



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEODÉZIE

INSTITUTE OF GEODESY

MĚŘENÍ ZMĚN NÁKLONU KONSTRUKCE ROZHLEDNY VELKÝ KOSÍŘ V DŮSLEDKU VLIVU NAMÁHÁNÍ VĚTREM

MEASUREMENT OF CHANGES IN THE INCLINATION OF THE VELKÝ KOSÍŘ LOOKOUT
TOWER STRUCTURE DUE TO THE INFLUENCE OF WIND STRESS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jonáš Smetana

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BUREŠ, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N0532A260001 Geodézie a kartografie
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav geodézie

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Jonáš Smetana
Název	Měření změn náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku vlivu namáhání větrem
Vedoucí práce	doc. Ing. Jiří Bureš, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2021
Datum odevzdání	27. 5. 2022

V Brně dne 30. 11. 2021

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

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

MICHALČÁK O., VOSIKA, O., VESELÝ, M, NOVÁK, Z. – Inženýrská geodézie I, Alfa a SNTL, 1985

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

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

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Podílejte se na měření změn náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku vlivu namáhání větrem. Popište použité metody, zpracujte naměřená data. Vyhodnoťte změny náklonu a interpretujte je s ohledem na nejistoty měření. Výsledky vhodně graficky znázorněte. V závěru zhodnoťte dosažené poznatky a výsledky.

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

Tato diplomová práce se zabývá problematikou posunů a přetvoření stavebních konstrukcí. Konkrétně se zabývá změnami náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku namáhání větrem. První část práce se zabývá teoretickým popisem problematiky posunů a přetvoření staveb a metodami měření. Druhá část představuje testování geodetické metody použité pro dynamické měření. Jedná se o nastavení totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu. Třetí část se poté zabývá samotným měřením rozhledny Velký Kosíř, vyhodnocením etapových měření, interpretací výsledků a porovnáním použitých metod. Tyto metody představuje polární metoda ve standardním režimu, polární metoda v režimu automatického sledování odrazného hranolu a měření dynamického zrychlení pomocí akcelerometru. Výsledný cíl představuje vyhodnocení náklonů za daných podmínek působení větru a vyhodnocení náklonu rozhledny z dlouhodobého hlediska.

KLÍČOVÁ SLOVA

Výškové stavby, rozhledna, vítr, měření posunů a přetvoření, dynamické měření, polární metoda

ABSTRACT

This thesis deals with the issue of displacements and deformations of building constructions. Specifically, it deals with changes in the inclination of the Velký Kosíř lookout tower structure due to wind stresses. The first part of the thesis deals with the theoretical description of the issue of displacements and deformations of buildings and measurement methods. The second part presents the testing of the geodetic method used for dynamic measurement. This involves setting up a total station in an automatic tracking mode and aiming a reflecting prism. The third part then deals with the actual measurement of the lookout tower Velký Kosíř, evaluation of the stage measurement, interpretation of the results and comparison of the methods used. These methods are represented by the polar method in a standard mode and the polar method in the mode of automatic tracking of the reflection prism and measurements of dynamic acceleration using accelerometer. The final objective is an evaluation of the inclinations under given wind conditions and the evaluation of the lookout tower inclination in the long term.

KEYWORDS

High-rise buildings, lookout tower, wind, measurement of displacements and deformations, dynamic measurement, polar method

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Jonáš Smetana *Měření změn náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku vlivu namáhání větrem*. Brno, 2022. 76 s., 42 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 změn náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku vlivu namáhání větrem* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 25. 5. 2022

Bc. Jonáš Smetana
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Měření změn náklonu konstrukce rozhledny Velký Kosíř v důsledku vlivu namáhání větrem* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 25. 5. 2022

Bc. Jonáš Smetana
autor práce

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu doc. Ing. Jiřímu Burešovi, Ph.D. za cenné rady, připomínky a konzultace. Děkuji také mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1 Úvod	10
2 Měření posunů a přetvoření staveb.....	11
2.1 Základní pojmy	12
2.2 Rozhledny z pohledu problematiky měření posunů a přetvoření.....	13
3 Metody měření posunů a přetvoření staveb	14
3.1 Geodetické metody.....	14
3.1.1 Geometrická nivelace	14
3.1.2 Hydrostatická nivelace	15
3.1.3 Trigonometrická metoda	15
3.1.4 Polární metoda.....	17
3.1.5 Metoda záměrné přímky.....	18
3.1.6 GNSS metoda	18
3.2 Negeodetické metody.....	19
3.2.1 Akcelerometry	19
3.2.3 Sklonoměr (inklinometr)	20
4 Měření změn náklonu rozhledny Velký Kosíř	21
4.1 Základní údaje o sledovaném objektu.....	21
4.2 Účel měření a volba metod měření	21
4.3 Experimentální testování využití totální stanice v režimu automatického sledování	24
4.3.1 Popis experimentálního testování.....	24
4.3.2 Realizace experimentálního testování	25
4.3.3 Parametry použitých totálních stanic.....	29
4.3.3.1 Topcon GT-1001.....	29
4.3.3.2 Trimble S9	32
4.3.4 Naměřená data a jejich vyhodnocení.....	34
4.3.4.1 Analýza kvantity objemu dat v časových úsecích	34
4.3.4.2 Analýza dat kontinuálního sledování v úhlové složce.....	37
4.3.4.3 Analýza dat kontinuálního sledování v délkové složce	41
4.3.4.4 Analýza dat kontinuálního sledování v souřadnicových složkách	43
4.3.4.5 Interpretace výsledků a poznatky z testovacího měření	48
4.4 Realizace měření náklonů rozhledny Velký Kosíř.....	51
4.4.1 Etapové měření s cílem zjištění dlouhodobého vlivu namáhání větrem	53
4.4.2 Etapové kontinuální měření s cílem zjištění okamžitého vlivu namáhání větrem	54
4.5 Vyhodnocení změn náklonů rozhledny a interpretace výsledků.....	55

4.5.1 Vyhodnocení dlouhodobého účinku namáhání větrem	55
4.5.2 Vyhodnocení okamžitého účinku namáhání větrem	59
4.5.2.1 Směr a rychlost větru	59
4.5.2.2 Vybuzené kmitání	59
4.5.2.3 Měření 0. etapy (22. 7. 2021).....	60
4.5.2.4 Měření 2. etapy (22. 4. 2022).....	63
4.5.2.5 Zhodnocení měření okamžitého účinku namáhání větru.....	66
5 Závěr	67
Seznam použitých zdrojů	68
Seznam použitých zkratk	71
Seznam obrázků.....	72
Seznam tabulek	74
Seznam grafů.....	75
Seznam příloh.....	76

1 Úvod

Měření posunů a přetvoření staveb představuje velmi široké spektrum oblastí. Hlavním důvodem realizace měření je zajištění stability a bezpečnosti staveb při samotné realizaci nebo v průběhu jejich životnosti. Tato práce se zabývá výškovými stavbami, které představují jednu část z celého spektra. U tohoto typu staveb hrají velkou roli přírodní vnější vlivy, které představuje zejména působení větru, deště, přímého slunečního záření nebo působení samotného složení vzduchu. V důsledku vnějších vlivů dochází k přetvořením (deformacím) staveb. Sledování těchto změn v čase je proto nezbytností.

Měření změn náklonu rozhledny Velký Kosíř umožňuje sledovat jeden konkrétní vnější dominantní vliv, který představuje vítr. Stavba rozhledny se nachází na stejnojmenném kopci v okrese Prostějov. Velký Kosíř (442 m n. m.) je nejvyšším vrcholem Hané. Umístění rozhledny na otevřeném vrcholu bez krytí vysokými stromy představuje konstrukci, která je namáhaná větrem bez jakékoliv ochrany. Z konstrukčních důvodů rozhledny je proto zapotřebí sledovat tento aspekt.

Rozhledna je veřejnosti zpřístupněna od června 2013. Její celková výška je 28,3 m, přičemž výška vyhlídkové plošiny je 25 m. Hlavním stavebním materiálem konstrukce umístěné na betonovém podstavci je dřevo s ocelovou výztuží. Dále je rozhledna chráněna plechovou střechou a částečně plechovými stěnami, které jsou v místech vedení kruhového schodiště po jejím obvodu. [1] [2]



Obrázek 1 – Rozhledna Velký Kosíř [doc. Bureš]

2 Měření posunů a přetvoření staveb

V současné době představuje měření posunů a přetvoření stavebních objektů nejen velmi široké spektrum aplikací, ale také jejich velmi náročné požadavky. Vysoká přesnost a spolehlivost výsledků, která je požadovaná se odráží v geodetických měřických postupech, které v některých případech mohou narážet na své limity. Geodetické metody jsou jedny z hlavních, avšak ne jediné možnosti pro detekování posunů a přetvoření. Vstupují zde také negeodetické metody z dalších oborů, které pracují na fyzikálních principech (např. zrychlení).

K posunu, tedy k přemístění celého objektu jako celku a k přetvoření (deformaci), tedy změně tvaru objektu, dochází zejména v důsledku působení vnějších vlivů. Mezi tyto vlivy mohou patřit dynamické provozní účinky (pohyb lidí nebo materiálu), změna hladiny podzemní vody, nová stavební činnost v okolí objektu, změna zatížení základové půdy (závisí na druhu půdy), poddolování, seismická činnost, vítr, déšť, přímé sluneční záření, teplota nebo vlhkost vzduchu. Uvedené vnější vlivy mohou způsobit kombinaci výše zmíněných důsledků, tedy posunu a přetvoření zároveň. Nutno uvést, že k posunům a přetvořením nemusí docházet pouze působením vnějších vlivů, ale také defektním materiálem nebo samotnou nevhodnou realizací stavby. [3] [4]

Cílem měření je detekovat rychlost a směr změn, tedy rozdíl mezi skutečnými a očekávanými hodnotami v čase. K tomu je nutné realizovat etapová měření (opakovaná měření). Volba intervalů mezi jednotlivými etapami měření vzniká v kooperaci geodeta a statika. Výsledkem této kooperace je projekt měření posunů. Tento projekt v sobě zahrnuje veškeré údaje charakterizující měření posunů a přetvoření. Je zde uveden účel měření, druh měření (etapové, kontinuální, periodické), průzkumy, očekávané posuny, potřebná přesnost měření, metody měření, časové plány, označení a zajištění bodů. Velikost časového úseku mezi jednotlivými etapami nebo intervaly u kontinuálních měření závisí na mnoha aspektech. Svou roli zde může hrát bezpečnostní riziko (např. u přehradních hrází) nebo mimořádnost samotné stavby (např. výškové stavby – Burj Khalifa).

U zmíněné mimořádné výškové stavby Burj Khalifa, která se v roce 2010 stala se svou výškou 828 m nejvyšší stavbou světa, musela být vhodně zhodnocena velikost intervalů mezi jednotlivými etapami. Už na počátku této stavby se odhadovalo, že klesne o 75 mm.

Dále zde hraje obrovskou roli vítr, který může dosahovat rychlosti až $240 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. To vše muselo být zohledněno v problematice posunů a přetvoření. [3] [5]

2.1 Základní pojmy

Základní pojmy upravuje norma ČSN 73 0401 Názvosloví v geodézii a kartografii. Níže uvedené pojmy se týkají problematiky určování změn prostorové polohy, rozměru a tvaru stavebních objektů vzhledem k základnímu nebo předcházejícímu měření.

Posun – prostorová změna polohy objektu vůči základní nebo předcházející etapě

Absolutní posun – posun vzhledem k soustavě vztažných bodů

Relativní posun – posun detekovaný v soustavě pozorovaných bodů

Svislý posun – svislá složka posunu

Vodorovný posun – vodorovná složka posunu

Sedání – svislý posun směrem dolů, jeho okamžitým stavem je sednutí

Zvedání – svislý posun směrem nahoru, jeho okamžitým stavem je zvednutí

Pootočení – otočení objektu jako celku kolem obecně položené osy otáčení

Náklon – odklon od svislice

Přetvoření – relativní změna tvaru stavebního objektu v rámci objektové soustavy vůči základní nebo předcházející etapě

Průhyb – přetvoření ve směru kolmém na převládající rozměr objektu

Pozorovaný bod – bod objektové soustavy osazený na sledovaném objektu

Vztažný bod – bod vztažné soustavy nacházející se mimo vliv sledovaného objektu

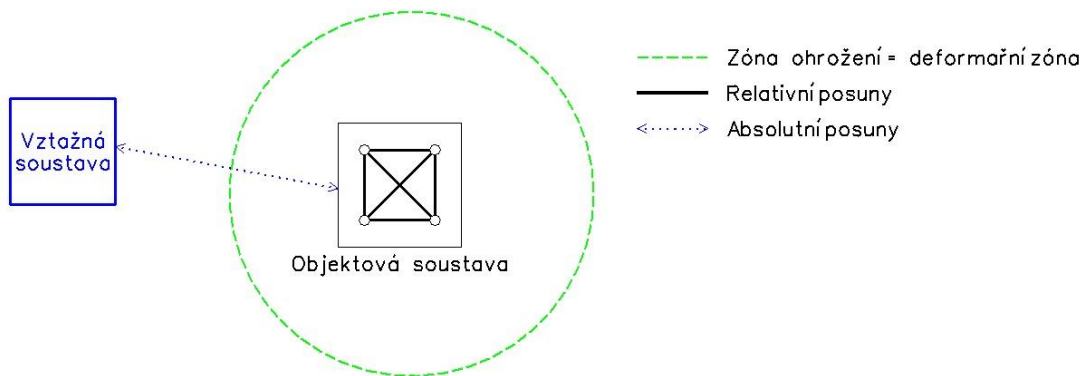
Etapová měření – opakované jednorázové zaměření bodů vztažné a objektové soustavy ve stanovených časových intervalech

Základní etapa (nultá) – počáteční etapa měření, většinou zaměřena s vyšší přesností

Celkový posun/přetvoření – vyhodnocení vůči základní etapě

Dílčí posun/přetvoření – vyhodnocení vůči předcházející etapě

Samotným měřením, vyhodnocením a interpretací výsledků se podrobně zabývá norma ČSN 73 0405 Měření posunů stavebních objektů. [3] [4] [6]



Obrázek 2 – Relativní a absolutní posuny [autor]

Deformační síť (zóna ohrožení) představuje oblast vlivu sledovaného objektu, kde nemůže být umístěna vztažná soustava pro relevantní měření absolutních posunů.

2.2 Rozhledny z pohledu problematiky měření posunů a přetvoření

Nejprve je nutno definovat rozhlednu z pohledu stavby a jejího účelu. Jedná se o stavbu, která je primárně určena pro účely rozhlížení se a její vyhlídková plošina se nachází minimálně ve výšce 4 m. Mezi další body definice rozhledny patří, že je přístupná široké veřejnosti. Tím se rozhledny odlišují od výškových budov, které jsou definované jako vícepatrové budovy, které jsou vysoké 35–100 m nebo budovy s neznámou výškou s 12–39 patry. Poté mrakodrapy jsou definovány jako vícepatrové budovy, jejichž výška je minimálně 100 m. [7] [8]

Z pohledu geometrie a interpretace výsledků posunů a přetvoření staveb ovšem můžeme na rozhledny a výškové budovy nahlížet podobně. Na všechny stavby tohoto typu zásadně působí přírodní vnější vlivy, zejména pak vítr a přímé sluneční záření. Naskytují se zde dva způsoby měření a vyhodnocování. Prvním způsobem je etapové měření, kdy v předem stanovených intervalech dojde k jednorázovému zaměření zájmového objektu. Sledujeme zde dlouhodobé změny v chování konstrukce. Pro zjištění okamžitých změn (např. právě v důsledku poryvu větru) je potřeba realizovat kontinuální měření, tedy určité časové sekvence záznamů. Při měření je dále nutné zaznamenávat fyzikální hodnoty velikosti a směru větru, teploty nebo vlhkosti vzduchu, aby mohly být změnám polohy přiřazeny tyto veličiny. [3]

3 Metody měření posunů a přetvoření staveb

Metody měření můžeme rozdělit na geodetické a negeodetické. Geodetické metody v problematice měření posunů a přetvoření nabízí širokou škálu možností. Závisí zde na druhu požadovaných vyhodnocovaných posunů (svislé nebo vodorovné) a na požadované přesnosti metody. Negeodetické metody se využívají zpravidla při určování relativních přetvoření, kde je požadována vysoká přesnost v řádu 0,01 mm, které geodetické metody nedosahují. [3]

3.1 Geodetické metody

3.1.1 Geometrická nivelace

Jedná se o metodu používanou pro měření svislých posunů. Z druhů geometrické nivelace ze středu se nejčastěji používají přesná nivelace (PN) a velmi přesná nivelace (VPN). [3]

Pro další specifikaci budeme u PN uvažovat požadavky odpovídající přesnosti pro měření nivelačních pořadů IV. řádu. Zásady měření a požadavky na vybavení jsou pro PN a VPN z části stejné. Patří zde např. požadavky na celistvé nivelační latě, postavení přístroje na pevném stativu nebo rozměření středu nivelační sestavy s přesností 0,1 m.

Požadavky na přesnost jsou u VPN vyšší než u PN. Z tohoto důvodu jsou některé zásady, postupy a požadavky na vybavení u VPN striktnější.

Přesná nivelace (PN)

- Měření nivelačního pořadu tam a zpět v rámci jednoho dne, v jinou denní dobu
- Maximální délka záměr 50 m
- Minimální výška záměr nad terénem 50 cm (ve svažitém terénu 25 cm u záměr nepřesahujících 20 m)
- Mezní rozdíl čtení dvou stupnic od laťové konstanty pro záměru činí 1 mm
- Celistvé nivelační latě (mohou být dřevěné)
- Přístroj nemusí být vybaven optickým mikrometrem

Velmi přesná nivelace

- Měření nivelačního pořadu tam a zpět v jiný den, v jinou denní dobu
- Maximální délka záměr 40 m

- Minimální výška záměry nad terénem 80 cm (ve svažitém terénu 40 cm u záměr nepřesahujících 20 m)
- Mezní rozdíl čtení dvou stupnic od laťové konstanty pro záměru činí 0,1 mm
- Celistvé nivelační latě s invarovou stupnicí
- Přístroj musí být vybaven optickým mikrometrem [9]

Přesnost samotné metody lze charakterizovat střední chybou jedné sestavy m_{hi} , která je u PN v rozmezí 0,6–1,6 mm a u VPN v rozmezí 0,1–0,3 mm. [10]

Pro možnost realizace vyrovnání je potřeba vždy měřit nadbytečná převýšení v rámci sítě. Z vyrovnání sítě získáme poté charakteristiky přesnosti, díky kterým můžeme stanovovat prokázané posuny na zvolené hladině významnosti. [3]

3.1.2 Hydrostatická nivelace

Jedná se o princip spojených nádob, který je založen na hydrostatickém tlaku. Z pohledu standardních geodetických měření se nejedná o běžně využívanou metodu. Její využití můžeme hledat ve speciálních aplikacích (např. v jaderných elektrárnách) pro realizaci automatizovaného kontinuálního měření. Přesnost metody dosahuje přesnosti VPN (viz kapitola 3.1.1). Naopak rozsah měření převýšení je velmi omezen, což je jednou z velkých nevýhod této metody. [3]

3.1.3 Trigonometrická metoda

Trigonometrická metoda umožňuje měření svislých i vodorovných posunů.

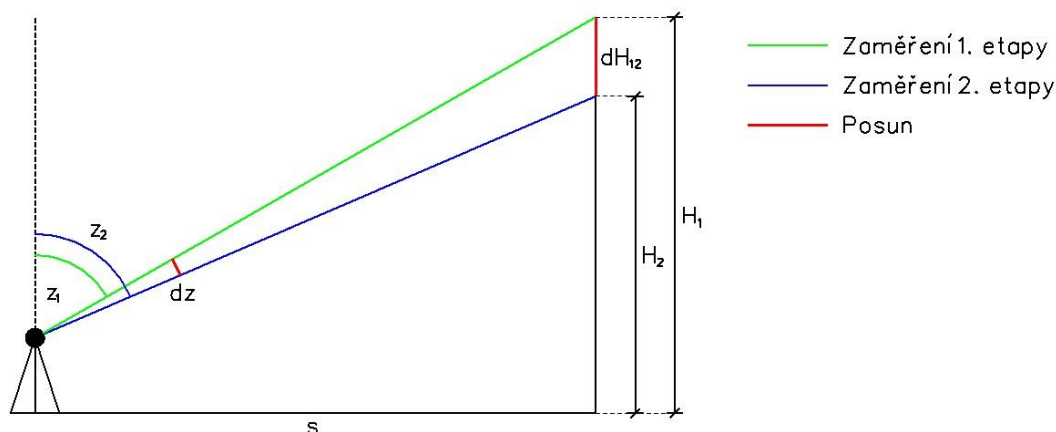
Využití trigonometrické metody u svislých posunů nedosahuje přesnosti geometrické nivelace (PN nebo VPN). Využívá se v případech, kdy nelze vhodně použít geometrickou nivelaci. Princip metody spočívá v opakovaném měření svislých (zenitových) úhlů. Předpokládá se, že vodorovná známá vzdálenost mezi cílem a stanoviskem realizovaným pilířem s nucenou centrací je neměnná. Tento předpoklad musí být zachován za další podmínky, kterou představuje zajištění stejné výšky horizontální klopné osy dalekohledu. Výpočet svislých posunů je poté přímo realizován z měřených svislých úhlů, viz vztah (1). Princip metody a zaměření dvou etap s vyznačením posunu znázorňuje Obrázek 3.

$$dH_{12} = -s * dz(1 + \cot^2 z) \quad (1)$$

$$dz = z_2 - z_1 \quad (2)$$

Přesnost metody můžeme určit na základě vztahu (3), kde $m_{dH_{12}}$ představuje střední chybu posunu. [11]

$$m_{dH_{12}}^2 = 2s^2(1 + \cot^2 z)^2 m_z^2 \quad (3)$$



Obrázek 3 – Trigonometrické měření svislých posunů [autor]

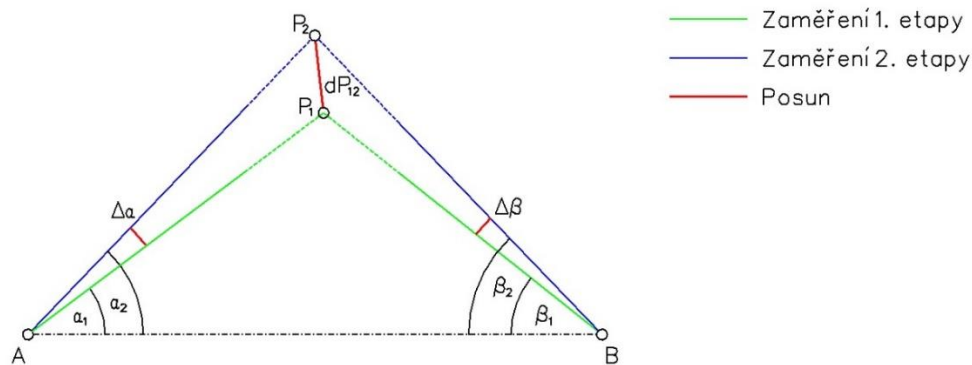
Využití trigonometrické metody u vodorovných posunů spočívá v metodě v protínání ze směrů. Velmi často tato metoda využívá místní souřadnicový systém. Princip metody a rozdíl zaměření mezi dvěma etapami s vyznačením posunu znázorňuje Obrázek 4. [3]

Na základě vztahů (4) a (5) lze určit relativní střední chyby jednotlivých souřadnic a na základě nich dále střední chybu posunu. Uvedené vztahy jsou pro variantu, kdy osa y místní souřadnicové soustavy je rovnoběžná se základnou z, která je tvořena spojnicí výchozích bodů A, B. [11]

$$m_x^2 = \frac{z^2(\sin^4 \alpha + \sin^4 \beta)}{\sin^4(\alpha - \beta)} m_\omega^2 \quad (4)$$

$$m_y^2 = \frac{z^2(\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha + \sin^2 \beta \cos^2 \beta)}{\sin^4(\alpha - \beta)} m_\omega^2 \quad (5)$$

Při kombinaci zaměření zenitových a vodorovných úhlů umožňuje tato metoda vyhodnocení obou složek (svislých a vodorovných) posunů zároveň.



