



**Lesnická
a dřevařská
fakulta**

**Geodézie
Přednáška**

**Měření úhlů
Přístroje pro měření úhlů
Přesnost a chyby při měření úhlů**

Mendelova
univerzita
v Brně



- ❑ úhly jsou pro geodézii jednou ze základních veličin a jejich měření představuje základ pro jakékoliv měřické práce
- ❑ prostorovou polohu směru, vycházejícího z počátku soustavy S na libovolný bod v terénu P, je možno stanovit dvěma úhly:
 - vodorovným (horizontálním) ω
 - svislým (vertikálním) ε , z

Vodorovný úhel

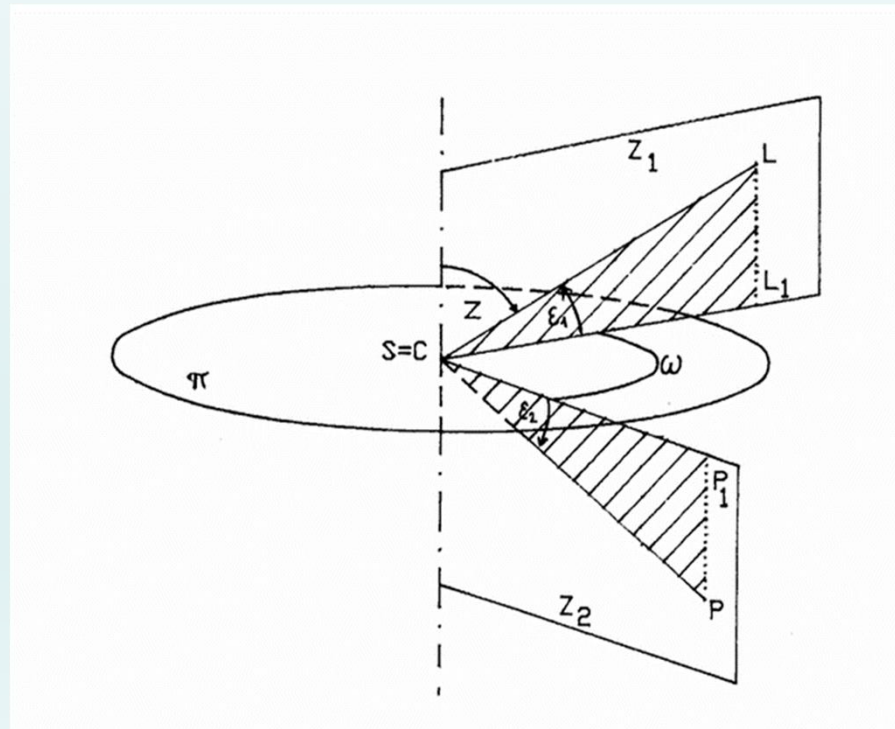
- určen dvěma svislými rovinami proloženými stanoviskem přístroje (vrchol úhlu) a signály (cílovými značkami) označujícími směr levého (L) a pravého (P) ramene úhlu
- je dán rozdílem úhlových hodnot dvou měřených směrů

Vodorovný směr

- je základním prvkem pro měření úhlů
- úhlová hodnota výsledného čtení od počátku kruhu, tj. od nuly vodorovné stupnice

Svislý úhel

- vyjadřuje odchylku směrů SP a SL (stanovisko-cílový bod) od:
 - vodorovné roviny - výškový úhel ε_1
hloubkový úhel ε_2
 - od svislice, zenitu - zenitová vzdálenost z



- ❑ na jednom bodě stanoviška můžeme měřit jeden a více úhlů, tj. dva a více směrů → osnova měřených směrů

osnova směrů – soubor všech vodorovných směrů na jednom stanovisku, který je obvykle měřen současně

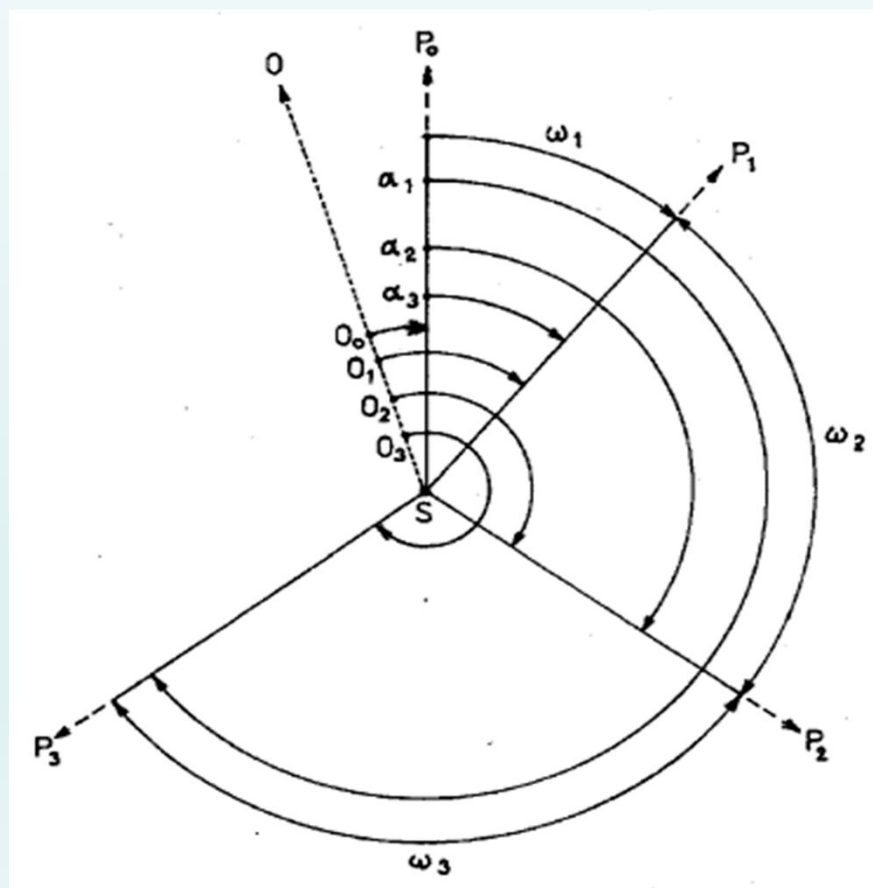
- ❑ pokud je osnova měřených směrů orientovaná k jednomu směru jako základnímu → orientovaná osnova směrů

