

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM GEODÉZIE A KARTOGRAFIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Testování přesnosti a využitelnosti Leica AP20 AutoPole

Testing the accuracy and usability of the Leica AP20 AutoPole

Vedoucí práce: Ing. Tomáš Jiřikovský, Ph. D.

Praha 2023



Dmitrii Solovev

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE


Příjmení: Solovev	Jméno: Dmitrii	Osobní číslo: 501676
Zadávající katedra: K154, Katedra speciální geodézie		
Studijní program: Geodézie a kartografie		
Studijní obor/specializace: Geodézie a kartografie		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Testování přesnosti a využitelnosti Leica AP20 AutoPole	
Název bakalářské práce anglicky: Testing the accuracy and usability of the Leica AP20 AutoPole	
Pokyny pro vypracování: Návrh, realizace a vyhodnocení testu přesnosti a využitelnosti autokompenzační náklonoměrné výtyčky Leica AP20 AutoPole. Testování bude zaměřeno na běžná měření bez urovnání libely (mírný náklon) a dále na využitelnost při velkých náklonech. Zpracování testovacích měření, zhodnocení, zkušenosti, doporučení, závěry.	
Seznam doporučené literatury: HAMPACHER, M. a ŠTRONER, M. Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii. Praha: Česká technika - nakladatelství ČVUT, ČVUT v Praze, 2015.	
Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Tomáš Jiřikovský, Ph.D.	
Datum zadání bakalářské práce: 24.2.2023	Termín odevzdání BP v IS KOS: 22.5.2023 <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

<u>24.2.2023</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---

Prohlášení:

Prohlašuji, že tato bakalářská práce je výsledkem mé samostatné práce, s výjimkou odborných konzultací s vedoucím bakalářské práce Ing. Tomášem Jiřikovským, Ph.D. Veškeré použité zdroje a literatura jsou uvedeny v seznamu použitých zdrojů.

V Praze dne

.....

Dmitrii Solovev

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomášovi Jiřikovskému, Ph.D. za odborné konzultace, rady a připomínky při zpracování této práce. Zvláště bych chtěl poděkovat Ing. Petrovi Jaškovi, Ph.D. za pomoc s nalezením a realizací daného tématu a Geodetické kanceláři Nedoma&Řezník, s. r. o za zapůjčení měřických přístrojů a veškerých potřebných pomůcek, použitých v rámci dané práce. Dále bych také chtěl poděkovat firmě GEFOS a. s. za poskytnuté podklady použité pro zpracování bakalářské práce, jmenovitě panu Ing. Petru Steinerovi a Martinu Pickovi.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá testováním využitelnosti a přesnosti nového systému Leica AP20 AutoPole, který umožňuje měření při libovolném náklonu výtyčky s hranolem.

Přesnost kompenzace náklonu byla zjišťována opakovaným měřením na experimentálním bodovém poli. Testování proběhlo ve čtyřech sériích s různými náklony výtyčky a různými typy odrazných hranolů pro zjištění vlivu konkrétního typu hranolu na měření s kompenzací náklonu.

Výsledkem práce jsou směrodatné odchylky prostorových souřadnic měřených bodů experimentálního bodového pole.

Klíčová slova

AP20, testování, přesnost, geodézie, náklon, kompenzace, Leica.

Abstract

This bachelor's thesis deals with usability and accuracy testing of the new Leica AP20 AutoPole system, which allows measurements at any inclination of the prism pole.

The accuracy of inclination compensation was determined by repeated measurements on an experimental point field. Testing was conducted in four series with different prism pole inclinations and different types of reflective prisms to determine the influence of a specific prism type on measurements with inclination compensation.

The results of the thesis are the standard deviations of spatial coordinates of measured points in the experimental point field.

Keywords

AP20, testing, accuracy, geodesy, tilt, compensation, Leica

Obsah

Úvod	8
1. Charakteristika Leica AP20 AutoPole.....	9
1.1 Princip fungování IMU jednotky.....	12
1.2 Možný způsob výpočtu souřadnic bodu s kompenzací náklonu.....	13
1.3 Použité přístroje a vybavení.....	16
2. Zvolené metody testování	20
2.1 Testování funkce kompenzace náklonu	20
2.2 Teoretický podklad k výpočtům přesnosti měřených bodů:	21
3. Zpracování testů kompenzace náklonu	23
3.1 Výpočet výběrových směrodatných odchylek souborů měření s AP20.....	24
3.2 Výpočet směrodatných odchylek od vztažných souřadnic	25
4. Výsledky testování kompenzace náklonu	26
5. Použití AP20 s náklony většími než 90°	36
6. Předchozí testování AP20	37
Závěr	38
Seznam použitých zdrojů	39
Seznam obrázků.....	40
Seznam tabulek	42
Seznam příloh	43

Úvod

Přesnost měření vždy byla klíčovým faktorem pro všechny druhy geodetických prací, obzvláště v dnešní době kromě přesnosti je vyžadována rychlost sběru a zpracování dat. Kvůli tomu během posledních 20 let vznikly modernější přístroje, umožňující samostatně provádět velmi přesná a rychlá měření (totální stanice s funkcí vyhledávání hranolu apod...).

Relativně nedávno vzniklo nové měřicí zařízení, které poskytuje možnost geodetických měření pomocí totální stanice bez nutnosti sledování svislosti výtyčky s hranolem. Jedná se o nový systém Leica AP20 AutoPole, který umožňuje měření při libovolném náklonu pomocí zabudované inerciální měřicí jednotky (IMU).

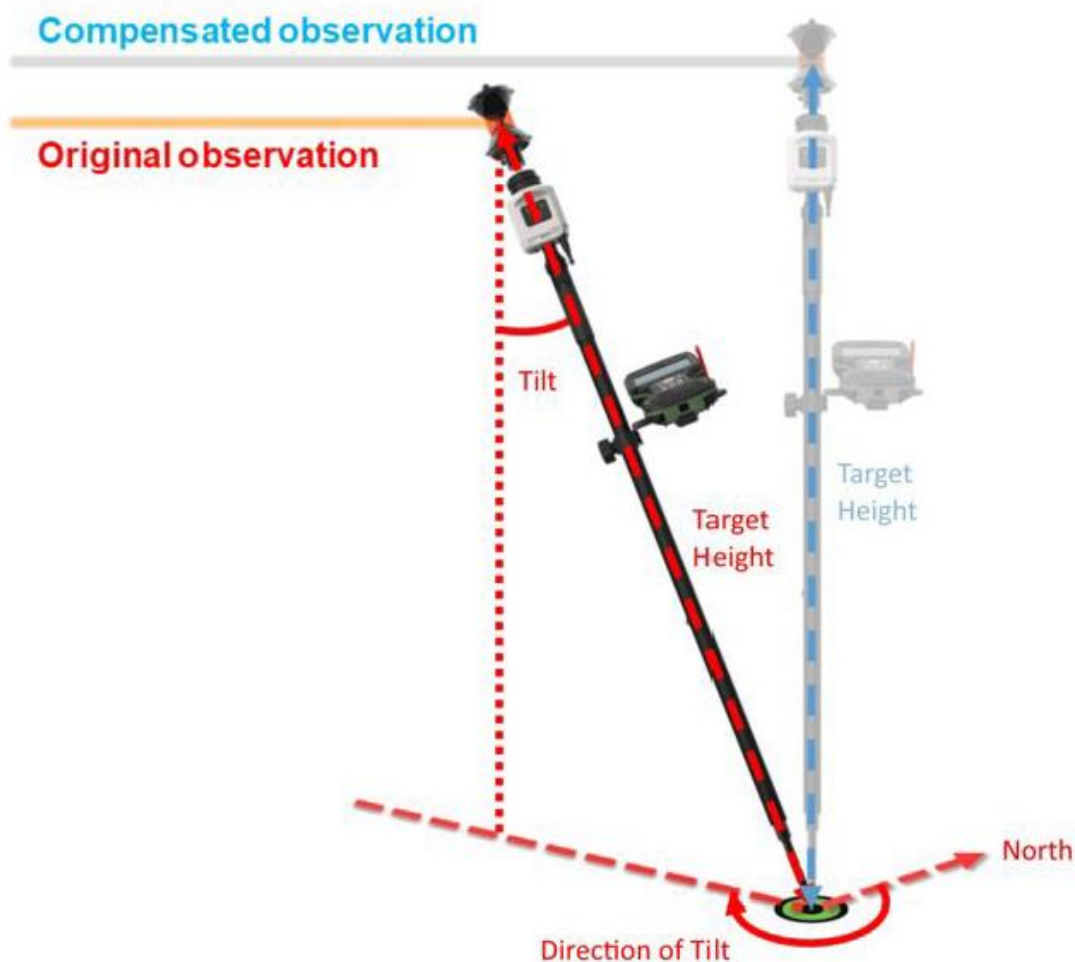
Cílem práce je zhodnotit přesnost tohoto zařízení a efektivitu při různých aplikacích. V práci budou popsány funkce Leica AP20 AutoPole a provedeny experimenty, které pomohou porovnat jeho výsledky s referenčními hodnotami. Výsledky této práce by měly být užitečné pro odborníky v oblasti geodézie a stavebnictví, kteří využívají měřicí techniku v praxi a chtějí si udělat představu o vlastnostech Leica AP20 AutoPole a jeho přínosu pro jejich práci.

Charakteristika Leica AP20 AutoPole

Leica AP20 AutoPole má v sobě tři funkce:

1. Kompenzace náklonu výtyčky s hranolem
2. Automatické měření výšky výtyčky s hranolem – Pole Height
3. Identifikace hranolu – Target ID

Testovaná Leica AP20 je vybavena inerciální měřičkou jednotkou IMU („**inertial measurement unit**“), díky které se dopočítává prostorová poloha hrotu výtyčky s hranolem při libovolném natočení a náklonu. IMU jednotka v AP20 neustále měří zrychlení a úhlovou rychlost. Tyto měření spolu s nepřetržitými polohami zaměřovaného bodu z totální stanice jsou používány v upraveném inerciálním systému (INS) integrovaném do AP20. Pomocí matematických výpočtů algoritmus INS převádí měření z IMU do souřadnicového systému totální stanice a určuje náklon tyče [1].



Obr: 1: Kompenzace náklonu [2]

Pro fungování funkce kompenzace náklonu je nutno, aby byla totální stanice v režimu uzamčení na hranol (Lock) a módu kontinuálního měření délek (Tracking) a také musí být vybavena radio-držadlem RH18. Před měřením IMU je potřeba inicializovat krátkým pohybem. Přesnost měření při kompenzaci náklonu je vyjádřena dodatečnou nejistotou ve 2D poloze při náklonu do 90° , což je $3 \text{ mm} + 0,6 \text{ mm}/^\circ$ náklonu při výšce tyčky 1,6 m a $4 \text{ mm} + 0,7 \text{ mm}/^\circ$ náklonu při výšce výtyčky 2,0 m. Dodatečnou 2D nejistotou je myšlena směrodatná odchylka kompenzace náklonu bez vlivu přesnosti totální stanice.

Model AP20 umožňuje automatické odečítání výšky výtyčky s hranolem, kterou pak posílá do kontroleru či totální stanice. Pro automatické odečítání výšky je potřeba mít výtyčku GLS51 nebo CRP4, která při docvaknutí zámku na výšku po 5 cm vysílá signál, obsahující informace o změřené výšce do AP20, která ho pak posílá do polního softwaru. Dále je AP20 vybavena funkcí identifikace hranolu pomocí ID. Princip funkce spočívá v tom, že AP20 vysílá ID používaného hranolu, díky čemu se totální stanice nemůže uzamknout na jiný hranol.

Leica AP20 AutoPole je plně kompatibilní se všemi totálními stanicemi majícími v sobě již výše zmíněné Lock+Power Search. Jedná se o modely TS16 P/I, TS60 a MS50. Podrobnější popis funkcí s charakteristikami AP20 lze najít v [3] a [4].



Obr. 2: Leica AP20 AutoPole [5]

1.1 Princip fungování IMU jednotky

Jak bylo uvedeno výše, IMU je sensorová jednotka, která měří akceleraci a úhlovou rychlost ve třech osách. Princip fungování IMU je založen na využití kombinace akcelerometru a gyroskopu.

Akcelerometr je senzor, který měří lineární zrychlení objektu. V IMU je umístěn v každé ze tří os (x , y , z) a detekuje změny rychlosti pohybu nebo změny polohy v těchto osách. Například, když se IMU pohybuje vpřed, akcelerometr v ose x zaznamená zrychlení směrem dopředu.

Gyroskop je zařízení nebo senzor používaný k měření nebo udržování orientace a otáčení objektu. Jeho hlavní funkcí je zachytávání změn v úhlové rychlosti rotujícího tělesa v prostoru. Existují různé typy gyroskopů, ale jeden z nejběžnějších je tzv. setrvačný gyroskop. Setrvačné gyroskopy využívají zákony setrvačnosti a převádějí úhlovou rychlost rotace na pohyb setrvačné hmoty nebo pohyb elektromagnetického pole. Tento pohyb je následně detekován a použit k měření nebo **udržování orientace v prostoru**.

