

GEODÉZIE 1

1. Úvod do geodézie

1.1. Geodézie ve vazbě ostatních geověd

1.2. Úkoly a dělení geodézie

1.3. Dějiny geodézie

1.3.1. Starověk

1.3.2. Středověk

1.3.3. Novověk

2. Tvar zemského tělesa a referenční plochy

2.1. Vliv zakřivení Země na měřené veličiny

2.1.1. Redukce délek

2.1.2. Rozdíly v úhlech

2.1.3. Rozdíly ve výškách

2.2. Způsoby sběru geodetických informací

2.2.1. Aproximace reliéfu, morfologické plochy

2.2.2. Prostorová lokalizace bodů

2.2.3. Způsoby zpracování měření

2.3. Souřadnicové systémy

2.3.1. Souřadnicové systémy stabilního katastru

2.3.2. Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

2.3.3. Souřadnicový systém S-42

2.3.4. Souřadnicový systém WGS 84

3. Geodetické základy

3.1. Budování klasických polohových bodových polí

3.1.1. Projekt budování polohových bodových polí

3.1.2. Stabilizace bodů

3.1.3. Signalizace bodů

3.1.4. Označování bodů

3.2. Modernizace geodetických základů v ČR

3.2.1. Kampaň EUREF-CS/H-91

3.2.2. Referenční GPS síť nultého řádu (NULRAD)

3.2.3. Referenční GPS síť DOPNUL

3.2.4. Zhuštění sítě DOPNUL

3.3. Aktivní polohové systémy

4. Geodetické přístroje

4.1. Proces měření

4.2. Základní charakteristiky a vlastnosti geodetických přístrojů

4.3. Základní součásti geodetických přístrojů

4.3.1. Mechanické součásti přístrojů

Šrouby, ustanovky, nosná zařízení a čepy.

4.3.2. Optické součásti přístrojů

Zrcadla, hranoly, planparalelní deska a čočky.

4.3.3. Jednoduché optické přístroje

Oko, lupa, mikroskop a dalekohled.

4.3.4. Odečítací pomůcky geodetických přístrojů

Index, vernier, mřížka, optický mikrometr, elektronické odečítací systémy.

4.3.5. Příslušenství geodetických přístrojů

Pomůcky pro stanovení vodorovného a svislého směru.

4.4. Teodolit

4.4.1. Dělení teodolitů podle konstrukce

4.4.2. Dělení teodolitů podle přesnosti

4.5. Zkoušky a rektifikace teodolitů

5. Měření úhlů

5.1. Určování úhlů konstantní velikosti

5.2. Určování úhlů libovolné velikosti

5.2.1. Měření vodorovných úhlů

5.2.1.1. Příprava teodolitu na stanovisku

5.2.1.2. Metody měření vodorovných úhlů

5.2.1.3. Analýza chyb při měření vodorovných úhlů

5.2.1.4. Rozbor přesnosti měření vodorovných směrů a úhlů

5.2.1.5. Centrace měřených vodorovných směrů

5.2.2. Magnetické azimuty

5.2.3. Astronomické azimuty

5.2.4. Měření svislých úhlů

5.2.4.1. Metody měření svislých úhlů

5.2.4.2. Analýza chyb při měření svislých úhlů

5.2.4.3. Rozbor přesnosti měření svislých úhlů

6. Měření délek

6.1. Metody přímého měření délek

- 6.1.1. Měření délek pásmem**
- 6.1.2. Velmi přesné měření délek invarovými dráty**
- 6.1.3. Měřické latě**

6.2. Metody nepřímého měření délek

- 6.2.1. Trigonometrické určování délek**
- 6.2.2. Optické měření délek**
 - 6.2.2.1. Paralaktické určování délek**
 - 6.2.2.2. Nitkové dálkoměry**
 - 6.2.2.3. Dvojobrazové dálkoměry**
 - 6.2.2.4. Diagramové dálkoměry**
- 6.2.3. Fyzikální dálkoměry**
- 6.2.4. Elektronické dálkoměry**
 - 6.2.4.1. Šíření elektromagnetického záření v prostoru**
 - 6.2.4.2. Modulace elektromagnetických vln**
 - 6.2.4.3. Metody elektromagnetického měření délek**
 - 6.2.4.4. Světelné dálkoměry**
 - 6.2.4.5. Radiové dálkoměry**
 - 6.2.4.6. Přesnost elektronických dálkoměrů**

6.3. Redukce měřených délek

6.3.1. Převod na referenční plochu

6.3.2. Převod do zobrazovací roviny

6.3.3. Topografická redukce

6.4. Elektronické tachymetry

7. Souřadnicové výpočty v rovině

7.1. Základní vlastnosti

7.2. Základní geodetické úlohy

7.2.1. 1. geodetická úloha

7.2.2. 2. geodetická úloha

7.3. Metody protínání

7.3.1. Protínání vpřed z úhlů

7.3.2. Protínání vpřed ze směrů

7.3.3. Protínání vpřed z délek

7.3.4. Protínání zpět

7.3.5. Určení nepřístupné vzdálenosti

7.4. Polygonové pořady

7.4.1. Volný polygonový pořad

7.4.2. Uzavřený polygonový pořad

7.4.3. Vetknutý polygonový pořad

7.4.4. Polygonový pořad oboustranně připojený a jednostranně orientovaný

7.4.5. Polygonový pořad oboustranně polohově připojený a oboustranně orientovaný

7.4.6. Nepřímo připojený polygonový pořad

7.5. Metody výpočtu souřadnic podrobných bodů

7.5.1. Polární metoda

7.5.2. Ortogonální metoda

1. Úvod do geodézie

1.1 Geodézie ve vazbě ostatních geověd

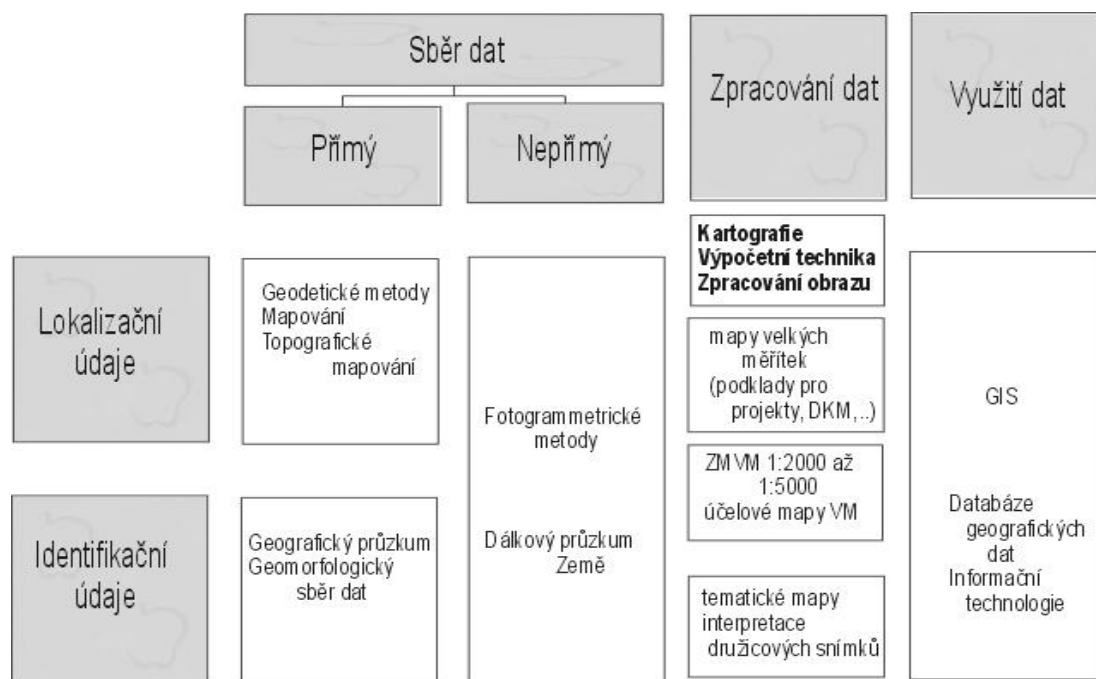
Geodézie je zařazována do oblasti geověd - věd o Zemi. Patří mezi nejstarší vědní obory, má svůj původ v antické vzdělanosti.

Geodézie je vědecký a technický obor, který pomocí geometrických a fyzikálních metod získává údaje metrického a fyzikálního charakteru o Zemi či jejích částech a zjišťuje geometrické údaje pro tvorbu map a pro potřeby jiných oborů [58.]. Slovo geodézie má řecký původ a je složeninou dvou slov: geo --- Země a daisia --- dělení. V Aristotelových spisech (384-322 př.n.l.) termín geodézie označoval rozměrování a rozdělování pozemků k zemědělskému obdělávání.

Geodézie má vazby na celou řadu vědních oborů a technických disciplín [58.]:

- **geomatika** --- vědecký a technický interdisciplinární obor, zabývající se získáváním, ukládáním, integrací, analýzou, interpretací, distribucí a užíváním geografických dat (geodat) a geografických informací (geoinformací) pro potřeby rozhodování, plánování a správy zdrojů. Geomatika zahrnuje obory jako jsou: geodézie, kartografie, dálkový průzkum Země, fotogrammetrie, mapování a geografické informační systémy.
- **geoinformatika** --- interdisciplinární oblast poznání na styku geografie, kartografie a informatiky, která zkoumá přírodní a socioekonomické geosystémy (jejich strukturu, vztahy, dynamiku a pod.) pomocí modelování.
- **mapování** --- soubor činností konaných pro vyhotovení původní mapy.
- **zeměměřictví** --- souhrn geodetických a kartografických činností včetně technických činností v katastru nemovitostí.
- **kartografie** --- vědecký a technický obor zabývající se zobrazením Země, kosmu, kosmických těles a jejich částí, objektů a jevů na nich a jejich vztahů s cílem sdělování těchto informací prostřednictvím kartografických děl.
- **fotogrammetrie** --- vědecký a technický obor zabývající se přesným měřením na měřických snímcích za účelem rekonstrukce tvaru, rozměrů a polohy (případně jejich změn) předmětů zobrazených na snímcích.
- **dálkový průzkum Země** --- soubor metod a technických postupů zabývajících se pozorováním a měřením objektů a jevů na zemském povrchu a ve styčných nad- a podpovrchových vrstvách bez přímého kontaktu s nimi a zpracováním těchto dat za účelem získání informací o poloze, stavu a druhu těchto objektů a jevů.
- **geografický informační systém** --- organizovaný soubor počítačového technického vybavení, programového vybavení, geografických dat a personálu, určený k účinnému sběru, uchovávání, údržbě, manipulaci, analýze a zobrazování všech forem geograficky vztažené informace.

Vztah mezi geodézií a některými dalšími vědními obory je znázorněn na obrázku č. 1.1:



obr. 1.1 – Vztah mezi geodézií a některými dalšími vědními obory

Jak je z obrázku patrné, geodézie spolu s mapováním a topografickým mapováním slouží ke sběru prostorových dat (lokalizačních údajů). Tytéž data nám může poskytnout i fotogrammetrie, ovšem zde se již nejedná o přímý sběr dat nýbrž o nepřímý sběr dat. Fotogrammetrie je schopna nám poskytnout informace o objektech a jevech bez přímého kontaktu s nimi. Tím je fotogrammetrie podobná dálkovému průzkumu Země. Dálkový průzkum Země ale poskytuje spíše než prostorová data identifikační údaje (lze se pomocí něj dozvědět, jaké mají zkoumané objekty vlastnosti). Takováto data nám může poskytnout i geografický průzkum či geomorfologický sběr dat. Zpracováním takto získaných dat se zabývá kartografie, lze využít také výpočetní techniku a pro zpracování družicových snímků se používají metody zpracování obrazu. Výstupem jsou pak mapy nejrůznějších měřítek a to jak mapy polohopisné tak výškopisné, katastrální, geografické i tematické. Tyto výstupy mohou být dále využity např. pro potřeby geografických informačních systémů či mohou být na jejich základě zpracovány nejrůznější databáze a další¹.

Všechny geodetické disciplíny mají společnou základní teoretickou disciplínu --- **teorii zpracování měření a teorii chyby**, které jsou důležité pro optimalizaci měření a určení přesnosti měření.

Výsledky geodetických činností zasahují do řízení státu, projektování a budování nadzemních i podzemních staveb, regionů, měst, obcí, těžby nerostných surovin, lesního a vodního hospodářství. Mezi méně známé oblasti použití patří sledování rozměrů, tvaru a pohybu různých objektů (lodí, letadel, aut, ...) a výzkum (ověřování hypotéz v geofyzice --- pohyby zemské kůry; geologii --- eroze, sesuvy půdy; stavebnictví --- sedání staveb, pružnost a pevnost konstrukcí).

¹ Uvedeným výčtem není přehled souvisejících oborů zdaleka vyčerpán.

Mimořádný význam má sledování stability zemské kůry zejména při výběru lokalit pro atomové elektrárny či velké přehrad.

Pokrok vedl ke změně struktury geodézie, k rozšíření jejích aktivit a novým možnostem (určení geocentrického souřadnicového systému, rychlé a přesnější měření souřadnic, ...). Velký význam získaly družicové techniky, GPS --- globální polohový systém, DPZ --- dálkový průzkum Země, robotické měřicí systémy, automatické zpracování obrazů, automatické informační systémy, řada technických i programových novinek využitelných v geodézii.

1.2 Úkoly a dělení geodézie

Tato nauka má **dva základní úkoly**:

- Určit vzájemnou polohu bodů na zemském povrchu nebo v prostoru ve smyslu vodorovném i svislém.
- Převést tyto body vhodným způsobem do roviny, tj. na plány a mapy.

Technickým úkolem geodézie je určení tvaru a prostorové polohy předmětů měření, ať již přirozených nebo umělých, vzhledem k soustavě geodetického základu. Přirozené předměty měření jsou vodstva, terénní útvary, údolí, druhy kultur a porostů. Umělé předměty měření jsou budovy, stavby, komunikace, hranice, různá vedení energie, tunely, technická zařízení apod. Tedy všechny předměty na, nad a pod zemským povrchem.

Geodézie se dělí na nižší a vyšší.

Hlavním úkolem **vyšší geodézie** je určit tvar a rozměry zemského tělesa jako celku. K dosažení tohoto cíle se využívají výsledky triangulačních, nivelačních, gravimetrických, astronomických a družicových měření. Jejím dalším úkolem je budování trigonometrických a nivelačních sítí na zemském povrchu, tedy budování geodetických základů.

Nižší geodézie (tzv. praktická geometrie), se zabývá vyměřováním malých částí zemského povrchu, který lze již považovat za rovinný. Na rozdíl od vyšší geodézie tedy nepřihlíží k zakřivení Země. Její součástí jsou fotogrammetrie, dálkový průzkum Země, mapování, kartografie a pozemkové úpravy.

Použití rozdílných referenčních ploch tvoří hranici mezi vyšší a nižší geodézií, ale jejich spojení je velmi úzké a poukazuje na integritu celého oboru. Úzká návaznost někdy umožňuje vytvořit celky a specializace, které překračují uvedené rozdělení. Z obou skupin lze vyčlenit disciplíny, které se zabývají jen kartografickou činností (matematická kartografie, kartometrie, tvorba a výroba map). Tento soubor kartografických nauk označujeme jako geodézii a kartografii.

Z vědeckého hlediska označuje termín geodézie **vědní obor**, který zahrnuje [45.], [53.]:

- **teoretickou geodézií** --- zabývá se teoretickými otázkami,
- **geodetickou astronomií** --- určování zeměpisných souřadnic a azimutů na povrchu Země pro geodetické účely na základě pozorování přirozených kosmických objektů,

- **astrofyziku** --- obor astronomie zabývající se stavbou, fyzikálními vlastnostmi a chemickým složením kosmických těles,
- **gravimetrii** --- část geofyziky zabývající se tíhovými měřeními, studiem tvaru, rozměrů a vnějšího tíhového pole Země,
- **technickou geodézií** --- zahrnuje metody měření, výpočty a zobrazování malých částí zemského povrchu,
- **fotogrametrii** --- vědní obor zabývající se určováním tvaru, rozměrů a polohy předmětů v prostoru z fotogrammetrických snímků,
- **pozemkové úpravy** --- scelování, dělení, uspořádání pozemků, rozmístění druhů pozemků, úprava hranic pozemků a s tím související vykonávání terénních, vodohospodářských a jiných opatření.

1.3 Dějiny geodézie

Geodézie je jedna z nejstarších věd o Zemi. Její počátky sahají daleko do doby př. n. l. a jsou spjaty nejen s touhou lidstva poznávat, ale především s praktickými potřebami života. Otázka tvaru a velikosti planety Země zaměstnávala lidstvo od prvních počátků kulturního života. Vědecké základy geodézie byly položeny již ve středověku.

1.3.1 Starověk

Určování rozměrů Země má bohatou historii. Jedna z prvních představ o světě je popsána v **Homérových** zpěvech (asi 850 př. n. l.). Země je zde popsána jako kotouč obklopený oceánem s nebeskou klenbou ve tvaru přílby. Již v 6. století př. n. l. význačný matematik **Pythagoras** tvrdil, že Země má tvar koule. Názor o kulatosti Země učil i jeho žák **Platón**. Prvním, kdo tento názor podložil důkazy, byl **Aristoteles**. Poukazoval např. na postupné mizení odplouvající lodi za obzorem či na kruhový stín Země na Měsíci při jeho zatmění.

První historicky známé určení velikosti Země učinil matematik **Eratosthenes** kolem roku 250 př. n. l. Zjistil, že v době letního slunovratu dopadají v pravé poledne sluneční paprsky v Asuánu (dříve Syena) až na dno hluboké studně. Usoudil, že Slunce v té době stojí přímo nad studnou a jeho paprsky směřují do středu Země. Eratosthenes změřil, že v Alexandrii, která leží ve vzdálenosti 5000 stadií na sever od Asuánu, je Slunce vzdáleno od zenitu o $\Delta\varphi = \frac{1}{50}$ kruhu.

Usoudil, že tento úhel se rovná středovému úhlu poledníkového oblouku mezi Alexandrií a Asuánem. Poloměr Země poté určil z délky s a velikosti středového úhlu $\Delta\varphi$. Podle Eratosthenových měření vyšel poloměr Země $R = 7,361$ km, délka zemského kvadrantu $Q = 11,562$ km.

Podobným způsobem odhadl velikost Země **Poseidonios** (135 - 51 př.n.l.), ale dopustil se chyby při určení středového úhlu. Na podkladě znalosti vzdálenosti mezi Alexandrií a Rhodem a z úhlového rozdílu spodních kulminací hvězdy Canopus na obou místech určil zemský poloměr

jako $R = 5,300$ km. Z tohoto údaje vycházel později **Ptolemaios** při tvorbě své první mapy světa i **Kryštof Kolumbus** při odhadu doby plavby z Evropy do Indie.

1.3.2 Středověk

Ve středověku je církví v Evropě prosazován primitivní názor o plochosti Země. V 7. století našeho letopočtu značně zmohutnělo panství Arabů. Na východě dosahovalo oblastí dolního Indu a na západě Tuniska, Alžírsko a Maroka. Roku 711 Arabové opanovali téměř celý Pyrenejský poloostrov. Na tomto území se stále více projevoval arabský kulturní vliv. Arabům vděčíme za to, že mnohý řecký spis se nám zachoval alespoň v arabském překladu.

Okolo roku 827 bylo z příkazu chalífy **Almanuna** provedeno první určení velikosti Země na základě přímého měření délky 1° poledníkového oblouku. Měření se konalo mezi Palmyrou a Rakkou v oblasti horního Iráku. Práce prováděly dvě měřické skupiny, které postupovaly proti sobě - jedna od severu k jihu a druhá opačně. Každá skupina měřila dvěma provazci o délce zhruba 25 metrů. Do směru meridiánu se položil první provazec a podél něho - od jeho středu - se položil druhý provazec atd. Výsledná délka oblouku jednoho stupně je uváděno $56 \frac{1}{3}$ míle. Po přepočtení vychází zemský obvod $40\,008\,384$ m.

Arabové se dále zasloužili o rozvoj trigonometrie a aritmetiky (zavedením desítkové soustavy).

V Evropě byli zastánci názoru kulovitosti Země tvrdě pronásledováni katolickou církví. Nejvýznamnějším vědeckým činem druhé poloviny 13. století bylo vydání tzv. Alfonsinských tabulek, které představovaly základ všech astronomických výpočtů až do 16. století. Až zámořská plavba **Kryštofa Kolumba**, objevení nového světadílu (Ameriky) roku 1492, následný rozvoj mořeplavectví a první obeplutí Země roku 1522 podnítily nový zájem o přesné určení rozměrů Země.

1.3.3 Novověk

V 16. století bylo kulturní centrum přeneseno do severozápadní Evropy, především pak do Nizozemí, Francie a Anglie.

Významnými vědci své doby byly **Mikuláš Koperník** (1473 - 1543), **Galileo Galilei** (1564 - 1642) a **Jan Kepler** (1571 - 1630), kteří svým heliocentrickým názorem položili základ moderní geodézie.

Roku 1525 se francouzský matematik a astronom **Jean Fernel** pokusil o nové určení rozměrů Země. Fernel si vybral pro své měření Paříž a místo poblíž Amiensu, ležící na pařížském meridiánu o 1° severněji. Vzdálenost změřil pomocí otáček kol vozu. Jím určený zemský obvod má hodnotu $40\,043\,343$ m a poloměr zemské koule $R = 6373$ km. Nízkou chybu tohoto výsledku lze vysvětlit pouze příznivým hromaděním chyb.

Další zásluhu o rozvoj astronomie a geodézie mají vlámský matematik **Gemma Regnier**, který popsal určování polohy měst měřením osnovy vodorovných úhlů ze dvou míst daných zeměpisnými souřadnicemi. Tuto metodu, již lze pokládat za prvopočáteční stadium triangulace, prakticky předvedl **Frisius**. Koncem 16. století byla zavedena algebra tehdejším největším francouzským matematikem **Francois Vietem** a anglický matematik **Leonard Diges** popisuje ve svém spise přístroj zvaný Instrument topographicall (předchůdce dnešního teodolitu).

Mezníkem ve vývoji geodézie se stalo první použití trigonometrické sítě. Holandský matematik **Q. Snell van Roijen** (1591 - 1626) poprvé určil délku meridiánového oblouku výpočtem z trigonometrické sítě. Jím použitá síť měla 13 vrcholů a celkem 3 základny. Při výpočtech se však dopustil početních chyb. Podle pozdější revize vychází obvod zemský 40 016 000 m.

V 18. století se dostala do popředí v geodézii francouzská Akademie věd. Brzy se objevil názor, že Země není dokonalá koule, ale rotační elipsoid. Rozřešením tohoto problému byli pověřeni **Lahire a Cassiniové**, kteří provedli další stupňové měření (1683 - 1716). Změřili poledníkový oblouk Colliour - Dunkerque ve Francii pomocí trigonometrického řetězce. Dále určili poloměry křivosti v jižní a v severní polovině oblouku. Působením měřických chyb byl však převýšen hledaný rozdíl mezi velmi blízkými poloměry a severní poloměr vyšel kratší než jižní. Tzn. osa rotace je delší než průměr rovníku.

Proti jejich závěru vystoupili dva významní fyzikové 17. století - **Isaac Newton** a **Christian Huygens**. Důkazem zploštělosti na pólech mělo být zjištění, že kyvadlové hodiny v Paříži mají delší kyvadlo než v Cayenne (místo v blízkosti rovníku v Jižní Americe) a tedy v Cayenne je menší zemská gravitace (z toho plyne: je vzdálenější od středu Země).

Akademie se rozhodla provést nové stupňové měření - co nejblíže rovníku a co nejdále na severu. Měření v Laponsku (1736-37) a v Peru (1736-44) potvrdilo teorii o zploštění země na pólech. Výsledné délky odpovídající středovému úhlu 1° jsou následující: Laponsko - 111 478 m, Francie - 111 212 m, Peru - 110 577 m. Zploštění Země bylo stanoveno $i = 1 : 310,3$.

Pokrok Francouzů byl podnětem pro zahájení rozsáhlých geodetických prací i v jiných zemích. Na našem území (tehdy Rakousko-Uhersko) pověřila Marie Terezie těmito pracemi **Josefa Liesganiga**. Liesganig vedl řetězec 22 trojúhelníků s jednou délkovou základnou u Vídeňského Nového Města od kaple sv. Kříže v obci Soběšice přes Vídeň až k Varaždínu v Uhrách. Jednalo se o první triangulaci provedenou na našem území.

Roku 1791 byl ve Francii přijat dekret ustanovující Komisi pro míry a váhy, jejímž úkolem bylo určení délky mezinárodního metru. Komise doporučila znovu změřit oblouk na pařížském poledníku. Úkolu se zhostili geodeti **Jean Bapt. Delambre** a **Pierre Francois Mechain**. Výsledkem bylo r. 1799 předložení etalonu metru a kilogramu ke schválení.

Brzy bylo měření poledníkových oblouků doplněno i měřením podél rovnoběžek. V Evropě 19. století stojí za zmínku zejména měření dánské (1816), Gaussovo měření hanoverské (1821-23), při němž **Gauss** použil novou signalizaci odraženým slunečním světlem, a Besselovo měření východopruské (1831-38). V letech 1817-1852 překonává všechna dosavadní měření (co se rozměrů týče) měření na území Ruska pod vedením astronoma **Struveho** a generála **Tennera**. Ti změřili řetězec o délce 2 880 km.

Roku 1841 určuje **Bessel** svůj elipsoid, zavedený později ve střední Evropě a roku 1846 odvozuje **Clarke** elipsoid pro USA. První určení elipsoidu z plošné astronomicko-geodetické sítě s isostatickými redukcemi provedl **Hayford**. Přestože měření pokrývalo pouze území USA, byl Hayfordův elipsoid prohlášen r. 1924 za mezinárodní.

Později byli odvozeny další elipsoidy, mezi nejznámějšími jmenujme například elipsoid Krasovského či elipsoid 1967.

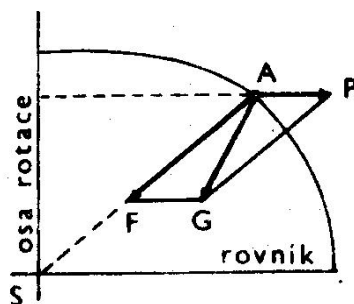
Usnesení XVII. Valného shromáždění MUGG (IAG) z roku 1979 se stalo posledním historickým mezníkem ve vývoji názorů na tvar Země. Pro velmi přesné výpočty prováděné v družicové geodézii byla rovníková kružnice nahrazena elipsou. Tím se elipsoid přiblížil k stometrové depresi geoidu jižně od Indie.

Největším pokrokem minulého století je bezesporu prudký rozvoj družicové geodézie a s ní související rozvoj nových měřických metod. Díky družicové geodézii mohla být změřena i celosvětová družicová síť BC 4 (r. 1966), byl vybudován navigační systém NAVSTAR-GPS, zpřesnili se naše znalosti průběhu geoidu. Výsledky získané pomocí družicové geodézie umožnili zpřesnit hodnoty parametrů zemského referenčního elipsoidu.

O této problematice je k dispozici velké množství literatury. Nejobsáhlejší je pravděpodobně publikace doc. Ing. Dr. Emanuela Procházky, CSc. PhDr. et JUDr. Ivana Honla: Úvod do dějin zeměměřictví, z níž jsem v této podkapitole převážně vycházela. Dalšími zdroji mohou být např. [13.], [28.].

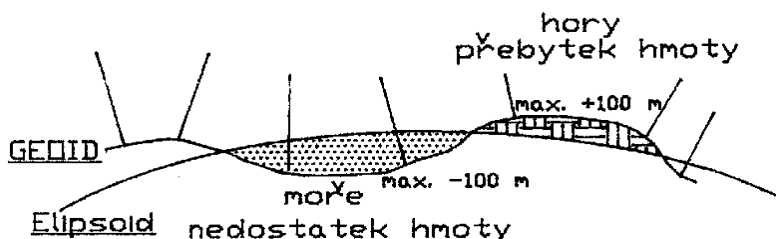
2. Tvar zemského tělesa a referenční plochy

Země je fyzikální těleso, jehož tvar je výslednicí dvou sil: **síly přitažlivé** a **síly odstředivé**. Výslednicí obou sil je **tíhová síla G**.



obr. 2.1 – Tíhová síla [34.]

Tíhové pole Země je prostor, ve kterém se projevuje působení zemské tíže a tělesa jsou přitahována přibližně do středu Země. V geodetickém smyslu je Zemí nulová hladinová plocha [34.], zvaná podle J. B. Listinga (1873) **geoid**. Geoid by se realizoval jako klidná střední hladina moří, která jsou spojena i pod kontinenty. Tato hladinová plocha je všude kolmá na směr zemské tíže. Při měření je tato plocha realizována urovnanou libelou. (Více viz [34.]



obr. 2.2 - Geoid [44.]

Jak vlastní povrch Země tak i geoid jsou však tělesa nepravidelná, členitá a velmi složitá, proto je pro potřeby mapování nahrazujeme **referenčními plochami**. Těmito plochami jsou **referenční elipsoid**, **referenční koule** a **referenční rovina**. Podrobněji jsou probírány v předmětu Vyšší geodézie. Zde se omezím pouze na základní pojmy.

Referenční elipsoid

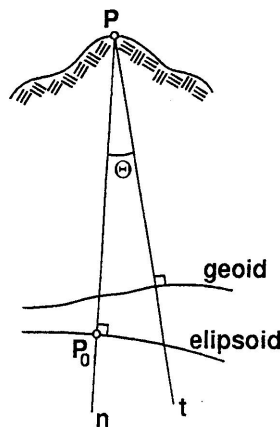
Elipsoid (sféroid) je rotační těleso zploštělé na pólech. Je určen dvěma konstantami elipsoidu: např. a – hlavní poloosa elipsoidu, b – vedlejší poloosa elipsoidu, e^2 – první excentricita, i – první zploštění

$$e^2 = \frac{a^2 - b^2}{a^2} \qquad i = \frac{a - b}{a}$$

Je-li střed elipsoidu ztotožněn s těžištěm geoidu a vedlejší osa s osou rotace Země, pak tento elipsoid nazýváme **zemský elipsoid**.

Je-li vedlejší osa rovnoběžná s osou rotace Země, pak tento elipsoid nazýváme **referenční elipsoid**.

Pokud nahrazujeme geoid rotačním elipsoidem tížnice ke geoidu t a normála k elipsoidu n svírají v různých místech malý úhel – **tížnicovou odchytku** θ .



obr. 2.3 –Tížnicová odchyška [9.]

U nás se v civilním sektoru využívá elipsoid Besselův z r. 1841, ve vojenském sektoru elipsoid Krasovského z r. 1940. Velmi užívaným je rovněž elipsoid Hayfordův (1909), který byl roku 1924 přijat za mezinárodní elipsoid. Pro metody měření pomocí GPS je používán elipsoid WGS-84, na nějž přejde vojenský sektor v roce 2005.

V tabulce jsou uvedeny parametry nejdůležitějších elipsoidů:

elipsoid					
	Bessel	Hayford	Krasovskij	IAG 1967	WGS-84
rok	1841	1909	1940	1967	1984
a [m]	6377397.155	6378388	6378245	6378160	6378137
b [m]	6356078.963	6356911.946	6356863.019	6356774.516	6356752.314
i [m]	1/299.153	1/297.0	1/298.3	1/298.247	1/298.257

tab.2.1 – Parametry vybraných elipsoidů

Proměnlivost křivosti elipsoidu působí, že i na rotačním elipsoidu jsou výpočty geodetických úloh značně složité. Proto jej často nahrazujeme koulí.

Referenční koule

Koule má konstantní křivost. Je určena pouze poloměrem R . Referenční kouli je možno využít [34.]:

- a) pro nahrazení části elipsoidu

Používá se pro území o poloměru do 200 km. Volí se střední poloměr křivosti $R_m = MN$, kde M je meridiánový poloměr křivosti a N je střední poloměr křivosti. Tento poloměr se vypočítává ke středu území, v němž se koule dotýká elipsoidu.

Střední poloměry křivosti pro jednotlivé elipsoidy uvádím v tabulce¹.

elipsoid					
	Bessel	Hayford	Krasovskij	IAG 1967	WGS-84
R_m [m]	6380703.611	6381718.731	6391561.267	6381476.805	6381453.683

tab. 2.2 – Střední poloměry křivosti pro vybrané elipsoidy

- b) pro nahrazení celého elipsoidu

Používá se pro méně náročné úkoly. Poloměr náhradní koule je možné určit více způsoby:

- aby koule měla stejný objem jako elipsoid

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^2 b \quad \Rightarrow \quad R = \sqrt[3]{a^2 b}$$

- aby koule měla stejný obsah jako elipsoid

$$4\pi R^2 = \frac{4}{3}\pi(2a^2 + b^2) \quad \Rightarrow \quad R = \sqrt{\frac{2a^2 + b^2}{3}}$$

- aby poloměr koule byl rovný aritmetickému průměru všech tří poloos elipsoidu

$$R = \frac{a + b + c}{3}$$

- aby délky kvadrantů byly stejné

$$\frac{1}{2}\pi R = Q \quad \Rightarrow \quad R = \frac{2Q}{\pi}, \text{ kde } Q \text{ je délka poledníkového}$$

kvadrantu.

Poloměry referenčních koulí pro dané elipsoidy za zmíněných podmínek uvádím v tabulce:

¹ Střední zeměpisná šířka pro ČR je 49°30'.

elipsoid					
podmínka	Besselův	Hayfordův	Krasovského	IAG 1967	WGS-84
stejný objem [m]	6370283	6371221	6371110	6371024	6371001
stejný povrch [m]	6370299	6371237	6371126	6371040	6371017
aritmetický průměr poloos [m]	6370291	6371229	6371118	6371032	6371009
stejný kvadrant [m]	6366743	6367655	6367558	6367471	6367449

tab. 2.3 – Poloměry referenčních koulí pro vybrané elipsoidy za zmíněných podmínek

Referenční rovina

Kouli lze nahradit tělesem rozvinutelným do roviny (např. kuželem, válcem či tečnou rovinou). Více se těmito tělesy zabývá předmet matematická kartografie. Za rovinu lze považovat – pro polohopisné účely – území do průměru 30 km². Vodorovné úhly a délky jsou prakticky stejné na zakřiveném povrchu i na jeho tečné rovině.

2.1 Vliv zakřivení Země na měřené veličiny

Volbou náhradní referenční plochy se v jednotlivých veličinách dopouštíme chyb, a to **chyb v délkách, úhlech a zejména ve výškách**.

Pokud zanedbáme zakřivení Země, tzn. pracujeme-li v rovinném průmětu, dopouštíme se chyb při výpočtu a zobrazení jednotlivých geodetických veličin. Pro tyto chyby platí přímá úměra: **čím větší je vzdálenost mezi uvažovanými body a čím větší bude zobrazované území, tím větší budou hodnoty zkreslení**. Pokud určíme rozdíly mezi těmito veličinami na kouli a jejich průměty do roviny, můžeme stanovit, do jaké vzdálenosti lze ještě zemský povrch považovat za rovinný, aniž bychom ovlivnili přesnost měřených veličin.

Přesnost měření lze charakterizovat poměrnými chybami.

Přesnost zobrazení Δ_r – grafická přesnost – závisí na přesnosti vynesení ($\Delta_y = \pm 0,05$ mm) a na měřítku mapy.

$$\Delta_r = \Delta_y * m$$

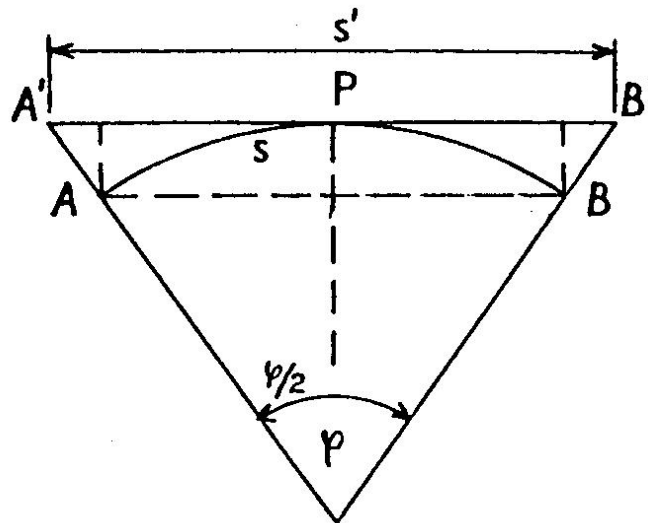
2.1.1 Redukce délek

[33.] Vliv zakřivení Země na měřené délky se projevuje jako rozdíl mezi délkou ve skutečném horizontu a délkou ve zdánlivém horizontu a jako změna délky promítnuté do nulového horizontu.

² Údaj 30 km vyplývá z problematiky rozdílu mezi délkami ve skutečném a zdánlivém horizontu, který je podrobně rozveden v následujícím odstavci.

Rozdíl mezi délkami ve skutečném a zdánlivém horizontu

Na obrázku je P střed oblasti. A,B jsou body na kulové ploše (skutečném horizontu). Jejich vzdálenost s je délka skutečného horizontu. Promítnutím obou bodů do zdánlivého horizontu (tangenciální zobrazovací roviny) dostaneme body A',B'. Zdánlivý horizont je kolmý na směř tíže a je realizován urovnanou libelou geodetického přístroje.



obr.2.4 - Rozdíl mezi délkami ve skutečném a zdánlivém horizontu [33.]

Délka $s = R * \varphi$

$$\text{potom } \varphi = \frac{s}{R} \quad (1)$$

$$\text{délka průmětu } s' = 2 * R * \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}. \quad (2)$$

Dosazením (1) do (2) dostaneme

$$s' = 2 * R * \operatorname{tg} \frac{s}{2R}.$$

Rozvinutím funkce tg v Maclourinovu řadu³ a použitím pouze prvních 2 členů dostaneme

$$s' = 2R \left(\frac{s}{2R} + \frac{s^3}{24R^3} \right) = s + \frac{s^3}{12R^2}.$$

Pak rozdíl mezi délkou na rovině a na kouli

³ Maclaurinova řada: je-li $x_0 = 0$, potom $f(x) = f(0) + \frac{f'(0)}{1!}x + \frac{f''(0)}{2!}x^2 + \dots + \frac{f^{(n)}(0)}{n!}x^n + \dots$

$$\Delta s = s' - s = \frac{s^3}{12R^2}.$$

s [km]	10	15	20	25	30	35
delta [mm]	2	7	16	32	55	88

tab. 2.4 - Rozdíl mezi délkou na rovině a na kouli⁴

Poměrná chyba $\frac{\Delta s}{s} = 1 : 545\,000$ a $\Delta s = 55$ mm pro $s = 30$ km.