základní (nulový) směr – směr na který je orientována celá osnova vodorovných směrů měřených na stanovisku, je na něj nastavována úhlová hodnota blížící se 0°

- ❑ v geodézii používáme několika druhů orientovaných směrníků
- ❑ jsou pojmenovány podle základního směru od něhož se počítají:
 - jižník – kladný směr osy X k jihu
 - severník – kladný směr osy X k severu
 - astronomický azimut – absolutní směr k severu (směr zeměpisného poledníku)
 - magnetický azimut – směr k magnetickému severnímu pólu (směr magnetického poledníku)

vrcholový úhel ω – vodorovný úhel, který svírají dva paprsky, směřující ze stanoviska na cílové body

směrové úhly α – vodorovné směry měřené od základního směru P_0 k paprskům na měřené body



❑ využití k měření a vytyčování vodorovných a svislých úhlů

❑ dělíme je na:

➤ teodolity

➤ magnetické úhломěrné přístroje

➤ gyroteodolity

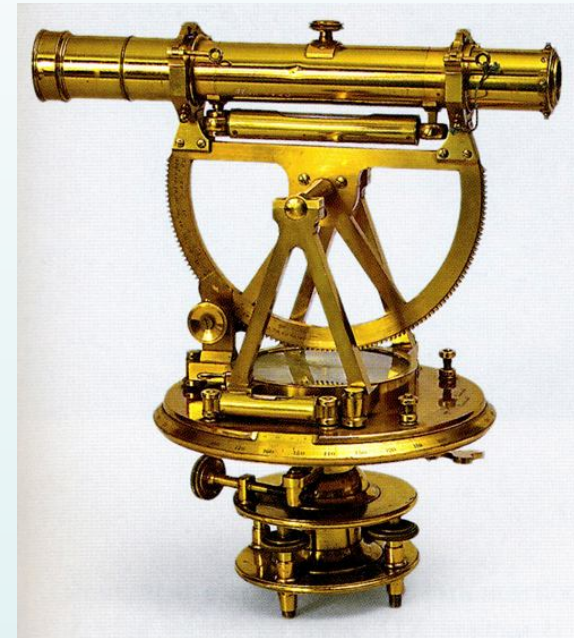
➤ elektronické tachymetry - totální stanice

❑ první teodolit sestrojil v r. 1720 mechanik Jonathan Sisson

❑ mechanické teodolity se stále zdokonalovaly a vyráběly se ve většině průmyslově vyspělých zemí

❑ v první pol. 20. století v Čechách prosluly především teodolity firmy Josef a Jan Frič Praha (později Meopta) – první teodolit se skleněným kruhem

❑ v zahraničí mezi nejznámější výrobce patří firmy Wild, Kern, Leica (Švýcarsko), Trimble, Spectra Precision (USA), Zeiss (Německo), Sokkia, Topcon, Nikon, Pentax (Japonsko), MOM (Maďarsko), South (Čína)



teodolit z první poloviny 19. století

Teodolity

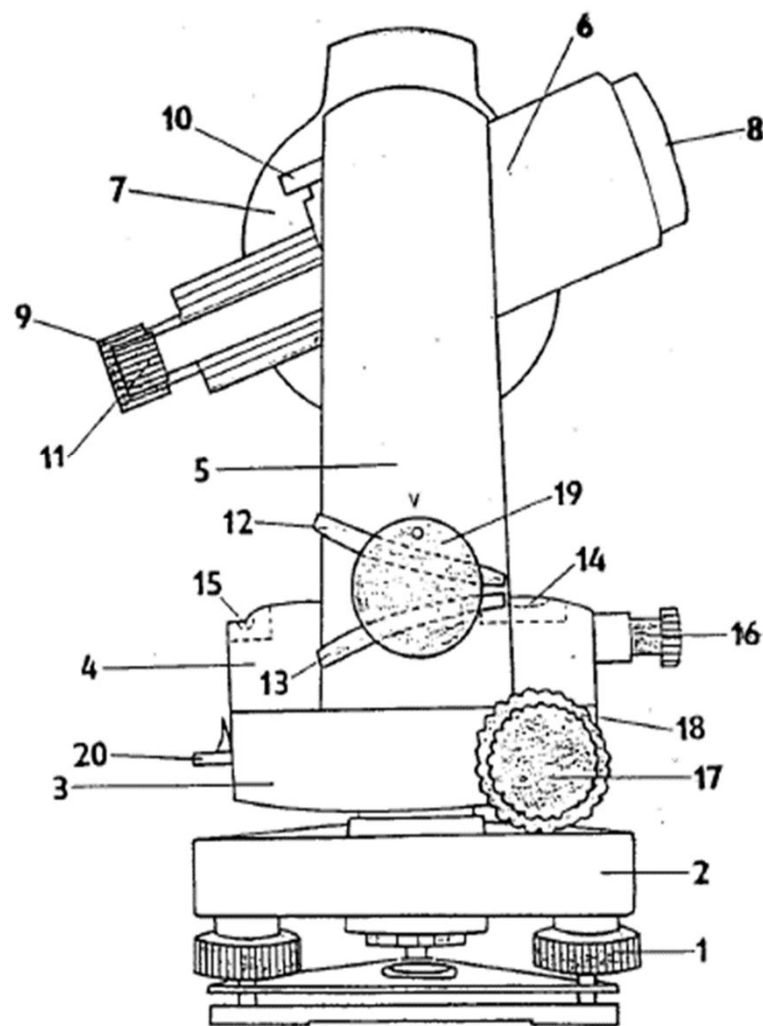
- ❑ slouží k určení libovolně velkého úhlu, a to jak v rovině vodorovné, tak svislé
- ❑ v principu jsou sestaveny ze tří částí:
 - **trojnožka** se třemi stavěcími šrouby – slouží k horizontaci přístroje
 - otvor se závitem ve spodní části trojnožky umožňuje pevné spojení teodolitu se stativem, na který se teodolit připevňuje pomocí středního šroubu v hlavě stativu
 - **limbus** – pevná spodní část teodolitu (nese vodorovný kruh s úhломěrnou stupnicí pro měření vodorovných úhlů)
 - **alhidáda** – horní otočná část teodolitu