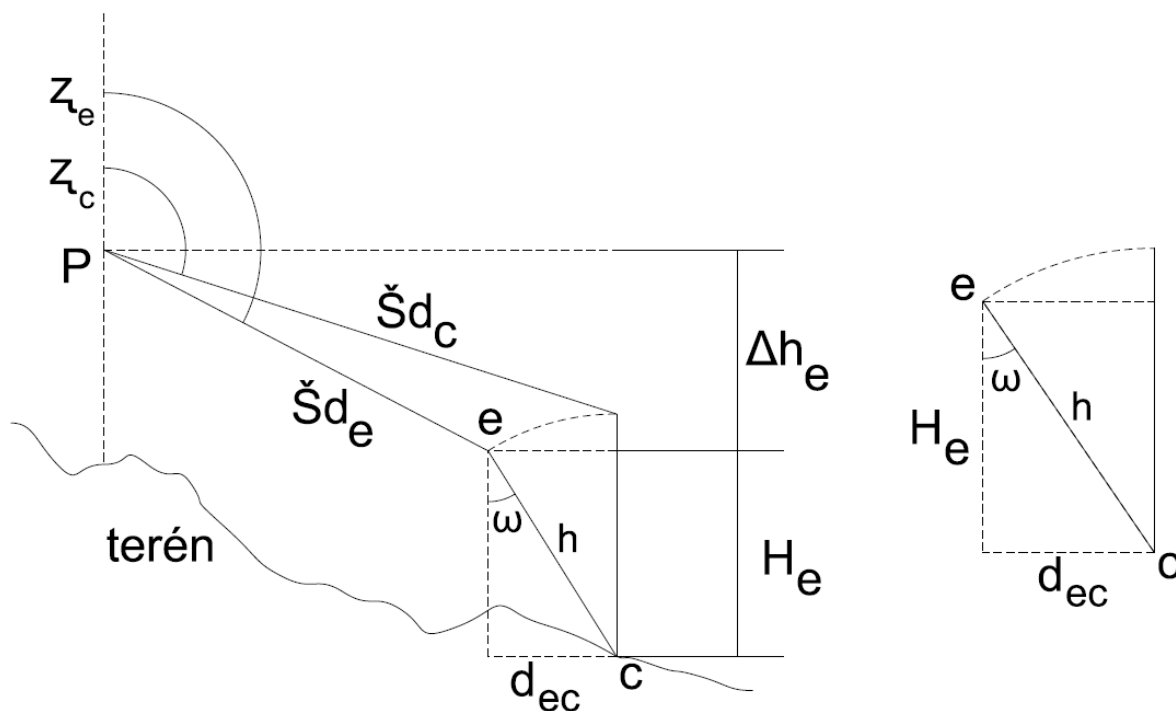
IMU kombinuje data z akcelerometru a gyroskopu a pomocí matematických algoritmů a filtrů vyhodnocuje změny pohybu a orientace objektu v prostoru. Tyto výsledné informace o akceleraci, úhlové rychlosti a orientaci se poté používají k určování náklonu, změny polohy, rotace a dalších pohybových parametrů.

1.2 Možný způsob výpočtu souřadnic bodu s kompenzací náklonu

V této kapitole bude popsán teoretický postup výpočtu souřadnic bodů určovaného s kompenzací náklonu.

Protože výrobce přímo neuvádí postup výpočtu s kompenzací náklonu, bylo zavedeno několik předpokladů založených na informacích z nalezených oficiálních zdrojů [2].

Výpočet byl rozdělen na výškovou a polohovou složku. Výpočet souřadnic X, Y určovaného bodu by mohl být spočítán podle následujícího obrázku:



Obr. 3: Měření s kompenzací náklonu, výšková složka, nárys

- P – totální stanice
- c a e – centr (poloha nakloněného hranolu) a excentr (určovaný bod)
- $Š_{d_e}$ a $Š_{d_c}$ – šikmé délky
- $Δh_e$ – převýšení mezi totální stanicí a nakloněným hranolem
- H_e – výška nakloněného hranolu v rovině určovaného bodu c
- h – délka výtyčky
- $ω$ – úhel náklonu výtyčky
- d_{ec} – vodorovná vzdálenost mezi excentrem a centrem
- $ζ_e$ a $ζ_c$ – zenitové úhly

Na obr. 3 pomocí totální stanice P se měří šikmá délka $Š_{d_e}$ a zenitový úhel $ζ_e$ na nakloněný hranol. Svislice na centru c ukazuje polohu výtyčky při měření klasickou metodou s urovnáním libely.

Převýšení Δh_e se vypočte pomocí měřené délky \check{S}_{d_e} a měřeného zenitového úhlu z_e :

$$\Delta h_e = \check{S}_{d_e} \cdot \cos z_e \quad (1)$$

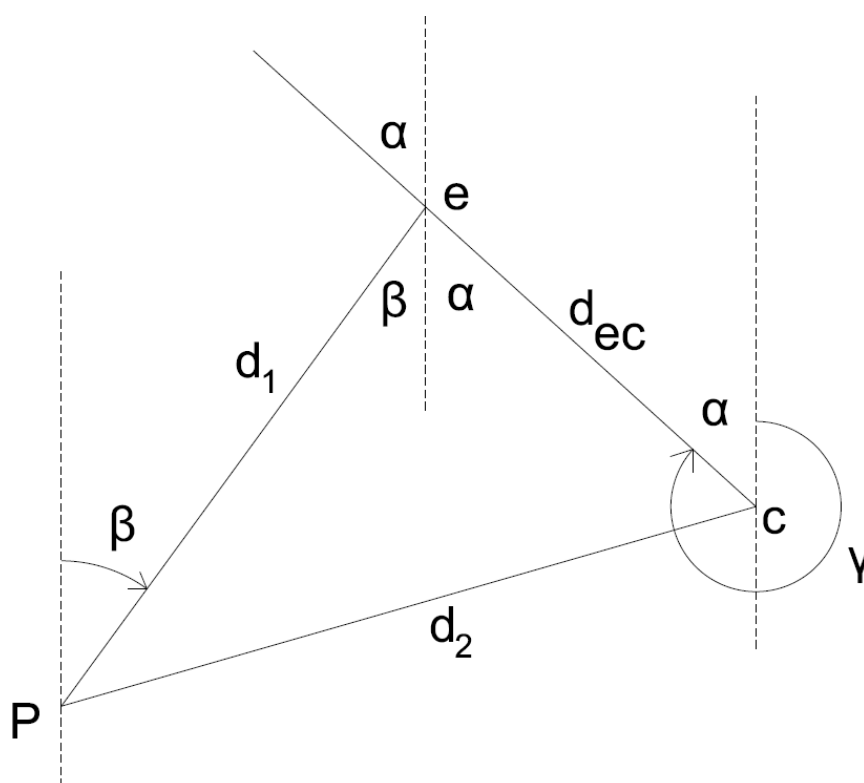
Výška hranolu H_e se vypočte z úhlu náklonu ω , který určuje AP20, a výšky výtyčky h dle vzorce:

$$H_e = h \cdot \cos \omega \quad (2)$$

Dále převýšení mezi totální stanicí a určovaným bodem je:

$$\Delta H = \Delta h_e - H_e \quad (3)$$

Tímto postupem je získáno převýšení mezi totální stanicí a určovaným bodem s využitím měřeného úhlu náklonu ω .



Obr. 4: Měření s kompenzací náklonu, polohová složka, půdorys

- **P** – totální stanice
- **c** a **e** – centr (poloha nakloněného hranolu) a excentr (určovaný bod)
- **d_1** a **d_2** – vodorovné délky na excentr a centr
- **d_{ec}** – vodorovná vzdálenost mezi excentrem a centrem
- **γ** – úhel od severu na excentru
- **β** – úhel od severu na pozici totální stanice

Na základě obr. 1 byl pro výpočet polohy bodu c zaveden předpoklad, že pomocí IMU jednotky je známá orientace výtyčky a totální stanice vůči severu.

Podle zavedeného předpokladu jsou pak známé úhly β a γ . Z úhlu γ se spočte úhel α :

$$\alpha = 400 \text{ gon} - \gamma. \quad (4)$$

Vodorovná délka d_{ec} bude vypočtena z obr. 2 pomocí měřeného úhlu náklonu ω :

$$d_{ec} = h \cdot \sin \omega. \quad (5)$$

Poté šikmá délka \check{S}_{d_e} bude převedena na vodorovnou d_1 pomocí měřeného zenitového úhlu ζ_e :

$$d_1 = \check{S}_{d_e} \cdot \sin \zeta_e. \quad (6)$$

Pak následuje výpočet souřadnic excentru X_e a Y_e pomocí vypočtené vodorovné délky d_1 a úhlu β :

$$\begin{aligned} X_e &= X_p + d_1 \cdot \cos \beta, \\ Y_e &= Y_p + d_1 \cdot \sin \beta, \end{aligned} \quad (7, 8)$$

kde souřadnice stanoviska X_p a Y_p jsou známé. Dále polární metodou z excentru e mohou být vypočteny souřadnice X_c a Y_c určovaného bodu c :

$$\begin{aligned} X_c &= X_e + d_{ec} \cdot \cos(200 + \alpha), \\ Y_c &= Y_e + d_{ec} \cdot \sin(200 + \alpha). \end{aligned} \quad (9, 10)$$

Uvedeny v rámci této podkapitoly postup výpočtu souřadnic určovaného bodu je jedním z možných postupů (se zavedením vlastních předpokladů) a nemusí odpovídat tomu, jak ten výpočet pomocí AP20 probíhá ve skutečnosti, protože výrobce přímo neuvádí, jak se pomocí AP20 souřadnice bodů počítají.

1.3 Použité přístroje a vybavení

V dané kapitole budou popsány všechny přístroje a pomůcky použité při testování Leica AP20.

Totální stanice Leica TS16 P 3“

Pro měření byla použita robotická totální stanice Leica TS16 P (Obr. 5). Směrodatná odchylka délky měřené na hranol udávaná výrobcem je 2 mm + 1,5 ppm a směrodatná odchylka měření vodorovného směru ve dvou polohách dalekohledu 1 mgon [6].



Obr. 5: Totální stanice Leica TS16 P

Měření bylo provedeno s využitím systému Power Search, který umožňuje automatické vyhledávání hranolu pomocí neviditelné laserové stěny, kterou z totální stanice systém vysílá. Dosah na 360° hranol je 300 m s časem vyhledání do 5 s. K ovládání totální stanice byl použit kontroler Leica CS20 (Obr. 6).



Obr. 6: Kontroler Leica CS20

Odrazné hranoly

Pro testování byly vybrány 3 různé odrazné hranoly, jeden pro určení referenčních souřadnic bodů testovacího bodového pole a dva další pro zjištění vlivu konkrétního modelu hranolu na měření s testovanou AP20. Dále budou používány pojmy “chyba z centrace” nebo “přesnost centrace“, které znamenají směrodatnou odchylku zarovnání a správné umístění hranolu v držáku hranolu a montážním čepu. Charakteristiky použitých hranolů jsou uvedeny v [7].

Leica GMP101

První použitý hranol je Leica GMP101 (Obr. 7). Tento hranol byl použit pro “přesné” určení souřadnic bodů experimentálního bodového pole, protože má minimální chybu v centraci [7] (přesnost centrace udávaná výrobcem je 1 mm). Souřadnice měřené pomocí GMP101 jsou pro testování v rámci této bakalářské práce považovány za bezchybné (podrobný postup měření je uveden v další kapitole).



Obr. 7: Hranol Leica GMP101

Leica GPR121

Hlavním důvodem použití GPR121 (Obr. 8) je porovnání přesnosti měření s hranolem GRZ4. Jeho výhodou oproti 360° hranolu GRZ4 je menší chyba z centrace 1 mm.



Obr. 8: Hranol Leica GPR121

Leica GRZ4

Daný hranol byl použit pro testování, protože je v současné době jedním z nejpoužívanějších pro běžné geodetické práce (Obr. 9). Velmi důležitým důvodem je, že při měření není potřeba sledovat, aby hranol byl stále natočen přesně na měřicí přístroj (na rozdíl od hranolu GPR121), což šetří čas při měření s využitím automatického cílení.

GRZ4 má přesnost centrace 2 mm, ale pro dosažení této přesnosti musí být ryskový kříž přístroje vodorovně zarovnan se značkou žluté šipky na těle hranolu. Pokud tato podmínka není splněna, nepřesnost centrace dosahuje až 5 mm.



Obr. 9: Hranol Leica GRZ4

Stabilizace bodů

Stabilizace bodů experimentálního bodového pole byla realizována pomocí čtyř měřických hřebů (Obr. 10).



Obr. 10: Stabilizace bodů 1-4

Zvolené metody testování

Hlavním cílem při navržení způsobů testování bylo co největší využití funkce kompenzace náklonu a zároveň aby experiment byl přiblížen skutečnosti pro dosažení výsledků, které co nejvíce odpovídají reálnému měření za normálních podmínek. V následující kapitole bude popsán postup a způsoby testování AP20.

2.1 Testování funkce kompenzace náklonu

Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, pro "přesné" určení souřadnic bodu testovacího bodového pole byl použit mini hranol Leica GMP101. Hranol byl na každém bodě č. 1-4 zafixován ve statické poloze pomocí stojánku, kvůli potlačení chyby z nesvislé polohy způsobené měřičem. Všechny délky, vodorovné směry a zenitové úhly byly změřeny jednou ve dvou polohách dalekohledu + jednou kontrolně. Tím byly získány souřadnice bodů bodového pole, které pak budou použity jako vztažné pro porovnání a vyhodnocení přesností dalších testů.

Dále souřadnice všech čtyř bodů byly zaměřeny klasickou metodou „na libelu“ s držením výtyčky bez zapnuté kompenzace náklonu s použitím kulatého hranolu GPR121 a 360° hranolu GRZ4. Počet opakování a způsob měření byl obdobný jako při měření s GMP101.

Po zaměření souřadnic bodů klasickými metodami se sledováním libely následovala měření s využitím funkce kompenzace náklonu.

V první sérii byly postupně změřeny body 1-4 s použitím AP20 s mírným náklonem (přibližně do 30°). Na každém bodě bylo provedeno celkem 50x4 měření v různých směrech náklonu výtyčky s kulatým hranolem GPR121, a to je 50x dopředu-dozadu-doprava-doleva vůči totální stanici (celkem 200 měření na každém bodě). Tento postup byl zvolen za účelem určení vlivu směru náklonu tyčky vzhledem k totální stanici v okamžiku měření. V testu náklonu do 30° byl schválně zvolen větší počet opakování kvůli tomu, že mírné náklony jsou nejběžnější ve většině geodetických prací. Každé jednotlivé měření bylo provedeno rychlým zaměřením na hranol v jedné poloze dalekohledu.

Druhá série probíhala stejně jako první s jediným rozdílem, že místo GPR121 byl použit GRZ4.