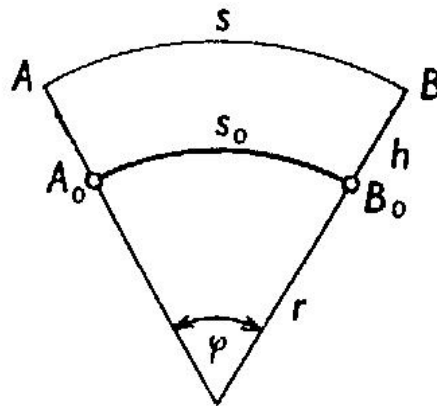
Přitom poměrná přesnost délkových měření je okolo $1 : 100\,000$ a grafická přesnost pro měřítko $1 : 1\,000$ je 50 mm.

Závěr:

Zakřivenou plochu lze nahradit rovinou do vzdálenosti $s = 30$ km. [33.]

Redukce délky do nulového horizontu

Vlivem sbíhavosti tížnic je délka v určité nadmořské výšce větší či menší než na nulovém horizontu. Délka s naměřená ve výšce h se při průmětu do nulového horizontu změní na délku s_0 .



obr. 2.5 - Redukce délky do nulového horizontu [33.]

$$\frac{s_0}{s} = \frac{R}{R+h} = \frac{1}{1+\frac{h}{R}}$$

$$s_0 = s * \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-1} = s * \left(1 - \frac{h}{R}\right)$$

Redukcí délky z nadmořské výšky je rozdíl Δs :

⁴ Pro $R = 6380$ km.

$$\Delta s = s - s_0 = h * \frac{s}{R}$$

Vybrané redukce jsou uvedeny v tabulce:

výška h	100 m	500 m	1 000 m	2 000 m
délka s	redukce Δs [mm]			
100 m	2	8	16	31
200 m	3	16	31	63
500 m	8	39	78	157
1 000 m	16	78	157	313
2 000 m	31	157	313	627
5 000 m	78	392	784	1567

tab. 2.5 - Redukce délky z nadmořské výšky

2.1.2 Rozdíly v úhlech

Při nahrazení plochy kulové rovinou zanedbáváme při měření vodorovných úhlů sférický exces. Sférický exces ε je hodnota, o kterou je větší součet vnitřních úhlů uzavřeného obrazce na sféře oproti součtu vnitřních úhlů stejného obrazce v rovině.

$$\varepsilon'' = \rho'' * \frac{P}{R^2}$$

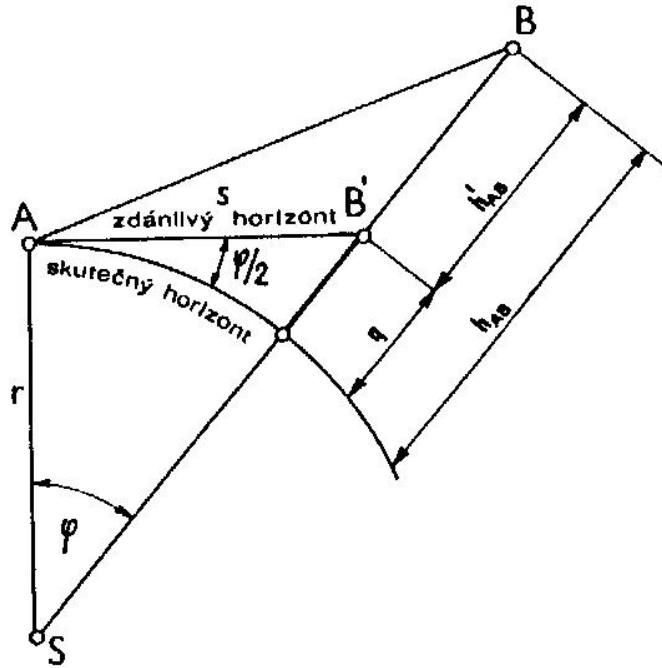
P ... plocha sférického obrazce

ρ'' ... radián

Pro rovnostranný sférický trojúhelník o stranách 20 km je exces $\varepsilon = 0,9''$ a každý úhel v rovinném trojúhelníku bude zatížený chybou $\varepsilon''/3 = 0,3''$. To je hodnota velmi malá a nemusí se uvažovat ani při přesnějších měřeních.

2.1.3 Rozdíly ve výškách

Při měření výšek zaměňujeme skutečný horizont za zdánlivý horizont. Výškový rozdíl bodů A a B je definován jako kolmá vzdálenost hladinových ploch procházejících zmíněnými body. Pokud zanedbáme zakřivení Země promítne se bod B do bodu B' s my určujeme převýšení BB' namísto správného převýšení AB. Tím se dopouštíme chyby o velikosti q .



obr. 2.6 – Vliv zakřivení Země na výšky [33.]

Z obrázku je patrné, že q vypočteme ze vztahu:

$$q = s * \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = s * \frac{\varphi}{2}.$$

Po dosazení za φ ze vztahu $\varphi = \frac{s}{R}$ dostaneme $q = \frac{s^2}{2R}$.

Z výsledného vztahu je vidět, že chyba roste kvadraticky. Vliv zakřivení Země tedy není možno při výškovém měření zanedbat ani na velmi krátké vzdálenosti, protože chyba překračuje tolerance i běžných výškových měření.

Velikosti chyb pro vybrané hodnoty délek jsou uvedeny v tabulce.

s [m]	100	500	1000	5000
q [mm]	1	20	78	1959

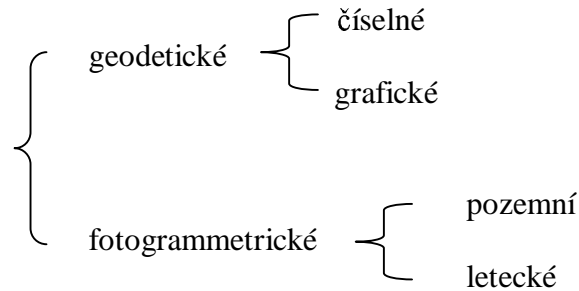
tab. 2.6 – Chyby ve výškách pro vybrané hodnoty délek

2.2 Způsoby sběru geodetických informací

Základním technickým úkolem geodézie je určení prostorové informace jednak o zemském povrchu a jednak o objektech na něm. [45.] Na těchto prostorových informacích – geodetických informacích – závisí řízení složitých informačních systémů. Kvalita řízení je pak závislá na **kvalitě informací**. Tento termín znamená zejména [33.]:

- objektivnost (spolehlivost) informace
- aktuálnost
- dostupnost
- komplexnost.

Jednou z podmínek je tyto informace získat s optimálními náklady a v optimálním čase. Prostorové informace získáváme měřením. **Měřické metody** se dělí dle hlavních úkonů na [10.]:



Volba metody závisí na požadované přesnosti, typu terénu, měřítku mapy, rozsahu mapovaného území, využitelnosti předchozích polohopisných podkladů, časovém a ekonomickém faktoru [10.], [21.].

Rozsah geodetických úloh pak závisí na více podmínkách, které lze rozdělit do 2 skupin

1) Všeobecné

- urbanizace území (hustota objektů v daném prostoru)
- rozloha území
- hustota osídlení
- hustota infrastruktury
- změny ve vlastnictví pozemků a dalších nemovitostech
- objem investic do stavebnictví a infrastruktury

2) Geodetické

- hustota a kvalita geodetických sítí
- podrobnost, aktuálnost a kvalita datového modelu daného prostoru
- pokrytí území aktuálními mapami velkých a středních měřítek
- existence a stav katastru nemovitostí
- počet a struktura odborníků
- materiální, operační a logistická základna geodetických služeb

Konečným výsledkem geodetických prací je zmenšený rovinný průmět části zemského povrchu (mapa) – analogová či digitální, nebo prostorové souřadnice jednotlivých bodů měření (opět mohou být ve formě analogové i digitální).

Výsledky měření mohou být doplněny různými daty, čímž vzniká informační systém o území (LIS).

2.2.1 Aproximace reliéfu, morfologické plochy

Skutečný povrch mapovaného území nazýváme **terénní reliéf** (terénní plocha). Ten je vytvářený přírodními silami či umělým zásahem – aktivní lidskou činností. Terénní reliéf je nepravidelná plocha, složená z četných topografických (morfologických) ploch. Tyto plochy se dělí na rovné, vypuklé a vhloubené.

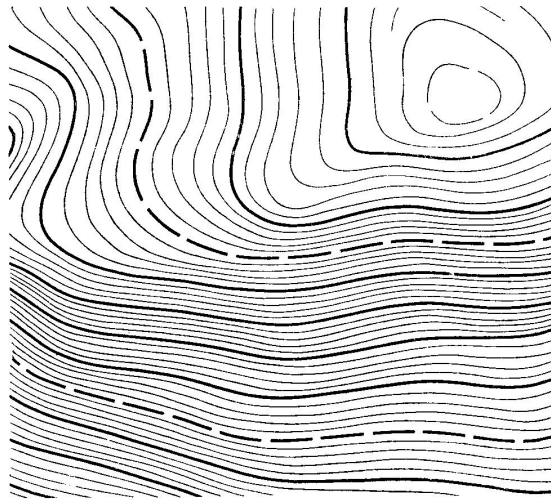
Seskupení těchto ploch vytvářejí terénní tvary, které je možno dělit na tvary vyvýšené a tvary vhloubené. Podle umístění se dále dělí:

- tvary na vrcholové části vyvýšeniny
- tvary na úbočí
- tvary na úpatí
- tvary údolní

Terénní tvary se dají snadno aproximovat skupinami charakteristických bodů. Ty pak vytváří charakteristické čáry terénní kostry (hřbetnice, údolnice, spádnice, hrany). Tím je úloha změření terénu převedena na změření jednotlivých bodů.

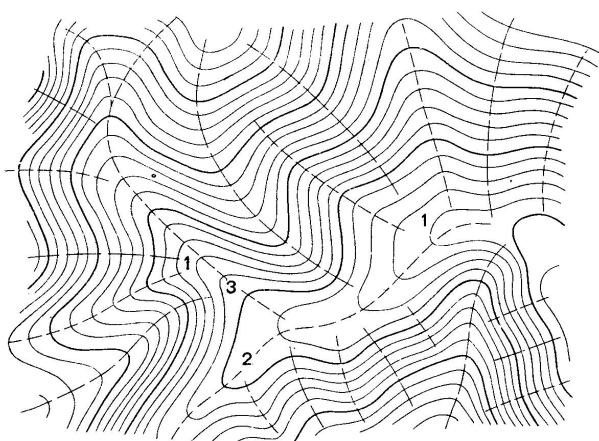
Významnou součástí měření je výběr zmíněných charakteristických bodů [2.]. Výběr je ovlivněn hlavně typem terénu (pravidelný, nepravidelný, jednoduchý, složitý). Vždy se zaměřují body terénní kostry – nejnižší místo vhloubené plochy a nejvyšší místo vypuklé plochy. Např. vrchol kupy, střed sedla, ale také styk údolnic či rozdělení svahových hřbetů.

V **pravidelném jednoduchém terénu** (viz obrázek 2.7) stačí volit výškové body v téměř pravidelných, šachovitě volených rozstupech.



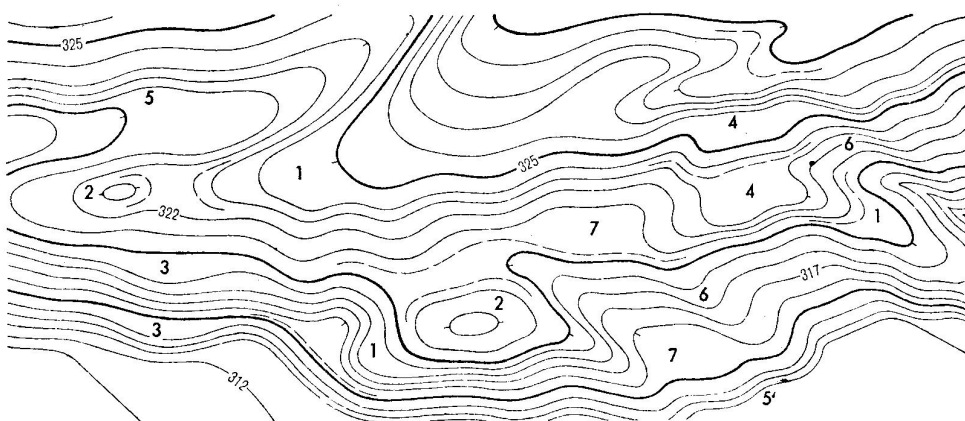
obr. 2.7 – Pravidelný jednoduchý terén [2.]

V **pravidelném členitém terénu** (viz. obrázek 2.8) je spolehlivým vodítkem pro rozmístění nejdůležitějších výškových bodů kostry horizontálního rozčlenění, tzn. hřbetnice, údolnice a jejich ohyby a styky. Tato síť se doplní body, které jsou nezbytně nutné k správnému znázornění průběhu terénu na dílčích plochách.



obr. 2.8 – Pravidelný členitý terén [2.]

V **nepravidelném terénu** (obrázek 2.9) je nutné rozdělit terénní reliéf na malé dílčí plochy s téměř stejným sklonem a výškové body volit na čarách ohraničujících tyto dílčí plochy, tj. na všech hranách, kde se mění sklon.



obr. 2.9 – Nepravidelný terén [2.]

Na typu terénu závisí i počet výškových bodů. Platí zde jednoduchá zásada: **čím složitější terénní reliéf, tím větší počet bodů.**

Více se této problematice bude věnovat předmět Topografické mapování.

2.2.2 Prostorová lokalizace bodů

Základní potřebou geodézie, stejně jako ostatních navazujících oborů, je jednoznačné určení polohy bodů a to jak na zemském povrchu, tak v jeho kartografickém obraze. Měření je třeba zobrazit na referenční (zobrazovací) plochu. Svislé průměty na tuto plochu a výšky bodů nad ní pak určují polohu bodů v prostoru.

Úlohu lze tedy rozdělit na 2 části [33.]:

- 1) určení vzájemné polohy průmětů bodů ,
- 2) určení výšek bodů.

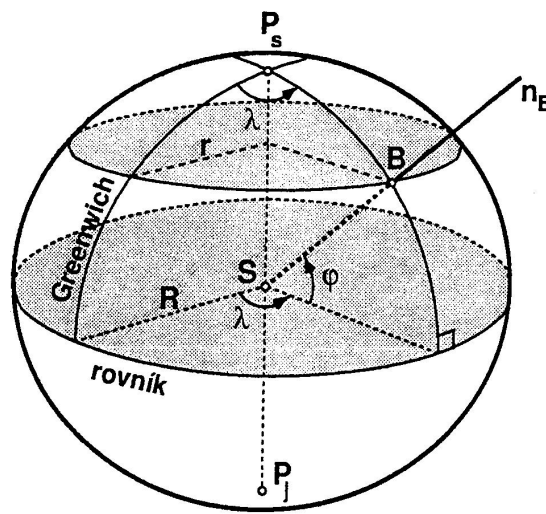
ad 1) Určení vzájemné polohy průmětů bodů

K této úloze používáme souřadnicové systémy. Dvojice číselných údajů nám poskytuje informaci o poloze bodů v horizontální rovině.

Následuje krátký přehled nejčastěji používaných souřadnicových systémů:

- **Geografické (zeměpisné) souřadnice**

Jedná se o zeměpisnou šířku a zeměpisnou délku.



obr. 2.10 – Zeměpisné souřadnice [9.]

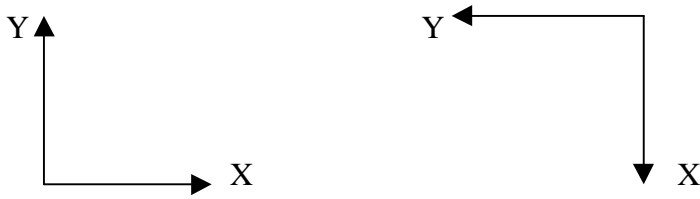
Zeměpisná šířka φ je dána úhlem, který svírá normála referenční plochy s rovinou rovníku. Nabývá hodnot od 0° do $\pm 90^\circ$.

Zeměpisná délka λ je úhel, který svírá rovina základního poledníku s rovinou místního poledníku (poledník procházející daným bodem). Nabývá hodnot od 0° do $\pm 180^\circ$.

Konstantní zeměpisnou šířku mají zemské rovnoběžky, konstantní zeměpisnou délku mají zemské poledníky. Póly jsou singulární body, poněvadž mají zeměpisnou délku 0° až 360° . Někdy se používá místo zeměpisné šířky geocentrická šířka β či redukovaná šířka ψ . (Více viz matematická kartografie).

- **Rovinné (pravoúhlé) souřadnice**

Rovinné souřadnice značíme X, Y . Počátek souřadnic může mít v rovině různé polohy. Stejně i natočení souřadnicových os může být různé. Příkladem může být matematická orientace os, tj. kladná osa X se ztotožní s kladnou osou Y pootočením o 90° proti směru pohybu hodinových ručiček, či geodetická orientace os, kde se kladná osa X ztotožní s kladnou osou Y pootočením po směru pohybu hodinových ručiček



obr. 2.11 – Rovinné souřadnice (pravoúhlé)

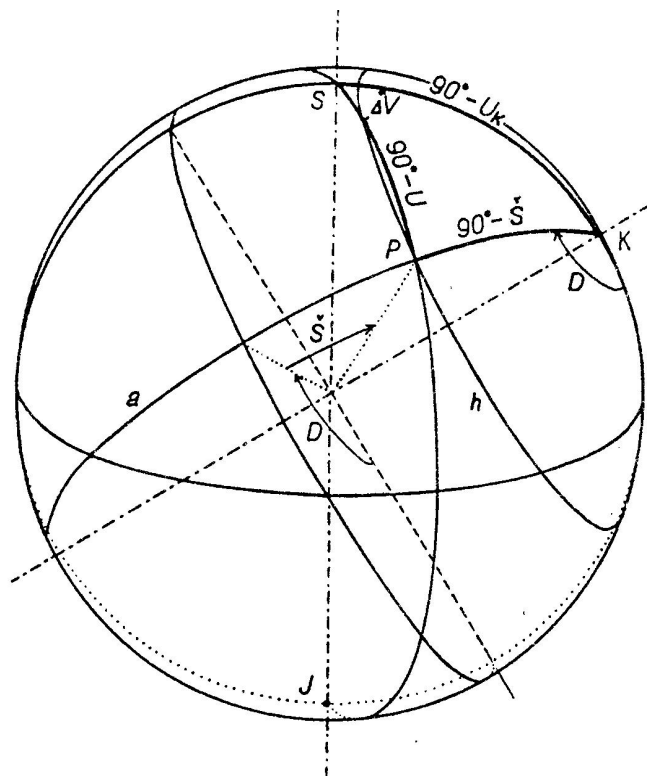
Pozn. V rovině se také používají polární souřadnice ρ a ε , které lze přepočíst na rovinné pomocí následujících výrazů:

$$X = \rho * \cos \varepsilon \quad Y = \rho * \sin \varepsilon$$

Pozn. Vztah mezi geografickými souřadnicemi (φ, λ) a rovinou zobrazení (X, Y) udávají zobrazovací rovnice. Zobrazovací rovnice mají obecný tvar $X = f(\varphi, \lambda)$ a $Y = g(\varphi, \lambda)$.

- **Kartografické souřadnice**

Osa zobrazovací plochy není totožná s osou Země. Důvodem je co nejlepší přimknutí zobrazovací plochy k referenční ploše v dané oblasti.



obr. 2.12 – Kartografické souřadnice [5.]

Souřadnice nazýváme kartografická šířka \check{S} a kartografická délka D . Kartografické souřadnice jsou definovány shodně jako zeměpisné souřadnice, ale jsou vztaženy ke kartografickému

pólu K , jehož polohu jsme vhodně zvolili. Souřadnice kartografického pólu označujeme U_K, V_K . Úloha se řeší na základě vět sférické trigonometrie [15.].

ad 2) Určení výšky

Jde o určení vzdálenosti bodu od zvolené nulové hladinové plochy. Touto problematikou se zabývá předmět Geodézie 2.

Polohu bodů lze určit také **geocentrickými souřadnicemi X, Y, Z** :

souřadnicový systém má počátek ve středu elipsoidu, osa X je vložena do průsečíku roviny rovníku a roviny základního poledníku, osa Z spojuje střed elipsoidu a severní pól a osa Y leží v rovině rovníku otočena o 90° proti směru hodinových ručiček od osy X .

2.2.3 Způsoby zpracování měření

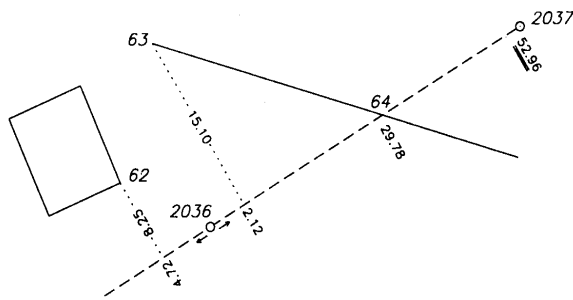
Základní měřené veličiny v geodézii jsou délky a úhly (případně směry). Tyto veličiny měříme na skutečném zemském povrchu. Výpočet a řešení geodetických úloh však provádíme v rovině kartografického zobrazení. Z této skutečnosti vyplývá nutnost úpravy měřených veličin před vlastními výpočty [1.], [52.].

K úpravě základních měřených veličin nám slouží fyzikální veličiny (teplota, tlak a vlhkost vzduchu), nadmořská výška, výška přístroje a cílů nad daným bodem, centrační prvky postavení přístroje a cílů spolu s výškovými úhly.

Úpravy měřených veličin v sobě zahrnují:

- vyloučení všech známých přístrojových chyb, osobních systematických chyb, atmosférických vlivů a vyrovnání naměřených hodnot na stanovisku,
- početní převod excentricky zaměřených veličin na spojnici stabilizačních značek,
- redukce měřených veličin do roviny kartografického zobrazení, v níž se provádějí výpočty a řešení geodetických úloh.

Výsledkem těchto prací je záznam upravených měřených veličin spolu s měřickým náčrtem (viz obr. 2.13 a 2.14).



Typ úlohy	Číslo k. ú.		Číslo náčrtu		Číslo bodu	TYP S	Staničení		Kolmice		Doměrek	Polární kolmice	Poznámka	
	9	Číslo evid.jednotky	Číslo tr.bodu	Vzdálenost S			Výška cíle (stroje)	Vod. úhel α	Svislý úhel β					
1	2					3	4	5	6	7	8	9	10	11
0	1	0	0	0	0	2036	0.	.	0.	.	:	.	.	
	1	0	0	0	0	2037	52.96	.	0.	.	:	.	.	
						62	-4.72	.	-8.25	.	:	.	.	
						63	2.12	.	-15.10	.	:	.	.	
						64	29.78	.	0.	.	:	.	.	
							:	.	.	

obr. 2.13 - Měřický náčrt ortogonální metody se záznamem naměřených dat [35.]

Měřeno přístrojem GTS-700/GTS-502E

2

/

1 1000000609 1.500

1000000606 68.0765 1.478 399.9999 99.2621

1000000610 53.9459 1.100 98.4368 104.8303

1000000606 68.0765 1.478 200.0010 300.7345

1000000610 53.9469 1.100 298.4365 295.1696

-1

/

1 1000000610 1.105

1000000609 53.9459 1.495 399.9989 95.1904

1000000609 53.9459 1.495 200.0000 304.8078

1000000616 53.4250 1.680 169.0032 97.9756

1000000616 53.4250 1.680 369.0038 302.0233

-1

700 98.1334 1.490 303.7185 105.7766

700 98.1334 1.490 103.7200 294.2227

/

1 1000000616 1.673

1000000610 53.4250 1.100 399.9990 102.0211

1000000610 53.4250 1.100 200.0007 297.9786

1000000617 42.6958 1.240 266.0051 120.2811

1000000617 42.6958 1.240 66.0083 279.7129

-1

/

1 1000000617 1.242

1000000616 42.6938 1.678 238.7750 79.7118

1000000616 42.6928 1.678 38.7730 320.2920

-1

/

-2

obr. 2.14 - výstup registrovaných dat

Následuje výpočet souřadnic bodů. Výpočet lze provádět pouze s pomocí kapesních kalkulátorů dle postupů blíže probíraných v kapitole Souřadnicové výpočty v rovině nebo na počítačích v různých výpočetních systémech např. Geus, Geodet, Kokeš, DiCAT, GROMA aj. Zpracování měřených dat v programu Kokeš je věnován předmět AVTG 1.

Výsledkem je seznam souřadnic v analogové či digitální podobě.

Grafické zpracování lze opět provádět dvojím způsobem – analogově nebo digitálně.

Při analogovém zpracování se nejprve vyhotoví konstrukční list. Do konstrukčního listu se zobrazí polohopis. Vyrovnají styky se sousedními mapovými listy a konstrukční list se zpracuje do formy originálu mapy.

Dnes se již převážně ke grafickému zpracování měření používají grafické systémy (např. Kokeš, MicroStation, AutoCAD, Mapa, ...). Např. grafický systém Kokeš je založen stavebnicově na jednotlivých funkcích. Umožňuje řešení základních souřadnicových úloh z oblasti mapování, pro projektování s grafickou podporou na obrazovce, grafickou editaci seznamu souřadnic a čárové kresby, digitalizaci mapových podkladů, vektorizaci rastrového podkladu a další úlohy potřebné ke konstrukci a aktualizaci map. Viz AVTG 2 či [24.].

Zejména v geografických informačních systémech (GIS) se měření zpracovává do tzv. digitálního modelu reliéfu (DMR). Ten poskytuje výstupy jak ve formě vrstevnicového obrazu, tak ve formě prostorových pohledů na danou oblast.

Zdrojem dat pro tvorbu DMR mohou být geodeticky přímo měřené prostorové souřadnice X, Y, Z nebo souřadnice získané digitalizací mapy obsahující výškopis. Z těchto souřadnic se vytvoří nepravidelná trojúhelníková síť (TIN). Trojúhelníky vzniknou spojením nejbližších bodů. Dále se označí singulární body a hrany, na spojnicích bodů se vypočtou souřadnice bodů, ležících ve zvoleném intervalu. Těmito body budou procházet vrstevnice.

Výstupem je vrstevnicové znázornění terénu. Nad DMR se dají řešit nejrůznější úlohy, např. stínování, řezy, analýzy viditelnosti, osvětlení terénu, počítání objemů a další.

2.3 Souřadnicové systémy

Pro mapování na našem území bylo použito následujících souřadnicových systémů:

2.3.1 Souřadnicové systémy stabilního katastru

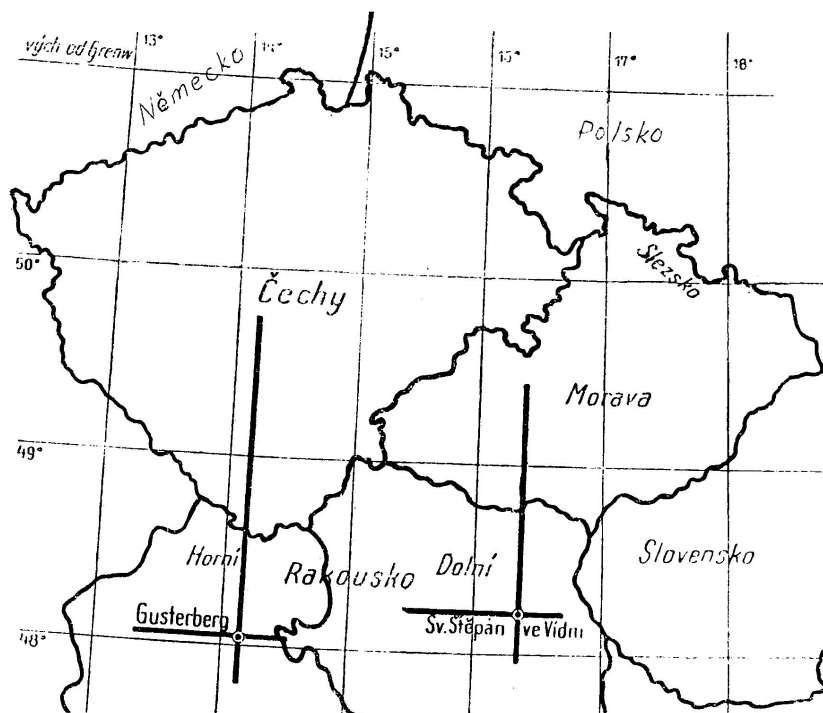
V první polovině 19. století bylo na našem území mapováno v měřítku 1:2880 na základě vybudované trigonometrické sítě (katastrální triangulace 1821 – 1864). Bylo použito Zachova elipsoidu ($a = 6\,376\,045$ m, $f^1 = 310$) a transversálního válcového zobrazení Cassiniovo-Soldnerovo. Tzn. osa válce leží v rovině rovníku a válec se dotýká základního poledníku. Poloha základního poledníku se určila astronomicky – na zvoleném trigonometrickém bodě, který byl určen jako počátek souřadnicové soustavy, se změřily astronomicky zeměpisné souřadnice a azimut alespoň jedné trigonometrické strany. Obraz určeného poledníku se zvolil za osu X , jejíž kladná osa směřovala k jihu. Hlavní kružnice procházející počátečním bodem soustavy kolmo k ose X byla zvolena za osu Y , jejíž kladná osa směřuje na západ. Poloha každého bodu byla určena sférickými souřadnicemi.

Při přechodu z koule do roviny se však zobrazil nezkresleně jen základní poledník. U ostatních poledníků, které se zobrazovaly jako rovnoběžky se základním poledníkem, se zanedbávala jejich sbíhavost. To samé platí i o pořadnicích Y , které se zobrazovaly jako kolmice k ose X . To mělo vliv na zkreslení délkové, úhlové i plošné. Poněvadž se zkreslení zvětšují se vzdáleností bodů od počátku, zvolilo se pro území bývalého Rakouska celkem 7 souřadnicových soustav a další 3 pro země uherské. Tím se zabránilo neúměrnému zkreslení.

Našeho území se týkají dva souřadnicové systémy.

První má počátek v trigonometrickém bodě Gusterberg v Horních Rakousích (jeho souřadnice jsou $\varphi = 48^{\circ}02'18,47''$, $\lambda = 31^{\circ}48'15,05''$ východně od Ferra). Gusterberský systém byl použit pro území Čech.

Pro území Moravy a Slezska byla zvolena za trigonometrický bod věž sv. Štěpána ve Vídni (jeho souřadnice jsou $\varphi = 48^{\circ}12'31,54''$, $\lambda = 34^{\circ}02'27,32''$ východně od Ferra).



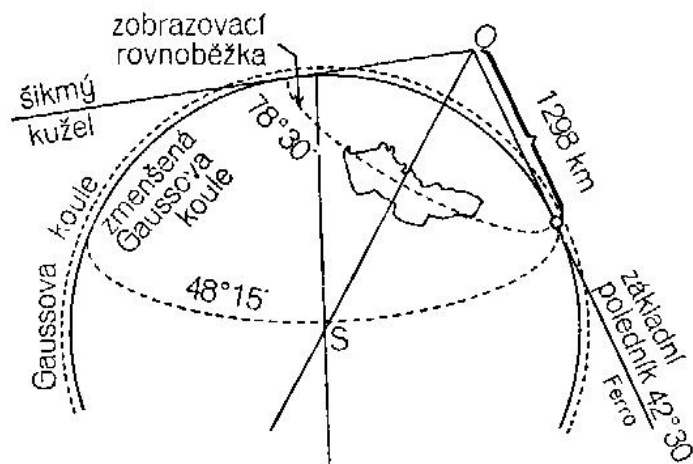
obr. 2.15 – Souřadnicové systémy stabilního katastru (Gusterberg a Svatý Štěpán)
[45.]

2.3.2 Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální

Souřadnicový systém jednotné trigonometrické sítě katastrální (S-JTSK) je definován Besselovým elipsoidem s referenčním bodem Hermannskogel, Křovákovým zobrazením (dvojitě konformní kuželové zobrazení v obecné poloze), převzatými prvky sítě vojenské triangulace (orientací, rozměrem i polohou na elipsoidu) a jednotnou trigonometrickou sítí katastrální.

O jednotné trigonometrické síti katastrální se zmiňují v následující kapitole.

Křovákovo zobrazení je jednotné pro celý stát. Navrhl a zpracoval jej Ing. Josef Křovák roku 1922.



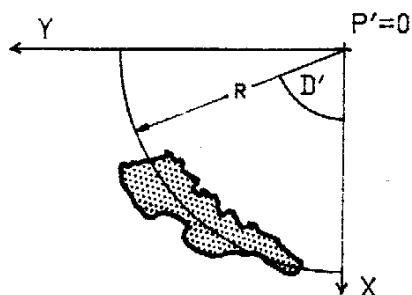
obr. 2.16 – Schéma Křovákova zobrazení [10.]

Zobrazení se označuje jako dvojité.

Tzn. že trigonometrické body se nejprve konformně zobrazí z Besselova elipsoidu na Gaussovu kouli. Pro území bývalé ČSR byla zvolena základní rovnoběžka $49^{\circ}30'$. Dále se referenční koule konformně zobrazila na kužel v obecné poloze. Obecná poloha kužele byla zvolena z důvodu protáhlé polohy zobrazovaného území ve směru severozápad – jihovýchod. Tím se rovnoběžkový pás, ve kterém ležela ČSR, zúžil z 370 km na pouhých 280 km a maximální délkové zkreslení se na okrajích pásu zmenšilo z $+42$ cm/km na $+24$ cm/km. Zvolenou základní kartografickou (dotyková rovnoběžka kuželové plochy v obecné poloze) rovnoběžkou je rovnoběžka $78^{\circ}30'$.

Koule se však nejprve zmenšila o $0,0001 * R$. Tím jsme místo jedné nezkreslené kartografické rovnoběžky dostali dvě nezkreslené rovnoběžky a délkové zkreslení dosahuje hodnot pouze v rozmezí -10 až $+14$ cm/1 km.

Za počátek pravoúhlé rovinné soustavy byl zvolen obraz vrcholu kužele. Osa X je tvořena obrazem základního poledníku ($\lambda = 42^{\circ}30'$ východně od Ferra⁵) a její kladný směr je orientován k jihu. Osa Y je kolmá k ose X a směřuje na západ. Tím se dostala celá republika do 1. kvadrantu a všechny souřadnice jsou kladné. Navíc pro libovolný bod na území bývalé ČSR platí $Y < X$.



obr. 2.17 – Umístění bývalé ČSR v souřadnicovém systému JTSK [44.]

⁵ Rozdíl zeměpisné šířky hvězdárny na ostrově Ferro a hvězdárny Greenwiche (nulté poledníky zeměpisných souřadnic) byl stanoven a je používán $18^{\circ}40'$

Převod zeměpisných souřadnic na pravoúhlé je podrobně probírán v [5.].

Pozn. [9.], [43.] **Systém S-JTSK/95** (pracovní název)

Nejde o nový systém, ale pouze o zpřesněný systém S-JTSK.

Systém S-JTSK/95

- a) zavádí geocentrický souřadnicový systém – umožňuje tedy bezprostřední nasazení techniky GPS,
- b) z geocentrických souřadnic (X, Y, Z) resp. (φ, λ, H) definuje (jednoznačně) rovinné geodetické souřadnice odpovídajících bodů v Křovákově zobrazení – umožňuje tedy provádět klasická geodetická měření,
- c) umožňuje použití stávajících grafických podkladů vyhotovených v S-JTSK od měřítka 1 : 1 000 směrem k menším měřítkům – je tedy vhodný pro přesné technické a katastrální měřické práce i pro řešení otázek lokalizace údajů v rámci GIS/LIS (střední hodnota rozdílu souřadnic od stávajícího S-JTSK je cca 10 cm.

Vlastnosti systému:

- 1) bude existovat přesný vztah mezi ETRF-89 a S-JTSK/95,
- 2) bude mít přesně definované měřítko (dané transformační rovnicí mezi S-JTSK/95 a ETRF-89,
- 3) souřadnice se budou od stávajícího S-JTSK lišit jen velmi málo.

Realizace systému:

Prostřednictvím 176 identických bodů byly vypočteny parametry Helmertovy prostorové transformace mezi systémy ETRS-89 a S-42/83. Touto transformací pak byly všechny trigonometrické body převedeny z S-42/83 do ETRS-89. Zbytkové odchylky na identických bodech byly rozděleny dotransformací. Systém byl označen jako S-JTSK/G. Opět pomocí již zmíněných 176 bodů byly vypočteny parametry Helmertovy prostorové transformace tentokrát mezi systémy S-JTSK/G a S-JTSK. Všechny body byly převedeny z S-JTSK/G do S-JTSK. Pro všechny body byly tedy známy dvojí souřadnice (v S-JTSK původním a novém). Rozdíly obou souřadnic byly zmenšeny kvadratickou dotransformací. Uvedená dotransformace je zahrnuto do Křovákova zobrazení jako jeho modifikace.

Přínos: Systém odstraňuje chybné měřítko stávajícího S-JTSK a lokální deformace S-JTSK.
Pozn. Zatím nebyl použit.

Více informací viz [9.], [12.].

