

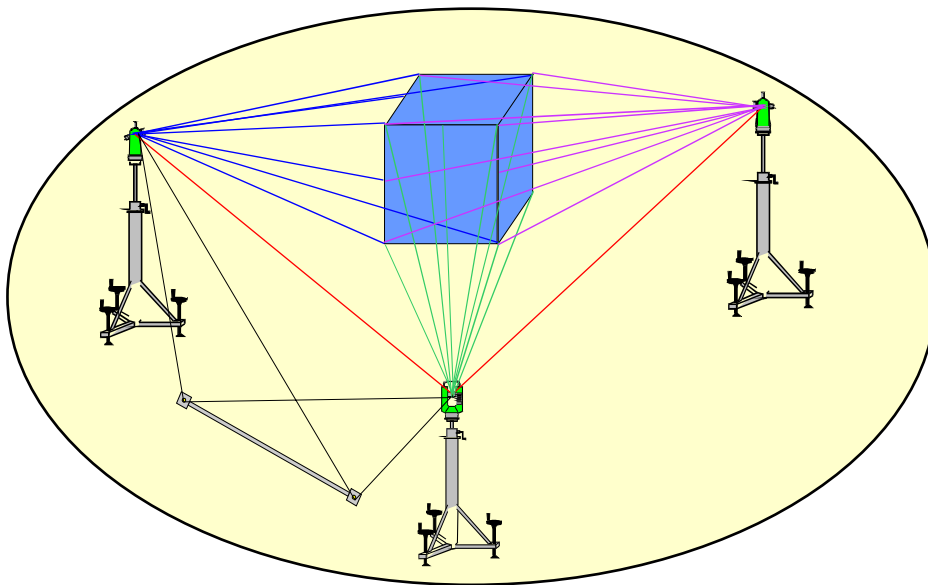
---

Technická univerzita Drážďany

Geodetický ústav

Katedra inženýrské geodézie

## Systemy průmyslových měření



---

Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Möser

Dipl.-Ing. Jan Schmidt

<http://wwwgi.geo.tu-dresden.de/ig/>

*V rámci projektu CTU 0513011 (2005) přeložil Doc. Ing. Pavel Hánek, CSc.*

*Přednáška na K 154 se konala v březnu 2005 v rámci předmětu SPGD.*

---

## Literatura

KERSTING, N.: Optimale Konfiguration beim Vorwärtseinschneiden mit Industrie-Messsystemen. AVN 94 (1987) 5, S. 169-177

SCHLEMMER, H.: Anforderungen, Stand und Entwicklung von Industrie-Messsystemen. ZfV 114 (1989) 7/8, S. 365-372.

HÁNEK, P.: Atypical methods of measurement in mechanical engineering. XIX International Congress FIG, Helsinki Finland, 1990, s. 610.4/1-10.

MEYER, R.: Theodolitindustriemesssysteme im Automobilbau. AVN 97 (1990) 5, S. 176-184.

HENNECKE, F.; MÜLLER, G.; WERNER, H.: Handbuch Ingenieurvermessung, Band 6: Maschinen- und Anlagenbau. Wichmann Verlag, Karlsruhe 1992.

WELSCH, W.; SCHLEMMER, H.; LANG, M.: Geodätische Messverfahren im Maschinenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 1, Stuttgart 1992.

SCHIRMER, W.: Vom Umgang mit Industriemesssystemen - einige praktische Erfahrungen. AVN 100 (1993) 6, s. 231 – 238.

BUBENÍK, F. - HÁNEK, P.: Schätzung der Genauigkeit der 3-D Messung im Maschinenbau. VR 56, 1994, č. 8, s. 426-433.

SCHWARZ, W. (HRSG.): Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer Band 28, Stuttgart 1995.

MÖSER, M.; u.a.: Erfahrungen mit dem Industriemesssystem Axyz im Nahbereich. AVN 10/97.

BUBENÍK, F. - HÁNEK, P. - JANŽUROVÁ, I.: K přesnosti jednoduchých aplikací prostorového protínání s použitím klasických teodolitů. GaKO 44 (86), 1998, č. 8, s. 178-182.

MÖSER, M.: Dreidimensionale geodätische Qualitätskontrolle im Schienenfahrzeugbau. Flächenmanagement und Bodenordnung. Zeitschrift für Liegenschaftswesen, Planung und Vermessung, Heft 1, 2001.




MÖSER, M. - HÁNEK, P. - JIRÁSKOVÁ, J.: Kontrola kvality geodetickými senzory při stavbě kolejových vozidel. Stavební obzor 10, 2001, č.4, s. 121-124.

MÖSER, M., u.a. (Hrsg.): LÖFFLER, F. u.a. (2002): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band: Maschinen und Anlagenbau. Wichmann Verlag

# 1 Určování prostorových souřadnic

## 1.1 Teodolitové měřicí systémy

- Poloha vývrtů, hran a signalizovaných bodů na karoseriích vozidel, výrobní přípravky v leteckém průmyslu, strojírenská zařízení (lisy, válcovací tratě),
- ověření forem pro velké dílce: parabolické antény, chladicí věže,
- měření experimentálních zařízení urychlovačů částic,
- měření a kalibrace geometrických, mechanických a kinematických parametrů průmyslových robotů,
- kontrola výrobních nástrojů ve stísněných prostorách,
- geometrické kontroly jakosti výroby na běžícím pásu.