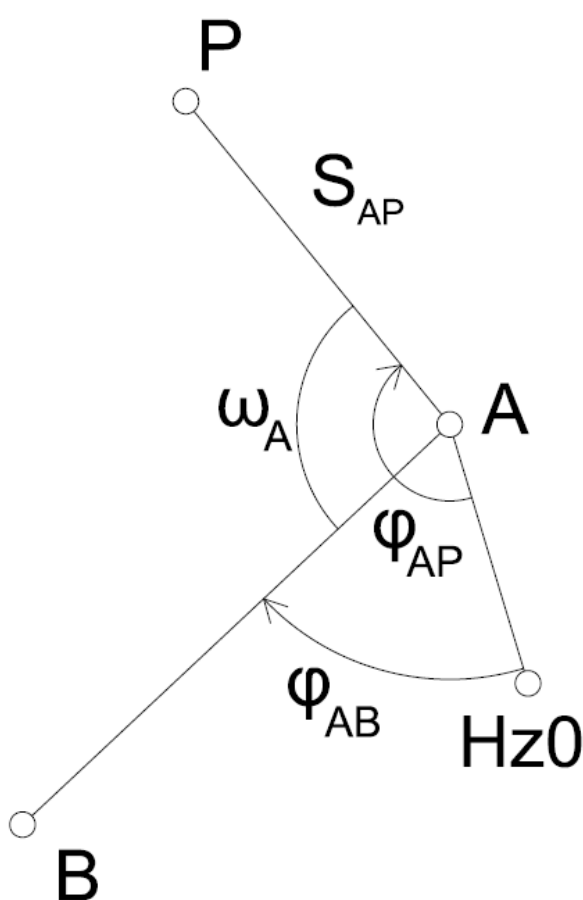
Ve třetí sérii byl každý bod změřen 10x ve všech směrech s velkými náklony do 90° s hranolem GPR121.

Ve čtvrté sérii byly hodnoty změřeny na 360° hranol jen s náklony doleva a doprava vzhledem k přístroji kvůli tvaru hranolu.

2.2 Teoretický podklad k výpočtům přesnosti měřených bodů:

Po měření nejdříve byly vypočteny vztažné souřadnice měřené na GMP101 a byla určena přesnost experimentálního bodového pole, která je u každého bodu vyjádřena pomocí souřadnicové směrodatné odchylky σ_{xy} . Souřadnicové směrodatné odchylky byly vypočteny z kovarianční matice souřadnic (matice, která na své hlavní diagonále obsahuje kvadráty směrodatných odchylek jednotlivých souřadnic). V rámci daného testování byl uvažován pouze **vliv měření** na přesnost určovaných souřadnic. Níže stručně uvedený výpočet přesnosti bodů je popsán podrobněji v [8].

Souřadnice každého bodu testovacího bodového pole byly spočítány pomocí polární metody. Přesnost bodů určených rajónem, jak bylo zmíněno výše, je vyjádřena pomocí souřadnicové směrodatné odchylky σ_{xy} .



Obr. 11: Schématický náčrt rajónu

Pro určení souřadnic bodu rajónem je potřeba mít měřené vodorovné směry na orientaci φ_{AB} (v našem případě orientací je bod 1 se známými souřadnicemi), na určovaný bod φ_{AP} a měřenou délku na určovaný bod s_{AP} . V dané konfiguraci jsou dány dva známé body (stanoviště A a orientace B) a jeden určovaný bod P podle obr. 11.

Nelineární model rajónu (úhel-délka) je [8]:

$$F_1: (\varphi_{AP} - \varphi_{AB}) - \left(\arctg \frac{y_P - y_A}{x_P - x_A} - \arctg \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) = 0$$

$$F_2: s_{AP} - \sqrt{(x_P - x_A)^2 + (y_P - y_A)^2} = 0 \quad (11, 12)$$

Dále se pomocí těchto rovnic spočítají matice parciálních derivací podle souřadnic x_P a y_P , matice parciálních derivací podle měřených prvků (2x směrů a 1x délky) a matice směrodatných odchylek měřených prvků. Z vypočtených matic pak byla spočítána kovarianční matice souřadnic, která vypadá následovně [8]:

$$\Sigma_x = \begin{pmatrix} \sigma_x^2 & cov(x,y) \\ cov(x,y) & \sigma_y^2 \end{pmatrix}, \quad (13)$$

kde σ_x a σ_y jsou směrodatné odchylky souřadnic X a Y, a $cov(x, y)$ jsou kovariance X a Y.

Hledané souřadnicové směrodatné odchylky σ_{xy} byly vypočteny jako kvadratický průměr směrodatných odchylek souřadnic σ_x a σ_y dle vztahu [10]:

$$\sigma_{xy} = \sqrt{\frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}{2}}. \quad (14)$$

Přesnost výškové složky byla vyjádřena směrodatnou odchylkou měřeného převýšení. Vzhledem k tomu, že totální stanice neměří přímo převýšení, ale zenitové úhly a šikmé délky, byl pro výpočet směrodatné odchylky převýšení použit zákon hromadění směrodatných odchylek dle [9].

Funkční vztah pro výpočet převýšení:

$$\Delta h = d_\xi \cos z, \quad (15)$$

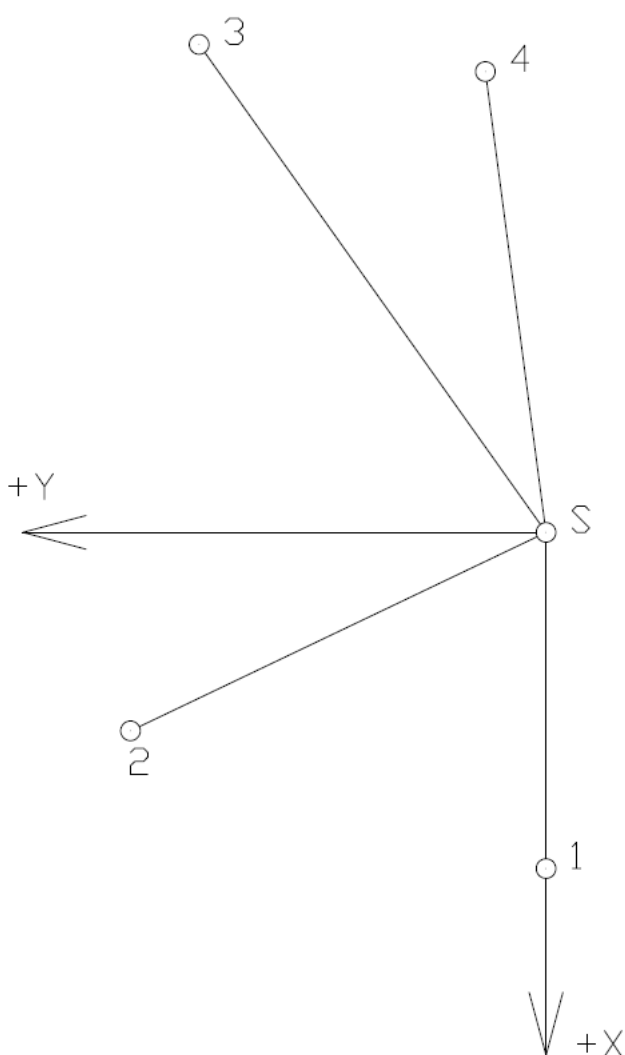
Aplikace zákona hromadění směrodatných odchylek [9]:

$$\sigma_{\Delta h}^2 = \left(\frac{\partial \Delta h}{\partial d_\xi} \right)^2 \cdot \sigma_{d_\xi}^2 + \left(\frac{\partial \Delta h}{\partial z} \right)^2 \cdot \sigma_z^2. \quad (16)$$

Zpracování testů kompenzace náklonu

Zpracování testů kompenzace náklonu proběhlo v sw. Matlab R2020b [14] a Excel [15]. Všechna provedena měření byla zpracována stejným způsobem. Obsahem této kapitoly je popis zpracování navržených způsobů testování.

Z měřených vodorovných směrů, zenitových úhlů a šikmých délek byly vypočítány souřadnice X, Y a převýšení H. S ohledem na rozměr experimentální sítě (délky do 50 metrů) pro výpočet byla použita místní souřadnicová soustava s měřítkem zobrazení $m = 1$. Rovinné souřadnice byly vypočítány rajónem ze zredukovaných na počátek vodorovných směrů (tím byly získány směrníky) a vodorovných délek. Převýšení byla vypočítána pomocí měřených zenitových úhlů a šikmých délek. Počátkem místní soustavy bylo zvoleno stanoviště a osa +X byla vložena do spojnice stanoviště – Bod č.1 (Obr 12).



Obr. 12: Schématický náčrt měřické sítě

3.1 Výpočet výběrových směrodatných odchylek souborů měření s AP20

Souřadnice vypočtené z měřených hodnot byly aritmetický zprůměrovány. Následně byly spočítány opravy od průměru a z nich výběrové směrodatné odchylky pro souřadnice X, Y, Z (H) podle následujícího vzorce:

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{[vv]}{n-1}}, \quad (17)$$

kde x je jedna z daných souřadnic (X, Y nebo Z (H)), v jsou opravy od průměru a n je počet použitých souřadnic.

Dále jako kvadratický průměr směrodatných odchylek souřadnic σ_x a σ_y byly spočítány směrodatné odchylky souřadnicové σ_{xy} dle (14).

V posledním kroku byly pomocí kvadratického průměru vypočteny směrodatné odchylky výšek (18):

$$\bar{\sigma}_H = \sqrt{\frac{[\sigma_H\sigma_H]}{n}} \quad (18)$$

a stejnou metodou byly kvadraticky zprůměrovány směrodatné odchylky souřadnicové pro souřadnice každého bodů dle vztahu:

$$\bar{\sigma}_{xy} = \sqrt{\frac{[\sigma_{xy}\sigma_{xy}]}{n}}. \quad (19)$$

3.2 Výpočet směrodatných odchylek od vztažných souřadnic

Výběrové směrodatné odchylky vypočtené výše vyjadřují přesnost konkrétního souboru měření, tzn. o kolik se od sebe navzájem typicky liší jednotlivá měření v rámci jednoho testu. Pro vyhodnocení přesnosti měření s jednotkou AP20 bylo však potřeba vypočítat parametry vyjadřující přesnost kompenzace náklonu vůči vztažným souřadnicím měřeným na mini hranol. Proto byly vypočítány směrodatné odchylky od "přesných" souřadnic.

Vzorec pro výpočet směrodatné odchylky od vztažných souřadnic je:

$$v_i = y_i - x_i,$$
$$\sigma = \sqrt{\frac{[v_i v_i]}{n}}, \quad (20,21)$$

kde n je počet měření, y_i je souřadnice měřená na mini hranol a x_i je souřadnice měřená s kompenzací náklonu pro i -té měření. Směrodatné odchylky byly vypočítány pro souřadnice X, Y a Z (H) ve všech směrech náklonu a kvadraticky zprůměrovány podle vzorce (18, 19).

Výpočet směrodatných odchylek proběhl dle [10].

Výsledky testování kompenzace náklonu

Přesnost určení jednotlivých bodů bodového pole je představena v následující tabulce:

Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]
1	1,5	0,4
2	1,5	0,6
3	1,6	0,7
4	1,5	0,6

Tab. 1: Polohová a výšková přesnost experimentálního bodového pole

Přesnost bodů měřených klasickou metodou byla spočítána pro všechny typy hranolů stejným způsobem a vyšla pro každý hranol stejná (skutečně není úplně stejná, ale pro přesnost na desetiny milimetrů bude považována za stejnou), proto je uvedena jenom jedna tabulka.

Dále byly porovnány souřadnice měřené na GMP101 a souřadnice měřené klasickou metodou na ostatní typy hranolů (souřadnicové rozdíly byly spočítány: $X_{GPR121} - X_{GMP101}$ a stejně pro GRZ4):

Typ hranolu	Č. bodu	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔH [mm]
GPR121	1	-1,0	2,0	-3,0
	2	1,0	1,0	-4,0
	3	-1,0	0,0	-2,0
	4	0,0	1,0	-2,0

Tab. 2: Porovnání souřadnic GMP101 a GPR101, klasická metoda

Typ hranolu	Č. bodu	ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔH [mm]
GRZ4	1	-2,0	2,0	-1,0
	2	-1,0	0,0	-1,0
	3	-1,0	0,0	0,0
	4	2,0	-1,0	0,0

Tab. 3: Porovnání souřadnic GMP101 a GRZ4, klasická metoda

Následující tabulky č. 4-7 představují výsledky zpracování měření s AP20 a vyjadřují “vnitřní” přesnost jednotlivých sérií:

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, <30°	50	1	2,0	1,6	1,5	1,0
	dozadu, <30°			1,8	0,7		
	doprava, <30°			1,0	0,8		
	doleva, <30°			0,6	0,8		
GPR121	dopředu, <30°	50	2	2,0	0,5	1,6	0,8
	dozadu, <30°			1,7	1,1		
	doprava, <30°			1,2	0,7		
	doleva, <30°			1,2	0,9		
GPR121	dopředu, <30°	50	3	1,8	0,6	2,4	0,7
	dozadu, <30°			1,9	0,7		
	doprava, <30°			1,1	0,7		
	doleva, <30°			4,0	0,9		
GPR121	dopředu, <30°	50	4	1,6	0,6	1,1	0,7
	dozadu, <30°			0,9	0,8		
	doprava, <30°			0,7	0,7		
	doleva, <30°			0,7	0,7		

Tab. 4: Směrodatné odchytky v první sérii

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, <30°	50	1	2,5	0,9	1,6	0,8
	dozadu, <30°			1,0	0,6		
	doprava, <30°			1,6	1,0		
	doleva, <30°			0,9	0,8		
GRZ4	dopředu, <30°	50	2	1,8	0,9	1,2	0,8
	dozadu, <30°			0,7	0,4		
	doprava, <30°			0,8	0,7		
	doleva, <30°			1,0	1,0		
GRZ4	dopředu, <30°	50	3	1,2	0,6	1,3	0,6
	dozadu, <30°			1,3	0,5		
	doprava, <30°			1,3	0,6		
	doleva, <30°			1,5	0,7		
GRZ4	dopředu, <30°	50	4	1,6	0,5	1,4	0,8
	dozadu, <30°			2,1	1,1		
	doprava, <30°			0,8	0,6		
	doleva, <30°			0,7	0,9		

Tab. 5: Směrodatné odchytky ve druhé sérii

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, >30°	10	1	3,0	1,0	1,6	1,3
	dozadu, >30°			0,5	1,4		
	doprava, >30°			1,1	1,4		
	doleva, >30°			0,5	1,4		
GPR121	dopředu, >30°	10	2	4,3	0,7	5,0	1,5
	dozadu, >30°			1,0	1,2		
	doprava, >30°			8,6	1,8		
	doleva, >30°			2,8	2,1		
GPR121	dopředu, >30°	10	3	4,4	1,6	2,3	1,4
	dozadu, >30°			0,4	1,7		
	doprava, >30°			0,4	1,2		
	doleva, >30°			0,4	1,1		
GPR121	dopředu, >30°	10	4	2,3	0,7	2,1	1,4
	dozadu, >30°			3,5	2,2		
	doprava, >30°			0,6	1,0		
	doleva, >30°			0,3	1,3		