2.3.3 Souřadnicový systém S-42

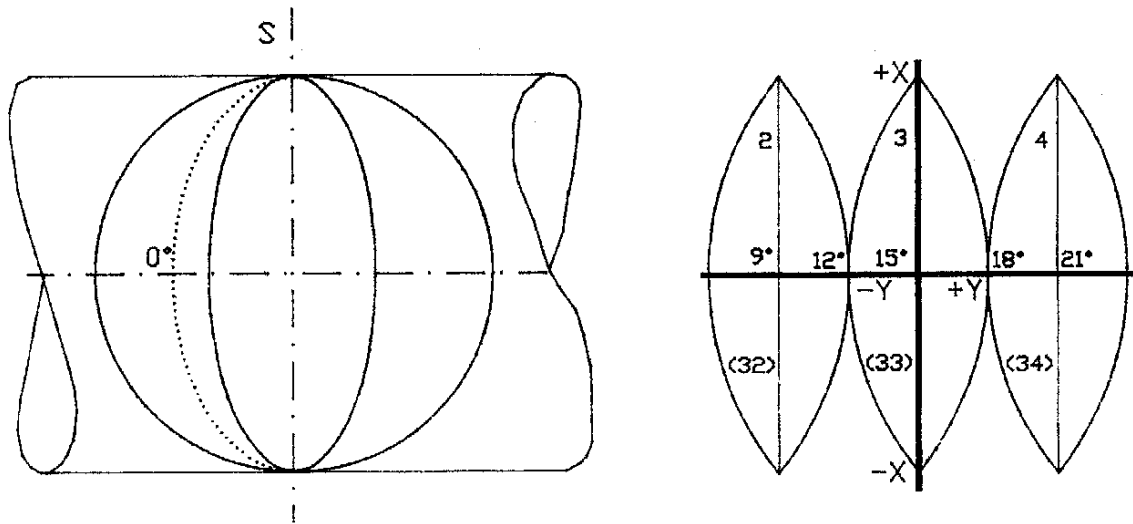
Souřadnicový systém S-42 používá Krasovského elipsoid s referenčním bodem v Pulkavu. Souřadnice bodů jsou vyjádřené v 6° a 3° pásech Gaussova zobrazení. Geodetickým základem je astronomicko-geodetická síť (AGS), která byla vyrovnána v mezinárodním spojení a do ní byla transformována Jednotná trigonometrická síť katastrální (viz následující kapitola: Geodetické základy).

Pozn. Před systémem S-42 se krátce používal předběžný souřadnicový systém S-52.

Základem mu byla astronomicko-geodetická síť západní části SSSR. Tento prozatímní systém měl být přesný natolik, aby se od pozdějšího přesnějšího lišil jen velmi málo a

aby se nepromítly žádné nepříznivé důsledky do již započatého topografického mapování. Ze SSSR nám byly dodány souřadnice vybraných bodů (byly použity body z dřívější vojenské triangulace) na našem území, vypočtených v S-42. Pro transformaci bodů JTS byl vypočten transformační klíč. Ostatní body byly pouze převedeny prostřednictvím tabulek.

Použitým zobrazením je válcové, konformní, příčné Gaussovo zobrazení. Elipsoid je zobrazován přímo na plášť válce. Válec se dotýká referenční plochy v základním poledníku, který je vždy volen ve středu pásu.



obr. 2.18 – Gaussovo zobrazení šestistupňovými pásy [44.]

Ze šestistupňových pásů případnou na naše území pásy 33. a 34. se základními poledníky 15° a 21° na východ od Greenwiche. Lze použít (pro větší měřítko) třístupňové pásy. Tím se docílí menších hodnot zkreslení na okrajích pásů. Ze třístupňových pásů zasahují na naše území pásy 34. až 38. se základními poledníky $12^\circ, 15^\circ, 18^\circ, 21^\circ$ a 24° východní zeměpisné délky.

Každý pás má svůj vlastní souřadnicový systém. Obraz základního poledníku je osa X, jejíž kladná orientace jde k severu. Obraz rovníku je osa Y a její kladná orientace jde k východu. Souřadnice X jsou pro celé státní území kladné. Souřadnice Y mohou být kladné i záporné. Pro výpočty v běžné praxi se souřadnice Y převádějí na souřadnice kladné přičtením 500 km a předřazením čísla pásu zmenšené o hodnotu 30.

Délkové zkreslení dosahuje maximální hodnoty na okraji pásu a to 0,57 m/km u šestistupňového pásu a 0,14 m/km u třístupňového pásu [5.]. Z konformity zobrazení plyne, že úhlové zkreslení je rovno 0. Meridiánová konvergence (úhlový rozdíl mezi místním a osovým poledníkem pásu) nepřesáhne pro naši zeměpisnou šířku na okraji pásu hodnotu 3° .

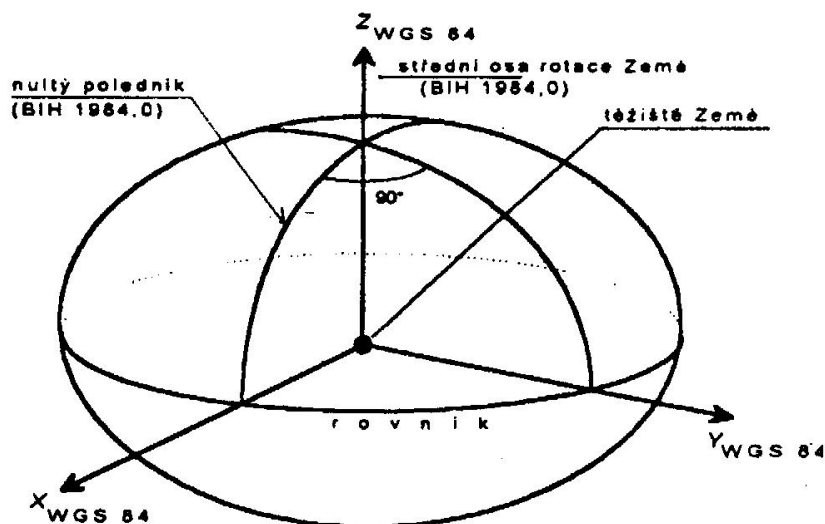
Pozn.: Po vyrovnání AGS v roce 1958 došlo k dalšímu zpřesnění a doplnění naměřených hodnot. Shromážděný materiál byl poté znovu poslán na vyrovnání do Moskvy. Vyrovnání bylo provedeno roku 1983 spolu s národními sítěmi ostatních států a výsledná síť nese označení Jednotná astronomicko-geodetická síť (JAGS) a souřadnicový systém je označován S-42/83.

2.3.4 Souřadnicový systém WGS 84

Jedná se o vojenský souřadnicový systém používaný státy NATO. Referenční plochou je elipsoid WGS 84 (World Geodetic System). Použité kartografické zobrazení se nazývá UTM (Univerzální transverzální Mercatorovo).

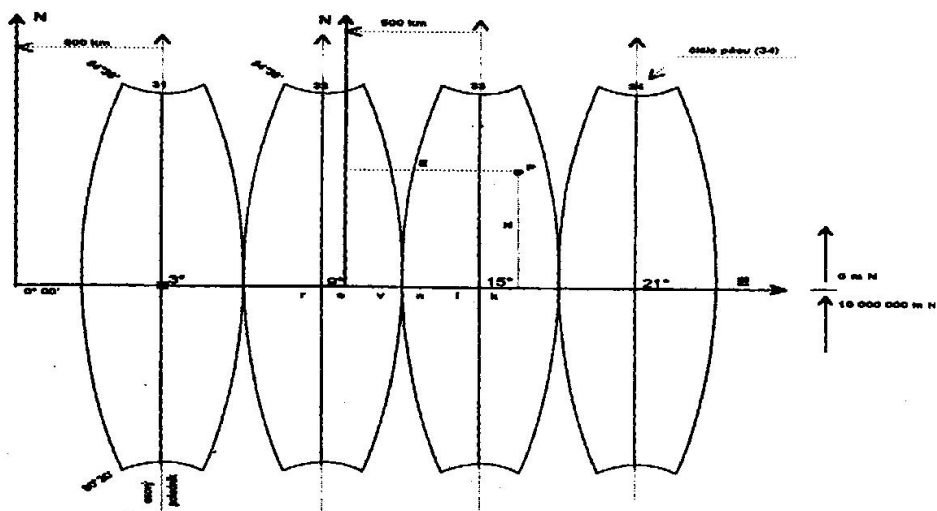
Systém má počátek v hmotném středu Země (s přesností cca 2 m) – jedná se o geocentrický systém. Osa Z je totožná s osou rotace Země v roce 1984. Osy X a Y leží v rovině rovníku. Počátek a orientace jeho os X, Y, Z jsou realizovány pomocí 12 pozemských stanic se známými přesnými souřadnicemi, které nepřetržitě monitorují dráhy družic systému GPS-NAVSTAR.

Schéma geocentrického souřadného systému WGS84



obr. 2.19 – Souřadnicový systém WGS 84 [59.]

Zobrazení UTM je příčné konformní válcové Mercatorovo zobrazení poledníkových pásů. Každý pás má vlastní souřadnicovou soustavu. Osa N je vložena do obrazu osového poledníku. Osa E je vložena do obrazu rovníku. Střední poledník šestistupňového pásu má zkreslení 0,9996, tedy vliv je -40 cm/km. Mezi dvěma nezkrácenými poledníky se délky zkracují, vně se prodlužují. Na okraji činí vliv zkreslení $+17$ cm/km.



obr. 2.20 – Zobrazení UTM [59.]

Pro odstranění záporných znamének se k souřadnici E přičítá hodnota 500 km, obdobným způsobem se vyhneme záporným znaménkům i na jižní polokouli, kde k souřadnicím N přičítáme 10 000 km.

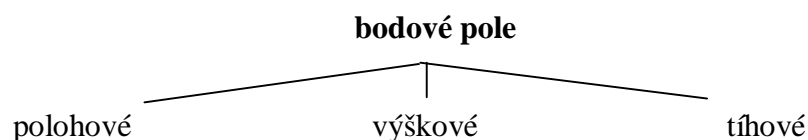
Souřadnicový systém UTM pokrývá povrch Země mezi 80° jižní šířky a 84° severní šířky. Pro polární oblasti se používá polární stereografická projekce (UPS) s počátkem v obrazu severního či jižního pólu.

Určení polohy bodu pomocí E , N však není jednoznačné. Musíme doplnit informaci, ve kterém šestistupňovém pásu se bod nachází. K přesné lokalizaci polohy bodu se používá hlásná síť UTM.

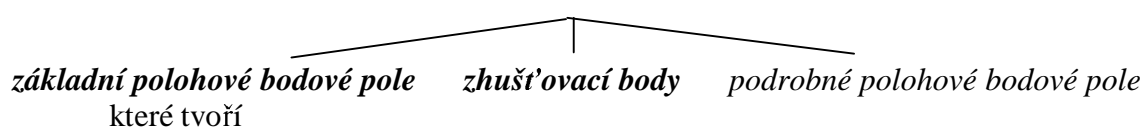
Systém hlásné sítě UTM je založen na kombinování obrazu prostorové zeměpisné sítě, který je členěn do sférických čtyřúhelníků a obrazu rovinné sítě s členěním do 100 km čtverců.

3. Geodetické základy

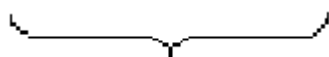
Jedná se o výběr přijatých geodetických sítí. Body těchto sítí jsou trvale stabilizované, případně trvale signalizované. (viz dále). [61.] Soubory bodů pak vytvářejí bodová pole, která se dělí podle účelu na polohové, výškové a tíhové bodové pole.



Polohové bodové pole tvoří [61.]:

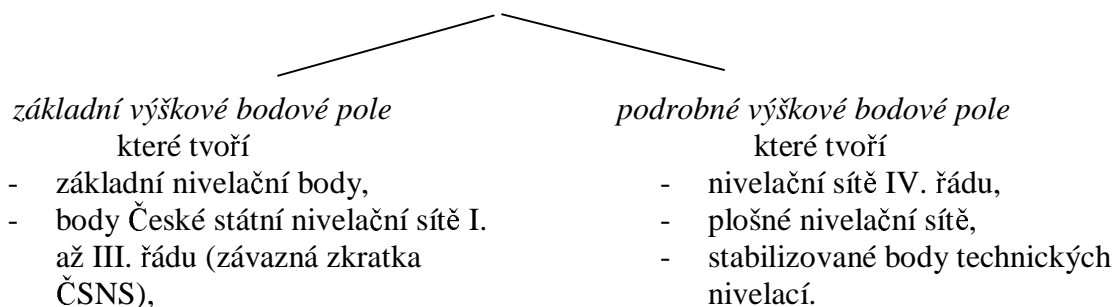


- body referenční sítě nultého řádu,
- body Astronomicko-geodetické sítě (závazná zkratka "AGS"),
- body České státní trigonometrické sítě (závazná zkratka "ČSTS"),
- body geodynamické sítě.



Geodetické polohové základy

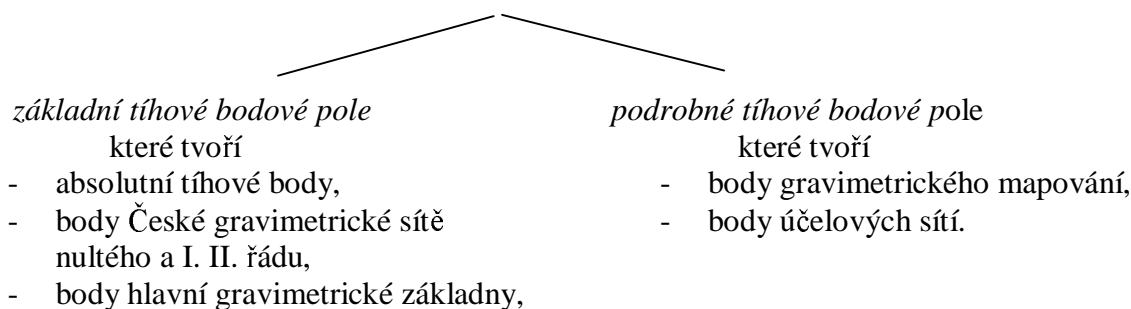
Výškové bodové pole tvoří [61.]:



- základní výškové bodové pole které tvoří*
- základní nivelační body,
 - body České státní nivelační sítě I. až III. řádu (závazná zkratka ČSNS),

- podrobné výškové bodové pole které tvoří*
- nivelační sítě IV. řádu,
 - plošné nivelační sítě,
 - stabilizované body technických nivelací.

Tíhové bodové pole tvoří [61.]:



- základní tíhové bodové pole které tvoří*
- absolutní tíhové body,
 - body České gravimetrické sítě nultého a I. II. řádu,
 - body hlavní gravimetrické základny,

- podrobné tíhové bodové pole které tvoří*
- body gravimetrického mapování,
 - body účelových sítí.

Až do nedávné doby se geodetické polohové základy (GPZ) budovaly klasickou triangulací (viz. Budování klasických polohových bodových polí). Tímto způsobem se však GPZ již nikdy budovat nebudou. V uplynulém desetiletí se GPZ zpřesňovaly pomocí elektronických dálkoměrů a metod kosmické geodézie. Roli klasických AGS přebírají postupně body a sítě určené metodami kosmické geodézie. Mezi moderní geodetické základy patří např. NULRAD či DOPNUL. Nová situace vznikla i na poli mezinárodní spolupráce. Došlo ke spojení geodetických sítí celé Evropy (např. EUREF). Dnes se začíná budovat síť permanentních stanic (firma by/s@t) pro aplikaci metody DGPS (diferenciální GPS). Více se o této síti zmíním v odstavci Aktivní polohové systémy.

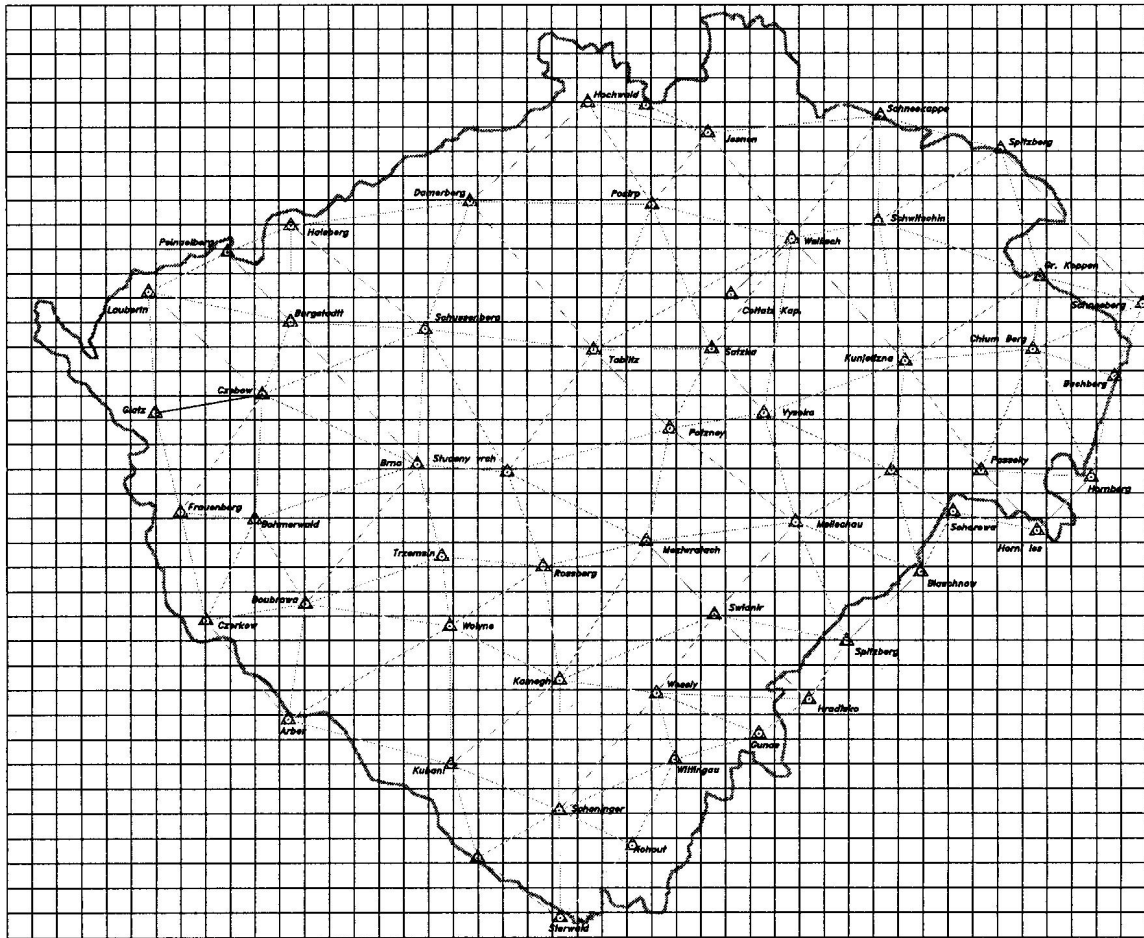
3.1 Budování klasických polohových bodových polí

GPZ byly na území České republiky budovány v následujících etapách:

1. Katastrální triangulace (1821-1864)
2. Vojenská triangulace (1862-1898)
3. Československá Jednotná trigonometrická síť katastrální (JTSK)
4. AGS

Katastrální triangulace (1821-1864)

V letech 1821-1840 bylo území bývalé rakouské monarchie pokryto první souvislou trigonometrickou sítí I. řádu (obr. 3.1), která byla dále zhuštěna trigonometrickou sítí II. a III. řádu (číselná triangulace). Katastrální triangulace probíhala až do roku 1864 [43.] pro mapování stabilního katastru v měřítku 1:2 880. Vybudování trigonometrické sítě bylo svěřeno triangulační kanceláři c.k. generálního štábu.



obr. 3.1 – Trigonometrická síť I. řádu pro mapování stabilního katastru na území Čech [11.]

Práce byly prováděny po jednotlivých zemích. Vodorovné úhly sítě I. řádu byly měřeny Reichenbachovými teodolity až dvanáctinásobnou repeticí, zenitové úhly byly měřeny třikrát ve dvou polohách dalekohledu [11.]. Měřeny byly čtyři základny:

- a) u Vídeňského Nového Města v Dolním Rakousku,
- b) u Welsu v Horním Rakousku,
- c) u Radouce v Bukovině,
- d) u Hall v Tyrolsku.

Měřené základny posloužily k odvození rozměru sítě. Délkovou jednotkou při měření a výpočtech byl vídeňský sáh¹.

Síť I. řádu byla vyrovnána po menších celcích, přičemž byl uvažován sférický excus. (Průměrná vzdálenost bodů I. řádu byla 40 km). Jednotlivé části již ale nebyly správně vyrovnány vzájemně mezi sebou. To má za následek zejména jiné stočení.

Síť II. řádu s délkou stran 9 – 15 km byla vyrovnána jako síť rovinná. Délka stran sítě III. řádu byla 4 – 9 km.

¹ 1 vídeňský sáh (1°) = 1,896484 m.

Podmínkou bylo, aby na triangulační (fundamentální) list připadly alespoň tři trigonometrické body číselně určené.

Pro potřeby podrobného měření byla číselná síť zhuštěna sítí IV. řádu (grafickou triangulací, prováděnou metodou grafického protínání pomocí měřického stolu). Přitom byla stanovena podmínka, aby na jeden mapový list padly alespoň tři body.

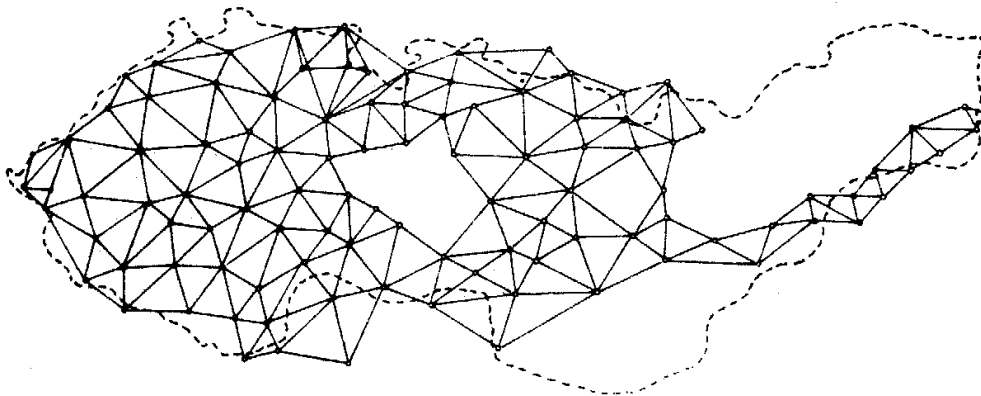
Výpočty trigonometrické sítě byly prováděny na Zachově elipsoidu.

Nevýhody katastrální triangulace jsou následující:

- 1) síť byla budována bez řádného plánu a nebyla vyrovnána jako celek,
- 2) body byly stabilizovány dřevěnými kůly a jejich trvalá stabilizace byla provedena až 20 let po triangulaci (to mělo vliv na přesnost polohy jednotlivých bodů),
- 3) v Gusterberském systému bylo nalezeno stočení kladné větve osy X od severního směru k západu o $4'22,3''$.

Vojenská triangulace (1862-1898)

Vojenská síť byla budovaná Vojenským zeměpisným ústavem ve Vídni v rámci střeoevropského stupňového měření. I když se jednalo o plošnou síť, byly na Moravě a na Slovensku poměrně velké mezery.



obr. 3.2 – Vojenská síť [44.]

Celkem bylo měřeno 22 základen, z nich dvě na našem území – základna u **Josefova** a u Chebu. Většina základen však plnila pouze kontrolní funkci. Ke zpracování sítě byl použit Besselův elipsoid. Základním trigonometrickým bodem byl Hermannskogel, jehož souřadnice a azimut byly změřeny astronomicky a byly použity pro výpočet geodetických souřadnic celé sítě. K výpočtu souřadnic bylo použito rozvinovací metody, a to bez korekcí z odchylky tížnice. (Ta byla zjištěna později). Výsledkem byla poměrně přesná síť, kde např. polovina uzávěrů trojúhelníků byla menší než $1''$.

Nedostatkem sítě je zejména její chybná orientace (téměř $10''$ v azimutu) a dále, že její rozměr byl určen jen s přesností, jakou dovoluje odvozování rozměru z jedné geodetické základny pro rozsáhlejší území.

Jednotná trigonometrická síť katastrální

Síť byla budována Triangulační kanceláří v čele s přednostou Ing. Josefem Křovákem v letech 1920 až 1957.

Z časových důvodů však nebylo možné budovat síť dle všech tehdy známých požadavků:

- nebyla provedena nová astronomická měření,
- nebyly měřeny geodetické základny,
- síť nebyla spojena se sítěmi sousedních států.

Rovněž z časových důvodů byly na části území převzaty měřené osnovy směrů z vojenské triangulace (1862-1898). Celkem se jednalo o 42 bodů v Čechách a 22 bodů v Podkarpatské Rusi. Na ostatních bodech bylo měřeno metodou Schreiberovou.

Stabilizace nových trigonometrických bodů se zpravidla prováděla kamenným hranolem o rozměrech 26x26x100 až 120 cm, označeným na horní ploše křížkem a po stranách písmeny K.V. a letopočtem, dále čtvercovou deskou o rozměrech 50x50 cm s centricky umístěným křížkem a další podzemní značkou. Kameny, označující trigonometrické body vojenské triangulace I. řádu o rozměrech 32x32x120 cm byly ponechány. Stabilizace bodů byla zajištěna dalšími 3 nebo 4 zajišťovacími body, umístěnými zpravidla na majetkových hranicích. Před měřením byly body signalizovány zpravidla čtyřbokými pyramidami se zvýšeným postavením nebo měřickými věžemi. [43.]

Síť celkem obsahovala 268 bodů, z nichž 107 bylo identických s body I. řádu vojenské triangulace. Rozměr, poloha a orientace sítě na Besselově elipsoidu byly určeny nepřímou prostřednictvím zmíněných identických bodů s vojenskou triangulací.

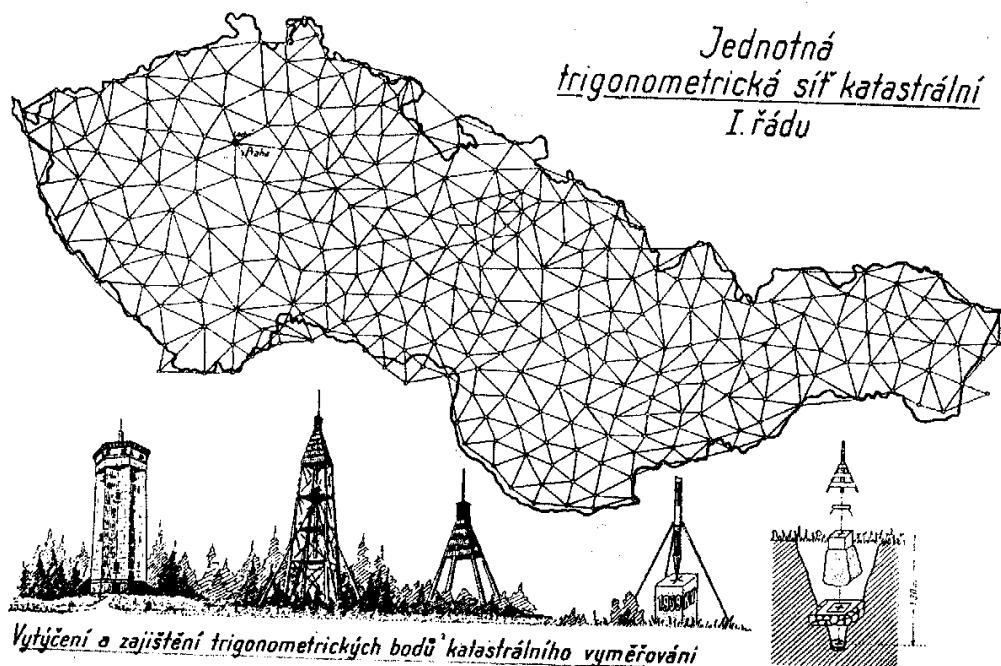
Definitivní tvar sítě byl získán jejím úhlovým vyrovnáním.

Rozměr, poloha a orientace sítě byly, jak již bylo zmíněno, určeny nepřímou pomocí dvojích odlišných souřadnic v rovině Křovákova zobrazení. Tyto dvojice souřadnice se získaly [9.]:

- k zeměpisným souřadnicím 107 bodů z vojenské triangulace se vypočetly rovinné pravouhlé souřadnice v Křovákově zobrazení
- rovinné souřadnice všech bodů sítě byly vypočteny tak, že se převzaly souřadnice bodů Chmelová a Velký Choč. Vypočetly se jejich souřadnice v Křovákově zobrazení a z těchto souřadnic se spočetly délky a směrníky všech ostatních stran a z těchto údajů již bylo možné vypočíst prozatímní souřadnice všech 268 bodů

Helmertovou transformací se posoudila kvalita bodů vojenské triangulace. Ukázalo se, že nejlepší výsledky se dosáhne, použije-li se 42 bodů v Čechách. Tyto body byly použity k výpočtu transformačního klíče a pomocí něj byly poté spočteny definitivní souřadnice všech trigonometrických bodů I. řádu v rovině Křovákova zobrazení.

V letech 1928-1936 byla tato síť I. řádu doplněna v Čechách o dalších 93 bodů a později v letech 1949-1950 o dalších 20 bodů podél československo-maďarské hranice.



obr. 3.3 – Jednotná trigonometrická síť katastrální I. řádu z roku 1936 [44.]

Od roku 1928 byla síť zhušťována body II., III. a IV. řádu a body podrobné trigonometrické sítě (později označované body V. řádu).

Na území dnešní České republiky se nachází přibližně 28 900 trigonometrických bodů.

Relativní přesnost sítě je dobrá. Charakterizuje ji střední chyba v poloze sousedních bodů V. řádu, která je rovna cca 1 cm. Celková kvalita však dobrá není. Síť má proměnlivé měřítko, je otočena o cca 10'' a je posunuta o přibližně 15'' směrem k východu z důvodu zanedbání tížnicové odchylky na bodě Hermannskogel.

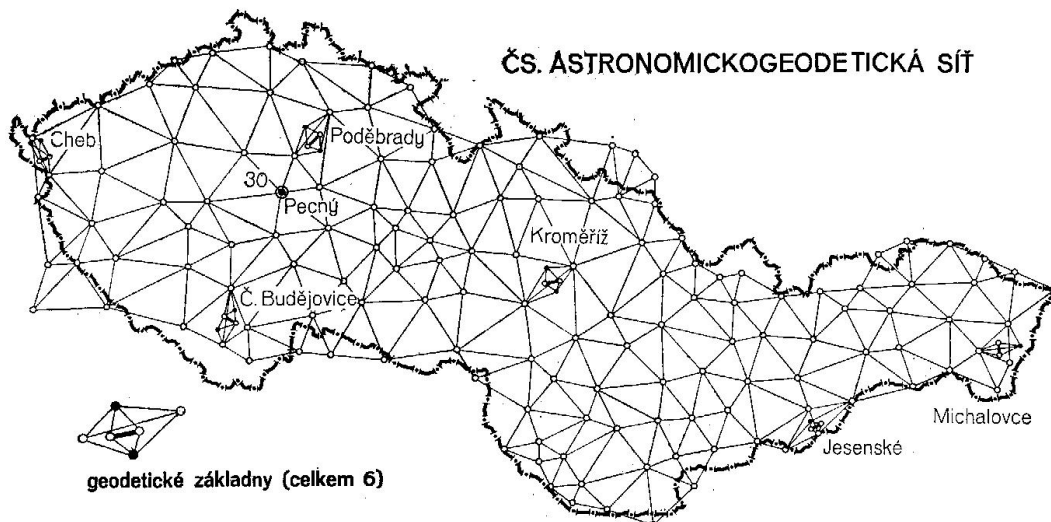
Astronomicko-geodetická síť

Od roku 1931 byla budována AGS (dříve označovaná jako Základní trigonometrická síť) a to s nejvyšší dosažitelnou přesností a podle nejnovějších vědeckých poznatků. Průměrná strana trojúhelníků byla zvolena 36 km. Většina bodů sítě je identická s body I. řádu JTSK. Všechny body sítě byly nově stabilizovány.

Stabilizace se skládala z jedné značky povrchové (kamenný hranol 30x30x90 cm s křížkem, označený TP a trojúhelníkem) a třech značek podzemních (první podzemní značka je skleněná deska 16x16 cm s křížkem v betonové desce, na které stojí povrchová značka, druhá podzemní značka je kamenná deska 60x60x10 cm s křížkem, třetí podzemní značka je kamenná krychle 20x20x20 cm s křížkem). Kromě těchto typů stabilizací bylo na bodech sítě postaveno též 21 železobetonových pilířů, 9 pilířů zděných. Kromě toho byly na 9 bodech postaveny zděné měřické věže a na 7 bodech bylo použito věží hradů a rozhleden. [43.]

Byla provedena astronomická a gravimetrická měření, úhly byly měřeny metodou vrcholovou a Schreiberovou, byly zaměřeny další základny, síť byla napojena na sítě sousedních států. Do roku 1954 byly měřické práce ukončeny. Celkem bylo změřeno [12.]:

- úhlově 227 trojúhelníků se 144 vrcholy,
- astronomicky 53 Laplaceových bodů²,
- 6 základen invarovými dráty (včetně rozvinovacích sítí),
- gravimetricky okolí 108 bodů I. řádu a 499 bodů II. řádu.



obr. 3.4 – Československá astronomicko-geodetická síť s vyznačenými základnami [10.]

Síť byla vyrovnána v letech 1956-58 společně s dalšími sítěmi zemí Východní Evropy. Všechny body však nemohly být vzhledem k možnostem výpočetní techniky vyrovnány a proto byla použita transformace, která však zachovává souřadnice bodů vyrovnaných.

Pozn. Od vyrovnání AGS v letech 1956-58 bylo provedeno další zpřesnění a doplnění naměřených hodnot [43.]:

- bylo zaměřeno (elektronickými dálkoměry) 14 délek stran AGS pro "Základnu kosmické triangulace" Pulkovo-Potsdam-Sofia,
- bylo zaměřeno 10 délek stran AGS, rozložených rovnoměrně v AGS; z toho 6 stran (Chebská je posunuta) jsou původní tzv. výchozí strany, odvozené ze základen, zaměřených invarovými dráty,
- byly zaměřeny některé nové astronomické veličiny, zejména azimuty, a další překontrolovány,
- byly nově určeny tížnicové odchylky a převýšení kvazigeoidu,
- byly opraveny některé měřené veličiny a doplněno souvislé spojení se sítěmi sousedících států (NDR, Polsko, SSSR, Maďarsko).

² Laplaceovy body jsou body, na nichž byla určená geodetická zeměpisná šířka, délka a azimut a z astronomických prvků alespoň astronomická zeměpisná délka a azimut.

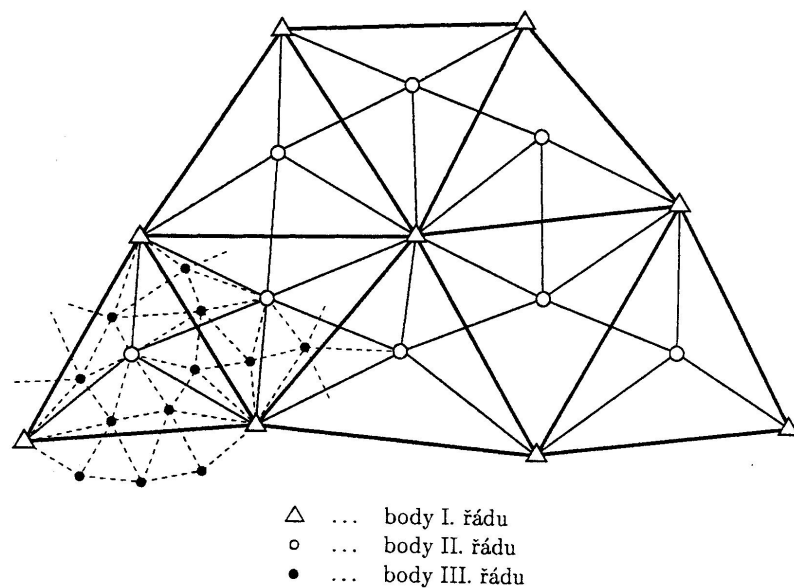
Bylo provedeno mezinárodní vyrovnání sítě s doplněnými údaji a sítě států východní Evropy byly spojeny do Jednotné astronomicko geodetické sítě.
(Při tomto zpřesnění již nebyly stabilizovány nové body!)

Přínos nového vyrovnání [43.]:

- došlo k menšímu posunu, pootočení sítě i k mírnému prohnutí sítě,
- došlo k většímu ovlivnění sítě na hranicích, neboť jde nyní o souvislou plošnou síť,
- došlo k významnému zlepšení tvaru sítě a její orientace zejména tam, kde při 1. mezinárodním vyrovnání v r. došlo k deformacím v důsledku chybných azimutů, které tehdy do vyrovnání vstupovaly jako pevné. Týká se to zejména jižní poloviny Moravy,
- došlo ke všeobecnému zlepšení rozměru sítě, neboť do nového vyrovnání bylo vzato větší množství přímo měřených délek

3.1.1 Projekt budování polohových bodových polí

Při budování polohových bodových polí je třeba použít postup, který by omezil hromadění chyb. Zásadou je postupovat z velkého do malého. Nejprve se tedy budují sítě I. řádu s nejvyšší možnou přesností a do nich jsou vkládány sítě II. až V. řádu, až průměrná vzdálenost bodů vyhovuje pro budování podrobného polohového bodového pole (1,5 – 2 km).



obr. 3.5 – Postup budování polohových bodových polí [9.]

Za základní prvek byl zvolen trojúhelník, který nejlépe zaručuje tuhost sítě. Proto je také tato síť označována jako síť trigonometrická (trojúhelníková).

Sítě I. řádu pokrývají buď souvisle celé území (plošné sítě) či jsou vedené jako řetězce přibližně po polednicích a rovnoběžkách.

Při budování trigonometrických sítí je třeba nejprve zvolit na zemském povrchu body (vrcholy trojúhelníků). Tyto body dominují nad širokým okolím, jsou trvale stabilizovány, případně signalizovány a polohově určeny.

K budování trigonometrických sítí je možné použít některou z následujících metod:

- triangulace,
- trilaterace,
- spojení obou metod.

Triangulace

V trigonometrické síti se měří v každém trojúhelníku všechny úhly. Třetí úhel je nadbytečný prvek a slouží pro kontrolu a vyrovnání sítě [9.], [3.].

K určení rozměru sítě je třeba znát délku alespoň jedné výchozí trigonometrické strany. Dříve nebylo možné měřit délky přímo a proto se měřily v tzv. základnových sítích. Délky všech ostatních stran je možné postupně vypočítat sinovými větami. V praxi se však měřilo několik trigonometrických stran. Tím dochází ke zpřesnění sítě a zamezí se nepřesnostem ve výsledcích, způsobených hromaděním chyb v úhlech.

Pro orientaci sítě na elipsoidu je nutné změřit azimut některé ze stran. Změříme-li u výchozího bodu astronomicky souřadnice φ a λ (vztažené přímo k zemskému povrchu), můžeme vypočítat z délek stran a jejich azimutů zeměpisné souřadnice (φ , λ) všech dalších bodů.³

Celá síť se z elipsoidu zobrazí na vhodně zvolenou zobrazovací plochu a vypočítají se pravoúhlé souřadnice této sítě ve zvoleném souřadnicovém systému.