Teodolit

- 1 stavěcí šroub
- 2 trojnožka
- 3 vodorovný kruh (limbus)
- 4 alhidáda
- 5 dalekohledová vidlice
- 6 dalekohled
- 7 svislý kruh
- 8 objektiv
- 9 okulár
- 10 hledáček dalekohledu

- 11 odečítací mikroskop
- 12 hrubá ustanovka svislého kruhu
- 13 hrubá ustanovka vodorovného kruhu
- 14 alhidádová libela trubcová
- 15 alhidádová libela krabicová
- 16 optický centrovač (dostřed'ovač)
- 17 jemná ustanovka vodorovného kruhu
- 18 jemná ustanovka svislého kruhu
- 19 vypínač obrazu svislého kruhu
- 20 repetiční svora (sepne limbus s alhidádou)

SCHÉMA REPETIČNÍHO TEODOLITU Theo 020A



Rozdělení teodolitů

1. Podle konstrukce

- **mechanické** (jednoosé) – kovové kruhy, čtecí pomůcky úhloměrných stupnic jsou verniery, šedesátinné čtení, do pol. 20 století
- **optické** – obrazy dvou diametrálních míst stupnice jsou pomocí čoček a hranolů převedeny do jediného zorného pole mikroskopu, skleněné kruhy, čtecími pomůckami jsou:
 - stupnicový mikroskop (mřížka)
 - jednoduchý optický mikrometr (indexový)
 - koincidenční mikroskop s optickým mikrometrem

repetiční (dvojosé) - limbus otočný kolem svislé osy, při otáčení alhidády dochází k mírnému posunutí limbu (chyba ze strhávání limbu)

- vhodným řešením teodolity s limbovou (repetiční) svorou - spíná limbový kruh s alhidádou
- při vypnutí zůstává limbus pevný, otáčí se pouze alhidáda
- mají dva páry ustanovek (alhidádové a limbové)
- tato konstrukce se uplatňuje u teodolitů s nižší a střední přesností

s kruhem na postrk (jednoosé) – samostatná limbová osa

- při otáčení nedochází ke strhávání limbu
 - mají jeden pár alhidádových ustanovek
 - limbem je možno otáčet pomocí pastorku zcela nezávisle na alhidádě
 - pastorek je chráněn proti nežádoucímu pootočení krytkou nebo pojistkou
 - nastavení požadované úhlové hodnoty do příslušného směru:
“zacílení do směru → utažení hrubé ustanovky vodorovného kruhu
→ na mikrometru nastavíme jemné čtení mikrometrickým šroubem
→ pastorkem nastavíme hrubou úhlovou hodnotu”
 - tato konstrukce se uplatňuje u přesných a velmi přesných teodolitů
- **elektronické** – pomůckou pro odečítání měřených údajů je displej s elektronickým čtecím systémem

2. Podle způsobu čtení

- **vizuální čtení**
- **registrační čtení**

3. Podle přesnosti měření

- **nižší přesnost** – střední chyba úhlu $m_{\omega} = 80^{\text{cc}}$ (Theo 080)
- **střední přesnost** – střední chyba úhlu $m_{\omega} = 20^{\text{cc}}$ (Theo 020A)
- **přesné** – střední chyba úhlu $m_{\omega} = 06^{\text{cc}}$ (Theo 010A)
- **velmi přesné** (triangulační) – střední chyba úhlu $m_{\omega} = 01^{\text{cc}}$ až 02^{cc} (Wild T3)