Obrázek 4 – Trigonometrické měření vodorovných posunů [autor]

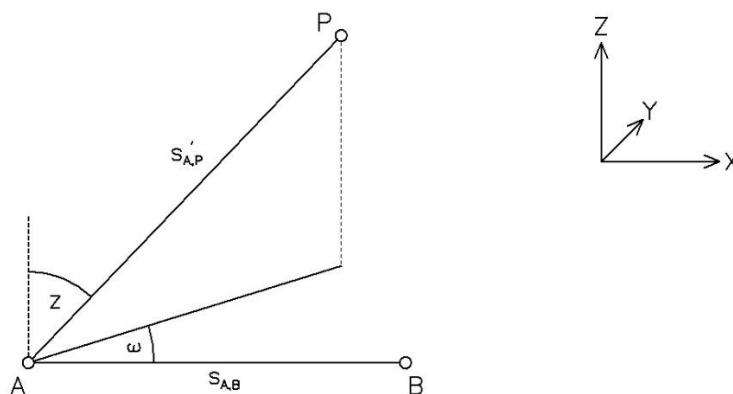
3.1.4 Polární metoda

V modifikaci prostorové polární metody se v současné době totálních stanic s elektronickými dálkoměry jedná o základní metodu současné geodézie. S možností trvalé instalace odrazných hranolů nebo samolepících odrazných terčů na sledované objekty nám tato metoda umožňuje měřit s vysokou přesností délky, vodorovné směry a zenitové úhly pro potřeby sledování posunů a přetvoření. Samotné měření se realizuje ve dvou polohách dalekohledu z důvodu eliminace osových chyb přístroje a v potřebném počtu skupin s ohledem na požadovanou přesnost. [12]

Polohovou přesnost určovaných bodů a následného posunu lze určit z relativních středních chyb jednotlivých souřadnic. Výpočet představují vztahy (6) a (7). [11]

$$m_x^2 = s^2 \sin^2 \omega * m_\omega^2 + \cos^2 \omega * m_s^2 \quad (6)$$

$$m_y^2 = s^2 \cos^2 \omega * m_\omega^2 + \sin^2 \omega * m_s^2 \quad (7)$$



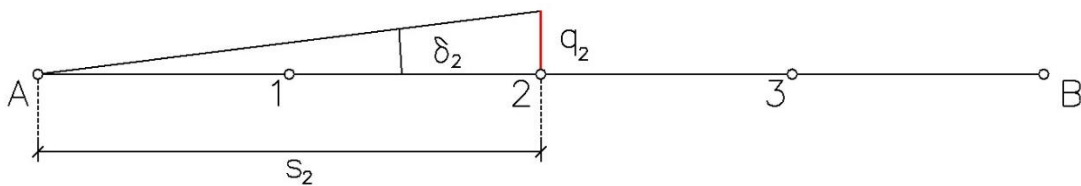
Obrázek 5 – Polární metoda [autor]

3.1.5 Metoda záměrné přímky

Jedná se o přesnou a technologicky jednoduchou metodu měření vodorovných posunů, konkrétně příčných posunů, tedy kolmých na zvolenou záměrnou přímku. Záměrná přímka je spojnice stanoviska a orientačního bodu. Odchýlení se od této spojnice poté tvoří příčné odchylky.

Výhodou této metody je možnost přímého určení příčných odchylek a jejich kontroly již během měření. Tento způsob je realizován pomocí stupnice umístěné na jednotlivých zaměřovaných bodech a přímé odečítání hodnoty pomocí teodolitu. Druhý způsob představuje nepřímé určení odchylek pomocí paralaktického úhlu δ a vzdálenosti s_i stanoviska a cíle (viz Obrázek 6). [3]

Využití této metody se může aplikovat např. u měření jeřábových drah pro určení vodorovných úchylek podélné střednice kolejnice v celkové délce dráhy. Mezní hodnoty jsou poté dány normami ČSN 73 5130 a ČSN EN 1090-2.



Obrázek 6 – Metoda záměrné přímky [autor]

3.1.6 GNSS metoda

Měření pomocí GNSS aparatury umožňuje dlouhodobě a kontinuálně měřit daný objekt bez nutnosti stálé obsluhy. Může se jednat o kontinuální sledování objektů, kde je vysoké bezpečnostní riziko, zde spadají např. přehradní hráze. Přesnost statické metody dosahuje v rozmezí 1–3 mm. [3]

Příkladem celé (statické) sítě GNSS aparatur sledující nepřetržitě deformace zemské kůry v Japonku je GEONET (GNSS Earth Observation Network System). Jedná se o síť více než 1300 stanic, které jsou od sebe vzdáleny v intervalech 20 km. Sledují deformace a posuny zemské kůry. Data jsou veřejně dostupná (po získání přístupu) ve formátu RINEX s intervalem záznamu 30 s. [13]

Dnešní rozšíření sítí referenčních stanic na území celých států umožňuje získávat data v reálném čase pomocí metody RTK. Mezi sítě referenčních stanic na území České republiky patří státní síť CZEPOS (od roku 2005), Trimble VRS Now, TopNet nebo GEOORBIT. Přesnost RTK metody dosahuje v poloze 30–50 mm. Pro detekci posunů v důsledku poddolování se může jednat o vhodnou metodu. [14]

3.2 Negeodetické metody

Negeodetické metody založené na fyzikálních základech představují velmi širokou škálu metod pro měření relativních přetvoření (deformací). Níže podrobněji uvedené metody jsou vybrány na základě vhodnosti jejich možného použití na měření změn náklonu rozhledny. Mezi další negeodetické metody patří laserové interferometry, tenzometry nebo číselníkové úchylkoměry. Většina negeodetických metod umožňuje permanentní monitoring stavebních objektů. [3] [12]

3.2.1 Akcelerometry

Jedná se o elektromechanické zařízení měřící zrychlení v reálném čase ve zvoleném souřadnicovém systému. Překonanou vzdálenost, myšleno změnu polohy, lze určit nepřímo pomocí integrace. Ze zrychlení lze určit okamžitou rychlost a z rychlosti poté vzdálenost v jednotlivých osách, pro nás určovanou polohu v souřadnicovém systému. Jedná se o dvojitou integraci podle času, kterou popisují vztahy (8) a (9).

$$v(t) = \int a(t) * dt + v_0 \quad (8)$$

$$x(t) = \int v(t) * dt + x_0 = \iint a(t) * dt * dt + v_0 * t + x_0 \quad (9)$$

v_0 – rychlost v čase počátku integrace

x_0 – poloha na počátku integrace

a – zrychlení v časovém okamžiku t

v – rychlost v časovém okamžiku t

x – vzdálenost (pozice), kterou sledovaný bod za danou dobu urazil

Šířka pásma u akcelerometrů udává množství spolehlivých záznamů zrychlení za 1 s. U pomalu pohybujících se sledovaných bodů je dostačující 50 Hz, u chvění nebo rychle se pohybujících strojů je potřeba šířka pásma v řádu stovek Hz. Přesnost výsledných údajů závisí na citlivosti a tím na velikosti změny signálu.

Využití akcelerometrů pro potřeby měření posunů, zejména náklonů, je pouze jednou z mnoha aplikací. Dále jsou akcelerometry využívány pro vyrovnávání robotů nebo detekci nehod u automobilů. [15] [16]

3.2.3 Sklonoměr (inklinometr)

Sklonoměr umožňuje v reálném čase kontinuálně měřit náklony stavební konstrukce. Při detekci mezních hodnot náklonu mohou systémy automaticky informovat o vzniklé situaci. [17]

Příkladem sklonoměru může být senzor náklonu Nano Triaxial Tilt Sensor od společnosti Senceive. Jedná se o tříosý senzor náklonu, který se může upevnit na konstrukci pomocí šroubů, magnetu nebo lepidla do jakékoliv výchozí polohy. Rozlišovací schopnost činí $0,0001^\circ$ ($0,00175$ mm/m) s opakovatelností $\pm 0,0005^\circ$ ($\pm 0,0087$ mm/m). [18]



Obrázek 7 – Senzor náklonu Senceive [18]

4 Měření změn náklonu rozhledny Velký Kosíř

4.1 Základní údaje o sledovaném objektu

Rozhledna je situovaná na vrcholu stejnojmenného vrcholu Velký Kosíř (442 m n. m.). Samotný vrchol není zalesněný a v širším okolí po klesajících svazích jsou vysázeny nové stromy, které v současné době dosují výšky přibližně 4 m. Tyto stromy svou velikostí a situováním netvoří ochranu rozhledny proti působení větru.

Současná rozhledna stojí na místě původní dřevěné rozhledny z roku 1927, která byla v roce 1939 odstraněna z důvodu špatného technického stavu.

Nově vybudovaná rozhledna otevřená v roce 2013 má tvar komolého kužele, který tvoří dřevěná konstrukce s ocelovou výztuží. Tato konstrukce je posazena na betonovém podstavci, který je obložen kamenem. V tomto podstavci je umístěno základní zázemí rozhledny přístupné kruhovým vstupem z jihozápadního směru.

Výstup na vyhlídkovou plošinu ve výšce 25 m je nejprve tvořen otevřeným schodištěm po obvodu betonového podstavce. Dále jej tvoří kryté dřevěné schodiště po obvodu dřevěné konstrukce, které je chráněno falcovaným plechem z vnější strany rozhledny a ze shora. V plechových stěnách schodiště jsou kruhová okna, která umožňují návštěvníkům výhledy již při výstupu. Celkový počet schodů na vyhlídkovou plošinu (včetně betonového schodiště) je 158. [2]



Obrázek 8 – Detail na kamenem obložený podstavec rozhledny [autor]

4.2 Účel měření a volba metod měření

Z technických důvodů byla rozhledna Velký Kosíř uzavřena v období od února 2017 do června 2018. V tomto období byly odstraněny konstrukční závady schodiště pomocí instalace podpěr. Další úpravy po tomto uzavření představovalo vyztužení celé konstrukce, ošetřování prasklin ve dřevě a vytvoření ochranných stříšek u patek

na betonovém podstavci. Tyto ochranné stříšky mají za cíl bránit zatékání vody a pronikání vlhkosti do kovových patek, ve kterých jsou upevněny stěžejní dřevěné nosné trámy. Účel měření představuje sledování změn a stability konstrukce (po úpravách) v důsledku vlivu namáhání větrem. Z dlouhodobého hlediska se jedná i o další vnější vlivy, které nelze odfiltrovat. Mezi další působící vnější vlivy patří zejména vliv přímého slunečního záření a deště na konstrukci rozhledny. [19]



Obrázek 9 – Ochranná stříška patek [autor]

Pro detekci změn z dlouhodobého hlediska lze použít jednorázová etapová měření v daných intervalech konvenčními geodetickými metodami. Dále je v textu tato metoda označována jako statické měření. Tato metoda nám umožňuje stanovovat posuny a deformace ke konkrétnímu datu v čase, ale neumožňuje nám sledovat změny v důsledku okamžitého působení větru na konstrukci rozhledny. Pro detekci těchto okamžitých změn je potřeba využít jinou metodu umožňující kontinuální záznam dat.

Dnešní totální stanice nabízejí možnost nastavení automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu. Umožňují tedy pozorovat a zaměřovat odrazný hranol v pohybu. Z tohoto pohledu se může jednat o vhodnou metodu pro sledování a zaměřování odrazného hranolu upevněného ke konstrukci rozhledny a pohybujícího se spolu

s konstrukcí v důsledku působení větru. Dále je tato metoda v textu práce označována jako dynamické měření.

Jelikož nejsou k dispozici dostatečné poznatky ohledně aplikace totální stanice v nastavení automatického sledování a zaměřování odrazné hranolu v konkrétním případě, byla nutnost tuto metodu otestovat a stanovit její vhodnost pro daný případ. Touto problematikou se zabývá celá nadcházející kapitola 4.3.

V praxi se pro účely dynamického měření výškových staveb (rozhleden, komínů, ...) využívají velmi často akcelerometry nebo jiná zařízení pracující na fyzikálních principech. Pro účely měření rozhledny Velký Kosíř je proto použití akcelerometrů jako další metody dynamického měření vhodnou variantou pro relevantní porovnání dat získaných pomocí totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu.

4.3 Experimentální testování využití totální stanice v režimu automatického sledování

Pro účely dynamického (kontinuálního) měření bylo potřeba realizovat testování polární metoda v nastavení totální stanice pro automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu. Cílem je demonstrovat cyklicky opakující se pohyb odrazného hranolu, který má představovat pohyb rozhledny v důsledku namáhání větrem. Samotná podstata testování metody spočívá v tom, zda totální stanice v nastavení automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu dokáže zachytit jeho okamžitý pohyb při poryvu větru.

Pro ilustrativní vykreslení si představme situaci, kdy je naprosté bezvětří a rozhledna není ovlivňována větrem ani ostatními vnějšími vlivy, které může představovat pohyb osob nebo další (teplo, pohyb podloží, ...). Totální stanice zaznamenává v režimu automatického sledování hodnoty, které jsou neměnné z pohledu změn polohy odrazného hranolu. Působí zde pouze vliv nejistoty měření a vliv měřických chyb. V tento moment dojde k náhlé změně polohy odrazného hranolu v důsledku vnějších vlivů, který v našem případě představuje především vítr o dané intenzitě a směru. Tento moment působení vnějších vlivů je rozhodujícím a hlavním momentem celého testování dané metody.

4.3.1 Popis experimentálního testování

Odrasný hranol byl připevněn na speciálně vyhotovenou aparaturu (viz Obrázek 10), která umožňovala realizovat kruhový cyklicky opakující se pohyb, u něhož lze regulovat frekvenci. Analogie s pohybem odrazného hranolu umístěného na rozhledně, zde spočívala v návratu nebo průchodu odrazného hranolu počáteční polohou. Ačkoliv na rozhledně je pohyb sledovaného bodu kývavý a při testování metody byl kruhový, tak v kontextu podstaty testování tento aspekt nehraje roli. Podstatou je zachycení tohoto pohybu.

Celá aparatura byla tvořena z hřídele upevněné ke kovové konstrukci na dřevěném podstavci. Na jedné straně hřídele byla umístěna kruhová násada umožňující připevnění odrazného hranolu tak, aby mohl vykonávat kruhový pohyb. Na opačné straně hřídele byla umístěna klika, která umožňovala manuálně realizovat potřebnou frekvenci.

Správnost frekvence v jednotlivých sekvencích byla stanovovaná metronomem, který určoval rytmus a kontrolována kalibrovaným otáčkoměrem Testo 470. Otáčkoměr snímal štítek umístěný na kruhové násadě, na které byl upevněný odrazný hranol (Obrázek 11).

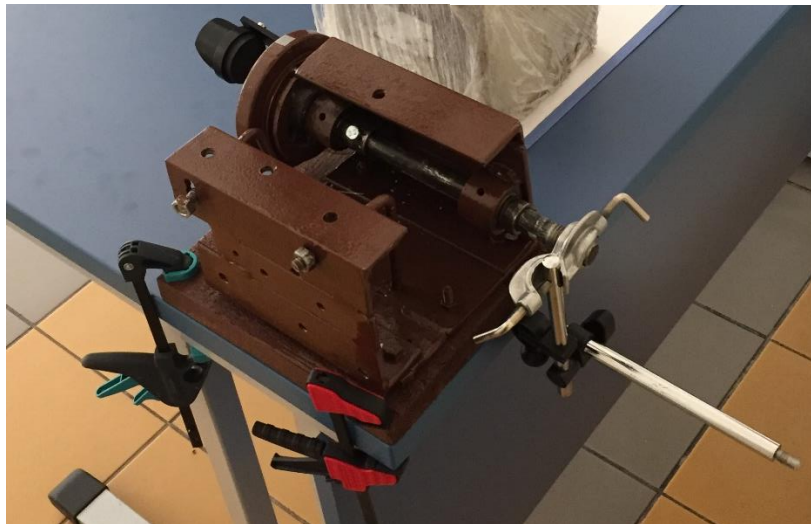
Sekvence představovaly jednotlivé časové úseky měření. Přičemž jednotlivé sekvence se odlišovaly frekvencí pohybu odrazného hranolu umístěného na aparatuře.



Obrázek 10 – Aparatura testování metody [autor]



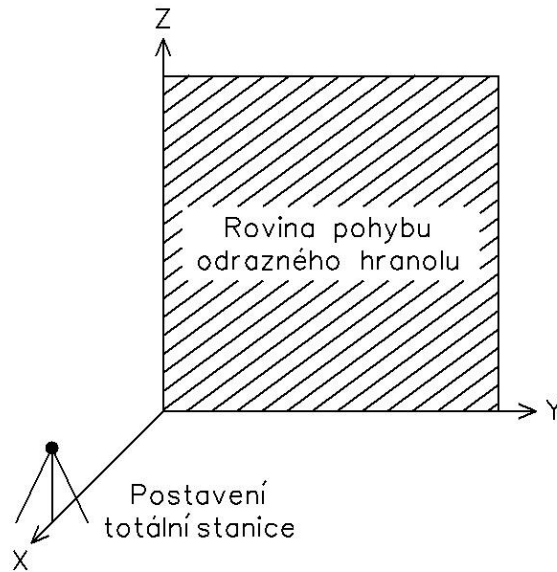
Obrázek 11 – Detail snímání otáček [autor]



Obrázek 12 – Mechanismus kliky [autor]

4.3.2 Realizace experimentálního testování

Bylo realizováno celkově 9 sekvencí. Před každou započatou sekvencí byla zaměřena 1 perioda (1 otočka odrazného hranolu po dráze kružnice) s velmi nízkou frekvencí (v řádu $f = 0,03$ Hz) tak, aby mohla být posléze vykreslena referenční dráha odrazného hranolu pro každou jednotlivou sekvenci zvlášť. To bylo realizováno z toho důvodu, aby každá sekvence měla svůj vlastní souřadnicový systém, v případě nepředvídatelného posunu aparatury mezi jednotlivými sekvencemi. Souřadnicový systém je tvořen místní soustavou. Osa X představuje spojnici stanoviska a odrazného hranolu. Rovina os Y a Z tvoří rovinu dráhy pohybu odrazného hranolu.



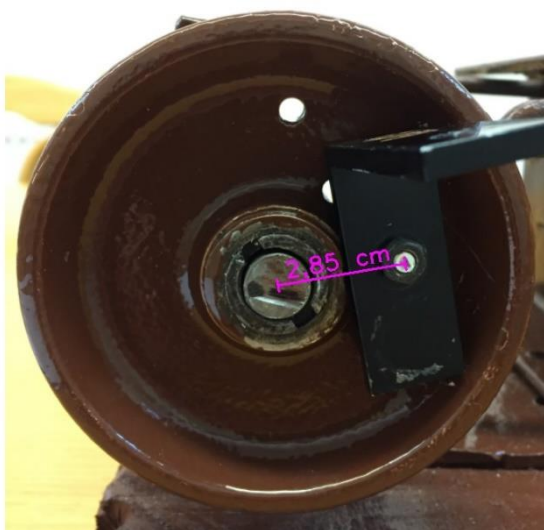
Obrázek 13 – Rovina pohybu odrazného hranolu [autor]

V jednotlivých sekvencích byla udržována po celou dobu měření konstantní, předem stanovená frekvence (počet otáček za minutu). Přičemž měření dané sekvence bylo započato vždy až po dosažení stanovených otáček. To z toho důvodu, aby se mohlo následně vyhodnotit, zda totální stanice v režimu automatického sledování a měření odrazného hranolu dokáže v moment započetí měření reagovat na okamžitou změnu polohy cíle v dané frekvenci.

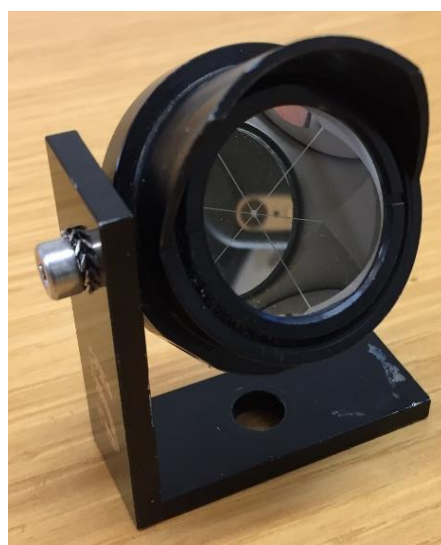
V každé následující realizované sekvenci byla zvýšena frekvence, resp. počet otáček za minutu. Nejprve vždy o 10 otáček za minutu v rozmezí 0,17 Hz až 1 Hz a poté od frekvence 1 Hz o 20 otáček za minutu až po frekvenci 2 Hz. Přehled sekvencí je uveden v Tabulce 1. Dále Tabulka 1 obsahuje údaje o úhlové a obvodové rychlosti odrazného hranolu při dané frekvenci. Obvodová rychlost je v tomto ohledu velmi zavádějící a nemůžeme její hodnotu relevantně porovnávat v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$. Poloměr otáčení odrazného hranolu kolem osy hřídele byl pouze 2,85 cm (viz Obrázek 14), a to z důvodu přiblížení se maximálnímu očekávanému odklonu rozhledny Velký Kosíř od svislice v hodnotách ± 20 mm při namáhání velmi silným větrem.