Trilaterace

Přímo se měří délky všech trigonometrických stran v síti. To bylo možné až s nástupem elektronických dálkoměrů. Délky se mohou vyrovnat buď přímo na elipsoidu či v rovině zvoleného kartografického zobrazení. Poloha a orientace sítě na elipsoidu se určí stejně jako v triangulaci (astronomickým měřením souřadnic a azimutů alespoň na výchozím bodě). V praxi se měří další azimuty pro zpevnění sítě.

Spojení obou metod

V síti se měří všechny úhly a některé délky či naopak, nebo všechny úhly a všechny délky. Takovéto měření je samozřejmě značně nákladné a provádí se pouze v lokálních sítích. Např. Místní trigonometrická síť Praha [7.], [6.].

3.2.1 Stabilizace bodů

Technické požadavky na body jsou dány předpisy [61.], [60.].

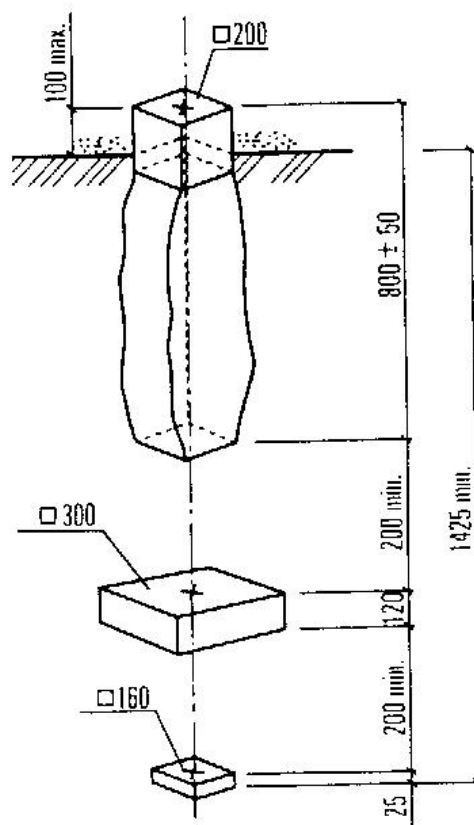
³ Souřadnice přímo (astronomicky) měřené = astronomické souřadnice.
Souřadnice odvozené (geodetickou cestou) = geodetické souřadnice.
Rozdíl obou souřadnic v určitém bodě = tížnicová odchylka θ .

[61.] Poloha **bodu základního polohového bodového pole** (dále jen "trigonometrický bod") je volena tak, aby

- a) nebyl ohrožen,
- b) jeho signalizace byla jednoduchá,
- c) byl využitelný pro připojení bodů polohového bodového pole.

Trigonometrický bod je stabilizován značkami jedním z následujících způsobů:

- 1) povrchovou a dvěma podzemními značkami.

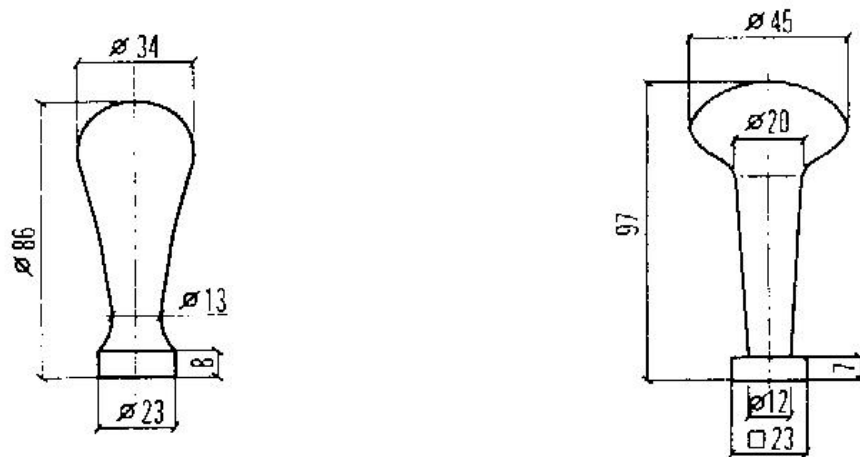


obr. 3.6 – Stabilizace povrchovou a dvěma podzemními značkami [61.]

Povrchovou značkou je kamenný hranol (obvykle žulový) s opracovanou hlavou a vytesaným křížkem ve směru úhlopříček na vrchní ploše hlavy hranolu. Vrchní podzemní značkou je kamenná deska a spodní podzemní značkou je skleněná nebo kamenná deska, které mají křížky jako povrchová značka. Středů křížků všech značek, ke kterým se vztahují souřadnice, musí být umístěny ve svislici s mezní odchylkou 3 mm,

- 2) povrchovou značkou podle písmena a) a podzemní značkou, kterou je kamenná deska s křížkem jako u povrchové značky, zabetonovanou ve skále,
- 3) povrchovou značkou podle písmena a) nebo čepovou nivelační značkou s křížkem, popřípadě otvorem, které jsou zabetonovány ve skále (skalní stabilizace). V obou

případech je značka trigonometrického bodu zajištěna čtyřmi zabetonovanými nivelačními značkami s křížkem nebo dvěma zajišťovacími body,



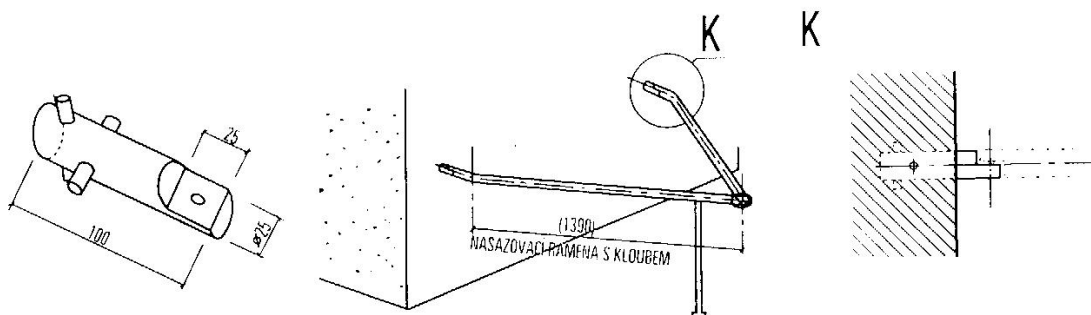
obr.3.7 – Nivelační značky [61.]

- 4) kovovým čepem s křížkem osazeným do ploché střechy stavby (střešní stabilizace, obr. 3.8), přičemž tato značka je zajištěna dvěma zajišťovacími body umístěnými mimo stavbu,



obr. 3.8 – Stabilizace kovovým čepem [61.]

- 5) dvěma konzolovými značkami zapuštěnými do svislé plochy staveb (boční stabilizace, obr. 3.9). Souřadnice bodu jsou vztaženy k vrcholu pomyslného rovnoramenného trojúhelníku (délka ramen je 1,390 m), jehož základnu vymezují konzolové značky. Nadmořská výška je vztažena vždy k horní ploše levé konzoly při pohledu od vrcholu trojúhelníku. Trigonometrický bod je zajištěn dvěma zajišťovacími body.



obr. 3.9 – Boční stabilizace [61.]

Trigonometrický bod s trvalou signalizací (makovice věže kostela apod.) je vždy zajištěn dvěma **zajišťovacími body**. Mezi těmito body i trigonometrickým bodem musí být vzájemná viditelnost.

První zajišťovací bod se stabilizuje jako trigonometrický bod třemi značkami podle odstavce 1). Druhý zajišťovací bod se stabilizuje povrchovou a vrchní podzemní značkou podle odstavce 1), přičemž povrchová značka má rozměr 160 x 160 x 750 mm. V zastavěných územích se zajišťovací body stabilizují zpravidla konzolovými značkami podle odstavce 5).

Případný další zajišťovací bod trigonometrického bodu je stabilizován jako druhý zajišťovací bod. Vzdálenost zajišťovacího bodu od trigonometrického bodu je menší než 500 m.

Z trigonometrického bodu musí být z výšky měřického přístroje zajištěna orientace (viditelný směr) na jiný trigonometrický bod nebo zhušťovací bod nebo trvalý a jednoznačně identifikovatelný bod (orientační směr) nebo zřízený orientační bod.

Orientační bod se zřizuje ve vzdálenosti 80 až 300 m od trigonometrického bodu. Stabilizuje se jako druhý zajišťovací bod nebo nivelační značkou uvedenou v odstavci 3).

[61.] Poloha **zhušťovacího bodu** se volí tak, aby nebyla ohrožena stabilizace značky tohoto bodu a přitom byl bod využitelný pro zeměměřické činnosti.

Zhušťovací bod se stabilizuje jedním z následujících způsobů:

- 1) povrchovou a jednou podzemní značkou. Povrchovou značkou je kamenný hranol (obvykle žulový) o celkové délce nejméně 700 mm s opracovanou hlavou o rozměrech 160 mm x 160 mm x 100 mm s vytesaným křížkem ve směru úhlopříček na horní ploše hlavy hranolu. Podzemní značkou je kamenná deska o rozměrech nejméně 200 mm x 200 mm x 70 mm s obdobným křížkem jako na povrchové značce. Podzemní značka je umístěna pod povrchovou značkou ve vzdálenosti minimálně 200 mm. Střed křížků, ke kterým se vztahují souřadnice, musí být umístěny ve svislici s mezní odchylkou 5 mm,
- 2) povrchovou značkou podle odstavce 1) nebo nivelační značkou s křížkem, popřípadě otvorem, které jsou zabetonovány ve skalním nebo betonovém masivu,
- 3) kovovým čepem s křížkem osazeným do ploché střechy stavby (střešní stabilizace),
- 4) dvěma konzolovými značkami, zapuštěnými do svislé plochy staveb (boční stabilizace). Souřadnice bodu jsou vztaženy k vrcholu pomyslného rovnoramenného trojúhelníka, jehož základnu vymezují konzolové značky (vzájemná vzdálenost přibližně 140 cm) a délka ramen je 1390 mm,
- 5) použitím neporušené stabilizace nivelačního kamene, kde centrem bodu je průsečík úhlopříček horní plochy hlavy kamene nebo střed vrchlíku hřbové značky,
- 6) použitím trvale signalizovaného bodu (makovice věže kostela apod.).

Zhušťovací bod bez podzemní značky je vždy zajištěn **zajišťovacím bodem** ve vzdálenosti maximálně 500 m umístěným tak, aby z něj bylo možno příslušný zhušťovací bod jednoznačně zpětně vytýčit.

Zajišťovací bod je stabilizován povrchovou značkou podle odstavce 1) nebo značkou podle odstavce 2), 4) a 5).

Trvale signalizovaný zhušťovací bod podle odstavce 6) je vždy zajištěn dvěma zajišťovacími body v maximální vzdálenosti 500 m, stabilizovanými podle odstavce 1) nebo 4). Zajišťovací body tvoří se zhušťovacím bodem (centrem) pokud možno rovnostranný trojúhelník se vzájemnou viditelností vrcholů. Výškové úhly z obou zajišťovacích bodů na centrum jsou menší než 45°. Orientace základny (spojnice obou zajišťovacích bodů) je určena globálním systémem určování polohy (GPS), geodeticky (orientace na dva trigonometrické nebo zhušťovací body) nebo astronomicky (měřením na Slunce nebo Polárku).

Zhušťovací bod musí mít z výšky měřického přístroje orientaci (viditelný směr) na trigonometrický, zhušťovací nebo zajišťovací bod nebo na trvalý jednoznačně identifikovatelný bod (orientační směr), nebo na zřízený přidružený *orientační bod* ve vzdálenosti 80-300 m, stabilizovaný povrchovou značkou podle odstavce 1) nebo značkami podle odstavce 2), 4) a 5).

[60.] Poloha **ostatních bodů podrobného polohového bodového pole** (dále jen ostatní body) se volí tak, aby bod nebyl ohrožen, aby signalizace byla jednoduchá a aby bod byl využitelný pro připojení podrobného měření.

Body se volí přednostně na objektech trvalého rázu nebo na jiných místech tak, aby co nejméně překážely v užívání pozemků, např. v obvodu dopravních komunikací.

Ostatní body se zřizují především:

- 1) na objektech se stabilizační značkou, např. na nivelačních kamenech, stabilizacích tíhových bodů, hraničních kamenech na hranicích obcí, na mostcích a propustcích s nivelační hřbovou značkou,
- 2) na vstupních a jiných šachtách podzemních vedení mimo zastavěné části obcí, pokud na nich lze jednoznačně vyznačit polohu bodu,
- 3) na technických objektech poskytujících trvalou signalizaci, zejména na rozích budov.

Pokud nejsou pro umístění ostatních bodů vhodné objekty, stabilizují se kamennými hranoly jako zhušťovací body podle odstavce 1). Byl-li již v místě pevně osazen k jinému účelu opracovaný kámen o rozměrech nejméně 120 mm x 120 mm x 600 mm, použije se po doplnění křížkem nebo důlkem.

Ostatní body je možno také stabilizovat:

- a) vysekáním křížku na opracované ploše skály,
- b) hřbovými značkami zabetonovanými do skály, kovovými konzolami, čepovými značkami apod. na budovách,
- c) ocelovými trubkami nebo čepy apod. v betonových blocích o velikosti nejméně 200 mm x 200 mm x 700 mm,

- d) ocelovými trubkami o průměru nejméně 30 mm a tloušťce stěny nejméně 3 mm délky nejméně 600 mm (nebo nejméně 500 mm, je-li trubka opatřena zařízením proti vytažení znaku) s hlavou z plastu velikosti nejméně 80 mm x 80 mm x 50 mm,
- e) kovovými značkami o průměru nejméně 8 mm s plochou hlavou o průměru nejméně 25 mm a délce značky nejméně
 - 1.100 mm, zatlučenými do zpevněného povrchu,
 - 2.40 mm s hmoždinkou, zapuštěnými do pevných konstrukcí;takto stabilizovaný bod se zpravidla zřizuje spolu s dalším bodem na blízkém technickém objektu.

Ze značek pevných bodů podrobného polohového bodového pole, které jsou použitelné jako stanoviska, musí být z výšky měřického přístroje orientace na body základního nebo podrobného polohového bodového pole téže nebo vyšší přesnosti.

Pozn. 1: Hustota trvale stabilizovaných bodů polohového bodového pole (základního i podrobného) je stanovena vzájemnou vzdáleností bodů v zastavěném území 150 až 300 m a v nezastavěném území hustotou nejméně jeden bod na km².

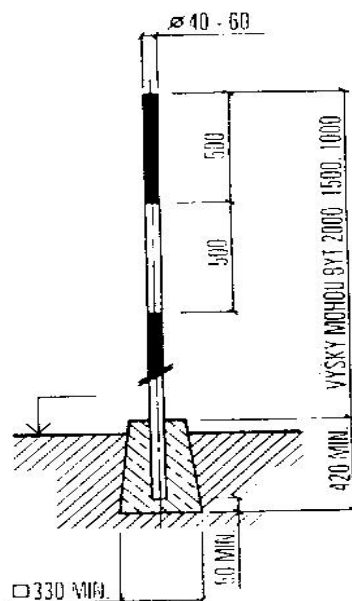
Pozn. 2: Charakteristiky přesnosti určení souřadnic X, Y bodů polohového bodového pole lze nalézt v [61.], [60.].

Pozn. 3: Body základních bodových polí jsou spravovány a udržovány (!) Zeměměřičským úřadem [63.]. Správu bodů podrobného bodového pole provádějí katastrální úřady. Obsah správy je vymezen v [60.]. Správa nezahrnuje údržbu bodů podrobného bodového pole, pole těchto bodů tedy stárne. V současné době však již není problém, s využitím moderní přístrojové techniky, se připojit na body vyšší kvality. Otázkou tedy je, zda budování a (hlavně) udržování podrobného polohového bodového pole není dnes již zbytečností (viz např. [25.]). Roku 1995 došlo ke schválení projektu zhuštění polohového bodového pole. Obsahem projektu je zejména revize dosavadních a zřizování nových zhušťovacích bodů. Body jsou zaměřovány technologií GPS a připojovány na vhodné trigonometrické body a na body sítě DOPNUL. Hustota výsledného bodového pole (obsahujícího trigonometrické body včetně bodů orientačních a zhušťovacích body) byla stanovena na 2 body/km² v intravilánu a 1 bod/km² v extravilánu. Zhuštění se neprovádí v rozsáhlých lesních komplexích. Rok předpokládaného ukončení projektu je 2003. Tímto pojetím se zhušťovací body dostávají mnohem blíže k bodům trigonometrickým než k ostatním bodům PPBP. V novele zeměměřického zákona jsou již zhušťovací body uváděny jako samostatná kategorie [25.].

3.1.3 Signalizace bodů

[61.] Ochranná a signalizační zařízení trigonometrického, zajišťovacího a orientačního bodu jsou zřízena podle potřeby a tvoří je jedno nebo více z těchto zařízení:

- a) červenobílá nebo černobílá ochranná tyč (orientační rozměry viz obr. 3.10) nebo tyče zpravidla umístěné 0,75 m od centra bodu,



obr. 3.10 – Ochranná tyč [61.]

- b) výstražná tabulka s nápisem "STÁTNÍ TRIANGULACE. POŠKOZENÍ SE TRESTÁ",
- c) betonová skruž nebo sloupek,
- d) ochranný (vyhledávací) kopec,
- e) tříboká pyramida.

Na trigonometrickém bodu může být zřízeno signalizační zařízení (zvýšené měřické postavení, signál nebo měřická věž).

3.1.4 Označování bodů

Jednotlivé body se označují číslem, popřípadě i názvem, a příslušností k evidenční jednotce. [61.]

Body se číslují dvanáctimístným úplným číslem. Úplné číslo bodu se skládá z předčíslí a vlastního čísla bodu. Evidenční jednotkou bodů ZPBP a bodů zhušťovacích je triangulační list, ostatní body PPBP se číslují v rámci katastrálního území. Dočasně stabilizované body se číslují jako pomocné body v rámci katastrálního území.

body	Úplné číslo bodu			
	předčíslí		vlastní číslo bodu	
ZPBP	0009	číslo TL	1-199	0
ZhB	0009	číslo TL	201-499	0
ostatní body PPBP	číslo k.ú.	00000	501-3999	
pomocné	číslo k.ú.	00000	od 4001	

tab. 3.1 – Číslování bodů

Přidružené body k bodům ZBPB a zhušťovacím bodům mají poslední nulu nahrazenou pořadovým číslem bodu.

K jednotlivým bodům bodových polí se zhotovují **geodetické údaje**⁴.

- Údaje o trigonometrických bodech

Údaje obsahují [61.]

- a) číslo a název trigonometrického bodu,
- b) lokalizační údaje o územních jednotkách (okresu, obci, katastrálním území), označení listu Státní mapy 1:5 000 - odvozené, označení Základní mapy ČR 1:50 000, označení triangulačního listu, číslo parcely nebo číslo popisné stavby na níž je bod umístěn,
- c) souřadnice trigonometrického bodu, jeho nadmořskou výšku s uvedením místa ke kterému se vztahuje a údaje o orientaci,
- d) místopisný náčrt s vyhledávacími mírami a místopisný popis,
- e) údaje o stabilizaci, ochraně a signalizaci trigonometrického bodu,
- f) údaje o vlastníku pozemku nebo stavby, na kterém je trigonometrický bod umístěn,
- g) údaje o zřízení trigonometrického bodu.

Je-li k trigonometrickému bodu zřízen zajišťovací nebo orientační bod, jsou jejich údaje uvedeny v údajích daného trigonometrického bodu.

⁴ Geodetické údaje o bodech bodových polí se v současnosti převádějí z analogové podoby do podoby digitální a to v rámci programu Národní geoinformační infrastruktury, mezi jejímiž úkoly je také naplnění a servis databází základních bodových polí ČR. Tento úkol má být dokončen roku 2003. Jedná se o databázi polohových bodových polí, databázi výškových bodových polí a databázi tíhového bodového pole.

Databáze polohových bodových polí bude poskytovat informace o trigonometrických a zhušťovacích bodech. Databáze bude vedena na počítačích v Zeměměřickém úřadu v databázovém systému ORACLE. Místopisné náčrtů se vyhotovují v systému Kokeš. Databáze bude plynule aktualizována.

Kraj: Západočeský
 Okres: Plzeň - město
 Obec: Plzeň 3

GEODETICKÉ ÚDAJE

Pořadí č. 2
 Platné od 1.11.1990 do

PRO VNITŘNÍ POTŘEBU STÁTNÍCH ORGÁNŮ A SOC. ORGANIZACÍ

TL	2013
ZM-50	12 - 33
SMO-5	070466

Číslo a název bodu		11		Homolka		11	
Bod	Druh	y	x	Nadmořská výška		vztahuje se na	
				Bpe			
11	TB	821 348,34	1 072 552,33	371,07	hranol		
11,1	EC	821 353,12	1 072 557,58	379,19	cíl, vrchol stříšny		

Orientace na body (ve sloupch)

Číslo	Název	Jižník	Delka strany	Číslo	Název	Jižník	Delka strany
11,1		42 19 49	7,096				
-	ZS Chválenická ul.17,hromosv.	291 24 47,4	-				

Místopisný popis: Bod je na násypu pokrývajícím nádrž vodojemu Homolka.
 Exc. cílem je vrchol stříšky sirény asi 7 m jz. od bodu.

Bod	11		11,1					
Stav. údaje	0,00	žula 16.16.09	0,00	exc. cíl	0,00		0,00	
	0,89	žula 30.30.10		vrchol stř. stříšny				
	1,03	sklo 16.16.3						
Označ. povrch. značky na boku:	△ sever, TP jih							
Ochranný znak: (druh, rok, vzdál.)								
Kat. území: Parc.čís. Druh poz.	Doudlevice st. 820		Doudlevice st. 820					
Vlastník: (uživatel):	Západočeské vodov. a kanal. Plzeň		Záp.vod. a kanaliz. Plzeň					

Druh a výška signal. stavby nebo nárys trvalého cíle: Signalizace z roku:		Poznámky:
---	--	-----------

obr. 3.11 – Geodetické údaje trigonometrického bodu

- Údaje o zhušťovacích bodech

Údaje obsahují [61.]

- a) číslo a název bodu,
- b) lokalizační údaje o územních jednotkách a katastrálním území, označení listu Státní mapy 1:5 000 - odvozené, označení Základní mapy ČR 1:50 000, označení triangulačního listu, číslo parcely nebo číslo popisné stavby, na níž je bod umístěn,
- c) souřadnice zhušťovacího bodu, jeho nadmořskou výšku s uvedením vztažného místa a údaje o orientaci,
- d) místopisný náčrt s vyhledávacími mírami a místopisný popis,
- e) údaje o stabilizaci a ochraně bodu,
- f) údaje o zřízení bodu.

Je-li ke zhušťovacímu bodu zřízen zajišťovací nebo orientační bod, jsou jeho údaje uvedeny v údajích daného zhušťovacího bodu.

GEODETICKÉ ÚDAJE

zhušřovacího bodu

Kraj: Plzeňský
 Okres: Plzeň – město
 Obec: Plzeň

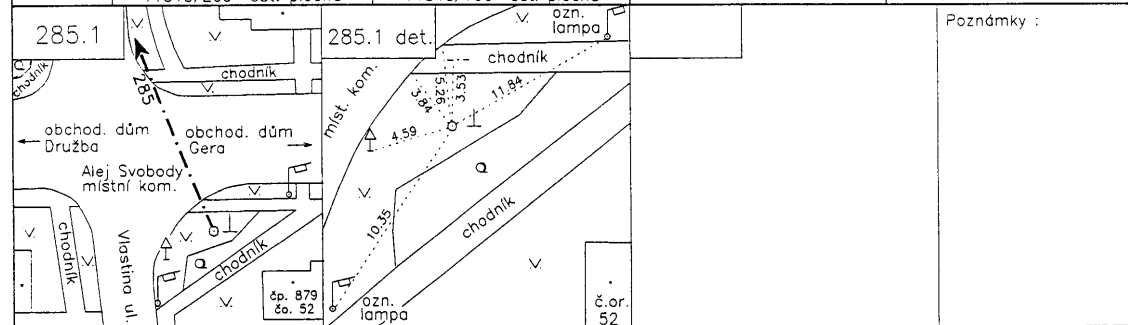
Pořadí č.: 4
 Stav k: 3.9.2001

TL	2012
ZM-50	12-33
SMO-5	070493

Číslo a název bodu	285		Elišky Krásnohorské		285	čp.34
Bod	Druh	Y	X	Nadmořská výška		
				Bpv	vztahuje se na	
285	ZhB	822739.04	1067271.67	360.88	hranol	
285.1	OB	822693.19	1067450.37	355.92	hranol	
Orientace na body (v grádech) :						
Bod číslo :	Jižník	Délka strany	Bod číslo :	Jižník	Délka strany	
285.1	384.0100	184.48				
						Bod určen : metodou GPS

Mistopisný popis : Bod je SZ od křižovatky ulic Vlastina a E. Krásnohorské na sídlišti Lochotín, 1.4 km SZ od kostela Všech svatých na Roudné.

Bod	285		285.1			
Bod. údaje	0.00	žula 16x16x62	0.00	žula 16x16x70	0.00	0.00
	0.83	žula 29x29x8	0.90	žula 20x20x10		
Ochranný znak: (druh,rok,vzdal.)	OT-1977-0.75-S		OT-1999-0.75-V			
Kat.území	Plzeň		Plzeň			
Parcel.čís. Druh poz.	11319/269 ost. plocha		11319/160 ost. plocha			



Poznámky :

Geodetické údaje : Změny geodetických údajů : (zapsal,kontroloval)
 Vyhotožil : Liška David *Liška*
 Kontroloval : Zahradník Václav *Zahradník*

Bod	285	285.1	
Zřízen	1977 Geodézie Plzeň	2001 KÚ Plzeň – město	
Přemístěn			
Přestabilizován			
Přeurčen	1998 KÚ Plzeň – město		
Údržba	1999 KÚ Plzeň – město		
Obnova			

Poznámka : Původní číslo bodu 285 je 148.
 Bod 285.1 určen metodou GPS.

obr. 3.12 – Geodetické údaje zhušřovacího bodu

- Údaje o ostatních bodech podrobného polohového bodového pole

Údaje obsahují [60.]:

- a) lokalizační údaje o obci a katastrálním území, označení listu Státní mapy 1:5 000 - odvozené,
- b) číslo bodu, souřadnice v S-JTSK, třídu přesnosti (jen u bodů zřízených před účinností vyhlášky [60.]) a výšku bodu ve výškovém systému baltském – po vyrovnání (pokud byla určena),
- c) místopisný náčrt s vyhledávacími mírami,
- d) údaje o zřízení bodu, jeho popis, způsob stabilizace a určení.

Kat. území Plzeň

Pro vnitřní potřebu státních orgánů
a socialistických organizací

Obec Plzeň

GEODETICKÉ ÚDAJE O PBPP

Str. 307

Bod 2601	Třída	Bod zřídila org., rok Geodézie Plzeň - 1978	y 820 941.95	x 1 068 060.66	SMO-5 Plzeň 8 - 4	Místopisný náčrt
Orientační jižník na bod		o ' "	Nadm. výška (Bpv) -			
		g c cc				
Popis, způsob stabilizace a určení bodu			Nárys nebo detail			
Roh budovy trafostanice Pivovarské vodárny. 0.50 m nad zemí. Určen rajonem.						
Poznámky: Rekognoskoval K. Molč v r. 1994. Souřadnice převzaty.						
Bod 2604	Třída	Bod zřídila org., rok Geodézie Plzeň - 1978	y 823 363.32	x 1 067 604.73	SMO-5 Plzeň 9 - 3	Místopisný náčrt
Orientační jižník na bod		o ' "	Nadm. výška (Bpv) -			
		g c cc				
Popis, způsob stabilizace a určení bodu			Nárys nebo detail			
Roh budovy čp. 649 (Domov důchodců). 5.00 m nad zemí. Určen rajonem.						
Poznámky: Rekognoskoval K. Molč v r. 1994. Nové souřadnice určeny v r. 1995.						
Bod 2605	Třída	Bod zřídila org., rok Geodézie Plzeň - 1978	y 823 388.73	x 1 067 413.96	SMO-5 Plzeň 9 - 3	Místopisný náčrt
Orientační jižník na bod		o ' "	Nadm. výška (Bpv) -			
		g c cc				
Popis, způsob stabilizace a určení bodu			Nárys nebo detail			
Roh garáže patřící k č. 586. 1.50 m nad zemí. Určen rajonem.						
Poznámky: Rekognoskoval K. Molč v r. 1994. Souřadnice převzaty.						

Geodézie č. 4.43-1986

Vytiskl Geodetický a kartografický podnik v Praze, n. p.

obr. 3.13 – Geodetické údaje ostatních bodů podrobného polohového bodového pole

3.2 Modernizace geodetických základů v ČR⁵

K budování moderních geodetických základů bylo možné přistoupit s nástupem moderní observační techniky, využívající v plném rozsahu pozorování družic systému GPS-NAVSTAR. Za počáteční období budování geodetických základů nového typu lze pokládat rok 1991, kdy se započalo s realizací koncepce „Koncepce modernizace a rozvoje československých geodetických základů“ schválenou roku 1990.

Hlavní charakteristiky moderních geodetických základů jsou následující [12.]:

- a) snížení významu hierarchické struktury klasických geodetických sítí,
- b) určování prostorové polohy bodů s převážným využitím metod kosmické geodézie,
- c) homogenita v rozsahu velkých územních celků,
- d) univerzální využití pro řešení vědeckých i praktických úloh geodézie a zeměměřictví,
- e) přiřazení časoprostorových charakteristik definičním souborům bodů,
- f) integrované pojetí (zahrnuje jednoznačné přiřazení fyzikálních parametrů tíhového pole parametrům geometrickým a jednoznačné definování vztahů mezi polohou bodu v trojrozměrném geometrickém a v tíhovém prostoru,
- g) flexibilita a operativnost využití.

3.2.1 Kampaň EUREF-CS/H-91

Při této kampani došlo k rozšíření evropského rámce EUREF⁶ na území České a Slovenské republiky.

Měřeno bylo na 6 bodech na území České a Slovenské republiky a na 5 bodech na území Maďarska aparaturami GPS. Měření probíhalo ve dnech 29. 10. až 2. 11. 1991.

Definitivní zpracování sítě bylo provedeno Bernským GPS Softwarem, verze 3.4. Výsledky byly předneseny na varšavském EUREF-symposiu.

3.2.2 Referenční GPS síť nultého řádu (NULRAD)

Vytvoření sítě nultého řádu bylo prvním krokem realizace koncepce geodetických základů nového typu. Jedná se o první etapu zhuštění nově vytvářeného evropského referenčního rámce EUREF pro území bývalé ČSFR.

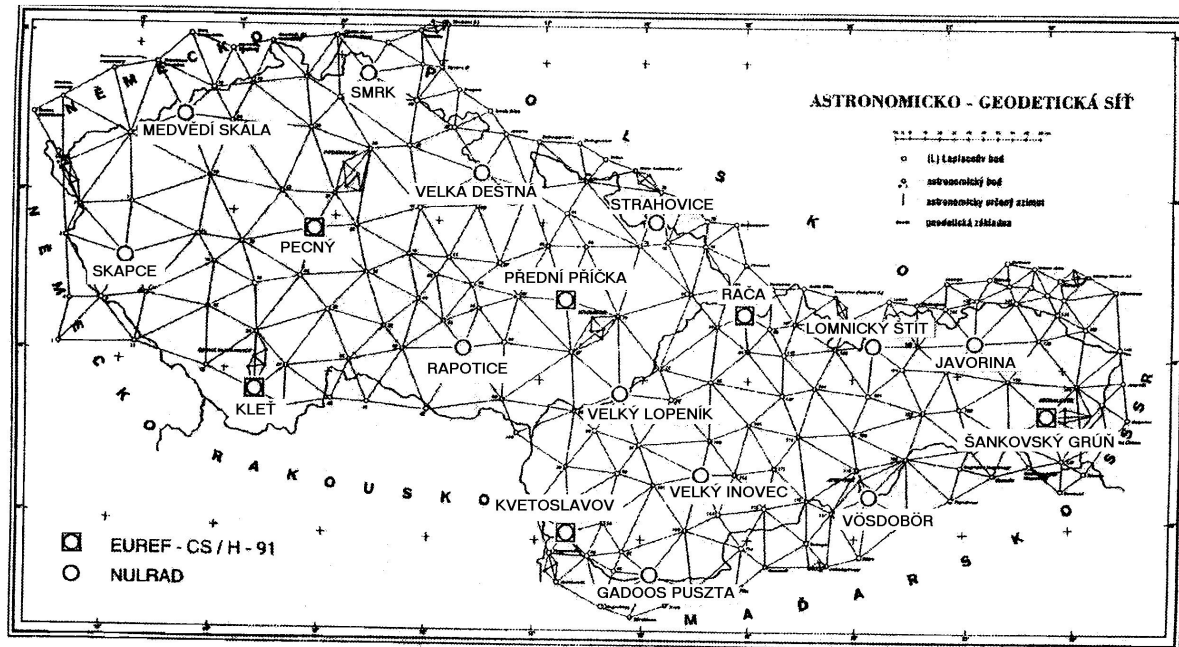
[43.] Hlavními kritérii pro výběr bodů NULRAD byly :

- geometrická konfigurace bodů,
- příslušnost bodu k AGS,
- možnost centrického umístění antény přijímače nebo excentricita maximálně 1000 metrů,
- splnění technických podmínek pro měření GPS.

⁵ Tato problematika je podrobněji probírána v předmětu Vyšší geodézie. Zde bude uveden pouze stručný nástin této látky.

⁶ EUREF (stálá síť) je síť evropských stanic, na kterých jsou provozována stálá GPS pozorování. [12.]

Měřeno bylo 19 bodů. Soubor bodů 0. řádu obsahuje všechny body EUREF-CS/H-91. Tím je splněna podmínka návaznosti na referenční rámec EUREF. Body sítě 0. řádu jsou zároveň i body Československé AGS s jedinou výjimkou – bodem Strahovice (trigonometrický bod 1. řádu).



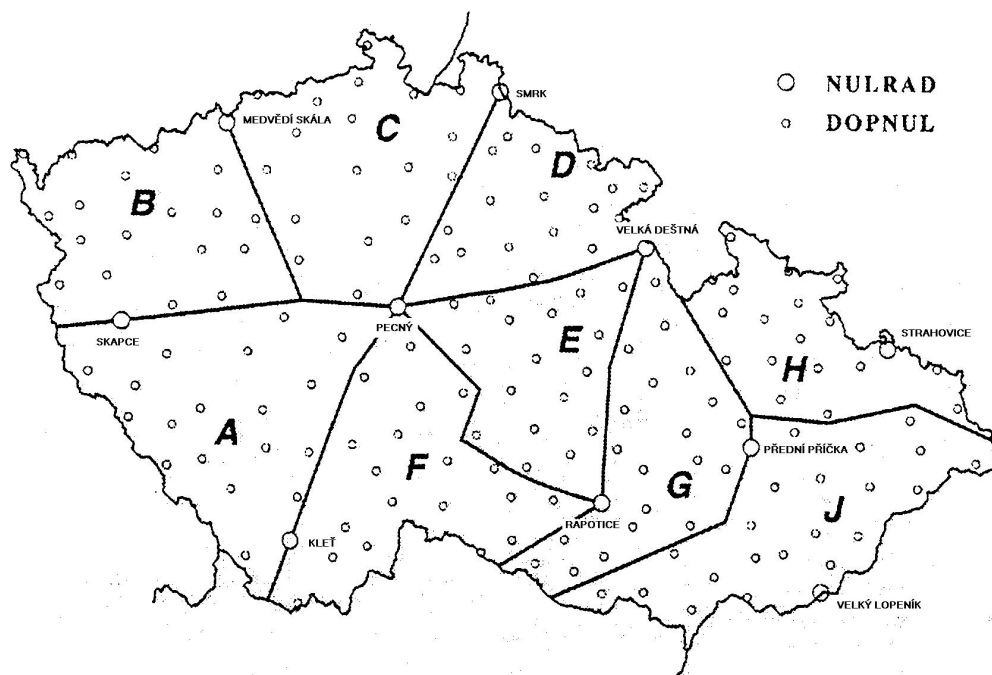
obr. 3.14 – Referenční GPS síť nultého řádu (NULRAD) [9.]

Na bodech sítě nultého řádu byly v následujících letech provedeny další měřické kampaně (CS-NULRAD-92, VGSN-92, CS-BRD-93) [9.], [12.], [23.].

3.2.3 Referenční GPS síť DOPNUL

Roku 1993 bylo rozhodnuto o dalším zhuštění sítě NULRAD tak, aby průměrná vzdálenost bodů určených GPS byla cca 25 km. Toto zhuštění probíhalo již pouze v České republice.

Území České republiky bylo rozděleno na 10 sektorů tak, že každý sektor obsahoval vždy tři body sítě NULRAD. V každém sektoru byly postupně vybírány body se stanovenou vzdáleností (20 – 30 km). Body byly vybírány tak, aby byly identické s body AGS ale i s body trigonometrických sítí nižšího řádu. Celkem síť DOPNUL obsahuje 176 bodů, včetně bodů sítě NULRAD.



obr. 3.15 – Schéma sektorů sítě DOPNUL [9.]

Body NULRAD byly během měření trvale osazeny aparaturami GPS, další aparatury se přemísťovaly po určených bodech podle předem vypracovaného plánu.

Měření bylo opět zpracováno Bernským softwarem, přičemž souřadnice bodů 0. řádu byly ponechány jako pevné.

3.2.4 Zhuštění sítě DOPNUL

Síť bodů DOPNUL má být zhuštěna vybranými body České státní trigonometrické sítě. Souřadnice těchto bodů jsou určovány v geocentrickém souřadnicovém systému ETRS-89. Celá síť by měla být dokončena v roce 2006.

Základní kritéria pro výběr bodů jsou následující:

- hustota budované sítě (průměrná vzdálenost sousedních bodů je 5 km, kromě lesních komplexů),
- přirozená ochrana bodů,
- snadná přístupnost bodů,
- možnost nerušené observace metodou GPS (požadavek minimálních zákrytů nad elevační maskou 15° antény přijímače).