	Laserový tracker LTD 500	Teodolitový systém Axyz-MTM	Videogrammetrie V-Stars/S
			
Měřicí rozsah	1 – 35 m	2 – 10 m	2 – 15 m
Přesnost	0,01mm/1m	0,1 mm/5m	0,05 mm/5m
Použití	Stavba zařízení	Deformační měření Stavba zařízení	Kalibrace robotů Výroba nástrojů

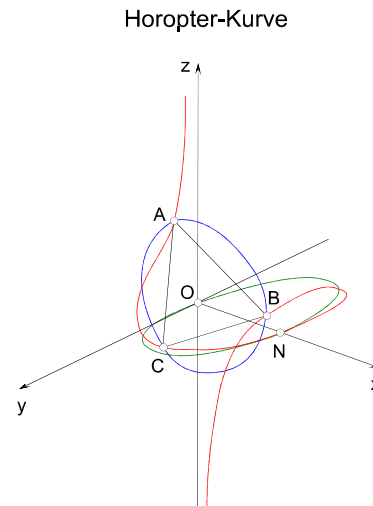
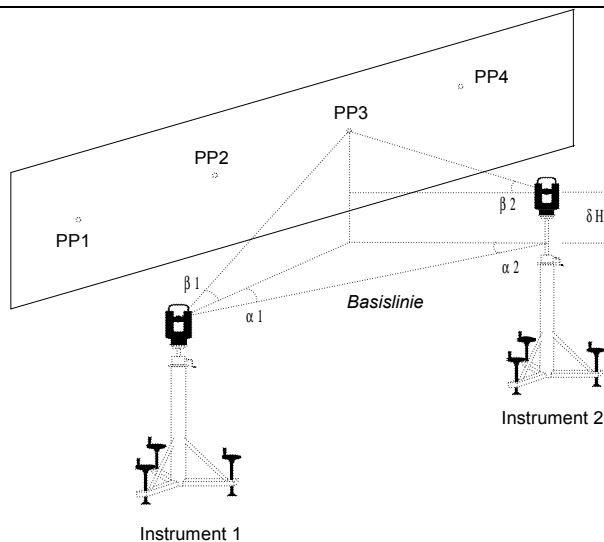
Při protínání vpřed a vzad musí být použity nejméně dva elektronické teodolity spojené s počítačem, který z měřených hodnot – horizontálních směrů a zenitových úhlů – a nejméně z jednoho známého rozměru v prostoru objektu vypočte 3D souřadnice.

**Protínání zpět** odpovídá principu fotogrammetrické metody pro určení polohy a orientace kamery v prostoru.

Ve vyhodnocovacím software teodolitových systémů není zadávána orientace kruhu a svislé osy přístroje. Příslušné parametry jsou určovány až při vyhodnocení. Měřené zenitové úhly představují obecný prostorový úhel, který už nemá žádný vztah ke svislici. V tomto případě, kdy jsou zaměřeny tři pevné body, vznikají dvě nebezpečné varianty:

- dané tři body leží v přímce,
- dané tři body leží spolu s hledaným stanoviskem na plášti válce, který v rovině svisle stojí na oněch třech daných bodech.

Tyto nevhodné pozice prostorového protínání odpovídají „nebezpečné kružnici“ rovinného protínání. Toto nebezpečí pomine, použijeme-li k protínání alespoň čtyři dané body, které neleží na tzv. *Horovertově křivce*. (V obr. *Basislinie* = základna.)

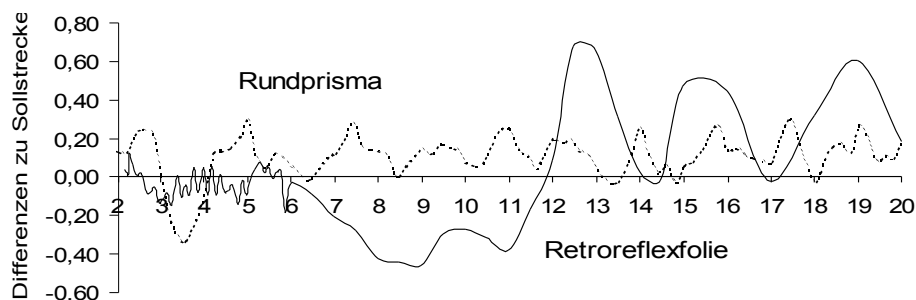


## 1.2 Přesné měření blízkých délek

Pro strojírenská měření délek elektronickým dálkoměrem je uvažována absolutní přesnost  $\sigma_s = 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$  a pro blízké cíle  $\sigma_s = 0,5 \text{ mm}$  pro 120 m. Cíle jsou značeny reflexními fóliemi (20 x 20, 40 x 40, 60 x 60 mm), zrcadelnými a hranolovými reflektory.

Dosah měření na reflexní fólie je zhruba 2 m až 180 m. Při měření délek do 20 m je na objektiv nasazována předsádková čočka. Má tvar štěrbinové clony a je uvnitř i zvenku zrcadelná. Tím je optika vysílače a přijímače chráněna proti rušivým signálům. Přesnost měření blízkých délek do 90 m je asi 0,7 mm.

U objektů rozměru cca 50 x 50 m odpovídá přesnost měření délek přesnosti úhlových měření. (Na obrázku na svislé ose jsou uvedeny skutečné chyby délkového měření s fólií a s hranolem.)