Tabulka 1 – Přehled sekvencí experimentálního testování

Sekvence	RPM	f [Hz]	ω [rad*s ⁻¹]	v [m*s ⁻¹]	v [km*h ⁻¹]
1	10	0,17	1,05	0,030	0,107
2	20	0,33	2,09	0,060	0,215
3	30	0,50	3,14	0,090	0,322
4	40	0,67	4,19	0,119	0,430
5	50	0,83	5,24	0,149	0,537
6	60	1,00	6,28	0,179	0,645
7	80	1,33	8,38	0,239	0,860
8	100	1,67	10,47	0,298	1,074
9	120	2,00	12,57	0,358	1,289

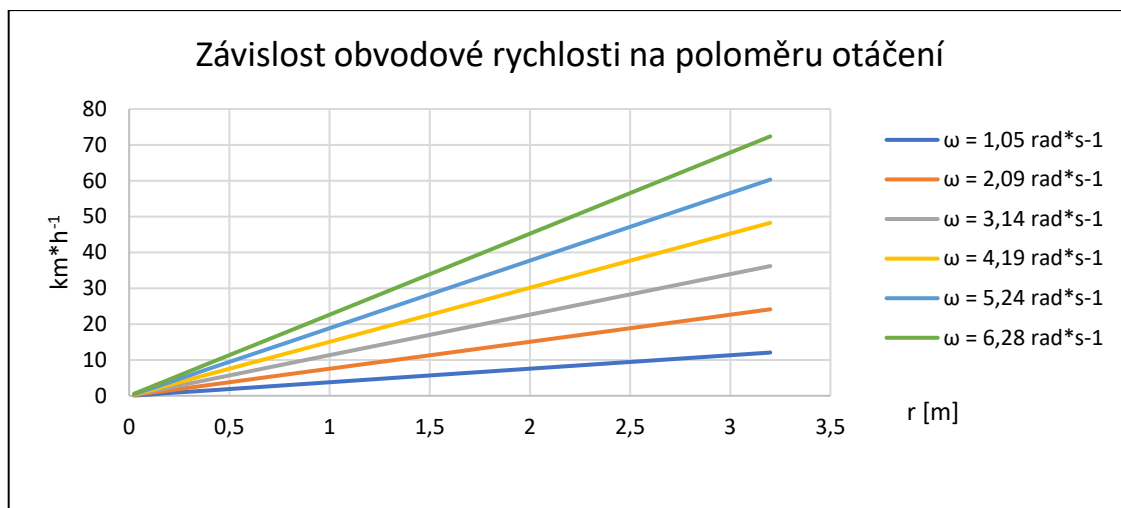


Obrázek 14 – Poloměr otáčení [autor]



Obrázek 15 – Odrazný hranol [autor]

Pro úplné vykreslení této situace uvedme příklad, že by vzdálenost středu odrazného hranolu a středu hřídele byla 2,85 m. Při frekvenci 2 Hz, jak tomu bylo při testování metody, by odrazný hranol v tomto případě dosahoval obvodové rychlosti 128,93 km*h⁻¹. V našem případě, jak je uvedeno v Tabulce 1 bylo dosaženo při frekvenci 2 Hz obvodové rychlosti 1,29 km*h⁻¹. To reprezentuje zásadní vliv závislosti obvodové rychlosti na poloměru otáčení se zachováním stejné úhlové rychlosti. Závislost obvodové rychlosti na poloměru otáčení má lineární průběh (viz Graf 1). Pro vykreslení grafu závislosti obvodové rychlosti na poloměru otáčení byly použity úhlové rychlosti aplikované při testování metody v sekvencích 1–6. Poloměr otáčení byl zvolen v rozmezí od 2,5 cm (reprezentující řádově pohyb rozhledny) až po poloměr 3,2 m. Tabulka 2 znázorňuje tuto závislost číselně. V tomto ohledu nelze dosažené obvodové rychlosti při testování metody srovnávat s pohybem automobilu, stavebního stroje či samotné chůze.



Graf 1 – Závislost obvodové rychlosti na poloměru otáčení

Tabulka 2 – Závislost obvodové rychlosti na poloměru otáčení a úhlové rychlosti

r [m]/v [km·h ⁻¹]	ω ₁	ω ₂	ω ₃	ω ₄	ω ₅	ω ₆
0,025	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,05	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1,1
0,1	0,4	0,8	1,1	1,5	1,9	2,3
0,2	0,8	1,5	2,3	3,0	3,8	4,5
0,4	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0
0,8	3,0	6,0	9,0	12,1	15,1	18,1
1,6	6,0	12,1	18,1	24,1	30,2	36,2
3,2	12,1	24,1	36,2	48,3	60,3	72,4

Pokud převedeme tuto problematiku z pohledu totální stanice a její rychlosti rotace kolem vertikální točné osy (resp. klopné osy dalekohledu), umožňuje nám to lépe porovnat, jak rychle pohybující se cíl dokáže totální stanice sledovat a zaměřovat. Dle výrobce totální stanice Topcon GT-1001 použité při realizaci testování metody umožňuje dosahovat v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu maximální rychlosti rotace 20° za 1 s kolem svých os. To odpovídá úhlové rychlosti 0,35 rad·s⁻¹. V takové situaci na příkladovou vzdálenost 50 m stanoviska a pohybujícího se cíle (např. stavebního stroje) umožňuje vykonávat rychlost daného cíle 62,83 km·h⁻¹, aby jej totální stanice mohla stále sledovat a zaměřovat. [20]

Výpočty týkající se úhlové a obvodové rychlosti byly realizovány ze vztahů (10) a (11). Přičemž úhlová rychlost vyjadřuje podíl úhlové dráhy, kterou opíše průvodič za danou dobu (periodu f), oproti tomu obvodová rychlost vyjadřuje rychlost hmotného bodu po dané dráze. [21]

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad} * \text{s}^{-1}] \quad (10)$$

$$v = \omega r \text{ [m} * \text{s}^{-1}] \quad (11)$$

Celé testování metody bylo realizováno ve dvou provedeních, přičemž popsany technologický postup byl totožný, stejně tak frekvence a počet sekvencí. Rozdíl provedení byl ve vzdálenosti stanoviska a cíle, aby mohl být vyhodnocen také tento aspekt. V prvním provedení byla vzdálenost stanoviska a cíle 8 m. Druhé provedení vyžadovalo možnost delší záměry, která v našem případě činila 46 m. Obě provedení byly realizovány uvnitř budovy B Fakulty stavební Vysokého učení technického v Brně umožňující realizace dlouhé záměry a zároveň prostředí eliminující vnější vlivy.

4.3.3 Parametry použitých totálních stanic

Laboratorní pokus byl souběžně realizován dvěma totálními stanicemi. Měření vždy probíhalo ve stejných časových intervalech tak, aby posléze mohla být vyhodnocena a porovnána data dosažena nezávisle dvěma měřidly za totožných podmínek. Totálními stanicemi byly Topcon GT-1001 a Trimble S9.

4.3.3.1 Topcon GT-1001

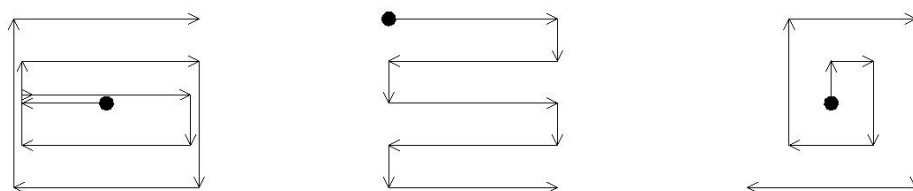
Totální stanice Topcon GT-1001 ze série GT-1000 disponuje funkcí automatického sledování odrazného hranolu. Funkce je nazývána jako Auto Tracking. Oproti tomu modely totální stanice série GT-500 touto funkcí nedisponují, obsahují pouze funkci automatického zaměření (Auto Pointing).

Série GT-1000 je tvořena několika dílčími modely, kterými jsou GT-1001, GT-1002, GT-1003, GT-1005. Poslední číslice v názvu totální stanice udává přesnost měření úhlů. U modelu GT-1001 se jedná o 1'' (0,0003 g). U dalších modelů analogicky 2''(0,0006g), 3'' (0,0009 g) a 5'' (0,0015 g). Stejný princip funguje také u modelů série GT-500, kterými jsou GT-502, GT-503 a GT-505. Přesnost měření délek u série GT-1000 je 1 mm + 2 ppm ve standardním režimu a 5 mm + 2 ppm v režimu Auto Tracking. [20] [22] [23]

Funkce automatického sledování Topcon GT-1001

Funkcí automatického sledování (Auto Tracking) totální stanice vyhledává a zaměřuje cíl, přičemž cíl sleduje a zaměřuje také při přesunu mezi jednotlivými body. To umožňuje použít tuto funkci při pohybujícím se cíli.

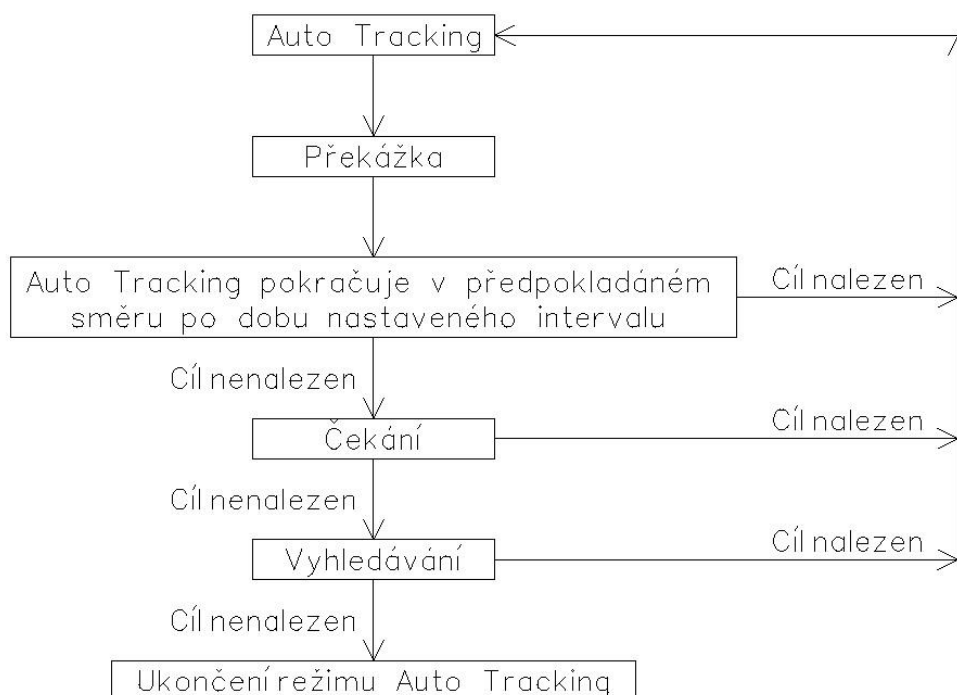
Před samotným započítím automatického sledování je potřeba vyhledat cíl, aby byl v zorném poli dalekohledu. Totální stanice automaticky vyhledává cíl, dle předem stanovených schémat vyhledávání (viz Obrázek 16). Přičemž v každém schématu jsou realizovány 2 pokusy vyhledání cíle, pokud se tak nestane úspěšně, vrátí se totální stanice do bodu, kde došlo ke ztrátě cíle nebo bylo započato vyhledávání. Poté je nutno cíl vyhledat automaticky, pomocí kolimátoru.



● Počáteční bod vyhledávání

Obrázek 16 – Schémata automatického vyhledávání cíle [22]

V průběhu měření v režimu Auto Tracking může dojít k situaci, kdy je odrazný hranol ztracen. Příčinou může být překážka tvořena vegetací, projetím nákladního automobilu nebo průchodu osob skrze spojnici totální stanice a odrazného hranolu. V tomto případě přístroj předpokládá směr, kterým se cíl pohybuje a automaticky pokračuje dále v režimu Auto Tracking. Tento předpokládaný pohyb je časově omezen, jehož interval lze nastavit přímo v totální stanici. Pokud v rozmezí nastaveného časového intervalu dojde k opětovnému nalezení cíle, funkce Auto Tracking pokračuje dále, bez změny. V opačném případě, kdy cíl není nalezen v nastaveném časovém intervalu na základě předpokládaného směru pohybu, dojde k vyobrazení hlášky cíl ztracen. Následuje čekání na hranol (interval čekání lze měnit v nastavení), vyhledávání (dle schémat) a ukončení režimu Auto Tracking v případě negací všech pokusů o získání navázání mezi totální stanicí a odrazným hranolem. Krok čekání lze nastavit také bez omezení, v tomto případě se dalekohled totální stanice nepohne do doby, dokud se odrazný hranol opět nedostane do jeho zorného pole. Poté totální stanice automaticky spustí režim Auto Tracking. [22]



Obrázek 17 – Algoritmus rozhodování v režimu Auto Tracking [22]

Samotný princip komunikace mezi totální stanicí a odrazným hranolem spočívá v technologii UltraTrack, která je založena na optickém snímání. Dále udržení sledování odrazného hranolu zaručují UltraSonic motory. Čas měření jednotlivých záznamů v režimu Tracking na odrazný hranol je 0,4 s. Topcon GT-1001 umožňuje v nastavení konfigurace nastavit tempo až 5 záznamů veličin za 1 s. Při testování metody byly nastaveny 4 záznamy za 1 s. [20] [22] [23] [24]

Excentricita záměrného kříže a odrazného hranolu Topcon GT-1001

Během měření sekvencí bylo v okuláru dalekohledu znatelné, že záměrný kříž totální stanice není totožný se středem pohybujícího se zaměřovaného odrazného hranolu. Bylo zde patrné stálé nekonstantní odsazení. Offset mezi středem cíle a středem záměrného kříže dalekohledu je dopočítáván pomocí zpracování obrazu. Na základě tohoto dopočtu je korigována měřená hodnota úhlů.

Aby dopočet a korigování zaměřených hodnot fungovalo správně je nezbytné, aby byla správně nastavena hodnota odsazení polohy senzoru obrazu ve vztahu k záměrnému kříži dalekohledu. Toto nastavení senzoru je vhodné realizovat před každým měřením, které vyžaduje přesné výsledky v režimu automatického sledování. Postup nastavení spočívá v umístění totální stanice a cíle (odrazného hranolu) v horizontálním směru

ve vzdálenosti zhruba 50 m. Následně v nastavení konfigurace a konstantách přístroje můžeme po manuálním zaměření nastavit aktuální konstantu vztahu senzoru obrazu a záměrného (nitkového) kříže. [22]



Obrázek 18 – Nastavení konfigurace [22]



Obrázek 19 – Konstanty přístroje [22]



Obrázek 20 – Ilustrativní excentricita odrazného hranolu [autor]

4.3.3.2 Trimble S9

Totální stanice Trimble S9 je dostupná ve dvou provedeních úhlové přesnosti (0,5'' nebo 1'') a ve dvou provedeních dálkoměrů DR Plus a DR HP (High Precision) EDM. Totální stanice Trimble S9 použitá při testování metody disponovala dle certifikátu úhlovou přesností 1'' (3^{cc}) a dálkoměrem DR HP s přesností měření vzdáleností 1 mm + 1 ppm na odrazný hranol (v hranolovém režimu) a v bezhranolovém režimu (Direct Reflex) 3 mm + 2 ppm. V režimu Tracking dosahuje přesnosti měření délek na odrazný hranol 5 mm + 2 ppm a v bezhranolovém režimu 10 mm + 2 ppm. [25] [26] [27]

Funkce automatického sledování Trimble S9

Funkce automatického sledování odrazného hranolu u totální stanice Trimble S9 zajišťuje technologie MultiTrack. Standardní doba vyhledávání odrazného hranolu je 2-10 s, záleží ovšem na velikosti zorného pole. Přesné a automatické cílení zajišťuje funkce Autolock, která cíl pomyslně ve svém hledání uzamkne. Trimble S9 disponuje technologií FineLock, která je užitečná při situaci, kdy se nacházejí dva odrazné hranoly blízko sebe v zorném poli dalekohledu. [27] [28]

Čas měření jednotlivých záznamů v režimu Tracking na odrazný hranol je 0,4 s, stejně jako u totální stanice Topcon GT-1001. Ale Trimble S9 umožňuje záznam sledování až ve frekvenci 10 Hz, tedy 10 záznamů veličin za 1 s. To je oproti totální stanici Topcon GT-1001 dvojnásobný možný počet uložených záznamů. Při realizaci testování metody bylo u totální stanice Trimble S9 nastaveno právě 10 záznamů za 1 s.

Excentricita záměrného kříže a odrazného hranolu Trimble S9

Při automatickém sledování a cílení na odrazný hranol může při použití funkce Autolock dojít k situaci, kdy v okuláru dalekohledu nejsou totožné záměrné osy, tedy že záměrný kříž totální stanice není totožný se středem zaměřovaného odrazného hranolu. Stejně jako v případě totální stanice Topcon GT-1001 se nemusí jednat o zásadní problém, protože optická osa dalekohledu i odrazného hranolu mají svá vlastní kolimační data, ovšem je podstatné, aby byl realizován kolimační test pro obě optické osy.

Správné zacílení lze zkontrolovat následujícím testem. Nejprve je nutno zacílit na odrazný hranol ručně a odečíst úhlové hodnoty vertikálního úhlu a horizontálního směru. Následně se zapnutou funkcí Autolock nechat totální stanici se automaticky uzamknout na totožném cíli (odrazném hranolu) a realizovat odečtení úhlových hodnot jako v prvním kroku. Poté je nutno porovnat úhlové hodnoty vertikálního úhlu a horizontálního směru zaměřené manuálně a automaticky. Pokud se hodnoty významně liší je nutno provést kolimaci obou optických os. [29]



Obrázek 21 – Topcon GT -1001 [autor]



Obrázek 22 – Trimble S9 [autor]

4.3.4 Naměřená data a jejich vyhodnocení

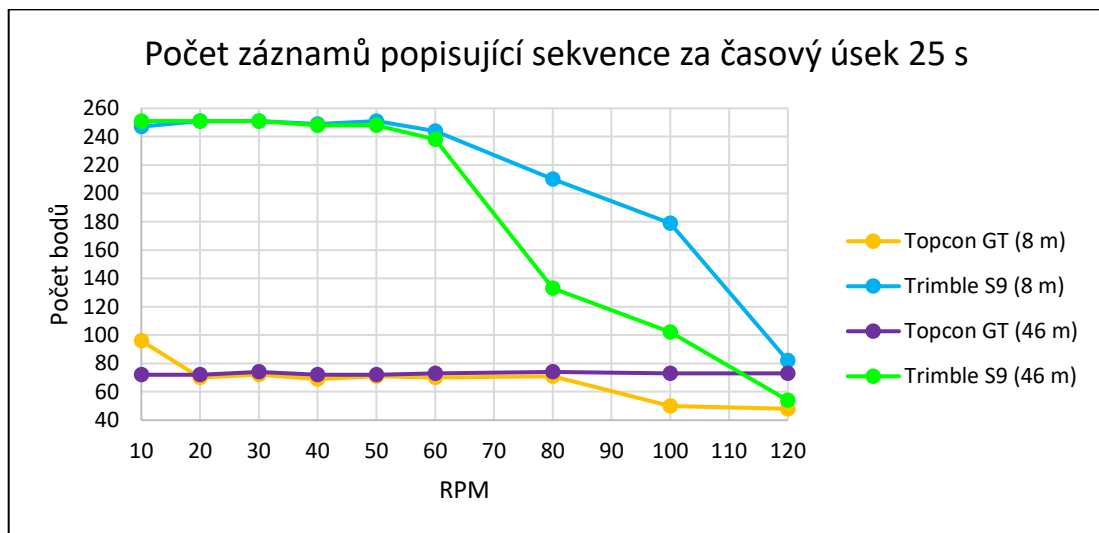
Naměřená data z laboratorního pokusu tvoří celkově 36 ekvivalentních sad. Každá ze dvou totálních stanic zaměřila 9 sekvencí na vzdálenost 8 m a 9 sekvencí na vzdálenost 46 m, to celkově tvoří 36 sad dat. Data jsou tvořena přímo měřenými veličinami, které představuje vodorovný směr, vertikální úhel, délka, čas a souřadnice X, Y, Z, které totální stanice automaticky počítaly v místních souřadnicových systémech.

4.3.4.1 Analýza kvantity objemu dat v časových úsecích

Čas v rámci testování tvoří základ, na který jsou navázána ostatní data. Nejprve bylo nutno synchronizovat veškeré časové záznamy do stejných absolutně navázaných úseků. Tato synchronizace byla nezbytná pro možnost porovnání souběžně nezávisle získaných dat ze dvou použitých totálních stanic. Pro další vyhodnocování byly zvoleny časové úseky jednotlivých sekvencí v délce trvání 25 s.

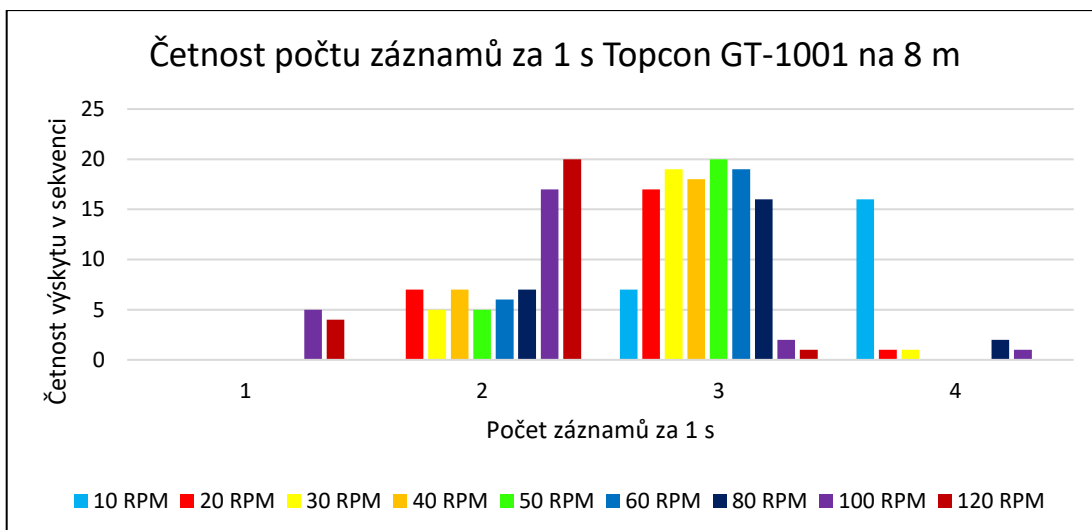
Celkový objem dat ovšem není z pohledu času dán pouze velikostí zvoleného časového úseku sekvencí, ale také množstvím záznamů za jednotku 1 s. U totální stanice Topcon GT-1001 byly nastaveny 4 záznamy za 1 s (vyjma sekvence 10 RPM na vzdálenost 8 m, kde bylo nastaveno 5 záznamů za 1 s) a u Trimble S9 bylo nastaveno 10 záznamů za 1 s. Při délce trvání sekvence 25 s by měly jednotlivé sady dat u Topcon GT-1001 obsahovat 100 záznamů a u Trimble S9 250 záznamů. Skutečné hodnoty záznamů za časový úsek 25 s dokládá Graf 2. Zásadní roli zde nehraje vzdálenost

stanoviska a cíle, ale frekvence otáček odrazného hranolu. U totální stanice Trimble S9 od 60 otáček za minutu znatelně klesá počet záznamů popisující dráhu pohybujícího se cíle. Tento pokles nastal u obou realizovaných vzdáleností totožně. Oproti tomu u totální stanice Topcon GT-1001 je průběh počtu záznamů daleko vyrovnanější, dokonce u vzdálenosti 46 m lze říci, že je konstantní po všechny zvolené frekvence. Ale záznamy v absolutním počtu nedosahují řádově nastavených záznamů.