Hustota bodů sítě se splní výběrem cca 4 trigonometrických bodů v každém triangulačním listě. V základním triangulačním listu však počet vybraných bodů nesmí překročit 120 trigonometrických bodů.

Všechny vybrané trigonometrické body se pro kontrolu nově stabilizují, kromě trigonometrických bodů I. a II. řádu. Ochrana bodů se provede osazením červenobílé tyče a skruže o průměru 1,5 až 1,7 m a výšce nejméně 0,5 m. Skruže mají být umístěny u všech bodů, kromě bodů, jejichž stabilizace či umístění to nedovolí, či bodů s přirozenou ochranou.

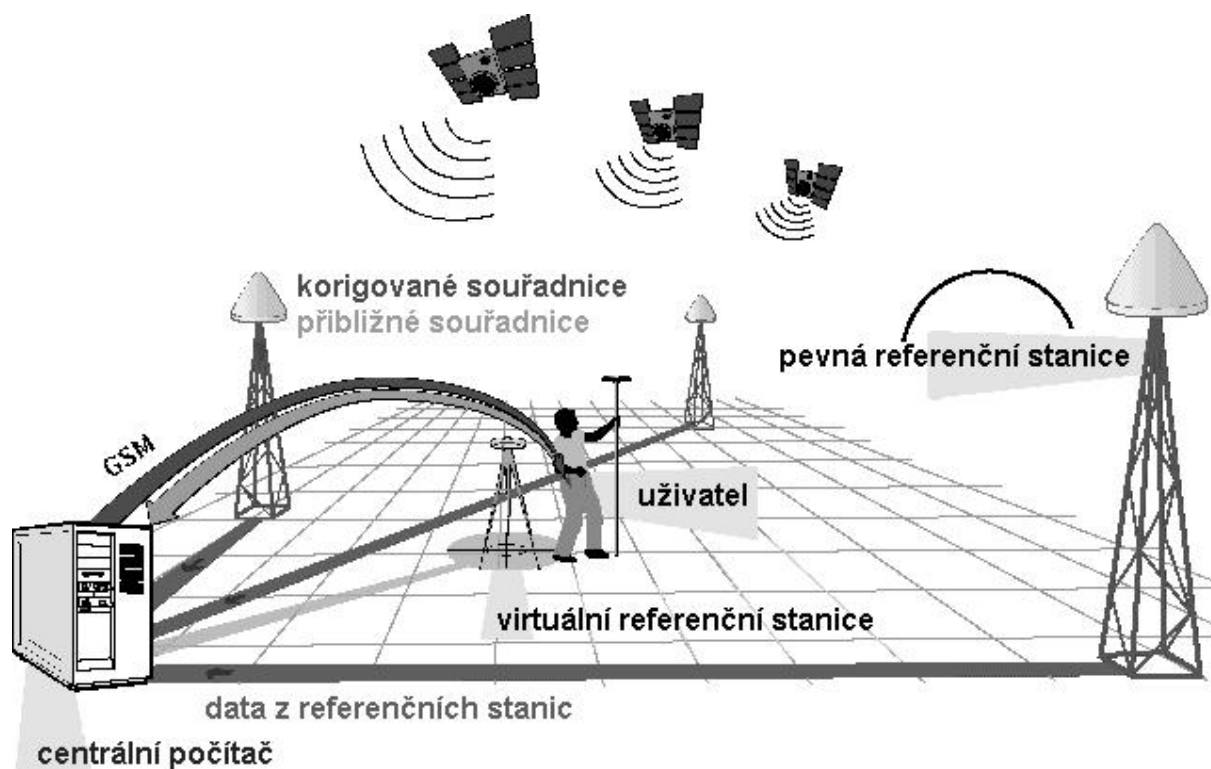
3.3 Aktivní polohové systémy

V rámci projektu NGII (Národní geoinformační infrastruktury) byl jedním z programů důležitých pro náš obor stanoven program prostorového referenčního rámce. Tuto aktivitu má v působnosti ČÚZK (Český úřad zeměměřičský a katastrální). Mezi hlavními výstupy pak je i analýza účelnosti vybudování sítě permanentních stanic na území ČR pro aplikaci metody DGPS (diferenční GPS) a podpora všestranného využití globálního referenčního systému k přesnému určování polohy pro geodetické a navigační účely.

V letech 2001 až 2004 bude prováděn VÚGTK výzkum diferenční GPS s cílem vybudovat a provozovat síť stanic DGPS s řídicí stanicí GO Pecný.

O vybudování této sítě se již delší dobu zajímá firma by/s@t. Cílem této společnosti [26.] je vybudování stálé a spolehlivé sítě referenčních stanic pro DGPS, provozování této referenční sítě a poskytování služby přenosu vysoce přesných korekčních dat pro virtuální referenční stanice v reálném čase. Mezi další cíle společnosti patří mimo jiné i vyvinutí technického i programového vybavení pro efektivnější a ekonomičtější využití DGPS.

Co je to vlastně virtuální referenční stanice? Tuto stanici zřizuje řídicí centrum pro každého uživatele v okamžiku přihlášení se k síti pomocí mobilního telefonu. Uživatel odešle do řídicího centra své přibližné souřadnice získané pomocí GPS. V řídicím centru bude pro toto stanoviště vypočtena z dat celé sítě "virtuální referenční stanice" (VRS) a odeslána spolu s korekčními daty RTCM zpět, opět prostřednictvím GSM. Uživatel získá v reálném čase, pomocí odpovídajícího softwaru, korigovanou polohu v WGS-84. Pro okolí virtuální referenční stanice bude vypočten také transformační klíč, který lze použít pro měření v S-JTSK.



obr. 3.16 – Princip virtuální referenční stanice [26.]

Výhody celoplošné sítě referenčních stanic uváděné firmou by/s@t jsou následující:

- vyšší hospodárnost,
 - odpadají náklady na zřízení a provoz lokálních referenčních stanic,
 - snížení počtu pracovních sil (o 50%),
 - rychlá inicializace (méně než 1 minuta),
 - kratší měření (méně než 5 vteřin),
 - zvýšení denní produktivity (až o 100 %) - odpadá měření vlíčovacích bodů, rovnou budou dodávány souřadnice S-JTSK či Gauss-Krüger,
 - rozšíření rozsahu provozu a provozní doby,
- zvýší se přesnost,
 - 1 -3 cm absolutní přesnost (WGS-84/ETRS-89),
 - nezávislost na vzdálenosti od referenční stanice.

Předpokládanými uživateli sítě jsou samozřejmě převážně geodeti, ale počítá se i z uživateli z jiných oborů (např. stavebnictví, zemědělství, silniční a železniční doprava, bezpečnostní systémy, ...).

K testování přesnosti deklarované firmou by/s@t bylo přistoupeno roku 2000 firmou VIAGEOS s.r.o. Test proběhl na území Německa, u městečka Marktschwaben poblíž Mnichova. V Německu je již síť referenčních stanic provozována. Jedná se o síť 9 stanic ve vzdálenosti 50 -70 km. (Pozn. Mimo tuto síť firmy by/s@t je na území Německa budována ještě síť SAPOS. [46.]). Podmínky za jakých test probíhal jsou uvedeny v [56.]. Ve stejném článku je možné najít i výsledky testu, které plně potvrzují jak absolutní přesnost 1 - 3 cm, tak i nezávislost na vzdálenosti od referenční stanice.

Ostatní výhody související s vyšší hospodárností jsou zřejmé.

V současnosti již bylo s výstavbou permanentních static sítě by/s@t započato. V první etapě byly vybudovány 4 stanice v okolí Prahy. Stanice jsou připojeny do systému ETRS-89. Toho bylo dosaženo určením stanice ze 4 až 5 bodů sítě DOPNUL. [57.]

Roku 2002 (červen – červenec) bylo provedeno testování systému virtuálních referenčních stanic vybudovaných v okolí Prahy společností by/s@t. Test byl zpracován VÚGTK a jeho stručné výsledky jsou uvedeny v [48.]:

Střední souřadnicová chyba v určení polohy bodu z jednoho měření systémem VRS je 0,019 m. Tato přesnost vyhovuje pro určení podrobného bodu ($m_{xy} = 0,14$ m), pro určení bodu podrobného polohového bodového pole ($m_{xy} = 0,06$ m) i pro určení zhušťovacího bodu ($m_{xy} = 0,02$ m) [60.]. Střední chyba v určení výšky z jednoho měření systémem VRS je 0,051 m. To odpovídá přibližně přesnosti trigonometrického určování výšek v triangulaci.

Na internetových stránkách firmy by/s@t se lze dočíst, že společnost začala již v průběhu září 2002 nabízet ke komerčnímu využití síť virtuálních referenčních stanic (VRS) by/S@T se souřadnicovým výstupem v reálném čase se současnou korekcí vlivu ionosféry na území hlavního města Prahy a středních Čech.

Přes nesporné výhody sítě permanentních referenčních stanic její použití neodstraní trvalé překážky pro měření GPS (např. zákryty).

4. Geodetické přístroje

Geodetické přístroje umožňují měřit geodetické veličiny (úhly, délky a převýšení). S jejich znalostí pak můžeme určit polohu objektů.

4.1 Proces měření

Při měření určité veličiny **porovnáваме** tuto měřenou veličinu s jinou veličinou stejného druhu, kterou jsme zvolili za jednotku (etalon). Při tomto porovnávání se buď přenáší etalon na objekt nebo objekt na etalon. Proces měření pak prezentuje následující schéma [33.]:

$$\text{Měření} = \underset{1.}{\text{přenos}} + \underset{2.}{\text{porovnání (odečtení)}}$$

$\underset{3.}{\text{Etalon}}$

Zařízení pro přenos, porovnání a etalon jsou základní zařízení přístroje. Dalším vybavením měřicího přístroje je ovládací zařízení a geodetické přístroje mají navíc zařízení k realizaci vodorovného a svislého směru.

Každé měření v geodézii se vykonává vícekrát, nejméně **dvakrát**. To nám umožňuje získat potřebnou kontrolu měření a určit nejspolehlivější hodnotu měřené veličiny a míru její přesnosti.

Měření je tedy možné považovat za proces, kdy v určitém časovém intervalu získáváme diskrétní či spojité hodnoty měřené veličiny.

Každý měřičský proces se realizuje určitou metodou měření M . (Tuto metodu determinuje přesnost měření, průměrně dosahovaná touto metodou). Přesnost měření se pak vyjadřuje **základní střední chybou měření m** či **jednotkovou základní střední chybou m_0** . Tyto chyby jsou funkcí citlivosti použitého přístroje γ a postupu měření T .

Na měřičský proces mají vliv zejména následující činitele [55.]:

- a) objekty měření – měřičské značky, jejich signalizační zařízení (např. jejich nestabilita, nedokonalá funkce, nevhodné tvary...)
- b) prostředí měřičského procesu – mění se stav fyzikálních vlastností ovzduší (teplota, tlak, index lomu ...), změna stability podloží pod přístrojem ale i celým systémem, ...
- c) měřič – např. únava zraku, snížení pozornosti, ...
- d) komplexem měřičských přístrojů, zařízení a pomůcek – např. nesplnění geometrických podmínek os přístroje, nepřesné dělení stupnic k odečítání, mechanické změny, ...

Některé faktory způsobují změnu ve výsledcích pouze o hodnotu, která použitým přístrojem není zaznamenatelná a ve výsledcích se tedy vůbec neprojeví. Některé faktory však způsobují velice výrazné změny ve výsledcích. Při opakovaném měření veličiny stejnou metodou za relativně shodných podmínek dostáváme odlišné výsledky měření.

¹ Citlivost přístroje je řádově nejmenší hodnota, kterou lze zaznamenat na čtecím zařízení přístroje.

Zpracováním výsledků měření se podrobně zabývá teorie chyb a vyrovnávací počet.

4.2 Základní charakteristiky a vlastnosti geodetických přístrojů

Na **vlastnostech** přístroje závisí jeho kvalita. Číselné vyjádření jeho vlastností se pak označuje jako **charakteristika přístroje**.

Pro uživatele je kvalitnějším přístrojem přístroj, který za těžších podmínek umožní měřit s potřebnou přesností ekonomičtěji, rychleji a který je stabilnější a méně poruchový.

Vlastnosti a charakteristiky lze rozdělit podle druhu na [33.]:

- rozměrové, geometrické (většinou jsou označené jako technická data)
- technologické, fyzikální
- provozní
- měřičské, charakteristiky přesnosti měření
- cena.

Technická data umožňují zařazení přístroje do typové skupiny (mezi přístroje určené pro stejný druh práce). Neumožňují však hodnocení přístrojů v rámci jedné skupiny.

Technologickými vlastnostmi jsou fyzikální vlastnosti materiálu použitého k výrobě částí geodetického přístroje, kvalita výroby a justáže, i zvolené konstrukční řešení. Tyto vlastnosti jsou většinou uváděné slovně.

Mezi provozní vlastnosti patří např. poruchovost, životnost, rychlost a další.

Měřičskými charakteristikami jsou např. střední chyby (střední chyba měřeného směru).

4.3 Základní součásti geodetických přístrojů

Součásti geodetických přístrojů lze rozdělit do pěti skupin a to:

1. Mechanické součásti
2. Optické součásti
3. Optické přístroje
4. Odečítací pomůcky
5. Příslušenství

4.3.1 Mechanické součásti přístrojů

Šrouby, ustanovky, nosná zařízení a čepy.

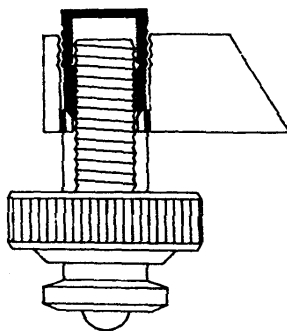
Šrouby

Umožňují trvalé nebo dočasné spojení mechanických dílů, jemný pohyb součástí, zajišťují spojení přístroje s podstavcem, správnou polohu os přístroje během měření apod. Šroub se skládá z hlavy (opatřené drážkou, šestihranem nebo otvorem pro trn) a vřetena se závitem, na které se může našroubovat matice (matka). Výška závitu udává velikost posunu matice při jedné otočce vřetena. Stoupáním závitu se rozumí poměr výšky závitu k obvodu vřetena. [45.]

Příkladem mohou být:

Šroub stavěcí –

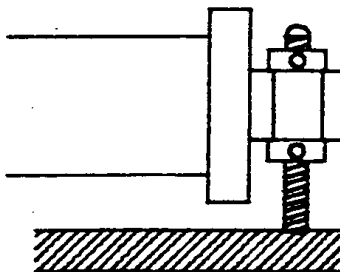
slouží k urovnání třínožky a tím i přístroje do správné polohy. Hlava má tvar kotouče a je po obvodě vroubkována. Stoupání závitu je malé, závit se chrání ochranným pouzdem. Hlavním požadavkem je, aby vřeteno šroubu nemělo v matici znatelnou vůli. Proto se používá stavěcích šroubů s rozříznutou konickou matkou, která umožňuje vymezení vůle utažením ochranného pouzdra.



obr. 4.1 – Stavěcí šroub [45.]

Šroub rektifikační -

slouží k uvedení některých částí přístroje do vzájemně správné polohy. Většinou má válcovou hlavu s drážkou pro šroubovák nebo s otvorem pro trn rektifikační jehly. Rektifikační šrouby libel bývají upraveny jako šrouby pevné s dvojití matek. [45.]



obr. 4.2 – Rektifikační šroub [45.]

Šrouby drobnoměrné -

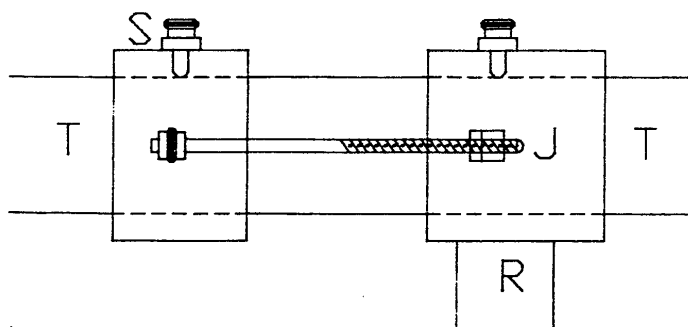
slouží jako zařízení k jemnému posunu nebo jako šrouby měřicí. Mají malou výšku závitu a jejich vřetena i matice jsou

vypracovány a zabroušeny. U geodetických přístrojů se mikrometrické šrouby používají jako jemné ustanovky. [45.]

Ustanovky

K nastavovacím a naváděcím zařízením teodolitů patří mechanické pomůcky pro hrubé – přibližné nastavení a jemné nastavení – navedení alhidády i dalekohledu na zaměřovaný bod. Tato zařízení jsou v geodézii označována jako **hrubá** a **jemná ustanovka**.

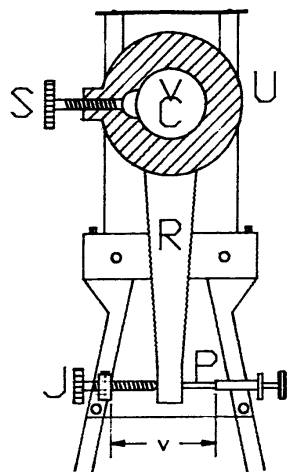
Pro zastavení **přímočarého pohybu** slouží **ustanovka lineární** (obr. 4.3). Umožňuje změnit nebo nastavit polohu posuvného ramene po tyči pevného ramene v jednom nebo druhém směru. Hlavní součástí lineární ustanovky je dvojice objímek na tyči T. Objímky jsou vzájemně spojené šroubem jemné ustanovky J. Utažením svěrného šroubu S (hrubé ustanovky) se hrubě zastaví pohyb druhé objímky po pevném rameni T, ale otáčením jemné ustanovky J lze měnit polohu druhé objímky a tím jemně posouvat ramenem R po tyči T. [45.]



obr. 4.3 – Lineární ustanovka [45.]

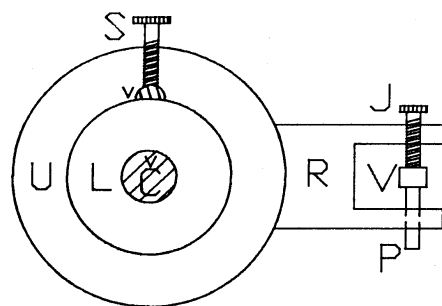
Ustanovky pro otáčivý pohyb slouží ke spojení otočné části přístroje s částí pevnou. [45.] Podle umístění se dělí ustanovky na svislé (obr. 4.4) a vodorovné (obr. 4.5), podle konstrukce na osové a obvodové.

Svislá ustanovka umožňuje sklápění dalekohledu ve vidlici alhidády. Těleso ustanovky U je volně otáčivé na vodorovné ose dalekohledu Č a pevně spojeno s ramenem R. Při utažení šroubu hrubé ustanovky S se pevně spojí těleso ustanovky a rameno s vodorovnou osou dalekohledu Č. Jemný pohyb je dán velikostí rámečku v na vidlici dalekohledu a délkou vřetena šroubu jemné ustanovky J, která se opírá o konec ramene R, na které tlačí péro P. [45.]

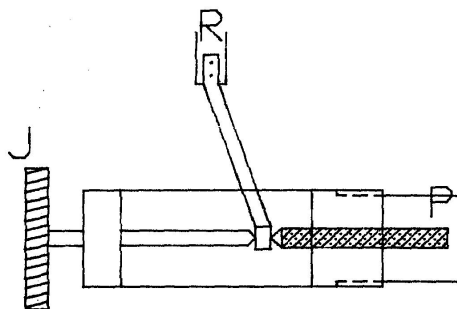


obr. 4.4 – Svislá ustanovka [45.]

Prstenec **vodorovné ustanovky** U je nasazen otáčivě na limbovém válci L, který je současně pouzdem pro čep alhidády Č, nesoucí vidlici s dalekohledem. Tělesem ustanovky U prochází tyčinka šroubu hrubé ustanovky S, která při utažení dotlačí na limbový válec vložku v z měkkého kovu a spojí dočasně limbový válec L s tělesem ustanovky U. Rámeček R spojený pevně s prstencem ustanovky je opatřen jemnou ustanovkou J a perem P, které se opírají o výstupek V otočné části – alhidády. Velikost rámečku R udává využitelný rozsah jemné ustanovky. U zvlášť přesných přístrojů se pohyb šroubu jemné ustanovky zjemňuje dvojitou nerovnoměrnou pákou, která se opírá o výstupek alhidády nebo rameno R u svislé ustanovky (obr. 4.6). [45.]

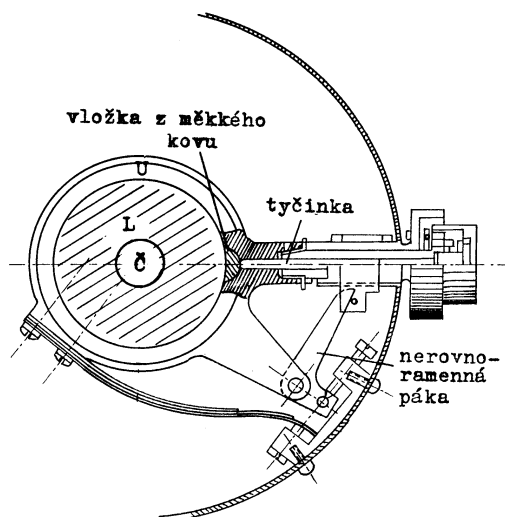


obr. 4.5 – Vodorovná ustanovka [45.]



obr. 4.6 – Zjemnění pohybu jemné ustanovky dvojitou nerovnoměrnou pákou [45.]

Souosé ustanovky (obr. 4.7) mají souosé umístění hrubé a jemné ustanovky. To umožňuje rychlou a bezpečnou obsluhu přístroje. Používají se zejména u úhloměrných geodetických přístrojů.



obr. 4.7 – Souosá ustanovka [45.]

Nosná zařízení

Geodetické přístroje se staví při měření na přiměřeně vysoké podstavce – stativy, observační pilíře, konzoly nebo rozpěry. K připevnění teodolitu na nosné zařízení se používá spojovací článek – podložka.

Stativ (obr. 4.8) se skládá z hlavy s otvorem uprostřed a tří noh se stálou či měnitelnou délkou. Nohy bývají opatřeny zahroceným kovááním a výstupkem, umožňujícím snadné zašlápnutí stativu do země. Tím se dosáhne pevnějšího postavení stativu a přístroje. Nohy jsou spojeny s hlavou stativu čepy, kolem kterých se mohou otáčet. Jejich pohyb je pro zvýšení stability bržděn pérovou podložkou se zajišťující maticí. Stativ musí být lehký a přitom dostatečně pevný a stabilní. Přístroj se staví na rovinnou plochu hlavy stativu. Ke spojení přístroje se stativem slouží středový šroub, který se šroubuje do matice umístěné na pružné ocelové desce třínožky. Středový šroub je většinou dutý, což umožňuje optickou centraci přístroje nad daným bodem nebo použití tzv. tuhé olovnice.



obr. 4.8 - Stativ

Centrace na **pilíři** tzv. **nucená centrace** slouží pro přesné práce. Účelem je stejné umístění přístroje při opakovaných měřeních po dobu třeba i několika let. Středový šroub je nahrazen šroubem stejného závitu, který je však pevně umístěn v betonovém pilíři. Nucená centrace se používá zpravidla při požadavku zvýšené přesnosti naměřených veličin při současné eliminaci některých chyb (chyba z centrace), při měření deformací. [45.]

Konzoly jsou kovová ramena, která je možné jedním konce připevnit k pevným předmětům prostředí. Na druhý konec se postaví či zavěsí teodolit. Konzoly se používají ve speciálních případech ve stavebnictví, strojírenství, v podzemních prostorách

Rozpěry se jako nosné zařízení používají v podzemních prostorách.

Podložka (obr. 4.9) má buď trojúhelníkový nebo kruhový tvar. Skládá se z vlastního tělesa, na kterém jsou tři urovnávací šrouby a z pružné podložkové desky, která se přišroubuje na hlavu stativu. Spojení teodolitu s podložkou se nejčastěji řeší:

- válcovým čepem svislého osového systému do pouzdra v podložce (teodolit se upevňuje svorkou nebo bajonetovým uzávěrem)
- třemi obvodovými čepy (teodolit se upevňuje pootočením a dotlačením).



obr. 4.9 - Podložka

Konstrukcí podložky a dolních částí přístrojů, terčů apod. se zabezpečuje přesné centrické umístění přístroje a pomůcek při jejich výměně. Jejich vzájemná výměna se může provést, aniž by se muselo měnit dostředění přístroje či pomůcky. Toho se využívá zejména při přesných polygonových měřeních, při paralaktickém měření délek apod.

Čepy a pouzdra čepů

Čepy a pouzdra bývají ne zcela správně označovány jako osy přístrojů. Osou tělesa se rozumí místo středů rovinných řezů, vedených v určitém směru na těleso. Osu rozeznáváme **geometrickou** – osa rotačního tělesa a **mechanickou** – přímka, podél níž se otáčí čep v pouzdře.

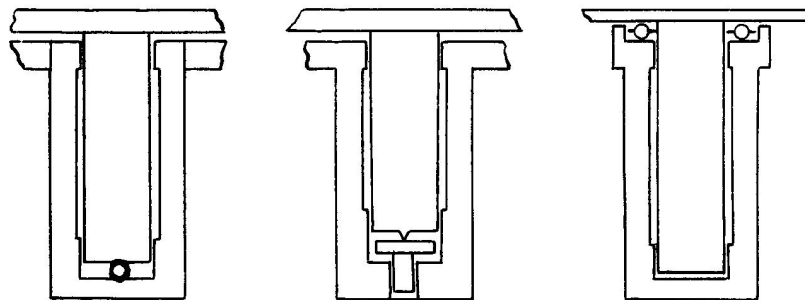
Čepy a pouzdra umožňují vzájemný pohyb pevné a otočné části přístroje. Vyrábějí se z oceli, bronzu nebo pro méně přesné přístroje z mosazi. Pouzdra slouží k podpoře a vedení čepů měřických přístrojů. K lehkému chodu točné osy přístroje je třeba, aby tření čepu v pouzdře bylo co nejmenší. Proto mívají čepy ve střední části menší průměr než je průměr pouzdra, a nebo se používá dvojice pouzder dostatečně od sebe vzdálených (např. u vodorovné osy dalekohledu). Chod svislé osy teodolitu se dále usnadňuje vhodným mazadlem, které vytváří

mezi třecími plochami tenký olejový film. Čepy nemají vykazovat necentričnost nebo být eliptické na styčných plochách s pouzdrem mají mít co nejmenší radiální vůli.

U geodetických úhломěrných přístrojů se rozlišují dvě hlavní osy – **vodorovná** a **svislá**.

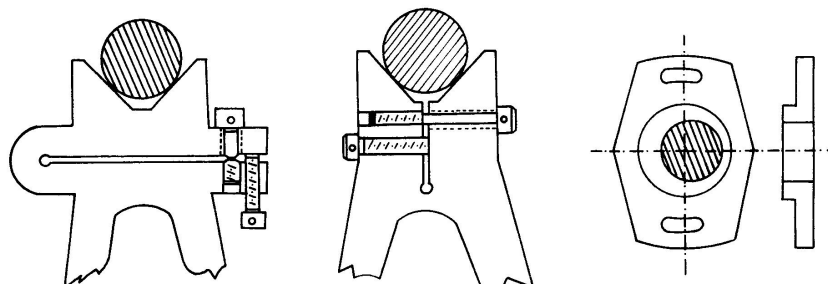
- a) **Svislá osa** geodetických přístrojů umožňuje otočné spojení alhidády, nesoucí dalekohled s třínožkou (limbem) přístroje. Čep mívá válcový tvar. Čep i pouzdro musí být ze stejného materiálu, aby měly stejnou tepelnou roztažnost. Jejich povrch musí být vzájemně vybroušen a vyhlazen a čep i pouzdro musí být vzájemně zabroušeny a lapovány (mechanicky tvrzeny). V současné době se provádí tvrzení čepů a pouzder buď nitridováním nebo tvrdým chromováním.

Svislý tlak alhidády se u menších přístrojů zachycuje broušenou ocelovou kuličkou, o kterou se opírá válcový čep, nebo bývá čep alhidády zakončen tvrdým hrotem, který se opírá o výškově stavitelnou kalenou plošku, umístěnou na dně čepu. Některé přesné přístroje používají k zachycení svislého tlaku alhidády malého kuličkového ložiska u horního čela pouzdra čepu.



obr. 4.10 – Způsoby zachycení svislého tlaku alhidády [45.]

- b) **Vodorovná osa** geodetických přístrojů nese u většiny teodolitů dalekohled a výškový kruh. K dosažení kolmosti vodorovné a svislé osy bývalo jedno pouzdro vodorovné osy opatřeno rektifikačním zařízením (vodorovnou či svislou štěrbínou, excentrickým uložením pouzdra čepu). Viz. obrázek 4.11.



obr. 4.11 – Příklady rektifikačních zařízení pouzdra vodorovné osy [45.]

Odklon točné osy přístroje od vodorovné polohy způsobí při měření vodorovných úhlů chybu velikosti $\Delta_i = i * \text{tg}\beta$, kde β je výškový úhel a i chyba v poloze točné osy

přístroje. Při požadavku, aby odklon točné osy nezpůsobil ve vodorovném úhlu větší chybu než je přesnost odčítání vodorovných úhlů, tj. maximálně 0,1 mgon stačí, bude-li dodržena kolmost točné a svislé osy přístroje s přesností do 1 mgon. Tomu odpovídá při vzdálenosti pouzder $l = 100$ mm maximální vychýlení jednoho z obou ložisek od vodorovné roviny o hodnotu $h = l * tgi = 100 * tg0,0001 = 2 * 10^{-3}$ mm. Tato tolerance se dá při výrobě dobře dodržet, a proto současné přístroje nemají zařízení k opravě polohy točné osy dalekohledu. Při strmějších záměrech, kdy chyba Δ_i přesáhne hodnotu 0,1 mgon, je nutno vliv této chyby vyloučit měřením ve dvou polohách dalekohledu. [45.]

4.3.2 Optické součásti přístrojů

Zrcadla, hranoly, planparalelní deska a čočky.

Geometrická optika jako vědní disciplína vznikla pro potřeby praktické optiky. Je to nauka o ideální optickém zobrazení a o vadách reálného zobrazení. Definuje základní rovnice pro určení chodu světla v homogenním prostředí, zabývá se chováním světla na rozhraní opticky různorodých prostředí, určuje vztahy pro chod světla optickými přístroji a dává základy pro konstrukci těchto přístrojů. [27.]

Geometrická optika se řídí následujícími **zákony**, které platí pro jakékoliv optické prvky:

- a) ve stejnorodém a izotropním prostředí (optické vlastnosti nejsou závislé ani na poloze ani na orientaci bodu) se šíří světlo přímočaře ve tvaru světelných paprsků. Zákon přímočarého šíření světla platí pouze pokud překážky postavené světlu do cesty jsou dostatečně velké oproti jeho vlnové délce. (Jinak nastává zřetelný ohyb světla).
- b) jednotlivé paprsky svazku jsou na sobě nezávislé,
- c) na rozhraní dvou stejnorodých a izotropních prostředí se paprsky řídí zákonem odrazu² a lomu³ (obr. 4.12). V anizotropních prostředích nastávají však odchylky od zákona lomu světla.

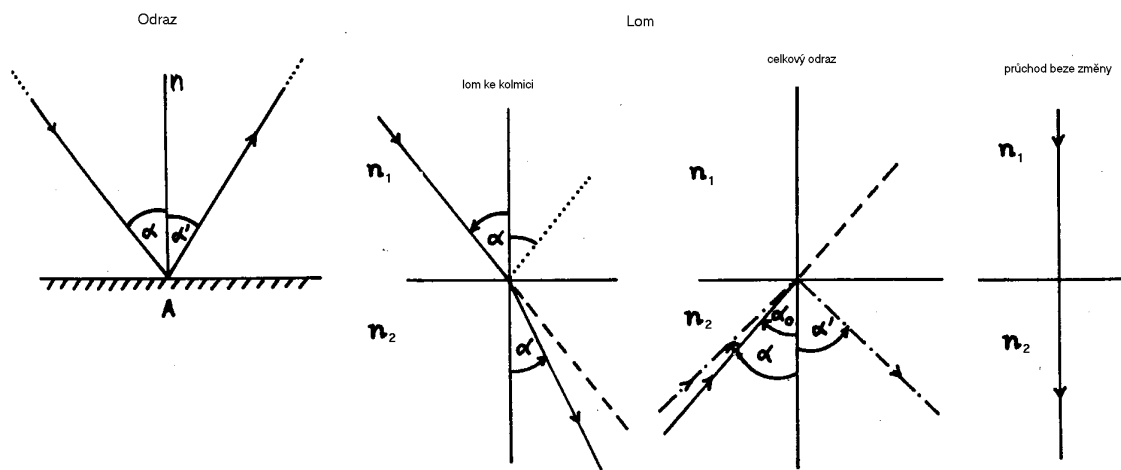
² Úhel dopadu je stejný jako úhel odrazu $\alpha = \alpha'$ a odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.

³ Na rozhraní dvou průhledných izotropních prostředí se světelné paprsky lámou. Poměr sinu úhlu dopadu α a sinu úhlu lomu α' je pro světlo určité vlnové délky a pro určitá dvě optická prostředí konstantní a nazývá se relativní index lomu $n_{1,2}$.

Jestliže paprsek postupuje z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího, je $n_{1,2} > 1$ a říkáme, že paprsek se láme ke kolmici.

Jestliže postupuje paprsek z prostředí hustšího do prostředí řidšího, je $n_{1,2} < 1$ a nastává lom od kolmice až do určitého mezního úhlu α_0 , kdy lomený paprsek dosáhne hodnoty 90° a bude se lámat po rozhraní. Při dalším zvětšování úhlu dopadu nastává celkový odraz.

Dopadá-li paprsek kolmo na rozhraní, prochází do druhého prostředí beze změny.



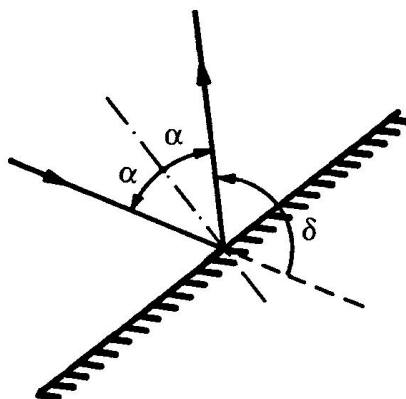
obr. 4.12 – Odraz a lom

Zrcadla

U geodetických přístrojů se používají většinou zrcadla rovinná. Jsou to broušené skleněné desky z jedné strany opatřené odrazivou vrstvou (stříbro, chrom, hliník...). Používají se k odklonu světelných paprsků od původního směru, a to buď k osvětlení odečítacích pomůcek a zařízení a nebo k snazšímu pozorování některých částí přístroje.

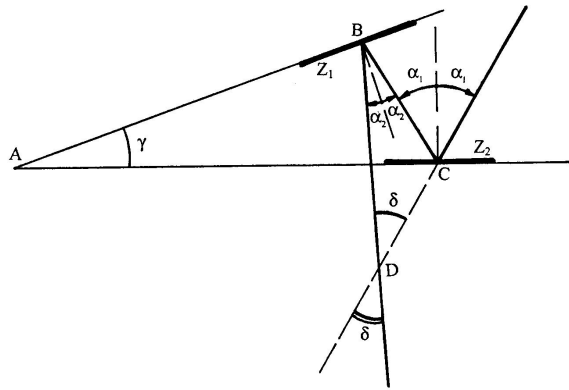
Dráha dopadajícího světelného paprsku se řídí zákonem odrazu.

Důležitým pojmem při změně směru paprsku je jeho **deviace** (obr. 4.13). Deviace je odchylka δ paprsku po optické transformaci vůči paprsku původnímu.



obr. 4.13 – Deviace paprsku [27.]

V optických přístrojích se využívá kombinace rovinných zrcadel. Svírají-li dvě rovinná zrcadla uhel γ je deviace paprsku $\delta = 2\gamma$, jak je patrné z obrázku (obr. 4.14).



obr. 4.14 – Deviace paprsku využití kombinace rovinných zrcadel [27.]

$\triangle ABC$:

$$\gamma + 90^\circ + \alpha_2 + 90^\circ - \alpha_1 = 180^\circ$$

$$\gamma = \alpha_1 - \alpha_2$$

$\triangle BCD$:

$$\delta + 2\alpha_2 + 180^\circ - 2\alpha_1 = 180^\circ$$

$$\delta = 2\alpha_1 - 2\alpha_2$$

$$\delta = 2\gamma .$$

Této myšlenky bylo využito při konstrukci vytyčovací zrcátka ($\gamma = 45^\circ$) a sextantu.

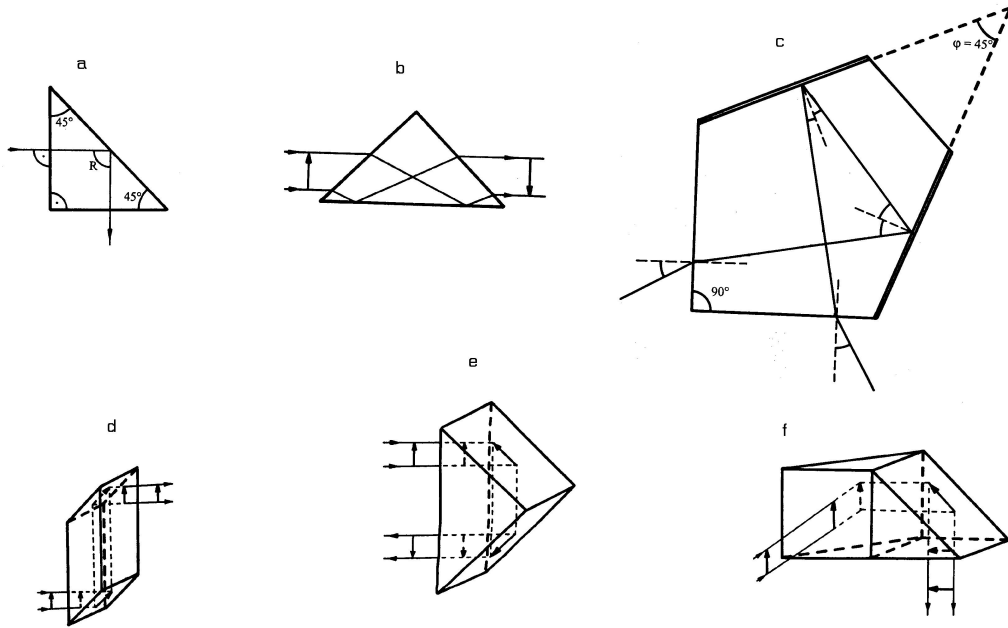
Hranoly

Hranoly jsou skleněná tělesa omezená dokonale vybroušenými rovinami. Jsou vyráběny z kvalitního optického skla. Užívají se k odklonu paprsků nebo k převracení či posunutí obrazů optických soustav.

