

1 ÚVOD

1.1 Stručný vývoj geodezie

Geodezie je vědní obor, zabývající se určením tvaru a rozměru Země, jejích jednotlivých částí i celého povrchu a znázorňováním zaměřených skutečností.

Název geodezie vznikl spojením dvou řeckých slov geo - Země a daiomai - dělím. Vhodnější spojení geo – Země a metrein – měřit se v praxi pro tento vědní obor nepoužívá, neboť je vyhrazeno pro jiná odvětví matematiky (geometrie).

Geodezie se poměrně záhy vyčlenila z matematiky vyspělých kulturních národů, které se zabývaly stavitelstvím, astronomií a vyšší formou zemědělství, v samostatné odvětví.

První písemná památka o zeměměřičtví pochází ze starověkého Egypta, kde vznikl ve 2. tisíciletí př. n. l. „papyrus Rhind“, ve kterém opisovač Ahmes popisuje výpočty ploch, objemů, učí jak zaměřovat pozemky a je tak dosud první dochovanou učebnicí zeměměřičtví. V Egyptě, kde v povodí Nilu každoroční záplavy vyvolávaly potřebu znovuvytyčení pozemků zemědělců v zaplavovaném pásmu. Důležité to bylo též pro panovníka, který z obhospodařovaných ploch vybíral daně. Zeměměřičtí úředníci se proto ve starověkém Egyptě těšili veliké úctě a vážnosti.

Nelze však tvrdit, že by zeměměřičtví vzniklo pouze v Egyptě. Zeměměřičké práce provázely velká stavební díla ve všech rozvinutých lidských kulturách. Prastaré říše v povodí mohutných veletoků v Číně, Indii, Mezopotámii a v jiných částech světa (např. v Americe), budovaly svá sídliště, přístavy, průplavy, opevnění, chrámy, paláce či pyramidy za přispění zeměměřičů.

Za samostatnou zmínku stojí zeměměřičké znalosti Sumerů a Akkáďů. Dovedli kromě základních čtyř početních úkonů též umocňovat a odmocňovat; dokázali vypočítat plochu trojúhelníka, pravoúhelníka, lichoběžníka, objem krychle, kvádra, hranolových těles, jehlanu, kužele atd. Znali i Pythagorovu větu a Ludolfovo číslo.

Rovněž staří Řekové vynikali v zeměměřičtví a ještě dnes známe mnoho jmen spjatých s tímto oborem. Mezi ně patří Thales, Pythagoras, Platón, Aristoteles, Archimedes, Erasthenes, Euklidos, Heron, Appolonius a další. Nejznámější doklad o vyspělé zeměměřičké činnosti pochází od Erasthotena ze 3. st. př. n. l., který v Egyptě z měření v Alexandrii a Asuánu úspěšně změřil délku poledníkového oblouku a z něj odvodil zemský obvod. Výsledek má vynikající přesnost a liší se od skutečnosti o pouhých 0,8 %.

Také Římané se zabývali měřičtím při vyměřování sídlišť, silnic, vojenských táborů, stavbě akvaduktů. Věděli jak určit výšky kopců, šířku vodních toků atd. Mnoho poznatků a zkušeností přejali od Etrusků a narozdíl od Řeků byli zpravidla vedeni jen potřebami praxe. V Římě se též začali používat dva zeměměřičké přístroje: gróma pro vytyčování kolmic a chorobates pro nivelaci. Obratnost, s jakou římstí zeměměřiči dovedli chorobatu používat, dosvědčují dodnes zachované vodní stavby, akvadukty, které zásobovaly města vodou. Příkladem je částečně dochovaný akvadukt do města Nimes v jižní Francii, vybudovaný koncem 1. st. př. n. l. s třípatrovým mostem „Pont du Gard“.

Ve středověku, kdy došlo k zániku starých civilizací a v celé Evropě se rozvíjela vzdělanost převážně v církevních kruzích, došlo ke stagnaci zeměměřičtví. V té době byli v měřičtví nejvyspělejší Arabové, kteří přes Pyrenejský poloostrov pronikali do Evropy. Řada termínů v zeměměřičtví a astronomii pochází z arabštiny např. alhidáda (z arabského al-idáda = počítadlo), nebo azimut (as-samt = směr, kurs). Arabové provedli nové, velmi přesné

stupňové měření a určili tak zemský obvod. V matematice zavedli desítkovou, poziční soustavu.

Až období renesance s rozvojem základních věd přineslo kvalitativně nový přístup k vývoji zeměměřičství v Evropě. Nové znalosti v matematice, deskriptivní geometrii a fyzice umožnily geodezii postavit na teoretický základ. Zasloužili se o to učenci jako G. D. Cassini, P. Bouguer, P. Laplace, J. Lagrange, G. Monge, J. B. J. Delambre, C. F. Gauss (viz příl. 1.1).

Také Češi se podíleli na rozvoji geodezie: tak např. Šimon Podolský spisem „Knižka o měřích zemských“. J. A. Komenský latinským spisem „Geometrie Kosmografie“ a českým „O vycházení a zapadání předních hvězd oblohy osmé“. První díl „Geometrie Kosmografie“ má název „Geometria theoretika“ a druhý „Geometria practica“ je nadepsán Geodesia. Po obecné nauce o užívaných měřích a kvadrantu popisuje užití tohoto přístroje při měření délek, výšek a hloubek. V závěrečné kapitole se dovídáme o měření výšek bez pomoci kvadrantu prostřednictvím délky stínu a zrcadla. Spis vznikl někdy kolem roku 1631, kdy Komenský učil na latinské škole v Lešně. Podobných dokladů zájmu Komenského o geodezii je více. Velmi zdařilá je např. Komenského mapa Moravy.

V devatenáctém století, kdy byly Čechy a Morava součástí Rakousko-Uherské monarchie, bylo na její větší části vybudováno mapové dílo, které co do rozsahu a přesnosti nemělo ve světě obdoby. Čeští zeměměřiči na něm měli podstatnou účast. Za všechny jmenujme alespoň geodeta Horského, který provedl triangulaci Vídně a okolí a geodeta Marka, který působil v Maďarsku.

Ani v současnosti se význam geodezie nezmenšil. Žádné stavební dílo se neobejde bez účasti geodeta, který s využitím nejmodernějších přístrojů, jako jsou totální stanice a stanice GPS, provádí jejich vytyčení a zaměření. Také regionální i celosvětová mapová díla patří neodmyslitelně do výbavy moderního člověka.

1.2 Základní rozdělení geodezie

Podle pracovní náplně a druhu činností obvykle dělíme geodezii na:

- geodezii rovinnou,
- geodezii vyšší,
- kartografii,
- fotogrammetrii a DPZ.

Geodezie rovinná - zabývá se praktickým zaměřováním a zobrazováním menších územních celků, vytyčovacemi pracemi a půdň evidencí. Geodetické úkoly jsou řešeny v rovině, takže všechny výpočty provádíme podle pravidel rovinné geometrie.

Geodezie vyšší - řeší úlohy převážně vědeckého charakteru. Zabývá se zpřesněním určení tvaru a rozměru Země, budováním geodeticko - astronomických sítí. Souvisí s astronomií a geofyzikou.

Kartografie - zabývá se teoretickou a praktickou tvorbou map všech druhů, včetně jejich reprodukce.

Fotogrammetrie a DPZ - patří mezi moderní odvětví geodezie, které využívá fotografických snímků pořizovaných ze země nebo z atmosféry k vyhotovování map, průzkumné činnosti aj. DPZ - dálkový průzkum Země je sběr průzkumných dat o území, realizovaný z kosmického nebo letadlového nosiče a zpracování jeho výsledků za účelem získání informací o stavu, poloze a druhu objektů a jevů na zemském povrchu.

Pozn. Dnes je možné se setkat s tím, že kartografie je z geodezie vyčleněna a je zařazena do věd geografických.

1.3 Soustavy měř

Už od starověku měla jednotlivá města, později státy, řadu soustav měř a vah. Dlouhá staletí vládla nejednotnost. Velké potíže vznikaly při obchodním a jiném styku. Některé míry měly dokonce stejné pojmenování, ale místně jinou velikost. Původní míry vycházely jednak z rozměrů lidského těla, říkáme jim míry přirozené, jednak z vykonané práce, lidské nebo tažných zvířat v zemědělství, těm říkáme míry odvozené. Pro příklad budou uvedeny některé staré soustavy:

staré české míry

1 loket pražský	= 0,591 m	= 3 pídě
1 píd'	= 0,198 m	= 10 prstů
1 dlaň	= 0,078 m	= 4 prsty
1 pěst	= 0,105 m	
1 zemský provazec	= 42 lokte	

délkové a plošné míry Rakousko-Uherské

1° (sáh) = 6' (stop) = 72'' (palců) = 864''' (čárek) = 1,896 484 m
1 rakouská míle = 4 000 sáhů = 7 585,936 m
1 jitro = 2 korce = 3 měrice = 1 600 čtver. sáhů = 5 754,64 m ²

anglické délkové a plošné míry

1 yard = 0,914 383 m (délka sekundového kyvadla v Greenwiche)
1 foot = 0,304 794 m (stopa)
1 inch = 0,025 399 m (palec)
1 yard = 3 feet = 36 inches
1 statue mile = 1 609,315 m (pozemní míle)
1 nautical mile = 1 852,01 m (námořní míle - délka oblouku, odpovídající 1 minutě na nultém poledníku)
1 acre = 0,405 ha (akr - jitro)
1 square mile = 2,589 89 km ² (plošná míle)

Teprve rozhodnutí francouzské Akademie věd dalo vzniknout nové jednotce - metru - a metrické soustavě. Metr byl původně definován jako desetimiliontá část zemského poledníkového kvadrantu, jehož rozměr byl zjištěn stupňovým měřením v 18. stol. Metrická soustava byla zavedena před více jak 100 lety, ale obecné přijetí bylo dobrovolné, a tak některé státy na metrickou konvenci dosud nepřistoupily. Evropské státy metrickou konvenci přijaly. Na území našeho státu byla přijata roku 1922.

Během let se původní definice metru několikrát změnila za účelem jejího zpřesnění. Poslední platná definice metru je tato: metr je délka dráhy, kterou uletí světlo ve vzduchoprázdnu za 1/299 792 458 sekundy. (ČSN 01 1300 Zákonné měřicí jednotky 1992)

metrická soustava - délková

Délkovou jednotkou je 1 metr, ostatní jednotky jsou odvozeny jako desetinné násobky nebo desetinné zlomky metru.

1 m = 1 m	1 dm = 1 · 10 ⁻¹ m
1 hm = 1 · 10 ² m	1 cm = 1 · 10 ⁻² m
1 km = 1 · 10 ³ m	1 mm = 1 · 10 ⁻³ m
	1 μm = 1 · 10 ⁻⁶ m (mikrometr)

metrická soustava - plošná

$$1 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ a (ar)} = 100 \text{ m}^2 \text{ (dnes již není povolen)}$$

$$1 \text{ ha (hektar)} = 100 \text{ a} = 10\,000 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ km}^2 = 100 \text{ ha} = 10\,000 \text{ a} = 1\,000\,000 \text{ m}^2$$

Ménší jednotky než 1 m^2 nepoužíváme, uvádíme je pouze jako čísla za desetinnou čárkou.

Míry úhlové

Kromě délkových a plošných jednotek, užívaných výhradně v metrické soustavě, platí dosud 3 typy úhlových měř:

míra oblouková - úhel se zde značí obecně α a vyjadřuje se délkou oblouku kružnice o jednotkovém poloměru ($r = 1$). Plnému úhlu odpovídá hodnota 2π . Znamená to, že kterýkoliv úhel můžeme vyjádřit jako funkci oblouku.

$$\text{Obecně platí } \alpha = \frac{s}{r} \quad \begin{array}{l} s \dots\dots \text{délka oblouku} \\ r \dots\dots \text{poloměr} \end{array}$$

míra stupňová - šedesátinná (sexagesimální)

$$\text{plný úhel} \dots\dots 360^\circ \quad \text{stupeň}$$

$$1^\circ = 60' = 3\,600'' \quad \text{minuty, vteřiny}$$

míra stupňová - setinná (centesimální)

$$\text{plný úhel} \dots\dots 400^g$$

$$1^g \quad \text{gon (dříve grad)}$$

$$0,01^g (1^c) \quad \text{setinná minuta (dříve centigrad)}$$

$$0,001^g (1^{\text{mg}}) \quad \text{miligon}$$

$$0,0001^g (1^{\text{cc}}) \quad \text{setinná vteřina (dříve decimiligrad)}$$

Převody úhlových měř

a) vztah mezi mírou obloukovou a stupňovou

$$\frac{\text{arc } \alpha}{\alpha^\circ} = \frac{2\pi}{360^\circ} \quad \text{arc } \alpha = \frac{2\pi}{360^\circ} \cdot \alpha^\circ \quad \alpha^\circ = \frac{360^\circ}{2\pi} \cdot \text{arc } \alpha$$

$$\text{radián } \rho^\circ = \frac{180^\circ}{\pi} = 57,295\,779\,51^\circ$$

$$\rho' = 3\,437,746\,77'$$

$$\rho'' = 206\,264,806''$$

b) vztah mezi mírou obloukovou a setinnou

$$\text{arc } \alpha = \frac{\pi}{200^g} \alpha^g \quad \alpha^g = \frac{200^g}{\pi} \text{arc } \alpha$$

$$\text{radián } \rho^g = \frac{200^g}{\pi} = 63,661\,977\,24^g$$

$$\rho^c = 6\,366,197\,724^c$$

$$\rho^{\text{mg}} = 63\,661,977\,24^{\text{mg}}$$

$$\rho^{\text{cc}} = 636\,619,772\,4^{\text{cc}}$$

c) vztah mezi mírou šedesátinnou a setinnou

$$360^\circ = 400^g$$

$$1^\circ = \frac{400^g}{360^\circ} = \frac{10}{9} = 1,111\,111^g$$

$$1^g = \frac{360^\circ}{400^g} = \frac{9}{10} = 0,9^\circ = 54'$$

2 MĚŘENÍ DÉLEK

Pod pojmem měření délek v geodezii rozumíme určení vodorovné vzdálenosti mezi dvěma krajními body přímky. Každá pomůcka nebo přístroj, se kterými měření provádí, musí být komparovaný (porovnány) s určitým základním měřítkem.

2.1 Přímé měření délek

Mezi nejjednodušší možnost, jak určit vzdálenost mezi dvěma body, patří krokování. Nevýhodou je malá relativní přesnost udávaná 1 : 50 až 1 : 100 a také použitelnost pouze v rovinném terénu. Pro hrubý odhad vzdálenosti je tato metoda dostačující a často použitelná. Její přesnost se dá poněkud zlepšit tím, že lidský krok nenásobíme průměrnou hodnotou 0,75 m (nebo dvojkroku 1,50 m), ale změříme si délku deseti vlastních kroků. Desetina této vzdálenosti je skutečná délka vlastního kroku.

Nejčastější pomůckou pro přímé měření délek je pásma. Pásma rozlišujeme podle jejich délky na:

- ▲ 20 m,
- ▲ 30 m - nejběžněji používané,
- ▲ 50 m.

Podle nosiče, na kterém jsou upnuty:

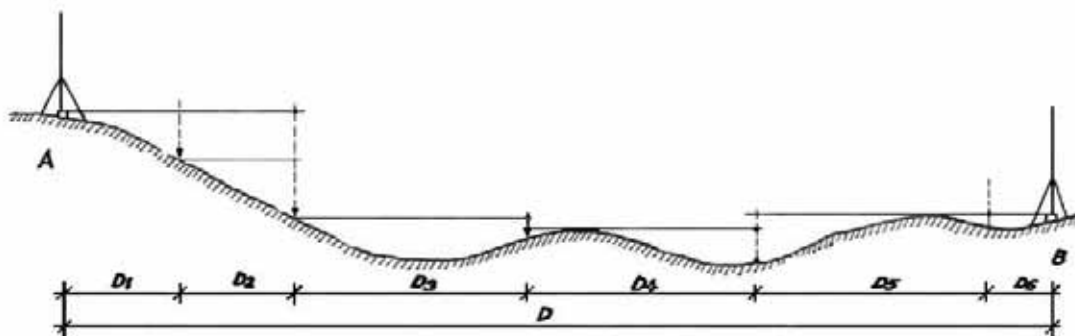
- na kruhu - starší systém, kruh je od pásma volně oddělitelný,
- na vidlici - nevhodnější varianta, vidlice má anatomicky uzpůsobenou rukojeť pro snazší napínání,
- v pouzdře - nepříliš vhodné, případné nečistoty se při svinutí dostanou dovnitř bez možnosti vyčištění, hůře se napíná.

Podle materiálu na:

- textilní - pro geodetické účely nevhodné - dochází k protažení,
- ocelová - nejběžnější vhodný materiál, dříve byla stupnice leptaná nyní je nanášena ve vrstvě laku,
- invarová - slitina 36 % niklu, 64 % oceli - neobyčejně stálý materiál z hlediska teplotní roztažnosti, použití při velmi přesných měřeních,
- eslonová - umělohmotný materiál se skleněnými vlákny - též velmi stálý, nevodivý, nekorodující.

Kromě pásma potřebujeme pro měření délek též olovnice, výtyčky se stojánky a měřické jehly.

2.1.1 Postup při měření délek pásmem



Obr. 2.1

1. Na koncové body měřené přímky postavíme výtyčky ve stojánkách, jejich svislost zajistíme pomocí olovnice zhlédnutím ze dvou na sebe kolmých stran. Je-li přímka příliš dlouhá, můžeme ji rozdělit na jednotlivé úseky, které proměříme samostatně.

2. Ve svažitém terénu postupujeme vždy se svahu.
3. Na počátečním bodě jeden pomocník pečlivě přiloží nulu pásma a pomocníka na druhém konci pásma zařadí do směru podle výtyčky umístěné na konci měřené délky. Podle svažitosti terénu rozvine druhý pomocník buď celé pásmo, nebo jen jeho část tak, aby mohl po urovnání pásma do vodorovné roviny klad pásma bez obtíží provázet olovnicí. Klad pásma volíme jako celistvé násobky pěti metrů. Urovnání pásma do vodorovné roviny zajistí měřič, který pásmo sleduje z boku – např. s použitím olovnice (oko je citlivé na pravý úhel).
4. Pomocníci na počátku a konci pásma jej napínají silou 100 N. Aby k provázení konce kladu pásma olovnicí došlo právě v okamžiku, kdy pomocník držící počátek pásma jej měl skutečně na nule, dotáže se hlasitě pomocník na konci pásma „NULA?“. Po kontrole pomocník na počátku odpoví „DOBŘÁ!“. V tom okamžiku pomocník na konci olovnicí prováže celý klad pásma a do terénu šikmo zabodne měřickou jehlu (v rovině kolmé k měřené délce).
5. Měřič vyznačí klad pásma do „Zápisníku délek měřených pásmem“ (viz příloha 2.1).
6. Pomocník s počátkem pásma se přesune k měřické jehle a druhý pomocník směrem ke konci měřené přímky a celý postup se opakuje. Pomocník u počátku pásma vždy měřickou jehlu sebere.
7. Na konci měřené délky nám zůstane vzdálenost menší než je klad pásma, tzv. doměrek, který po provázení olovnicí přímo na koncovém bodě odečte měřič v metrech s přesností na centimetry.
8. Měřič запиše hodnotu doměrku do Zápisníku délek měřených pásmem. Pomocník u počátku pásma nahlásí počet sebraných jehel. Počet musí souhlasit s počtem kladů pásma zapsaných v Zápisníku.
9. Provedeme druhé změření délky. V rovinném terénu zpět k počátku, ve svažitém opět po svahu, ale s odsazenou nulou.
10. Přímo v terénu porovnáme rozdíl mezi dvojným měřením délky. Pokud překročí maximální přípustný rozdíl, např. $\Delta_D = 0,006 \cdot \sqrt{D}$, měření musíme opakovat a odlehlé měření vyloučit.
11. Po ukončení měření zbavíme pásmo nečistot a vytřeme jej do sucha.

2.1.2 Chyby při měření délek pásmem

Obecně dělíme chyby při měření na hrubé a nevyhnutelné, nevyhnutelné dále na systematické a nahodilé .

Při měření délek pásmem mohou vzniknout všechny uvedené chyby. Při dodržení všech zásad měření uvedených v oddílu 2.1.1 můžeme hrubé chyby z měření odstranit a chyby nevyhnutelné minimalizovat tak, aby nepříznivě neovlivnily požadovanou přesnost měření.

Hrubé chyby při měření délek pásmem vznikají nepečlivostí při měření a zapisování. Bývá to často zapomenutý klad pásma, špatně odečtený či zapsaný doměrek.

Systematické chyby jsou podstatně nebezpečnější než chyby nahodilé. Je jich celá řada, a každá ze systematických chyb má stále stejné znaménko. Jejich vliv tak roste přímo úměrně.