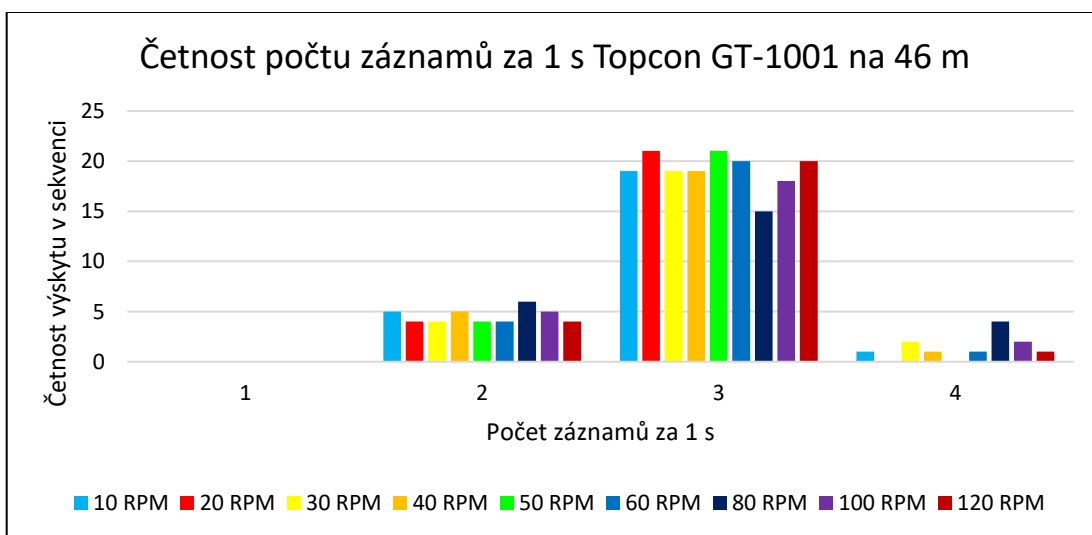


Graf 2 – Počet záznamů popisující sekvenční za časový úsek 25 s

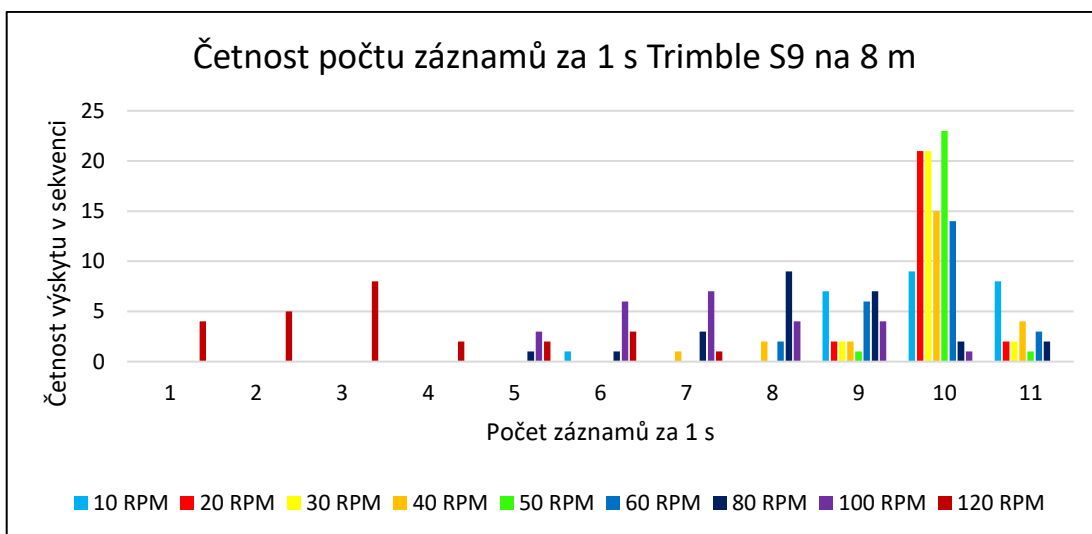
Grafy 3–6 vyobrazují četnosti záznamů za 1 s v dílčích sekvencích u jednotlivých použitých měřících přístrojů na danou vzdálenosti 8 m nebo 46 m. Dle vyhodnocených dat četnosti záznamů za 1 s představují napříč sekvencemi bez ohledu na vzdálenost mezi stanovištěm a cílem největší podíl u Topcon GT-1001 3 záznamy za 1 s a u vyšších frekvencí 2 záznamy za 1 s. U Trimble S9 od 10 RPM do 60 RPM (včetně) 10 záznamů za 1 s a od 60 RPM tento počet záznamů za 1 s znatelně klesá. Největší zastoupení zde poté mají záznamy od 1 do 4 za 1 s.



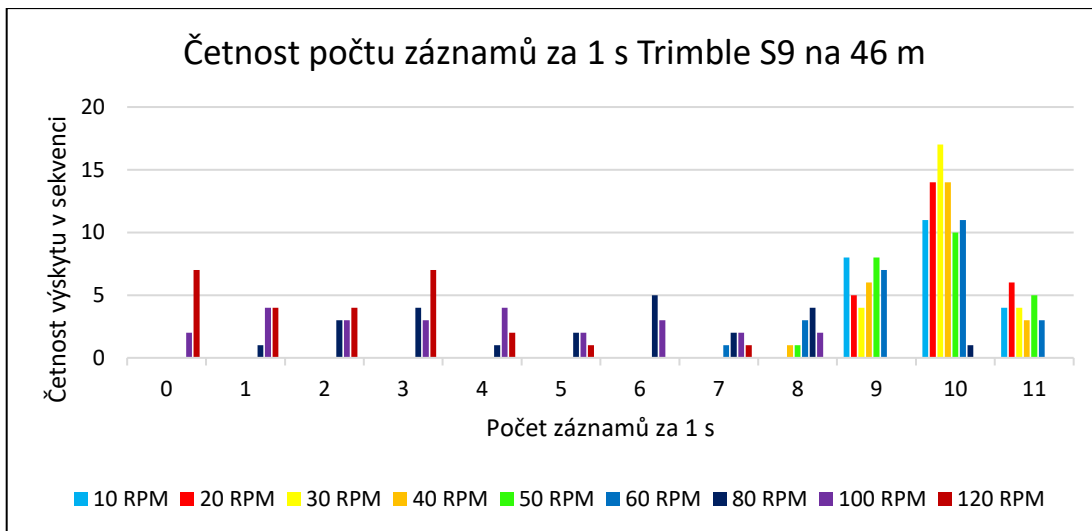
Graf 3 – Četnost počtu záznamů za 1 s Topcon GT-1001 na 8 m



Graf 4 – Četnost počtu záznamů za 1 s Topcon GT-1001 na 46 m



Graf 5 – Četnost počtu záznamů za 1 s Trimble S9 na 8 m

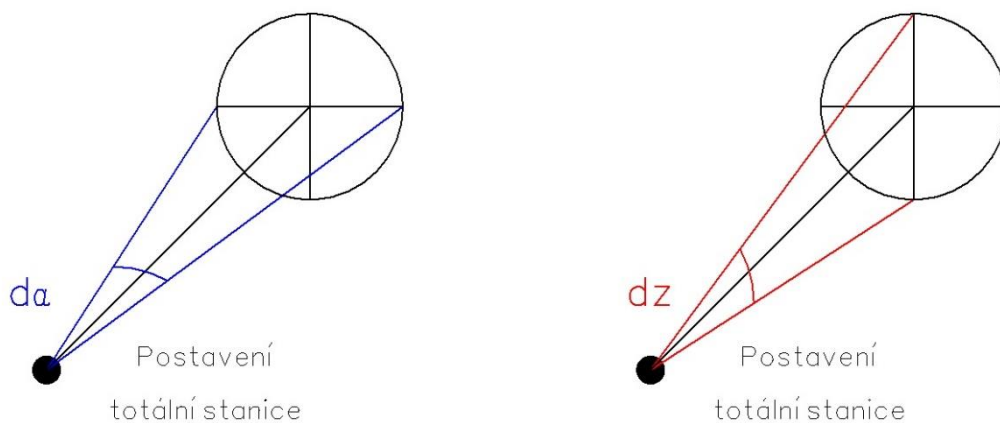


Graf 6 – Četnost počtu záznamů za 1 s Trimble S9 na 46 m

Dle dosažených výsledků lze konstatovat, že Topcon GT-1001 má oproti Trimble S9 vyrovnanější průběh záznamů, avšak absolutní počet záznamů neodpovídá převážně v žádné sekvenci nastaveným 4 záznamům za 1 s. Naopak Trimble S9 částečně dosahuje nastaveného kritéria 10 záznamů za 1 s, dokonce u některých sekvencí došlo k uložení 11 a 12 záznamů za 1 s. To mohlo být způsobeno přenosem dat během měření, které u Trimble S9 bylo realizováno pomocí portu přímo do notebooku. Ale u zvyšujících se otáček (frekvence) od 60 RPM prudce klesá počet záznamů.

4.3.4.2 Analýza dat kontinuálního sledování v úhlové složce

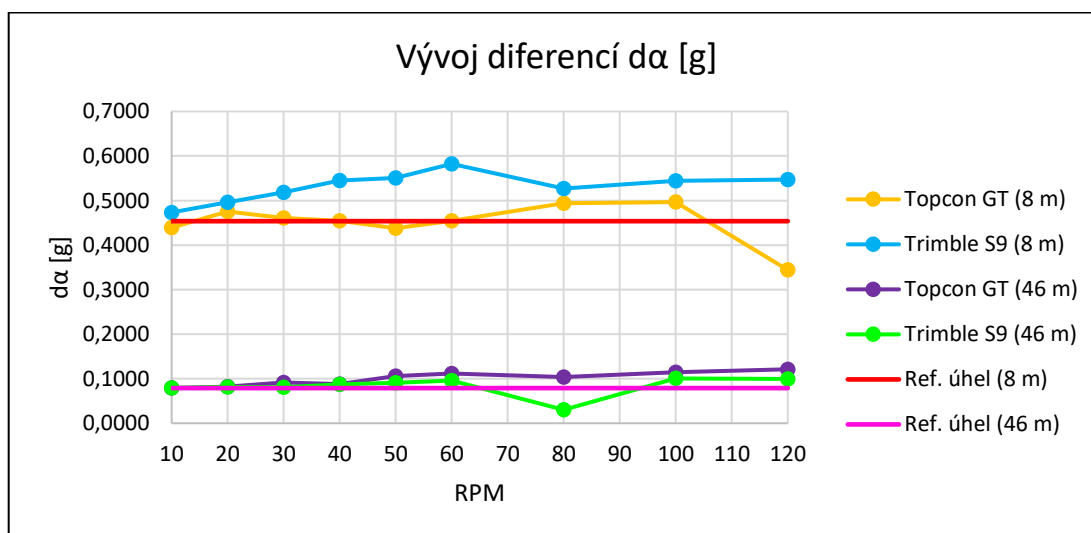
Pro účely vyhodnocení byly horizontální směry a vertikální úhly od sebe odděleny. Diference $d\alpha$ a $d\zeta$ představují úhly, v jakých totální stanice zaměřovaly pohybující se cíl. Diference $d\alpha$ je úhlem v horizontální rovině a diference $d\zeta$ úhlem ve vertikální rovině. Vlivem souměrné kruhové dráhy jsou oba úhly na sebe v kolmých rovinách na danou vzdálenost totožné. Je zřejmé, že na vzdálenost 8 m je tento úhel větší než na vzdálenost 46 m při zachování poloměru kruhové dráhy pohybujícího se cíle. Při poloměru otáčení 2,85 cm se na vzdálenost 8 m jedná o úhel $0,4536^\circ$ a na vzdálenost 46 m o úhel $0,0789^\circ$ v obou na sebe kolmých směrech.



Obrázek 23 – Úhel v horizontální rovině da a vertikální rovině dz [autor]

Velikost vyhodnocovaných úhlů v jednotlivých sekvencích byla zjištěna jako rozdíl maximální a minimální velikosti naměřených úhlových veličin v rámci 25 s dlouho trvajících sekvencí. Zahrnutí všech úhlových záznamů sekvence umožňuje sledovat, zda v některých sekvencích při vyšších otáčkách nedochází k odlehlejšímu nebo naopak nedostačujícímu úhlovému měření vůči skutečnosti. Jsou zde zahrnuty i odlehle hodnoty.

Graf 7 Vývoj diferencí da [g] v sobě zahrnuje úhel v horizontální rovině u obou totálních stanic na vzdálenost 8 m a 46 m. Dále jsou zde vyobrazeny vypočítané referenční velikosti úhlů na vzdálenost 8 m a 46 m. Můžeme zde graficky porovnávat vývoj zaměřeného horizontálního úhlu vůči úhlu, který měl být skutečně zaměřen (v grafech uváděn jako referenční úhel).



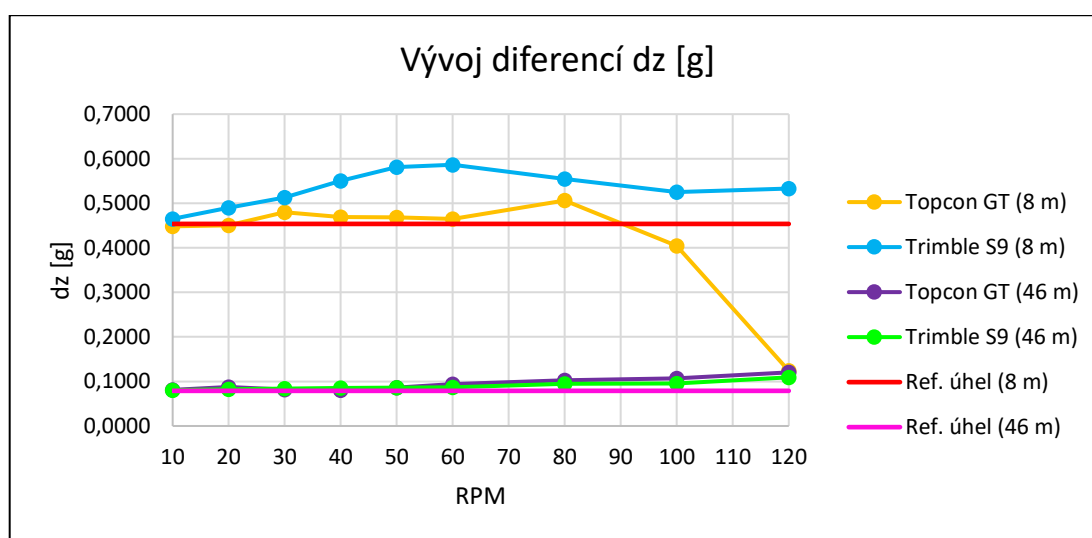
Graf 7 – Vývoj diferencí da [g]

V Tabulce 3 jsou tyto rozdíly mezi velikostí referenčního úhlu a zaměřeného úhlu v jednotlivých sekvencích, vzdálenostech a typu přístroje uvedeny číselně. Kladné odchylky vyznačují větší měřený úhel, než je referenční, naopak záporné odchylky znamenají, že měřený úhel je menší než referenční. V těchto odchylkách jsou ovšem zahrnuty také hodnoty, které lze pokládat za šum. Data z tohoto pohledu nebyla filtrována, protože to nebylo žádoucí. Bylo nutno zjistit velikosti odlehlých hodnot, které může soubor měření obsahovat.

Tabulka 3 – Vývoj diferencí $d\alpha$ [g] od referenčního úhlu

RPM	Topcon GT-1001		Trimble S9	
	$d\alpha_{8m}$ [g]	$d\alpha_{46m}$ [g]	$d\alpha_{8m}$ [g]	$d\alpha_{46m}$ [g]
10	-0,0141	0,0002	0,0197	0,0004
20	0,0213	0,0032	0,0427	0,0025
30	0,0072	0,0128	0,0644	0,0021
40	0,0005	0,0089	0,0915	0,0082
50	-0,0157	0,0269	0,0968	0,0117
60	0,0011	0,0326	0,1287	0,0167
80	0,0403	0,0247	0,0737	-0,0487
100	0,0429	0,0353	0,0903	0,0217
120	-0,1094	0,0423	0,0937	0,0203
 Max 	0,1094	0,0423	0,1287	0,0487

Analogicky jako horizontální úhly byly vyhodnoceny také vertikální úhly. Graf 8 Vývoj diferencí dz [g] představuje průběh vertikálních úhlů (zenitového úhlu), stejně tak Tabulka 4 doplňuje tento průběh číselnými odchylkami od referenčních úhlů.



Graf 8 – Vývoj diferencí dz [g]

Tabulka 4 – Vývoj diferencí dz [g] od referenčního úhlu

RPM	Topcon GT-1001		Trimble S9	
	dz_{8m} [g]	dz_{46m} [g]	dz_{8m} [g]	dz_{46m} [g]
10	-0,0057	0,0018	0,0114	0,0016
20	-0,0030	0,0085	0,0363	0,0037
30	0,0261	0,0027	0,0596	0,0053
40	0,0157	0,0017	0,0970	0,0065
50	0,0146	0,0070	0,1272	0,0071
60	0,0113	0,0149	0,1328	0,0081
80	0,0525	0,0240	0,1013	0,0161
100	-0,0492	0,0282	0,0713	0,0162
120	-0,3297	0,0414	0,0792	0,0303
 Max 	0,3297	0,0414	0,1328	0,0303

Průběhy horizontálních a vertikálních úhlů u jednotlivých přístrojů v daných sekvencích a na určitou vzdálenost reagují s podobnými trendy. Příkladem může být vnější odsazení průběhu horizontálního a vertikálního úhlu totální stanice Trimble S9 na vzdálenost 8 m.

Dalším příkladem může být totální stanice Topcon GT-1001, které od 100 RPM na vzdálenost 8 m značně klesá rozsah jak v horizontálním, tak ve vertikálním úhlu. Uvedený příklad s totální stanicí Topcon má empirické vysvětlení. Topcon GT-1001 byl nastaven na 4 záznamy měření za 1 s, od uvedené sekvence 100 RPM ve skutečnosti převažují 2 záznamy za 1 s (viz Graf 3). Pro ilustrativní vysvětlení využijme sekvenci 120 otáček za minutu, tedy 2 otáčky za 1 s, což odpovídá frekvenci 2 Hz. Z toho vyplývá, že jedna otočka měla periodu trvání 0,5 s. Se stejnou periodou registrovala totální stanice Topcon 1 záznam v daných sekvencích. To vede k závěru, že jedna otočka byla zaznamenána právě jedním bodem (záznamem). Každá další otočka byla zaznamenána s určitým postupným krokem, protože nelze předpokládat naprostou synchronizaci jedné otočky a jednoho záznamu. Vykreslené body této sekvence by se měly kumulovat pouze na určité části kruhové dráhy.

Podobné trendy můžeme pozorovat i v dalších případech. Nejedná se ovšem o trendy, které by uceleně popisovaly celou skupinu měření.

Na základě těchto údajů lze konstatovat, že obě totální stanice se pohybují stejně kvalitativně kolem vertikální točné osy přístroje i kolem klopné (horizontální) osy dalekohledu. Kombinovaný pohyb těchto dvou os poté umožňuje sledování objektu.

V Příloze 1, 2 a 3 je vyobrazen průběh úhlů v rámci jednotlivých sekvencí. Z toho v Příloze 1 je vyobrazen průběh vertikálního úhlu, v našem případě zenitového úhlu, na vzdálenost 8 m ve všech sekvencích z obou přístrojů, stejně tak v Příloze 2 na vzdálenost 46 m. V Příloze 3 je poté ilustrativně vyobrazen průběh vodorovného úhlu na vzdálenost 8 m totální stanicí Trimble S9. Průběh horizontálního úhlu i zde reaguje stejnými trendy jako vertikální úhel, což je dalším doložením kvalitativně a kvantitativně stejného pohybu totální stanice kolem obou točných os. Z pohledu množství sekvencí a příloh by bylo nadbytečné a dále nereprezentativní vykreslovat všechny sekvence také z pohledu horizontálního úhlu, proto je uvedena pouze ilustrativní Příloha 3 dokládající tuto skutečnost.

Vertikální úhly zobrazené v plném rozsahu kombinací měření jsou dostatečným reprezentativním vzorem z pohledu úhlového měření na reakci pohybu a sledování cíle.

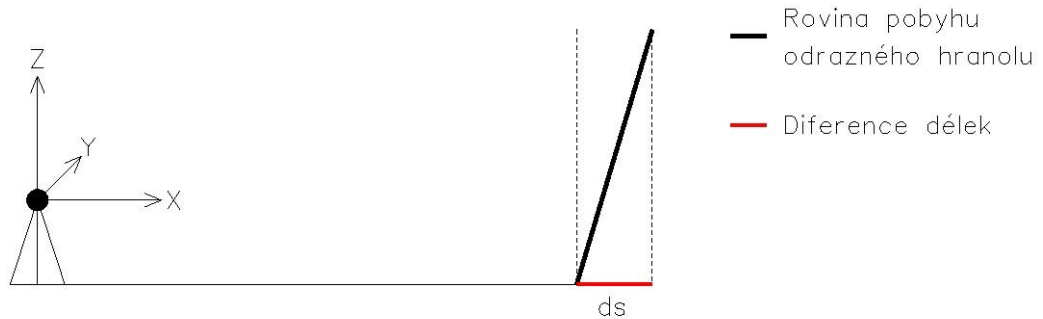
Grafy (Příloha 1 a 2) průběhu vertikálních (zenitových) úhlů názorně zobrazují vliv počtu záznamů za 1 s na přímo měřené veličiny. Do 60 otáček (včetně) za minutu má průběh zenitového úhlu u obou měřících přístrojů na obě vzdálenosti totožný (hladký) průběh se stejnými trendy. Od 60 otáček za minutu se trendy mění v závislosti na druhu měřidla a také v závislosti na vzdálenosti stanoviště a cíle. Nelze zde určit jednoznačný trend. Ale lze si všimnout, že průběh zenitového úhlu u Topcon GT-1001 má stále menší amplitudu oproti Trimbles S9. To je způsobeno právě odlišným množstvím registrovaných záznamů, které mají přímý vliv na tyto změny. Snižující se schopnost popisu určitého tvaru se zvyšující se frekvencí ovšem nesnižuje klíčový poznatek vycházející z grafů Přílohy 1, 2 a 3.

Tím hlavním a nejdůležitějším poznatkem, který dokládá Příloha 1, 2 a 3 je okamžitá reakce totální stanice po započetí režimu Tracking na již pohybující se cíl. Není zde žádná časová prodleva, za předpokladu, že odrazný hranol je v zorném poli dalekohledu (jako tomu bylo při realizaci testování metody). Na tento hlavní aspekt nemá počet záznamů za 1 s vliv.