*Chyba měřených délek*

Pro blízké objekty je přesnost určení bodu ovlivněna především určením délek. Určení součtových konstant pro fólie i hranoly (viz tabulka) se uskutečňuje přímým měřením na laserovém interferometru nebo na základně se čtyřmi neznámými úseky. V rozsahu

do 15 m se při měření na fólie 20 x 20 mm projevily systematické odchylky velikosti  $\pm 0,6$  mm. V rozsahu do 90 m se již rozdíly v přesnosti při použití různých cílových odražečů neprojevují.

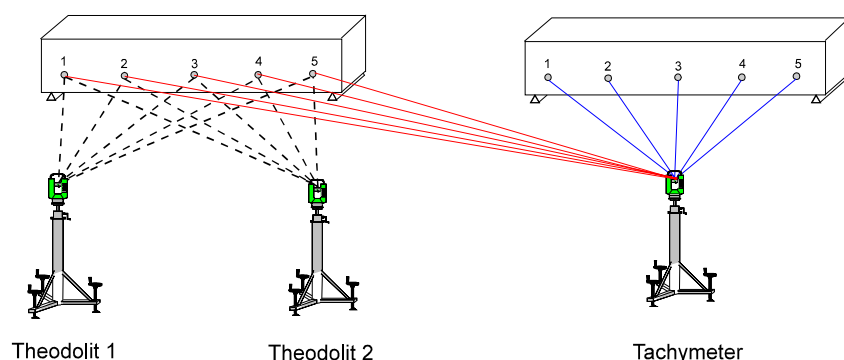
Základna	Odražeč	Dosah [m]	Součtová konstanta c [mm], $s_c = 0,2$ mm
terénní	hranol	100	1,6
terénní	fólie	100	33,8
laboratoř	hranol	20	1,6
laboratoř	fólie	20	34,0

Při měření na fólie, jejichž rovina svírá s rovinou cílového paprsku ostrý úhel, musí být průběh paprsků v přístroji centrický (SCHLEMMER 1996). Jen při tomto uspořádání jsou přijímány tytéž signály, které byly odraženy v cíli. V opačném případě cílový bod a bod odrazu nejsou identické; výsledná délka je zkreslena. Mezní úhel stočení při použití fólie je  $15^\circ$ . Potom chyba v délce nepřesáhne hodnotu 1 mm.

Podrobné výzkumy prokázaly rozdíl v délce měřené na fólii v první a v druhé poloze dalekohledu ve velikosti 1,5 mm při stočení roviny cíle oproti rovině paprsku přes  $20^\circ$ . Všechny délky v blízkém dosahu musí být proto měřeny **ve 2 polohách**.