1. Chyba z nesprávné délky měřidla - je způsobena tím, že skutečná délka měřidla neodpovídá délce měřidla uvedené výrobcem. Má stále stejné znaménko a v plné velikosti se projevuje s každým kladem pásma. Zjistíme ji porovnáním pásma s ocejchovaným měřidlem.
2. Chyba z nevdorovné polohy měřidla - jak je patrné z obr. 2.3 je vždy kladná.

$$\bar{D} = \frac{f}{y} \cdot l$$

Potom $D = \frac{f}{y} \cdot l + f + \Delta$ $f + \Delta = c$ c je součtová konstanta

$$\frac{f}{y} = k \quad k = 100$$

$$D = k \cdot l + c.$$

U moderních dalekohledů byla vložena do optické soustavy ještě jedna čočka zv. analaktická, kterou je vrchol dálkoměrného úhlu převeden do středu přístroje potom platí:

$$D = k \cdot l.$$

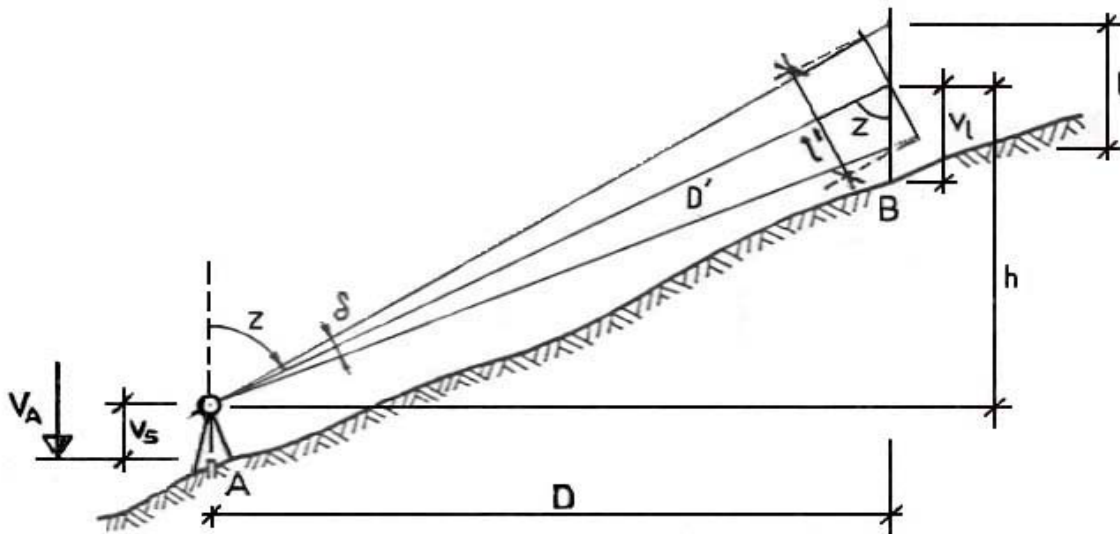
Tento jednoduchý vztah platí však pouze při vodorovné záměře a svislé lati.

V případě, že se jedná o šikmou záměru, z obr. 2.5. vyplývá, že odečtený laťový úsek l není kolmý k záměře. Kolmost splňuje až úsek l' , který získáme výpočtem:

$$l' = l \cdot \sin z \quad \text{kde } z \text{ je měřený zenitový úhel.}$$

Vodorovná vzdálenost $D = D' \cdot \sin z$ kde $D' = k \cdot l'$.

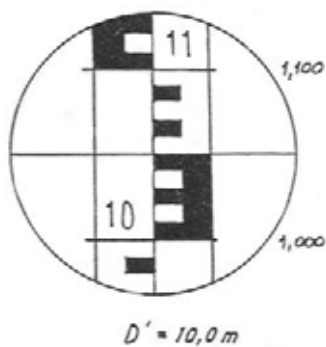
Potom $D = k \cdot l \cdot \sin^2 z.$



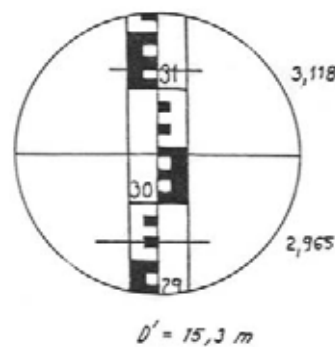
Obr. 2.5

Postup při měření nitkovým dálkoměrem

1. Na jeden koncový bod měřené délky postavíme stativ s teodolitem, provedeme jeho centraci a horizontaci. Na druhý konec postavíme nivelační (tachymetrickou) lať a udržujeme ji ve svislé poloze pomocí krabicové libely.
2. Zacílíme dalekohledem na lať tak, aby svislá ryska záměrného (nitkového) kříže byla uprostřed latě (viz obr. 2.6), spodní dálkoměrnou rysku nastavíme na lati na hodnotu celého metru (jednoho, dvou, tří). Mezi těmito třemi variantami zvolíme takovou, při které se záměra nejvíce blíží vodorovné (kvůli přesnosti měření).



Obr. 2.6 a



Obr. 2.6 b

3. Přečteme hodnotu horní dálkoměrné rysky v centimetrech s přesností na milimetry (ty pečlivě odhadujeme). Z hlavy odečteme od této hodnoty hodnotu spodní dálkoměrné rysky a rozdíl nahlásíme zapisovateli. Toto je přímo hodnota laťového úseku **I**. (obr. 2.6 a) Pozn. V nepřehledném terénu (např. v lese), kde není možno nastavit spodní dálkoměrnou rysku na hodnotu celého metru, vyhledáme na lati místo, kde jsou vidět obě dálkoměrné rysky a čteme zapisovateli hodnotu horní i dolní rysky (opět v centimetrech s přesností na milimetry) (obr. 2.6. b). Zapisovatel udělá z těchto dvou obecných hodnot rozdíl - laťový úsek **I**. V krajním případě lze odečíst hodnotu horní či spodní dálkoměrné rysky a jako druhou hodnotu střední rysky. Tím získáme 1/2 laťového úseku. Přesnost takto získané délky bude však poloviční.
4. V mikroskopu u teodolitu přečteme hodnotu zenitového úhlu **z**, kterou také zapíšeme.
5. Vodorovnou vzdálenost mezi středem teodolitu a latí získáme ze vzorce $D = k \cdot I \cdot \sin^2 z$ ($k = 100$).

Přesnost nitkových dálkoměrů

Přesnost délky určené z laťového úseku **I** závisí na řadě faktorů. Již vlastní určení laťového úseku **I** závisí na dobrém odhadu oka při nastavení dolní dálkoměrné rysky. Také při odečítání hodnoty na horní rysce musíme brát v úvahu, že na centimetrové laťové stupnici odhadujeme milimetry, a každý špatný odhad se v konečné délce násobí stem. Čím je lať vzdálenější od teodolitu, tím je odhad obtížnější. Proto se doporučuje neměřit délky delší než 120 m. Na čtení laťového úseku má negativní vliv i diferenční refrakce stejně jako vibrace vzduchu při vyšších teplotách.

Další faktor, který negativně ovlivňuje přesnost určené délky, je vliv nesvislé latě, který vzrůstá přímo úměrně s hodnotou odečtenou a se strmostí záměry. Tento vliv minimalizujeme volbou méně strmých záměr (lze ovlivnit zvláště u kratších délek správně nastavenou hodnotou „spodní dálkoměrné rysky“), a pečlivým držením latě s použitím krabicové libely.

I zkušený měřič se na délce 100 m může nitkovým dálkoměrem snadno dopustit chyby až 30 cm. Relativní chyba se udává 1 : 300. Přesnost tohoto typu dálkoměru je tedy poměrně nízká a vhodné použití je pouze pro určování vzdáleností podrobných bodů metodou nitkové tachymetrie v polní trati (v extravilánu).

2.2.2 Elektronické měření délek

Z fyzikálních způsobů určování vzdáleností je pro geodetické účely nejvhodnější elektronické měření délek, které je v současnosti hojně užívané. Původní myšlenkou využití rychlosti světla k určování vzdáleností se zabývali vědci již od konce 19. století. Objev německého fyzika Hertze, že krátké radiové vlny mají podobné vlastnosti jako vlny světelné, podnítil zájem o výzkum rádiových vln. Rozvoj elektroniky ve druhé polovině 20. století umožnil vznik plně funkčních dálkoměrů, u nichž se měřidlem stala vlnová délka

elektromagnetického vlnění. V oblasti velmi krátkých vln hovoříme o dálkoměrech radiových a v oblasti viditelného a infračerveného světla o dálkoměrech světelných.

Za vynálezce prvního světelného dálkoměru je považován švédský vědec E. Bergstrand (v r.1947). Jeho přístroj byl označen jako Geodimeter (Geodetic Distance Meter). První radiový dálkoměr sestrojil v roce 1954 v JAR T. Wadley a nazval jej Tellurometer.

Princip elektronického měření délek spočívá ve vlastnosti elektromagnetického vlnění šířit se prostorem určitou rychlostí téměř přímočaře. Určíme-li dobu t , kterou potřebovalo vlnění k proběhnutí dané vzdálenosti s , platí $s = v \cdot t$. Poněvadž $v \cong 3 \cdot 10^5$ km/s, nelze měřit t na opačném konci s , vrací se proto na tomto bodě vlnění zpět a určujeme $2s = v \cdot t'$, kde t' nazýváme tranzitním časem. Na určení tranzitního času je založen impulzový (pulzní) dálkoměr, který může být jak radiový tak světelný. Vyslaný i odražený impuls je naveden na indikátor tranzitního času. Rozlišujeme impulzové dálkoměry s pasivním nebo aktivním odrazným systémem. Druhý uvedený rozšiřuje dosah dálkoměru. K měření tranzitního času se používá elektronické měření času prostřednictvím časové základny obrazovky osciloskopu.

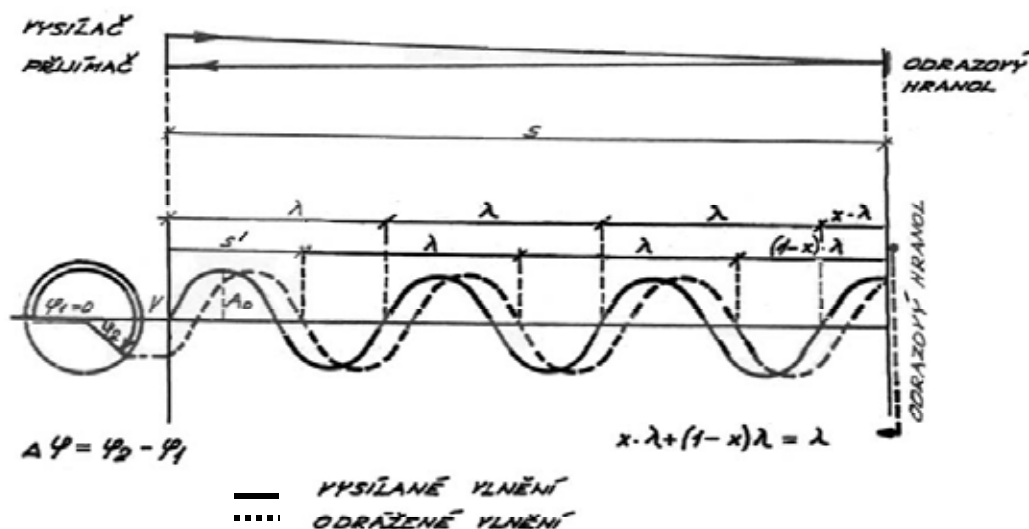
V posledních letech byly vyvinuty pulzní světelné geodetické dálkoměry, které na kratší vzdálenosti měří i bez odrazného hranolu. Dosah těchto dálkoměrů několikanásobně zvýšíme použitím odrazného hranolu.

Radiový impulzový dálkoměr se začal využívat už v době 2. světové války, systém RADAR (Radio Detection and Ranging), ke zjišťování povahy a polohy pozemních, námořních a vzdušných cílů na podkladě zpětného odrazu ultrakrátkých radiových vln zaměřených na zjišťovaný cíl.

Elektronicky můžeme měřit délky také pomocí kmitočových dálkoměrů. Zde vysílač vysílá přes anténu vhodně frekvenčně modulovanou nosnou vlnu (pilovitě, trojúhelníkovitě), kterou po odrazu zachytí přijímací stanice spolu s vysílaným signálem. Ve směšovacím obvodu přijímače vzniknou záněje, jejichž frekvence je funkcí vzdálenosti. Kmitočtové dálkoměry se využívají pro měření kratších vzdáleností hlavně u leteckých výškoměrů.

Z elektronického měření délek se pro geodetické účely nejčastěji používá dálkoměrů fázových. Podle toho jakých vln používají, rozlišujeme je na světelné a radiové. Konstrukteři vytvořili dva typy těchto dálkoměrů. S konstantní modulační frekvencí a s plynulou změnou modulační frekvence. Vývoj upřednostnil typ fázového dálkoměru s konstantní modulační frekvencí, proto dále bude věnována pozornost tomuto typu.

Fázový dálkoměr s konstantní modulační frekvencí využívá spojitého elektromagnetického vlnění a měřená vzdálenost se určuje z fázového rozdílu vyslaných a přijatých vln. Princip určení vzdáleností je patrný z obr. 2.7



Obr. 2.7

Vyjděme ze základní rovnice pro jednoduchý kmitavý pohyb, která vyjadřuje průběh vlnění určitým bodem a vyplývá z Maxwellových rovnic:

kde A = výchylka v čase t

A_0 = amplituda výchylky

$\omega = 2\pi f$ = úhlová frekvence t = čas měření

$\Delta\varphi$ = fázový posun f = frekvence

Pro výchylku vysílaného vlnění v počátku V bude:

$$A = A_0 \cdot \sin(\omega t + 0)$$

Pro výchylku přijímaného vlnění platí:

$$A' = A_0 \cdot \sin \omega(t + t')$$

kde t' = tranzitní čas

když použijeme vztah $t' = \frac{2s}{v}$

kde s = určovaná vzdálenost

v = fázová rychlost

bude:

$$A' = A_0 \cdot \sin \omega \left(t + \frac{2s}{v} \right)$$

$$A' = A_0 \cdot \sin \left(\omega t + \omega \frac{2s}{v} \right)$$

$$A' = A_0 \cdot \sin \left(\omega t + 2\pi f \frac{2s}{v} \right)$$

dosadíme $f = \frac{v}{\lambda}$

kde λ = délka vlny

$$A' = A_0 \cdot \sin \left(\omega t + \frac{2\pi \cdot 2s}{\lambda} \right)$$

Fázový posun přijímaného vlnění vůči vysílanému se rovná

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi \cdot 2s}{\lambda}$$

Fázový posun má periodický charakter s periodou 2π a lze jej rozdělit

$$\Delta\varphi = n \cdot 2\pi + \Delta\varphi' \quad \text{pro } n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Fázový posun ve velikosti $n \cdot 2\pi$ odpovídá cestě signálu od vysílače k odraznému hranolu a zpět na vzdálenost $n \cdot \lambda$.

Fázový posun $\Delta\varphi'$ odpovídá zbytku dráhy signálu s' , který je menší než λ . Bude tedy

$$s' = \frac{\Delta\varphi'}{2\pi} \lambda, \quad \text{kde } \frac{\Delta\varphi'}{2\pi} = k$$

$$s' = k \cdot \lambda \quad 0 < \Delta\varphi' < 2\pi \quad \text{a tedy také} \quad 0 < \frac{\Delta\varphi'}{2\pi} < 1$$

Měřená vzdálenost je tedy

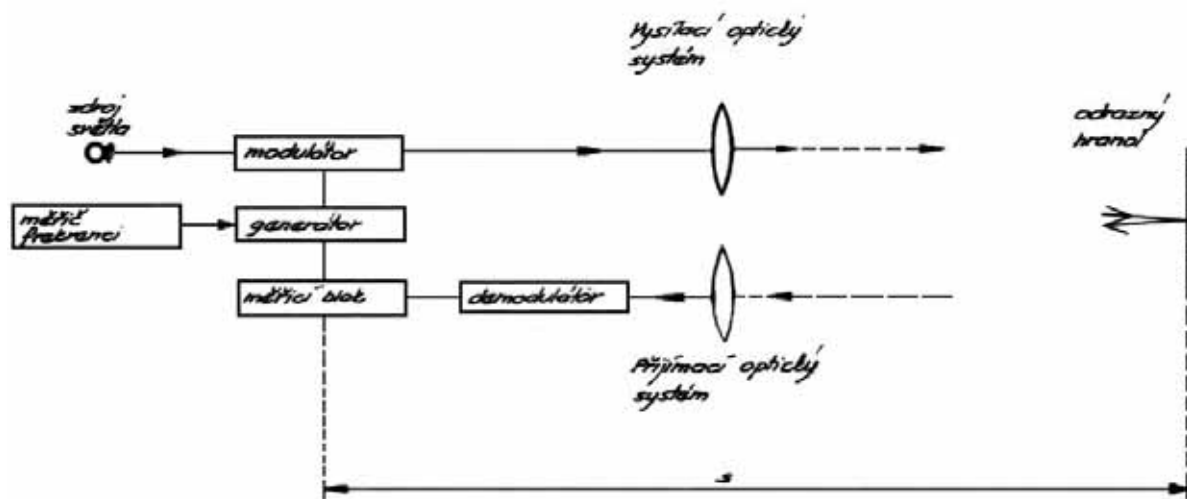
$$2s = n \cdot \lambda + s'$$

$$2s = n \cdot \lambda + k \cdot \lambda$$

$$\text{a z toho } s = n \cdot \frac{\lambda}{2} + k \cdot \frac{\lambda}{2}.$$

Z této rovnice vyplývá, že pro určení vzdálenosti s je nutno určit n úseků $\frac{\lambda}{2}$ obsažených ve dráze $2s$ a zbytkovou vzdálenost s' měřením fázového posunu $\Delta\varphi'$ vysílané a přijímané vlny. K určení počtu celých půlvln nebo jiných zlomků λ je nutno provést měření několikrát s využitím různých frekvencí. U moderních dálkoměrů tento proces probíhá automaticky a výsledkem je přímo naměřená vzdálenost, která se objeví na displeji z tekutých krystalů.

BLOKOVÉ SCHÉMA SVĚTELNÉHO DÁLKOMĚRU



Obr. 2.8

Ze světelného zdroje postupuje světlo do modulátoru, kde je amplitudově modulováno vysokofrekvenční vlnou vytvořenou vysokofrekvenčním modulátorem. Amplitudově modulované světlo je vysláno optickým vysílacím systémem podél měřené vzdálenosti a je odraženo odrazným systémem zpět do přijímacího optického systému dálkoměru. Jím je světlo soustředěno do demodulátoru, v němž je přeměněno na elektrický proud. Elektrický signál postupuje dále do měřicího bloku, kde se porovná se srovnávacím signálem přiváděným z vysokofrekvenčního generátoru. Výsledkem porovnání signálů je určení fázového rozdílu, odpovídajícího zbytkové vzdálenosti s' . K určení celé vzdálenosti je třeba znát ještě počet celých vln.

Součásti světelného dálkoměru

Zdroje elektrické energie

- v současné době jsou, namísto olověných nebo alkalických akumulátorů, používány akumulátory plynotěsné, které je možno umístit přímo do přístrojů. Součástí napájecího bloku je polovodičový měnič stejnosměrného proudu z akumulátoru na proud střídavý.

- Světelné zdroje - žárovky - projekční, wolframové, naplněné inertním plynem – používané ve starších typech dálkoměrů,
 - výbojky - rtuťové nebo xenonové,
 - laser - tento novodobý světelný zdroj umožnil zvýšit dosah světelných dálkoměrů až na 60 km. Používá se He-Ne laser (helium-neonový laser), zářící kontinuálně v pásmu červeného světla. Světlo je monochromatické, koherentní, lineárně polarizované, velmi soustředěné a má vysoký jas. Pozor, při aplikaci laseru je třeba zachovávat opatrnost, nedívat se do vysílací optiky, nepozorovat odrazný systém pomocným dalekohledem bez použití ochranného barevného filtru a řídit se příslušnými bezpečnostními předpisy.
- luminiscenční diody - na bázích Ga-As (galium-arsen) jsou výborným světelným zdrojem pro malé dálkoměry. Poskytují neviditelné záření v infračerveném pásmu. Jejich výhodou je, že poskytují přímo amplitudově modulované světlo (bez použití světelných modulátorů).
- Světelné modulátory - amplitudově modulují světlo na světlo s téměř sinusovým průběhem. Používá se modulátor na bázi krystalů dihydrofosforečnanu amonného či draselného. Využívá se fyzikálních jevů: polarizace, umělého dvojlomu a interference.
- Vysokofrekvenční generátory - zdrojem modulačních kmitů v elektronických dálkoměrech jsou krystaly řízené vysokofrekvenčními generátory, mající velkou stabilitu kmitů.
- Vysílací a přijímací systémy - mají svou konstrukcí zajistit předání co největšího množství světelné energie vysílané či přijaté. Jsou užívány systémy čočkové nebo čočkozrcadlové. Vysílací a přijímací systémy mohou být uspořádány buď paralelně nebo nyní častěji souose.
- Odrasné systémy - nyní se používají skleněné koutové hranoly vzniklé řezem krychle. Odrasnými stěnami jsou části bývalých stěn krychle. Tyto koutové hranoly nám zajistí odraz světelného paprsku do dálkoměru i v případě, že odrazný systém není nastavený přesně kolmo k vysílanému paprsku. Pro dlouhé vzdálenosti lze koutové hranoly sdružovat do sestav (po 3, 7 nebo 21 hranolech). Pro krátké vzdálenosti lze použít malé hranolové odrazné systémy vylisované z umělé hmoty (podobné odrazkám vozidel). Hranoly jsou upevněny buď na teleskopické tyči nebo na stativu.
- Demodulátory - používají se buď fotonásobiče nebo fotodiody. Fotonásobič je zařízení, které mění světelný tok na elektrický proud a ten mnohokrát zesilují.
Fotodiody - nejčastěji na bázi Ge nebo Si (germánie nebo křemíku) jsou podobné polovodičové diodě, po dopadu světla na průsvitnou vrstvu polovodiče vzniká fotoproud, který je třeba zesílit v zesilovačích.