4.3.4.3 Analýza dat kontinuálního sledování v délkové složce

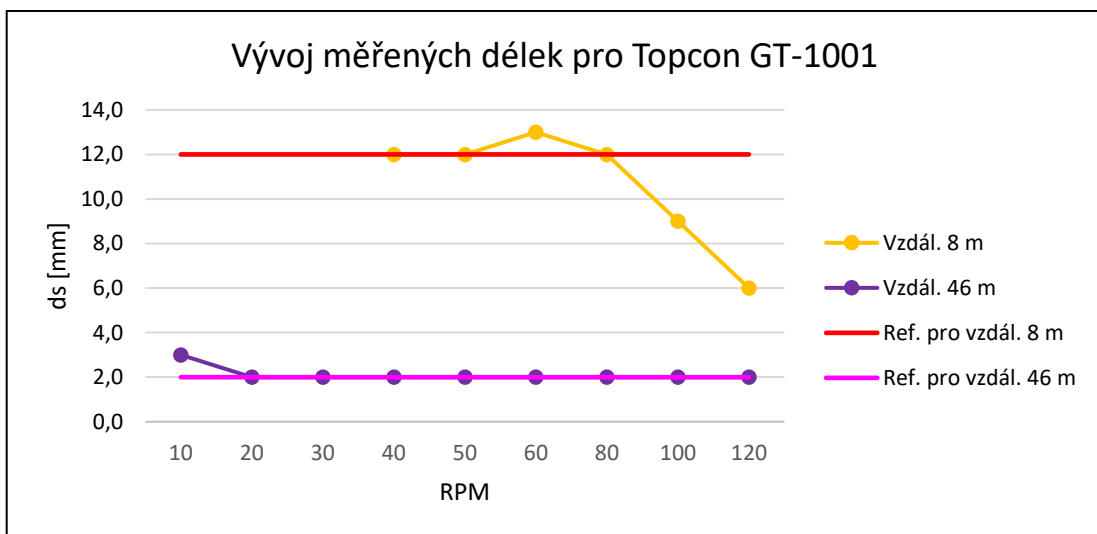
V důsledku nedokonalé rovnoběžnosti roviny pohybu odrazného hranolu vůči svislici a mírně odlišných postavení jednotlivých totálních stanic při testování metody byly měřené vodorovné délky v určitém rozsahu. Diference délek představuje rozdíl mezi

maximální a minimální délkou, tedy maximální a minimální vzdálenosti totální stanice od roviny pohybu odrazného hranolu. (viz Obrázek 24).

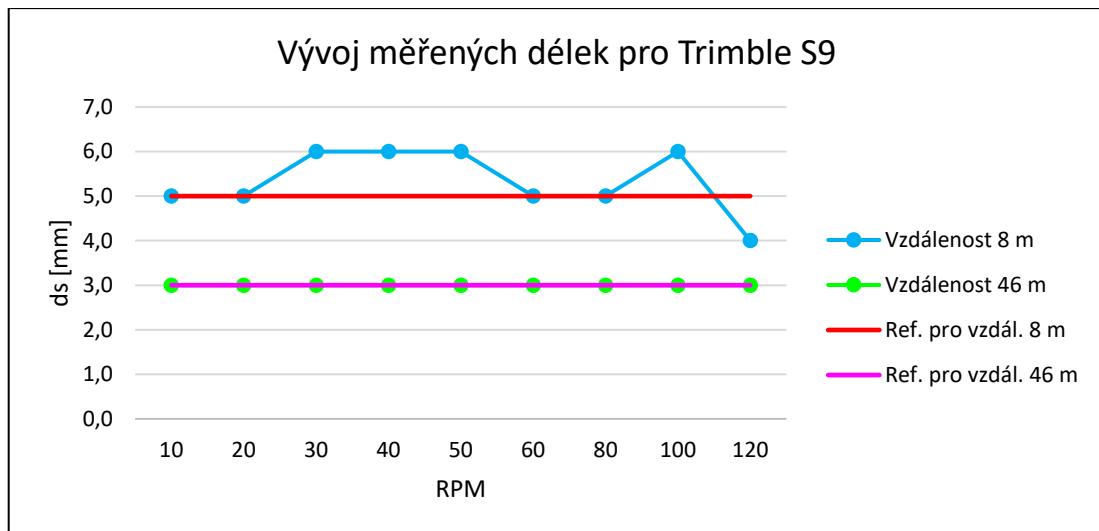


Obrázek 24 – Diference délek [autor]

Dále byly porovnávány rozdíly mezi diferencemi délek u jednotlivých sekvencí vůči diferencím zjištěných během určování referenčního tvaru. Diference délek určené z měření referenčního tvaru jsou pro tento účel porovnání považovány za bezchybné.



Graf 9 – Vývoj měřených délek pro Topcon GT-1001



Graf 10 – Vývoj měřených délek pro Trimble S9

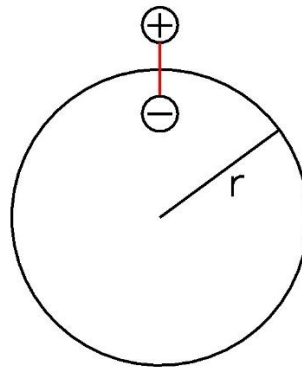
Porovnání diferencí délek bylo realizováno zvláště pro jednotlivé totální stanice, protože již mírně odlišné stanovisko má vliv na referenční velikost těchto diferencí. Z Grafu 9 a 10 lze stanovit, že odchýlení se referenčních diferencí je pouze u kratší vzdálenosti (8 m) mezi stanoviskem a cílem. U delší vzdálenosti 46 m jsou difference ze sekvencí totožné s referenčními diferencemi.

4.3.4.4 Analýza dat kontinuálního sledování v souřadnicových složkách

Ze souřadnic Y, X, Z byly pro další zpracování vybrány pouze souřadnice Y, Z tvořící rovinu dráhy oběhu odrazného hranolu. Souřadnice jednotlivých bodů v sekvencích jsou graficky vyobrazeny v Příloze 4 (na vzdálenost 8 m) a v Příloze 5 (na vzdálenost 46 m). Pro ilustrativní porovnání je v každém grafu vykreslen referenční tvar. Tento referenční tvar byl vykreslen také z naměřených dat. Tato data byla realizována zaměřením jedné periody před každou sekvencí, tak aby každá sekvence měla svůj originální souřadnicový systém v případě nepředvídatelného pohybu aparatury testování.

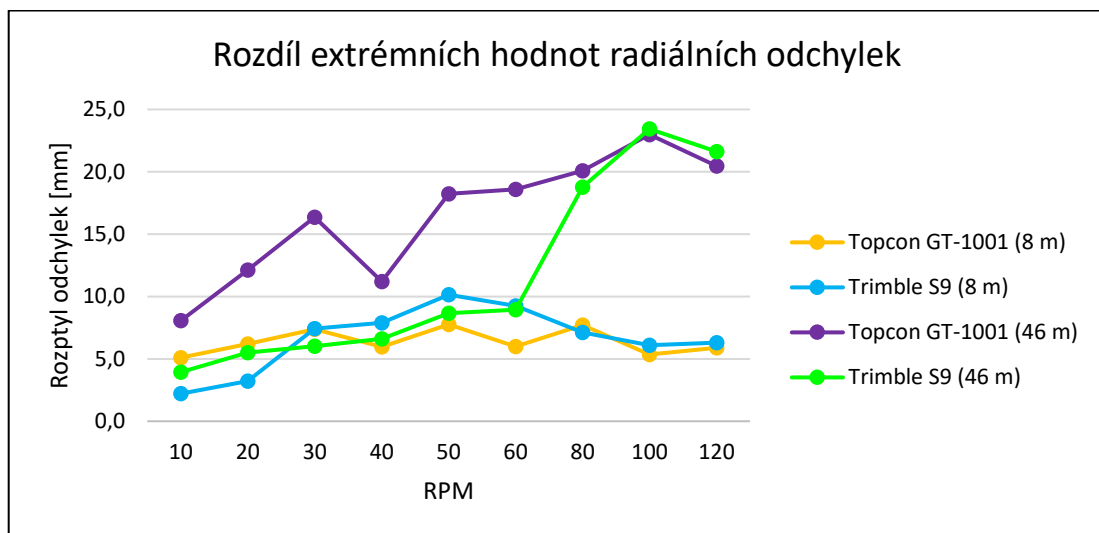
Grafické vyobrazení jednotlivých bodů (v Příloze 4 a 5) ukazuje skutečné dosažené výsledky. Z vykreslených jednotlivých bodů o souřadnicích Y, Z jsou patrné radiální odchylky od referenčního tvaru. Radiální odchylka je odchylkou ve směru poloměru od kruhového tvaru. Záporná hodnota odchylky znamená, že skutečná hodnota poloměru je menší než referenční. Naopak z kladné hodnoty odchylky vyplývá, že skutečná hodnota poloměru je větší, odchylka je tedy vně.

Rozdíl extrémních hodnot (max.-min.)
radiálních odchylek

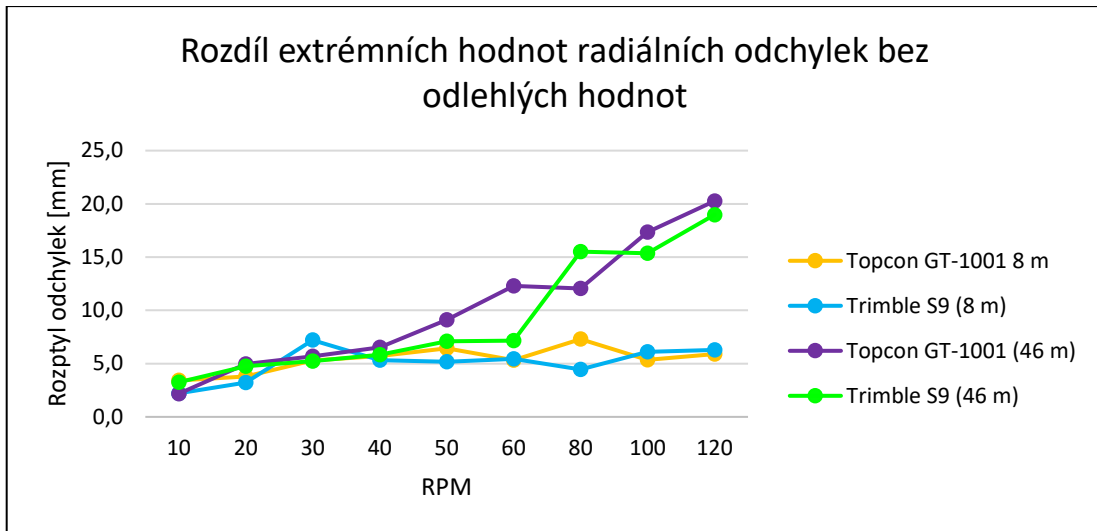


Obrázek 25 – Radiální odchylky [autor]

Tyto odchylky byly početně realizovány a porovnány od středu a poloměru vypočítaného MNČ z dat referenčního tvaru. Graf 11 vykresluje rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek získaných z rozdílu max – min radiální odchylky v dané sekvenci u konkrétního měřícího přístroje. Graf 12 dále vykresluje rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek bez odlehklých hodnot, které byly vyloučeny ze souboru měření na základě dvojnásobku střední chyby.



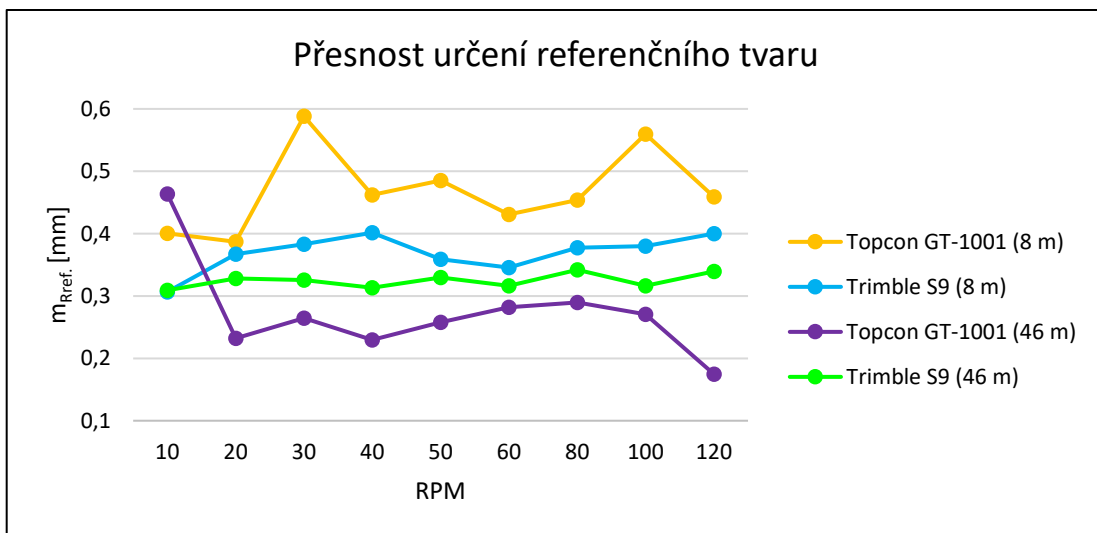
Graf 11 – Rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek



Graf 12 – Rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek bez odlehlých hodnot

Ze získaných radiálních odchylek bylo dále možno určit střední chyby přesnosti určení referenčního tvaru a tvaru během sekvencí. Střední chyby byly vypočteny dle vztahu (12). Průběh středních chyb referenčního tvaru a tvaru během sekvencí vyobrazují Graf 13 a Graf 14. Číselné vyjádření středních chyb je poté v Tabulce 5 a Tabulce 6. Přesnost určení referenčního tvaru realizovaného před všemi sekvencemi je submilimetrová. [30]

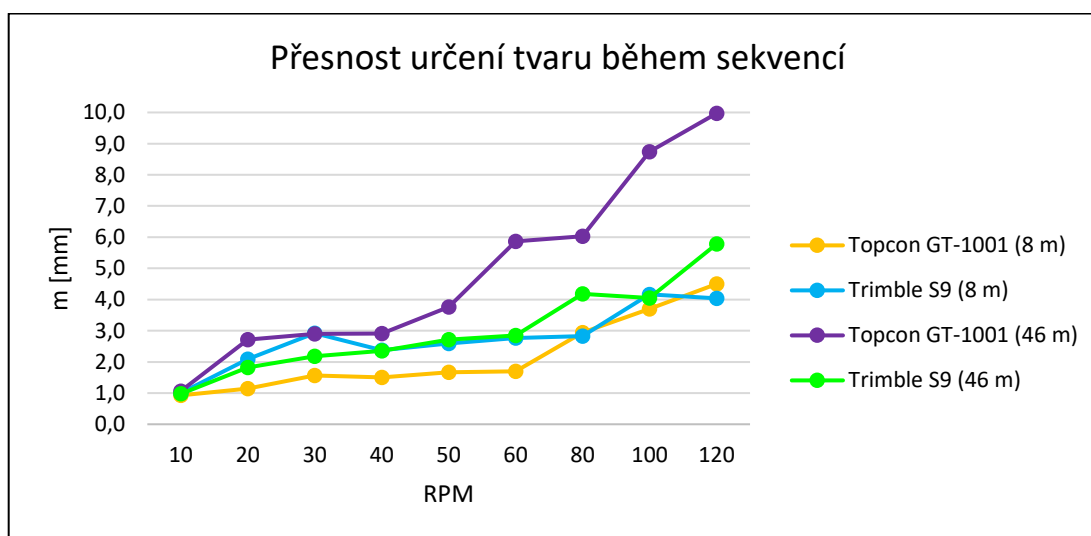
$$m = \sqrt{\frac{\sum vv}{n-k}} \quad n - \text{počet měření, } k - \text{počet nutných měření} \quad (12)$$



Graf 13 – Přesnost určení referenčního tvaru

Tabulka 5 – Přesnost určení referenčního tvaru

RPP	Topcon (8 m)	Topcon (46 m)	Trimble (8 m)	Trimble (46 m)
	m _{Ref.} [mm]	m _{Ref.} [mm]	m _{Ref.} [mm]	m _{Ref.} [mm]
10	0,4	0,5	0,3	0,3
20	0,4	0,2	0,4	0,3
30	0,6	0,3	0,4	0,3
40	0,5	0,2	0,4	0,3
50	0,5	0,3	0,4	0,3
60	0,4	0,3	0,3	0,3
80	0,5	0,3	0,4	0,3
100	0,6	0,3	0,4	0,3
120	0,5	0,2	0,4	0,3

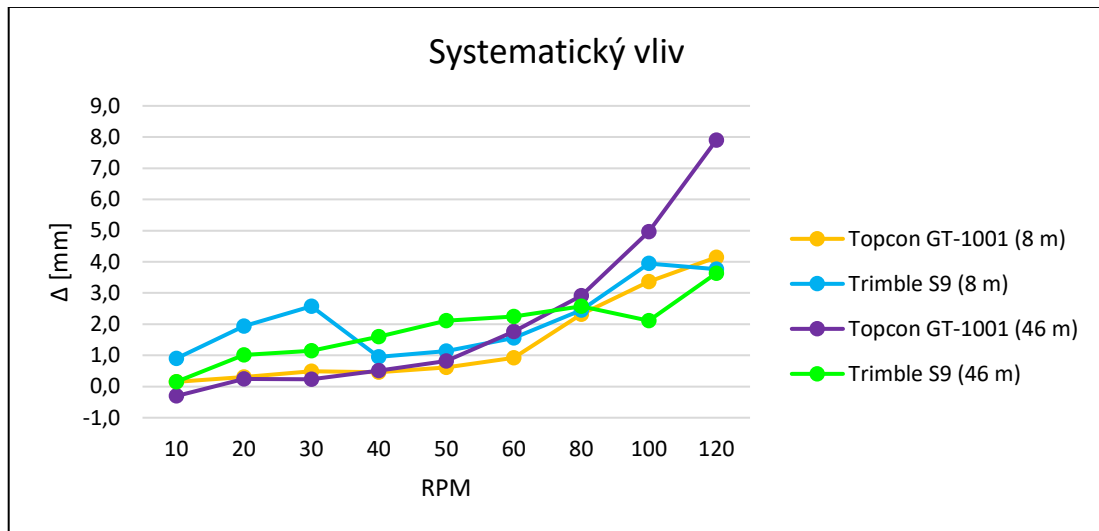


Graf 14 – Přesnost určení tvaru během sekvencí

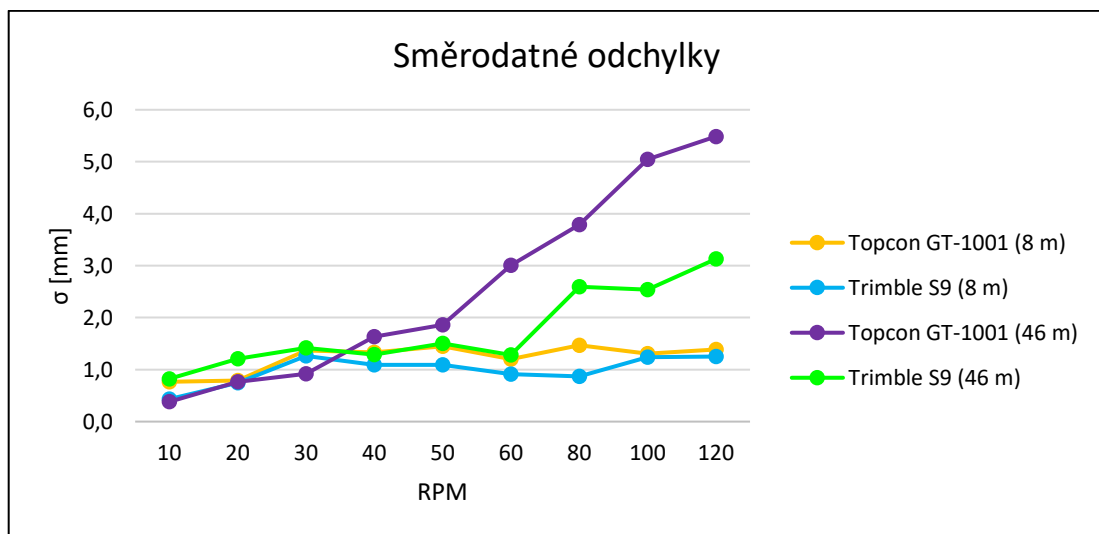
Tabulka 6 – Přesnost určení tvaru během sekvencí

RPP	Topcon (8 m)	Topcon (46 m)	Trimble (8 m)	Trimble (46 m)
	m [mm]	m [mm]	m [mm]	m [mm]
10	0,9	1,1	1,0	1,0
20	1,1	2,7	2,1	1,8
30	1,6	2,9	2,9	2,2
40	1,5	2,9	2,4	2,4
50	1,7	3,8	2,6	2,7
60	1,7	5,9	2,8	2,8
80	2,9	6,0	2,8	4,2
100	3,7	8,7	4,2	4,0
120	4,5	10,0	4,0	5,8

U totální stanice Trimble S9 se napříč všemi sekvencemi a oběma variantami vzdáleností projevuje tendence určitého vnější odsazení od referenčního tvaru. Toto odsazení se zvětšuje se zvyšující se frekvencí pohybu odrazného hranolu. Po odfiltrování tohoto systematického vlivu (viz Graf 15) mohlo dojít k výpočtu směrodatných odchylek.



Graf 15 – Systematický vliv



Graf 16 – Směrodatné odchylky

Tabulka 7 – Směrodatné odchylky

RPP	Topcon (8 m)	Topcon (46 m)	Trimble (8 m)	Trimble (46 m)
	σ [mm]	σ [mm]	σ [mm]	σ [mm]
10	0,8	0,4	0,4	0,8
20	0,8	0,8	0,7	1,2
30	1,4	0,9	1,3	1,4
40	1,3	1,6	1,1	1,3
50	1,4	1,9	1,1	1,5
60	1,2	3,0	0,9	1,3
80	1,5	3,8	0,9	2,6
100	1,3	5,0	1,2	2,5
120	1,4	5,5	1,2	3,1

4.3.4.5 Interpretace výsledků a poznatky z testovacího měření

Na základě vyhodnocování přímo měřených a odvozených dat můžeme konstatovat určité jednoznačné závěry. Závěry na podkladě experimentálního testování metody.

Vzdálenost stanoviště a cíle nemá vliv na počet registrovaných záznamů. Ale s rostoucí frekvencí pohybu odrazného hranolu klesá kvantitativní popis tvaru a průběhu dráhy. Metoda je zde také limitována omezeným možným počtem záznamů za 1 s, který pro vyšší frekvence je nedostatečný pro kvalitativní popis tvaru i za předpokladu, že by počet nastavených záznamů za 1 s byl konstantní po všechny testované frekvence.

Na základě grafického vyobrazení průběhu úhlů (viz Příloha 1, 2 a 3) můžeme konstatovat, že obě totální stanice dokážou zachytit okamžitý pohyb cíle bez prodlevy do testované frekvence 2 Hz pohybu cíle.