Dalekohled

- ❑ nasazen na dalekohledové vidlici na alhidádě
- ❑ slouží přístroji jako dokonalá záměrná pomůcka
- ❑ starší typy přístrojů používaly Keplerův astronomický dalekohled (dvě spojné čočky, zvětšený a převrácený obraz)
- ❑ v současnosti se konstruují dalekohledy rovněž na principu Keplerova astronomického dalekohledu, ale s úpravou, která umožňuje získat vzpřímený a zvětšený obraz (rozptylná čočka s vnitřním zaostřováním)
- ❑ je soustavou dvou optických systémů na společné optické ose:
 - **objektiv** – dvě nebo tři čočky pro potlačení vad čoček (sférické, chromatické, astigmatismus, koma)
 - **okulár** (složitá soustava mnoha typů)
- ❑ podle způsobu zaostřování dalekohledy dělíme na:
 - **s proměnlivou délkou** (obraz zaostřujeme změnou vzdálenosti okuláru od objektivu, starší typy dalekohledů)
 - **s pevnou délkou** (objektiv i okulár jsou uloženy v tubusu dalekohledu tak, aby se obraz v obrazové rovině objektivu dal zvětšit okulárem)

- ❑ dalekohled je opatřen **záměrným (nitkovým) křížem**
 - ve starých dalekohledech to byla pavoučí vlákna (odtud nitkový)
 - v současnosti je leptán nebo ryt na skleněnou destičku
- ❑ zvětšení dalekohledu bývá 25 až 30 ti násobné
- ❑ velikost zorného pole je malá (1° až 3°), proto se při cílení používá **hledáček (kolimátor)**
 - záměrná pomůcka pro přibližné zacílení
 - značka vyříznutá na tmavém pozadí zakrývajícím průsvitné sklo
 - tato značka se promítá rovnoběžnými paprsky při pozorování do nekonečna
 - oko zaostřené na vzdálený cíl vidí stejně ostře i značku

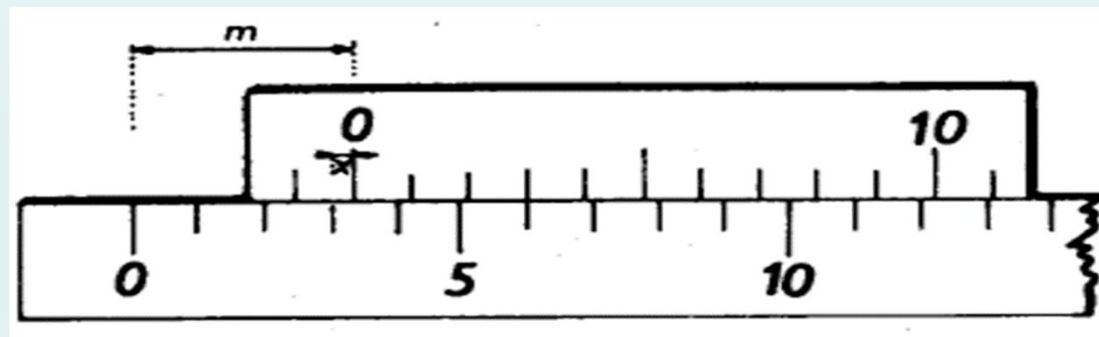
Libely

- ❑ pomůcka k určování vodorovného směru (horizontace)
- ❑ na alhidádě jsou většinou umístěny dvě libely (alhidádové)
 - **krabicová** – k předběžnému (hrubému) urovnání
 - je tvořena nádobkou kruhového tvaru, která je naplněna kapalinou s nízkým bodem tuhnutí, malou přilnavostí ke sklu a rychlým vypařováním (éter, sirouhlík nebo líh)
 - **trubicová** – pro přesné urovnání (citlivá libela)
 - trubička z křemičito-draselného skla, která je uvnitř vybroušena tak, aby podélný řez byl kružnicový oblouk
 - naplněna stejnou kapalinou jako krabicová
- ❑ další libely: **křížová** – dvě trubicové libely s osami k sobě kolmými
- indexová** – k urovnání spojnice čtecích indexů svislého kruhu do vodorovné polohy (nejcitlivější)
- nivelační** – u některých teodolitů je na dalekohledu, osa je rovnoběžná se záměrnou přímkou
- sázecí** – slouží k určení sklonu vodorovné osy dalekohledu

Odečítací pomůcky

1.vernier (nonius) - pomůcka často používaná k odměřování zbytků (úhlových i délkových)

- na starých typech teodolitů
- zpravidla se používal vernier stejnosměrný, při němž číslování pomocného měřítka postupuje stejným směrem jako číslování měřítka hlavního
- pomocí vernieru dokážeme odečíst přesně desetinu dílku hlavního měřítka