Pozn. Hodnoty vzdáleností získané při měření je třeba opravit o fyzikální redukci. Na každou naměřenou délku totiž působí parametry ovzduší, zatěžující rychlost elektromagnetických vln systematickými chybami. Proto při přesném určování vzdáleností je třeba měřit atmosférickou teplotu a tlak, a zjištěné hodnoty před

vlastním měřením vložit do dálkoměru, který naměřenou vzdálenost automaticky opraví o příslušnou fyzikální redukci.

Matematická redukce je oprava z nadmořské výšky, ve které byla vzdálenost měřena na nulovou hladinovou plochu a oprava ze zobrazení. Zpravidla se provádí až při dalším zpracování naměřených vzdáleností, stejně jako oprava z komparace. Tu zjistíme z korekčního grafu, který získáme kontrolním měřením dálkoměrem na komparační základně.

Vzdálenosti získané měřením jsou zpravidla šikmé, je proto třeba redukovat je na vodorovné.

Podle dosahu dělíme světelné dálkoměry na:

- malé do 5 km,
- střední do 15 km,
- velké nad 15 km.

Přesnost světelných dálkoměrů je ve srovnání se všemi dříve používanými přístroji vysoká. Zpravidla se udává střední chybou vzdálenosti $5-10 \text{ mm} + s \cdot 10^{-6}$, což představuje na vzdálenost $s = 50 \text{ km}$ $5-6 \text{ cm}$. Výjimečným přístrojem je výrobek firmy Kern ME 3000, u kterého se udává přesnost $0,2 \text{ mm} + 2s \cdot 10^{-6}$ (s dosahem do 3 km).

3 MĚŘENÍ ÚHLŮ

Úhel je pro geodezii jednou ze základních veličin a měření úhlů představuje základ pro jakékoliv měřické práce.

V geodezii se zásadně měří dva typy úhlů: vodorovné (horizontální) a svislé (vertikální).

Vodorovný úhel ω - se měří v úrovni horizontu přístroje (teodolitu, totální stanice). Horizont představuje vodorovná rovina π , kolmá k tížnici a procházející točnou osou dalekohledu teodolitu. Vodorovný úhel je pak úhel, sevřený svislými rovinami ρ_1 a ρ_2 , které jsou proloženy záměrnými paprsky.

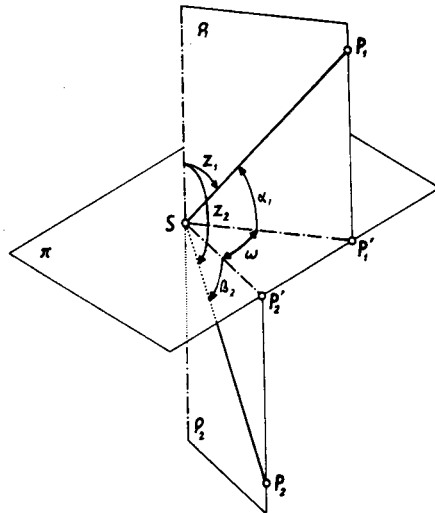
Svislým úhlem - může být úhel výškový α , úhel hloubkový β a nebo úhel zenitový z . (viz obr. 3.1)

výškový úhel α - měříme od vodorovné roviny π ve svislé rovině ρ_1 k záměrnému paprsku ležícímu nad vodorovnou rovinou π .

hloubkový úhel β - měříme od vodorovné roviny π ve svislé rovině ρ_2 k záměrnému paprsku ležícímu pod vodorovnou rovinou π .

zenitový úhel z - měříme od tížnice směřující k zenitu (nadhlavníku) ve svislé rovině k záměrnému paprsku (starší výraz zní: zenitová vzdálenost).

U starších typů teodolitů je možno se setkat se stupnicí pro měření výškových a hloubkových úhlů. V současné době se konstruuje přístroje pro měření zenitových úhlů. Na nejmodernějších elektronických přístrojích je možno zvolit systém odečítání svislých úhlů.



Obr. 3.1

3.1 Úhloměrné pomůcky

ÚHLOVÉ ZRCÁTKO - tuto jednoduchou pomůcku lze použít pro vytyčení pravého úhlu 90° . Skládá se ze dvou rovinných zrcátek, svírajících mezi sebou úhel 45° . Jsou upevněna ve vhodné kovové objímce, k níž je připevněno držátko s háčkem k zavěšení olovnice. Průchod světelných paprsků úhlovým zrcátkem je patrný z obr. 3.2.

V trojúhelníku ABC platí:

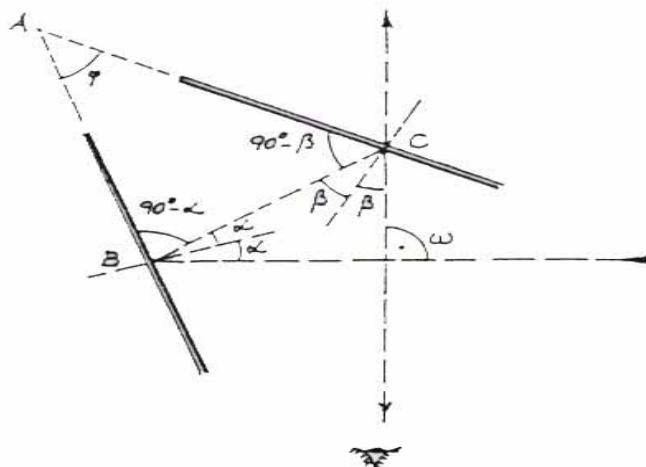
$$\varphi + 90^\circ - \alpha + 90^\circ - \beta = 180^\circ$$

$$\varphi = \alpha + \beta$$

$$\omega = 2\alpha + 2\beta = 2 \cdot (\alpha + \beta)$$

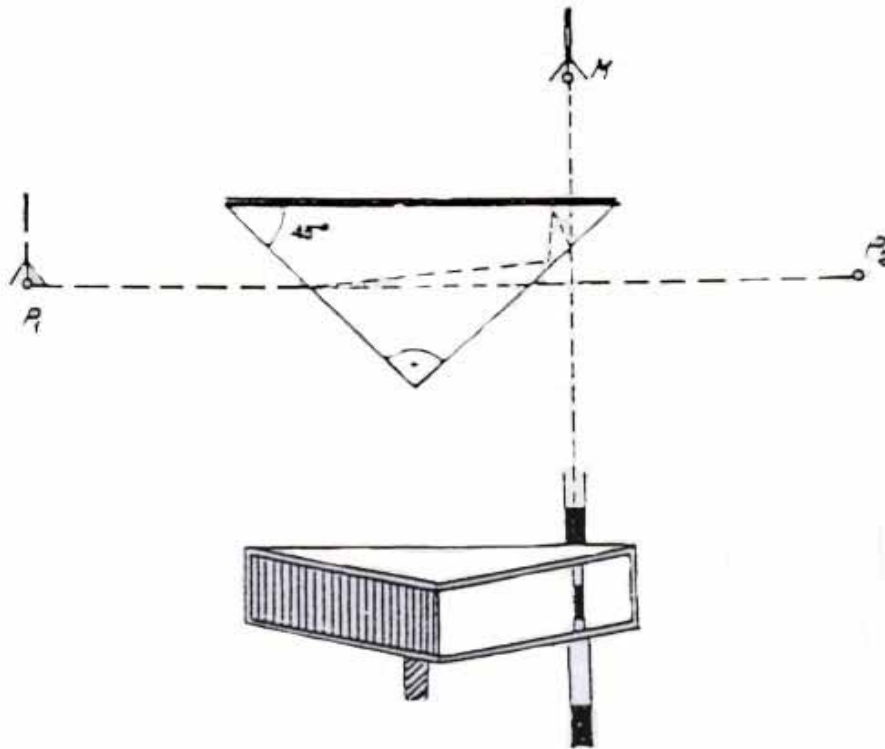
$$\omega = 2\varphi$$

Úhel ω , o němž se odchýlí paprsek v zrcátku, nezávisí tedy na úhlu dopadu α . Bude-li $\varphi = 45^\circ$, potom $\omega = 90^\circ$.



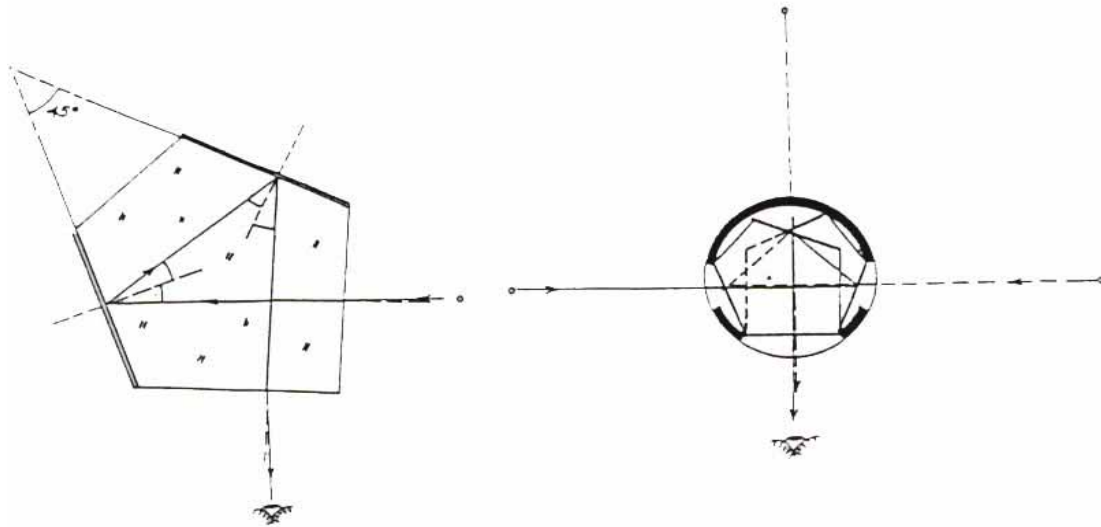
Obr. 3.2

ÚHLOVÝ HRANŮLEK - další jednoduchá pomůcka pro vytyčování pravého úhlu 90° . Na obr. 3.3 je řez trojbokým hranůlkem, ve kterém při pozorování vidíme dva obrazy výtyčky, jeden pevný a druhý pohyblivý. K vytyčení paty kolmice (pravého úhlu) musíme použít nepohyblivého obrazu, který nemění svou polohu, je méně jasný a promítá se stále stejným směrem. Při měření má být přepona hranolku přibližně rovnoběžná se směrem, ke kterému vytyčujeme pravý úhel.



Obr. 3.3

PENTAGON - je nejdokonalejší jednoduchou pomůckou pro vytyčování stálých úhlů, protože má velké zorné pole a dává jasný obraz. Nejčastěji se používá dvojitý pentagon, sestávající ze dvou nad sebou položených pentagonálních hranolů, se kterým lze zároveň vytyčit úhel 180° a pravý úhel 90° (viz obr. 3.4). K promítání vytyčeného bodu (paty kolmice, event. mezilehlého bodu přímky) na terén se používá olovnice. Maximální délka kolmic určených těmito pomůckami by neměla přesáhnout 40 m. Všechny uvedené pomůcky lze použít pouze v rovinném nebo mírně svažitém přehledném terénu. Standardní přesnost určení úhlu závisí na přesnosti a sestavení hranolů. Za dobrých podmínek se udává ± 2 cm v poloze vytyčeného bodu.



Obr. 3.4

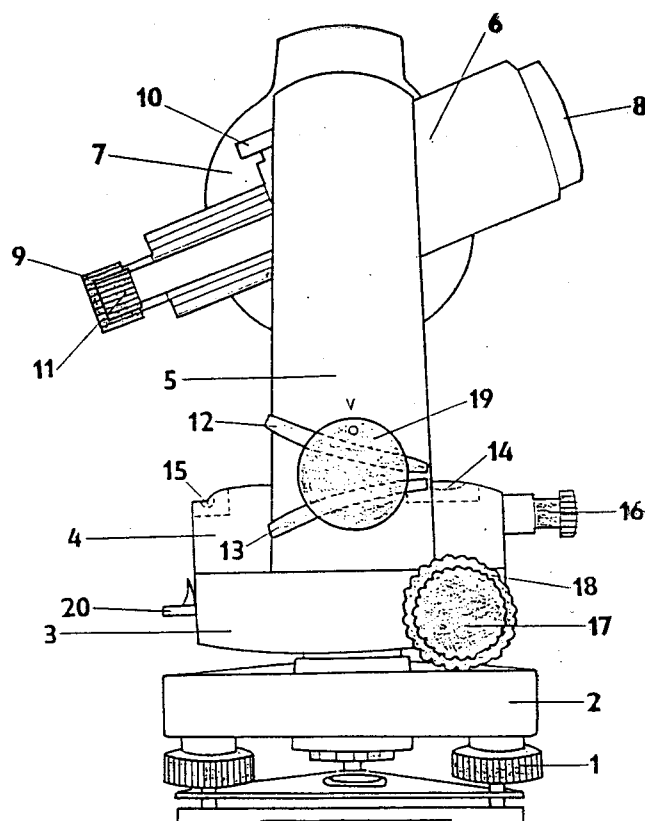
3.2 Úhломěrné přístroje

TEODOLITY jsou geodetické přístroje, které slouží k měření a vytyčování vodorovných a svislých úhlů. První teodolit sestrojil v r. 1720 mechanik John Sisson. Mechanické teodolity se stále zdokonalovaly a vyráběly se ve většině průmyslově vyspělých zemích. V první polovině 20. století v Čechách prosluly především teodolity firmy Josef a Jan Frič Praha (později Meopta). V zahraničí mezi nejznámější výrobce patří firmy Carl Zeiss Jena (Německo), Wild, Kern, Leica (Švýcarsko), MOM (Maďarsko), Sokkia, Topcon, Nikon (Japonsko).

Od devadesátých let dvacátého století začíná ve světové produkci převažovat výroba univerzálních elektronických teodolitů (UET), mnohdy ve spojení s elektrooptickými dálkoměry, tzv. TOTÁLNÍ STANICE.

Princip teodolitu bude objasněn na teodolitu mechanické konstrukce.

SCHÉMA REPETIČNÍHO TEODOLITU Theo 020A



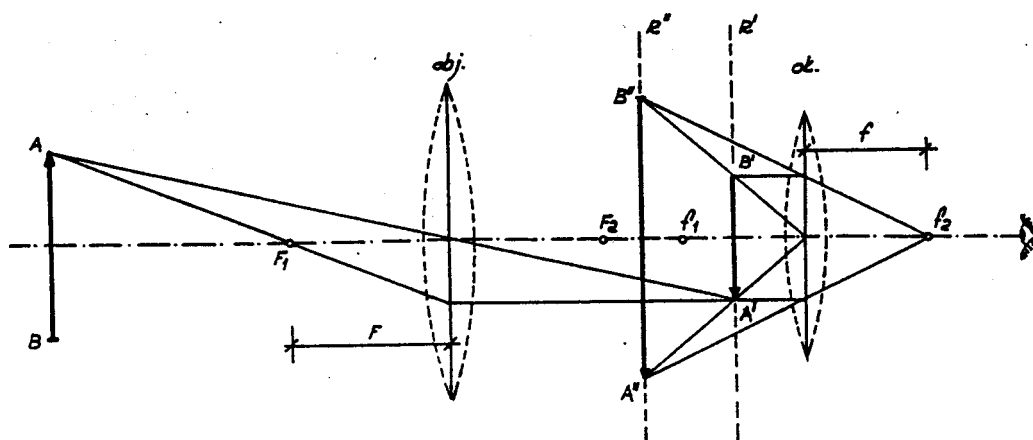
Obr. 3.5

- | | |
|---------------------------|---|
| 1 stavěcí šroub | 11 odečítací mikroskop |
| 2 trojnožka | 12 hrubá ustanovka svislého kruhu |
| 3 vodorovný kruh (limbus) | 13 hrubá ustanovka vodorovného kruhu |
| 4 alhidáda | 14 alhidádová libela trubicová |
| 5 dalekohledová vidlice | 15 alhidádová libela krabicová |
| 6 dalekohled | 16 optický centrovač (dostředovač) |
| 7 svislý kruh | 17 jemná ustanovka vodorovného kruhu |
| 8 objektiv | 18 jemná ustanovka svislého kruhu |
| 9 okulár | 19 vypínač obrazu svislého kruhu |
| 10 hledáček dalekohledu | 20 repetiční svora (sepne limbus s alhidádou) |

Součástí teodolitu je **trojnožka** se třemi stavěcími šrouby, které slouží k jeho horizontaci. Otvor se závitem ve spodní části trojnožky umožňuje pevné spojení teodolitu se stativem, na který se teodolit připevňuje pomocí středního šroubu v hlavě stativu. Nad trojnožkou je **vodorovný kruh (limbus)**, vyrobený buď z kovu (starší typy), nebo ze skla, na němž je přesně vyznačena úhломěrná stupnice pro měření vodorovných úhlů. Starší typy mají dělení šedesátinné (plný kruh 360°), novější typy už výhradně setinné (plný kruh 400^s). Číslování je pravotočivé.

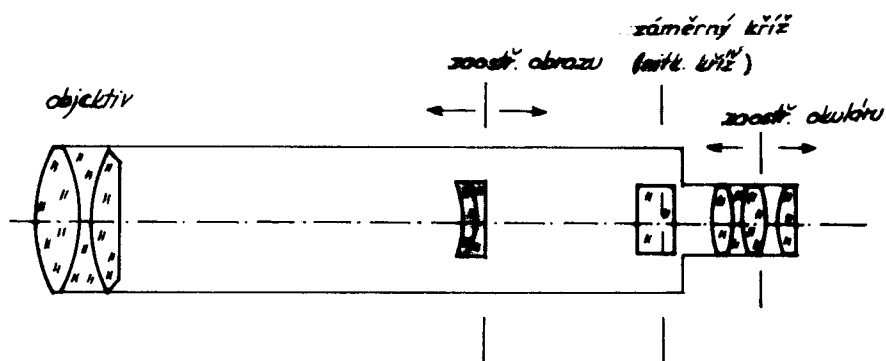
Otočná část teodolitu umístěná souose nad limbem se nazývá **alhidáda**. Na ní je na **dalekohledové vidlici** umístěn **dalekohled**, což je záměrné zařízení teodolitu. U starších typů

teodolitů se používá Keplerův astronomický dalekohled. Skládá se v principu ze dvou spojných čoček a dává zvětšený, převrácený a neskutečný obraz (viz obr. 3.6).



Obr. 3.6

V současné době se však konstruují dalekohledy s vestavěnou rozptylnou čočkou (analaktickou) s vnitřním zaostřováním. Tyto dalekohledy dávají obraz zvětšený, vzprámený a neskutečný. Součástí dalekohledů jsou **objektivy**, které se konstruují ze dvou nebo tří čoček (pro potlačení čočkových vad – sférické, chromatické, astigmatismu a koma) a jejich vnější stěna je opatřena antireflexní vrstvou pro zlepšení světelnosti dalekohledu. Dále jsou součástí dalekohledů **okuláry**, což jsou složité soustavy, řady typů, nejznámější jsou Ramsdenův, Kellnerův a Hensoldtův. Aby bylo možno použít dalekohledu k měřickým účelům, vkládá se do roviny skutečného obrazu A', B' záměrný (nitkový) kříž. Ve starých dalekohledech to byla pavoučí vlákna (odtud nitkový). V současnosti je leptán nebo ryt na skleněnou destičku.



Obr. 3.7

Výkonnost dalekohledu posuzujeme podle zvětšení, velikosti zorného pole, světelnosti dalekohledu a zřetelnosti obrazu.

Zvětšením rozumíme poměr úhlů, pod kterým se jeví zdánlivý obraz předmětu v dalekohledu a úhlu pod kterým by byl vidět předmět prostým okem (u dalekohledu teodolitu se zvětšení pohybuje okolo 30ti násobku).