Střední chyby a směrodatné odchylky určené z radiálních odchylek umožňují empiricky stanovit přesnosti metody při dané frekvenci. Na základě vztahu (13) můžeme řádově určit základní frekvenci rozhledny. V našem případě se jedná pouze o přibližný vztah pro určení základní frekvence. Hodnota takto vypočítané základní frekvence při výšce rozhledny 28,3 m činí 1,6 Hz. Testování metody bylo realizováno do 2 Hz včetně, řádově odpovídá reálné možné frekvenci rozhledny. [31]

$$n = \frac{46}{h} [Hz] \quad h - \text{výška rozhledny} \quad (13)$$

Testovaná metoda ve svém rozmezí frekvencí dosahuje přesnosti určení vychýlení 1–3 mm, při odstranění systematických vlivů (viz Tabulka 7) v očekávaném odklonu od vvislice ± 20 mm. Rozmezí této přesnosti nespĺňují pouze dvě sekvence (100 RPM

a 120 RPM) u přístroje Topcon GT-1001 na vzdálenost 46 m. V těchto dvou sekvencích dosahuje směrodatná odchylka hodnoty 5,0 mm resp. 5,5 mm. Při přiblížení těchto dvou sekvencí zjistíme, že 27,4 % resp. 39,7 % souřadnic bodů (polohy bodů) z celého souboru měření je od testované referenční kružnice vzdáleno více než 10 mm. Tato skutečnost způsobuje poté diametrální rozdíl přesnosti. Tabulka 8 znázorňuje procentuální zastoupení hodnot odchýlených více než 10 mm od referenčního tvaru. U vzdálenosti totálních stanic a cíle 8 m nemají takto odchýlené hodnoty zastoupení. Hodnoty vzdálené nad 10 mm od referenčního tvaru se vyskytují pouze u delší vzdálenosti stanoviště a cíle.

Tabulka 8 – Procentuální zastoupení odlehklých hodnot nad 10 mm od ref. tvaru

RPM	Topcon (8 m)	Topcon (46 m)	Trimble (8 m)	Trimble (46 m)
10	0,0 %	0,0 %	0,0 %	0,0 %
20	0,0 %	2,8 %	0,0 %	0,0 %
30	0,0 %	2,7 %	0,0 %	0,0 %
40	0,0 %	1,4 %	0,0 %	0,0 %
50	0,0 %	2,8 %	0,0 %	0,0 %
60	0,0 %	13,7 %	0,0 %	0,0 %
80	0,0 %	10,8 %	0,0 %	1,5 %
100	0,0 %	27,4 %	0,0 %	2,1 %
120	0,0 %	39,7 %	0,0 %	6,3 %

Pro zasazení testované metody do problematiky měření posunů a přetvoření staveb a jejich požadavků na přesnost měření, můžeme pro přiblížení využít vztahy (14) a (15) dle ČSN 73 0405. Jako vstupní hodnotu v obou případech uvažujeme jedinou stanovenou hodnotu představující maximální očekávané odchýlení konstrukce rozhledny od svislice v důsledku namáhání větrem. Její hodnota činí ± 20 mm.

$$\delta_1 = \frac{2}{5} p_k \quad p_k - \text{kritická hodnota posunu} \quad (14)$$

$$\delta_2 \leq \frac{2}{15} p \quad p - \text{očekávaná hodnota celkového posunu} \quad (15)$$

Vztah (14) představuje stanovení požadované mezní odchylky měření posunů existujících stavebních objektů při dosazení kritické hodnoty posunu p_k .

Vztah (15) představuje stanovení požadované mezní odchylky měření posunů nových stavebních objektů při dosazení očekávaného celkového posunu p .

Ani jeden ze vztahů zcela nevyhovuje, přesněji vyhovuje pouze z části konkrétnímu případu rozhledny Velký Kosíř.

Vztah (14) vyhovuje svým určením pro již existující stavební objekt, který rozhledna Velký Kosíř představuje. Naopak nevyhovuje potřebou znát kritickou hodnotu posunu. Kritickou hodnotou posunu je myšlena hodnota, kdy u objektu dochází k jeho selhání. Touto hodnotou pro výpočet nedisponujeme, disponujeme pouze očekávanou maximální hodnotou posunu.

Vztah (15) vyhovuje potřebou dosažení očekávaného celkového posunu, který v našem případě představuje očekávané maximální vychýlení konstrukce rozhledny od svislice v hodnotě ± 20 mm. Naopak vztah nevyhovuje svým určením pro nové stavební objekty.

Navzdory tomu, že ani jeden ze vztahů zcela nevyhovuje požadavkům, tak pro ilustraci a zasazení testované metody do kontextu posunů a přetvoření stavebních objektů je potřeba stanovit mezní odchylku měření.

Při uvážení, že rozhledna Velký Kosíř není novým stavebním objektem a lze předpokládat, že kritická hodnota posunu rozhledny bude větší než maximální očekávaná hodnota vychýlení od svislice ± 20 mm, popisuje vztah (14) danou situaci věrohodněji. Dosazením striktnější vstupní hodnoty je stanoveno přísnější kritérium přesnosti měření.

Na základě vztahu (14) pro existující stavební objekt s dosazením hodnoty ± 20 mm jako kritické hodnoty posunu představuje stanovená mezní odchylka měření $\delta_1 = 8$ mm. [4]

Pro zasazení experimentální testovací metody do praktického měření uvažujeme tedy mezní hodnotu měření 8 mm. Tuto mezní hodnotu (při volbě součinitele konfidence $t = 2$) splňují všechny sekvence, vyjma dvou sekvencí (100 RPM a 120 RPM) zmíněných v této kapitole, u kterých byl značný podíl odlehlých bodů nad 10 mm od referenčního tvaru.

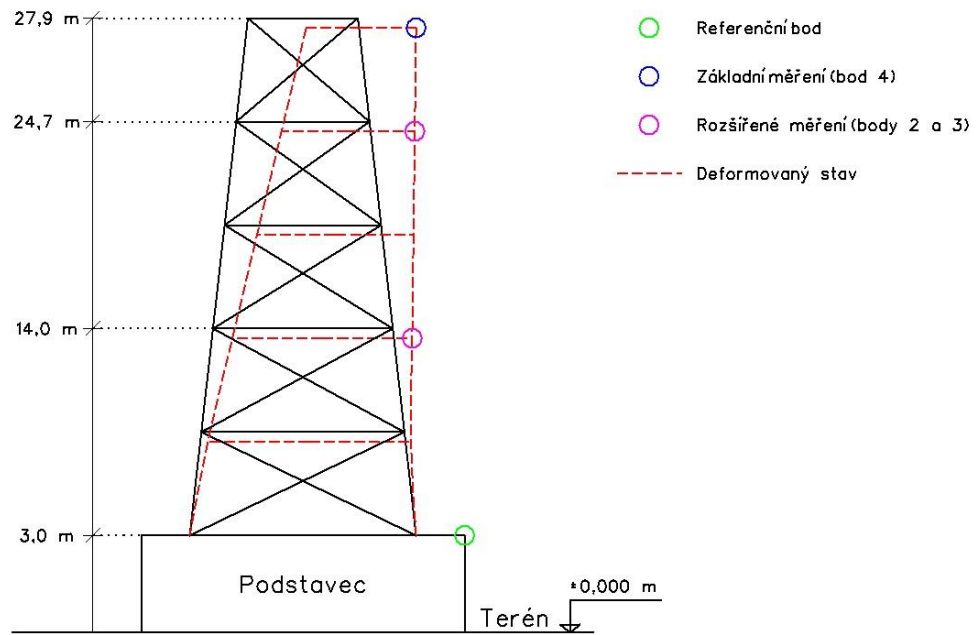
Na základě zjištěných údajů můžeme konstatovat, že pro měření rozhledny Velký Kosíř v režimu automatického sledování a měření odrazného hranolu upevněného na konstrukci rozhledny, lze použít obě testované totální stanice v rozsahu zjištěných nejistot a frekvencí pro očekávané maximální odchýlení od svislice ± 20 mm.

4.4 Realizace měření náklonů rozhledny Velký Kosíř

Měření bylo realizováno ve dvou provedeních. První představovalo klasické etapové měření, které je v této práci označováno jako statické měření. Jedná se sledování konstrukce z dlouhodobého hlediska ve standardním nastavení totální stanice. Druhé provedení představovalo také etapové měření, ale v nastavení totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu upevněného na rozhledně. Toto provedení je v této práci označováno jako dynamické měření, které má za cíl kontinuálně sledovat okamžité změny konstrukce v důsledku namáhání větrem. Pro nezávislou kontrolu měření totálních stanic v režimu automatického sledování a zaměřování byla rozhledna zaměřena pomocí akcelerometru.

Všechna měření totálními stanicemi jsou navázána do S-JTSK. K navázání do S-JTSK byl použit také trigonometrický bod 19, který je bodem I. řádu České státní trigonometrické sítě. Navázání do S-JTSK bylo realizováno především z důvodu orientace os, kde osa Y směřuje na západ a osa X na jih. To nám umožňuje vyhodnocovat odchylky ze souřadnic přímo vůči světovým stranám a směru působení větru.

Na konstrukci rozhledny byly trvale instalovány 4 odrazné hranoly. Při realizaci 0. etapy (22. 7. 2021) byly instalovány první dva základní odrazné hranoly. První z nich byl instalován na betonový podstavec. Tento bod nese označení 1 a jedná se o referenční bod, na který jsou transformovaná veškerá měření a etapy. Druhý instalovaný odrazný hranol představuje bod s označením 4, který je umístěn na dřevěném trámu na samotném vrcholu rozhledny. Tento bod 4 představuje hlavní zájem s ohledem na pozorovanou problematiku maximálního odchýlení rozhledny od svislice. Dále při realizaci 1. etapy (29. 8. 2021) byly osazeny zbývající dva odrazné hranoly představující body s označením 2 a 3. Jedná se o doplňující body pro možnost sledování konstrukce rozhledny v celém jejím rozsahu. Tyto odrazné hranoly byly osazeny na kovové prstence rozhledny. Výškové schéma rozmístění odrazných hranolů reprezentující sledované body znázorňuje Obrázek 26.



Obrázek 26 – Schéma rozmístění odrazných hranolů [autor]

Postavení přístrojů, navázání do S-JTSK a vztahy jednotlivých bodů byly v obou variantách provedení (statickém a dynamickém měření) totožné. Rozdíl spočíval pouze v nastavení totální stanice a tím v samotné podstatě, zda jsou sledovány dlouhodobé nebo okamžité změny. V obou případech se jednalo o prostorovou polární metodu, kterou popisuje kapitola 3.1.4 Polární metoda.

Stejně jako experimentální testování metody totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování, tak samotné zaměření rozhledny Velký Kosíř bylo realizováno nezávisle dvěma totálními stanicemi pro možnost kontroly a zhodnocení. Jednalo se o totožné totální stanice Topcon GT-1001 a Trimble S9.



Obrázek 27 – Postavení totálních stanic vzhledem k zájmovému objektu [doc. Bureš]

4.4.1 Etapové měření s cílem zjištění dlouhodobého vlivu namáhání větrem

Ve statickém provedení měření byly realizovány celkově 3 etapy zaměření. Konkrétně se jednalo o 0. etapu (22. 7. 2021), 1. etapu (29.8. 2021) a 2. etapu (22. 4. 2022).

Hlavním předmětem 0. etapy byla instalace a zaměření referenčního bodu 1 a bodu 4 umístěného na vrcholu rozhledny určeného k primárnímu měření a stanovení odchylek od svislice. Výsledkem 0. etapy jsou souřadnice referenčního bodu 1, na který byly posléze transformovány (posunuty) ostatní měření tak, aby mohly být vůči sobě porovnány. Bod 1 je považován za pevný bod. Transformování měření a etap na bod 1 je nezbytností s ohledem na požadovanou vyhodnocovací přesnost v souvislosti se způsobem navázání do S-JTSK, které bylo realizováno pomocí dvou bodů (19, 4001) na výtyčku s odrazným hranolem. Přesnost absolutního navázání do S-JTSK není striktní, protože účel navázání souvisí pouze s orientací os vůči světovým stranám.

Hlavním předmětem 1. etapy byla instalace a zaměření rozšiřujících bodů 2 a 3, které dále slouží k popisu chování konstrukce v celém jejím rozsahu.

Zaměření 2. etapy poté bylo realizováno s dostatečným odstupem od předchozích dvou etap s cílem detekovat dlouhodobé změny. V této etapě byly zaměřeny všechny osazené body v plném rozsahu.

4.4.2 Etapové kontinuální měření s cílem zjištění okamžitého vlivu namáhání větrem

V rámci dynamického měření pro detekci okamžitého účinku namáhání větrem byly realizovány dvě etapy měření. Jednalo se o 0. etapu (22. 7. 2021) a 2. etapu (22. 4. 2022). Číslování etap je převzato ze statického měření. V jednotlivých etapách měření byly realizovány synchronizované časové úseky měření totálních stanic s akcelerometrem. Totální stanice byly v nastavení automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu.

Předmětem dynamického měření bylo sledování bodu 4 a jeho změn v horizontální poloze v daný moment a za daných podmínek.

Pro možnost přiřazení změn polohy v důsledku působení větru byl na vrchol rozhledny po dobu měření instalován mobilní anemometr. Během měření akcelerometrem byla zároveň registrována data o intenzitě a směru větru.



Obrázek 28 – Anemometr a čidlo akcelerometru [autor]

Čidla akcelerometru byla instalována ve směru sever–jih a východ–západ, aby mohla být získaná data přímo porovnána s daty získanými geodetickými metodami. Takto orientované osy umožňují jednoznačně vyhodnotit směr působení větru a směr pohybu konstrukce.

4.5 Vyhodnocení změn náklonů rozhledny a interpretace výsledků

V rámci statického měření byly porovnávány jednotlivé etapy vůči sobě. Naopak v rámci dynamického měření docházelo pouze k porovnávání dat v rámci jednotlivých etap a synchronizovaných časových úseků měření.

4.5.1 Vyhodnocení dlouhodobého účinku namáhání větrem

Časový úsek 9 měsíců mezi 0. a 2. etapou nám umožňuje detekovat trendy změn konstrukce rozhledny z dlouhodobého hlediska. Na tyto trendy nemá vliv pouze vítr, ale také další vnější vlivy.

Na základě směru náklonu osamocených stromů, lze očekávat působení větru zejména ve směru jihozápad–severovýchod. Náklony stromů dokládá Obrázek 29. Osamocené velké stromy v blízkosti vrcholu Velkého Kosíře shodně směřují přibližně v azimutu 45°.

Přímé sluneční záření působí z jižního obzoru a stavba před ním není chráněna jinou zástavbou nebo vegetací. Další vnější vlivy a jejich směr působení nelze přesně a jednoznačně predikovat. Mezi tyto další vlivy mohou patřit důsledky pronikání vlhkosti, proti kterým byla realizována opatření ve formě ochranných stříšek (viz kapitola 4.2) nebo dlouhodobé působení pohybu velkého množství návštěvníků. S ohledem na složitost konstrukce a působení sil a pnutí uvnitř ní, nelze tyto směry působení jednoduše definovat. Z tohoto důvodu je vhodné sledovat dlouhodobé trendy pomocí etapového měření, které může tyto směry v důsledku kombinace všech vlivů působení exaktně stanovit a prokázat na základě statistického testování.



Obrázek 29 – Příklad dlouhodobého působení větru v blízkosti rozhledny [autor]

Podmínky během jednotlivých etap měření

0. etapa (22. 7. 2021) – skoro jasno, velmi mírný vítr, 21,1 °C
1. etapa (29. 8. 2021) – polojasno, bezvětří, 12,5 °C
2. etapa (22. 4. 2022) – zataženo, mírný vítr, 16,8 °C

Na základě vypočítaných charakteristik přesnosti souřadnic jednotlivých bodů mohlo být realizováno statistické testování, které umožňuje pomocí intervalů spolehlivosti určit, zda posun prokazatelně nastal či nikoliv. Vztahy (16), (17) a (18) popisují statistické testování. Posuny a jejich prokázání bylo realizováno dle uvedených vztahů zvláště pro jednotlivé horizontální souřadnicové složky. [3]

$$m_p - \text{charakteristika přesnosti posunu} \quad \delta_p = t * m_p \quad t = 2$$

$$p < m_p \quad \text{Neprůkazný posun} \quad (16)$$

$$m_p \leq p \leq \delta_p \quad \text{Neprůkazný posun s určitými trendy, nutné sledovat} \quad (17)$$

$$p > \delta_p \quad \text{Průkazný posun s rizikem } \alpha = 5 \% \quad (18)$$

Volba koeficientu spolehlivosti při realizaci statistického testování byla $t = 2$. Tato volba odpovídá hladině významnosti $\alpha = 5 \%$ u jednotlivých vyhodnocovaných souřadnicových složek. Hladina významnosti stanovuje, jaké přijímáme riziko nesprávného závěru.

Číselné zpracování výsledků statického etapového měření představuje Tabulka 9. Grafické znázornění náklonů (vodorovných posunů) mezi 0. a 1. etapou a mezi 1. a 2. etapou je vyobrazeno v Příloze 6.

Výsledné prokazatelné posuny statického etapového měření převládají ve směru západ–východ s mírným stočením ve směru jihozápad–severovýchod s přibližným průměrným azimutem 80°. Směr statisticky prokázaných posunů ilustruje, že dlouhodobé namáhání větrem, který působí v převládajícím směru jihozápad–severovýchod může mít částečný vliv na směr posunů. Konkrétně na jejich stočení právě ve směru jihozápad–severovýchod. Výsledné posuny jsou ovšem vždy kompilací všech vnějších vlivů. Při konkrétním dlouhodobém namáhání sledovaného objektu nelze od sebe odfiltrovat jednotlivé vnější vlivy, dokonce nelze přesně určit jejich podíl vlivu. K tomuto účelu slouží dynamická měření, která sledují okamžité změny v důsledku působení konkrétních vlivů.

Velikosti prokázaných výsledných vektorů posunů jsou v řádu 5 mm na jednotlivých výškových úrovních. To značí, že není prokázána rozličná deformace (přetvoření) konstrukce v jednotlivých výškových úrovní, ale že dochází v důsledku vnějších vlivů k podobným trendům v celém vertikálním rozsahu konstrukce rozhledny.

Tabulka 9 – Etapové měření dlouhodobého vlivu namáhání větrem

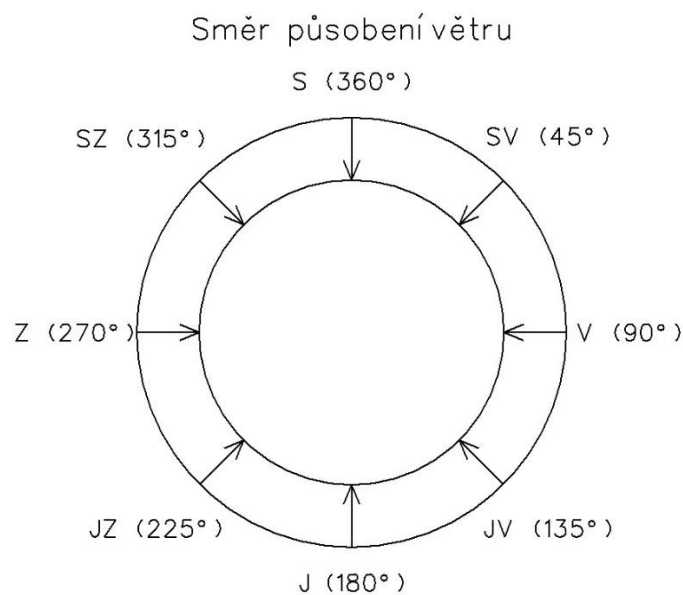
Etapové měření dlouhodobého vlivu namáhání větrem																				
Bod	Etapa 0 (22.07. 2021)						Etapa 1 (28.08. 2021)						Deformace			Stř. chyba posunu		Vyhodnocení posunu		
	Y	X	m _Y	m _X	Y	X	m _Y	m _X	Y	X	m _Y	m _X	dY	dX	dS	m _{dY}	m _{dX}	Test dY	Test dX	
	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	$\alpha = 5 \%$	$\alpha = 5 \%$	
1	561276,4226	1125143,3720			561276,4226	1125143,3720			561276,4226	1125143,3720			0,00	0,00	0,00					
2	561276,5313	1125139,0811	1,83	0,76	561276,5359	1125139,0816	1,33	0,23	561276,5359	1125139,0816	1,33	0,23	4,63	0,50	4,65	2,26	0,80	Prokázán	Neproklázán	
Bod	Etapa 0 (22.07. 2021)						Etapa 1 (28.08. 2021)						Deformace			Stř. chyba posunu		Vyhodnocení posunu		
	Y	X	m _Y	m _X	Y	X	m _Y	m _X	Y	X	m _Y	m _X	dY	dX	dS	m _{dY}	m _{dX}	Test dY	Test dX	
	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[m]	[m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	$\alpha = 5 \%$	$\alpha = 5 \%$	
1	561276,4226	1125143,3720			561276,4226	1125143,3720			561276,4226	1125143,3720			0,00	0,00	0,00					
2	561277,7225	1125139,6250	0,50	0,23	561277,7185	1125139,6241	0,26	1,03	561277,7185	1125139,6241	0,26	1,03	-4,03	-0,88	4,13	0,56	1,05	Prokázán	Neproklázán	
3	561277,7050	1125139,0658	1,46	0,21	561277,6997	1125139,0643	0,36	1,85	561277,6997	1125139,0643	0,36	1,85	-5,33	-1,50	5,54	1,50	1,86	Prokázán	Neproklázán	
4	561276,5359	1125139,0816	1,33	0,23	561276,5311	1125139,0809	0,59	2,15	561276,5311	1125139,0809	0,59	2,15	-4,78	-0,63	4,83	1,46	2,16	Prokázán	Neproklázán	

4.5.2 Vyhodnocení okamžitého účinku namáhání větrem

Z dat získaných pomocí anemometru byl pro jednotlivé etapy určen převládající směr větru (úhlová výseč) a maximální dosažená rychlost působení větru. Pro vyhodnocení a interpretaci výsledků odklonů od svislice byla z celkového objemu dat jednotlivých etap měření vybrána 1 absolutně synchronizovaná časová sekvence v délce trvání 10 s, u které bylo detekováno působení větru o největší intenzitě. Tato sekvence z každé etapy představuje porovnání dvou nezávislých metod, které reprezentují totální stanice v nastavení automatického sledování a měření odrazného hranolu a akcelerometr měřící zrychlení pomocí čidel. Tyto metody umožňují oproti statickému etapovému měření filtrovat jeden konkrétní vnější vliv, který představuje vítr a stanovovat jeho přímé působení na konstrukci rozhledny za dané rychlosti a směru.