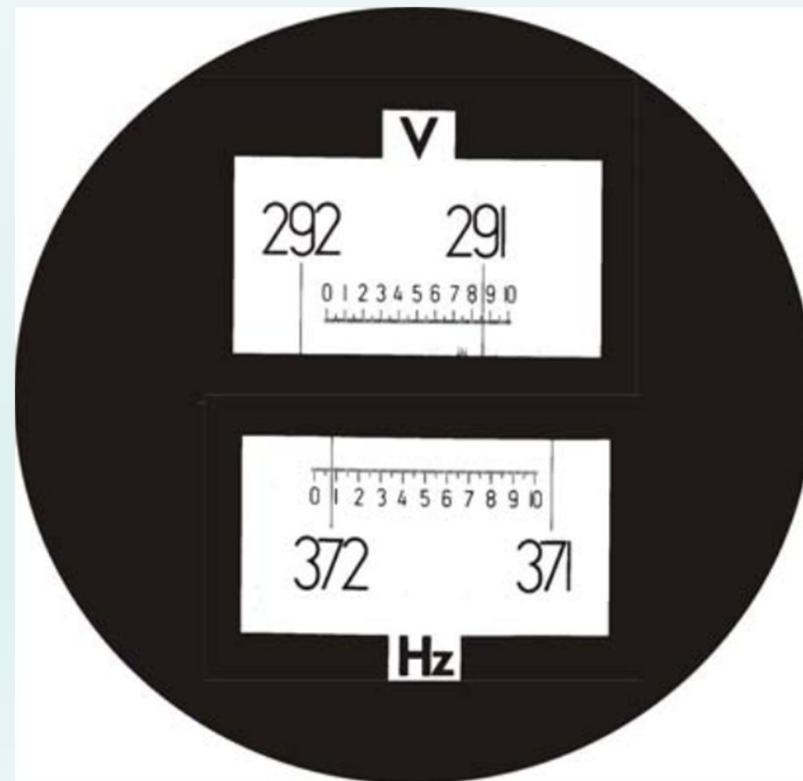


$$m = 3,3$$

- 2. stupnicový mikroskop (mřížka)** - nejčastěji používanou odečítací pomůckou u technických teodolitů, např. Zeiss Theo 020A
- skleněná destička, vsazená do roviny obrazu, na které je vyryta pomocná stupnice, jež se promítá na obraz úhломěrného kruhu a umožňuje načtení nejmenšího dílku
 - délka stupnice je stejná jako vzdálenost nejmenšího dílku úhломěrného kruhu

291,86^g

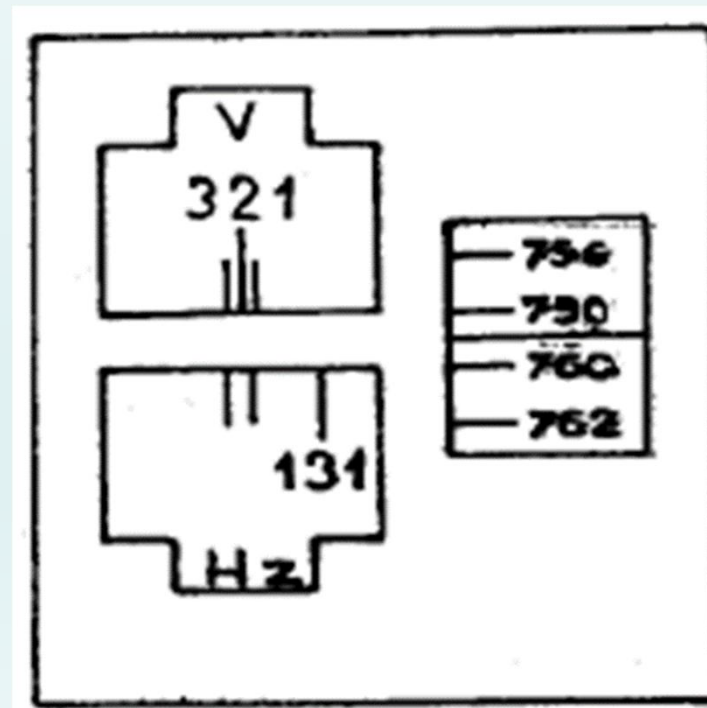
372,08^g



3. jednoduchý indexový mikrometr - použití u přesných teodolitů, např. Zeiss Theo 020A

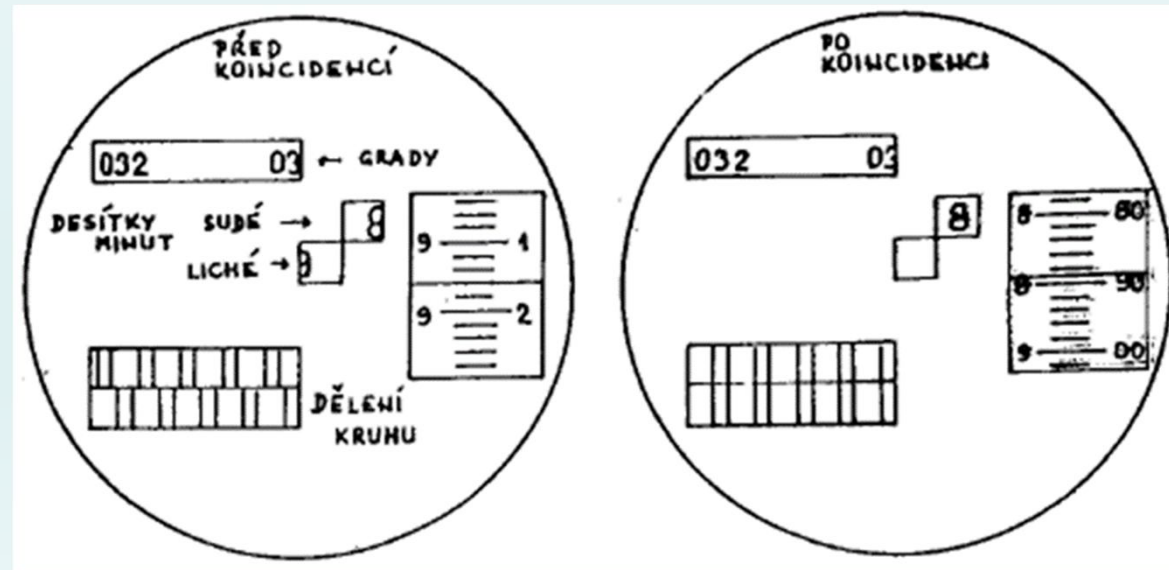
- využívá pro odečítání vždy jedno místo vodorovného nebo svislého kruhu, v mikroskopu se objeví tři stupnice
- otáčením koincidenčního šroubu se snažíme umístit mezi pevnou dvojryску uprostřed stupnice obraz celého dílku stupnice
- umožní odečítání až na $0,001^g$ (1 miligon) a je tak desetkrát přesnější než mřížka