Velikost zorného pole je poměrně malá $1^\circ - 3^\circ$ a klesá s rostoucím zvětšením dalekohledu, proto při cílení používáme hledáček dalekohledu.

Světelnost dalekohledu je poměr světla, které dopadne do oka z obrazu, k množství světla které by dopadlo do oka přímo.

Zřetelnost obrazu závisí na odstranění čočkových vad (viz výše).

Na jedné z vidlic dalekohledu je umístěn svislý kruh, který je pevně spojen s vodorovnou točnou osou dalekohledu. Svislý kruh je opět kovový či skleněný a je na něm vyznačena úhlová stupnice. Na alhidádě jsou dále umístěny libely, (zpravidla dvě) sloužící k horizontaci přístroje.

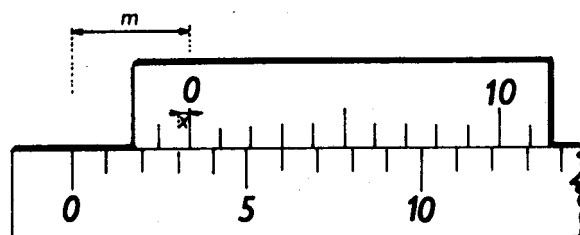
Krabicová libela je tvořena nádobkou kruhového tvaru, která je naplněna kapalinou, která má nízký bod tuhnutí, malou přilnavost ke sklu a která se rychle vypařuje (etér, sirouhlík nebo líh). Nádoba je v horní části buď vybroušena do kulové plochy, nebo uzavřena sféricky vybroušeným sklíčkem. Libela je urovňována, když vzduchová bublina splyne se středem libely, resp. se soustřednými kroužky vyrytými na její vrchní části. Slouží pro hrubší urovňání teodolitu.

Trubicová libela je trubička z křemičito-draselného skla, která je uvnitř vybroušena tak, aby podélný řez byl kružnicový oblouk. (Opět je naplněna kapalinou, viz krabicová libela.) Vnější vypuklá strana trubky je opatřena čárkovou stupnicí. Slouží pro přesnou horizontaci teodolitu. Je urovňována tehdy, když bublina je uprostřed čárkové stupnice.

Hodnotu libely posuzujeme podle pohyblivosti bubliny a podle její citlivosti. Pohyblivostí se rozumí snadnost a rychlost s jakou bublina reaguje na malé změny sklonu. Závisí na vybroušení a vyhlazení trubice, na jejích rozměrech i délce bubliny a viskozitě náplně. Citlivostí libely je úhel, o který musíme vychýlit osu libely, aby se bublina posunula o jeden dílek. Posuzujeme ji podle délky dráhy, o kterou se střed bubliny vychýlí, odkloníme-li libelu z urovňované polohy o určitý úhel. Citlivost je závislá na poloměru výbrusu libely. Čím je poloměr výbrusové kružnice větší, tím je libela citlivější.

Zkouška správné funkce trubicové libely u teodolitu se provádí tak, že podélnou osu libely umístíme rovnoběžně s libovolnými dvěma stavěcími šrouby a libelu urovňáme. Otočíme alhidádu o 180° . Když je libela funkční, neměla by se bublina z jejího středu vychýlit. Pokud k výchylce dojde, polovinu výchylky odstraníme rektifikačními šrouby libely pomocí rektifikační jehly. Druhou polovinu stavěcím šroubem, který je na protilehlé straně od vychýlené bubliny. Zkoušku je třeba opakovat. Pozn. rektifikační šrouby jsou umístěny i u krabicové libely. Také tu lze rektifikovat. Její nesprávnou funkci zjistíme tehdy, když po pečlivém urovňání trubicové libely z obou na sebe kolmých směrů není její bublina uprostřed.

Úhlové údaje z vodorovného i svislého kruhu získáváme pomocí odečítacích pomůcek. V moderních teodolitech je obraz částí vodorovného i svislého kruhu a příslušných odečítacích pomůcek převeden důmyslnou optickou soustavou do odečítacího mikroskopu umístěného vedle okuláru. Nejjednodušší odečítací pomůckou je čtecí značka neboli index. U teodolitu se nepoužívá pro její malou přesnost. Nejlépe lze její princip objasnit jako ručičku na číselníku hodin. Další pomůckou je vernier (nonius). Tato pomůcka byla často používána k odměřování zbytků (úhlových i délkových), lze ji nalézt na starých typech teodolitů. Zpravidla se používal vernier stejnosměrný, při němž číslování pomocného měřítka postupuje stejným směrem jako číslování měřítka hlavního (viz. obr. 3.8).



Obr. 3.8

Dílky stejnosměrné vernierové stupnice se vypočte ze vztahu, že $(n-1)$ dílků měřítka hlavního, každý o velikosti a , se rozdělí na n dílků vernierových o velikosti a' :

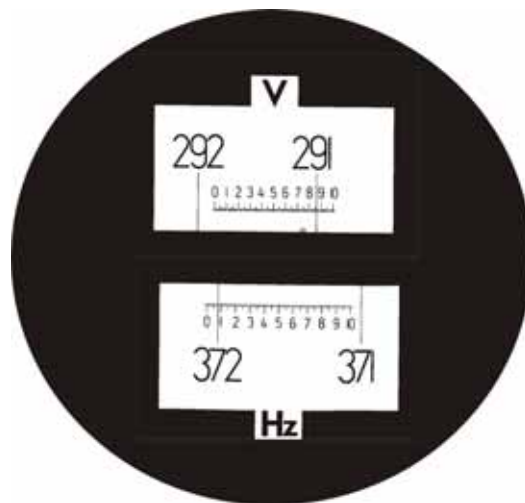
$$(n-1) \cdot a = n \cdot a'$$

Rozdíl obou dílků $a - a'$ nazýváme vernierovou diferencí δ .

$$\delta = a - a' = \frac{a}{n}$$

Pomocí vernieru dokážeme odečíst přesně desetinu dílku hlavního měřítka (při $n = 10$). Z obr. 3.8 je patrné jak odečíst čtení na hlavním měřítku. Nejprve určíme počet celých dílků hlavního měřítka před ryskou s nulou vernieru (tři). Dále vyhledáme kolikátá ryska na vernierově stupnici se stotožňuje s ryskou hlavního měřítka (splývá třetí dílek). Výsledek je tedy $m = 3,3$.

Mřížka je u technických teodolitů (Zeiss Theo 020A) nejčastěji používanou odečítací pomůckou. Je to skleněná destička, vsazená do roviny obrazu, na které je vyryta pomocná stupnice. Ta se promítá na obraz úhломěrného kruhu a přímo umožňuje načtení nejmenšího dílku. Její délka je stejná jako vzdálenost nejmenšího dílku úhломěrného kruhu. Je rozdělena na 100 dílků (každý desátý je očíslován). Odečtení probíhá následovně: nejprve zjistíme, kterou očíslovanou rysku úhломěrného kruhu mřížka přetíná, u horizontálního kruhu (Hz) na obr. 3.9 je to 372 a tím získáme hodnotu celých gonů (gradů). Hodnotu zlomku gonů odečteme přímo na mřížce, kde ryska úhломěrného kruhu poslouží jako index 0,08^g. Celé čtení je tedy 372,08^g. Stejným způsobem odečteme i hodnotu na vertikálním kruhu (V). Na obr. 3.9 je to 291,86^g. (Obrázek odpovídá 2. poloze dalekohledu.)



Obr. 3.9

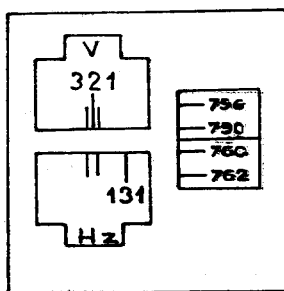
Optický mikrometr je odečítací pomůcka sloužící k odečítání velmi malých lineárních hodnot a používá se především v konstrukci přesných a velmi přesných teodolitů. Je umístěn do mikroskopu pro odečítání úhlových hodnot a jeho hlavní součástí je planparalelní destička, vestavěná (stejně jako mřížka) do roviny obrazu. Otáčíme-li touto destičkou, pomocí koincidenčního šroubu optického mikrometru, pohybují se (zdánlivě) obrazy stupnic a tento pohyb je měřitelný na stupnici bubínku koincidenčního šroubu.

V praxi jsou použity dvě konstrukce mikrometrů, indexový a koincidenční.

Indexový mikrometr používaný u přesných teodolitů (Zeiss Theo 015B) využívá pro odečítání vždy jedno místo vodorovného nebo svislého kruhu. V mikroskopu se nám objeví

tři stupnice (obr. 3.10). Stupnice V (pro zenitové úhly), stupnice Hz (pro vodorovné úhly) a vpravo stupnice pro jemné čtení (obraz na 500 dílků rozděleného bubínku koincidenčního šroubu). Otáčením koincidenčním šroubem, který je umístěn na opačné dalekohledové vidlici než je svislý kruh, se snažíme umístit mezi pevnou dvojrysku uprostřed stupnice V (resp. Hz) zdánlivě se pohybující obraz celého dílku stupnice V (resp. Hz). Po pečlivé koincidenční odečteme hodnotu zlomku gonů na vodorovném indexu uprostřed stupnice jemného čtení. Stupnice jemného čtení slouží jak pro odečítání vodorovných tak svislých úhlů, vždy záleží na tom, kterou stupnici koincidujeme. Tato pomůcka umožní odečítání až na $0,001^g$ neboli 1 miligon a je tak desetkrát přesnější než mřížka.

Teodolit 015B

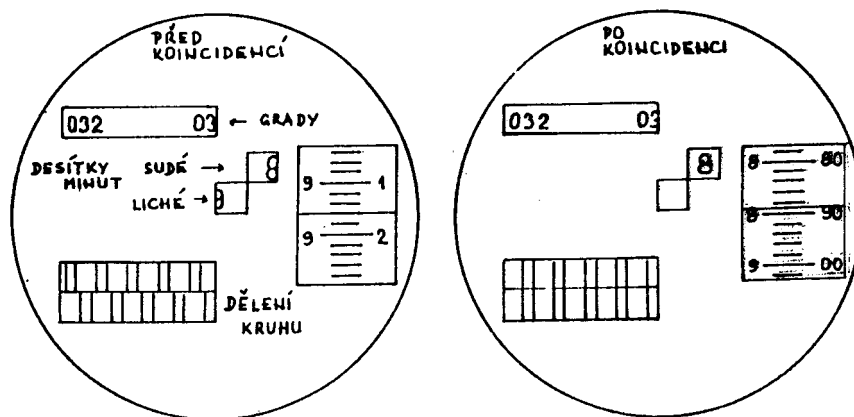


Čtení : 321, 759^g

Obr. 3.10

Koincidenční mikrometr se používá u velmi přesných teodolitů (Zeiss Theo 010A) a využívá pro odečítání vždy dva protilehlé úseky vodorovného nebo svislého kruhu. V mikroskopu se nám objeví údaje o buď vodorovném nebo svislém kruhu. Je zde celkem pět okének. Vlevo nahoře je okénko, ve kterém se pohybují čísla gonových hodnot. Vlevo dole je obraz dvojrysek ze zmíněných protilehlých částí vodorovného nebo svislého kruhu. Pomocí otáčení koincidenčního šroubu se snažíme umístit dvojrysky přesně proti sobě. Uprostřed mikroskopu je dvojice malých okének, ve kterých se objevují hodnoty desetin gonu (v horním sudé, v dolním liché). Vpravo je páté okénko se stupnicí jemného čtení, která je opět rozdělená vodorovným indexem uprostřed. Po pečlivé koincidenční čteme nejprve hodnotu celých gonů v horním okénku (viz obr. 3.11). V jednom z prostředních okének přečtu desetiny gonu. Setiny, tisíciny a desetitisíciny gonu odečtu z indexu v pravém okénku jemného čtení.

Teodolit 010A



Čtení : 32, 8
 $\frac{889}{32, 8889^g}$

Obr. 3.11

Na každém teodolitu se nalézají dva páry **ustanovek**. Jsou to zařízení, kterými lze spojit pohyblivou část přístroje s pevnou a zamezit tak její hrubý pohyb a zároveň umožnit pohyb jemný. Proto rozlišujeme ustanovky hrubé a jemné. Podle toho jaký pohyb omezují je dělíme na ustanovky svislého a vodorovného kruhu. Jemné ustanovky jsou funkční při zatažených hrubých ustanovkách. Ustanovky vyžadují citlivé zacházení. Při pokusech o otáčení přístroje při zatažených hrubých ustanovkách často dochází k jejich poškození a nutnosti nákladné opravy.

Moderní teodolity mají zabudovaný **optický centrovač (dostřed'ovač)** což je v podstatě malý dalekohled s optickou osou zalomenou do pravého úhlu. Optický centrovač nám umožní dostředit teodolit nad stanoviskem přesněji, než při použití olovnice. Funkční je pouze při správně horizontovaném přístroji.

Poslední důležitou součástí teodolitu je buď **repetiční svora** (u technických teodolitů), nebo **pastorek** (u přesných a velmi přesných teodolitů). Tyto pomůcky slouží k nastavení libovolné úhlové hodnoty do zvoleného směru.

Teodolity dělíme podle přesnosti na:

- velmi přesné – možnost odečítání $2''$ a vyšší (Theo 010A),
- přesné – možnost odečítání $2'' - 10''$ (Theo 015B),
- technické – možnost odečítání $10'' - 1'$ (Theo 020A).

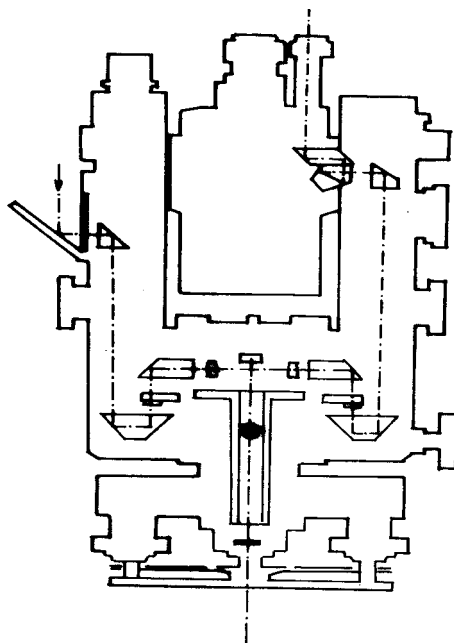
Dále dělíme teodolity podle konstrukce na:

- repetiční,
- s limbem na postrk.

Repetiční teodolity mají buď dva páry ustanovek (alhidádové a limbové), potom lze otáčet jen alhidádou pomocí alhidádových ustanovek, nebo limbem společně s alhidádou pomocí limbových ustanovek, anebo jeden pár ustanovek a **svoru**, která spojuje nebo uvolňuje limbus s alhidádou. Je-li svora **uvolněná**, čtení na vodorovném kruhu se při otáčení **mění**. Je-li svora **sepnutá**, dojde k pevnému spojení limbu s alhidádou, čtení na vodorovném kruhu se při otáčení **nemění**. Repetiční teodolity se používají pro měření úhlů metodou repetiční (násobením) i metodou ve skupinách. Tato konstrukce se uplatňuje u technických teodolitů např. Zeiss Theo 020A.

Teodolity s limbem na postrk mají jeden pár alhidádových ustanovek. Limbem je možno otáčet pomocí **pastorku** zcela nezávisle na alhidádě. Pastorek je obvykle chráněn proti nežádoucímu pootočení krytkou nebo pojistkou. Nastavení požadované úhlové hodnoty do příslušného směru provedeme tak, že nejprve pečlivě zacílíme dalekohledem do směru, utáhneme hrubou ustanovku vodorovného kruhu. Mikrometrickým šroubem nejprve nastavíme požadované jemné čtení a potom pastorkem nastavíme požadovanou hrubou úhlovou hodnotu. Tato konstrukce teodolitu se používá pro měření metodou ve skupinách pro přesné a velmi přesné teodolity např. Zeiss Theo 015B, Zeiss Theo 010A.

Na obr. 3.12 je znázorněn schematický průchod paprsků teodolitem Zeiss Theo 010. Zde je patrné, jak prochází světlo přístrojem od osvětlovacího zrcátka hranolovým systémem přes horizontální a vertikální kruh do mikroskopu.



Obr. 3.12

Pozn.: Jako úhломěrný přístroj lze pro jednoduché a málo přesné práce v rovinném nebo mírně svažitém terénu použít i novější typy nivelačních přístrojů, u kterých je vodorovný kruh zpravidla zabudován jako nadstandardní výbava.

3.3 Příprava přístroje před měřením

Pracovní postupy měření úhlů předpokládají před zahájením měření, že teodolit je na stanovisku postaven na stativ, centrován a horizontován. Tento postup platí jak pro teodolity mechanické tak elektronické, elektronické dálkoměry i totální stanice.

Před zahájením práce zkontrolujeme stativ zda má všechny šrouby a zda jsou utažené. Při měření používáme takřka výhradně stativy s výsuvnými nohama, ty vysuneme tak, aby byly několik centimetrů od dorazu (podle výšky měřiče) a stativ, zatím bez teodolitu postavíme nad stanovisko, kterým může být nastřelovací hřeb v živici, železná trubka, žulový mezník s křížkem apod. Nachází-li se stabilizovaný bod ve svahu, umístíme jednu nohu stativu proti svahu a zbývající dvě po svahu dolů. Naší snahou je postavit stativ tak, aby jeho hlava byla přibližně vodorovná a přibližně nad stanoviskem.

Jednu nohu stativu zašlápneme do terénu a na stativ připevníme pomocí středního šroubu v hlavě stativu teodolit. Stavěcí šrouby teodolitu by měly být vyšroubovány všechny stejně do střední polohy. Otáčením okuláru optického centrovače zaostříme jeho záměrný kříž (příp. soustředné kroužky) a jeho vysouváním zaostříme obraz terénu pod stativem. Pokud záměrná přímka optického centrovače směřuje do těsné blízkosti stabilizovaného bodu, zašlápneme i zbývající dvě nohy stativu. V opačném případě uchopíme tyto nohy do rukou a posouváme jimi tak, aby záměrná přímka směřovala do těsné blízkosti bodu. Po zašlápnutí noh se zacílení poněkud poruší. To odstraníme tím, že při stálém sledování bodu v optickém centrovači otáčíme stavěcími šrouby teodolitu až je střed centrovače nad bodem. Záměrná přímka centrovače ale není svislá, protože přístroj není horizontován.

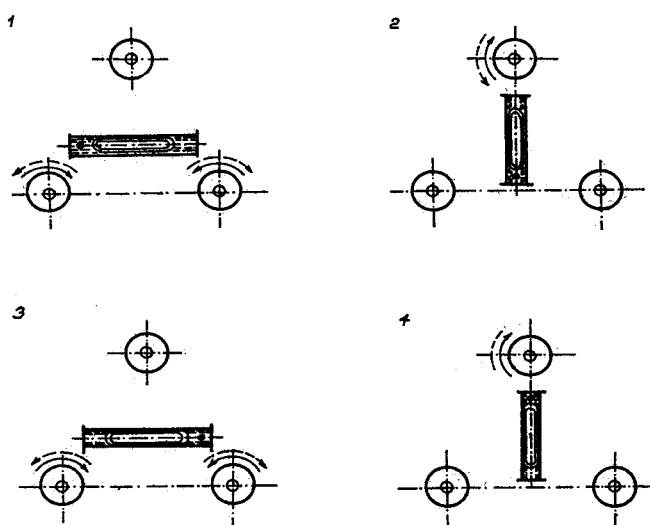
Do svislice záměrnou přímku centrovače uvedeme urovnáním krabicové libely teodolitu a to vysouváním či zasouváním (nikoli posunem) noh stativu (nesmíme použít

stavěcích šroubů trojnožky!). Vysouváme či zasouváme vždy tu nohu stativu, která je nejvíce ve směru výchylky krabicové libely. Vysouvání či zasouvání noh provádíme oběma rukama velmi citlivě při neustálém sledování krabicové libely.

Přesnou horizontaci teodolitu provedeme pomocí trubicové alhidádové libely a stavěcích šroubů trojnožky následovně (viz. obr. 3.13): nejdříve otočíme alhidádou tak, aby spojnice dvou libovolných stavěcích šroubů byla rovnoběžná s podélnou osou trubicové libely. Protisměrným otáčením těchto šroubů libelu urovnáme (1), přičemž platí pravidlo „palec levé ruky“, které říká, že směr pohybu palce levé ruky ukazuje pohyb bubliny v libele. Nyní otočíme alhidádou do polohy kolmé k výchozí spojnici a urovnání trubicové libely provedeme pouze otáčením třetího šroubu (2).

Dále otočíme alhidádou tak, aby trubicová libela byla v poloze obrácené proti (1) o 200° .