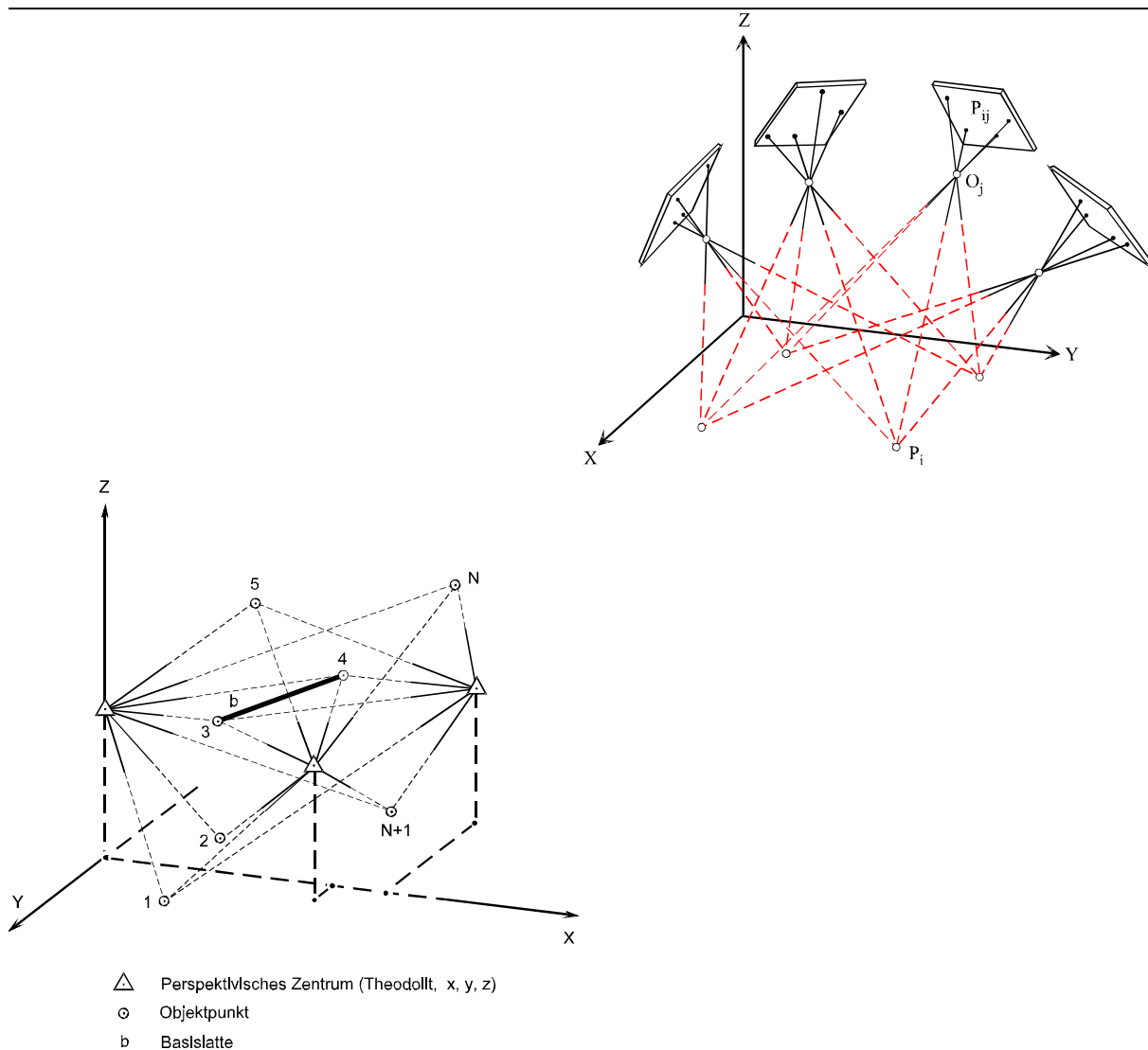
## 2 Průmyslová měření

Průmyslové měřicí systémy (IMS, geodetické IMS, teodolitové IMS) se používají pro určení 3D karteziánských souřadnic.



### *Metody protínání vpřed a polární, Leica TM5000 pro průmyslová použití*

Protože teodolitový měřicí systém předpokládá při protínání vpřed observaci každého měřeného bodu alespoň ze dvou stanovisek, musí být k dispozici před měřeným objektem dostatečně velký volný prostor. Oproti tomu je u polární metody s potřebou jediného zacílení situace jednoznačně odlišná. V nepřehledných prostorových konfiguracích je použití polární metody výhodnější nežli metoda protínání.



*Vícesnímková triangulace a teodolitový systém*

(V popisu obrázku postupně: střed projekce – bod objektu – základnová lať)

## 2.1 Orientace a zpracování

U teodolitových systémů je nejdříve – nezávisle na objektu – relativně řešen vztah stanoviště a orientace děleného vodorovného kruhu v kartézském souřadnicovém systému: počátek je v průsečíku točné osy libovolně umístěného teodolitu s rovinou; osa  $Z$  směřuje k zenitu; osa  $X$  směřuje k druhému teodolitu.

Pro určení měřítka systému je nutné zaměřit nejméně 2 body, určující známý rozměr: základnová lať nebo jakékoli jiné měřítko nebo rozměr, považovaný za referenční, se umístí na objekt tak, aby koncové body byly viditelné z obou stanovišek.

Pro toto určení orientace, polohy a měřítka jsou používány dvě odlišné cesty:

- a) metoda vzájemného zacílení,
- b) vyrovnání trsu paprsků.

(1a) Metoda vzájemného zacílení

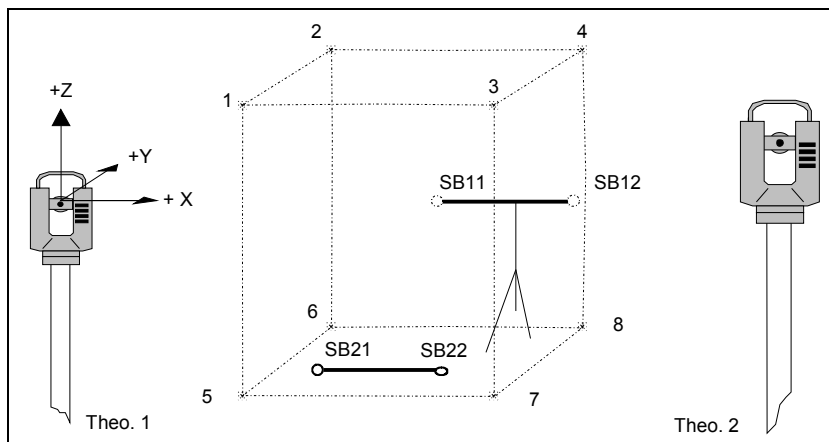
- vzájemné zacílení teodolitů,  
na cílový znak protějšího teodolitu je cíleno ve dvou polohách, přičemž cílový teodolit je mezi záměry také otočen o  $180^\circ$ , aby se vyloučila excentricita cílového bodu a průsečíku záměrné osy s osou otáčení teodolitu,
- přístrojové chyby jsou určeny a korigovány,
- zaměření koncových znaků referenčního rozměru.

#### (1b) Orientace bez vzájemného zacílení

- parametry orientace se určí ze záměr na body objektu a / anebo ze záměr na body, určené pro orientaci, a ze záměr na koncové body referenční délky,
- je měřeno nejméně 5 bodů (doporučováno je 10 - 15 cílových bodů),
- referenční délka je postupně měřena ve 3 - 4 odlišných polohách,
- příklad orientace v místním souřadnicovém systému:  
2 teodolity, 2 měřítka a 8 orientačních bodů.