4.5.2.1 Směr a rychlost větru

Směr větru udává směr odkud vítr vane. Tento parametr lze udávat pomocí světových stran nebo pomocí azimutu ve stupních. Obrázek 30 znázorňuje směr působení větru a jeho vyjádření. Intenzita větru představuje rychlost větru v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ nebo v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

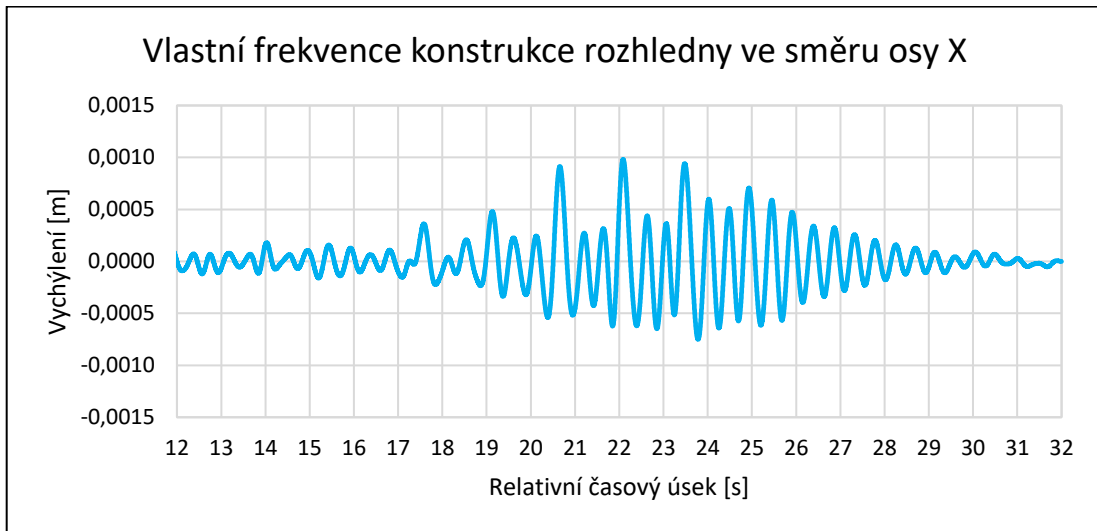


Obrázek 30 – Směr působení větru [autor]

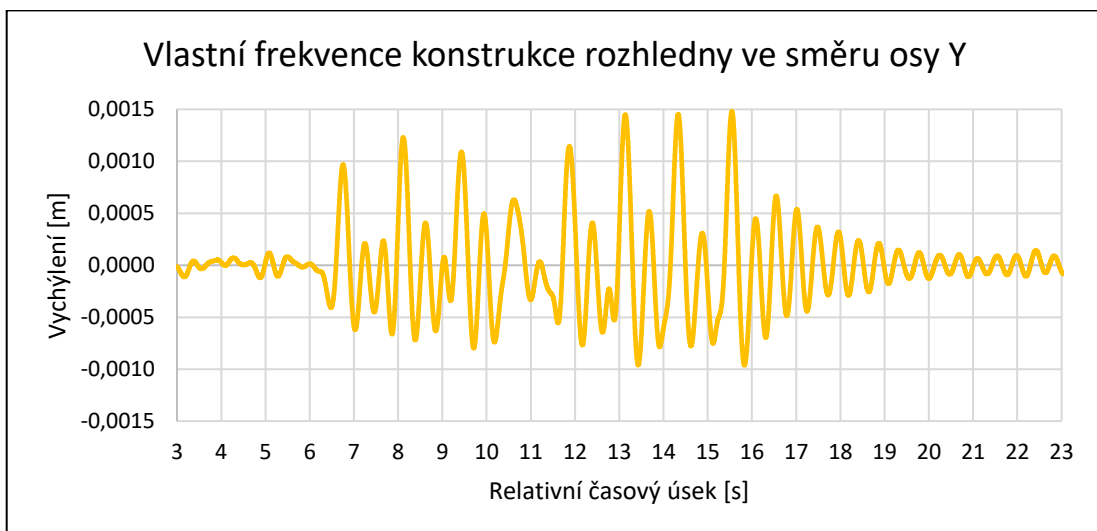
4.5.2.2 Vybuzení kmitání

V rámci 0. etapy před samotným měřením sekvencí bylo realizováno manuální vybuzení kmitání rozhledny a sledování jeho odezvy. Vybuzení kmitání nám ukazuje reálnou vlastní frekvenci konstrukce rozhledny. Hodnota vlastní frekvence konstrukce je opakovaně v řádu 2 Hz (viz Graf 17 a Graf 18). To odpovídá frekvenci dosažené při

experimentálním testování totální stanice a také řádovému určení dle použitého vztahu (13) pro přibližné určení základní frekvence a zasazení do kontextu problematiky.



Graf 17 – Vlastní frekvence konstrukce rozhledny ve směru osy X



Graf 18 – Vlastní frekvence konstrukce rozhledny ve směru osy Y

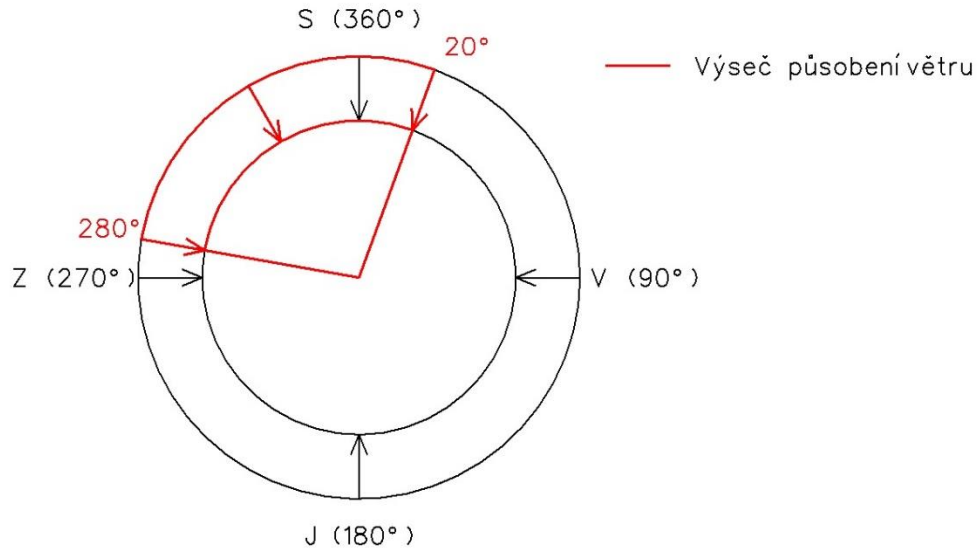
Hodnota vychýlení v jednotlivých osách při vybuzení kmitání manuální silou dosahuje v maximálním rozmezí pohybu kmitání 1,7 mm v ose X a 2,4 mm v ose Y. Orientace os X a Y je shodná s orientací S-JTSK.

4.5.2.3 Měření 0. etapy (22. 7. 2021)

Nejvyšší zaznamenaná hodnota rychlosti větru v průběhu měření 0. etapy činila $4,9359 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Převládají směr větru působil ve výšce od 280° do 20° (viz Obrázek 31), jednalo se tedy o převládající severozápadní a severní vítr. V průběhu měření byla

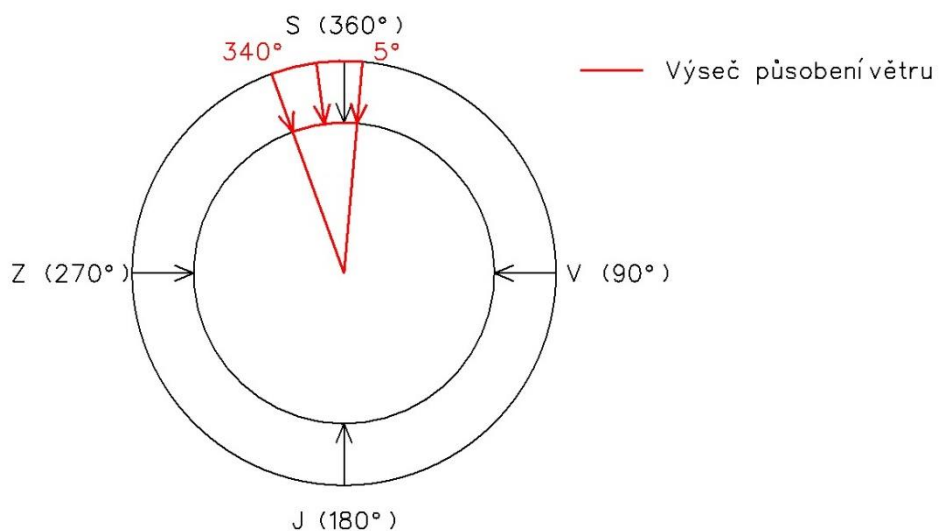
zaznamenána řada poryvů jiného směru působení, nelze je ovšem nijak kvantifikovat z důvodu jejich velké proměnlivosti.

Osy souřadnicového systému akcelerometru byly shodné s orientací os S-JTSK.

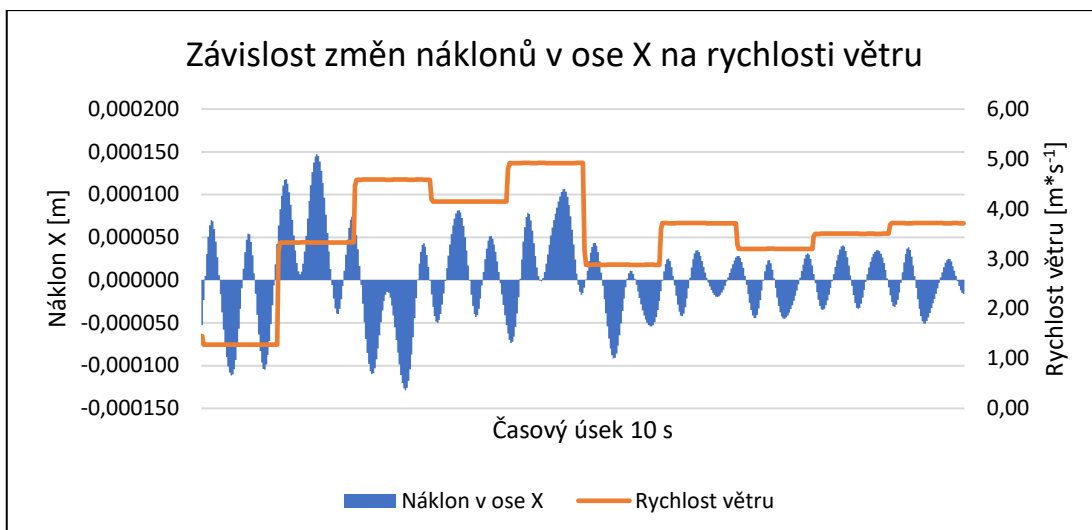


Obrázek 31 – Výseč převládajícího směru větru v průběhu 0. etapy [autor]

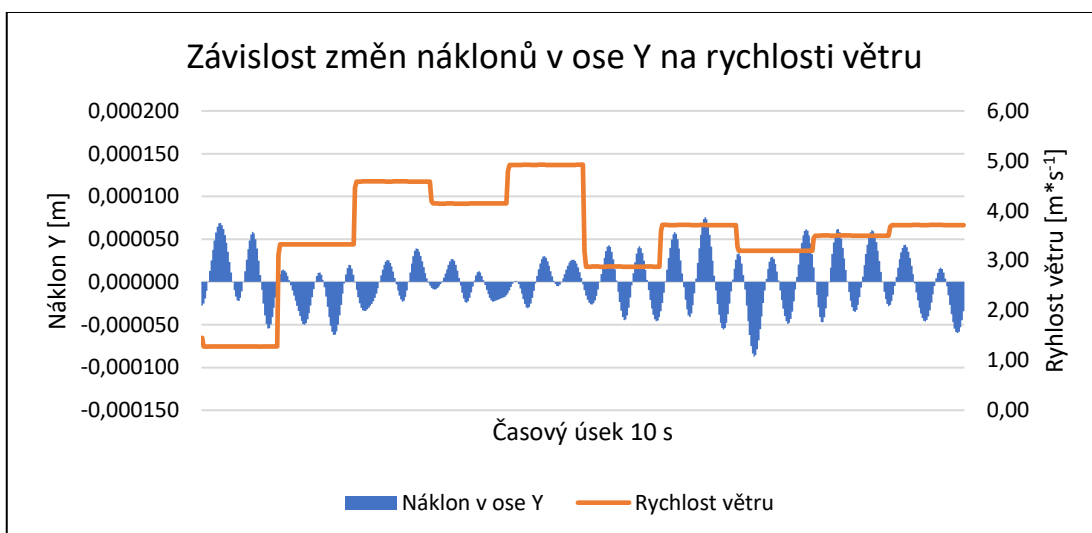
Převládající směr větru ve vybrané 10 s dlouhé sekvenci 0. etapy byl $340^{\circ}-5^{\circ}$, jedná o podmnožinu výseče působení převládajícího směru větru v průběhu celé 0. etapy. Průběh odchylek v jednotlivých osách v závislosti na rychlosti větru vyobrazuje pro akcelerometr Graf 19 a Graf 20. Dále Graf 21 a Graf 22 vyobrazuje zaznamenané odchylky během měření totálními stanicemi.



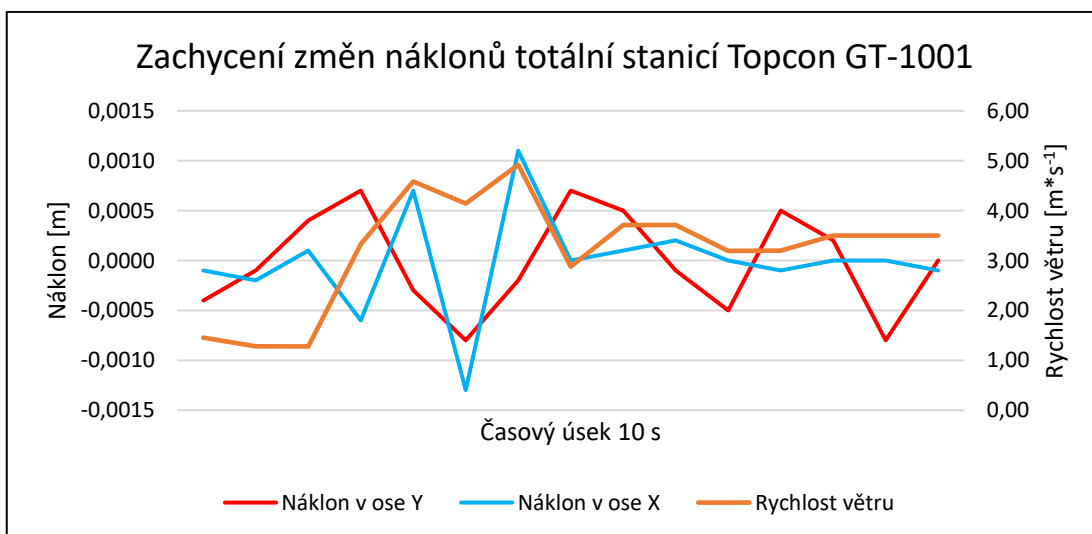
Obrázek 32 – Výseč převládajícího směru větru během 10 s úseku 0. etapy [autor]



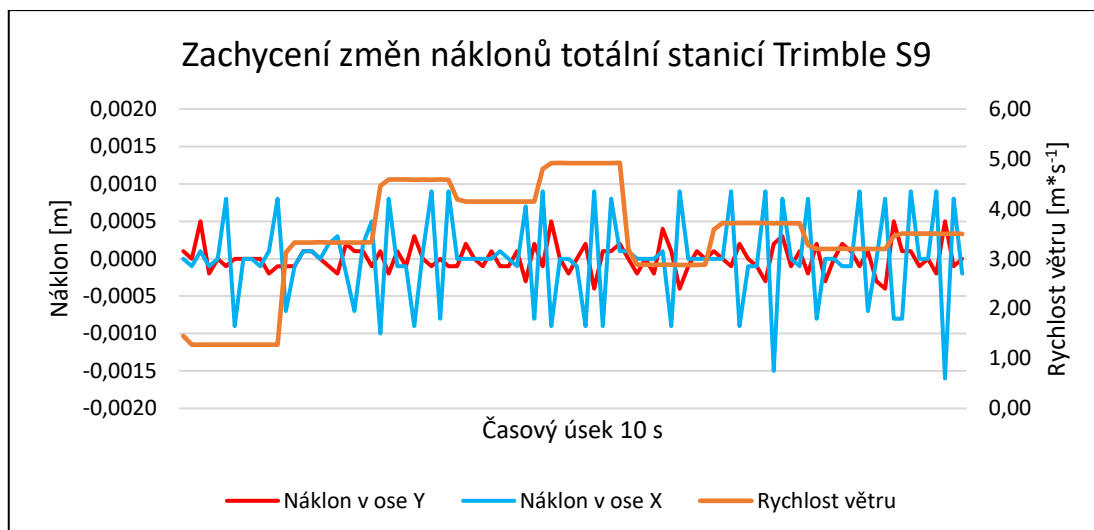
Graf 19 – Závislost změn náklonů v ose X na rychlosti větru v rámci 0. etapy



Graf 20 – Závislost změn náklonů v ose Y na rychlosti větru v rámci 0. etapy



Graf 21 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Topcon GT-1001 v rámci 0. etapy



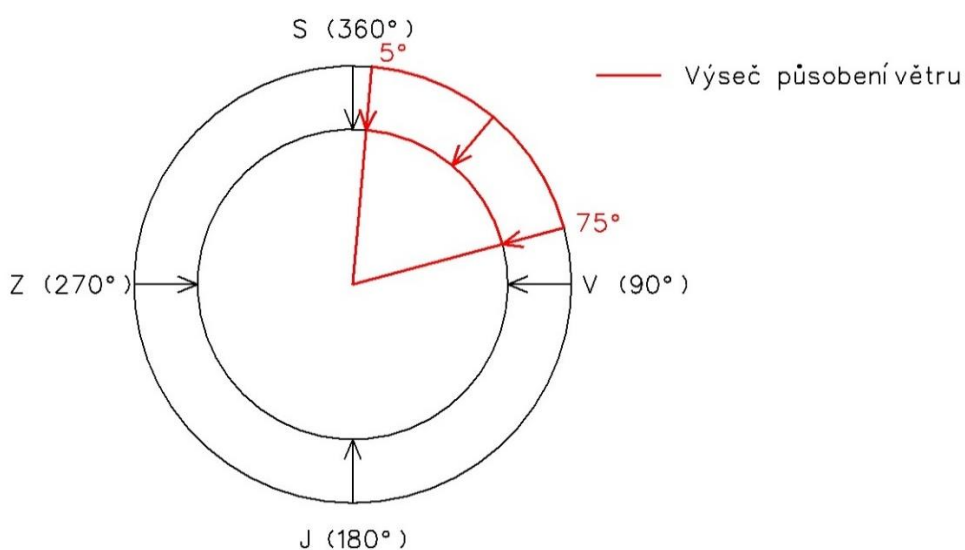
Graf 22 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Trimble S9 v rámci 0. etapy

Tabulka 10 – Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 0. etapy

Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 0. etapy					
Akcelerometr		Topcon GT-1001		Trible S9	
dY [m]	dX [m]	dY [m]	dX [m]	dY [m]	dX [m]
0,00009	0,00015	0,0008	0,0013	0,0005	0,0016

4.5.2.4 Měření 2. etapy (22. 4. 2022)

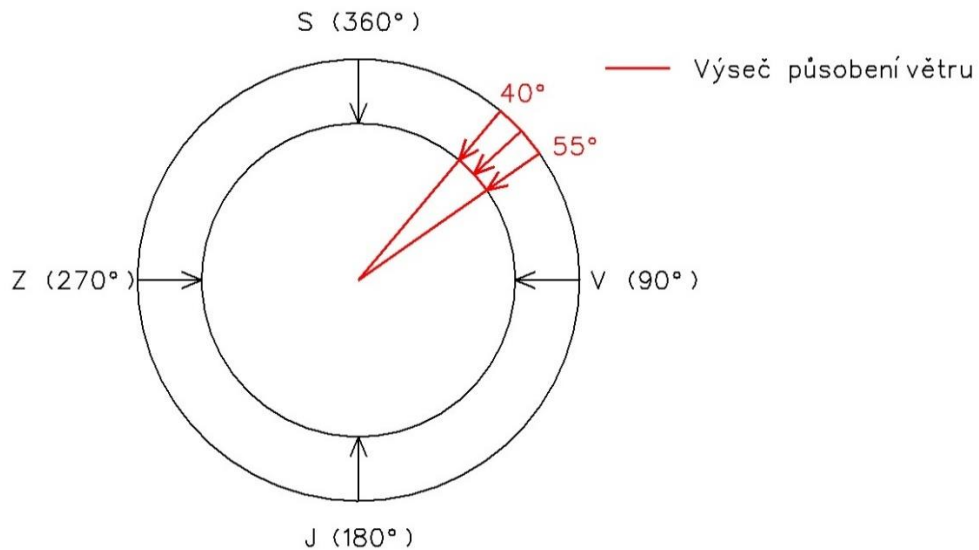
Nejvyšší zaznamenaná hodnota rychlosti větru v průběhu měření 2. etapy činila $6,3825 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Převládají směr větru působil ve výšce od 5° do 75° (viz Obrázek 33), jednalo se tedy o převládající severovýchodní a severní vítr.



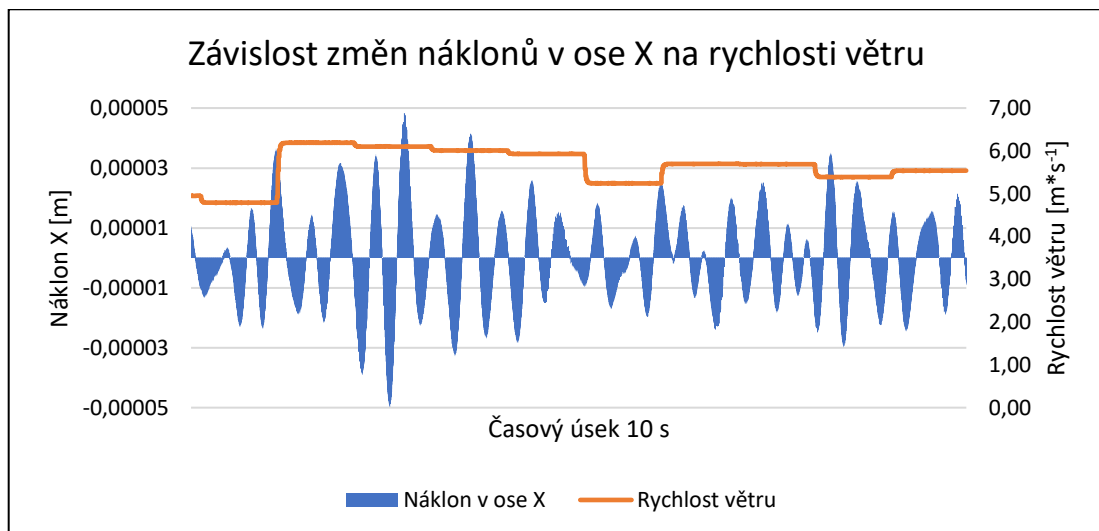
Obrázek 33 – Výšeč převládajícího směru větru v průběhu 2. etapy [autor]

Převládající směr větru ve vybrané 10 s dlouhé sekvenci 2. etapy byl 40° – 55° , jedná o podmnožinu výšece působení převládajícího směru větru v průběhu celé 2. etapy (5° – 75°). Průběh odchylek v jednotlivých osách v závislosti na rychlosti větru vyobrazuje pro akcelerometr Graf 23 a Graf 24. Dále Graf 25 a Graf 26 vyobrazuje zaznamenané odchylky během měření totálními stanicemi.