Nyní provedeme urovnání opět dvěma stavěcími šrouby, přičemž výchylka má být malá (3), pokud je alhidádová libela správně rektifikována. Poslední poloha bude opět o 200° opačně proti poloze (2) a urovnáme libelu třetím stavěcím šroubem (4).



Obr. 3.13

Po této přesné horizontaci opět zkontrolujeme centraci optickým centrovačem. Pravděpodobně se v důsledku přesné horizontace trochu změní. Přesné dostředění provedeme tak, že povolíme střední šroub stativu a opatrně po hlavě stativu posuneme teodolit při neustálém sledování obrazce v centrovači do středu. Toto lze provést, neboť hlava stativu má vůli a je větší než trojnožka teodolitu.

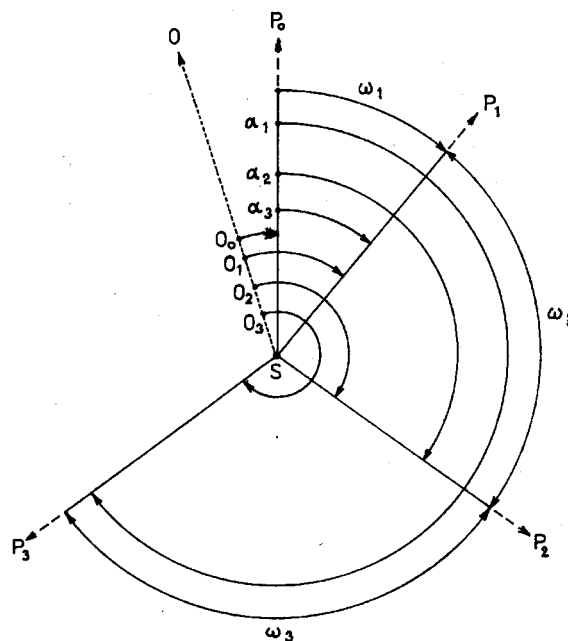
Nyní opět musíme zkontrolovat horizontaci a případně ji opravit (viz přesná horizontace teodolitu).

Při pečlivém dostředění optickým centrovačem můžeme dosáhnout přesnosti 0,7 mm. Je třeba ovšem zkontrolovat, zda je optický centrovač funkční. Kontrolu provedeme **po** přesné horizontaci přístroje tak, že otáčíme alhidádou a stále sledujeme pohyb záměrného kříže (soustředných kroužků) centrovače. Pokud je střed centrovače neustále na stabilizovaném bodě, je centrovač v pořádku. Pokud střed centrovače opisuje kružnici okolo stabilizovaného bodu, je třeba jej dát do opravy. V tomto případě použijeme olovnici, která je v příslušenství teodolitu. Přesnost dostředění pomocí olovnice je ale menší, $2 \div 3$ mm (za nepříznivých povětrnostních podmínek i horší).

3.4 Metody měření vodorovných úhlů

Pro snazší pochopení dalšího výkladu definujme základní pojmy při měření a výpočtech vodorovných úhlů (viz obr. 3.14),

- vrcholový úhel ω je vodorovný úhel, který svírají dva paprsky, směřující ze stanoviska na cílové body,
- směrové úhly α jsou vodorovné směry měřené od základního směru P_0 k paprskům na měřené body,
- základní nebo nulový směr P_0 je takový směr, na který je orientována celá osnova vodorovných směrů, měřených na stanovisku S. Je na něj nastavována úhlová hodnota blízká se 0° (cca $0,02^\circ - 0,04^\circ$),
- osnova vodorovných směrů je soubor všech vodorovných směrů na jednom stanovisku, který je obvykle měřen současně,



Obr. 3.14

- poloha dalekohledu je takové nastavení dalekohledu, kdy svislý kruh je nalevo od okuláru dalekohledu,
- II. poloha dalekohledu je takové postavení dalekohledu, kdy svislý kruh je napravo od okuláru dalekohledu,
- řada je osnova směrů měřená v I. nebo II. poloze dalekohledu,
- skupina je sestava řad směrů v I. a II. poloze dalekohledu,
- průměr prostý je aritmetický průměr ze čtení zlomků gradů z I. a II. polohy dalekohledu z měření na jeden směr,
- redukce (redukovaný průměr) je hodnota směru v prostém průměru, od které je odečtena hodnota prostého průměru prvního směru P_0 ,
- vystředění zápisníku je výpočet požadovaných vodorovných směrů (od zvoleného počátku) z naměřených hodnot,
- adjustace zápisníku je zvýraznění některých hodnot v zápisníku tenkou černou fixou nebo tuší.

Nejjednodušší způsob měření vodorovného úhlu spočívá v tom, že zaměřujeme jednotlivá ramena úhlu v první poloze dalekohledu a v mikroskopu pomocí příslušné odečítací pomůcky odečteme úhlové hodnoty vodorovných směrů. Tyto dvě hodnoty od sebe odečteme a rozdíl je vodorovný úhel. Tento způsob ovšem neeliminuje ani konstrukční chyby teodolitu ani měřické chyby. Proto se používá technologický postup měření vodorovných směrů v obou polohách dalekohledu v několika skupinách nebo vodorovných úhlů repeticí (násobením). Pro velmi přesné práce bylo vyvinuto měření vodorovných úhlů v laboratorních jednotkách.

3.4.1 Postup při měření vodorovných směrů ve skupinách

Tato metoda je v praxi nejčastěji používána.

- a) Provedeme centraci a horizontaci teodolitu nad stanoviskem, zaostříme záměrný kříž a mikroskop pro odečítání úhlových hodnot.
- b) Zvolíme základní směr (počátek). Vybereme směr jednoznačný, ostře viditelný, zpravidla na severu, na který nastavíme čtení blízké nule. U repetičních teodolitů se svorou, (Zeiss Theo 020A), pohybujeme alhidádou a stále sledujeme pohybující se odečítací pomůcku (mřížku) v mikroskopu. Když se čtení blíží 0^{s} zatáhneme hrubou ustanovku vodorovného kruhu, jemnou ustanovkou vodorovného kruhu nastavíme požadované čtení, sepneme repetiční svoru a přesně nacílíme na zvolený základní (nulový) směr. Při zatažené hrubé ustanovce vodorovného a svislého kruhu rozepneme svoru. Pootočíme teodolit o dvě otáčky, znovu nacílíme na cíl a čteme údaj vodorovného kruhu. U teodolitů s limbem na postrk (Zeiss Theo 015B) použijeme k nastavení čtení blízkého nule pastorek. Nejprve přesně zacílíme na zvolený základní (nulový) směr. Pomocí koincidenčního šroubu optického mikrometru nastavíme v mikroskopu jemné čtení cca $0,02^{\text{s}}$. Pomocí pastorku, který odaretujeme současným stlačováním a otáčením, docílím čtení cca $0,02^{\text{s}}$. Pastorek opět zaaretujeme. Povolíme hrubou ustanovku vodorovného kruhu, protočíme přístroj a opět zacílíme na základní směr. Pečlivě zkoincidujeme pomocí koincidenčního šroubu optického mikrometru a čtení na vodorovném kruhu zapíšeme.
- c) Pokračujeme v měření na další zvolené směry. Svory nebo pastorku se nedotýkáme. Směry si předepíšeme do „Zápisníku vodorovných směrů“ (viz příloha 3.1) do sloupce (3). Postupujeme ve smyslu pohybu hodinových ručiček a v případě, že směrů (včetně základního) je více jak dva, zapíšeme základní směr (počátek) ještě jednou na konec osnovy.
- d) Proložíme dalekohled do II. polohy, zacílíme opět na základní směr a pokračujeme v měření proti smyslu pohybu hodinových ručiček. Do zápisníku zapisujeme úhlové hodnoty odspoda nahoru. Zapisovatel by si měl všímat, zda se úhlové hodnoty na tentýž směr z I. a II. polohy dalekohledu liší o zhruba 200^{s} (rozdíl by u technických teodolitů neměl přesahovat $0,03^{\text{s}}$, u teodolitů přesných $0,01^{\text{s}}$). Tímto jsme ukončili měření v 1. skupině.
- e) Zapisovatel ihned po ukončení měření přímo v terénu provede vystředění zápisníku (sloupec (6)). Do výpočtu sloupce (6) zahrneme pouze zlomky gradů. U každého směru nejprve spočteme aritmetický průměr mezi první a druhou polohou. Tím získáme hodnoty $o_0 - o_n$ (viz. obr. 3.14). Tím, že provedeme redukci, od všech hodnot $o_0 - o_n$ odečteme hodnotu o_0 získáme přímo hodnoty směrů α_n . Výsledné vodorovné směry zapisujeme do sloupce (9).

Měřením v jedné skupině jsou naměřené směry zbavené většiny přístrojových vad, jsou zjištěny hrubé chyby při měření i částečně eliminován vliv chyb nevyhnutelných.

Pokud je třeba dále zpřesnit naměřené směry zvolíme měření ve více skupinách. Přesnost naměřených směrů roste ale pouze s odmocninou z počtu skupin. Při druhé a každé další skupině se postupuje naprosto stejně jako u skupiny první, pouze se od sebe liší nastavením počáteční hodnoty na základní směr, aby se odstranila další přístrojová vada z nestejněměrně děleného vodorovného kruhu a bubínku koincidenčního šroubu optického mikrometru. Měření ve více skupinách dále předpokládá použití přesného nebo velmi přesného teodolitu. Následná tabulka určuje úhlové hodnoty na základním směru pro přesné a velmi přesné teodolity pro různý počet skupin.

		přesný teodolit (Theo 015B)	velmi přesný teodolit (Theo 010A)
2 skupiny	1. skupina	0,020 ^g	0,0100 ^g
	2. skupina	100,520 ^g	100,5600 ^g
3 skupiny	1. skupina	0,020 ^g	0,0100 ^g
	2. skupina	66,350 ^g	66,3430 ^g
	3. skupina	133,680 ^g	133,6760 ^g
4 skupiny	1. skupina	0,020 ^g	0,0100 ^g
	2. skupina	50,270 ^g	50,2350 ^g
	3. skupina	100,520 ^g	100,5600 ^g
	4. skupina	150,770 ^g	150,7850 ^g

Při vystředění „Zápisníku vodorovných směrů“ postupujeme ve sloupci (8) naprosto stejně jako u sloupce (6). Při měření ve dvou skupinách, pro které je tento zápisník uzpůsoben se výsledné směry zapisují do sloupce (9). Hodnoty celých gonů v tomto sloupci získáme z I. polohy 1. skupiny (sloupec (5)). Zlomky gonů vypočteme jako aritmetický průměr z redukci (6) a (8) sloupce.

3.5 Metody měření svislých úhlů

Všechny novější teodolity mají plný svislý (vertikální) kruh uzpůsobený pro měření zenitových úhlů. Je třeba si uvědomit, že na rozdíl od měření vodorovných úhlů, při kterém limbus zůstává nehybný a otáčí se alhidáda s odečítacími pomůckami, se při měření svislých úhlů při sklápění dalekohledu otáčí svislý kruh současně s vodorovnou točnou osou dalekohledu. S ní je totiž pevně spojen, zatímco odečítací pomůcky, spojené s indexovou libelou nebo kompenzátořem, zůstávají pevné.

Způsob odečítání svislých úhlů je zdánlivě stejný jako u úhlů vodorovných. Čtení probíhá ve stejném mikroskopu, stejným typem odečítacích pomůcek. Pro správné určení svislého úhlu je však třeba přesvědčit se, zda je kompenzátoř funkční (u novějších teodolitů), nebo zda je urovnána indexová libela, případně ji dorovnat před každým odečítáním na svislém kruhu.

Kompenzátoř nám automaticky urovnává příslušnou odečítací pomůcku svislého kruhu do vodorovné polohy. Jednoduše lze jeho funkčnost ověřit lehkým poklepem (jedním prstem) na svislý kruh teodolitu. Funkční je tehdy, když se při tom odečítací pomůcka svislého kruhu v mikroskopu teodolitu lehce chvěje. Vzhledem k tomu, že u současných teodolitů jsou svislými úhly zenitové, bude dále popisováno jejich měření.

Nejjednodušeji lze měřit zenitový úhel tak, že v první poloze dalekohledu zacílíme na určený bod. Použijeme střední vodorovnou rysku záměrného kříže (zpravidla jednoduchou vodorovnou rysku), a jelikož není podmínkou přesné směrové nacílení, provedeme cílení mimo střed záměrného kříže. Přesné cílení provádíme pomocí jemné

vertikální ustanovky. V okamžiku zacílení urovnáme indexovou libelu a čteme hodnotu zenitového úhlu. (U teodolitů s kompenzátorem urovnání indexové libely odpadá). Takto získaný zenitový úhel je ovšem zatížen všemi přístrojovými i měřickými chybami. Proto je třeba zjistit alespoň hodnotu tzv. indexové chyby. Je to přístrojová chyba vzniklá nedokonalou funkcí indexové libely nebo kompenzátoru. Zjistíme jí tak, že se zvolí výškově přesně identický bod a změří se zenitový úhel v obou polohách dalekohledu. V případě, že přístroj nemá indexovou chybu platí vztah $z_I + z_{II} = 400^g$. Indexová chyba se vypočte ze vzorce:

$$i = \frac{400^g - (z_I + z_{II})}{2}.$$

O indexovou chybu potom musíme opravit zenitový úhel naměřený pouze v I. poloze dalekohledu (pozor může nabývat kladných nebo záporných hodnot). Při zjišťování indexové chyby se doporučuje použít měření na dva výškově dobře identické body (výsledná indexová chyba bude aritmetickým průměrem z obou měření, znaménko musí být stejné a hodnoty podobné). Tak se lze vyhnout zavedení chybně určené indexové chyby do výpočtů. U technických teodolitů by velikost indexové chyby neměla překročit $0,05^g$. V případě, že chceme určovat zenitové úhly s vyšší přesností a vyloučit z měření měřické a přístrojové chyby použijeme měření zenitových úhlů ve 2 skupinách. Nejčastěji měříme zenitové úhly v jedné skupině. Měření započneme opět v první poloze dalekohledu a postupujeme stejným způsobem jak bylo popsáno výše. Po přečtení první hodnoty zenitového úhlu v první poloze ihned proložíme dalekohled do druhé polohy, zacílíme a při současném urovnání indexové libely čteme hodnotu zenitového úhlu. Na rozdíl od měření vodorovných úhlů tedy neměříme všechny zenitové úhly z jednoho stanoviska v první poloze dalekohledu a potom všechny v poloze druhé. Zde je třeba u každého bodu co nejrychleji měřit, aby prodleva mezi měření v první a druhé poloze dalekohledu byla co nejmenší. Výsledný zenitový úhel $z = z_I + i$.

Hodnotu indexové chyby (i) získáme z výše uvedeného vzorce. V případě, že chceme dále zpřesňovat hodnotu zenitového úhlu, opakujeme měření v jedné skupině. Opět platí, že přesnost naměřených zenitových úhlů roste z odmocninou z počtu skupin. Je třeba též posoudit, jestli kvalita použitého teodolitu odpovídá požadované přesnosti. Na přístrojích technického typu (Zeiss Theo 020A) nelze dosahovat výsledků, které mají vteřinovou přesnost.

3.6 Princip měření magnetických azimutů

Při měření vodorovných úhlů magnetickými přístroji využíváme známého jevu, že vlivem magnetického pole Země se staví magnetka vždy do směru magnetického meridiánu. To dříve umožňovalo orientaci měřických prací v lesnatém a nepřehledném terénu. Nyní se magnetické přístroje již téměř nepoužívají, především pro jejich nízkou přesnost v důsledku nahodile se vyskytujících magnetických poruch, ale i vlivem místních podmínek např. ocelových předmětů či blízkosti elektromagnetického pole.

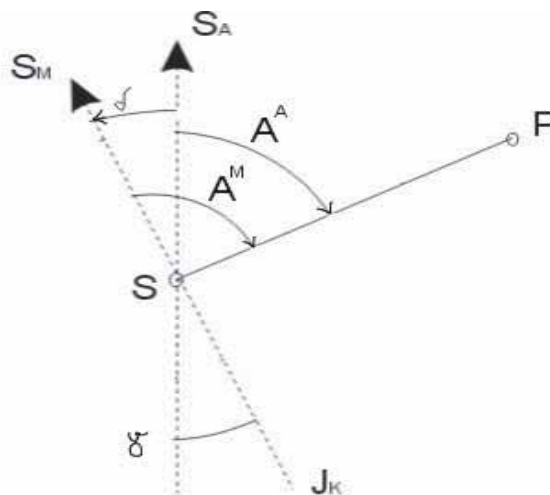
Magnetický azimut A^M je orientovaný úhel, měřený v bodě S od severní větve magnetického meridiánu S_M ve směru pohybu hodinových ručiček ke straně SP, jejíž azimut určujeme.

Astronomický azimut A^A je orientovaný úhel, měřený v bodě S od severní větve astronomického meridiánu S_A ve směru pohybu hodinových ručiček ke straně SP, jejíž azimut určujeme.

Magnetický meridián S_M pozorovacího místa je průsečnice svislé roviny proložené osou ustálené deklinační magnetky se zemským povrchem.

Astronomický meridián S_A pozorovacího místa je průsečnice svislé roviny směřující k astronomickému severu se zemským povrchem.

Magnetická deklinace δ je úhel, který svírá v místě pozorování směr magnetického meridiánu s astronomickým meridiánem. Deklinace může být západní (záporná) nebo východní (kladná). V současnosti dosahuje hodnot asi $+1^\circ$. Mění se s místem a časem.



Obr. 3.15

Meridiánová konvergence γ je úhel, který svírá rovnoběžka s osou X nebo katastrální meridián s astronomickým meridiánem. Velikost meridiánové konvergence závisí na zeměpisné délce, zeměpisné šířce a druhu zobrazení. V západní části ČR v systému S- JTSK dosahuje až 10° .

Při **přímém měření** magnetické azimuty čteme na děleném kruhu buzoly podle hrotu magnetky. Tato měření jsou značně nepřesná, nejvýš $0,1^\circ$.

Při **nepřímém měření** se magnetické azimuty odečítají nebo odvozují z odečtených hodnot na limbu. Obvykle se používá teodolit s buzolou nebo magnetickým usměrňovačem. Podle typu přístroje nastavíme nulu limbu do směru magnetického meridiánu a po zacílení dalekohledu na bod přečteme azimut na limbu. Orientaci lze opakovat a jako výsledek vzít aritmetický průměr čtení.

3.7 Přesnost měřených úhlů

Při posuzování přesnosti měřených úhlů můžeme stejně jako při měření délek rozdělit měřické chyby na hrubé a nevyhnutelné. Nevyhnutelné podle jejich charakteru na systematické a nahodilé. Mezi **hrubé chyby** při měření úhlů patří omyl při čtení, zacílení na jiný bod, hrubé stržení vodorovného kruhu (při utažené hrubé ustanovce), zakopnutí (nebo opření se o stativ), měření při neutaženém svěrném šroubu trojnožky atd. Hrubá chyba je při měření snadno odhalitelná a vyloučit ji musíme opakovaným měřením.

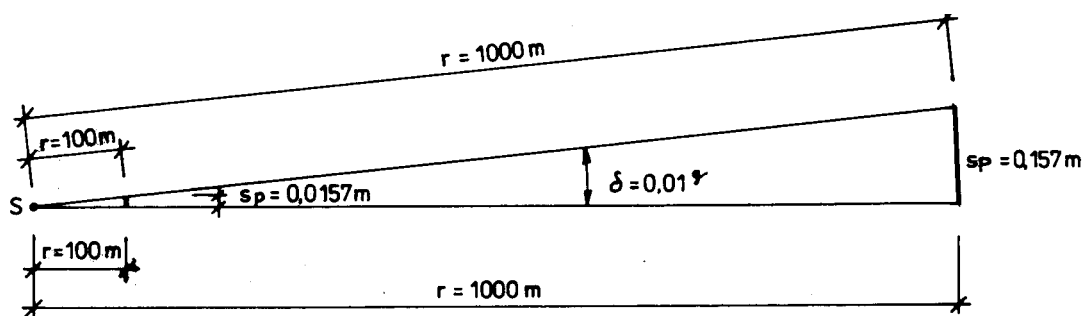
Chyby nevyhnutelné vznikají při měřickém procesu a v důsledku přístrojových chyb. Většinu přístrojových chyb vyloučíme výše popsányými technologiemi měření úhlů. Chyby z centrace a horizontace přístroje eliminujeme na minimum pečlivou prací a kontrolou správné funkce optického centrovače a alhidádových libel (viz výše). Mezi nevyhnutelnými

chybami má největší zastoupení chyba z nesprávného odečítání úhlových hodnot (má nahodilý charakter a snížíme ji pečlivou prací a zaostřením odečítacích pomůcek v mikroskopu) a chyba z cílení. Abychom zmenšili chybu v cílení, je třeba dodržovat následující **zásady při cílení**:

- vždy cílíme co nejbliž k vlastnímu bodu, tj. na výtyčku co nejniž (na hrot), u přímo viditelných bodů na jejich osu (střed makovice věže kostela, patu hromosvodu, vrch osy komína apod.),
- u blízkých bodů (na několik metrů) je třeba použít k jejich signalizaci tenčí signál než je výtyčka (přidržená tužka, hrot hřebíčku či špendlíku apod.),
- pro cílení použít dvojrysky záměrného kříže, která využívá citlivost oka pro symetrii čar,
- při cílení jemně zacházet s obojím typem ustanovek; zvláště hrubé ustanovky se nedotahují silou, ale jen tak, aby působily třením.