Dráha dopadajícího světelného paprsku se řídí zákonem lomu.

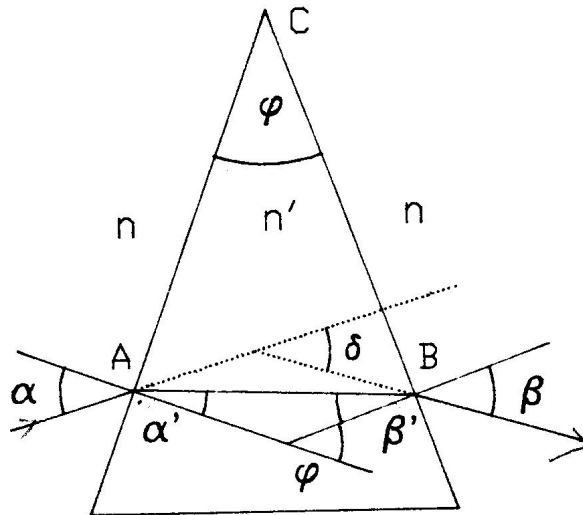
Hranoly je možné rozdělit na odrazné a lámavé [27.].

Mezi *odrazné hranoly* (obr. 4.15) používané v geodetických přístrojích patří např. trojboký hranol (k odchýlení paprsku o 90° – obr. 4.15 a, k otočení obrazu o 180° v původním směru – obr. 4.15 b), pětiboký hranol – pentagon – obr. 4.15 c (působí jako dvojice zrcadel svírajících úhel 45°), rombický hranol – obr. 4.15 d (k paralelnímu posunutí paprsků), střeškový hranol – obr. 4.15 e (ke stranovému obrácení a posunu paprsku), složené hranoly – obr. 4.15 f (např. sfénoid – k otočení obrazu o 90° a posunutí obrazu).



obr. 4.15 – Příklady odrazných hranolů [27.]

Nejdůležitějším **lámavým hranolem** je optický klín. Paprsek dopadá na hranol s lámavým úhlem φ pod úhlem α . Deviace δ je funkcí indexu lomu skla n' , ze kterého je hranol zhotoven a lámavého úhlu φ .



obr. 4.16 – Optický klín [45.]

$$\alpha - \alpha' + \beta - \beta' + 180^\circ - \delta = 180^\circ \Rightarrow \delta = \alpha - \alpha' + \beta - \beta' \quad (1)$$

$$180^\circ - \varphi + \alpha' + \beta' = 180^\circ \Rightarrow \varphi = \alpha' + \beta' \quad (2)$$

$$\delta = \alpha + \beta - \varphi$$

Pokud $n \cdot \sin \alpha = n' \cdot \sin \alpha'$, pak pro $n = 1$ a malé α je možné psát

$$\alpha \approx n' \cdot \alpha' \text{ (obdobně pro } \beta).$$

Dosazením do (1) dostaneme

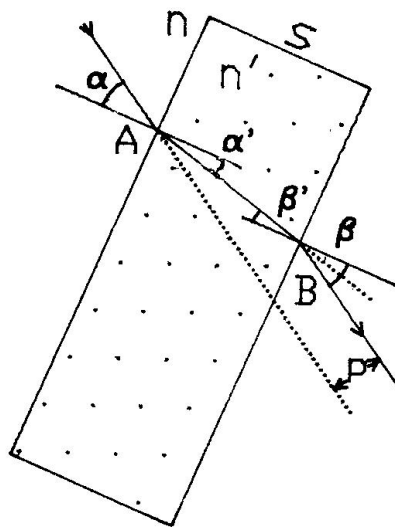
$$\delta = n' \cdot \alpha' - \alpha + n' \cdot \beta' - \beta$$

$$\delta = \alpha' \cdot (n' - 1) + \beta' \cdot (n' - 1) = (n' - 1) \cdot (\alpha' + \beta').$$

Použitím (2): $\delta = \varphi \cdot (n' - 1)$.

Planparalelní deska

Planparalelní deska je tvořena dvěma paralelními optickými rozhraními. Je zhotovena z optického skla o indexu lomu n' . Dopadne-li paprsek kolmo, prochází deskou beze změny směru. Dopadne-li pod úhlem α , který je menší než úhel mezní ($\approx 42^\circ$), dochází k lomu paprsku na obou plochách desky. Na prvním rozhraní dochází k lomu ke kolmici, na druhém od kolmice. Vycházející paprsek je rovnoběžný s paprskem dopadajícím, leží v rovině dopadu a je posunutý o hodnotu p (ta je funkcí síly desky, úhlu dopadu a indexu lomu skla).



obr. 4.17 – Planparalelní deska [45.]

$$\sin \alpha = n \cdot \sin \alpha'$$

$$n \cdot \sin \beta' = \sin \beta$$

$$\Rightarrow \alpha = \beta, \alpha' = \beta'$$

$$p = \overline{AB} \cdot \sin(\alpha - \alpha')$$

$$\overline{AB} = \frac{s}{\cos \alpha'}$$

$$\text{tedy: } p = \frac{s}{\cos \alpha'} * \sin(\alpha - \alpha').$$

Po úpravě:

$$p = \frac{s}{\cos \alpha'} * (\sin \alpha * \cos \alpha' - \cos \alpha * \sin \alpha'),$$

$$p = s * \sin \alpha - \frac{s}{\cos \alpha'} * \cos \alpha * \sin \alpha'$$

$$\text{a } p = s * \sin \alpha * \left(1 - \sqrt{\frac{1 - \sin^2 \alpha}{n^2 - \sin^2 \alpha}} \right) \quad [27.]$$

Protože je úhel α malý, můžeme psát $\sin^2 \alpha = 0$, $\sin \alpha = \alpha$.

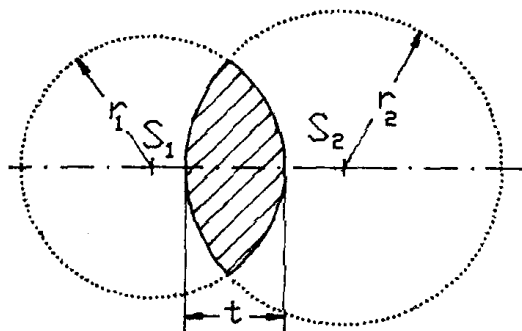
$$p = s * \frac{n-1}{n} * \alpha$$

Planparalelní deska je u geodetických přístrojů součástí optických mikrometrů.

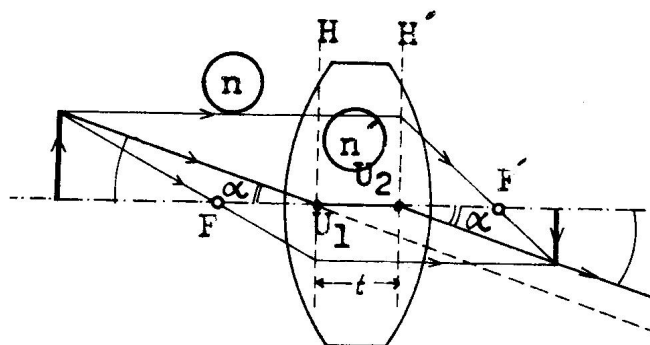
Čočky

Čočky se dělí na tenké a tlusté. Podle toho, zda čočky poskytují skutečné obrazy či neskutečné, je dělíme na spojky a rozptylky. Spojky mají okraje tenčí než středy, u rozptylek je tomu opačně.

Čočka je těleso ohraničené dvěma většinou kulovými plochami. Poloměry těchto ploch označíme r_1 a r_2 , spojnicí středů křivosti S_1 a S_2 (= optická osa) o , tloušťku čočky t . Každá čočka má dva uzlové body U_1 a U_2 (pokud čočku z obou stran obklopuje stejné prostředí, splývají s hlavními body H).



obr. 4.18 – Tloušťka čočky [45.]



obr. 4.19 – Průchod paprsku uzlovými body čočky [45.]

Paprsek, který přichází do bodu U_1 , se rovnoběžně posouvá do bodu U_2 (stejně jako u planoparalelní desky) a zachovává svůj směr. Svazek paprsků (monochromatický) rovnoběžný s optickou osou se po průchodu spojnou čočkou spojí v jediném bodě na ose, který se nazývá ohnisko (značíme jej F). Vzdálenost ohniska od bodu U se nazývá ohnisková vzdálenost f :

$$\frac{1}{f} = (n-1) * \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) - \left(\frac{n-1}{n} \right)^2 * \frac{t}{r_1 * r_2}$$

n ... index lomu materiálu čočky

r_1, r_2 ... poloměry křivosti

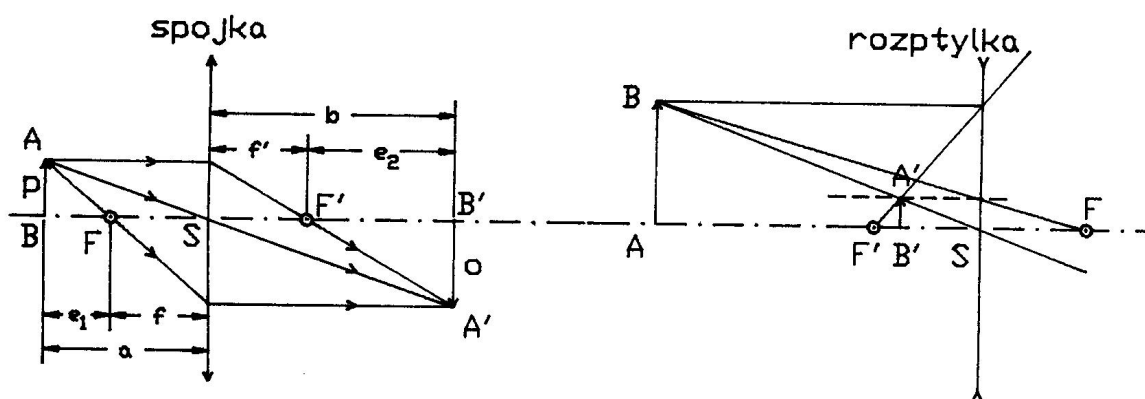
t ... tloušťka čočky.

U tenkých čoček uvažujeme $t = 0$ a oba hlavní body H splývají v jediný střed čočky S .

Paprsky vycházející z předmětu, které prochází středem čočky, projdou čočkou beze změny.

Paprsky, které jsou rovnoběžné s optickou osou se lámou do ohniska.

Paprsky, které procházejí ohniskem, jsou po průchodu čočkou rovnoběžné s optickou osou.



obr. 4.20 – Konstrukce obrazu u čočky spojně a rozptylně [45.]

Poloha obrazu a předmětu vzhledem ke středu čočky závisí na ohniskové vzdálenosti f a je vyjádřena čočkovou rovnicí:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}.$$

Zavedeme-li za hodnotu a výraz $f + e_1$ a za hodnotu b výraz $f + e_2$, dostane čočková rovnice tvar:

$$e_1 * e_2 = f^2.$$

Příčným zvětšením čočky z se označuje poměr velikosti obrazu o vzhledem k velikosti předmětu p :

$$z = \frac{o}{p} = \frac{b}{a}.$$

U vzpřimovacích soustav se používá příčného jednotkového zvětšení čočky.

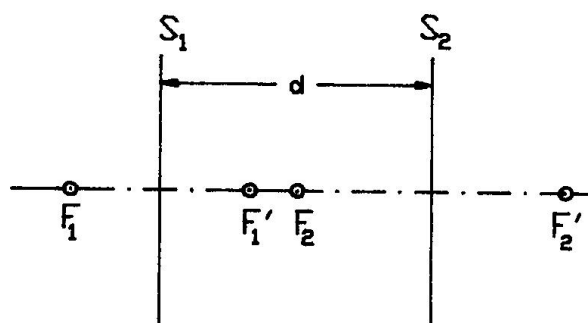
$$z = 1 \Rightarrow b = a$$

a dosazením do čočkové rovnice dostáváme:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{2}{a} \Rightarrow 2f = a.$$

Kombinací dvou tenkých jednoduchých čoček o ohniskových vzdálenostech f_1 a f_2 , jejichž středy jsou od sebe vzdáleny o hodnotu d (obr. 4.21) se vytvoří čočka o ohniskové vzdálenosti

$$f = \frac{f_1 * f_2}{f_1 + f_2 - d}.$$

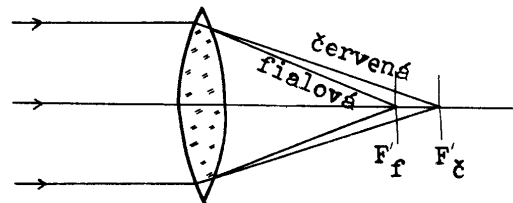


obr. 4.21 – Kombinace dvou tenkých jednoduchých čoček [45.]

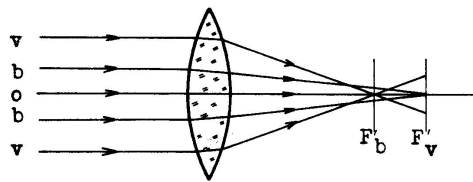
Volbou různých ohniskových vzdáleností f_1 a f_2 , či optického intervalu d , je možné získat různé hodnoty ohniskové vzdálenosti f . Toho se využívá k odstranění **optických vad soustav**. Mezi těmito vadami jmenujme alespoň:

- **vada chromatická** (obr. 4.22) – dochází k rozkladu světla, projevuje se barevným orámováním obrazu,

- **vada sférická** (obr. 4.23) – paprsky dopadající na čočku dále od osy se lámou silněji než paprsky bližší optické ose, projevuje se neostrostí zobrazení.



obr. 4.22 – Vada chromatická [45.]



obr. 4.23 – Vada sférická [45.]

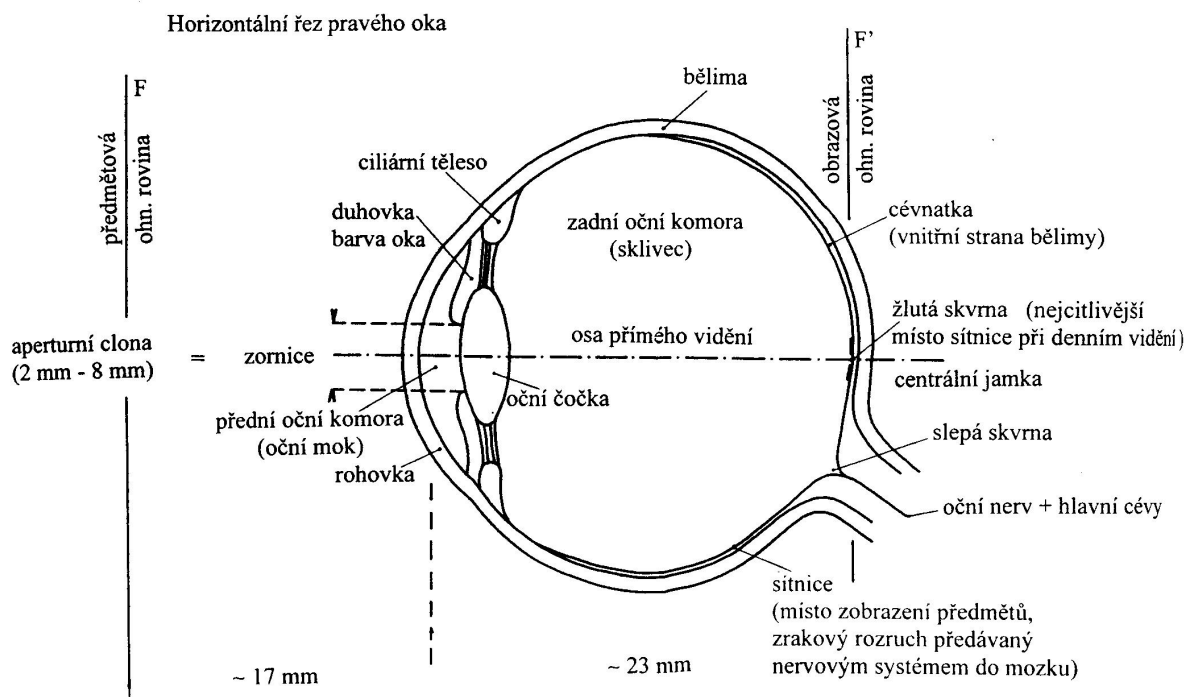
4.3.3 Jednoduché optické přístroje

Úkolem jednoduchých optických přístrojů je zobrazit předmět tak, aby bylo výhodnější pozorovat okem jeho obraz než pozorovat okem vlastní předmět.

Oko, lupa, mikroskop a dalekohled.

Oko

Oko je optická soustava přibližně kulového tvaru. Oko se skládá z bělimy a rohovky (vnější vrstva), cévnatky, jejíž povrch je v zadní části oka tvořen sítnicí, ciliárním tělesem, duhovkou se zornicí, přední oční komorou (mezi rohovkou a čočkou) vyplněnou očním mokem a zadní oční komorou vyplněnou sklivcem (obr. 4.24).



obr. 4.24 – Řez pravým okem [27.]

Oční čočka je bezbarvé těleso tvaru bikonvexní čočky. Na čočku se upíná ciliární těleso, které se reflexivně stahuje a roztahuje. Tím se mění optická mohutnost čočky, což umožňuje vytvoření obrazu vždy na povrchu sítnice. Říkáme, že oko akomoduje.

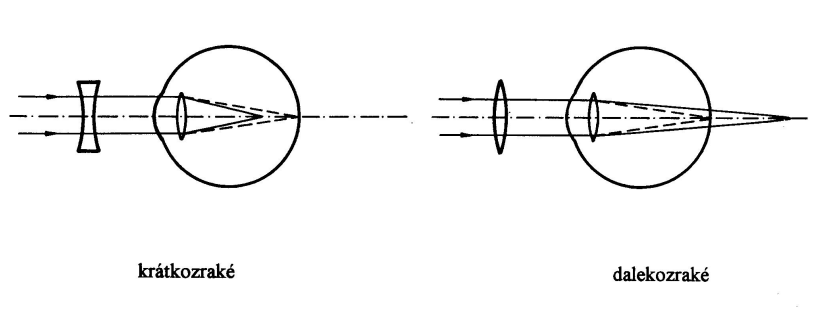
Sítnice je vrstva citlivá na světlo. Je tvořena čípkami a tyčinkami⁴. V nich dochází k rozruchům, které se přeměňují na elektrické impulsy, jež jsou pomocí očního nervu přenášeny do mozkové kůry. Tím dochází ke zrakovému vjemu. V místě vstupu očního nervu do oka nejsou ani čípky ani tyčinky – tzv. slepá skvrna. Poblíž slepé skvrny je tzv. žlutá skvrna. V její střední části je centrální jamka – místo nejostřejšího vidění.

Optickou soustavu oka tvoří rohovka, oční mok, čočka a sklivec. Na rozhraní těchto prostředí se paprsek láme. Na sítnici se promítá ostrý, zmenšený a obrácený obraz pozorovaného předmětu.

Poruchy lomivosti se nazývají **refrakční vady**. Patří mezi ně:

- **Krátkozrakost** – způsobuje ji větší zakřivení čočky nebo prodloužení optické osy oka. Obraz vzniká před sítnicí. Vada se napravuje čočkami rozptylkami.
- **Dalekozrakost** - způsobuje ji nedostatečné vyklenutí čočky nebo zkrácení optické osy oka. Obraz vzniká za sítnicí. Vada se napravuje čočkami spojky.

⁴ Barevné vidění umožňují čípky. Tři druhy čípků rozlišují tři druhy barev: modrou, zelenou a červenou. Jejich různou kombinací vznikají barevné vjemy. Vidění za šera umožňují tyčinky. Jsou citlivější na světlo, ale nerozlišují barvy.



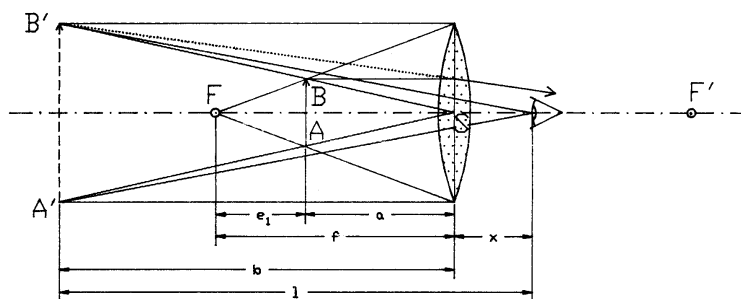
obr. 4.25 – Refrakční vady [27.]

Nejdůležitější vlastností oka je jeho rozlišovací schopnost. Zdravé normální oko je schopné rozlišit dva body v úhlové vzdálenosti asi $1'$.

Lupa

Lupa je nejjednodušším optickým přístrojem. Slouží k pozorování detailů drobných blízkých předmětů, které jsou menší než asi $0,075 \text{ mm}^5$. Toho lze docílit pouze zvětšením zorného úhlu.

Jako lupa slouží spojná čočka, jejíž ohnisková vzdálenost f je kratší než konvenční zraková vzdálenost l (25 cm). Při pozorování lupou se předmět umísťuje mezi předmětové ohnisko a předmětový hlavní bod lupy. Obraz předmětu je neskutečný, zvětšený a vzpřímený (obr. 4.26).



obr. 4.26 – Konstrukce obrazu lupou [45.]

Základní charakteristikou lupy je její **zvětšení**, které je dáno poměrem

$$z = \frac{b}{a} \quad (3).$$

Z čočkové rovnice plyne

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{-b} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{b} = \frac{1}{a} - \frac{1}{f} = \frac{f-a}{a \cdot f} \Rightarrow b = \frac{a \cdot f}{f-a} \quad (4)$$

⁵ $\varpi = y/l \Rightarrow y = l \cdot \varpi \approx 0,073 \text{ mm}$, kde l (konvenční zraková vzdálenost) = 25 cm, $\varpi = 1'$.

Dosazením (4) do (3) dostaneme

$$z = \frac{a * f}{f - a} * \frac{1}{a} = \frac{f}{f - a} = \frac{f}{e_1}.$$

Závěr: zvětšení lupy bude tím větší, čím pro dané f bude předmět blíže k ohnisku čočky.

Na obrázku je l konvenční zraková vzdálenost a x je vzdálenost oka pozorovatele od čočky. Vzdáleností l je dán rozsah měnicího se zvětšení lupy

$$z = \frac{b}{a} = b * \frac{1}{a} = b * \left(\frac{1}{f} + \frac{1}{b} \right) = b * \frac{b + f}{b * f} = \frac{b + f}{f} = \frac{b}{f} + 1.$$

Dosazením za $b = l - x$ (viz obr. 4.26):

$$z = \frac{l - x}{f} + 1.$$

Pro hodnotu $x = 0$ je z maximální a pro $x = f$ je z minimální. Průměrné zvětšení lupy je tedy

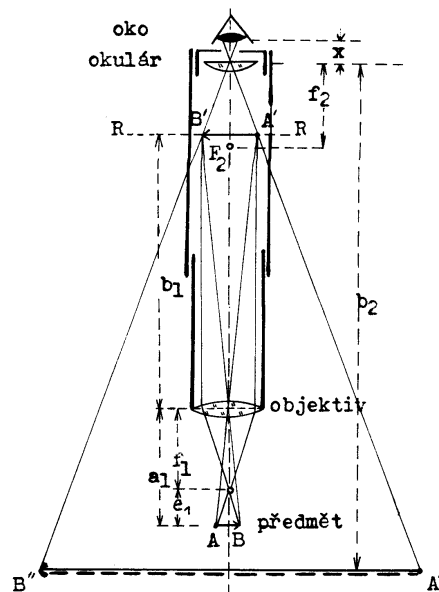
$$z = \frac{l}{f} + \frac{1}{2}.$$

Do zvětšení asi 6x se používají jednoduché čočky, při zvětšení do 30x se používají složené čočkové systémy. Při větších zvětšeních se používá mikroskop.

V geodézii se lupy používají jako čtecí pomůcky při čtení na vernierech, bubincích mikrometrů a jiných malých stupnic.

Mikroskop

Mikroskop slouží k rozlišení podrobností blízkých předmětů. Umožňuje dosáhnout větších úhlových zvětšení (více než 30x) než lupa. Mikroskop se skládá ze dvou optických soustav – z objektivu a z okuláru. Obě součásti jsou umístěny ve společném tubusu a tvoří centrovanou optickou soustavu. Pozorovaný předmět se klade mezi jednoduchou a dvojnásobnou ohniskovou vzdálenost objektivu. Za objektivem se vytvoří skutečný, zvětšený a převrácený obraz, který se pozoruje okulárem jako lupou. Okulár vytváří neskutečný, zvětšený obraz (obr. 4.27).



obr. 4.27 – Konstrukce obrazu mikroskopem [45.]

Vzdálenost mezi obrazovým ohniskem objektivu a předmětovým ohniskem okuláru se nazývá optický interval a značí se Δ , f_1, f_1' jsou ohniskové vzdálenosti objektivu, f_2, f_2' ohniskové vzdálenosti okuláru. Ohniskové vzdálenosti f, f' optické soustavy mikroskopu jsou dány vztahy

$$f = \frac{f_1 * f_2}{\Delta}, \quad f' = -\frac{f_1' * f_2'}{\Delta}.$$

Označíme-li zvětšení objektivu z' a zvětšení okuláru z'' , bude celkové zvětšení mikroskopu dáno součinem

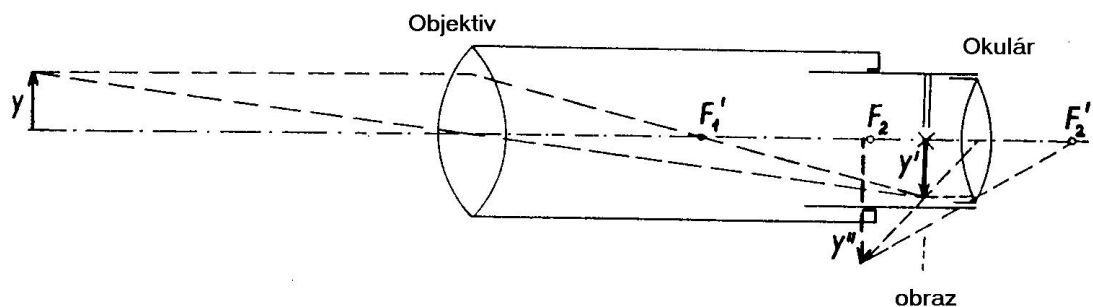
$$z = z' * z'',$$

$$z' = \frac{b_1}{a_1}, \quad z'' = \frac{d - x}{f_2} + 1.$$

Mikroskopy geodetických přístrojů slouží k proměrování stupnic délkových a úhlových. Okuláry (spojné) měřících mikroskopů umožňují umístit do roviny skutečného obrazu vytvořeného objektivem nitkový kříž či odečítací zařízení.

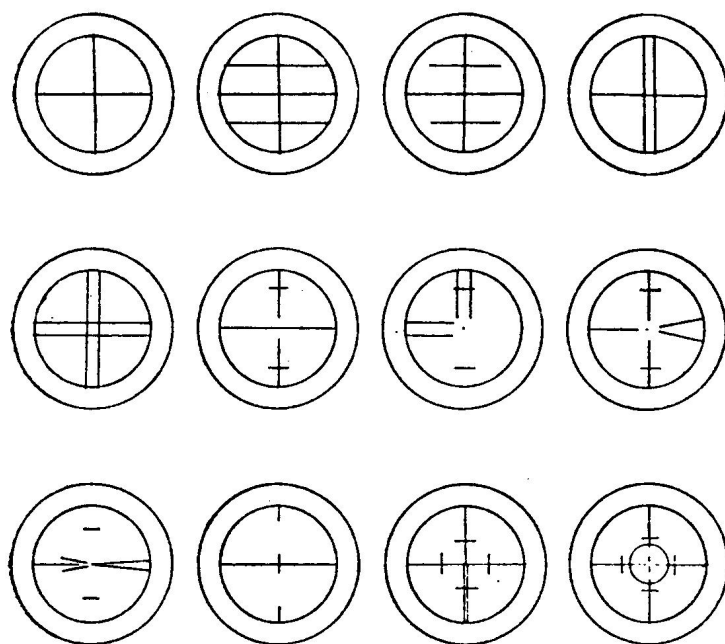
Dalekohled

Dalekohled slouží k pozorování vzdálených předmětů a k rozlišení detailů na těchto předmětech. Je tvořen dvěma optickými soustavami – objektivem a okulárem. Ty slouží ke zvětšení zorného úhlu, pod kterým pozorujeme předmět. Objektiv vytváří skutečný, zmenšený a převrácený obraz (obr. 4.28), který se pozoruje okulárem jako lupou.



obr. 4.28 – Konstrukce obrazu dalekohledem [33.]

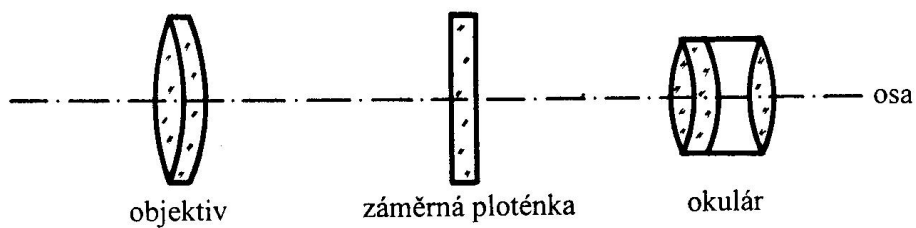
Objektiv dalekohledu je tvořen spojnou soustavou, okulár je tvořen buď soustavou spojnou (Keplerův dalekohled), nebo rozptylnou (Galileův dalekohled). Pro geodetické účely se hodí pouze dalekohled Keplerův, neboť umožňuje umístit do obrazové roviny objektivu nitkový kříž⁶, který umožňuje cílení. (Příklady nitkových křížů jsou na obrázku 4.29). Obraz vytvořený Keplerovým dalekohledem je úhlově zvětšený, skutečný a převrácený. Pokud chceme, aby obraz byl vzpřímený, využijeme k tomu převracející optické soustavy, jako jsou čočky, či systém hranolů.



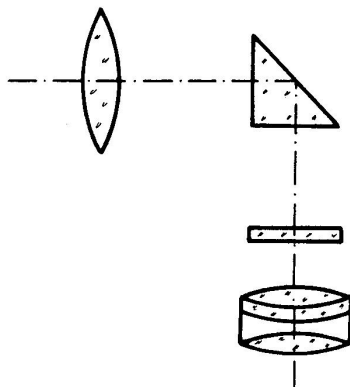
obr. 4.29 – Příklady nitkových křížů [27.]

V geodetických přístrojích se využívá dalekohledu k zaměření na pozorovaný vzdálený předmět (cílovou značku – terč, či měřickou stupnici - lať). Dalekohled může mít optickou osu přímou (obr. 4.30), zalomenou (obr. 4.31), nebo může být použit čočkozrcadlový systém (např. WILD – obr. 4.32).

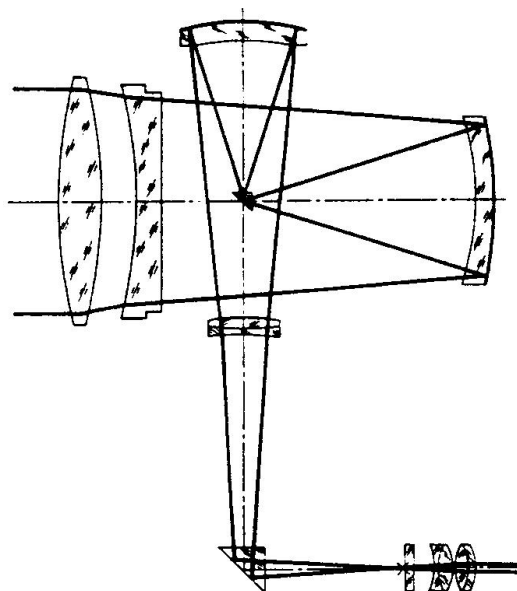
⁶ Tímto křížem může být čárka, kříž, klín, kružnice, křivka či stupnice. Nositeli nitkových křížů jsou planparalelní destičky. Nitkové kříže vznikají rytím, leptáním, fotograficky či fotomechanicky.



obr. 4.30 – Dalekohled s přímou optickou osou [27.]



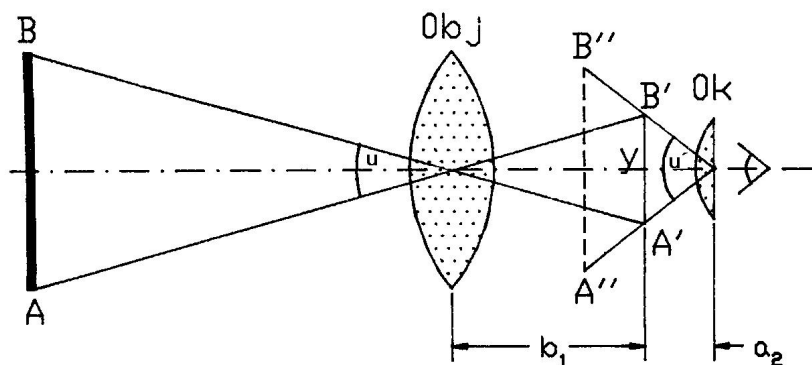
obr. 4.31 – Dalekohled se zalomenou optickou osou [27.]



obr. 4.32 – Čočkozrcadlový dalekohled [27.]

Kvalita dalekohledu závisí na jeho zvětšení, na zorném poli, světelnosti a rozlišovací schopnosti dalekohledu.

Zvětšení dalekohledu z je poměr úhlu u' , pod kterým je vidět obraz předmětu dalekohledem, k úhlu u , pod kterým je vidět předmět pouhým okem.



obr. 4.33 – Zvětšení dalekohledu [45.]

Při malých úhlech u' a u můžeme psát:

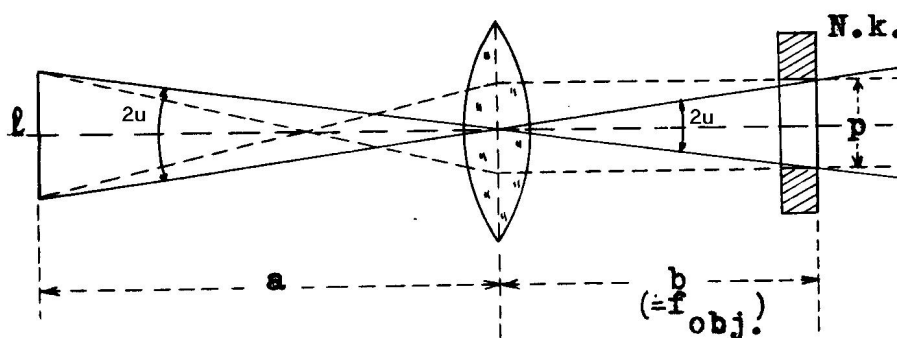
$$z = \frac{tgu'}{tgu} = \frac{u'}{u} = \frac{f_{obj}}{f_{ok}}$$

Vzhledem k tomu, že ohniskové vzdálenosti nebývají u dalekohledů teodolitů známy, počítá se zvětšení z z poměru průměrů vstupní a výstupní pupily, které se určují laboratorně.

Zvětšení dalekohledů u geodetických přístrojů bývá dvacetinásobné až šedesátinásobné.

Zorné pole dalekohledu je skutečné a zdánlivé.

Skutečné vstupní zorné pole je prostor, který se v dalekohledu rázem přehledne. Vyjadřuje se vrcholovým úhlem $2u$, pod kterým je vidět polní clona⁷ ze středu objektivu.



obr. 4.34 – Zorné pole dalekohledu [45.]

⁷ Polní clona vymezuje zorné pole dalekohledu. Používá se proto, aby nedocházelo ke snížení jasu na okraji obrazu.

$2u = \frac{p}{f_{obj}}$, kde p je průměr clonky. Protože $p = k * f_{ok}$ (k nabývá hodnot od 0,5 do 0,2 –

závisí na tom, pro jaké pozorovací podmínky je dalekohled určen), můžeme psát

$$2u = \frac{p}{f_{obj}} = \frac{k * f_{ok}}{f_{obj}} = \frac{k}{z}. \text{ Z toho plyne, že zorné pole je nepřímo úměrné zvětšení}$$

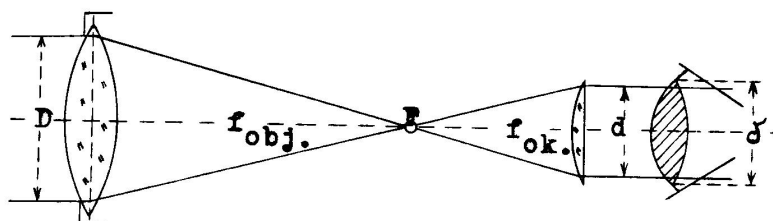
dalekohledu.

Zdánlivé výstupní zorné pole je dáno úhlem $2u'$, pod kterým je vidět polní clona ze středu okuláru a je přibližně rovno z násobku skutečného zorného pole. Zdánlivé zorné pole dalekohledu nesmí být větší než je zorné pole klidného oka (asi 70°).

Pak např. $z_{max} = \frac{70^\circ}{2u_{konst}}$ při požadavku konstantní velikosti vstupního zorného pole, nebo při

požadavku konstantního zvětšení dalekohledu $2u_{max} = \frac{70^\circ}{z_{konst}}$.

Světelnost dalekohledu je poměr světelného toku, který dopadne do oka z obrazu předmětu po průchodu dalekohledem, k světelnému toku, který dopadá do oka přímo z předmětu. Množství světla dopadajícího do oka po průchodu dalekohledem je přímo úměrné ploše výstupní pupily o průměru d , množství světla dopadajícího do oka přímo z předmětu je přímo úměrné ploše zornice oka o průměru δ . Pokud uvažují ztráty světla (absorpcí, difúzí, reflexí) při průchodu dalekohledem⁸, násobím výraz pro světelnost dalekohledu S koeficientem propustnosti soustavy $t < 1$.



obr. 4.35 – Světelnost dalekohledu [45.]

$$S = t * \frac{\Phi_{ok}}{\Phi_o} = t * \frac{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2}{\pi \left(\frac{\delta}{2}\right)^2} = t * \frac{d^2}{\delta^2}$$

Z obrázku 4.35 je patrné, že

$$\frac{D}{d} = \frac{f_{obj}}{f_{ok}} = z \Rightarrow d = \frac{D * f_{ok}}{f_{obj}} = \frac{D}{z} \Rightarrow S = t * \frac{D^2}{z^2 * \delta^2}.$$

⁸ Pro zmenšení ztrát se nanáší na povrchy čoček antireflexní vrstvy.