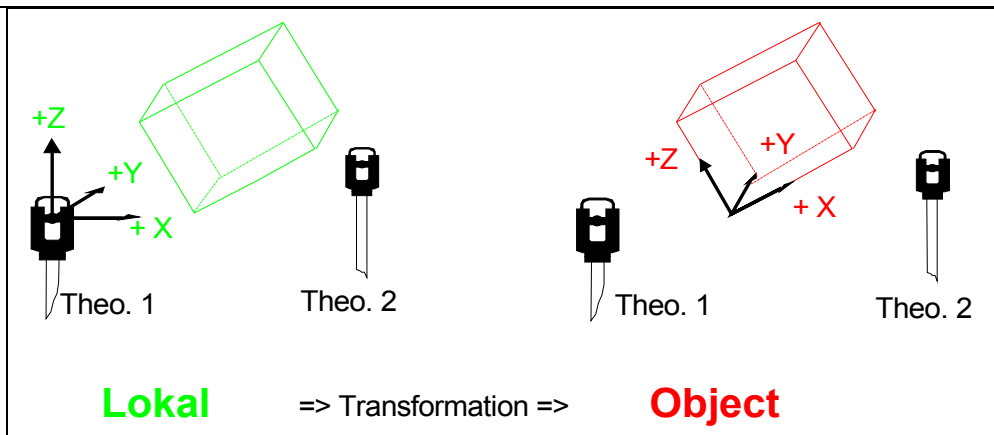
Záměry teodolitu při měření horizontálních směrů a zenitových úhlů jsou v podstatě trsem paprsků. Při vyrovnání trsu paprsků z více stanovisek jsou záměry tak pootočený a posunuty, aby se paprsky směřující k témuž cíli pokud možno protínaly v jednom bodě za podmínky, že obsahují záměry na kalibrovaný referenční rozměr.

Výsledkem je vzájemná protisměrná orientace teodolitů a 3D souřadnice měřených bodů, ale ty nikoli v souřadnicovém systému objektu.



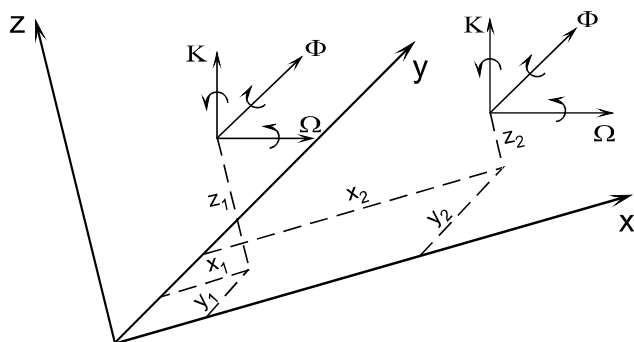
(3) Po provedené orientaci lze určovat body na měřeném objektu protínáním vpřed. Přitom prostorem obecně probíhají dva nebo více záměrných paprsků. V tom případě se vlivem měřických nepřesností neprotínají v jednom bodě. Jako výsledný průsečík je vypočítán bod, jehož vzdálenosti od záměr jsou minimální.

(4) Souřadnice měřených bodů objektu jsou nejprve určeny v souřadnicovém systému, daném orientací teodolitů (v obrázku Lokal) s počátkem zpravidla v průsečíku os levého teodolitu. Pokud jsou v tomto systému určeny i body, u nichž jsou známy souřadnice v jiném systému, např. vztaženém k měřenému objektu (Object), lze vypočítat parametry prostorové transformace a ostatní body snadno do tohoto požadovaného objektově orientovaného souřadnicového systému transformovat.

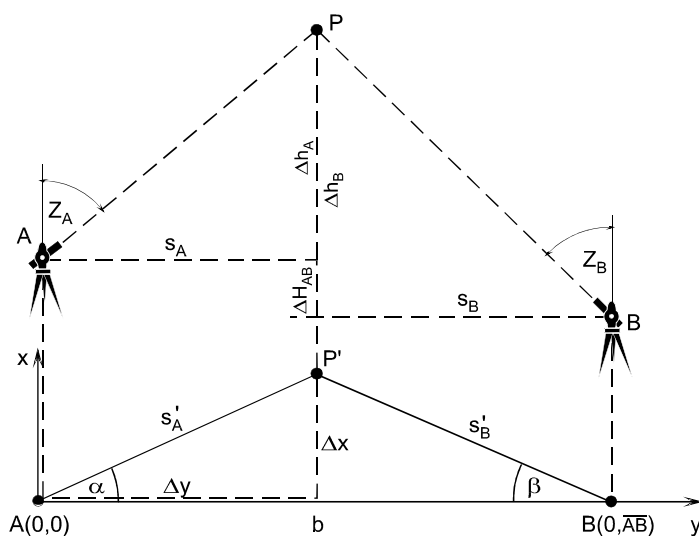


Ze 7 stupňů volnosti (m, X, Y, Z,  $\Omega$ ,  $\Phi$ , K) 3D-transformace (měřítko, 3 posuny a 3 pootočení) jsou v praxi používány většinou jen 6 nebo 4 prvky, neboť

- měřítko je definováno referenčním rozměrem,
- v mnoha případech je souřadnicová osa Z svislá.



(5) Pokud se spojí měření pro orientaci s měřením pozorovaných bodů objektu, proběhne prostorové vyrovnání společně.