Správné cílení také nepříznivě ovlivňují vibrace vzduchu v letních měsících zvláště v poledních hodinách, nedbale postavená signalizace (nesvislá výtyčka) na cílovém bodě a nezaostřený záměrný kříž či obraz cíle (paralaxa).

Při měření a vytyčování je třeba dobře zvážit, jakou přesnost by měřený či vytyčený úhel měl mít a podle toho volit typ teodolitu a metodu pro měření úhlu. Zpravidla jde o to, jaký maximálně přípustný směrový posun jsme ochotni tolerovat mezi stanoviskem (středem úhlu) a koncovými body jeho ramen. Při chybě úhlu $\delta = 0,01^g$ a délce jeho ramen 100 m činí směrový posun $s_p = 0,0157$ m.



$$s_p = r \cdot \text{arc} \delta = \frac{\pi}{200^g} \cdot \delta^g$$

Obr. 3.16

Při stejně velké chybě úhlu $\delta = 0,01^g$ a délce jeho ramen 1000 m je směrový posun $s_p = 0,157$ m. Tedy desetinásobný. Z toho vyplývá, že při měření úhlů na blízké cíle není třeba tak přesných teodolitů a metod měření jako při měření na cíle vzdálené.

Výpočet střední chyby úhlu lze provést podle vzorce $m_\omega = \sqrt{\frac{1}{s} \cdot (m_o^2 + m_c^2) + m_{\omega_e}^2}$

- kde
- s - počet skupin,
 - m_o - střední chyba v odečtení úhlové hodnoty,
 - m_c - střední chyba v cílení,
 - m_{ω_e} - vliv střední chyby v centraci přístroje a cílů.

Povšimněte si, že střední chyba v odečtení úhlové hodnoty je jen jednou ze tří chyb ovlivňujících konečnou střední chybu úhlu. Také proto tedy nelze hodnotit přesnost

naměřených úhlů pouze prostřednictvím použitého teodolitu. Z praktických výsledků lze vypočítat, že s vteřinovým teodolitem (tj. s teodolitem s možností odečítání na 0,0001^g), při délce ramen 500 – 1500 m, lze ve dvou skupinách měřit se střední chybou $m_{\omega} \cong 0,015^g$.

U minutového teodolitu (Zeiss Theo 020A) při délce ramen 150 – 200 m, měření v jedné skupině a signalizaci cílů výtyčkami lze očekávat střední chybu $m_{\omega} \cong 0,004^g$.

4 MĚŘENÍ VÝŠEK

Měření výšek spočívá v určování výškových rozdílů (převýšení) mezi body s danou výškou a body určenými. Převýšení můžeme přibližně definovat jako nejkratší (svislou) vzdálenost mezi dvěma hladinovými plochami proloženými výchozím a koncovým bodem.

V geodezii se pro určování výšek používá čtyř metod. Jsou to metody:

- barometrická (historická – přibližná),
- trigonometrická,
- nivelační,
- metoda GPS (globální polohový systém).

4.1 Barometrické měření výškových rozdílů

Princip metody spočívá v poznatku, že barometrický tlak vzduchu vyvolaný tíhou zemské atmosféry klesá s přibývajícím výškou od hladiny moře (změnou výšky o přibližně 11 m klesne barometrický tlak o 1 mm rtuťového sloupce, tedy o 1 torr, jak byla dříve označována jednotka atmosférického tlaku). Nyní je základní jednotkou pro měření tlaku pascal (Pa). Platí: 1 torr = 133,3 Pa. Přístroje k měření tlaku vzduchu se nazývají barometry.

Dělíme je na:

- a) rtuťové (historicky starší – pro práce v terénu nevhodné),
- b) kovové – aneroidy (takřka výhradně používané v geodezii).

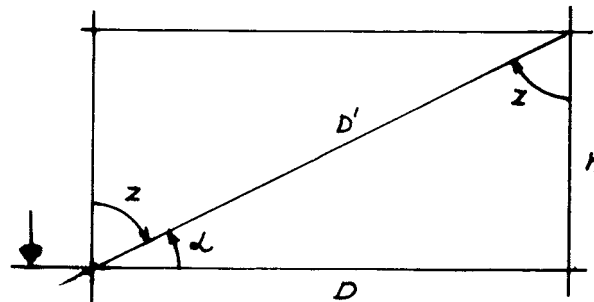
Hlavní součástí aneroidu je téměř vzduchoprázdná válcová krabička ze silného plechu, neprodyšně uzavřená zvlněnou membránou. Při změně tlaku vzduchu se tato membrána prohýbá dovnitř nebo vně krabičky. Pohyb se mechanicky převádí na ručičku se stupnicí v jednotkách tlaku. Nejvíce používaný bývá Pauliniho aneroid (konstrukce švédského inženýra Pauliniho), často s výškoměrnou stupnicí (tzv. altimetr).

Měření výškových rozdílů můžeme provádět pomocí jednoho, nebo dvou aneroidů současně. Při použití dvou přístrojů zlepšíme přesnost určených výškových rozdílů. Nejprve na výchozím bodě seřídíme oba aneroidy a jeden necháme na tomto bodě jako staniční. Druhý tzv. polní přenášíme postupně na další body, jejichž výšky je třeba určit. U obou aneroidů vždy ve stejném okamžiku odečítáme hodnotu tlaku vzduchu a teplotu vzduchu, která naměřené údaje ovlivňuje. Pro synchronizaci času odečítání lze použít krátkovlnných vysílaček nebo mobilních telefonů. Měření končí opět porovnáním obou aneroidů na výchozím bodě.

Výpočtem barometrické rovnice nebo prostřednictvím speciálních tabulek se určí převýšení mezi určenými body. Přesnost takto určených výšek je i tak nízká, asi 1 m, což postačuje pouze pro informativní zjištění výškových rozdílů v hornatých terénech.

4.2 Trigonometrické měření výšek

Spočívá v řešení pravoúhlého trojúhelníka, ve kterém měříme úhel a délku. Hledanou hodnotou je velikost svislé odvěsny – převýšení (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1

Převýšení tedy získáme jako zprostředkovanou veličinu z následujících vzorců :

$$h = D \cdot \operatorname{tg} \alpha$$

v případě, že měříme vodorovnou vzdálenost D a výškový úhel α ,

$$h = D \cdot \operatorname{cotg} z$$

v případě, že měříme vodorovnou vzdálenost D a zenitový úhel z ,

$$h = D' \cdot \sin \alpha$$

v případě, že měříme šikmou vzdálenost D' a výškový úhel α ,

$$h = D' \cdot \cos z$$

v případě, že měříme šikmou vzdálenost D' a zenitový úhel z .

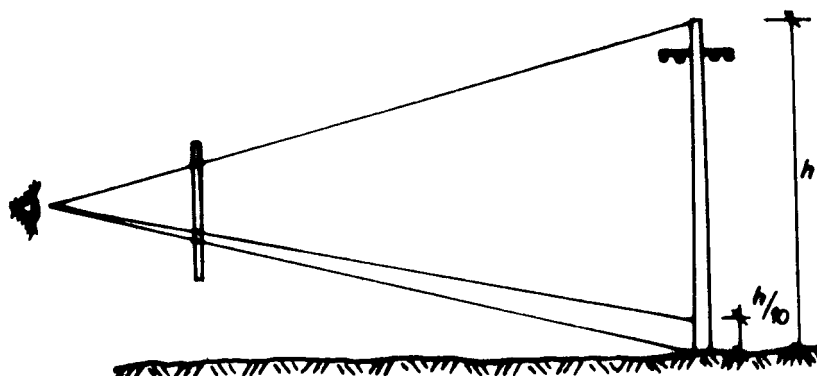
Přesnost takto určeného převýšení je tedy závislá na přesnosti změřených vzdáleností a svislých úhlů. Vzdálenosti měříme buď pásmem, optickým nebo elektronickým dálkoměrem (viz kapitola 2). Svislé úhly měříme pomocí teodolitu (viz kapitola 3). S výhodou lze pro současné změření obou veličin použít moderního geodetického přístroje, totální stanice, ve které je zabudován elektronický dálkoměr i elektronický teodolit. Zároveň tento přístroj dokáže vyřešit i výše zmíněné rovnice.

Na obr. 4.1 je vodorovná rovina realizována horizontem přístroje.

4.2.1 Určení výšky předmětu

V praxi se vyskytuje potřeba změřit výšku budovy, věže, stožáru, komína, nebo jen určité části stavby, která je zcela nepřístupná. Někdy je třeba určit průřezný profil v určeném objektu, výšky vodičů vysokého napětí nad terénem, nebo výšku stromu či porostu. Zde všude lze využít trigonometrické určování výšek. Jen je třeba zvážit, jak přesně je potřeba danou výšku určit a podle toho zvolit pomůcky či přístroje k měření. Nejjednodušší pomůckou je **lesnický dendrometr**, kterým lze změřit výšku a tloušťku stromů, nebo i stožárů apod.

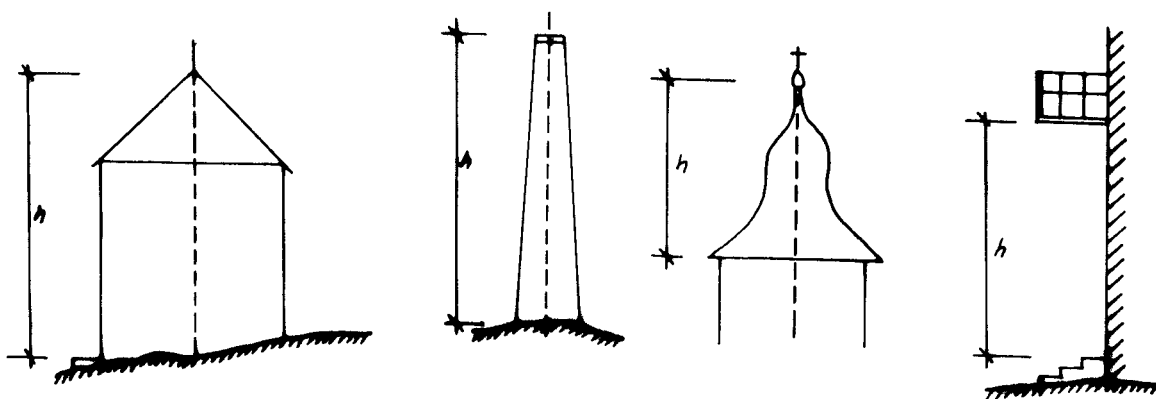
Lze jej snadno sestrojít z pravítka, na kterém provedeme tři zářezy. Na počátku a ve vzdálenosti jednoho a deseti dílů od počátku. Použití spočívá v praktickém řešení podobnosti trojúhelníků (viz obr. 4.2).



Obr. 4.2

Uchopíme dendrometr ve svislé poloze do natažené ruky. Poodstoupíme tak daleko od předmětu, jehož výšku chceme určit, až jej vidíme celý v horním a dolním zářezu dendrometru. Na předmět promítneme zářez provedený ve vzdálenosti jednoho dílu od počátku a pomocník v tom místě učiní na předmětu značku. Nyní změříme výšku značky od terénu a vynásobíme deseti, čímž získáme celou výšku předmětu. Je třeba si uvědomit, že chyba v promítnutí zářezu na předmět se zdesetinásobí, a proto se přesnost takto určené výšky pohybuje kolem 0,5 m. V mnohých případech je však dostačující.

Chceme-li určit výšku předmětu s vyšší přesností, je třeba použít **teodolitu** a **pásma** nebo **totální stanice**. Vždy je třeba si uvědomit, že vždy určujeme výšku po svislici, a kam je vypočtená výška vztažena (viz obr.4.3).



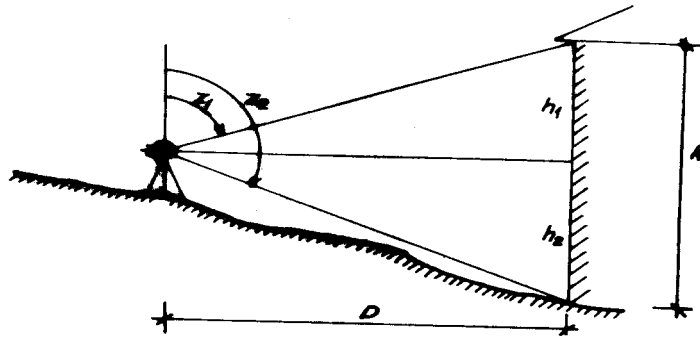
Obr.4.3

Vlastní měření se tedy provede s ohledem na přesně definovaný požadavek. Mohou nastat tyto tři varianty:

- a) lze změřit vzdálenost mezi teodolitem a předmětem (viz obr.4.4),

$$h = h_1 + h_2 = D \cdot \cotg z_1 - D \cdot \cotg z_2$$

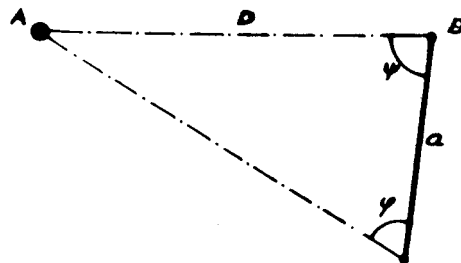
$$h = D \cdot (\cotg z_1 - \cotg z_2)$$



Obr. 4.4

- b) nelze změřit vzdálenost mezi teodolitem a předmětem, ale lze rozvinout do strany pomocnou základnu **a**,

$$D = a \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}$$



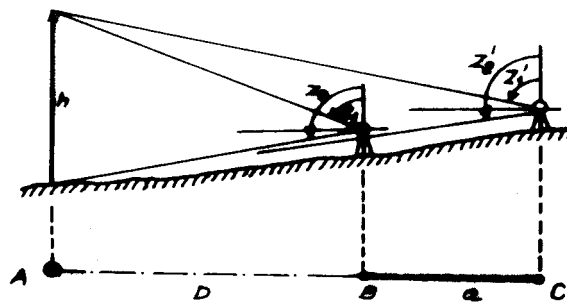
Obr. 4.5

Na obrázku 4.5 je znázorněný půdorys, na kterém je patrné, jak pomocí sinové věty z naměřené základny **a** a vodorovných úhlů φ a ψ vypočteme vodorovnou vzdálenost mezi stanovištěm teodolitu **B** a předmětem **A**. Na bodě **B** je třeba změřit zenitové úhly **z**. Další řešení viz varianta a).

- c) nelze změřit vzdálenost mezi teodolitem a předmětem a nelze rozvinout do strany pomocnou základnu **a**.

Tato varianta může nastat v úzké ulici, kde je třeba určit výšku kostela .

Použijí opět pomocnou základnu **a**, kterou zvolím přesně v prodloužení nepřístupné vzdálenosti **D** (řez viz obr. 4.6).



Obr. 4.6

V tomto případě je třeba změřit pomocnou základnu a , a zároveň zenitové úhly z jak na bodě B tak C . Výšku předmětu odvodíme z následujících rovnic:

$$h = D \cdot (\cotg z_1 - \cotg z_2) = D \cdot p$$

$$h = (D + a) \cdot (\cotg z_1' - \cotg z_2') = (D + a) \cdot q$$

$$D \cdot p = (D + a) \cdot q = D \cdot q + a \cdot q$$

$$D \cdot p - D \cdot q = a \cdot q$$

$$D = \frac{a \cdot q}{p - q}$$

$$h = D \cdot p = \frac{a \cdot p \cdot q}{p - q}$$

Pozn. Výpočet je bez kontroly – nadbytečně měřené veličiny byly použity k výpočtu nepřístupné délky tak, aby převýšení vyšlo z obou postavení stejně.

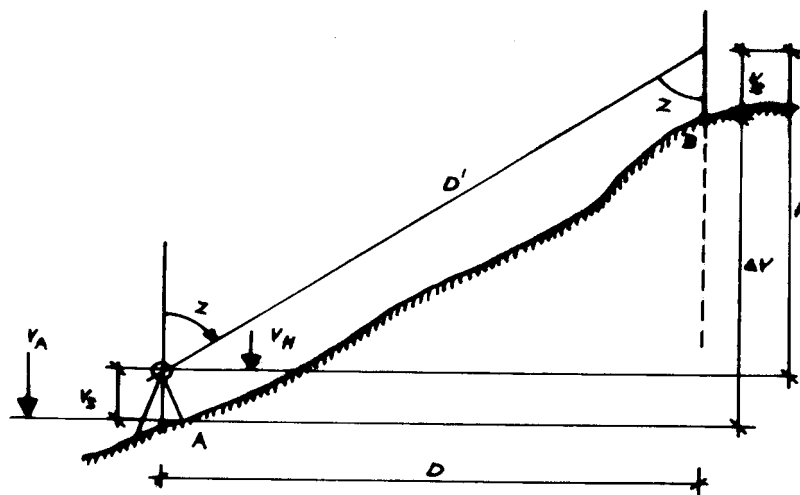
4.2.2 Určení nadmořské výšky

Nadmořskou výšku zvoleného bodu určíme trigonometricky tak, že nad bodem o známé nadmořské výšce zcentrujeme a zhorizontujeme teodolit či totální stanicí, změříme zenitový úhel a pásmem nebo elektronicky změříme vzdálenost (šikmou či vodorovnou). Zenitový úhel neměříme přímo ke zvolenému bodu, na který zpravidla není přímo vidět, ale k signálu (terči), který nad bodem svisle umístíme. Dále je třeba změřit (např. svinovacím kovovým dvoumetrem) na milimetry výšku přístroje (k točné ose dalekohledu) a výšku signálu nad cílovým bodem (viz obr. 4.7).

$$h = D \cdot \cotg z = D' \cdot \cos z$$

$$V_H = V_A + v_s$$

$$\underline{V_B = V_H \pm h - v_l}$$



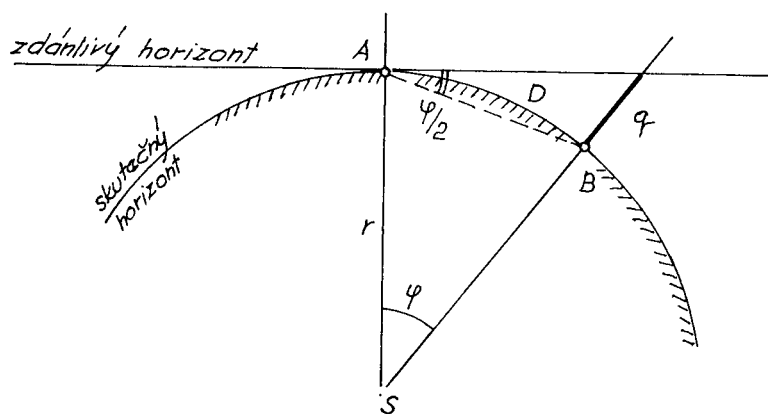
Obr. 4.7

Pokud je vzdálenost mezi body A a B větší než 300 m je třeba při trigonometrickém měření výšek brát v úvahu opravu ze zakřivení Země a z refrakce.

Vzorec pro opravu ze zakřivení Země (ze záměny zdánlivého a skutečného horizontu) vyplývá z obr. 4.8.

$$q = D \frac{\varphi}{2} \quad \varphi = \frac{s}{r}$$

$$q = \frac{D^2}{2r} \quad r = 6\,380 \text{ km}$$



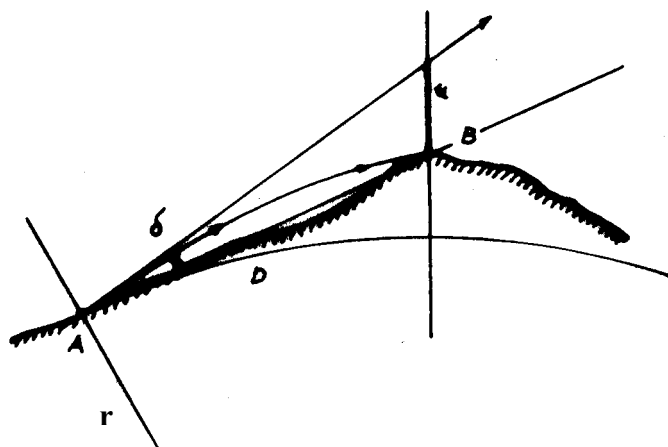
Obr. 4.8

Protože zenitový úhel je vztažen ke zdánlivému horizontu a nikoli ke skutečnému je třeba opravu ze zakřivení Země k převýšení **přičíst**.

Oprava z refrakce vyplývá z obr. 4.9.