Tab. 6: Směrodatné odchylky ve třetí sérii

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, >30°	10	1	-		1,2	1,4
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			1,6	1,7		
	doleva, >30°			0,7	0,9		
GRZ4	dopředu, >30°	10	2	-		6,0	1,6
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			8,3	1,4		
	doleva, >30°			1,2	1,8		
GRZ4	dopředu, >30°	10	3	-		1,3	1,3
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			1,0	1,6		
	doleva, >30°			1,5	0,9		
GRZ4	dopředu, >30°	10	4	-		0,9	1,2
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			0,9	1,3		
	doleva, >30°			0,9	1,1		

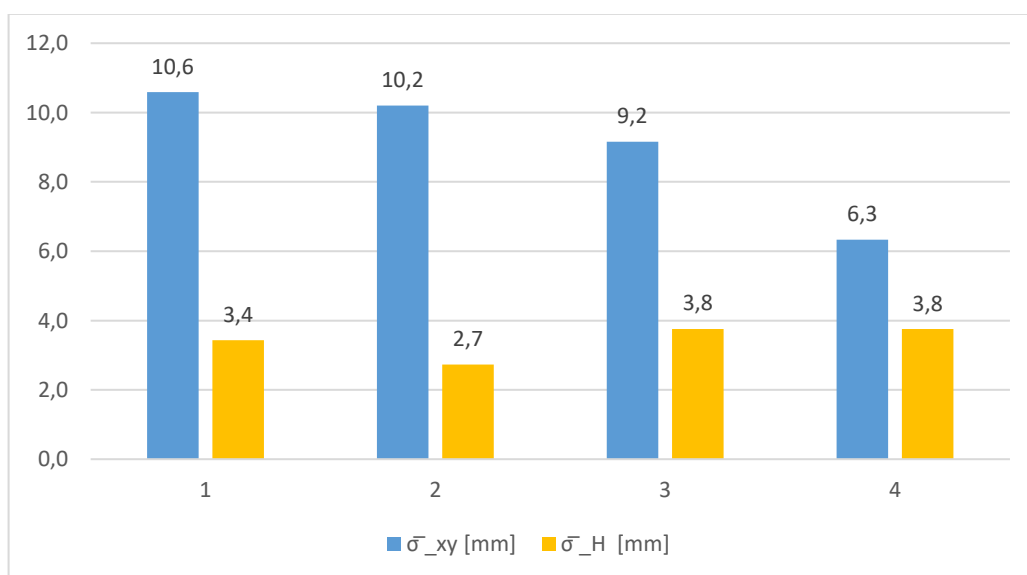
Tab. 7: Směrodatné odchylky ve čtvrté sérii

Z vypočtených výsledků je vidět, že výsledná polohová a výšková přesnost v rámci jednotlivých testů nezávisí ani na směru náklonu výtyčky ani na typu použitého hranolu. Polohová přesnost s mírnými náklony se výrazně neliší od polohové přesnosti měření s velkými náklony a je skoro stejná. Nejvíc je ovlivněna výšková přesnost, se zvětšením úhlu náklonu se výšková přesnost zhoršuje a polohová přesnost zůstává přibližně stejná.

Tabulky č. 8-11 shrnují informace o přesnosti měření s kompenzací náklonu vůči měření na GMP101. Pro názornost byly směrodatné odchytky zobrazeny do histogramů:

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, <30°	50	1	7,3	4,8	10,6	3,4
	dozadu, <30°			5,9	2,0		
	doprava, <30°			17,3	2,0		
	doleva, <30°			7,8	4,0		
GPR121	dopředu, <30°	50	2	4,7	3,2	10,2	2,7
	dozadu, <30°			4,3	2,0		
	doprava, <30°			13,3	2,0		
	doleva, <30°			14,1	3,4		
GPR121	dopředu, <30°	50	3	6,9	4,5	9,2	3,8
	dozadu, <30°			6,1	2,7		
	doprava, <30°			9,7	2,8		
	doleva, <30°			12,5	4,6		
GPR121	dopředu, <30°	50	4	8,0	5,0	6,3	3,8
	dozadu, <30°			4,5	2,9		
	doprava, <30°			5,7	2,5		
	doleva, <30°			6,6	4,1		

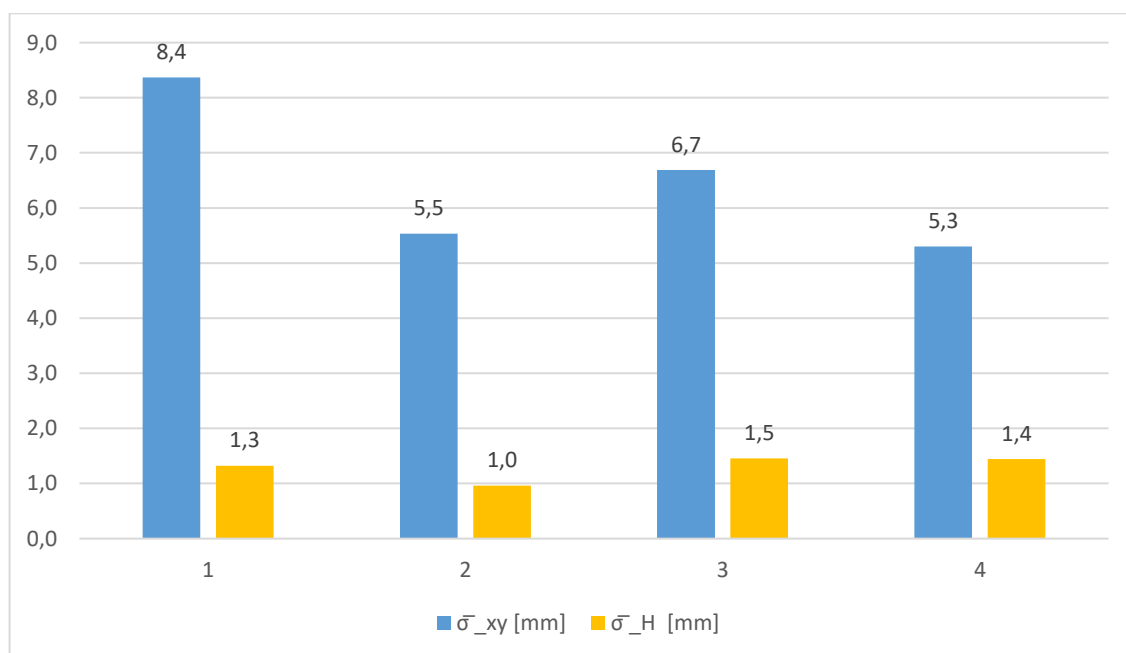
Tab. 8: Směrodatné odchytky od vztažných souřadnic v první sérii



Obr. 13: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony <30°, GPR121

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, <30°	50	1	7,7	1,8	8,4	1,3
	dozadu, <30°			3,2	0,9		
	doprava, <30°			13,8	1,0		
	doleva, <30°			4,5	1,4		
GRZ4	dopředu, <30°	50	2	6,8	1,0	5,5	1,0
	dozadu, <30°			4,6	0,5		
	doprava, <30°			5,9	1,0		
	doleva, <30°			4,5	1,2		
GRZ4	dopředu, <30°	50	3	6,9	1,3	6,7	1,5
	dozadu, <30°			4,3	1,4		
	doprava, <30°			9,2	0,9		
	doleva, <30°			5,3	2,0		
GRZ4	dopředu, <30°	50	4	6,4	0,9	5,3	1,4
	dozadu, <30°			4,5	1,7		
	doprava, <30°			5,3	0,8		
	doleva, <30°			4,8	2,0		

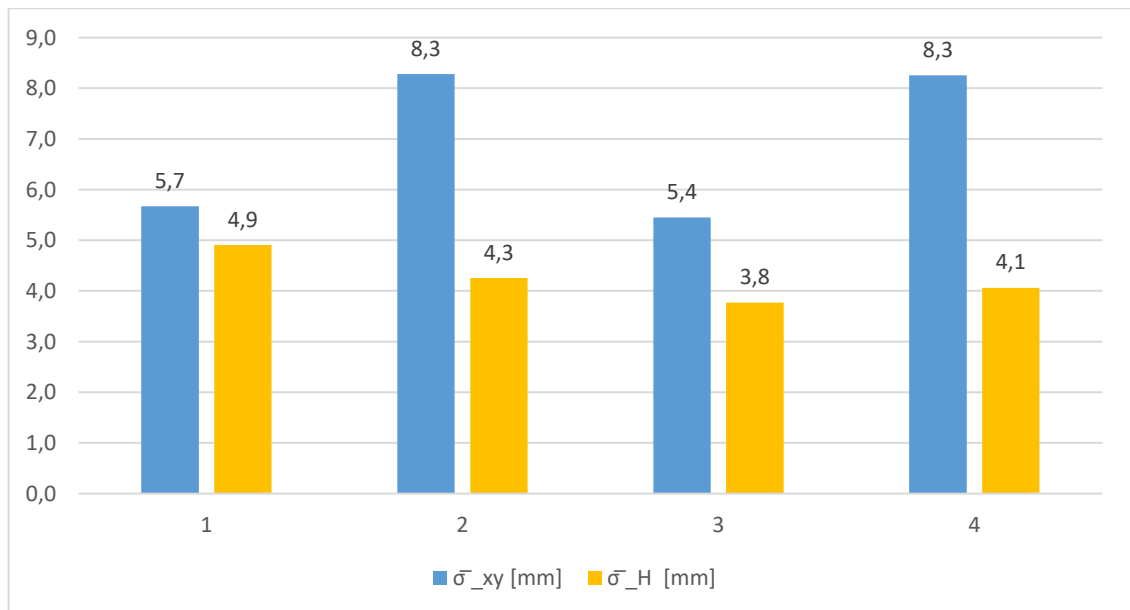
Tab. 9: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve druhé sérii



Obr. 14: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony <30°, GRZ4

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, >30°	10	1	5,7	8,1	12,2	7,2
	dozadu, >30°			5,3	1,5		
	doprava, >30°			22,3	2,1		
	doleva, >30°			6,0	11,5		
GPR121	dopředu, >30°	10	2	9,7	5,0	19,5	6,2
	dozadu, >30°			5,2	1,1		
	doprava, >30°			36,3	5,3		
	doleva, >30°			9,2	9,9		
GPR121	dopředu, >30°	10	3	8,1	11,0	11,2	9,4
	dozadu, >30°			20,4	4,6		
	doprava, >30°			4,2	2,7		
	doleva, >30°			2,4	14,2		
GPR121	dopředu, >30°	10	4	8,5	10,0	7,4	6,1
	dozadu, >30°			7,4	2,3		
	doprava, >30°			8,8	1,8		
	doleva, >30°			4,1	6,4		

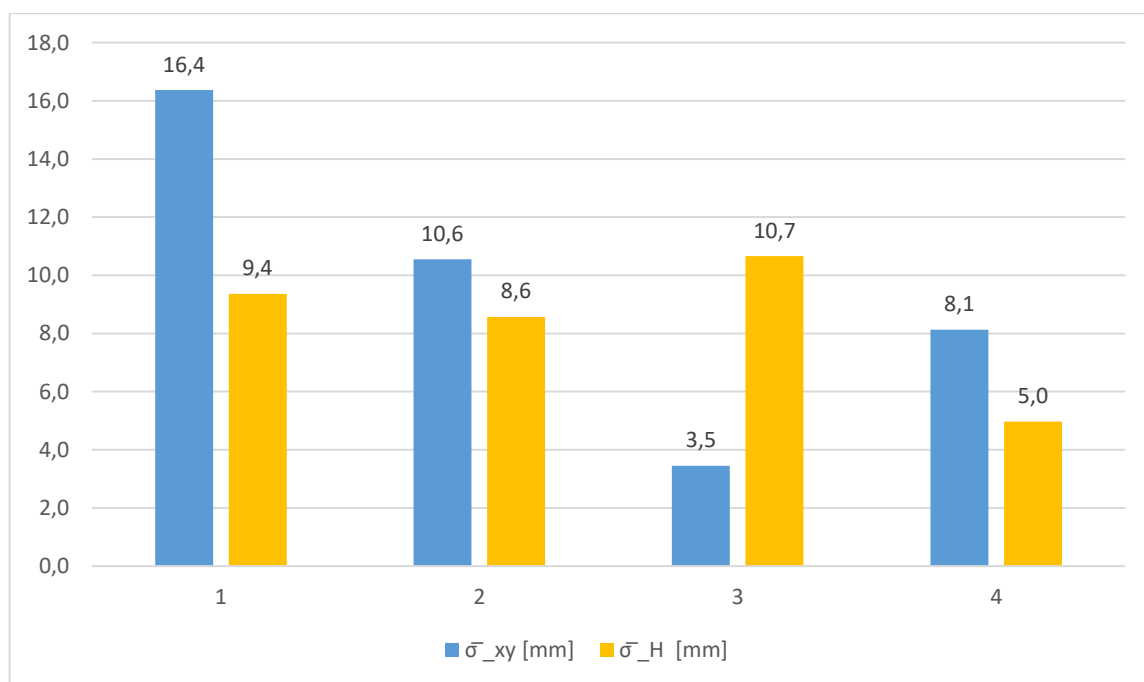
Tab. 10: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve třetí sérii



Obr. 15: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony >30°, GPR121

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, >30°	10	1	-		16,4	9,4
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			22,0	3,0		
	doleva, >30°			7,2	12,9		
GRZ4	dopředu, >30°	10	2	-		10,6	8,6
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			9,0	7,4		
	doleva, >30°			11,9	9,6		
GRZ4	dopředu, >30°	10	3	-		3,5	10,7
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			3,6	2,9		
	doleva, >30°			3,3	14,8		
GRZ4	dopředu, >30°	10	4	-		8,1	5,0
	dozadu, >30°			-			
	doprava, >30°			11,1	3,1		
	doleva, >30°			3,0	6,3		

Tab. 11: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve čtvrté sérii



Obr. 16: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony >30°, GPR121

Po porovnání výsledků měření s AP20 a měření klasickou metodou lze zjistit, že polohová přesnost souřadnic určených s použitím AP20 je řádově horší oproti klasické metodě. V příloze č. 1 jsou uvedeny histogramy, ukazující polohovou a výškovou přesnost bodů pro konkrétní směr náklonu.