Při znalosti parametrů orientace vypočte program systému prostorové souřadnice bodů objektu v místním systému z rovnic



$$y = b \cdot \frac{\sin \beta \cdot \sin \alpha}{\sin(\alpha + \beta)} \quad x = b \cdot \frac{\sin \beta \cdot \cos \alpha}{\sin(\alpha + \beta)}$$

$$h = \frac{1}{2} \left( b \cdot \frac{\sin \beta \cot z_A + \sin \alpha \cot z_B}{\sin(\alpha + \beta)} + \Delta H_{AB} \right)$$

Výpočet souřadnic není oddělen od výpočtu orientace. Při přiměření dalších hodnot (bodů) se provede celé vyrovnání včetně orientace znovu. IMS umožňuje

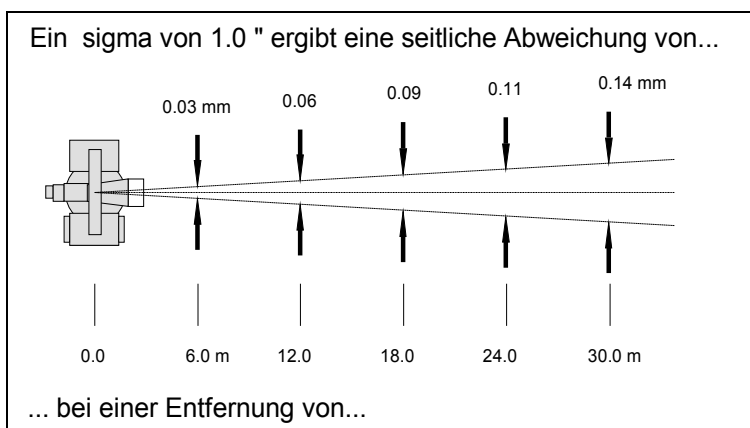
- proložení geometrických tvarů body (např. přímka, kruh, rovina, válec, koule apod.) podle strojírenských požadavků,
- výpočet charakteristik přesnosti: směrodatné odchytky úhlů a délek, svislé odchytky vyrovnané roviny atd.

## 2.2 Konfigurace a přesnost systému

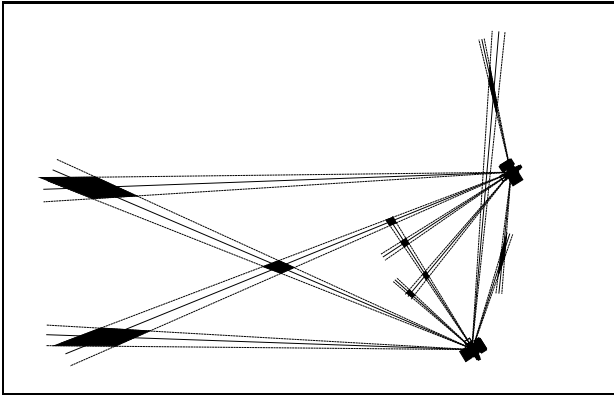
Dosažitelná **přesnost**  $\sigma_r = 0,2$  až  $0,4$  mgon,  $s = 10$  m,  $q = 0,03$  bis  $0,06$  mm,  $\sigma_p = 0,05$  až  $0,1$  mm pro signalizované body je odvislá od

- přesnosti měření směrů a na vzdálenosti,
- přesnosti určení referenční délky (kalibrace),
- jemnosti cílení na signalizované body,
- úhlu protnutí záměr,
- stability postavení přístrojů,
- refrakce a vlivů okolí (běžící stroje?),
- mechanických omezení, osobní chyby měřiče atd. = přesnost pozorování ( $1\sigma$ ).

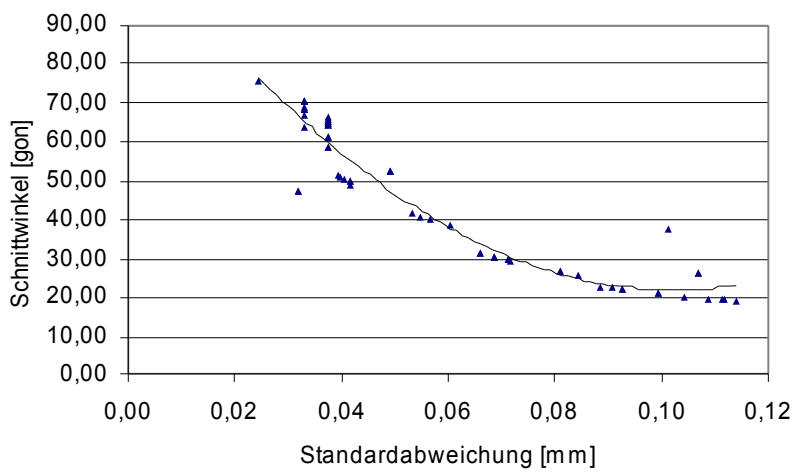
V obrázku je uvedena příčná odchytka, vyvolaná přesností  $1\sigma = 1,0''$  na různé vzdálenosti v rozsahu 30 m.