Světelnost klesá se vzrůstajícím zvětšením.

Rozlišovací schopnost je nejmenší úhel, pod kterým lze při zobrazení optickým přístrojem navzájem rozlišit obrazy dvou bodů. Ohybem světla se bod nezobrazí jako bod, ale jako soubor samostatných kroužků tvořených ohybovými maximy a minimy. Pro poloměr středního kroužku platí $r = f * \frac{\lambda}{D}$, kde f je ohnisková vzdálenost objektivu, λ je vlnová délka světla a D je průměr vstupní pupily.

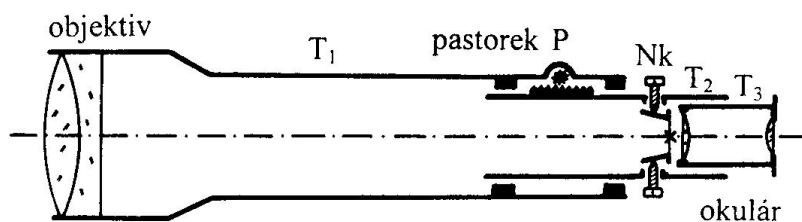
Nejmenší rozlišitelný úhel γ dvou bodů pozorovaný ze středu objektivu bude při $\lambda \approx 0,5 \mu\text{m}$

$$\gamma = \frac{r}{f} * \rho = \frac{f * \frac{\lambda}{D}}{f} * \rho = \frac{\lambda}{D} * \rho = \frac{0,0005}{D} * 63,6 \approx \frac{0,03}{D} \text{ gon} * \text{mm}^{-1}. [45.]$$

Před vlastním cílením (nastavením nitkového kříže na obraz signálu zaměřovaného bodu) je třeba, aby se prvky nitkového kříže jevíly ostré a zřetelné (= byly zaostřeny). Zaostření dosáhneme tak, že zamíříme dalekohledem na světlé pozadí a otáčíme objímkou okuláru dokud neuvidí oko obrazec ostře.

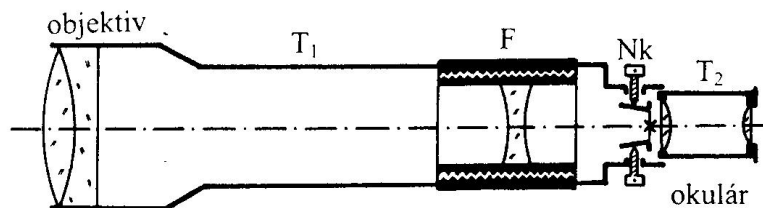
Při cílení navádíme střed nitkového kříže na významný bod cíle. Při tomto úkonu provádíme tzv. zaostřování obrazu. Tzn. ztotožňujeme rovinu nitkového kříže s obrazem cíle. Toho lze docílit buď posunem roviny nitkového kříže do roviny skutečného obrazu – **dalekohled proměnlivé délky**, nebo posunem roviny skutečného obrazu do roviny nitkového kříže – **dalekohled stálé délky**.

Dalekohled proměnlivé délky (obr. 4.36) se skládá ze tří trubic. Prostřední trubicí je možno pohybovat prostřednictvím pastorku. Zároveň s trubicí se pohybuje i rovina nitkového kříže.



obr. 4.36 – Dalekohled proměnlivé délky [27.]

U dalekohledu stálé délky (obr. 4.37) se posouvá rovina skutečného obrazu prostřednictvím slabé rozptylky (fokuzální čočky), která je vložena do trubice T_1 . Její pohyb umožňuje prstenec na dalekohledové trubicí.



obr. 4.37 – Dalekohled stálé délky [27.]

Není-li rovina nitkového kříže totožná s rovinou skutečného obrazu, vzniká tzv. **paralaxa nitkového kříže**. Její odstranění je možné změnou zaostření nitkového kříže nebo obrazu tak, aby se obě roviny ztotožnily.

4.3.4 Odečítací pomůcky geodetických přístrojů

Index, vernier, mřížka, optický mikrometr, elektronické odečítací systémy.

Při geodetickém měření zjišťujeme velikost měřených geodetických veličin odečítáním prostřednictvím odečítacích pomůcek. Odečítací pomůcky můžeme rozdělit do 3 skupin:

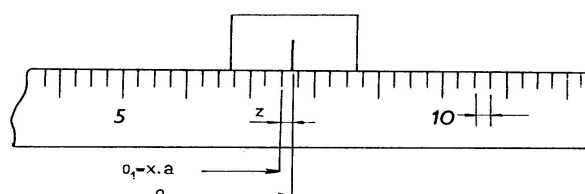
- mechanické (index, vernier, mřížka),
- optické (mikroskopy, mikrometry),
- elektronické.

Odečítání mechanických a optických odečítacích pomůcek vykonáváme vizuálně, u elektronických pomůcek se odečítání vykonává plně automaticky a digitálně. Vizuální odečítání neprovádíme pouhým okem. Oko totiž dokáže rozdělit na desetiny ještě dílek velikosti 1 mm, je-li však interval dělení stupnice odečítací pomůcky menší, musíme jej opticky zvětšit. K tomu využíváme lupy a mikroskopy.

Index

Index je nejjednodušší odečítací pomůckou. Pomocí indexu odečítáme na hlavní stupnici nejbližší nižší vyznačený údaj a toto čtení doplníme odhadem zbytku dílku mezi dílkem stupnice, který jsme přečetli, a ryskou.

Čtení $o = x \cdot a + z$, kde a je nejmenší dílek stupnice, x je počet celých dílků stupnice k rysce a z je zbytek, který jsme odhadli. Hodnotu $x \cdot a$ také nazýváme hrubé čtení a hodnotu z jemné čtení.

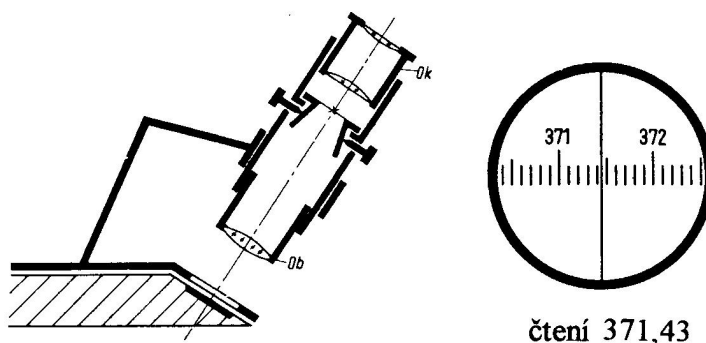


obr. 4.38 - Index [33.]

Na obrázku (obr. 4.38) má hlavní stupnice grádové dělení s intervalem $a = 25^c$, pak:

$$\begin{aligned} x * a &= 7,50^g && \dots \text{hrubé čtení} \\ z &= 0,6 * a = 15^c && \dots \text{odhad} \\ o &= 7,65^g && \dots \text{výsledné čtení} \end{aligned}$$

Použijeme-li index ve spojení s mikroskopem (v rovině obrazu mikroskopu je skleněná destička s odečítací rýskou) mluvíme o *čárkovém mikroskopu*.



obr. 4.39 – Čárkový mikroskop [27.]

Vernier

Vernier je odečítací pomůcka, která nám umožňuje přesnější odečítání zbytku z dílku hlavní stupnice. Vernier je pomocná stupnice, která se pohybuje podél hlavní stupnice. Mezi oběma stupnicemi platí následující vztah:

$$(n \pm 1) * a = n * a' \dots \text{vernierová rovnice}$$

kde n ... počet dílků vernieru
 a ... velikost dílku hlavní stupnice
 a' ... velikost dílku vernieru.

Nebo-li n dílkům vernieru odpovídá $(n - 1)$ dílků hlavní stupnice (vernier stejnosměrný) nebo $(n + 1)$ dílků hlavní stupnice (vernier protisměrný).

$$\text{Dále: } n * a - a = n * a'$$

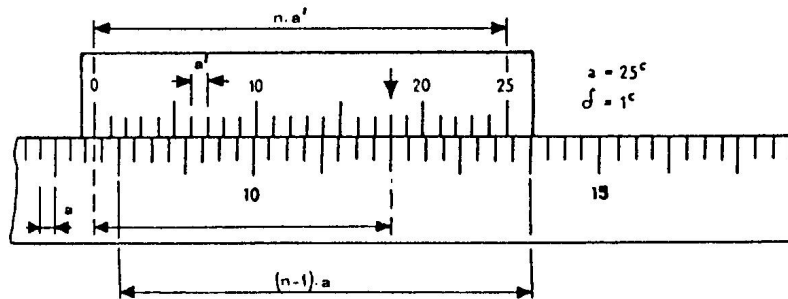
$$n * (a - a') = a, \text{ kde } (a - a') \text{ označíme } \delta \dots \text{vernierová diference.}$$

$$\text{Potom: } n * \delta = a$$

$$\delta = \frac{a}{n} .$$

Čtení pomocí vernieru se skládá ze čtení hlavní stupnice a ze čtení vernieru. Na hlavním měřítku přečteme podle nulové rýsky vernieru počet celých dílků (hrubé čtení) a na vernieru

zjistíme, kolikátý dílek vernieru splývá s některým dílkem hlavní stupnice. Splývá-li i -tý dílek vernieru, je čtení vernieru $i * \delta$ (jemné čtení). Výsledné čtení je rovno součtu hrubého a jemného čtení.



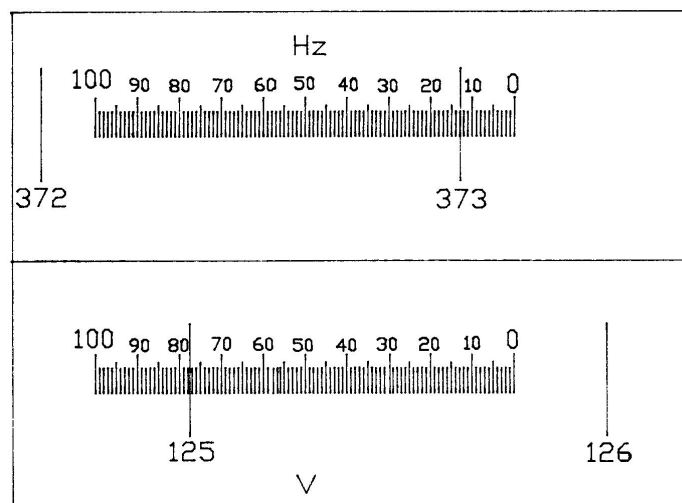
obr. 4.40 – Vernier [33.]

Na obrázku (obr. 4.40) je hrubé čtení rovno $7,50^\circ$, jemné čtení je 18° a výsledné čtení tedy $7,68^\circ$.

Použijeme-li vernier ve spojení s mikroskopem (v rovině obrazu mikroskopu je skleněná destička s vyrytým vernierem) mluvíme o *vernierovém mikroskopu*.

Mřížka

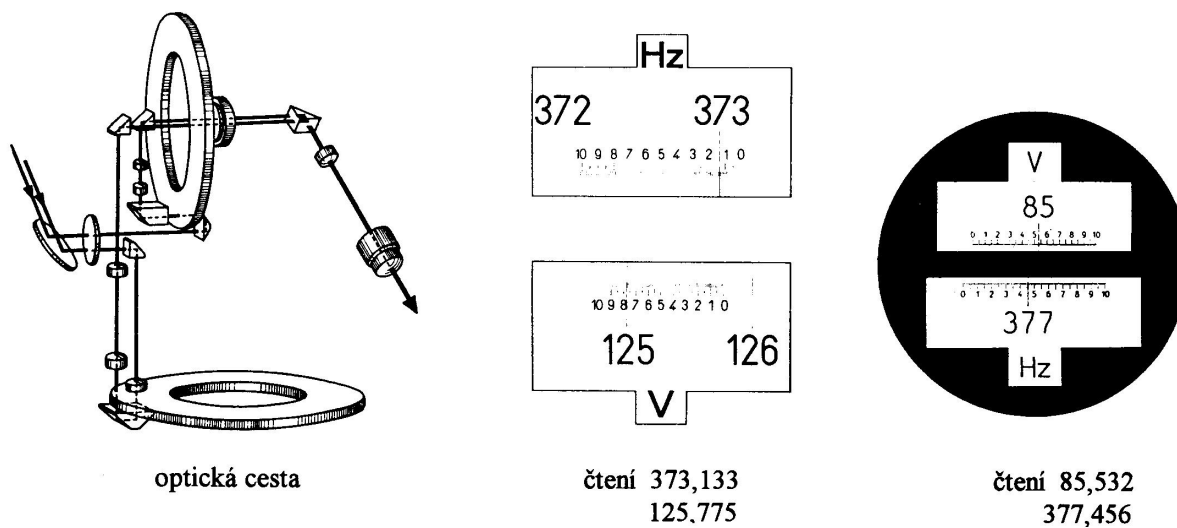
Mřížka je jemně dělená stupnice v rozsahu jednoho dílku obrazu hlavní stupnice. Mřížka je číslována opačným směrem než hlavní stupnice. Čtení spočívá v odečtení hodnoty hlavní stupnice, kterou mřížka protíná (hrubé čtení) a počtu celých dílků mřížky (jemné čtení) – odečítací ryska hlavní stupnice.



obr. 4.41 - Mřížka [45.]

Na obrázku (obr. 4.41) je hrubé čtení rovno 373^g , jemné čtení je $0,13^g$ a výsledné čtení tedy $373,13^g$. Na vertikálním kruhu je hrubé čtení rovno 125^g , jemné čtení je $0,775^g$ a výsledné čtení tedy $125,775^g$.

Použijeme-li mřížku ve spojení s mikroskopem (v rovině obrazu mikroskopu je skleněná destička s vyleptanou stupnicí - mřížkou) mluvíme o *stupnicovém mikroskopu*.



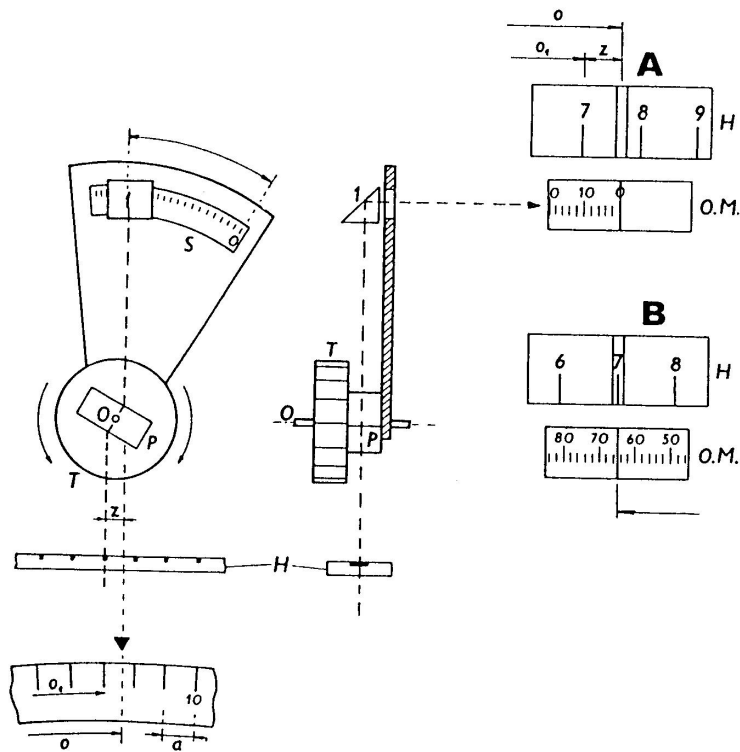
obr. 4.42 – Stupnicový mikroskop [27.]

Optický mikrometr

Základem optického mikrometru je pohyblivý optický prvek. Tímto prvkem mohou být planparalelní desky nebo posuvné klíny. Podle způsobu odečítání se optické mikrometry dělí na mikrometry jednoduché (s jednou planparalelní deskou) a mikrometry koincidenční (se dvěma planparalelními deskami popř. klíny).

Jednoduchý optický mikrometr

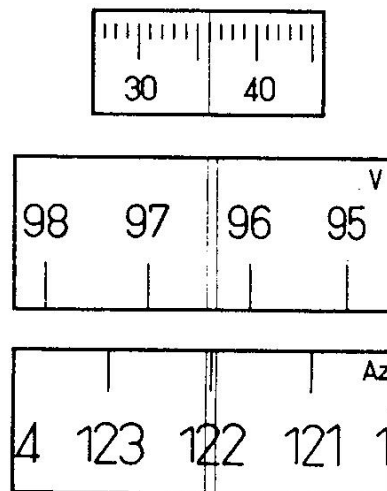
Mezi objektivem mikroskopu, kterým se pozoruje hlavní stupnice a jeho obrazovou rovinou, ve které je umístěna skleněná destička s ryskou (častěji dvojryskou) označující místo odečítání, je umístěna planparalelní deska. Jejím nakláněním prováděným pomocí šroubu je možno rovnoběžně posouvat obraz dělení hlavní stupnice tak, že odečítací dvojryskou umístíme symetricky podél nejbližší nižší rysky hlavní stupnice. Náklon planparalelní desky je registrován na stupnici optického mikrometru a vyjadřuje hodnotu zbytku dílku z mezi odečítací ryskou a nejbližší nižší ryskou hlavní stupnice. Obraz stupnice optického mikrometru pozorujeme okulárem mikroskopu.



obr. 4.43 – Schéma jednoduchého optického mikrometru [33.]

Maximální posun paprsků, jehož lze planparalelní deskou nebo klínem dosáhnout, se musí rovnat obrazové vzdálenosti nejmenšího dílku hlavní stupnice.

Vlastní odečtení se provede podle odečítací rysky hlavní stupnice, která udává grady a doplní se minutami, získanými ze stupnice mikrometru (popř. deseti-vteřinami). Příklad čtení je na obrázku 4.44.



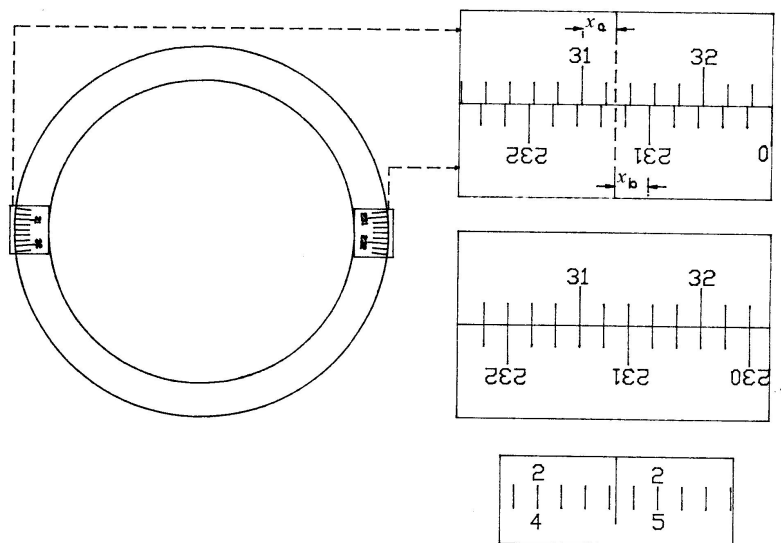
čtení 122,360

obr. 4.44 – Příklad čtení jednoduchého mikrometru [27.]

Koincidenční mikrometr

U koincidenčního mikrometru snímáme směry na dvou protilehlých místech kruhu, která se do zorného pole mikroskopu převádí optickou cestou. Jedna část stupnice se jeví v normální poloze s číslováním zleva doprava, druhá v převrácené poloze s číslováním zprava doleva. Výsledné odečtení se vztahuje k místu, kde se údaj na stupnici v normální poloze liší od převrácené stupnice o 200^{g} , přičemž vzpřímené číslo musí být nalevo od čísla převráceného.

Způsob odečtení je patrný z obrázku (obr. 4.45). Pro názornost uvažujme, že je stupnice vybavená odečítací ryskou (ve skutečnosti tomu tak nebývá). Úsek od vzpřímené číslice (např. 31) k rysce označíme x_a a úsek od převrácené číslice (231) označíme x_b . Potom čtení na první stupnici je $O_1 = 31 + x_a$, na druhé $O_2 = 231 + x_b - 200$.



obr. 4.45 – Princip koincidenčního způsobu odečítání [45.]

Z těchto dvou čtení získáme výsledné čtení jako průměr hodnot O_1 a O_2 , tj. $O = 31 + \frac{x_a + x_b}{2}$.

$(x_a + x_b)$ značí tedy vzdálenost dvou rysek, jejichž označení se liší o 200^{g} . Tuto vzdálenost můžeme vyjádřit počtem n celých dílků hodnoty a a zbytky Δ_1, Δ_2 . Můžeme tedy psát

$O = C + \frac{n \cdot a}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$, v našem konkrétním případě $O = 31 + \frac{2 \cdot 0,2}{2} + \frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$. Hodnotu

$\frac{\Delta_1 + \Delta_2}{2}$ dostaneme tak, že protisměrným otáčením planparalelních desek přivedeme obě

stupnice do koincidence. Poté ji již můžeme přečíst na stupnici mikrometru (nahore čteme jedničky minut a dole vteřiny).

Výsledné čtení je rovno $31,2246^{\text{g}}$.

Elektronické odečítací systémy

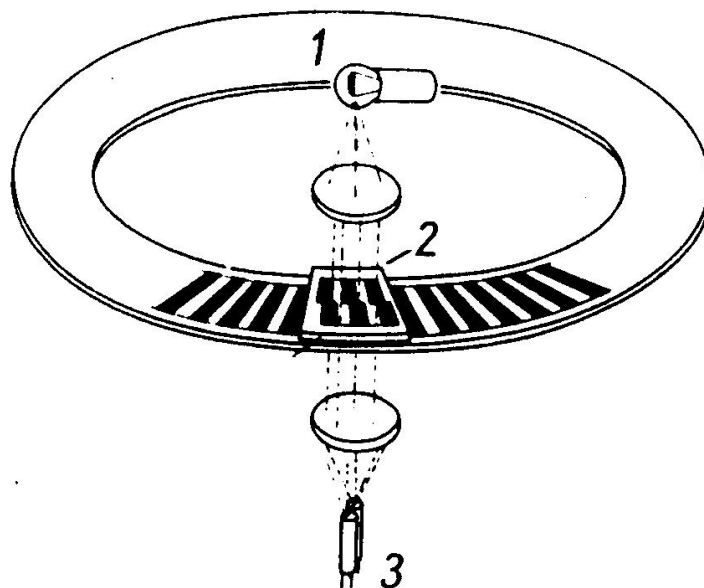
Odečítací systém tvoří úhломěrné převodníky, které optoelektronicky či elektronicky mění údaje o poloze kruhu na digitální údaje v jednotkách rovinného úhlu.

Podrobněji se zmíním o dvou systémech:

- inkrementálním (impulsovém),
- kódovém.

Inkrementální (impulsový) systém

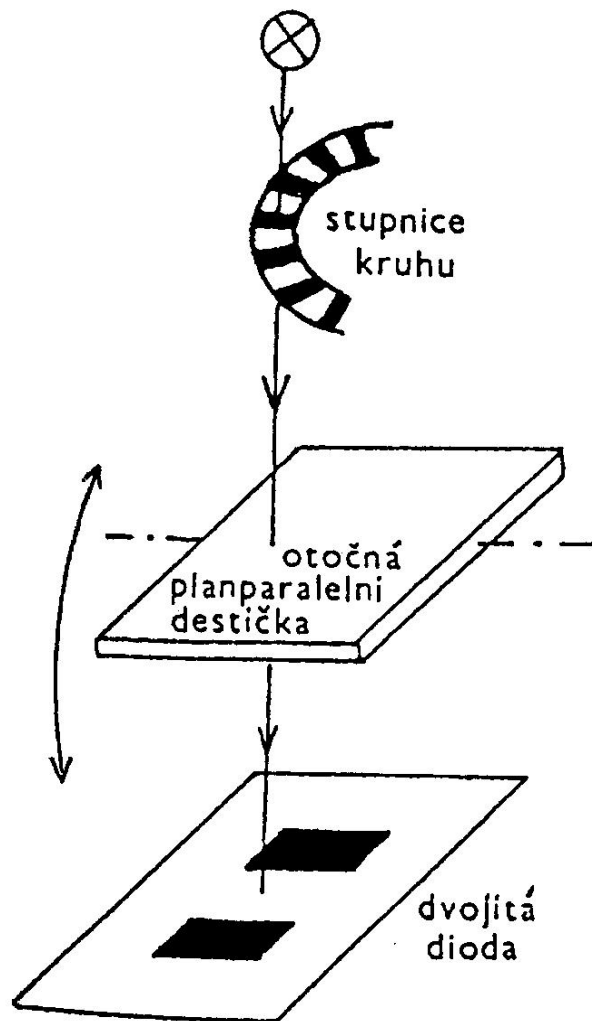
Využívá princip fotoelektrického impulsového snímání a odečítání dílků. Skleněný kruh je opatřen radiálními ryskami, mezi nimiž jsou průsvitné mezery stejné šířky.



obr. 4.46 – Princip impulsového systému [33.]

Při otáčení kruhu a jeho prosvětlování vzniká určitý počet světelných signálů, které jsou snímány a přeměňovány na elektrické impulsy fotodiodami. Elektrický proud vznikající ve fotodiodě má zhruba sinusový průběh. Sinusové kmity se převádí elektrickou cestou na obdélníkové kmity a dále na elektrické impulsy, které se dají spočítat na čítači a zobrazit na displeji ve formě úhlové hodnoty. Hrubé čtení se tedy děje spočítáním světelných maxim při pohybu alhidády.

Jemné čtení se provádí interpolací. Příkladem může být interpolace s elektronickým mikrometrem [38.]. Dílky stupnice jsou koincidovány pomocí otočné planparalelní skleněné destičky a dvojité diody. Pootočení planparalelní skleněné destičky je spojeno se stupnicí mikrometru, na níž se automaticky zjistí jemné čtení a přičte se v okamžiku koincidence ke čtení hrubému.



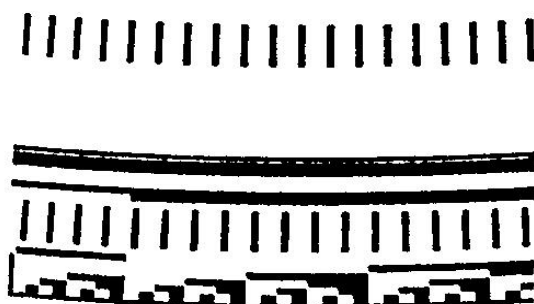
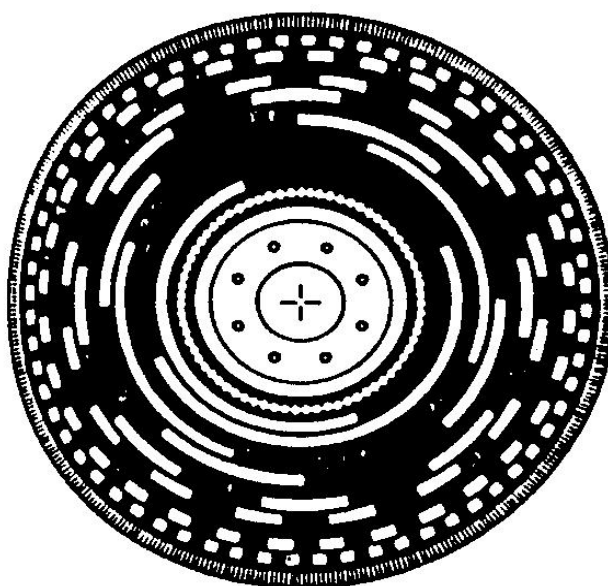
obr. 4.47 – Interpolace s elektronickým mikrometrem [38.]

Vodorovný kruh je možné orientovat např. nastavením nuly do libovolného směru. Pro svislý kruh je zřízena nulová značka. Ta je tvořena dvěma čárkovými maskami (jednou pevnou, druhou pohyblivou). Před měřením je tedy nutno provést inicializaci \Rightarrow dalekohled se protočí kolem vodorovné osy.

Celý proces měření řídí vhodný mikroprocesorový systém.

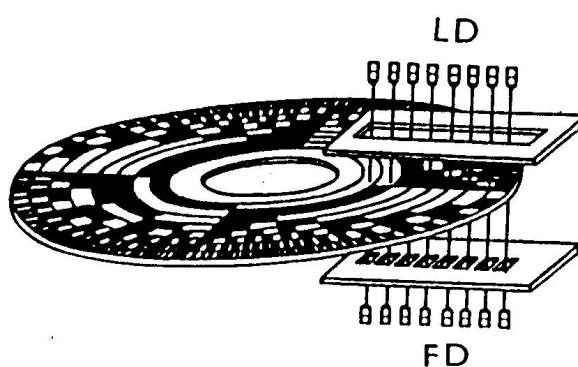
Kódový systém

Kódový systém se skládá z kódových kruhů (obr. 4.48), na kterých se nachází několik koncentrických kruhových stop. Stopy jsou vytvořené ze světlých a tmavých plošek různých tvarů, velikostí a uspořádání. Slouží jako analogové signály (kódy) a odpovídají konkrétním úhlovým hodnotám.



obr. 4.48 – Kódový kruh [33.]

Kódy v referenční rovině se odečítají optoelektrickým snímačem (systémem fotodiód).



obr. 4.49 – Snímání kódů fotodiódami [33.]

Příslušný elektrický signál postoupí do mikroprocesoru, který jej zpracuje a zobrazí jako dekadické číslo na displeji. Automaticky je k tomuto číslu přiřazeno i jemné čtení. Jemné čtení se získává fotoelektrickou interpolací v intervale čtení na kódovém kruhu, nebo použitím fotoelektrického mikrometru s vytvořením elektronické koincidence.

Mezi dalšími systémy jmenujme např. dynamický systém či elektroindukční systém.

Dynamický systém aplikovali závody Wild v 80. letech při vývoji elektronických teodolitů vyšší přesnosti. Systém umožňuje snímat, při měření každého úhlu všechny dílky kruhu jako diametrální dvojice. Tím se eliminuje vliv excentricit a chyb dělení kruhu.

Elektroindukční systém se od ostatních výrazně liší ryze elektronickou realizací etalonu a způsobem hrubého odečítání. V 80. letech jej aplikovala firma AGA-Geotronics.

Více informací lze získat např. v [33.], [55.], [38.].

4.3.5 Příslušenství geodetických přístrojů

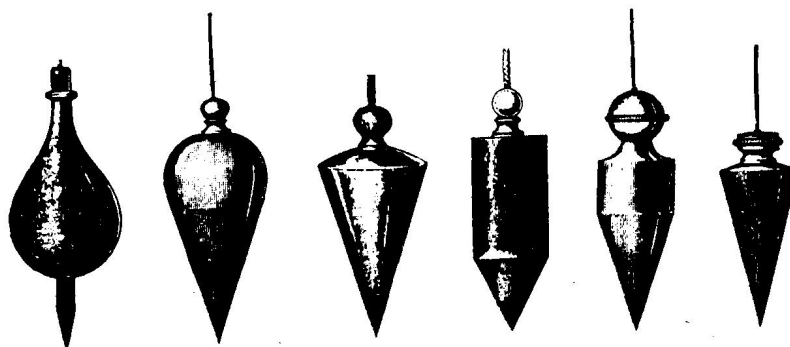
Pomůcky pro stanovení vodorovného a svislého směru.

K určení vodorovného a svislého směru se používají olovnice, libely a kompenzátory.

Olovnice

Olovnice slouží k realizaci svislého směru. Používají se závěsné olovnice, tyčové olovnice a optické olovnice (klasické a laserové).

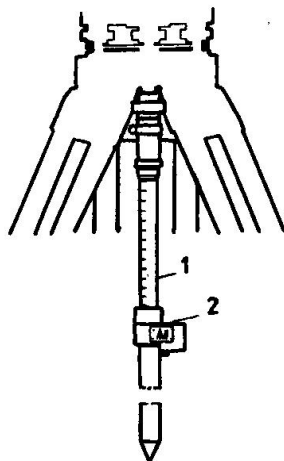
Závěsnou olovnici (obr. 4.50) tvoří závaží (100 až 250 gramů těžké) tvaru rotačního tělesa v spodní části kuželovitého tvaru zakončeného hrotem a závěs o vhodné délce, k jejímuž nastavení slouží jednoduchá mechanická pomůcka. Osa závaží musí být přesným prodloužením závěsu. Nevýhodou závěsných olovnic je velká citlivost vůči větru. Při provažování do velkých hloubek se používají olovnice se závažím větší hmotnosti (až několik kilogramů) nebo velká speciální závaží⁹.



obr. 4.50 – Typy závaží závěsných olovnic

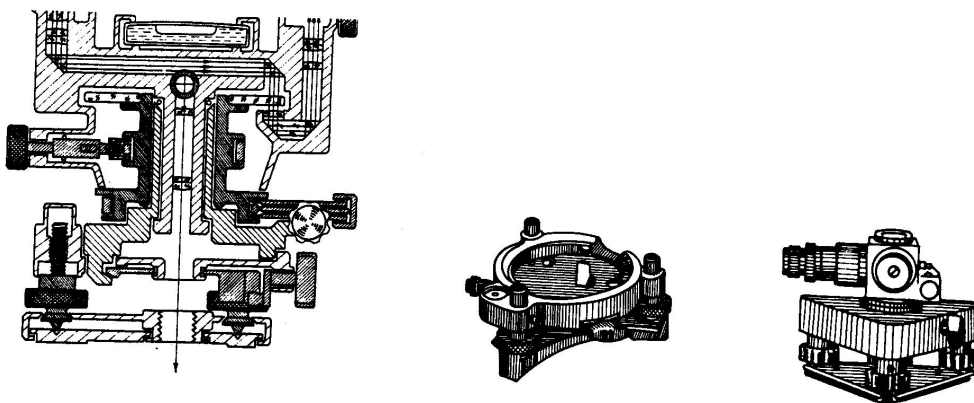
⁹ Lze také použít tzv. optický provažovač. Optický provažovač se umísťuje na stativ či speciální nosič. Jeho dalekohled se záměrným obrazcem má zalomenou optickou osu (o 90°). Po urovnání přístroje záměrný paprsek realizuje svislici.

Tyčová olovnice (obr. 4.51) se skládá ze dvou kovových tyčí, které lze do sebe zasouvat a tím měnit jejich délku. Horní tyč 1 se připevňuje k teodolitu. Spodní tyč je vybavená kruhovou libelou 2, pomocí níž uvedeme olovnici do svislé polohy. Hrot olovnice se umístí přesně na střed měřické značky, poté se posouvá teodolit po hlavě stativu dokud se neurovná krabicová libela. Na horní tyči může být vynesena stupnice, která umožňuje přímé odměření výšky stativu nad bodem. Výhodou tyčové olovnice je možnost použití i za větru. Nevýhodou je nutnost justáže kruhové libely a rozměry a váha olovnice.



obr. 4.51 – Tyčová olovnice [29.]

Optická olovnice (obr. 4.52) je jednoduchý dalekohled, jehož optická osa je hranolem zalomena v pravém úhlu. Umožňuje přesnou centraci přístroje či samostatné třínožky nad daným bodem. Je zabudována v tělese teodolitu, nebo v tělese odnímatelné třínožky, nebo je samostatná. V posledním případě je opatřena čepem, s jehož pomocí se upevňuje do třínožky. Záměrným obrazcem bývá křížek nebo kroužek. Pro správnou funkci musí optická olovnice vyhovovat osovým podmínkám. Výhodou optických olovnic je vysoká přesnost centrace (menší než 1 mm). Nevýhodou je malé zorné pole a tím zdlouhavější centrování a nutnost kontroly a justáže.



obr. 4.52 – Způsoby umístění optických olovnic [27.]

U laserové olovnice je v dalekohledu umístěný laserový zdroj, který vytváří kruhovou laserovou stopu. To umožňuje rychlejší centrování.

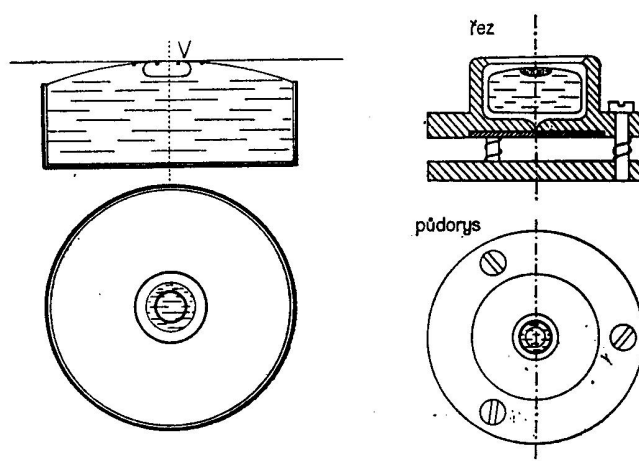
Libely

Libely jsou vzduchotěsně uzavřené skleněné nádoby z větší části naplněné vhodnou kapalinou s nízkým bodem varu (lihem, sirouhlíkem, éterem) tak, aby se vytvořila dostatečně velká bublina. Používají se k určení jak vodorovného tak i svislého směru.

Podle tvaru rozeznáváme libely

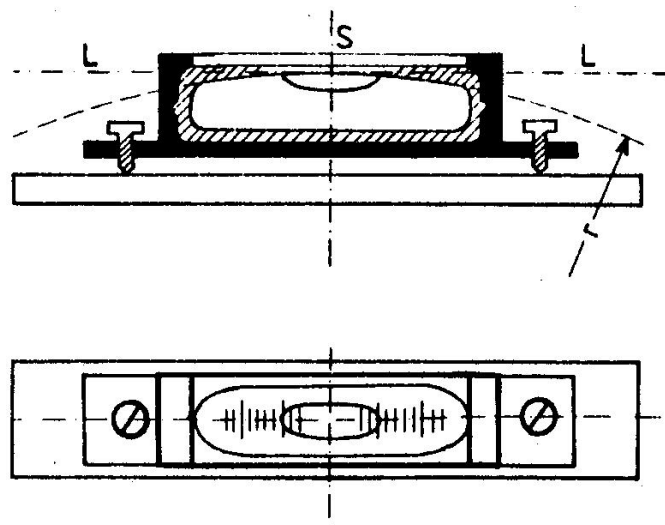
- krabicové,
- trubicové.