Polohová přesnost:

Z vypočtených výsledků je vidět, že na **bodě č. 1** při měření “doprava” dochází s systematické chybě, která hodně ovlivňuje výslednou polohovou přesnost, proto měření “doprava” na bodě 1 bylo z výpočtu a vyloučeno a byly znova pro tento bod vypočteny směrodatné odchylky souřadnicové. Z tab. 10 lze zjistit, že u měření “doprava” na **bodě č. 2** a měření “dozadu” na **bodě č. 3** polohová přesnost vyšla řádově horší oproti měřením v ostatních směrech, proto byla stejně jako u bodu č. 1 tato měření vyloučena z výpočtu.

Výšková přesnost:

Při měření s velkými náklony na GPR121 u **bodu č. 1** se vyskytuje odlehlá měření (tab. 10, “dozadu”, “doprava” a tab. 11, “doleva”). Po porovnání výsledků z tab. 10 a tab. 11 bylo zjištěno, že při měření s velkými náklony “doleva” na **bodě č. 3** vyšla výšková přesnost horší. Všechna nalezena odlehlá měření byla vyloučena z výpočtu a výškové směrodatné odchylky byly spočítány znovu stejným postupem.

Výsledná výšková a polohová přesnost:

Vyhledání podezřelých hodnot proběhlo v sw. R-4.3.0 [12] pomocí **Dixonova statistického testu** (podrobněji viz [13]), který je používán k identifikaci odlehlých hodnot v daném datovém souboru. Nulová hypotéza pro Dixonův test je:

H_0 : V datovém souboru **neexistují** odlehlé hodnoty.

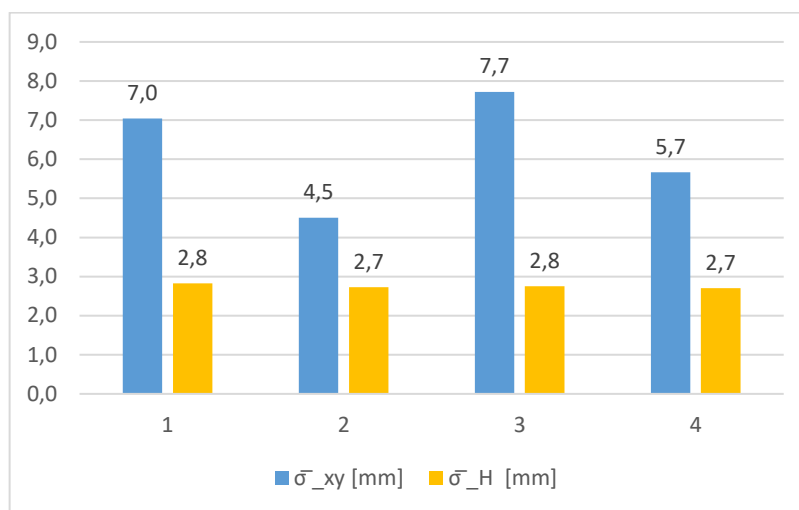
Alternativní hypotéza pak je:

H_1 : V datovém souboru **existují** odlehlé hodnoty

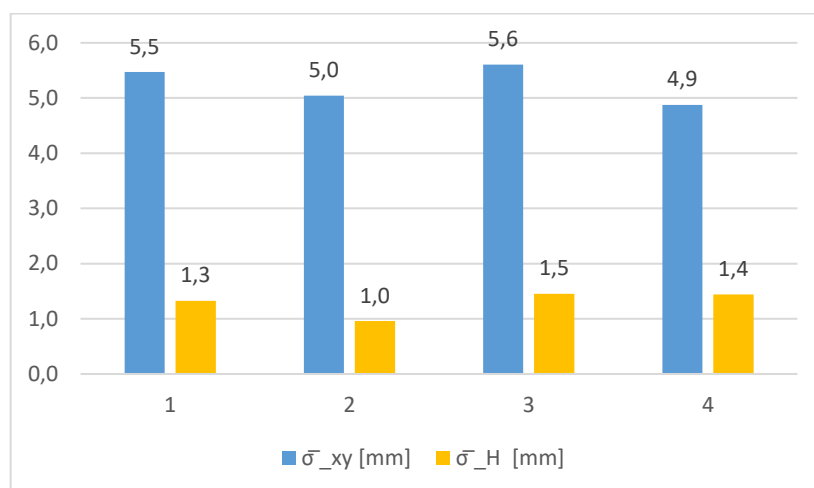
Zamítnutí nulové hypotézy znamená, že byla nalezena minimálně jedna odlehlá hodnota.

Protože se odlehlé hodnoty u všech bodů při různých směrech náklonu vyskytovaly n-systematicky, bylo je přehlednější vyznačit přímo v tabulkách s výsledky (**příloha č.2**), kde **červeně** jsou vyznačeny vyloučené hodnoty směrodatných odchylek. Výsledky Dixonova testu (výstup z sw. R-4.3.0) jsou uvedeny v elektronické příloze “Dixonuv_test_R”. Vyloučení odlehlých hodnot pro měření na GRZ4 s velkými náklony nelze provést pomocí Dixonova testu (kvůli nedostatečnému počtu hodnot), proto hodnoty byly vyloučeny na základě porovnání s výsledky testu měření s GPR121 s velkými náklony za předpokladu, že výsledky měření s oběma hranoly musejí vyjít přibližně stejné.

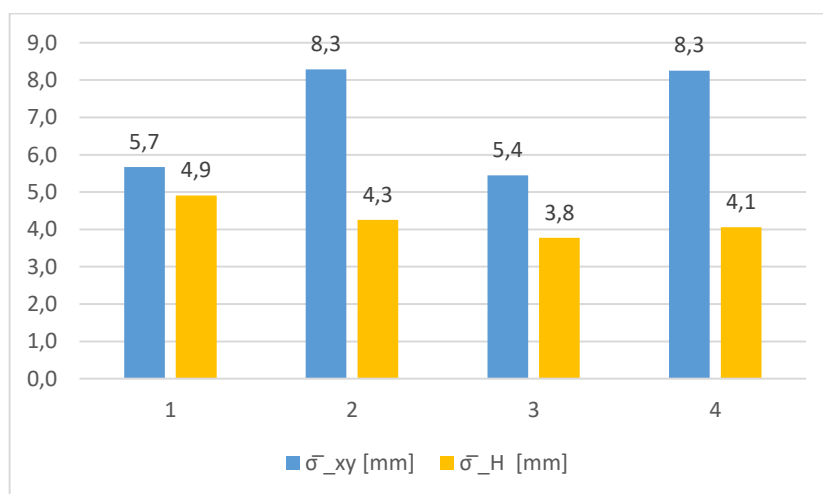
Výsledná polohová a výšková přesnost všech bodů po vyloučení byla zobrazena do histogramů (Obr. 17-20):



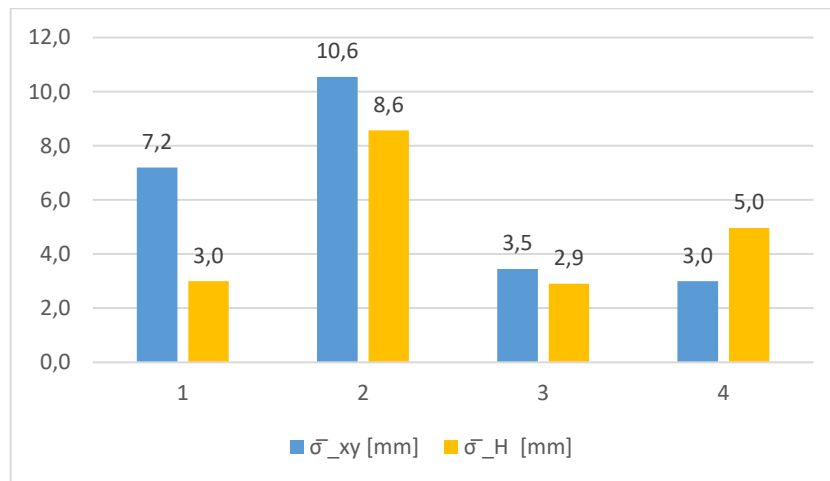
Obr: 17: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, první série



Obr: 18: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, druhá série



Obr: 19: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, třetí série



Obr: 20: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, čtvrtá série

Při měření s mírnými náklony přesnost polohy a výšky bodů vyšla skoro stejná s oběma hranolů, a výška v porovnání s klasickou metodou byla určena skoro stejně přesně jako na mini hranol. Polohová přesnost při měření s velkými náklony vychází přibližně stejná na oba typy hranolů. Přesnost určení výšky je lepší s GRZ4 na všech bodech kromě bodu č. 2. Experimentálně bylo zjištěno, že pro dosažení maximální polohové a výškové přesnosti měření s AP20 je potřeba měřit s mírnými náklony.

Použití AP20 s náklony většími než 90°

Výrobce na svých webových stránkách uvádí, že rozsah náklonu není nijak omezen, proto byl spíše pro zajímavost proveden test AP20 při měření s náklonem větším, než 90°. Na zdi byl fixou vyznačen křížek a zaměřen s využitím bezhranolového dálkoměru ve dvou polohách (Obr.21).



Obr. 21: Křížek na zdi

Poté tento bod byl 20x zaměřen s testovanou AP20 s náklonem $> 90^\circ$. Bod byl schválně udělán ve kratší vzdálenosti od totální stanice a co nejvíc kolmo na přístroj pro zmenšení vlivu velikosti dálkoměrného svazku na měření délky. Měření bylo provedeno s hranolem GRZ4. Výsledky měření jsou představeny v následujících tabulkách:

ΔY [mm]	ΔX [mm]	ΔH [mm]
5,0	-7,0	8,0

Tab. 12: Souřadnicové rozdíly AP20-bezhranolový dálkoměr

σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]
7,3	8,0

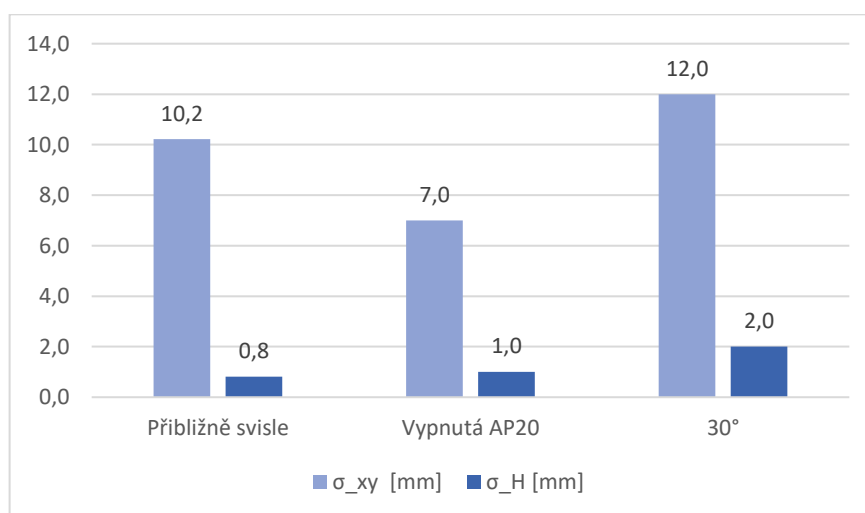
Tab. 13: Polohová a výšková přesnost bodu vůči souřadnicím měřeným bezhranolovým dálkoměrem

Z dosažených výsledků je vidět, že polohová přesnost měření s náklony většími než 90° je přibližně stejná jako při měření s velkými náklony a výšková přesnost je 2x horší než výšková přesnost měření s velkými náklony.

Předchozí testování AP20

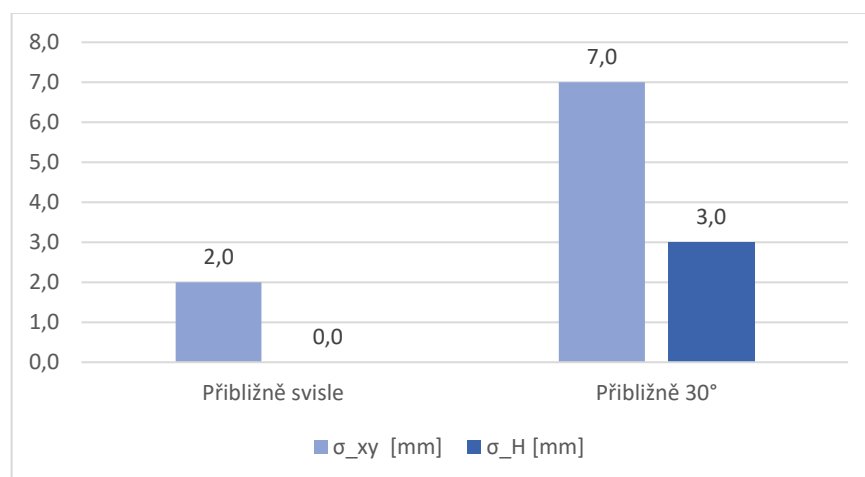
V květnu 2022 firma GEFOS a.s., obchodní zastoupení Leica Geosystems pro ČR, provedla testování AP20 AutoPole [11]. Celkem byly provedeny 2 testy.

U testu "A" se porovnávala měření klasickou metodou vs. měření s AP20. Výrobce charakterizuje výslednou přesnost pojmy "střední polohová chyba" a "střední výšková chyba", pro jednotnost v rámci této práce z výsledků měření byly vypočteny souřadnicové směrodatné odchylky a výškové směrodatné odchylky podle vzorců (14,17) uvedených ve 3. kapitole o zpracování testů kompenzace náklonu. Protože firma GEFOS prováděla testování s 360° hranolem GRZ122, výsledky budou v závěru porovnávány s měřením na GRZ4.



Obr. 22: Výsledky testu "A"

V testu "B" se ověřovalo, jestli je přesnost souřadnic s kompenzací náklonu závislá na velikosti úhlu náklonu. Proto byly porovnávány výsledky v přibližně svislé poloze a s odklonem od svislice cca 30°.



Obr. 23: Výsledky testu "B"

Závěr

Cílem této práce bylo otestovat přesnost Leica AP20 a využitelnost při různých druzích geodetických prací.