- Vlivy konfigurace na celkovou přesnost

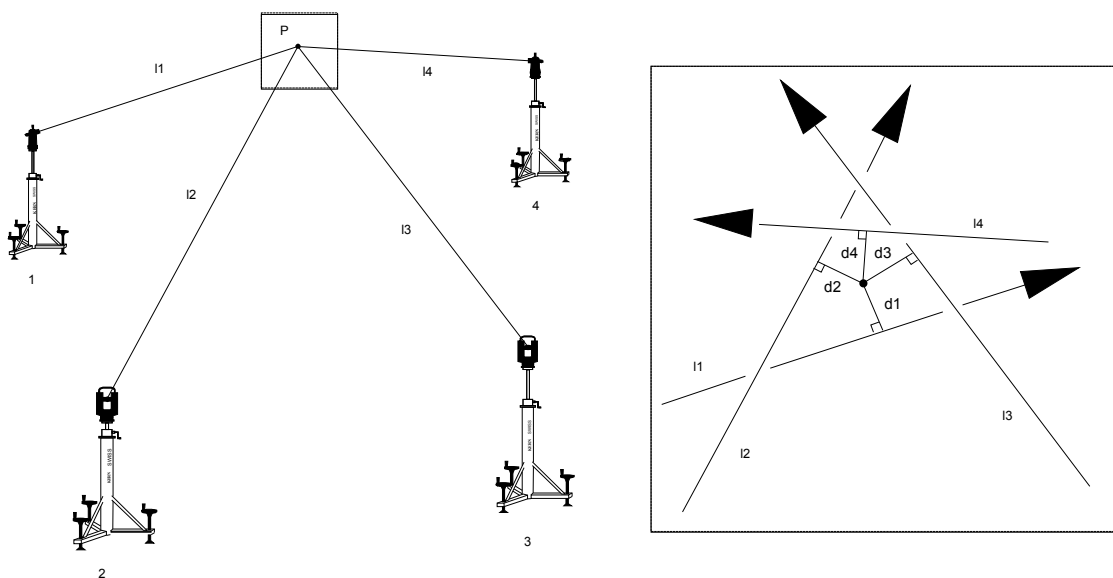


⇒ velikost úhlu protínání ⇒ přesnost určení souřadnic bodů



(V obrázku je na svislé ose velikost úhlu protínání, na vodorovné směrodatná odchylka.)

Pokud je bod po výpočtu nekvalitní...

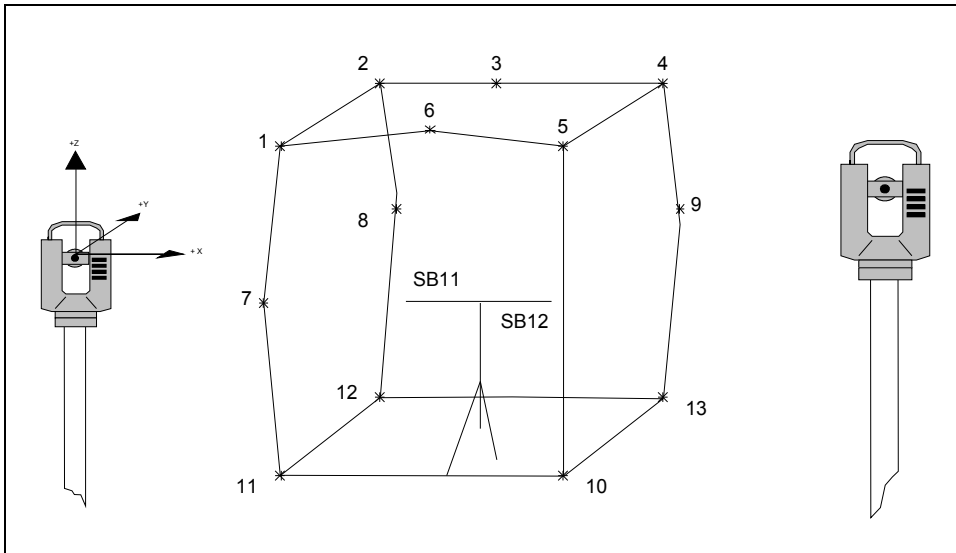


### *Přesnost cílení a chyba bodu*

Poloha záměr je ovlivněna náhodnými chybami. Za nejpravděpodobnější průsečík je

považován ten bod, který vykazuje nejkratší vzdálenost k přímkám (viz obr.). Tím je udávána i přesnost určení polohy bodu.

**Pozor:** Výpočtem je vyhledáván bod, který vykazuje největší chybu v zacílení (RMS-Anzielfehler). Tato chyba zkrlesluje i dobré výsledky.



*Vzájemná konfigurace měřicího systému a objektu*

## 2.3 Signalizace cílů



### Měření neviditelných bodů (Hidden point Stab)

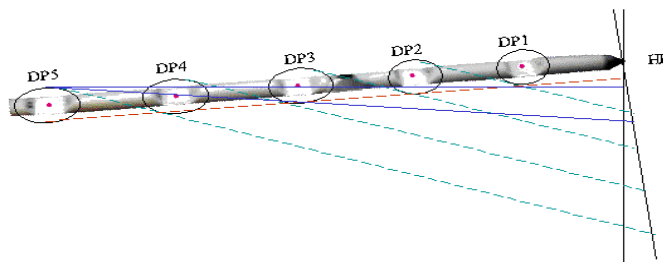
„Hidden point Stab“ je speciální přípravek (tyč), sloužící k určení neviditelných, zakrytých bodů (angl.: Hidden points). Na tyči je 5 cílových znaků (angl.: Device points) ve známých rozestupech (100 mm) a hrot. Tímto přípravkem se excentricky signalizuje měřený bod a z jeho rozměrů lze vypočítat požadované souřadnice tohoto bodu. Výpočet souřadnic hrotu tyče, přiloženého na měřený bod, se provede z měření dvojice Device points jako bod na přímce. Pro souřadnicové rozdíly platí:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{DP_{i+1}} - \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{DP_i}$$