321,759^g

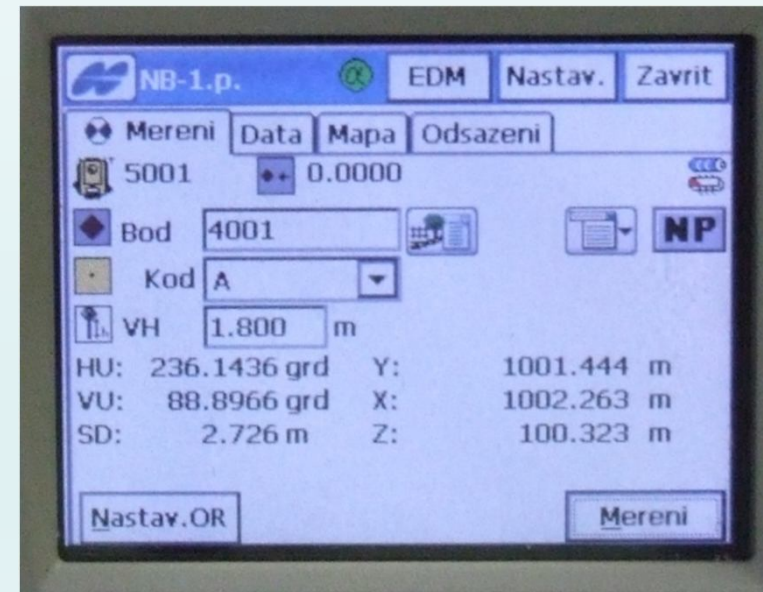


- 4. optický koincidenční mikrometr** - použití u velmi přesných teodolitů, např. Zeiss Theo 010A
- využívá pro odečítání vždy dva protilehlé úseky vodorovného nebo svislého kruhu
 - pomocí otáčení koincidenčního šroubu umísíme dvojrysky přesně proti sobě a přečteme výslednou hodnotu pomocí tří okének
 - horní – celé gony
 - prostřední – desetiny
 - pravé (jemné čtení) – setiny, tisíciny a desetitisíciny

32,8889g



- 5. elektronické čtecí systémy** - jsou zabudovány v elektronických teodolitech a tachymetrech, a rovněž v universálních měřických stanicích (totální stanice)
- údaj měřené veličiny (úhel, délka) získáme přímo v digitální formě
 - tyto údaje čteme na displeji přístroje, případně je registrujeme pomocí vnitřní paměti přístroje



Ustanovky

- ❑ pomůcka ke spojení pohyblivé části přístroje s částí pevnou
- ❑ zamezí tak její hrubý pohyb a zároveň umožní pohyb jemný, nezbytný pro přesné zacílení
- ❑ na teodolitu jsou umístěny dva páry ustanovek
 - podle druhu pohybu
 - **hrubé**
 - **jemné**
 - podle směru, který omezují
 - **horizontální** - ustanovky vodorovného kruhu)
 - **vertikální** - ustanovky svislého kruhu)
 - podle provedení
 - **obvodové** – v současnosti se již nepoužívají
 - **osové** – tlak, kterým se spojí pohyblivá část s pevnou působí kolmo na osu otáčení (svorné, tlačné, souosé)

Optický centrovač

- moderní teodolity ho mají již zabudovaný
- jedná se v podstatě o malý dalekohled s optickou osou zalomenou do pravého úhlu
- umožní dostředit teodolit nad stanoviskem přesněji než při použití olovnice
- funkční je pouze při správně horizontovaném přístroji

Příslušenství

Hranoly pro strmé záměry

Sluneční filtry

Clona na dalekohled

- ❑ svislá osa přístroje (teodolitu) musí procházet daným bodem vyznačeným v terénu (kámen, kolík, hřeb) → měřený úhel bude skutečně vodorovný (svislý)
- ❑ docílíme toho urovnáním přístroje, které sestává ze dvou dílčích činností:
 - **horizontce** – provádí se stavěcími šrouby pomocí alhidádových libel, vertikální osa přístroje se uvede do svislé polohy
 - **centrace** (dostředění) – provádí se olovníci nebo optickým centovačem, vrchol měřeného úhlu se ztotožní s daným bodem

- ❑ při měření vodorovných úhlů musíme přihlížet k požadované přesnosti
- ❑ zvyšování přesnosti = prodlužování doby měření = zvyšování nákladů na měření
- ❑ volíme tedy takovou metodu, která při dodržení požadované přesnosti bude vyžadovat nejkratší čas na měření = efektivita
- ❑ používáme tyto metody:
 - jednoduché měření úhlů (zatíženo řadou chyb)
 - měření úhlů v obou polohách dalekohledu
 - měření úhlů násobením – repeticí
 - měření úhlů v řadách a skupinách (nejčastěji používaná metoda měření úhlů v praxi)
 - měření úhlů v laboratorních jednotkách (pro velmi přesná měření)

- ❑ je třeba vycházet ze skutečnosti, že vyrobené přístroje ani smysly člověka nejsou dokonalé
- ❑ proto při měření dochází nevyhnutelně k chybám
- ❑ znalost příčin vzniku a jejich vlivu na výsledek = jejich vyloučení, případně snížení pomocí vhodné metody

Chyby hrubé – jsou při měření snadno odhalitelné, vyloučení opakovaným měřením

- omyl ve čtení
- zacílení na jiný bod
- hrubé stržení vodorovného kruhu
- zakopnutí nebo opření o stativ
- měření při neutaženém svěrném šroubu trojnožky

Chyby nevyhnutelné – vznikají při měřickém procesu a v důsledku přístrojových chyb, většinu přístrojových chyb vyloučíme správnými technologiemi měření úhlů

- **systematické** – vzniklé nedokonalostí výroby, nejsou dodrženy (splněny) ošové podmínky
- **nahodilé** – chyba z nesprávného odečítání úhlových hodnot
 - chyba z centrace a horizontace přístroje
 - chyba z cílení

Chyby vnější – způsobené vlivem prostředí ve kterém měříme (teplota, tlak, povětrnostní podmínky, atd.)