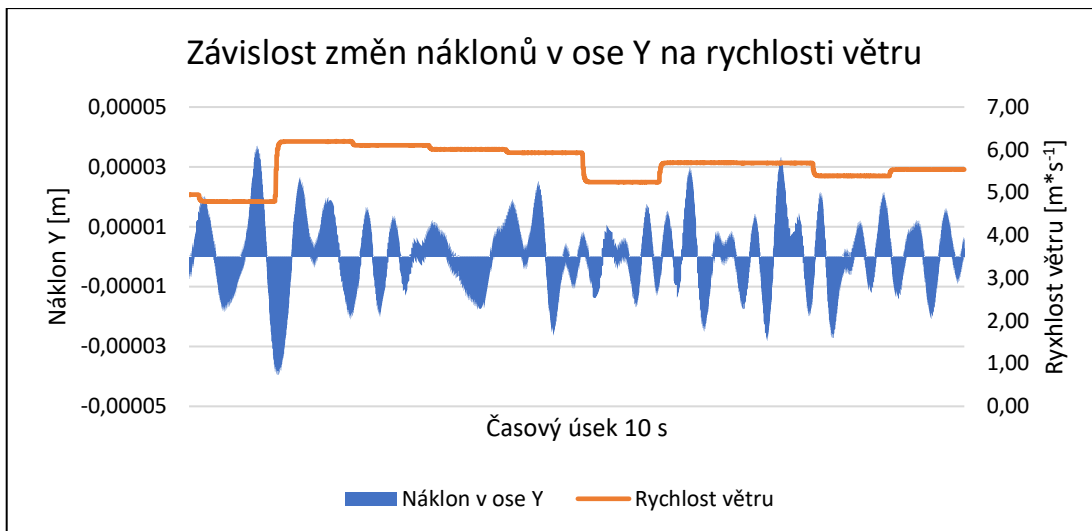
Osy souřadnicového systému akcelerometrů byly shodné s orientací os S-JTSK.



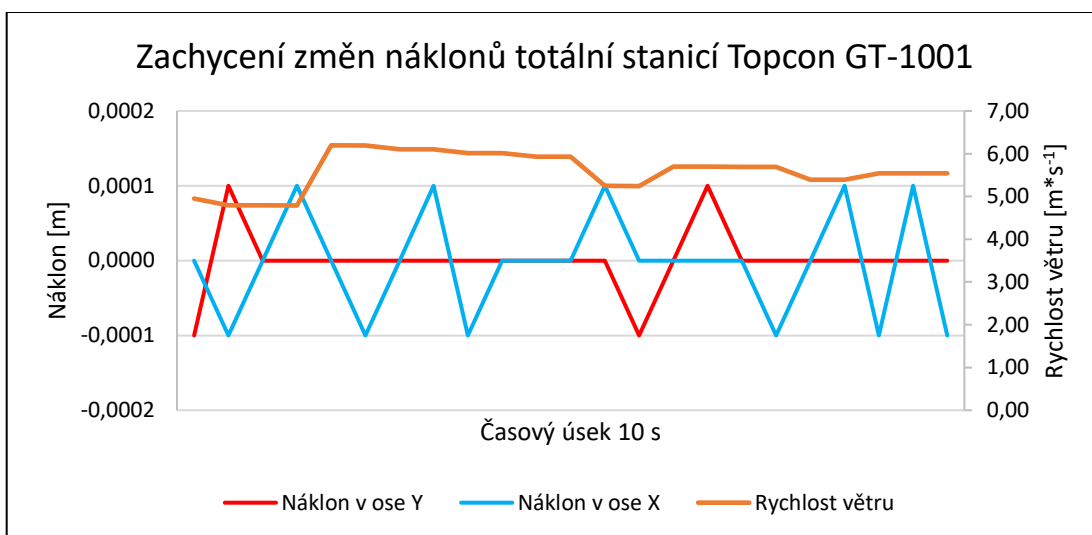
Obrázek 34 – Výšece převládajícího směru větru během 10 s úseku 2. etapy [autor]



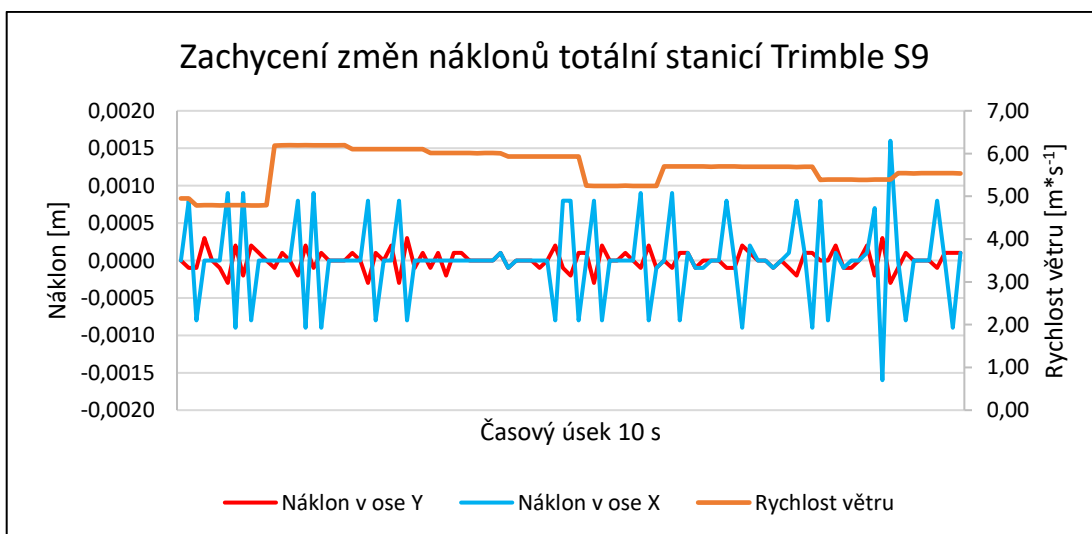
Graf 23 – Závislost změn náklonů v ose X na rychlosti větru v rámci 2. etapy měření



Graf 24 – Závislost změn náklonů v ose Y na rychlosti v rámci 2. etapy



Graf 25 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Topcon GT-1001 v rámci 2. etapy



Graf 26 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Trimble S9 v rámci 2. etapy

Tabulka 11 – Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 2. etapy

Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 2. etapy					
Akcelerometr		Topcon GT-1001		Trimble S9	
dY [m]	dX [m]	dY [m]	dX [m]	dY [m]	dX [m]
0,000039	0,000050	0,0001	0,0001	0,0003	0,0016

4.5.2.5 Zhodnocení měření okamžitého účinku namáhání větru

Již rozdíl struktury dat mezi akcelerometrem a totálními stanicemi napovídá o rozdílech. Akcelerometrická data nabízejí záznam s možností frekvence až 1000 Hz (0,001 s). Z tohoto pohledu nejsou totální stanice konkurenceschopné, protože jejich možnosti záznamů se akcelerometrům nepřibližují ani řádově. Možnost záznamu dat použitých totálních stanic je 4 Hz (0,25 s u Topcon GT-1001) resp. 10 Hz (0,1 s u Trimble S9).

Dalším významným rozdílem je rozlišovací schopnost měření. Vypočítané hodnoty posunů (ze zrychlení) u akcelerometrů umožňují rozlišovací schopnost měření v řádu μm a vyšší. Z tohoto hlediska totální stanice opět nemohou být konkurenceschopné, jejich rozlišovací schopnost je submilimetrová, ale přesnost samotného měření na základě experimentálního testování metody je v rozmezí 1–3 mm.

V důsledku nedostatečné intenzity působení větru v průběhu dynamického měření, nemohl být dostatečně relevantně otestován potenciál totálních stanic v nastavení automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu. Náklony konstrukce při zaznamenané rychlosti větru do $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou pod rozlišovací schopnosti totálních stanic. Zaznamenané hodnoty změn polohy v horizontální rovině totálními stanicemi jsou v mezích nejistot a nejsou tedy prokazatelné.

Z tohoto důvodu je zapotřebí pro adekvátní využití totálních stanic realizovat měření pro určení změn náklonů rozhledny za vyšší rychlosti působení větru v důsledku kterého by došlo ke značně větším odklonům od svislice, které by již byly detekovatelné také totálními stanicemi.

5 Závěr

Pro účely měření změn náklonů konstrukce rozhledny v důsledku namáhání větrem bylo nejprve nutné zvolit vhodnou metodu, která by umožnila kontinuálně zaznamenávat data, a tak vyhodnotit okamžité účinky namáhání větrem. Z tohoto důvodu bylo nezbytné zvolenou metodu otestovat. Jednalo se o experimentální testování nastavení totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu. Na základě experimentálního testování můžeme stanovit přesnost metody v rozmezí 1–3 mm pro určení vychýlení rozhledny od svislice v maximální očekávaném odklonu ± 20 mm do frekvence pohybu 2 Hz.

Výsledkem vlastního měření rozhledny Velký Kosíř jsou dva odlišné pohledy na konstrukci rozhledny, a to z dlouhodobého nebo okamžitého hlediska.

Statická etapová měření nám umožnila sledovat změny konstrukce z dlouhodobého hlediska. Tyto změny nastávají v převládajícím směru západ–východ s mírným stočením ve směru jihozápad–severovýchod v celkové velikosti do 5 mm. Směr působení těchto změn je kombinací řady vnějších vlivů, které od sebe nelze jednoznačně oddělit.

Kontinuální etapové měření (dynamické měření) nám umožnilo sledovat okamžité účinky větru na konstrukci rozhledny. Data získaná akcelerometrem nám poskytují výchozí skutečnost, že změny v důsledku rychlosti větru do $7 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ jsou pod rozlišovací schopnost totálních stanic v režimu automatického sledování a zaměřování. Z tohoto důvodu nemohly být z pohledu totálních stanic prokazatelně stanoveny odklony od svislice, protože byly v nejistotách měření. Pro detekování změn odklonu od svislice pomocí totálních stanic je nutné, aby měření bylo realizováno za vyšší rychlosti větru v důsledku kterého by došlo ke značně větším odklonům od svislice, které by se řádově přibližovaly experimentálnímu testování totální stanice v režimu automatického sledování a zaměřování odrazného hranolu.

Seznam použitých zdrojů

- [1] Rozhledna Velký Kosíř [online]. [cit. 2022-02-07]. Dostupné z:
<https://rozhledna-kosir.cz/>
- [2] SEDLÁČEK, Svatopluk. Rozhledna Velký Kosíř. Mikroregion KOSÍŘSKO [online]. Těšetice: ANTEE, © 2022 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z:
https://www.kosirsko.cz/rozhledna_kosir
- [3] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. Inženýrská geodézie I: GE16 Modul 02 Geodézie ve stavebnictví. Brno, 2006.
- [4] ČSN 73 0405 Měření posunů stavebních objektů. Zdíby: Český normalizační institut, 1997.
- [5] Velké stavby světa: Nejvyšší mrakodrap, Dokument ČT2. Spojené státy americké, 2011.
- [6] ČSN 73 0401 Názvosloví v geodézii a kartografii. Praha: Český normalizační institut, 1990.
- [7] České rozhledny [online]. Chroust, ©2001 - 2012 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z:
<http://rozhledny.yc.cz/index.html>
- [8] EMPORIS [online]. Hamburg: Emporis, © 2000-2022 [cit. 2022-04-28]. Dostupné z: <https://www.emporis.com/>
- [9] BLAŽEK, Radim a Zdeněk SKOŘEPA. Geodézie 3: Výškopis. Třetí. Praha: ČVUT, 2009. ISBN 978-80-01-04358-5.
- [10] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. Inženýrská geodézie I: GE16 modul 03 Návody ke cvičení. Brno, 2006.
- [11] ŠVÁBENSKÝ, Otakar, Alexej VITULA a Jiří BUREŠ. Inženýrská geodézie I: GE16 Modul 03 Návody ke cvičení. Brno: VUT Brno Fakulta stavební, 2006.
- [12] PROCHÁZKA, Jaromír. SYLABUS 11. PŘEDNÁŠKY Z INŽENÝRSKÉ GEODÉZIE: Měření posunů a přetvoření [online]. Praha, 2018 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/106972833-Sylabus-11-prednasky-z-inzenyrske-geodezie.html>

- [13] GEONET. Geospatial Information Authority of Japan [online]. Japan: Geospatial Information Authority of Japan [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://www.gsi.go.jp/ENGLISH/geonet_english.html
- [14] ČÁBELKA, Miroslav. Úvod do GPS. DOCPLAYER [online]. DocPlayer.cz, ©2022 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18769279-Uvod-do-gps-miroslav-cabelka.html>
- [15] JURÁNEK, Martin. Prostředky automatického řízení [online]. [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: https://homel.vsb.cz/~jur286/prostredky_aut_rizeni/preklad.htm
- [16] KUTÍLEK, Patrik a Adam ŽIŽKA. Měření kinematiky a dynamiky pohybu končetin pomocí akcelerometru [online]. Praha [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: http://esf.fbmi.cvut.cz/sites/default/files/KA03_4_Mereni_kinematiky_a_dynami_ky_pohybu_koncetin_pomoci_akcelerometru_komplet.pdf
- [17] Monitoring staveb. CCE Praha [online]. Praha: CCE Praha, © 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.ccepraha.cz/nabizene-sluzby/monitoring-staveb/>
- [18] Nano Triaxial Tilt Sensor Node Range. Senceive [online]. London: Senceive, © 2022 [cit. 2022-05-01]. Dostupné z: <https://www.senceive.com/tilt-sensors/nano-triaxial-tilt-sensor-node-range>
- [19] Archiweb [online]. Brno: Archiweb, ©1997-2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.archiweb.cz/>
- [20] Topcon GT SERIES: Datasheet [online]. [cit. 2022-02-24]. Dostupné z: https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/gt_series_datasheet_7010_2231_reva_sm_1.pdf
- [21] BRABEC, Petr a Filip BARTŮNĚK. Rovnoměrný pohyb po kružnici. Fyzika 007 [online]. 2012 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://sites.google.com/site/fyzika007/mechanika/rovnomerne-pohyb-po-kruznici>
- [22] Návod na použitie, Geodetická totálna stanica: Séria GT-1000, Séria GT-500. 2016.

- [23] Topcon GT SERIES: ROBOTIC TOTAL STATION [online]. 2016 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z:
https://www.topconpositioning.com/sites/default/files/product_files/gt_series_brochure_b_team_en_eu_low.pdf
- [24] Nové robotické totální stanice Topcon GT-1200 a GT-600. Zeměměřič [online]. 2020 [cit. 2022-03-01]. Dostupné z: <https://www.zememeric.cz/topcon-gt-1200-a-topcon-gt-600/>
- [25] Trimble S9: Total Station. Trimble [online]. c2015-2021 [cit. 2022-03-02]. Dostupné z:
https://geospatial.trimble.com/sites/geospatial.trimble.com/files/2021-04/Datasheet%20-%20Trimble%20S9%20S9HP%20Total%20Station%20-%20English%20US%20-%20Screen_1.pdf
- [26] MEYERHÖFFER, Jakob. Certificate: Trimble S9 1" DR HP with serial number 38410016. Danderyd, Sweden, 2015.
- [27] Trimble S9. Geotronics Praha [online]. 2016 [cit. 2022-03-29]. Dostupné z: <https://geotronics.cz/geodezie/totalni-stanice/trimble-s9/>
- [28] Enabling Autolock, FineLock or Long Range FineLock. Trimble Access HELP PORTAL [online]. Trimble, 2018 [cit. 2022-04-03]. Dostupné z: <https://help.trimblegeospatial.com/TrimbleAccess/2018.10/en/Target-lock-modes.htm>
- [29] TRIMBLE S9 TOTAL STATION. USER GUIDE. Westminster CO, 2015.
- [30] 3. Přesnost měření. České vysoké učení technické v Praze [online]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, © 2015 [cit. 2022-05-05]. Dostupné z: https://inggeo.fsv.cvut.cz/wiki/doku.php?id=04_teorie_chyb:0403_presnost_mereni
- [31] ČSN EN 1991-1-4. Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 1-4: Obecná zatížení – Zatížení větrem. 2. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020.

Seznam použitých zkratek

ČSN	Česká technická norma
PN	Přesná nivelace
VPN	Velmi přesná nivelace
GNSS	Global Navigation Satellite System
RTK	Real time kinematic
RPM	Revolutions per minute
v. č.	Výrobní číslo
DR	Direct reflex
EDM	Electronic Distance Measurement
MNČ	Metoda nejmenších čtverců
S-JTSK	Systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

Seznam obrázků

Obrázek 1 – Rozhledna Velký Kosíř [doc. Bureš]	10
Obrázek 2 – Relativní a absolutní posuny [autor]	13
Obrázek 3 – Trigonometrické měření svislých posunů [autor]	16
Obrázek 4 – Trigonometrické měření vodorovných posunů [autor]	17
Obrázek 5 – Polární metoda [autor].....	17
Obrázek 6 – Metoda záměrné přímky [autor].....	18
Obrázek 7 – Senzor náklonu Senceive [18].....	20
Obrázek 8 – Detail na kamenem obložený podstavec rozhledny [autor]	21
Obrázek 9 – Ochranná stříška patek [autor]	22
Obrázek 10 – Aparatura testování metody [autor].....	25
Obrázek 11 – Detail snímání otáček [autor]	25
Obrázek 12 – Mechanismus kliky [autor].....	25
Obrázek 13 – Rovina pohybu odrazného hranolu [autor].....	26
Obrázek 14 – Poloměr otáčení [autor]	27
Obrázek 15 – Odrazný hranol [autor]	27
Obrázek 16 – Schémata automatického vyhledávání cíle [22].....	30
Obrázek 17 – Algoritmus rozhodování v režimu Auto Tracking [22]	31
Obrázek 18 – Nastavení konfigurace [22]	32
Obrázek 19 – Konstanty přístroje [22]	32
Obrázek 20 – Ilustrativní excentricita odrazného hranolu [autor]	32
Obrázek 21 – Topcon GT -1001 [autor]	34
Obrázek 22 – Trimble S9 [autor]	34
Obrázek 23 – Úhel v horizontální rovině d_a a vertikální rovině d_z [autor]	38
Obrázek 24 – Diference délek [autor].....	42
Obrázek 25 – Radiální odchylky [autor].....	44
Obrázek 26 – Schéma rozmístění odrazných hranolů [autor].....	52
Obrázek 27 – Postavení totálních stanic vzhledem k zájmovému objektu [doc. Bureš]	53
Obrázek 28 – Anemometr a čidlo akcelerometru [autor]	54
Obrázek 29 – Příklad dlouhodobého působení větru v blízkosti rozhledny [autor]	55
Obrázek 30 – Směr působení větru [autor]	59
Obrázek 31 – Výšeč převládajícího směru větru v průběhu 0. etapy [autor]	61
Obrázek 32 – Výšeč převládajícího směru větru během 10 s úseku 0. etapy [autor]	61

Obrázek 33 – Výseč převládajícího směru větru v průběhu 2. etapy [autor]	63
Obrázek 34 – Výseč převládajícího směru větru během 10 s úseku 2. etapy [autor]	64

Seznam tabulek

Tabulka 1 – Přehled sekvencí experimentálního testování.....	27
Tabulka 2 – Závislost obvodové rychlosti na poloměru otáčení a úhlové rychlosti.....	28
Tabulka 3 – Vývoj diferencí $d\alpha$ [g] od referenčního úhlu	39
Tabulka 4 – Vývoj diferencí dz [g] od referenčního úhlu	40
Tabulka 5 – Přesnost určení referenčního tvaru	46
Tabulka 6 – Přesnost určení tvaru během sekvencí	46
Tabulka 7 – Směrodatné odchylky	48
Tabulka 8 – Procentuální zastoupení odlehlých hodnot nad 10 mm od ref. tvaru	49
Tabulka 9 – Etapové měření dlouhodobého vlivu namáhání větrem	58
Tabulka 10 – Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 0. etapy....	63
Tabulka 11 – Největší zaznamenané náklony v jednotlivých osách v rámci 2. etapy....	66

Seznam grafů

Graf 1 – Závislost obvodové rychlosti na poloměru otáčení	28
Graf 2 – Počet záznamů popisující sekvence za časový úsek 25 s	35
Graf 3 – Četnost počtu záznamů za 1 s Topcon GT-1001 na 8 m	36
Graf 4 – Četnost počtu záznamů za 1 s Topcon GT-1001 na 46 m	36
Graf 5 – Četnost počtu záznamů za 1 s Trimble S9 na 8 m	36
Graf 6 – Četnost počtu záznamů za 1 s Trimble S9 na 46 m	37
Graf 7 – Vývoj diferencí $d\alpha$ [g]	38
Graf 8 – Vývoj diferencí dz [g]	39
Graf 9 – Vývoj měřených délek pro Topcon GT-1001	42
Graf 10 – Vývoj měřených délek pro Trimble S9	43
Graf 11 – Rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek	44
Graf 12 – Rozdíl extrémních hodnot radiálních odchylek bez odlehlých hodnot	45
Graf 13 – Přesnost určení referenčního tvaru	45
Graf 14 – Přesnost určení tvaru během sekvencí	46
Graf 15 – Systematický vliv	47
Graf 16 – Směrodatné odchylky	47
Graf 17 – Vlastní frekvence konstrukce rozhledny ve směru osy X	60
Graf 18 – Vlastní frekvence konstrukce rozhledny ve směru osy Y	60
Graf 19 – Závislost změn náklonů v ose X na rychlosti větru v rámci 0. etapy	62
Graf 20 – Závislost změn náklonů v ose Y na rychlosti větru v rámci 0. etapy	62
Graf 21 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Topcon GT-1001 v rámci 0. etapy ..	62
Graf 22 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Trimble S9 v rámci 0. etapy	63
Graf 23 – Závislost změn náklonů v ose X na rychlosti větru v rámci 2. etapy měření ..	64
Graf 24 – Závislost změn náklonů v ose Y na rychlosti v rámci 2. etapy	65
Graf 25 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Topcon GT-1001 v rámci 2. etapy ..	65
Graf 26 – Zachycení změn náklonů totální stanicí Trimble S9 v rámci 2. etapy	65

Seznam příloh

Příloha 1	Průběh zenitového úhlu experimentálního testování na vzdálenost 8 m
Příloha 2	Průběh zenitového úhlu experimentálního testování na vzdálenost 46 m
Příloha 3	Průběh vodorovného úhlu experimentálního testování
Příloha 4	Souřadnice bodů experimentálního testování na vzdálenost 8 m
Příloha 5	Souřadnice bodů experimentálního testování na vzdálenost 46 m
Příloha 6	Grafické znázornění vodorovných posunů statického měření