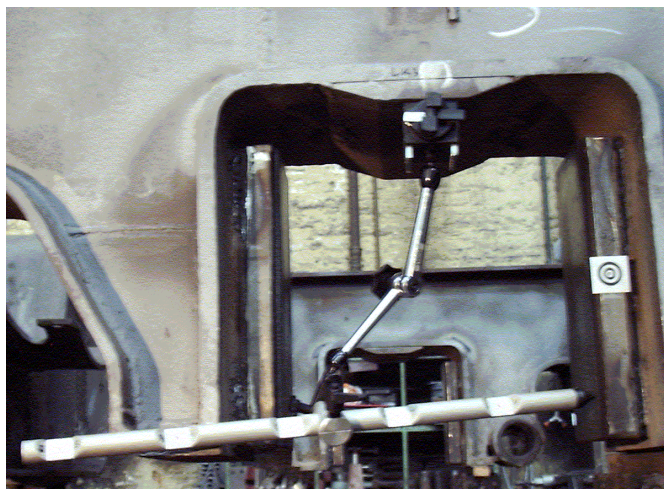
Směrový vektor je přitom vypočten z vodorovného směru  $t$  a zenitového úhlu  $\zeta$  nebo z rozdílu souřadnic obou použitých cílových znaků. Souřadnice zakrytého bodu (HP) se vypočtou při vzdálenosti těchto znaků 100 mm:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{HP} = \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}_{Di} + 100 \text{ mm} \begin{pmatrix} \cos \zeta \cdot \cos t \\ \sin \zeta \cdot \cos t \\ \sin \zeta \end{pmatrix}$$

Přesnost je ovlivněna  
 přesností úseků latě mezi znaky,  
 excentricitou znaků oproti ose tyče,  
 přesností cílení na cílové znaky,  
 přesností umístění hrotu na určovaný měřený bod,  
 orientací přípravku oproti rovině.



*Přesnost určení bodu v závislosti na umístění tyče*



*Použití tyče „Hidden Point Stab“*

## Zatěžovací zkoušky

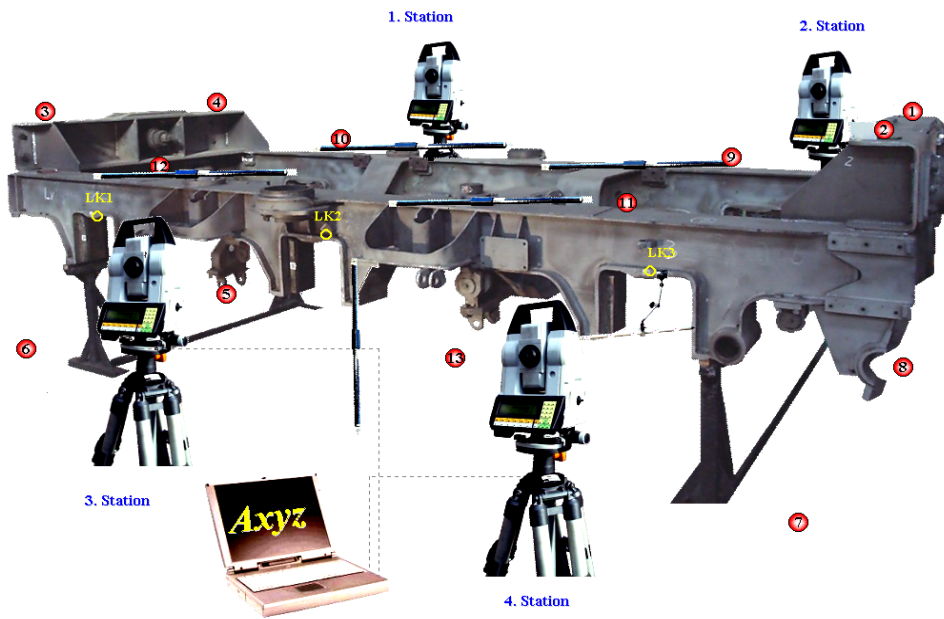
<b>Zadání</b>	Měření deformací pro Institut stavebních hmot TU Dresden
<b>Problem</b>	Určení svislých deformací železobetonového trámce
<b>konfigurace</b>	
<b>Dosažená přesnost</b>	M. protínání Axyz MTM : $s_z < 0,1 \text{ mm}$ $s_p = 0,1 \text{ mm}$ M. polární STM : $s_z = 0,1 \text{ mm}$ $s_p = 0,5 \text{ mm}$

TU Dresden Geodätisches Institut  
 Professur Ingenieurgeodäsie

## Ocelové mosty

<b>Zadání</b>	Kontrola mostních dílců Stahlbau Plauen GmbH
<b>Problém</b>	Ověření geometrie mostních dílců polární metodou Axyz-STM se zakrytými body
<b>Konfigurace měření</b>	
<b>Dosažená přesnost</b>	Přesnost bodu $s_p = 1,0 \text{ mm}$ <span style="background-color: #ADD8E6; display: inline-block; width: 50px; height: 15px;"></span>

TU Dresden Geodätisches Institut  
 Professur Ingenieurgeodäsie



Podvozek lokomotivy (Diplomová práce VOLKHOZ, 2000)