Refrakce v přízemních vrstvách atmosféry způsobuje ohyb záměry. Měříme ve směru tečny k obecně prostorově zakřivené záměři. Místo správného zenitového úhlu z , změříme obvykle při dostatečné výšce záměry nad terénem zenitový úhel z' menší o úhel δ . Na koncovém bodě bude z tohoto důvodu převýšení o hodnotu u větší.

$$u = -k \frac{D^2}{2r} \quad \text{kde } k \cong 0.13 \quad r = 6\,380 \text{ km}$$



Obr. 4.9

Vzorec je podobný vzorci pro opravu ze zakřivení Země, má ale opačné znaménko a vyskytuje se zde empiricky určený Gaussův refrakční součinitel k . Opravu z refrakce je třeba od určeného převýšení vždy **odečíst**.

Následující tabulka názorně ukazuje jakých hodnot mohou obě opravy nabývat.

D (m)	q (m)	u (m)	q - u (m)
100	0.001	-	0.001
300	0.007	- 0.001	0.006
1 000	0.078	- 0.010	0.068
2 000	0.314	- 0.041	0.273

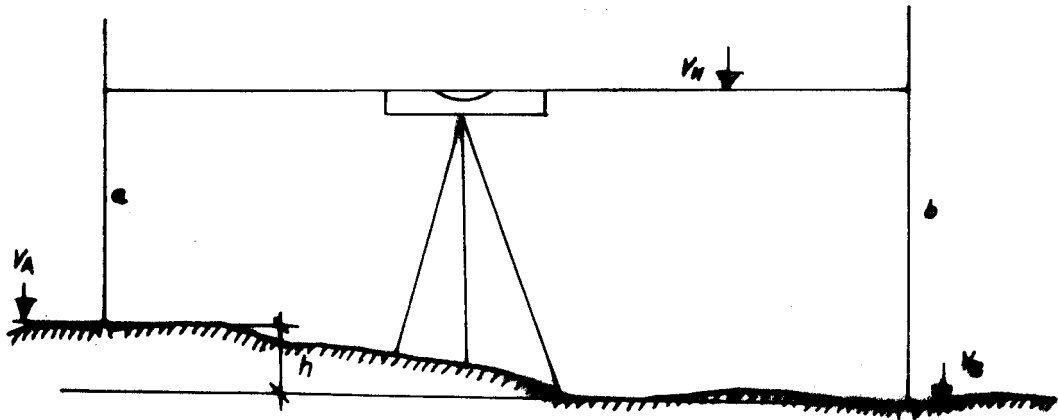
4.2.3 Přesnost trigonometricky určených výšek

Výpočet přesnosti se provede podle zákona o hromadění středních chyb. Přitom je rozhodující přesnost měření délek a zejména svislých úhlů, ze kterých se převýšení odvozuje. Abychom při měření výšky předmětu dosáhli přesnosti charakterizované střední chybou $m_h \cong 0,01$ m, je třeba měřit příslušnou délku se střední chybou $m_D \leq 0,01$ m a zenitový úhel se střední chybou $m_z \leq 0,005^g$.

Při určování převýšení na vzdálenost $D = 150$ m, měříme-li D se střední chybou $m_D = 0,04$ m, při zenitovém úhlu $z = 115^g$ (nebo 85^g), měříme-li z se střední chybou $m_z = 0,0015^g$ dosáhneme opět střední chybu převýšení $m_h \cong 0,01$ m.

4.3 Nivelace

Podstatou nivelace (z francouzského nivellement) je určování rozdílu výšek dvou bodů od zvoleného horizontu, který je realizován do vodorovné polohy **urovnaným** dalekohledem nivelačního přístroje (viz obr. 4.10), hodnoty **a**, **b** na svislých měřících (tzv. nivelačních latích) odečteme na vodorovné rysce záměrného kříže dalekohledu nivelačního přístroje.



Obr. 4.10

4.3.1 Nivelační přístroje

Princip všech nivelačních přístrojů je stejný. Jejich prostřednictvím vytyčujeme vodorovnou rovinu (záměru). Lze je rozdělit podle různých hledisek:

- 1) podle realizace vodorovné záměry ♦ s nivelační libelou (starší konstrukce),
♦ s kompenzátorem (většina nových přístrojů),
- 2) podle zdroje světla ♦ optické,
♦ laserové,

- 3) podle způsobu odečítání
- ◆ vizuální,
 - ◆ automatické (čárový kód),
- 4) podle přesnosti
- ◆ velmi přesné $m_0 \leq 0,3$ mm,
 - ◆ přesné $0,3 \text{ mm} < m_0 \leq 1,5$ mm,
 - ◆ technické $1,5 \text{ mm} < m_0 \leq 5$ mm,
 - ◆ s nižší přesností $m_0 > 5$ mm,
kde m_0 je střední kilometrová chyba (viz dále),
- 5) podle způsobu hrubého urovnání
- ◆ s klínovými kotouči,
 - ◆ se stavěcími šrouby,
 - ◆ s kulovou hlavicí stativu.

Libelové i kompenzátorové nivelační přístroje mají pro hrubé urovnání do vodorovné roviny krabicovou libelu. Libelové nivelační přístroje mají pro jemné urovnání tzv. nivelační libelu, která je trubicová a velmi citlivá. Její urovnání provádíme pomocí elevačního šroubu.

U kompenzátorových nivelačních přístrojů je nivelační libela nahrazena mechanickým zařízením, pomocí kterého dosáhneme vodorovnosti záměrné přímkou. Toto zařízení se nazývá **kompenzátor** a je založen na působení zemské tíže.

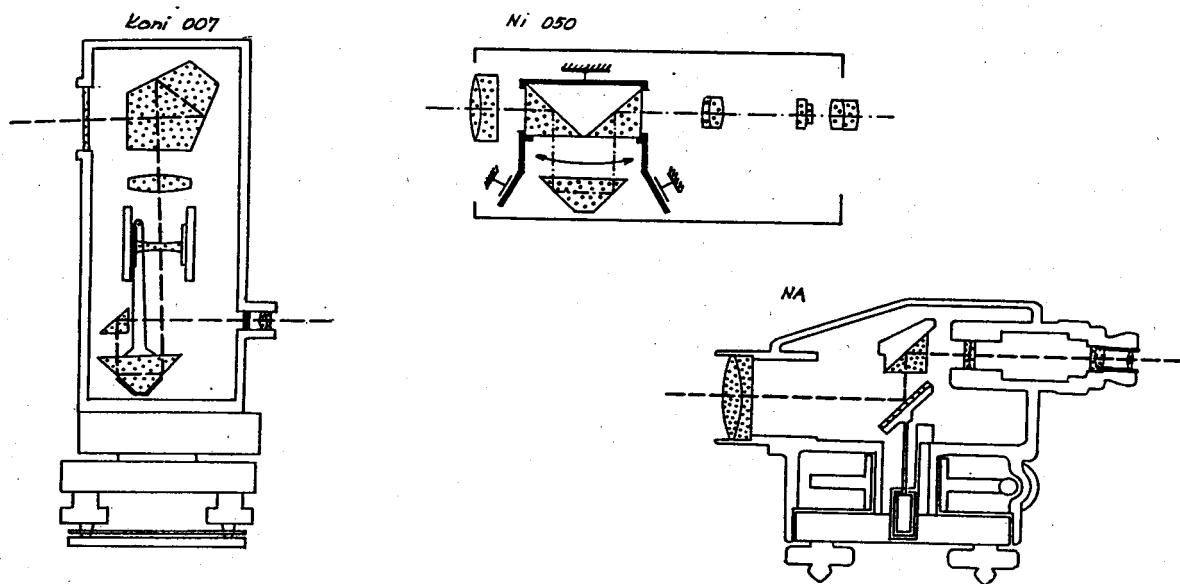
Hlavním konstrukčním prvkem kompenzátoru je nejčastěji:

- kyvadlo,
- povrch kapaliny,
- pružina s hranolem či zrcadlem.

Vzhledem k tomu, že hlavní konstrukční prvek je zpravidla zavěšen a kývá se, je třeba jeho kyv tlumit. Tlumiče kompenzátorů jsou:

- vzduchové,
- kapalinové,
- magnetické.

Princip konstrukce kompenzátoru viz obr. 4.11.

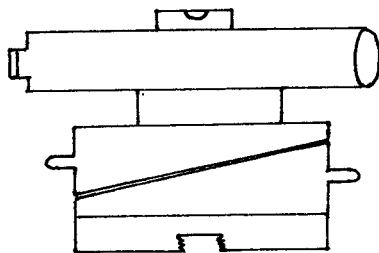


Obr. 4.11

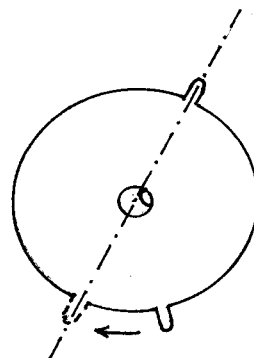
Příprava nivelačního přístroje před měřením

- 1) Pevně zašlápneme nohy stativu s nivelačním přístrojem – hlava stativu by měla být přibližně vodorovná. Ve svahu by měly být dvě nohy stativu umístěny ze svahu kvůli lepší stabilitě.
- 2) Zaostříme záměrný kříž dalekohledu a odstraníme paralaxu (stejně jako u dalekohledu teodolitu).
- 3) Hrubě zhorizontujeme nivelační přístroj pomocí krabicové libely.

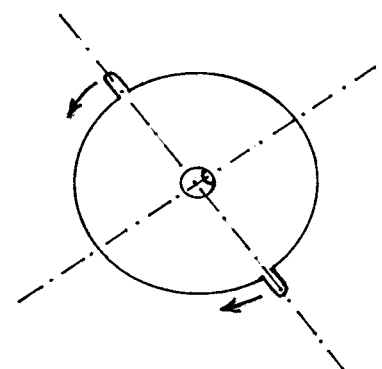
Pozn. U nivelačních přístrojů s klínovými kotouči, řez přístrojem viz obr. 4.12 a, je třeba postupovat následovně. Nejprve táhly otočíme tak, aby se ocitla proti sobě (pohled shora viz obr. 4.12 b). Potom otočíme protilehlými táhly tak, aby jejich spojnice byla kolmá na spojnici procházející středem krabicové libely a středem bubliny v této libele (viz obr. 4.12 c) a souběžným pohybem oběma táhly současně dostaneme bublinu doprostřed libely. Směr pohybu táhel je i směrem pohybu bubliny. Urovnání závisí především na přesnosti odhadu kolmosti čerchovaných spojnic (viz obr. 4.12c).



Obr. 4.12a



Obr. 4.12b

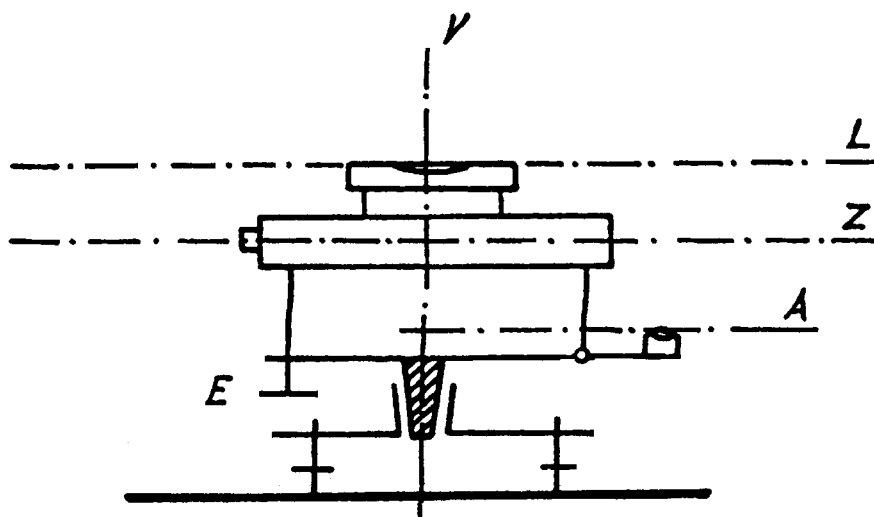


Obr. 4.12c

- 4) Zacílíme na nivelační lať a dokonale zaostříme obraz v dalekohledu.
- 5) Pečlivě urovnáme nivelační libelu elevačním šroubem. (U nivelačních přístrojů s kompenzátorem tento bod odpadá, jen je třeba se přesvědčit, lehkým poklepáním nehtem na dalekohled tam kde je umístěn kompenzátor, zda je funkční. Obraz záměrného kříže se při správné funkci kompenzátoru slabě chvěje.)

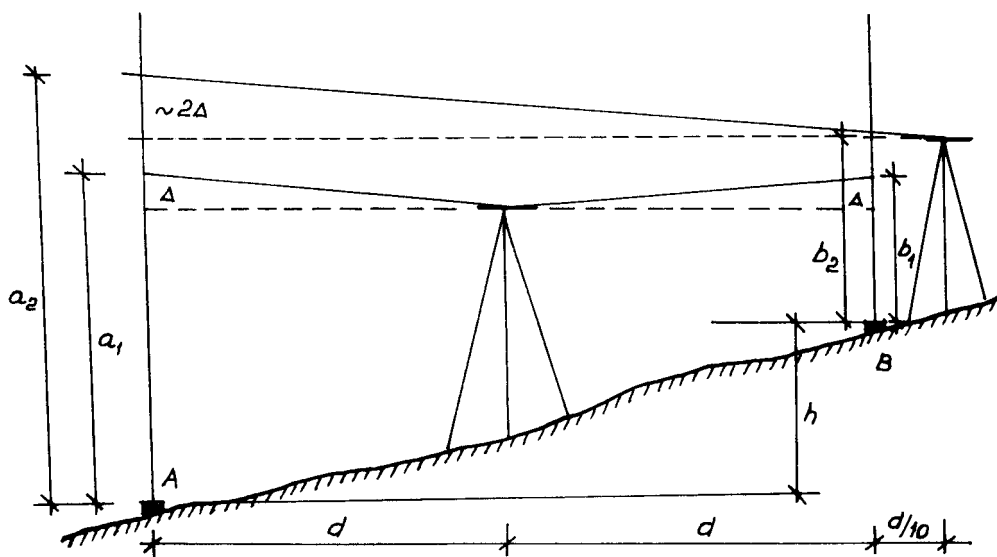
Přístrojové vady nivelačních přístrojů nepříznivě ovlivňují kvalitu nivelace. Vady vznikají nedodržením osových podmínek nivelačního přístroje.

1. Osa pomocné krabicové libely **A** má být kolmá ke svislé ose přístroje **V**.
2. Vodorovná ryska záměrného kříže má být kolmá ke svislé ose přístroje **V**.
3. Osa nivelační libely **L** má být rovnoběžná se záměrnou přímkou.



Obr. 4.13

- ad 1) Pomocí nivelační libely provedeme přesnou horizontaci tak, aby nivelační libela byla urovňána v jakékoliv poloze dalekohledu. Podmínka není splněna, když bublina pomocné krabicové libely není v jejím středu. Opravu lze provést pomocí rektifikačních šroubků u krabicové libely. U nivelačních přístrojů s kompenzátorem není, při nesplnění této podmínky, kompenzátor funkční (po urovňání pomocí krabicové libely nereaguje záměrný kříž na lehký poklep chvěním). Takový nivelační přístroj je třeba dát do opravy.
- ad 2) Porušení této podmínky je málo časté. Vadu zjistíme tak, že levý okraj vodorovné rysky záměrného kříže zaměříme na zřetelný bod (např. roh dílku na svislé a upevněné nivelační lati). Při posunu jemnou ustanovkou má vodorovná ryska záměrného kříže stále krýt zvolený bod. Nekryje-li, je zapotřebí pootočit destičku záměrného kříže.
- ad 3) Tato podmínka je rozhodující pro správnou funkci nivelačního přístroje a je nutno ověřit její správnost **každý den** před započítím měření a vždy po delším transportu nivelačního přístroje. Tomuto ověření říkáme **polní zkouška nivelačního přístroje** (viz obr. 4.14).



Obr.4.14

Na mírně svažitém terénu zvolíme body **A** a **B** vzdálené od sebe 50 – 60 m a provedeme jejich přechodnou stabilizaci nivelačními podložkami. Rozkrokováním umístíme doprostřed nivelační přístroj a zhorizontujeme jej. Na nivelační podložky na bodech **A**, **B** necháme postavit nivelační latě a odečteme na nich hodnoty a_1 , b_1 .

Potom přeneseme nivelační přístroj 2 – 3 m za bod **B**, aby byl v jedné přímce. I zde přístroj zhorizontujeme a na nivelačních latích, které zůstaly stát na bodech **A**, **B** Odečteme hodnoty a_2 , b_2 . Vypočteme převýšení mezi body **A**, **B** z hodnot a_1 , b_1 .

$$h_1 = a_1 - b_1$$

Stejné převýšení vypočteme z hodnot a_2 , b_2 .

$$h_2 = a_2 - b_2$$

Vzhledem k tomu, že jsme nezměnili polohu bodu **A** ani bodu **B**, měla by se převýšení shodovat $h_1 = h_2$. V tomto případě je dodržena třetí osová podmínka a nivelační přístroj je v pořádku. Je možné akceptovat rozdíl $h_1 - h_2$ o velikosti

$$\pm 2-3 \text{ mm max.} 5 \text{ mm,}$$

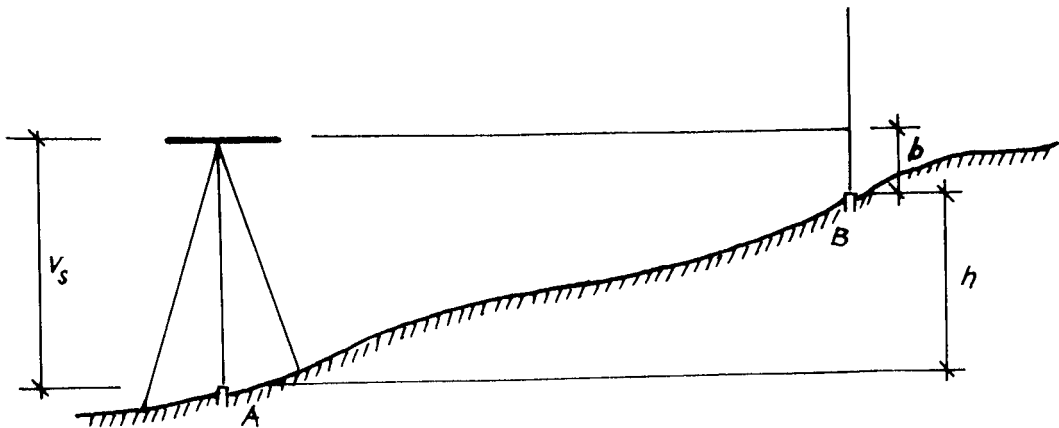
vzniklý zpravidla špatným odhadem čtení na lati.

Pozn. Obr. 4.14 platí pro přístroje s nivelační libelou. Pro nivelační přístroje kompenzátorem provádíme polní zkoušku obdobně a pokud nám rozdíl $h_1 - h_2$ **opakovaně** překročí 5 mm je třeba dát přístroj odborně seřídit.

4.3.2 Nivelační metody

Geometrická nivelace vpřed (kupředu)

Tato metoda se v praxi uplatňuje výjimečně, zpravidla při měření příčných profilů. Její princip je patrný z obr. 4.15.



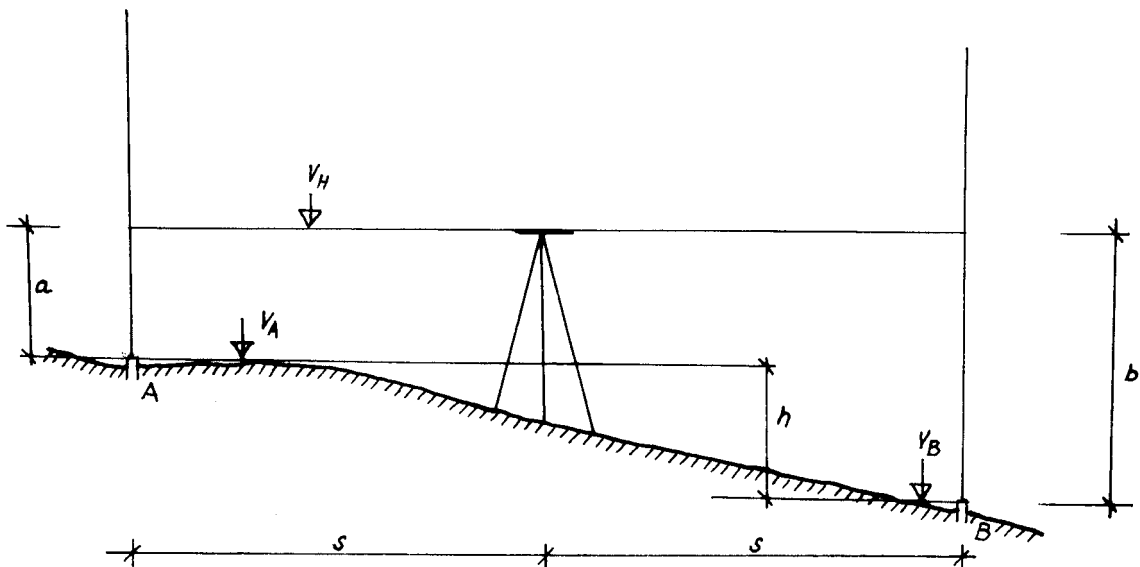
Obr. 4.15

Na bodě A zhorizontujeme nivelační přístroj. Svinovacím dvoumetrem odměříme s přesností na milimetry výšku přístroje v_s , a na nivelační lati svisle postavené na bodě B odečteme hodnotu b . Převýšení mezi body A a B je :

$$h = v_s - b$$

Geometrická nivelace ze středu

Touto metodou se v praxi provádí většina nivelačních měření. Podstata vyplývá z obr. 4.16.