Osové podmínky

- ❑ požadavek, aby se záměry na libovolné body promítaly svisle do horizontální roviny vodorovného kruhu je splněn pouze u přístroje zbaveného osových chyb
- ❑ vznikají z nesprávné polohy hlavních os teodolitu
- ❑ přístroj má čtyři hlavní osy:
 - svislá točná osa alhidády **V**
 - vodorovná točná osa dalekohledu **H** (rovnoběžná s osou libely **L**)
 - záměrná osa dalekohledu **Z**
 - osa alhidádové libely **L**
- ❑ měření úhlů je správné, pokud jsou splněny následující podmínky:
$$V \perp L \quad H \perp V \quad Z \perp H$$
- ❑ kontrola podmínek se provádí v odborném servisu (nelze zajistit absolutně přesné nastavení)
- ❑ měřič může provádět pouze rektifikaci libely ($V \perp L$)
- ❑ úplná eliminace $H \perp V$, $Z \perp H$ lze provést měřením v obou polohách

Další chyby

- exentricita dalekohledu (točná osa alhidády neleží v záměrné rovině)
- exentricita alhidády (točná osa alhidády neprochází středem děleného kruhu)
- nesymetrická poloha nulových značek odečítacího zařízení (indexů)
- nerovnoměrné dělení kruhů

Rozbor přesnosti

Při chybě úhlu $\delta = 0,01^g$ a délce jeho ramen 100 m činí směrový posun $s_p = 0,0157$ m. Při stejně velké chybě úhlu $\delta = 0,01^g$ a délce jeho ramen 1000 m je směrový posun $s_p = 0,157$ m (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.

Magnetické přístroje

- ❑ jeden ze způsobů měření vodorovných úhlů je založen na využití zemského magnetizmu - Země (permanentní magnet) vytváří magnetické pole, jehož působením hrot magnetky vždy směřuje k severnímu magnetickému pólu
- ❑ tento směr se nazývá magnetický meridián a stává se základním směrem pro měření magnetických azimutů

Magnetický meridián S_M

průsečnice svislé roviny proložené osou ustálené deklinační magnetky se zemským povrchem

Magnetický azimut A_M

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 meridián S_A

průsečnice svislé roviny směřující k astronomickému severu se zemským povrchem

Astronomický azimut A_A

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

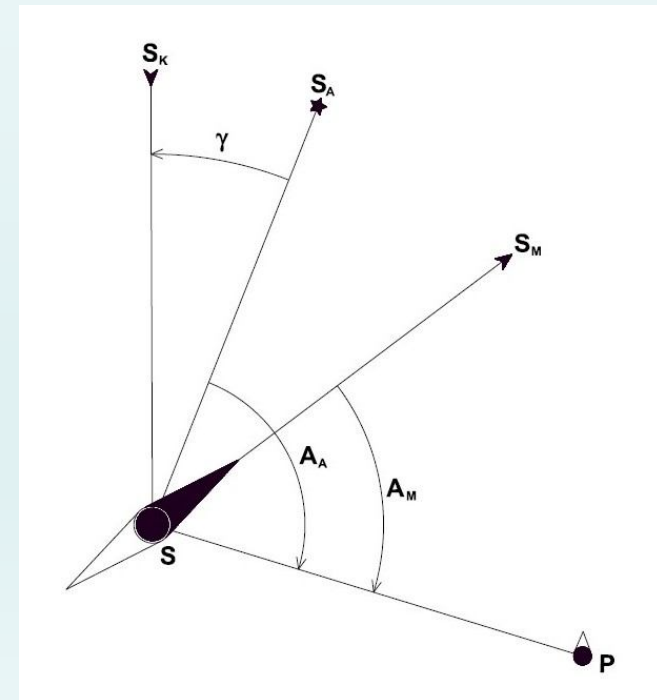
Meridiánová konvergence γ

úhel mezi obrazem místního poledníku (směr k S_A) a rovnoběžkou s osou X (směr k S_K – sever kartografický nebo také sever kilometrové sítě)

- velikost závisí na zeměpisné délce, zeměpisné šířce a druhu zobrazení
- hodnoty rostou směrem V-Z
- v západní části ČR v systému JTSK dosahuje hodnoty až 10°