V porovnání s referenčními hodnotami se ukázalo, že při měření s mírnými náklony s hranolem GRZ4, lze dosáhnout přesnosti **5-6 mm** v poloze a **1-1,5 mm** ve výšce. Experimentálně bylo zjištěno, že měření s hranolem GPR121 vychází stejně přesně polohově a méně přesně výškově (**5-8 mm** v poloze a **3 mm** ve výšce), ale v porovnání s klasickou metodou výšková přesnost vyšla stejná.

Měření s velkými náklony vyšlo s přibližně stejnou přesností – **3-10 mm** a **3-8 mm** s GRZ4, **6-8 mm** a **4-5 mm** pro GPR121. Z těchto výsledků je vidět, že měření s velkými náklony nejvíce ovlivnilo výškovou přesnost bodů.

Také bylo ověřeno, že AP20 umožňuje kompenzaci při libovolném náklonu výtyčky s hranolem s přibližně stejnou přesností jako při měření s velkými náklony.

Výsledky provedených experimentů ukázaly, že Leica AP20 AutoPole může být využitelná ve mnoha druzích geodetických prací, např. pro zaměření polohopisu a výškopisu, méně přesné vytyčovací práce (vytyčení výkopů, komunikací (pouze pro konstrukční vrstvy s nižším nárokem na přesnost), hranic pozemků apod...). Velké využití AP20 může získat v katastru nemovitostí, kde jsou překážky (ploty, stromy, auta atd...) velmi běžným zdrojem problémů při geodetických pracích a přesnost kompenzace náklonu ani zdaleka nepřekračuje mezní polohovou odchylku stanovenou pro katastr.

Výsledky dosažené v rámci vlastního testování a testování firmou GEFOS a.s. vyšly přibližně stejné. Polohová přesnost testu "A" vyšla horší oproti vypočteným hodnotám o **6 mm** (horší přesnost polohy bodů lze odůvodnit menším počtem opakování). Výšková přesnost vyšla také horší o **0,5 mm**, což lze považovat za skoro stejnou přesnost. Test "B" byl proveden s větším počtem opakování, proto polohová přesnost vyšla přibližně stejná jako z vlastního testování – **7 mm**, ale výšková přesnost vyšla dvakrát méně přesná – **3 mm** (oproti **1,5 mm**).

Seznam použitých zdrojů

- [1] *White Paper: The Leica AP20 AutoPole* [online]. In: . [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/en-us/about-us/content-features/leica-ap20-autopole-white-paper>
- [2] *Leica Geosystems: HeXml - 2.0 Schema Release Information* [online]. In: . Published in Switzerland© 2022 Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Switzerland, 2022 [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/>
- [3] *Leica e-mail 3/2022* [online]. GEFOS, 2022 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://www.gefos-leica.cz/data/original/totalni-stanice/ap20/03-22_ap20_auto-pole_web.pdf
- [4] *Leica AP20 AutoPole: Technické specifikace* [online]. GEFOS, 2022 [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/data/original/totalni-stanice/ap20/lgs-ap20-auto-pole-ds-966832-0322-cs-lr.pdf>
- [5] *Leica AP20 AutoPole* [online]. In: . [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/novinky/detail-clanku-303-leica-ap20-autopole>
- [6] *Leica TS16: Technické specifikace* [online]. In: . [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://www.gefos-leica.cz/data/original/totalni-stanice/leica-ts16-ds-939072-1120-cs-lr.pdf>
- [7] *Product information: Prism dimensions* [online]. In: . [cit. 2023-05-22]. Dostupné z: <https://leica-geosystems.com/products/total-stations/accessories/reflectors>
- [8] SKOŘEPA, Zdeněk. *Geodézie 4*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05481-9.
- [9] *Teorie chyb a vyrovnávací počet: Zákon hromadění skutečných chyb, směrodatných odchylek* [online]. prof. Ing. Martin Štroner, Ph.D. [cit. 2023-05-14]. Dostupné z: https://k154.fsv.cvut.cz/~stroner/TCH1/tch_pred_3.pdf
- [10] HAMPACHER, Miroslav a Martin ŠTRONER. *Zpracování a analýza měření v inženýrské geodézii*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2011. ISBN 978-80-01-04900-6.
- [11] *Leica e-mail 5/2022* [online]. [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: https://www.gefos-leica.cz/data/original/totalni-stanice/ap20/05-22_test_ap20_web.pdf
- [12] *The R Project for Statistical Computing* [online]. [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.r-project.org>
- [13] DIXON, WJ. *Analysis of Extreme Values: Ann. Math. Stat. 21, 4, 488-506*. 1950.
- [14] *MATLAB* [online]. [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- [15] *Microsoft: Microsoft Excel* [online]. [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-365/excel>

Seznam obrázků

Obr: 1: Kompenzace náklonu [2]	9
Obr: 2: Leica AP20 AutoPole [5].....	11
Obr: 3: Měření s kompenzací náklonu, výšková složka, nárys.....	13
Obr: 4: Měření s kompenzací náklonu, polohová složka, půdorys.....	14
Obr: 5: Totální stanice Leica TS16 P	16
Obr: 6: Kontroler Leica CS20.....	17
Obr: 7: Hranol Leica GMP101	18
Obr: 8: Hranol Leica GPR121	18
Obr: 9: Hranol Leica GRZ4.....	19
Obr: 10: Stabilizace bodů 1-4.....	19
Obr: 11: Schématický náčrt rajónu	21
Obr: 12: Schématický náčrt měřické sítě.....	23
Obr: 13: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony <30°, GPR121.....	29
Obr: 14: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony <30°, GRZ4	30
Obr: 15: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony >30°, GPR121.....	31
Obr: 16: Polohová a výšková přesnost bodů, náklony >30°, GPR121.....	32
Obr: 17: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, první série	34
Obr: 18: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, druhá série ...	34
Obr: 19: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, třetí série	34
Obr: 20: Polohová a výšková přesnost bodů po vyloučení odlehlých hodnot, čtvrtá série ...	35
Obr: 21: Křížek na zdi	36
Obr: 22: Výsledky testu "A"	37
Obr: 23: Výsledky testu "B"	37
Obr: 24: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon <30°, GPR121.....	44
Obr: 25: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon <30°, GPR121.....	44

Obr: 26: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon <30°, GPR121	45
Obr: 27: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon <30°, GPR121.....	45
Obr: 28: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon <30°, GRZ4	46
Obr: 29: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon <30°, GRZ4	46
Obr: 30: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon <30°, GRZ4	47
Obr: 31: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon <30°, GRZ4	47
Obr: 32: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon >30°, GPR121	48
Obr: 33: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon >30°, GPR121	48
Obr: 34: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon >30°, GPR121	49
Obr: 35: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon >30°, GPR121	49
Obr: 36: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon >30°, GRZ4	50
Obr: 37: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon >30°, GRZ4	50
Obr: 38: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon >30°, GRZ4	51
Obr: 39: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon >30°, GRZ4	51

Seznam tabulek

Tab. 1: Polohová a výšková přesnost experimentálního bodového pole	26
Tab. 2: Porovnání souřadnic GMP101 a GPR101, klasická metoda	26
Tab. 3: Porovnání souřadnic GMP101 a GRZ4, klasická metoda.....	26
Tab. 4: Směrodatné odchylky v první sérii.....	27
Tab. 5: Směrodatné odchylky ve druhé sérii	27
Tab. 6: Směrodatné odchylky ve třetí sérii.....	28
Tab. 7: Směrodatné odchylky ve čtvrté sérii.....	28
Tab. 8: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic v první sérii	29
Tab. 9: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve druhé sérii.....	30
Tab. 10: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve třetí sérii	31
Tab. 11: Směrodatné odchylky od vztažných souřadnic ve čtvrté sérii	32
Tab. 12: Souřadnicové rozdíly AP20-bezhranolový dálkoměr	36
Tab. 13: Polohová a výšková přesnost bodu vůči souřadnicím měřeným bezhranolovým dálkoměrem	36
Tab. 14: Vyloučené hodnoty, první série	52
Tab. 15: Vyloučené hodnoty, druhá série	52
Tab. 16: Vyloučené hodnoty, třetí série	53
Tab. 17: Vyloučené hodnoty, čtvrtá série	53

Seznam příloh

Příloha č. 1: Souřadnicové a výškové směrodatné odchylky pro konkrétní směr náklonu.

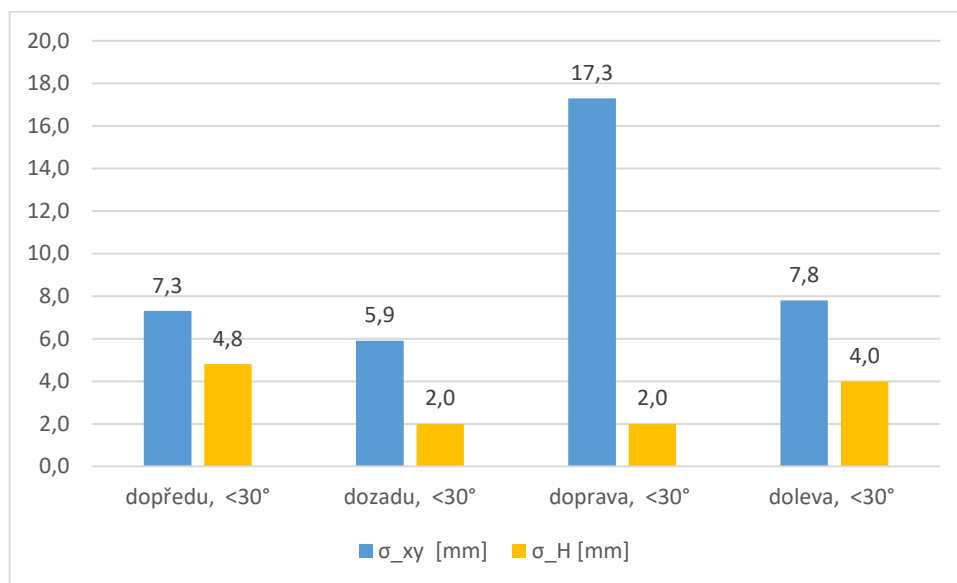
Příloha č.2: Vyloučené z výpočtu odlehlé hodnoty.

Elektronické přílohy:

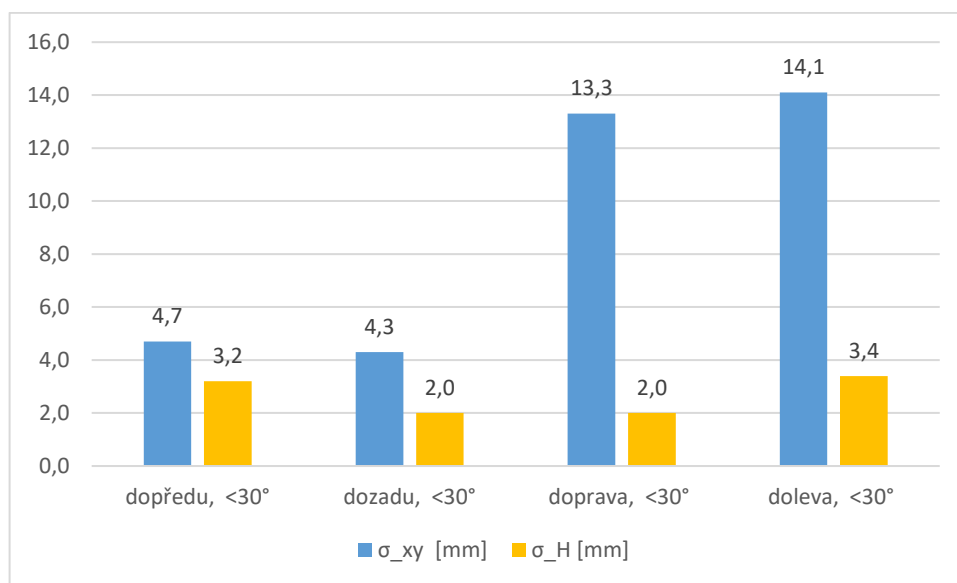
- Výpočty v sw. Excel (Vypocty_excel.zip)
- Výpočty v sw. Matlab (Vypocty_matlab.zip)
- Seznam měření z totální stanice (Seznam_mereni.pdf)
- Výsledky Dixonova testu (Dixonuv_test_R.zip)

Příloha č. 1: Souřadnicové a výškové směrodatné odchylky pro konkrétní směr náklonu.