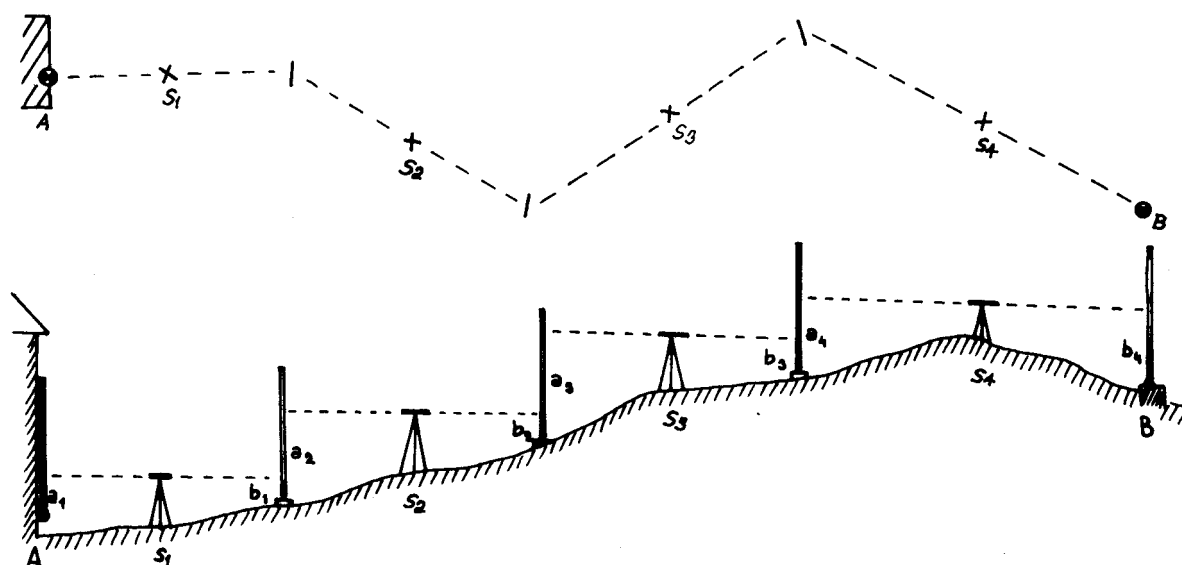


Obr. 4.16

Naším úkolem je opět zjistit převýšení mezi body **A** a **B**. Tentokrát postavíme nivelační přístroj přesně doprostřed mezi tyto body a zhorizontujeme jej. Na body **A** a **B** postavíme svisle nivelační latě. Na latích odečteme hodnoty **a** a **b**. Hledané převýšení je :

$$h = a - b$$

Postavení latě – nivelační přístroj – lať jak je vyobrazeno na obr. 4.16 se nazývá **nivelační sestava** a je základním prvkem geometrické nivelace ze středu. Vzhledem k tomu, že velmi často mezi body **A** a **B**, jejichž převýšení chceme určit, není přímá viditelnost, nebo jsou od sebe příliš vzdálené, či převýšení je příliš velké, aby bylo možno provést určení převýšení pomocí jedné nivelační sestavy je třeba sdružit nivelační sestavy do **nivelačního oddílu** (viz obr 4.17).



Obr. 4.17

V horní části obr. 4.17 je půdorys nivelačního oddílu. Stanoviska nivelačního přístroje jsou označena $S_1 - S_4$. Povšimněte si, že délky jednotlivých nivelačních sestav se mohou lišit, a že nivelační oddíl může být směrově libovolně zalomený. Jen je třeba dodržet zásadu, že ke směrovému zalomení nivelačního oddílu může docházet pouze v místě postavení latě (nivelační sestavy musí být přímé). Nivelační latě stavíme přímo na body **A** a **B**, ale na přechodných postaveních latí (**přestavových bodech**) stavíme latě na **nivelační podložky**, které pečlivě zašlapujeme do terénu a dočasně tak přestavové body stabilizujeme. Označíme-li všechna čtení na lať vzad (myšleno ve směru nivelačního oddílu) $a_1 \dots a_n$ a všechna čtení na lať vpřed $b_1 \dots b_n$, bude pro výpočet převýšení mezi body **A**, **B** platit :

$$a_1 + a_2 + a_3 \dots a_n = [a]$$

$$b_1 + b_2 + b_3 \dots b_n = [b]$$

$$h = [a] - [b]$$

Známe-li výšku bodu **A**, výška bodu **B** bude:

$$V_B = V_A + h$$

při čemž hodnota **h** může být kladná nebo záporná.

Nivelační oddíly se sdružují do větších celků, kterým říkáme **nivelační pořady**. Rozlišujeme tři druhy nivelačních pořadů:

- volné,
- vložené,
- uzavřené.

Volnými nivelačními pořady nazýváme takové, které začínají na nivelačním bodě o známé a ověřené nadmořské výšce a končí na bodě určovaném. Nejjednodušší příklad takového pořadu je na obr. 4.17 a sestává se pouze z jednoho oddílu. Tento typ nivelačního pořadu je v praxi **nepřípustný**. Lze sice spočítat výšku neznámého určovaného bodu, ale nelze zjistit možnou hrubou chybu.

Vložený nivelační pořad je nejvhodnější. U něj vycházíme ze známého nivelačního bodu s ověřenou výškou a končíme na jiném známém nivelačním bodě s ověřenou výškou. V takovém pořadu můžeme mít libovolný počet nivelačních oddílů a lze tedy v jeho rámci určit výšky i většího počtu nových neznámých bodů.

Uzavřený nivelační pořad je vlastně zvláštním případem vloženého nivelačního pořadu. Výchozí a koncový nivelační bod je totožný. V tomto případě je naprosto nevyhnutelné ověřit výšku tohoto nivelačního bodu před započítáním vlastního měření. Podle toho jak přesně chceme určit výšku nově určovaných bodů používáme při měření tři různě přesných druhů (způsobů):

- technické nivelace,
- přesné nivelace,
- velmi přesné nivelace.

Všechny tři využívají principu geometrické nivelace ze středu. Liší se však v použitých typech nivelačních přístrojů (viz kap. 4.3.1) a pomůckách jako jsou nivelační latě a nivelační podložky. Také technologie měření má s vzrůstající přesností více omezení a je pracnější.

Velmi zhruba se dá říci, že přesnost technické nivelace je centimetrová, přesné nivelace milimetrová a u velmi přesné nivelace ještě o řád vyšší. Pro běžné práce nám postačí pracovat metodou technické nivelace.

Zásady technické nivelace

a) Nivelační přístroj musí odpovídat podmínce, že střední kilometrová chyba $m_0 \leq 5 \text{ mm}$

$$(\Delta \leq 20 \cdot \sqrt{r_{km}})$$

b) Nivelační latě mohou být dřevěné nebo kovové s centimetrovou stupnicí, z jednoho kusu nebo sklápěcí či teleskopické o délce 2 – 4 m, opatřené krabicovou libelou.

- c) Nivelační podložky litinové nebo kovové s polokulovitým vrchlíkem.
- d) Délky záměr (vzdálenost latí od nivelačního přístroje) se volí s ohledem na sklonitost terénu, stav ovzduší (při vyšších teplotách se vzduch chvěje) a požadovanou přesnost. V rovinném terénu může délka sestavy dosáhnout až 120 m, ale doporučuje se aby nepřesahovala 60 m. Rozdíl v délkách záměr u jedné nivelační sestavy by neměl přesáhnout 1 – 2 m, proto lze délku záměr pouze krokovat.
- e) Maximální délka nivelačního pořadu u vloženého nivelačního pořadu je 5 km, u uzavřeného 3 km.
- f) Výšky záměr nad terénem by neměly klesnout pod 0,3 m.
- g) Polní zkouška nivelačního přístroje provádět vždy po delším transportu a každé ráno před měřením.
- h) Ověření výšek výchozího a koncového nivelačního bodu je nutno provádět **vždy** alespoň na jeden nejbližší známý nivelační bod před započítáním měření nivelačního pořadu.
- i) Mezní odchylka nivelačních pořadů technické nivelace (mezi daným a naměřeným převýšením).

$$\Delta_h = 40 \text{ mm} \cdot \sqrt{r} \quad \text{kde } r \text{ je délka nivelačního pořadu v kilometrech}$$

Výpočet mezní odchylky musí předcházet vlastnímu výpočtu nivelačního pořadu (viz příl. 4.1)

Pouze je-li splněna nerovnost

$$\Delta_h > o_h \quad \text{kde } o_h = h - h' = \text{odchylka měření}$$

h = dané převýšení počátečního
a koncového bodu nivelačního pořadu

h' = změřené převýšení počátečního
a koncového bodu nivelačního pořadu

[a] - [b]

je možno přistoupit k rovnoměrnému rozdělení oprav v nejlépe na čtení vzd.

$$v = \frac{o_h}{n} \quad n \text{ je počet čtení vzd}$$

Pozn. Opravy v zaokrouhlujeme na celé milimetry, musí však platit $[v] = o_h$. V případě, že $o_h < n$ přisoudíme opravu jen na některá čtení vzd, ale vždy rovnoměrně do celého nivelačního pořadu.

4.3.3 Přesnost nivelace

Přesnost nivelace se odvíjí od chyb, kterých se při nivelaci dopouštíme.

Chyby opět dělíme na **hrubé** a **nevyhnutelné**. Nevyhnutelné chyby na **systematické** a **nahodilé**.

Mezi **hrubé chyby** při nivelaci lze zařadit:

- opomenutí urovnání nivelačního přístroje,
- odečítání hodnoty na lati podle dálkoměrné rysky,
- posun nivelační podložky (zejména výškový),
- přehlédnutí při odečítání,
- přepis při zápisu do nivelačního zápisníku.

Těmto chybám se lze vyhnout pečlivou prací všech pracovníků a lze je snadno zjistit porovnáním mezní odchylky s odchylkou měření.

Systematické chyby při nivelaci jsou nejnebezpečnější, protože každá z nich má vždy stejné znaménko a jejich velikost může neustálým opakováním téhož měřického postupu nebezpečně růst. Patří mezi ně:

- chyba ze zanedbání rozdílu mezi zdánlivým a skutečným horizontem. Záměrná přímka urovnaného nivelačního přístroje vytváří zdánlivý horizont, který se v místě nivelační latě odklání od skutečného horizontu. Chyba se při geometrické nivelaci ze středu zcela eliminuje tím, že nivelační přístroj je uprostřed latí.
- Chyba ze svislé složky refrakce. Vzniká při nivelaci ve velmi svažitém terénu tím, že záměrný paprsek proniká různě ohřátými vrstvami vzduchu. Snížení vlivu této chyby lze dosáhnout tím, že volíme záměry více jak 30 cm nad terénem.
- Chyba z nesprávné délky laťového metru. Stupnice nivelační latě má být přesným délkovým měřítkem. Vlivem teploty a vlhkosti venkovního prostředí může dojít ke změnám délky laťového metru. U přesných nivelací se proto používá speciálních latí se stupnicí nanosenou na kovovém pásku z invarové slitiny. U metody technické nivelace nemá tato chyba na přesnost měření větší vliv.
- Chyba z nesvislé polohy nivelační latě. Při této chybě vždy získáme větší hodnotu čtení než v případě, že k chybě nedochází. Ze všech zmíněných systematických chyb je nejnebezpečnější. Narůstá s úhlem odklonu od svislice, ale i se čtením na lati. Lze ji eliminovat pečlivým stavěním nivelačních latí do svislé polohy pomocí rektifikovaných krabicových libel. V případě že není nivelační lať opatřena libelou nebo není tato libela funkční, lze ji nouzově nahradit pozvolným kýváním latí ve směru záměry (odečte se vždy nejmenší hodnota na lati).

Nahodilé chyby při nivelaci splňují kritéria Gaussovy křivky (viz obr. 2.2), jsou to:

- chyba z nepřesného urovnání nivelační libely nebo z chvění při činnosti kompenzátoru. Chybu minimalizujeme pečlivým urovnáním nivelační libely. U kompenzátorových nivelačních přístrojů vyčkáme, až se ztlumí kyv kompenzátoru. Za větrného počasí je možno chránit nivelační přístroj před poryvy větru slunečníkem.

- Chyba ze změny výšky nivelačního přístroje nebo latě. Zmenšení chyby dosáhneme pečlivým zašlapáváním noh stativu a nivelačních podložek do terénu. Nebezpečné pérování podložek na trávě, mechu, nebo jehličí odstraníme odkopnutím drnu. Rychlost a rovnoměrné tempo odečítání hodnot vzad a vpřed také tuto chybu zmenší.
- Chyba ze čtení laťové stupnice. U technické nivelace odhadujeme na centimetrové stupnici milimetry co nejpečlivěji. U přesnějších typů nivelací se pro zpřesnění čtení používá např. optických mikrometrů na stejném principu jako u přesných teodolitů (viz kap. 3.2).
- Chyba z nestejnomyšerného dělení laťové stupnice. Tuto chybu potlačíme používáním kvalitně vyrobených latí.

V případě, že jsme si vědomi jaký vliv na měření mají všechny uvedené chyby a výše zmíněnými pokyny je eliminujeme, měla by odchylka měření být bez problému menší než mezní odchylka a měření bude mít odpovídající kvalitu. Uvedená mezní odchylka $\Delta_h = 40 \text{ mm} \cdot \sqrt{r}$, bývá pro přesnější práce zpřísněna na $\Delta_h = 20 \text{ mm} \cdot \sqrt{r}$. Platí v případě ověřených připojovacích výškových bodů.

Při posuzování přesnosti nivelačních přístrojů (viz kap 4.3.1) byla zmíněna střední kilometrová chyba m_0 . Je to chyba jednotková, vyjadřující míru přesnosti měření na 1 km délky nivelačního pořadu měřeného dvakrát (TAM \times ZPĚT).

$$m_0 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{\rho^2}{r}} \quad \text{kde } \rho \text{ je rozdíl měření tam – zpět v mm}$$

r je délka nivelačního pořadu v km

Takto vypočtená m_0 (z jediného rozdílu ρ) je náhodnou veličinou a má velmi malou vypovídací schopnost pro posouzení kvality (přesnosti) provedeného měření.

Teprve vzorec,

$$m_0 = 0,5 \cdot \sqrt{\frac{1}{n_R} \left[\frac{\rho \cdot \rho}{R} \right]} \quad \text{kde } n_R \text{ je počet nivelačních oddílů,}$$

je vhodnější charakteristikou přesnosti.

Tento mezinárodní Vignalův vzorec, používaný u PN a VPN je tím vhodnější charakteristikou přesnosti, čím větší je n_R (10, 20, 40,atd.). Náhodný výběr se blíží základnímu souboru.

Carl Friedrich Gauss (1777 – 1855) se zabýval řadou témat matematiky a fyziky. V neposlední řadě také geodezií. Jeho práce měly značný vliv na rozvoj mnoha oblastí. Nejlepším důkazem jeho vážnosti v rodném Německu je desetimarková bankovka, platná do konce roku 2001, na jejímž líci je vyobrazen. Vlevo od jeho portrétu je silueta univerzity, na níž působil, a jeho křivka normálního rozdělení. Na rubu bankovky vpravo dole je zobrazena Hannoverská trigonometrická (trojúhelníková) síť, kterou C. F. Gauss vybudoval a proměřil pro následné mapování Hannoverského království. Uprostřed rubu bankovky je Gaussem zkonstruovaný přístroj, teleskop, pro zaměření této sítě. Celá bankovka je tedy naplněna geodetickou tematikou.



Zápisník vodovojných smerů, zenitových úhlů

Príjemcoví počet 1
 Prí početník:
 číslo: 2402
 MIF: SMAŽIL
 čas 23.4.02
 učiteľ: JASNO

Súčasť: 5
 2403
 2402
 2405
 2401
 2404
 2403
 2402
 2401
 2403

Stavba číslo stavby	Súčasť číslo	Vodovojné smery						(B) + (D) 2 m	
		1. stupňa prvý mna	2. stupňa prvý mna	Príčet prvý mna	(B) + (D) 2 m				
2404	740	1	0 01 80	04 90	10 8	52 20	52 40	0 00 00	
		2	200 02 00 00	00 300	52 60	00 00			
	7401	1	267 57 70	52 05	362 08	10 02	45	0 00 00	
		2	67 52 40	54 45	168 08	80	54 05		267 54 10
		3	0 02 00	01 20	100	52 00	52 30		
		4	200 02 40 00	00 300	52 60	00 00			0 00 00
7402	1	188 74 80	74 95	289 25	00	25 25	188 72 85		
	2	328 75 10	72 75	89 25	50	72 55		188 72 85	
	3	275 09 20	09 25	375 59	60	59 70			
7405	1	75 09 39	07 05	175 59	80	07 40	275 07 22		
	2	200 02 00	00 300	52 60	00 00		0 00 00		
740	1	0 04 70	04 85	106	54 30	54 50	399 99 42		
	2	200 02 00	00 300	52 60	00 00			0 00 00	
2402	2401	1	0 02 00	02 30	100	54 20	52 40	0 00 00	
		2	200 02 60	00 00	300	52 40	00 00		
2403	2403	1	20 19 66	09 67	25 30	24 68	46 35	20 19 65	
		2	19 59 00	94 45	102 47	10 94	85 20		19 59 00

Zápisník zenitových úhlů a delek

úhly : dekadových úhlů a delek

Str. : 4

Trendit
Theo 015B
v.č. 201047

Zápisník: GRYGAROVA
Výpočet: GRYGAROVA
Kontrola: SMAŽIL
Príčetník:

Výška nad mořou	Zenitový úhel		Dekadový úhel	Príčetník	Vodovojná výškovosť
	1	2			
180	0	180	180	180	180
1	80 24 30	80 20 65	180	180	180
2	3 19 80	0 01 28	-0 01 13	180	180
3	4 00 04	30 42	-0 00 65	180	180
4	4 02 15	60 102	4 59 55	180	180
5	2 97 53	70 26	+0 00 07	180	180
6	2 39 29	30 4	+0 00 05	180	180

Pro výuku predmetů GEODEZIE a ZÁKLADY GEODEZIE



Zápisník pro technickou nivelaci

Příloha 4.1

Délka sestavy (kroky)	Číslo bodu	Čtení na lati		Nadmořská výška Bpv	Místní výškový systém	Poznámka
		vzad +	vpřed -			
76	16	1735	0488	391,867		typ přístroje: NI 050 výr. číslo přístroje: 447564 měřeno dne: 23.4.2002 měřil: ROLLER
84		2446	0463			zapsal: BRLKA
92		3529	0365			vypočetl: BRLKA
130		0468	2022			viditelnost: DOBRÁ zkouška přístroje: $a_1 = 1213$ $a_2 = 1176$ $b_1 = 1924$ $b_2 = 1888$ $h_1 = 0711$ $h_2 = 0712$ $h_1 - h_2 = -1\text{mm}$
82		0792	2205			
96		0260	2206			
78		0183	2620			
104		0263	2410			
68	17	0667	0750	388,612		
Σ 810		Σ 10343	13589			$h = -3,255\text{m}$ $h' = -3,246\text{m}$ $\sigma_h = h - h' = -9\text{mm}$ $\Delta_h = 40\text{mm} \cdot \sqrt{r}$ [mm] $r = 810\text{ kroků} = 0,607\text{km}$ $\Delta_h = 31\text{mm}$ $\Delta_h > \sigma_h$
60	17	1837	2157	388,612		
94		1945	1482			
48		3181	2121	389,819		
106		1791	3442			
82		0312	1784			
78	2402	0484	0122	387,063		
104		1465	1137			
68		2173	2105			
92		1567	2241			
74		2784	1865			$h = 0,000\text{m}$ $h' = -0,018\text{m}$ $\sigma_h = h - h' = +18\text{mm}$ $\Delta_h = 40\text{mm} \cdot \sqrt{r}$ [mm] $r = 868\text{ kroků} = 0,651\text{km}$ $\Delta_h = 32\text{mm}$ $\Delta_h > \sigma_h$
62	17	1175	0276	388,612		
Σ 868		Σ 18714	18732			



Pro výuku předmětů GEODEZIE a ZÁKLADY GEODEZIE