Výpočet konvergence

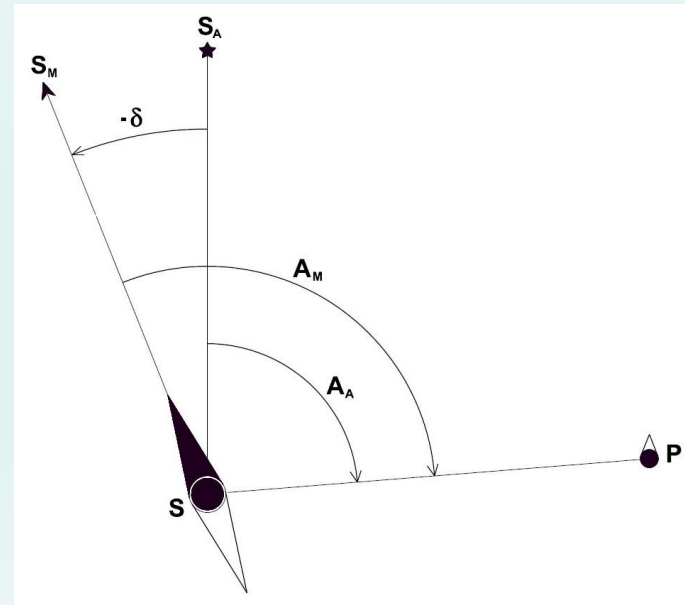
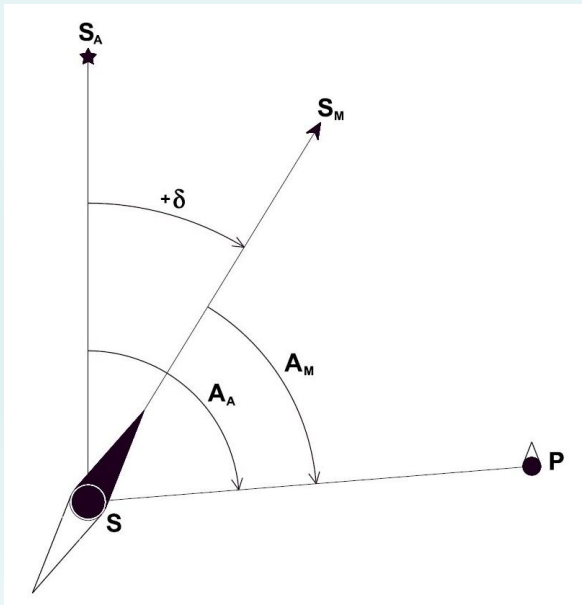
$$\gamma = 0,008257 \cdot Y + 2,373 \cdot \frac{Y}{X} \text{ (km)}$$



Magnetická deklinace δ

úhlový rozdíl mezi směry astronomického meridiánu (S_A) a magnetického meridiánu (S_M) v místě pozorování

- může být západní (záporná) nebo východní (kladná)
- astronomický meridián má stálou polohu, mění se pouze směr magnetického meridiánu
- v důsledku toho se mění i magnetická deklinace
- změny probíhají se změnou místa a času (pravidelné a nepravidelné)



- ❑ magnetické přístroje mají vodorovný kruh pevně spojen se záměrným zařízením a je tedy otočný
- ❑ přímé měření - odečtení polohy záměrné roviny umožňují pevné hroty deklinační magnetky
- ❑ nepřímé měření - magnetické azimuty se odečítají nebo odvozují z odečtených hodnot na limbu
- ❑ podle typu dělíme magnetické přístroje na kompasy, buzoly a buzolní teodolity

Kompas – jedná se o zasklené pouzdro s děleným kruhem a deklinační magnetkou, používá se jako pomůcka k orientaci, v dolech dosáhl velkého upotřebení hornický kompas (jednoduchost - zavěšení na provazci)

Buzola – kompas doplněný záměrným zařízením (orientační, vynášecí, lesní), nejdokonalejším typem buzoly je Wildova buzola T_0 , magnetka spojena s děleným kruhem, koincidenční čtení, doplněna svislým kruhem

Buzolní teodolit – universální teodolit doplněný celokruhovou buzolou nebo buzolním trubicovým usměrňovačem

Magnetické přístroje



Gyroteodolity

- přístroje sloužící k určení směru místního poledníku
- hlavní součástí je setrvačnickový kompas (gyrokompas)
- setrvačník upraven tak, že jeho osa se může volně pohybovat pouze ve vodorovné rovině
- vlivem zemské rotace se osa roztočeného setrvačnicku stáčí do směru místního poledníku, kolem něhož se kývá
- z krajních poloh kývajících se osy setrvačnicku určíme směr astronomického poledníku
- hlavní využití je při usměrnění (orientaci) trigonometrické sítě (určení astronomických azimutů na základních bodech)
- další oblastí využití je v důlním zeměměřičství (určení deklinace a orientace polygonové sítě v podzemních prostorách)
- mnohem větší přesnost než buzola (asi 7")
- přístroje Gi - B1, B2 (MOM - Maďarsko), Gi - C11 (gyroskopický nástavec), Gyromat 3000, 5000 (Leica)

Gyroteodolity



Gi-C11



Gi-B2



Gyromat 3000

Totální stanice

- ❑ registrační elektronický teodolit kombinovaný s elektrooptickým dálkoměrem (dosah až 5 000 m)
- ❑ umožňuje zápis bodů do vnitřní paměti (nebo na kartu)
- ❑ pomocí měřených zenitových vzdáleností automaticky převádí šikmé vzdálenosti na vzdálenosti vodorovné
- ❑ u novějších typů možnost bezhranolového měření (až 2 000 m)
- ❑ mnoho výpočetních programů
- ❑ v současnosti existuje řada modifikací pro různé využití:
 - vytyčovací paprsky
 - automatické vyhledávání cíle - servo
 - kombinované měření s GPS
 - vytváření mapy přímo v terénu apod.

Totální stanice



Topcon GPT-9000M



Trimble M3

Totální stanice



Leica



Nikon



Sokkia

Totální stanice



Pentax



Geomax



South

**Děkuji za pozornost
Ing. Miloš Cibulka, Ph.D.**

**Ústav hospodářské úpravy lesů a aplikované geoinformatiky
Lesnická a dřevařská fakulta
uhulag.mendelu.cz
tel.: 545 134 015**