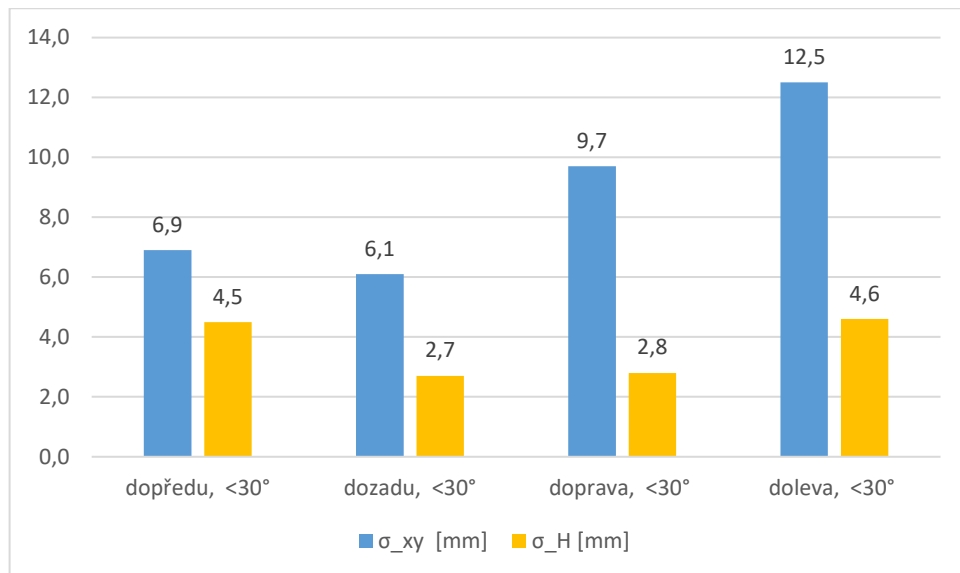
GPR121, náklon <30°:



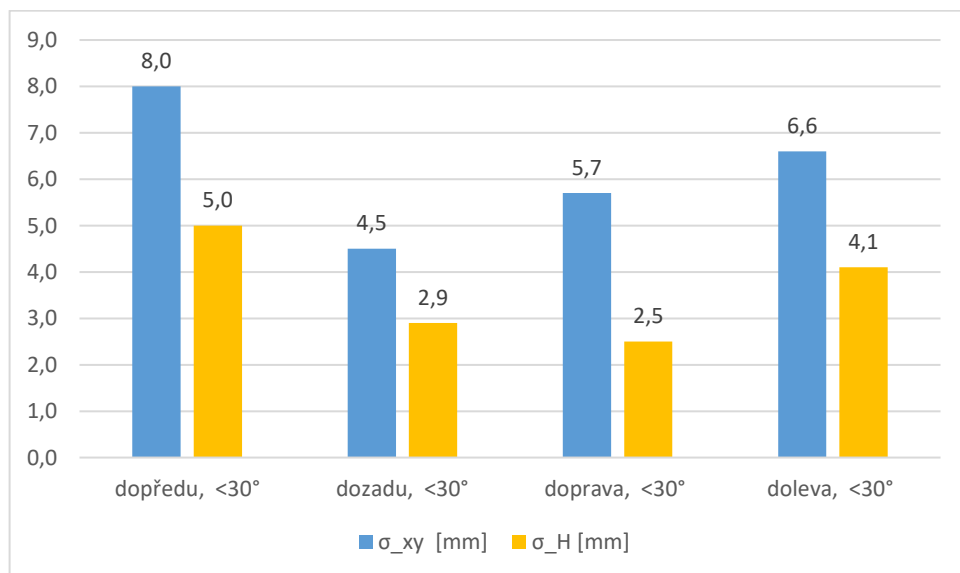
Obr: 24: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon <30°, GPR121



Obr: 25: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon <30°, GPR121

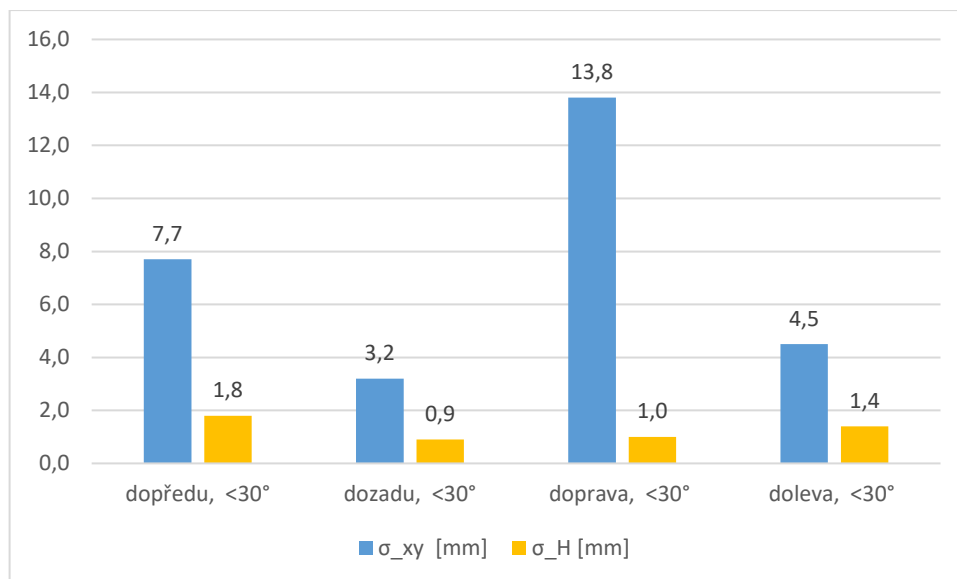


Obr. 26: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon <math><30^\circ</math>, GPR121

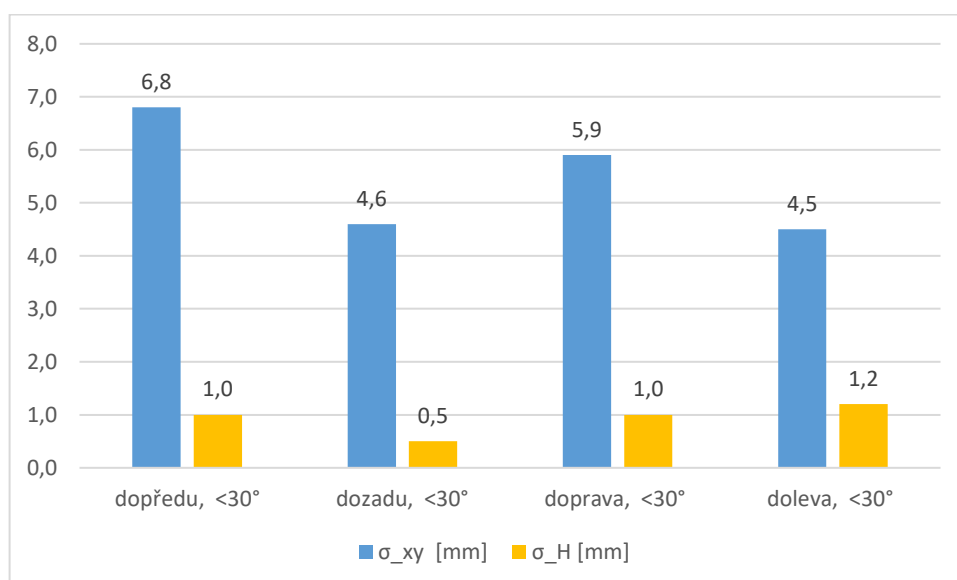


Obr. 27: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon <math><30^\circ</math>, GPR121

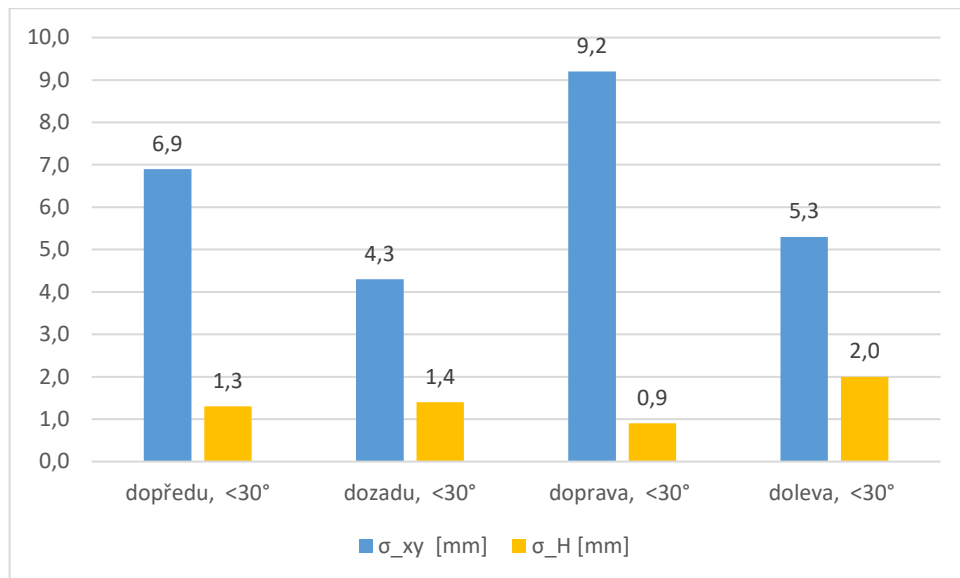
GRZ4, náklon <30°:



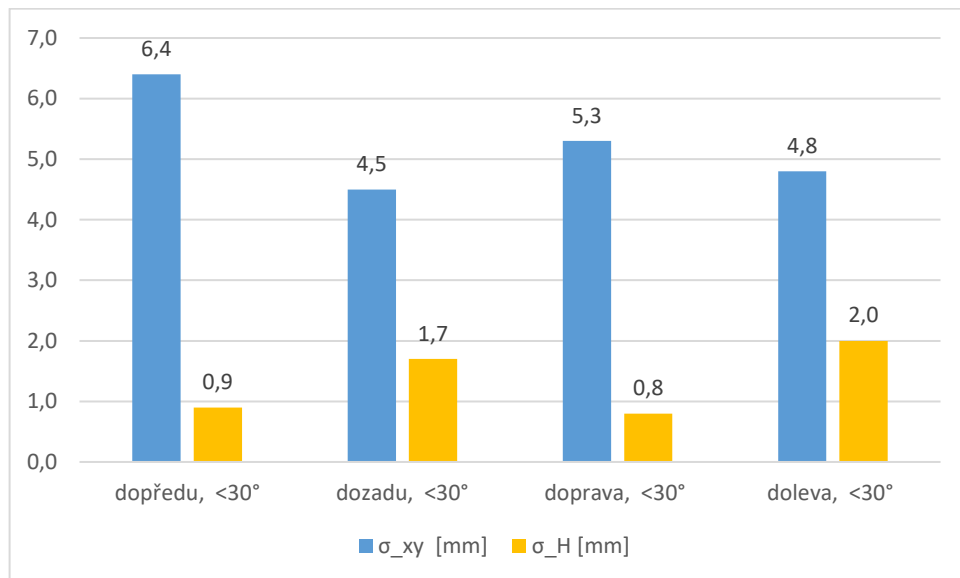
Obr: 28: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon <30°, GRZ4



Obr: 29: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon <30°, GRZ4

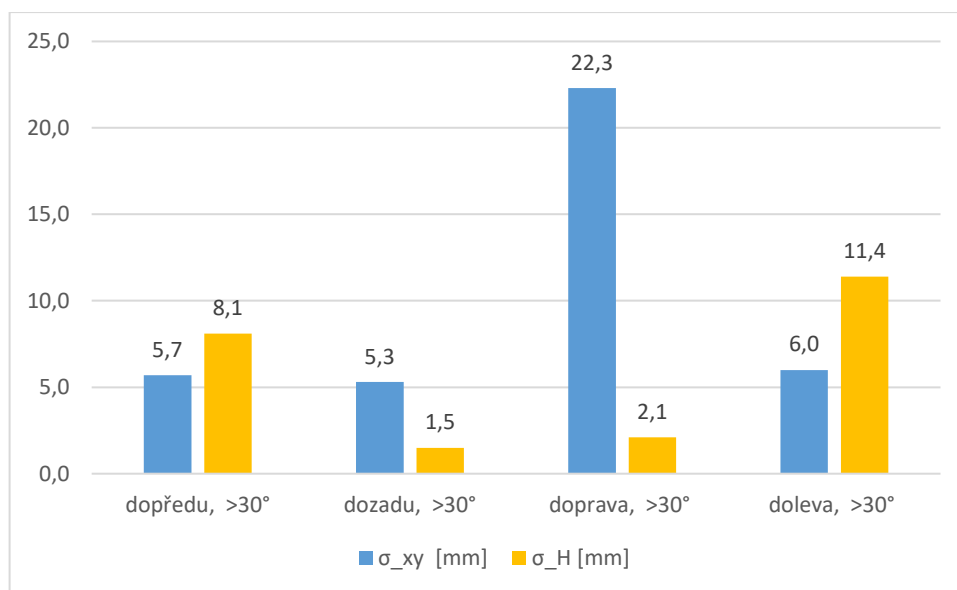


Obr: 30: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon <30°, GRZ4

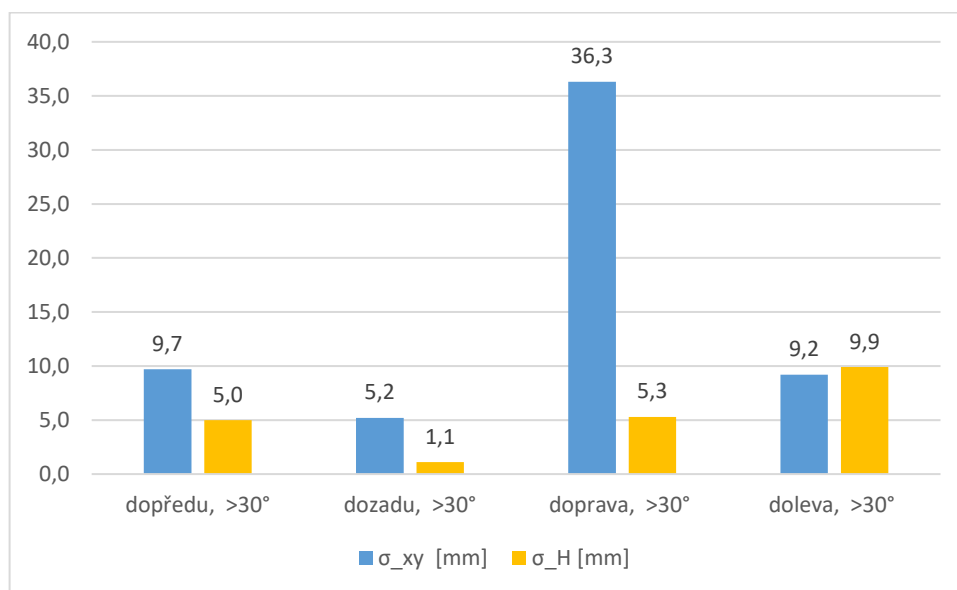


Obr: 31: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon <30°, GRZ4

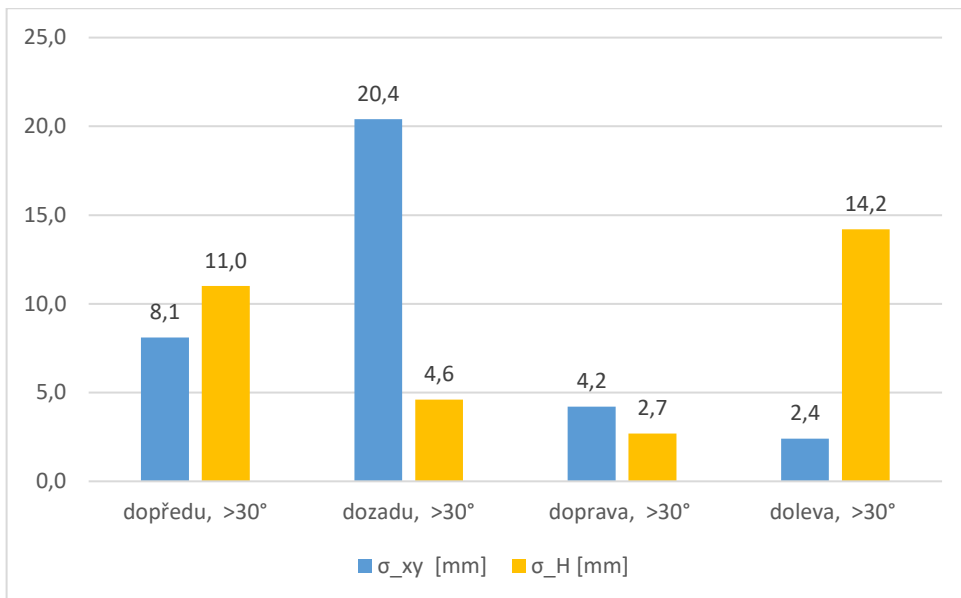
GPR121, náklon >30°:



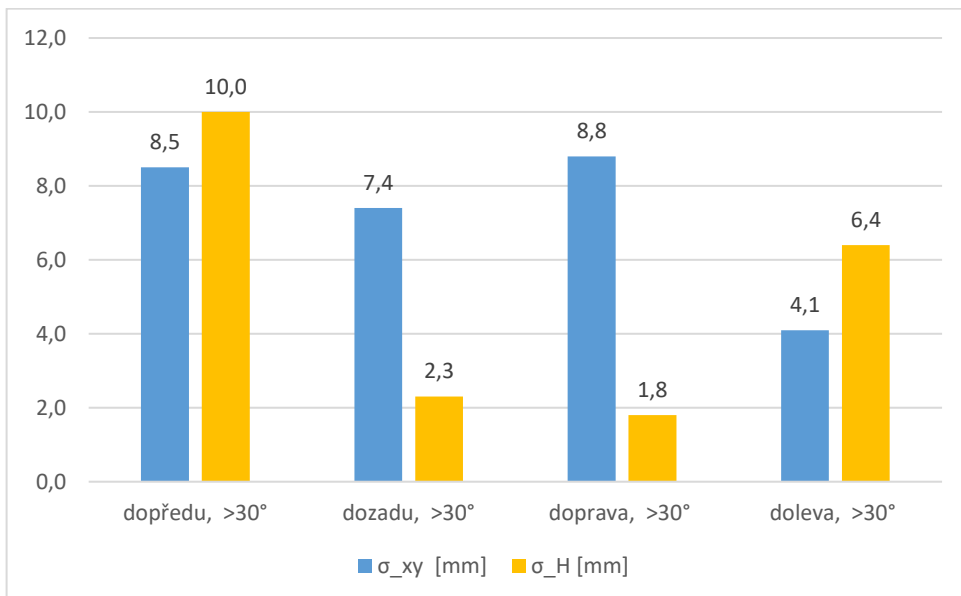
Obr. 32: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon >30°, GPR121



Obr. 33: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon >30°, GPR121

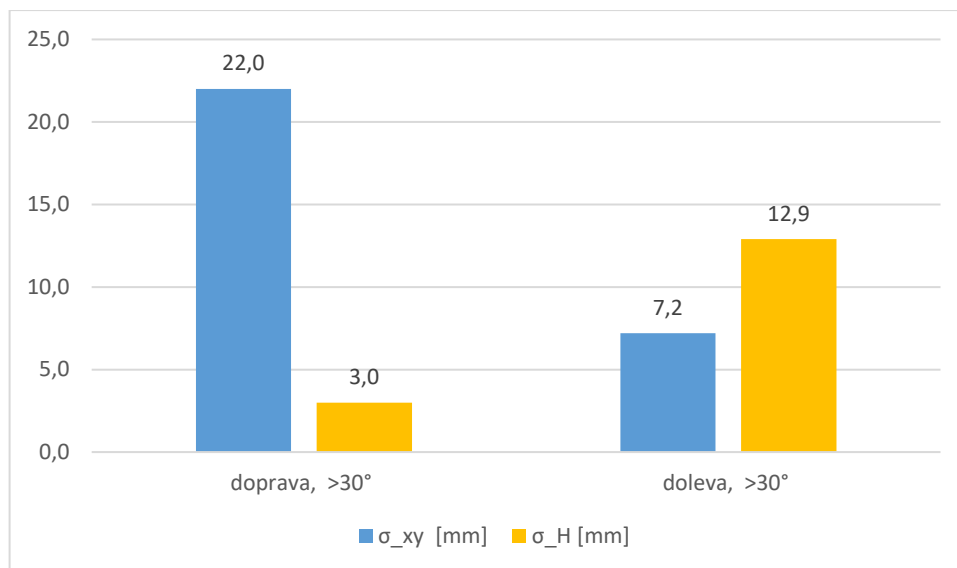


Obr. 34: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon >30°, GPR121

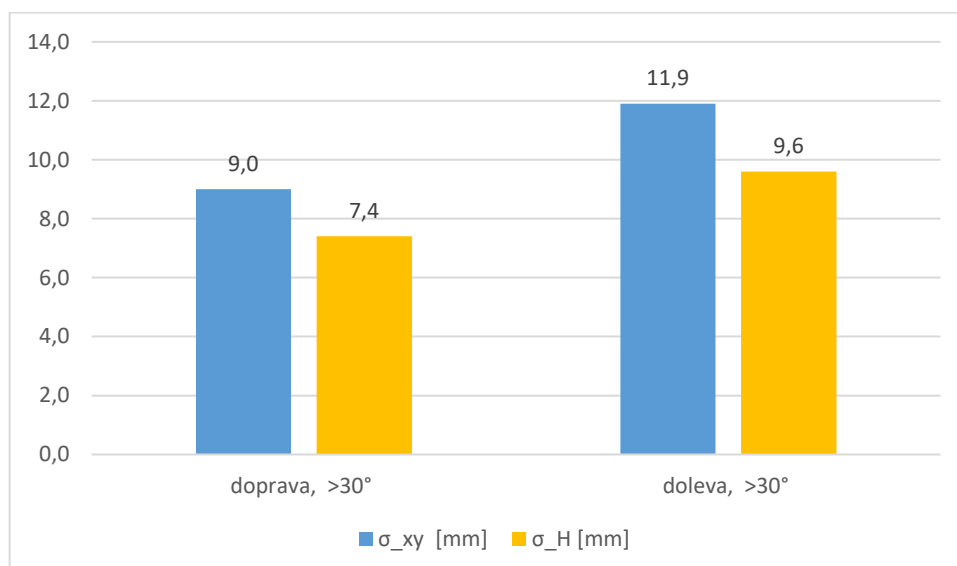


Obr. 35: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon >30°, GPR121

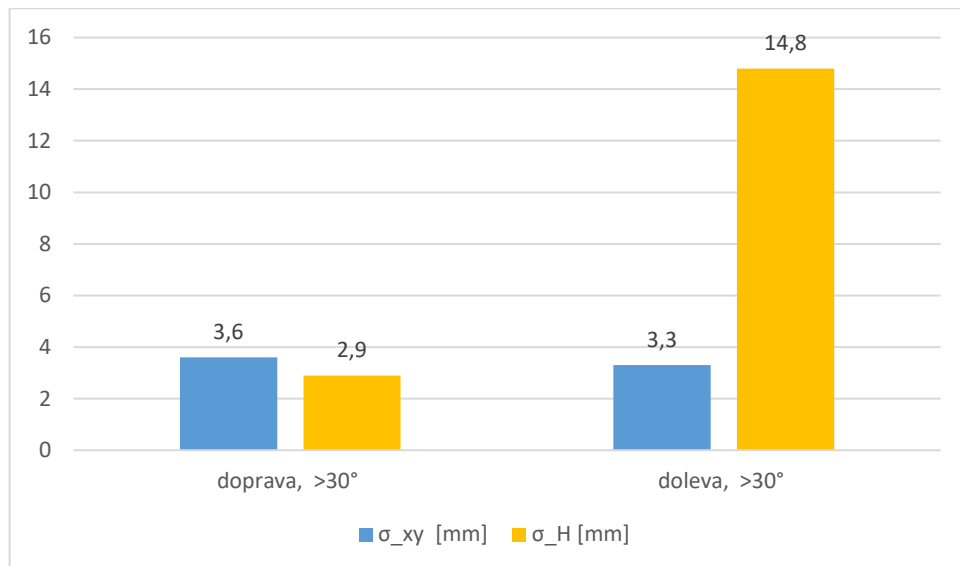
GRZ4, náklon >30°:



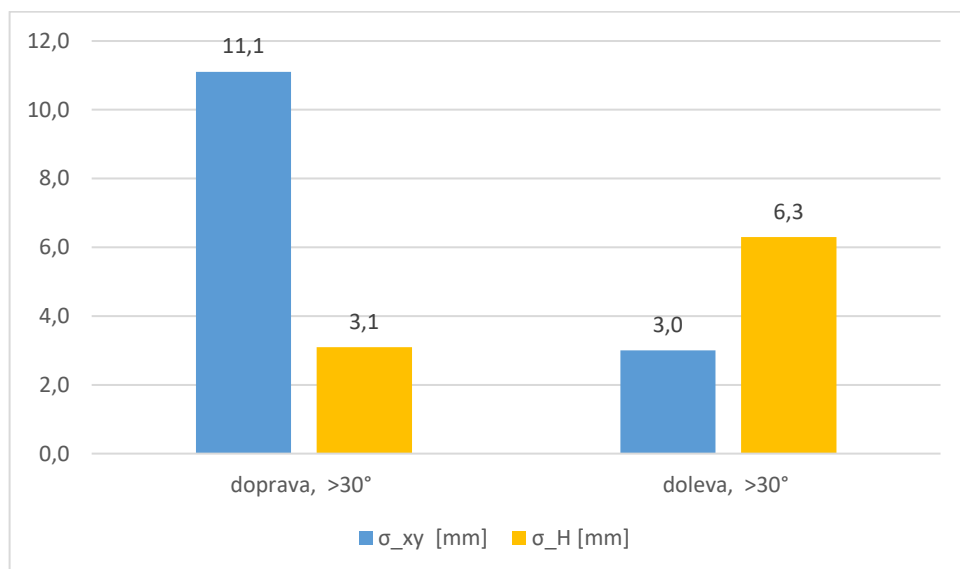
Obr: 36: Polohová a výšková přesnost bodu 1, náklon >30°, GRZ4



Obr: 37: Polohová a výšková přesnost bodu 2, náklon >30°, GRZ4



Obr: 38: Polohová a výšková přesnost bodu 3, náklon >30°, GRZ4



Obr: 39: Polohová a výšková přesnost bodu 4, náklon >30°, GRZ4

Příloha č.2: Vyloučené z výpočtu odlehle hodnoty

Červeně jsou vyznačeny vyloučené hodnoty:

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, <30°	50	1	7,3	4,8	7,0	2,8
	dozadu, <30°			5,9	2,0		
	doprava, <30°			17,3	2,0		
	doleva, <30°			7,8	4,0		
GPR121	dopředu, <30°	50	2	4,7	3,2	4,5	2,7
	dozadu, <30°			4,3	2,0		
	doprava, <30°			13,3	2,0		
	doleva, <30°			14,1	3,4		
GPR121	dopředu, <30°	50	3	6,9	4,5	7,7	2,8
	dozadu, <30°			6,1	2,7		
	doprava, <30°			9,7	2,8		
	doleva, <30°			12,5	4,6		
GPR121	dopředu, <30°	50	4	8,0	5,0	5,7	2,7
	dozadu, <30°			4,5	2,9		
	doprava, <30°			5,7	2,5		
	doleva, <30°			6,6	4,1		

Tab. 14: Vyloučené hodnoty, první série

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, <30°	50	1	7,7	1,8	5,5	1,3
	dozadu, <30°			3,2	0,9		
	doprava, <30°			13,8	1,0		
	doleva, <30°			4,5	1,4		
GRZ4	dopředu, <30°	50	2	6,8	1,0	5,0	1,0
	dozadu, <30°			4,6	0,5		
	doprava, <30°			5,9	1,0		
	doleva, <30°			4,5	1,2		
GRZ4	dopředu, <30°	50	3	6,9	1,3	5,6	1,5
	dozadu, <30°			4,3	1,4		
	doprava, <30°			9,2	0,9		
	doleva, <30°			5,3	2,0		
GRZ4	dopředu, <30°	50	4	6,4	0,9	4,9	1,4
	dozadu, <30°			4,5	1,7		
	doprava, <30°			5,3	0,8		
	doleva, <30°			4,8	2,0		

Tab. 15: Vyloučené hodnoty, druhá série

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GPR121	dopředu, >30°	10	1	5,7	8,1	5,7	4,9
	dozadu, >30°			5,3	1,5		
	doprava, >30°			22,3	2,1		
	doleva, >30°			6,0	11,5		
GPR121	dopředu, >30°	10	2	9,7	5,0	8,3	4,3
	dozadu, >30°			5,2	1,1		
	doprava, >30°			36,3	5,3		
	doleva, >30°			9,2	9,9		
GPR121	dopředu, >30°	10	3	8,1	11,0	5,4	3,8
	dozadu, >30°			20,4	4,6		
	doprava, >30°			4,2	2,7		
	doleva, >30°			2,4	14,2		
GPR121	dopředu, >30°	10	4	8,5	10,0	8,3	4,1
	dozadu, >30°			7,4	2,3		
	doprava, >30°			8,8	1,8		
	doleva, >30°			4,1	6,4		

Tab. 16: Vyloučené hodnoty, třetí série

Typ hranolu	Směr/Úhel náklonu	Poč. opak.	Č. bodu	σ_{xy} [mm]	σ_H [mm]	$\bar{\sigma}_{xy}$ [mm]	$\bar{\sigma}_H$ [mm]
GRZ4	dopředu, >30°	10	1	-	-	7,2	3,0
	dozadu, >30°			-	-		
	doprava, >30°			22	3,0		
	doleva, >30°			7,2	12,9		
GRZ4	dopředu, >30°	10	2	-	-	10,6	8,6
	dozadu, >30°			-	-		
	doprava, >30°			9,0	7,4		
	doleva, >30°			11,9	9,6		
GRZ4	dopředu, >30°	10	3	-	-	3,5	2,9
	dozadu, >30°			-	-		
	doprava, >30°			3,6	2,9		
	doleva, >30°			3,3	14,8		
GRZ4	dopředu, >30°	10	4	-	-	3,0	5,0
	dozadu, >30°			-	-		
	doprava, >30°			11,1	3,1		
	doleva, >30°			3,0	6,3		

Tab. 17: Vyloučené hodnoty, čtvrtá série