Krabicová libela (obr. 4.53) je tvořena válcovou nádobou, v horní části uzavřenou sféricky vybroušenou plochou, která je vyplněná kapalinou. V nejvyšším místě je bublina. Okolo středového bodu libely je vyrytý jeden nebo více soustředných kroužků, které představují prostor, kde se má nacházet bublina libely při jejím urovnání. Polohu libely vzhledem k podložce, na které je upevněna, je možné upravovat rektifikačními šrouby. Krabicových libel se používá pro hrubou horizontaci roviny.



obr. 4.53 – Krabicová libela

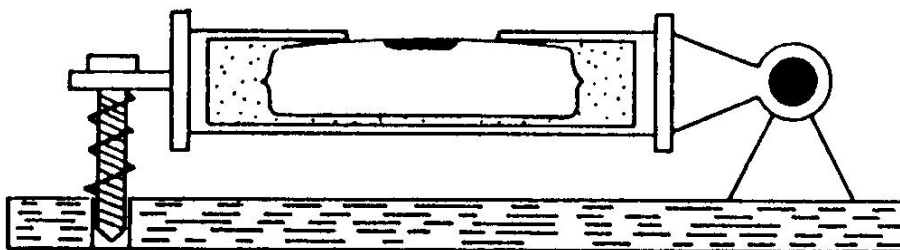
Trubicová libela (obr. 4.54) je vyrobená ze speciálního optického skla. U méně přesných libel je válcová nádobka ohnutá, u přesných libel je vnitřní stěna válcové nádoby vybroušená do sférické plochy s poloměrem R . Pokud je vybroušena jak horní tak i dolní stěna nádoby, jedná se o libelu reverzní. V nádobce je opět kapalina s bublinou, která se při urovnání libely nachází v nejvyšším místě výbrusu. Délka bubliny se volí tak, aby při teplotě $+ 20^{\circ}\text{C}$ zakrývala asi $1/3$ délky libely. Libela je opatřena stupnicí, která je vyrytá symetricky vzhledem k středu libely (na její horní části). Interval dělení stupnice $d = 2 \text{ mm}$. Polohu libely je opět možno upravovat rektifikačními šrouby.



obr. 4.54 – Trubicová libela [50.]

Osa libely je tečna vedená k výbrusu libely středem stupnice (kroužků) libely. U reverzní libely jsou osy dvě, proto se reverzní libela označuje také jako dvouosa.

Libely jsou chráněné **kovovým pouzdem** (obr. 4.55) s výřezem na čtení polohy bubliny. V pouzdru je libela utěsněná korkem a zalitá sádrou. Oba materiály slouží také jako tepelná izolace.



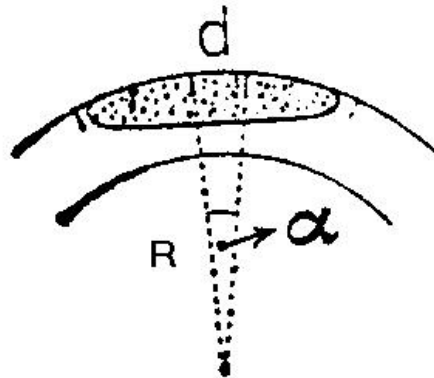
obr. 4.55 – Ochranné pouzdro libely [33.]

Libely je možné dělit také podle způsobu použití.

Mezi samostatné trubicové libely patří např. libela stolová nebo libela sázecí. Stolová libela je spojena s podložkou kterou klademe např. na měřický stůl a to ve dvou směrech k sobě kolmých. Tím dosáhneme jeho urovnání do vodorovné polohy. Sázecí libela se používá u přesných teodolitů. Nasazuje se na točnou osu dalekohledu.

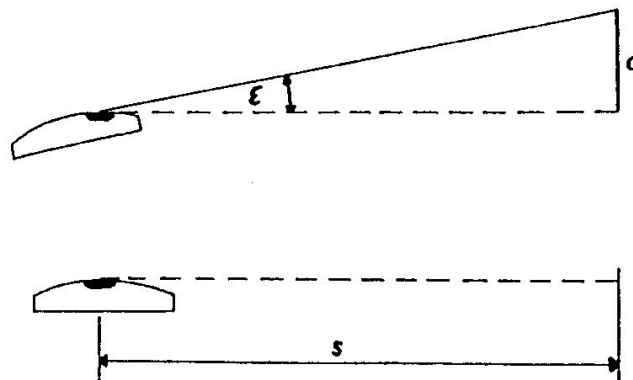
Mezi libely pevně spojené s teodolitem patří např. libela alhidádová, indexová libela či nivelační na dalekohledu.

Základní charakteristikou libely je její **citlivost**. Citlivost libely je úhel, o který se osa libely odchýlí od horizontální roviny, jestliže se bublina posune o jeden dílek. Čím je tento úhel menší, tím je libela citlivější. Citlivost je tedy dána vztahem $\alpha = \frac{d}{R}$, kde d je délka dílku stupnice a R je poloměr sférické plochy.



obr. 4.56 – Citlivost libely

Všechny způsoby určování citlivosti libely vychází ze stejného principu. Pokud se libela skloní o úhel ε , posune se její bublina o n dílků. Platí tedy $\varepsilon = n * \alpha$.



obr. 4.57 – Určení citlivosti libely [33.]

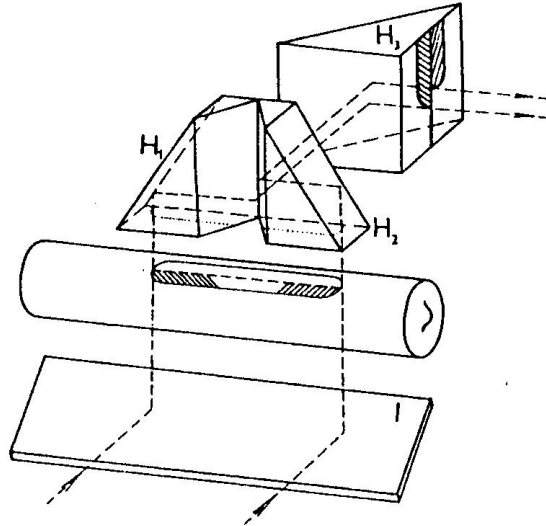
Úhel ε můžeme zjistit přímo – úhlovým měřením, nebo nepřímo – odměřením hodnot s , a .

Z obrázku (obr. 4.57) je zřejmé, že $\frac{a}{s} = \varepsilon = n * \alpha$. Podle způsobu zdvihání libely a

odměřování určovacích prvků se rozdělují dvě skupiny metod určování citlivosti libely: metrologické metody a geodetické metody. Metrologické metody využívají různé zkoušecí přístroje – od rektifikačního pravítka, přes složitější přístroje – libeloměry, až po poloautomatické zkoušecí systémy. Geodetické metody využívají k určení citlivosti libely geodetické přístroje. Zde se používají dvě metody. První metoda odměřuje úhel ε vertikálním kruhem teodolitu, druhá určuje zdvih a na lati pomocí dalekohledu. (viz [33.]).

Dalšími charakteristikami libely jsou přesnost urovnání libely a pohyblivost libely.

Přesnost libely je definována nejmenším úhlem, který je možné s libelou ještě určit. Je rovna asi 1/5 citlivosti. Kromě citlivosti závisí také na způsobu pozorování, pohyblivosti, teplotě okolí apod. Pokud bychom chtěli přesnost libely zvýšit, museli bychom např. bublinu pozorovat zvětšující optickou soustavou nebo hranolovou soustavou. Toho je využito např. u indexové libely (obr. 4.58). Princip spočívá v tom, že hranoly (sfenoidy) zobrazují vedle sebe poloviny konců bubliny. Libela je zesponu osvětlována zrcadlem. K urovnání dochází, pokud oba konce bubliny koincidují.



obr. 4.58 – Indexová libela [33.]

Pohyblivost bubliny je minimální úhel, o který je třeba naklonit osu libely, aby se bublina vychýlila z rovnovážné polohy o hodnotu rozlišitelnou pouhým okem. Závisí na citlivosti libely, jakosti a čistotě výbrusu, délce bubliny, vlastnostech kapaliny a průměru a tvaru příčného řezu dutiny.

U elektronických teodolitů se můžeme setkat s **elektronickými libelami**. Ty využívají činnost tzv. *automatického křížového kompenzátoru* (jeho úlohou je určování odklonu osy od svislice a korekce příslušného vlivu na měřené úhly. Na displeji se objeví buď dvě hrubé dvojrysky (Geodimetr) nebo přímé zobrazení úhlových hodnot odklonu osy ve dvou kolmých směrech (Pentax). Kvůli omezenému rozsahu kompenzátoru je však nejprve nutné urovnat přístroj podle kruhové libely.

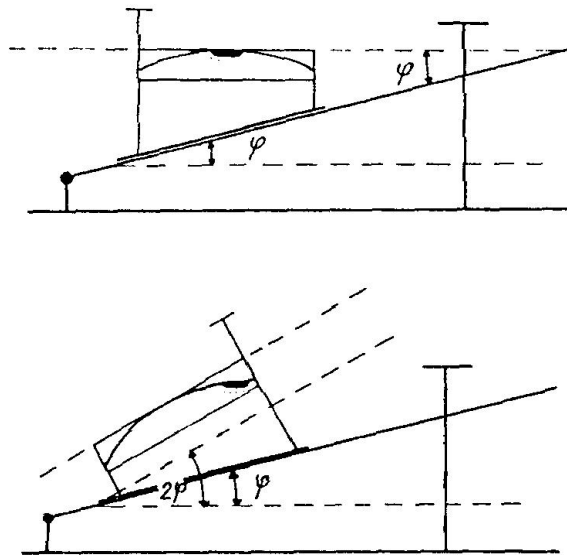
Základní podmínkou správné funkce libely je:

- rovnoběžnost osy libely s podložkou
- rovnoběžnost osy libely (resp. kolmost) k ose přístroje – u libel pevně spojených s teodolitem.

Pokud podmínka není splněna, provádíme **opravu (justáž, rektifikaci) libely**.

Samostatné libely se zkouší a rektifikují na rektifikačním pravítku (obr. 4.59). Libela se položí na rektifikační pravítko a urovná se mikrometrickým šroubem pravítka. Potom se libela otočí o 180°. Pokud je osa libely rovnoběžná s podložkou, zůstane bublina urovnaná i po otočení. Pokud ale osa libely svírá s podložkou úhel φ , pak v otočené poloze svírá osa libely s vodorovnou rovinou úhel 2φ a bublina vyběhne k vyššímu konci o hodnotu odpovídající 2φ .

Při rektifikaci jednu povinu výběhu bubliny opravíme rektifikačním šroubem libely a druhou polovinu mikrometrickým šroubem pravítka. Celý postup je třeba několikrát opakovat.



obr. 4.59 – Rektifikace libely na rektifikačním pravítku [33.]

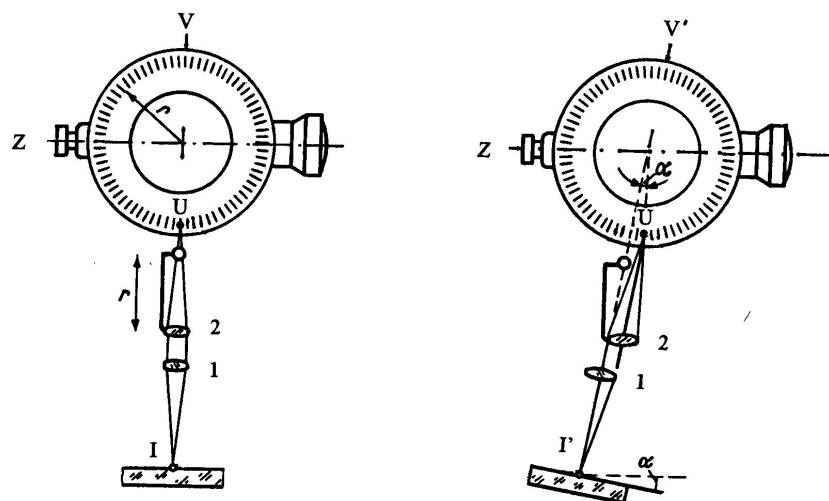
Podobný princip je použit i při zkoušení a rektifikaci libel pevně spojených s teodolitem. Například alhidádová libela se urovná nad dvěma stavěcími šrouby přístroje a pak se otočí přístrojem o 180° . Případný výběh bubliny se odstraní z poloviny rektifikačním šroubem libely a z druhé poloviny stavěcími šrouby. Obvykle je třeba postup ještě zopakovat.

Kompenzátory

Kompenzátory mohou být mechanické, optické, opticko-mechanické, libelové, kapalinové a další. Používají se zejména u nivelačních přístrojů a teodolitů. U klasických teodolitů uvádějí kompenzátory do požadované polohy odečítací indexy výškového kruhu a u nivelačních přístrojů slouží k horizontaci záměrné osy. Po hrubém urovnání přístroje podle krabicové libely se uvede do činnosti kompenzátor, který změnou svojí polohy zajišťuje polohu paprsku, jakou má správně zaujímat.

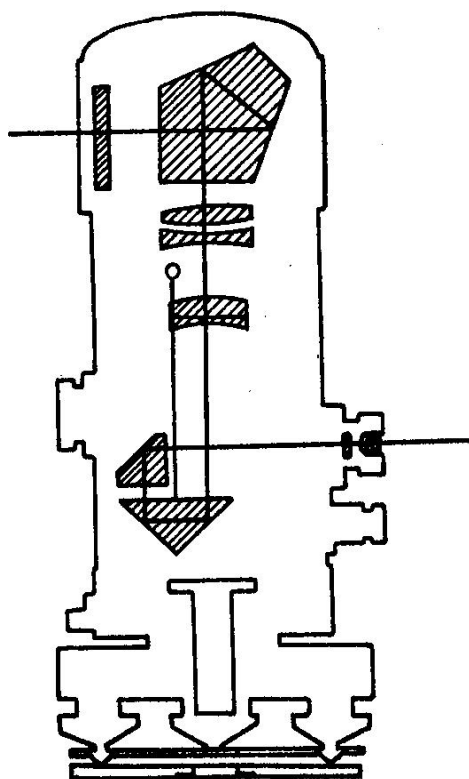
Kompenzátory většinou využívají tíži a to prostřednictvím kyvadel. Kyvadlo, vybavené tlumičem, automaticky realizuje svislý směr. Důležitou částí kompenzátoru je optická součástka (hranol, zrcadlo, čočky), která je zavěšená na kovových vlákních.

Na obrázku (obr. 4.60) je znázorněný kyvadlový kompenzátor klasického teodolitu. Kompenzaci zde zajišťuje dvoučočkový objektiv. Čočka 2 je umístěna v kyvadlovém rameni, jehož délka r je rovna poloměru r stupnice výškového kruhu. Kyvadlo je zavěšeno na kuličkovém ložisku. Díky zemské tíži zaujme rameno kyvadla vertikální polohu, čímž se mění poloha čočky 2 a tím i chod paprsků v optické soustavě objektivu. Obraz odečítacího zařízení I' se tím přemísť do požadovaného místa odečtu na stupnici vertikálního kruhu U .



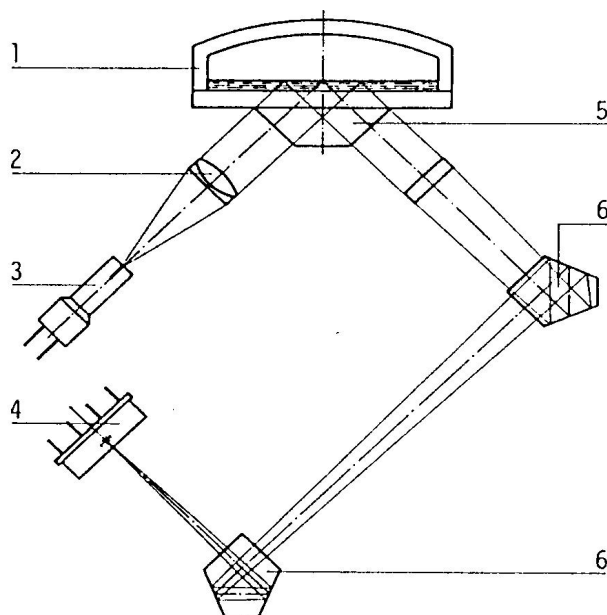
obr. 4.60 – Schématické znázornění kyvadlového kompenzátoru a jeho funkce [27.]

V nivelačním přístroji Zeiss Ni 007 tvoří kompenzátor hranol z optického skla, zavěšený na ocelovém vlákně (obr. 4.61). Paprsek záměrné přímky po průchodu přes boční okénko dopadne na pětiboký hranol, projde kolmo na původní směr objektivem a zaostřovací čočkou a dopadne na kompenzátor. Po průchodu kompenzátořem a pevným hranolem již jde paprsek do středu záměrného kříže a okuláru.



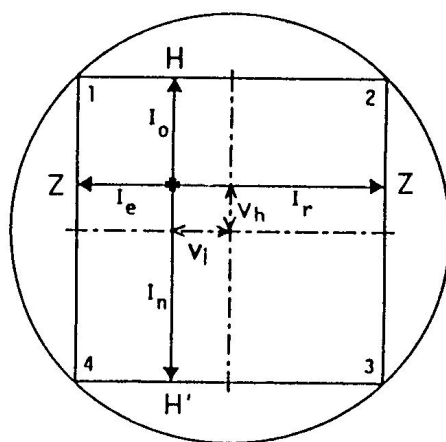
obr. 4.61 – Schématické znázornění kompenzátoru nivelačního přístroje Zeiss Ni 007 [50.]

V elektronických teodolitech jsou použity dvouosé, křížové kompenzátory (obr. 4.62). Princip je založen na odrazu od vodorovného povrchu kapaliny. Světelný bod vysílací diody 3 se po průchodu objektivem 2 odrazí od rtuťového povrchu a přes hranoly 6 se zobrazí na velkoplošné fotodiodě 4.



obr. 4.62 – Křížový kompenzátor [33.]

Ta funguje jako dvojrozměrný polohový detektor. Když světelný bod dopadne na aktivní plochu detektoru, vzniknou fotoelektrické proudy na 4 umístěných elektrodách. Tyto fotoelektrické proudy jsou nepřímo úměrné vzdálenosti světleného bodu od elektrod. To umožňuje stanovit polohu světelného bodu vůči referenčnímu (nulovému) bodu kompenzátoru pomocí pravoúhlých souřadnic. Přičemž jedna souřadnice je mírou pro sklon teodolitu v směru cílení ($Z-Z'$), druhá pro sklon ve směru točné osy ($H-H'$). Vliv složky v_h odklonu v směru točné osy a složky v_l v směru záměrné osy počítá mikroprocesor.



obr. 4.63 – Dvojrozměrný polohový detektor [33.]

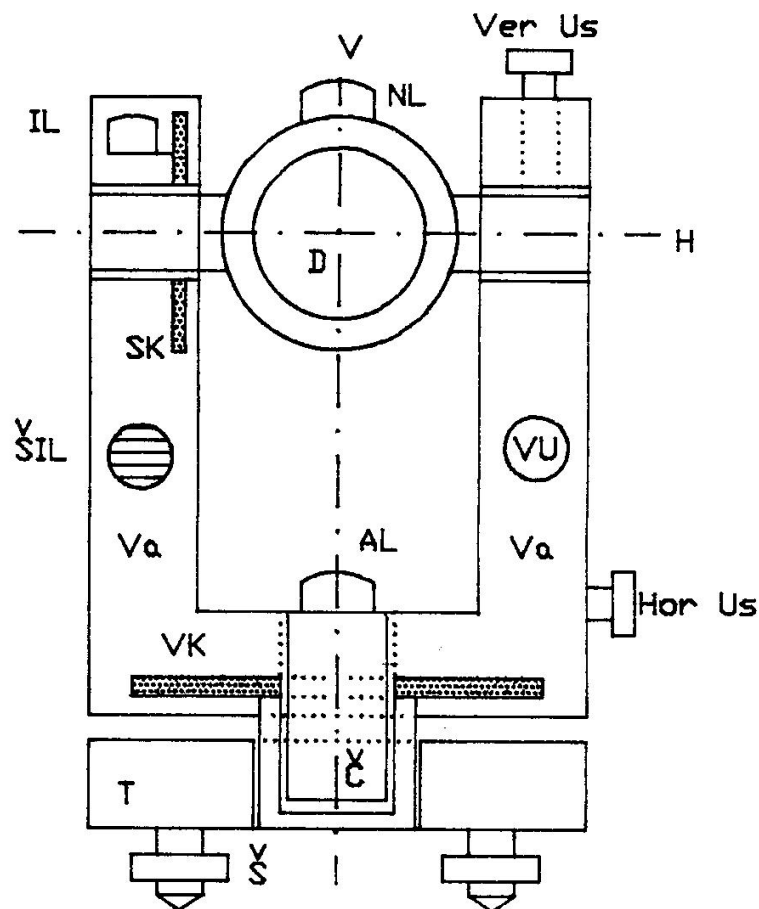
4.4 Teodolit

Teodolit je geodetický přístroj na přesné měření a vytyčování vodorovných a svislých úhlů libovolné velikosti.

Teodolity prošly dlouhým vývojem od teodolitů s kovovými kruhy, přes optické teodolity, až po elektronické teodolity, které umožňují automatické odečítání a registraci úhlů.

Teodolit (obr. 4.64) má tři základní části [45.]:

- alhidádu,
- limb,
- třínožku.



obr. 4.64 – Schéma teodolitu [33.]

Třínožka spojuje teodolit a stativ. Je v ní pouzdro vertikální osy teodolitu. Je opatřena třemi stavěcími šrouby (Š).

Základní částí **limbu** je vodorovný kruh (VK) s úhlovou stupnicí.

Alhidáda je otočná část teodolitu. Skládá se z čepu (Č) zapadajícího do pouzdra válce a umožňující otáčení kolem svislé (vertikální, alhidádové) osy (V). Jsou na ní alhidádová libela (AL), vidlice dalekohledu (Va) s ložisky točné osy (H) dalekohledu (D) (kolem ní lze

dalekohled sklápět, příp. otáčet do tzv. druhé polohy¹⁰). Na alhidádě je také umístěna indexová libela (IL) se šroubem (ŠIL) umožňujícím její urovnání (příp. kompenzátor). Na točné ose dalekohledu je svislý kruh (SK) se stupnicí pro měření svislých úhlů. Některé starší typy teodolitů jsou vybaveny nivelační libelou (NL).

Na samotné odečítání obou dvou kruhů používají teodolity odečítací či registrační pomůcky. Pohyb kolem obou os je ovládán ustanovkami (horizontální (Hor Us) a vertikální (Ver Us)).

Kromě základních částí mají teodolity i další - **doplňkové části**, které zvyšují jejich využitelnost. V některých případech bývají trojnožky teodolitů vybaveny nucenou centrací, což umožňuje při měření umístit záměrný terč nad stabilizačním znakem. Při astronomických měřeních jsou přístroje vybaveny filtry umístěnými na okulár. K měření na nebeská tělesa jsou přístroje vybaveny zalomenými okuláry. Při astronomických měřeních se také používá sázecí libela. Některé přístroje k přesným měřením jsou vybaveny výměnnými okuláry. Gyroskopické doplňky umožňují gyroskopickou orientaci směrů. Dálkoměrné doplňky slouží k měření délek¹¹. [38.], [27.].

Příklady některých teodolitů

K předním výrobcům teodolitů patří např. evropské firmy Leica (Švýcarsko), Carl Zeiss (Německo), japonské firmy Topcon, Sokkia, Nikon, Pentax. V praxi se můžeme setkat také se stroji firem Wild a Kern, které však již zanikly.

Základní charakteristika jednotlivých přístrojů je společně s výrobcem uvedena v následující tabulce:

Výrobce	Teodolit	Druh	Z	Zorné pole m / 1000 m	Průměr Objektivu mm	Min. Vzdálenost	Úhlová přesnost	Citlivost alhid. libely "/2 mm	Přímé čtení mgon	Pozn.	M kg
Kern	K1-S	optický	30					30	10	kompenzátor	4.6
Kern	DKM3	optický	30/45	1.15°	68	5 m	0.06 mgon/0.2''	10	0.1		12.2
Kern	DKM 3-A	optický	45				0.06 mgon/0.2''	10	0.05		14.2
Kern	DKM 2-A	optický	32				0.1 mgon/0.3''	20	0.1	kompenzátor	6.2
Kern	DKM 1	optický	20				10 mgon/2''	40	1		1.8
Leica	T100	Elektr.	30		45	0.85 m	30 mgon/10''	60			4.4
Leica	T 1010	Elektr.	30		42	1.7 m		30			5
Leica	T 1610	Elektr.	30		42	1.7 m		30			5
Leica	T 1800	Elektr.	30			1.7 m	0.3 mgon/1''				5.9
Leica	T 1100	Elektr.	30			1.7 m	1 mgon/3''				5.6
Meopta	T1C	optický	28			1.5 m		20 (30)	10		4.3

¹⁰ V první poloze dalekohledu je výškový kruh vlevo od dalekohledu ve směru měření. Ve druhé poloze je svislý kruh po pravé straně dalekohledu.

¹¹ Pokud je elektronický teodolit vybavený elektronickým dálkoměrem, lze jej použít k trojrozměrnému měření v terénu (tachymetrii) a označuje se elektronický tachymetr (někdy také totální stanice).

C. Zeiss	Theo 020 A	optický	25	23		1.5 m	1 mgon/3''	20	10	kompenzáto r	4.2
C. Zeiss	Theo 020 B	optický	30	23	40	1.5 m	1 mgon/3''	30	10	kompenzáto r	4.5
C. Zeiss	Theo 010 A	optický	30	23		1.5 m	0.3 mgon/1''	20	0.2	kompenzáto r	4.5
C. Zeiss	Theo 010 B	optický	30	23		1.5 m	0.3 mgon/1''	20	0.2	kompenzáto r	4.8
C. Zeiss	Theo 080 A	optický	18	45		0.9 m	4.5 mgon/15''	2'	100		2
C. Zeiss	Eth 2	Elektr.	30	24	45	1.0 m	0.2 mgon/0.6''	30		kapalinový kompenzáto r	4.7
C. Zeiss	Eth 3	elektr.	30	24	45	1.0 m	0.5 mgon/2''	30		kapalinový kompenzáto r	5
C. Zeiss	Eth 4	elektr.	30	24	45	1.0 m	2 mgon/6''	30		kapalinový kompenzáto r	3.8
Wild	T2	optický	30	29	40	2.2 m	0.25 mgon/0.8''	20	0.2	kompenzáto r	6
Wild	T1	optický	30	27		1.7 m	1 mgon/3''	30	2	kompenzáto r	5.8
Wild	T16	optický	30	27		1.7 m		30	10	kompenzáto r	5.3
Wild	T0	optický	20	35		1.0 m	8 mgon/25''	4'	10		2.7
Wild	T3	optický	40	28	60	4.6 m		6.5	0.1		11.2
Wild	T4	optický	80	14	35	~100 m		1			50
Wild	T1000	elektr.	30	27	42	1.7 m	1 mgon	30		kompenzáto r	5.6
Wild	T 2002	elektr.	20-42	27	42	1.7 m	0.15 mgon/0.5''	20		kapalinový kompenzáto r	8.7
Wild	T 3000	elektr.	43		52	0.6 m	0.15 mgon/0.5''	20		kapalinový kompenzáto r	7.5
Sokkia	DT6	elektr.	28			0.9 m	5 mgon/20''				4.1
Sokkia	DT 2E	elektr.	30			0.9 m	0.6 mgon/2''	30		kapalinový kompenzáto r	4.8
Sokkia	DT 4 F	elektr.	30			0.9 m	1.5 mgon/5''	30		kapalinový kompenzáto r	5
Sokkia	DT500	elektr.	30			0.9 m	5''	40			
Sokkia	DT500A	elektr.	30			0.9 m	5''	40			
Sokkia	DT600	elektr.	26			0.9 m	7''	60			
Sokkia	TM6	optický	30			1.3 m		30	0.6		
Sokkia	TM 1A	optický	30			1.3 m		20	0.1	kompenzáto r	6
Zeiss	Th 2	optický	30	24	40	1.6 m	1.0 mgon/3''	20	0.2	kompenzáto r	5.2
Zeiss	Th 4	optický	25				1.0 mgon/3''	30	10	kompenzáto r	4.5

Zeiss	Th 5	optický	25				5 mgon/20''	30	50		3.2
Topcon	DT 101	elektr.	30	1°30'	45	0.9 m	2''	30	0.2	kompensátor	4.3
Topcon	DT 102	elektr.	30	1°30'	45	0.9 m	5''	40	1	kompensátor	4.1
Topcon	DT 103	elektr.	30	1°30'	45	0.9 m	7''	40	1		4.1
Topcon	DT 104	elektr.	26	1°30'	40	0.9 m	10''	60	2		3.4

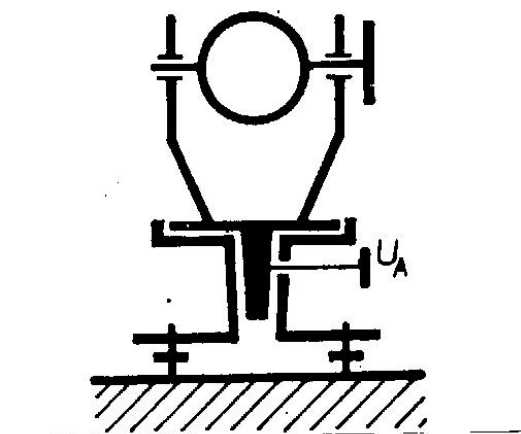
tab. 4.1 – Přehled vybraných teodolitů

4.4.1 Dělení teodolitů podle konstrukce

Podle konstrukce se teodolity dělí na:

- jednoduché,
- repetiční,
- s limbem na postrk.

Jednoduchý teodolit

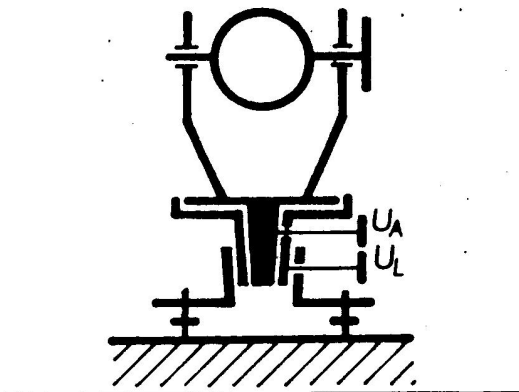


obr. 4.65 – Jednoduchý teodolit [50.]

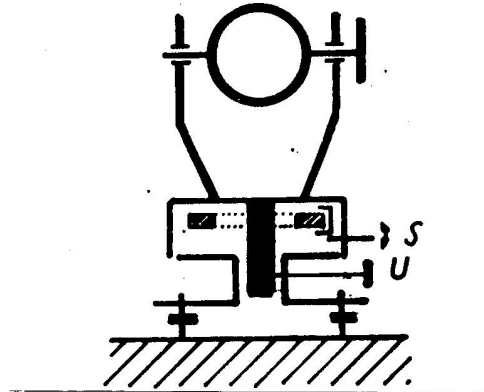
Limbus L je pevně spojen s podstavnou částí pouzdem, do kterého zapadá čep alhidády A. Spojení alhidády s limbem a její jemný pohyb vůči limbu umožňuje hrubá a jemná ustanovka alhidádová U_A .

Repetiční teodolit

se dvěma páry ustanovek



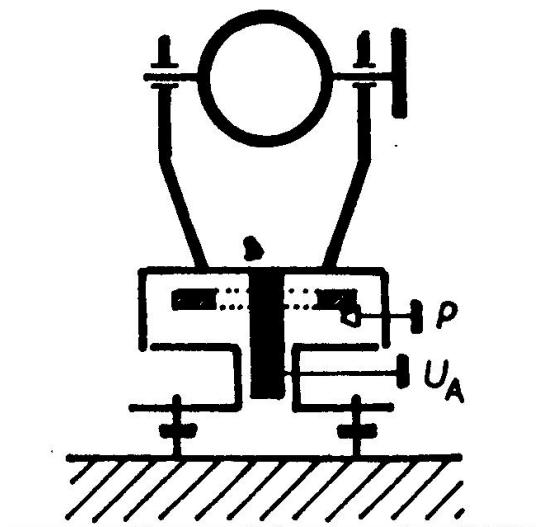
se svorou



obr. 4.66 – Repetiční teodolit [50.]

U repetičního teodolitu je možné otáčet buď jen alhidádou nebo alhidádou společně s limbem. Může být vybaven buď dvěma ustanovkami: alhidádovou U_A (spojuje alhidádu s limbem), limbovou U_L (spojuje limbus s podstavnou částí) nebo jednou ustanovkou U a svorou S (spojuje limbus s alhidádou).

Teodolit s limbem na postrk



obr. 4.67 – Teodolit s limbem na postrk [50.]

Limbus je možné otáčet pomocí pastorku P zcela nezávisle na alhidádě. Alhidáda se spojuje s hrubou a jemnou ustanovkou U_A se spodní pevnou částí přístroje.

U repetičních teodolitů a teodolitů s limbem na postrk lze nastavit určité čtení do žadaného směru.

4.4.2 Dělení teodolitů podle přesnosti

Podle přesnosti se teodolity dělí na teodolity [45.]:

- technické (minutové) – používají se pro běžné práce. Přesnost čtení je $0,01^{\text{g}}$.
- přesné (vteřinové) – používají se pro budování bodových polí pro podrobné měření. Přesnost čtení je $0,2 \text{ mgon}$.
- velmi přesné (triangulační) – používají se v inženýrské geodézii, při budování přesných úhlových sítí. Přesnost čtení je $0,05 \text{ mgon}$.

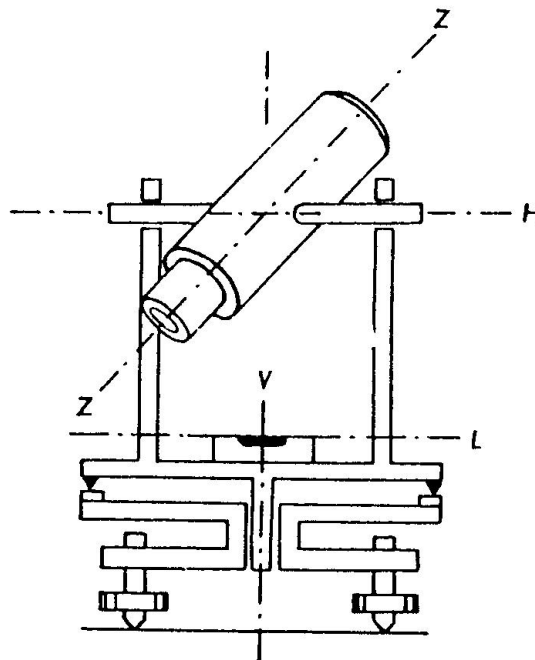
Někteří autoři [33.], [50.] uvádějí dělení teodolitů podle přesnosti na čtyři skupiny. Kritériem dělení je střední chyba směru měřené jedenkrát v obou polohách dalekohledu - m_{α} .

- teodolity nejvyšší přesnosti – triangulační (třída přesnosti 1) - $m_{\alpha} < 2^{\text{cc}}$ ($0,67''$),
- teodolity vyšší přesnosti – vteřinové (třída přesnosti 2) - $m_{\alpha} < 6^{\text{cc}}$ ($2''$),
- teodolity střední přesnosti – minutové (třída přesnosti 3) - $m_{\alpha} < 20^{\text{cc}}$ ($6,7''$),
- teodolity nejnižší přesnosti – stavební (třída přesnosti 4) - $m_{\alpha} > 20^{\text{cc}}$ ($6,7''$).

4.5 Zkoušky a rektifikace teodolitů

Rektifikovaný teodolit musí splňovat geometrické podmínky vzájemné polohy hlavních os.

Základními osami teodolitu jsou: vertikální osa (alhidádová osa) V, horizontální osa H, osa alhidádové libely L a osa záměrné přímky Z.



obr. 4.68 – Základní osy teodolitu [33.]

Podmínky (označované jako osové) pak jsou:

- a) $V \perp L$, při nesplnění vzniká chyba alhidádové libely,
- b) $H \perp V$, při nesplnění vzniká chyba úklonná,
- c) $Z \perp H$, při nesplnění vzniká chyba kolimační.

Osové podmínky lze však splnit pouze s určitou přesností, kterou charakterizujeme tzv. **osovými chybami**¹². Jedná se o chyby systematické, které je tudíž třeba z měření vyloučit nebo alespoň jejich vliv snížit. Úklonnou a kolimační chybu lze kromě rektifikace vyloučit metodou měření – měřením ve dvou polohách dalekohledu. Chyba alhidádové libely se musí odstranit rektifikací.

Chyba alhidádové libely

Pokud osa alhidádové libely L není kolmá na osu vertikální V , pak při urovnání stroje (podle alhidádové libely) není osa V svislá a mluvíme o chybě alhidádové libely. Chyba se zjišťuje následovně. Po urovnání přístroje podle trubicevé alhidádové libely ve dvou polohách k sobě kolmých otočíme alhidádou o 180° . Případná výchylka odpovídá dvojnásobné chybě a libelu je třeba rektifikovat.

Rektifikace:

Jedna polovina výchylky se odstraní stavěcími šrouby, druhá polovina se opraví rektifikačním zařízením libely. Postup je většinou nutné několikrát opakovat.

Úklonná chyba

Pokud je stroj přesně urovnán, ale točná osa dalekohledu H není kolmá na osu svislou, pohybuje se dalekohled při sklápění namísto ve svislé rovině v rovině šikmé. Zaměříme-li na bod P , čteme místo čtení O čtení $O_1 = O + \Delta_1$. Po proložení dalekohledu do druhé polohy dostaneme čtení $O_2 = O - \Delta_1$. Z uvedeného je zřejmé, že vliv této chyby se vyloučí vytvořením aritmetického průměru ze čtení v obou polohách dalekohledu:

$$O = \frac{O_1 + O_2}{2}$$

. U nových teodolitů zaručují výrobci vodorovnost točné osy dalekohledu na $0,001''$ [38.]. Tuto chybu lze zanedbat při běžných pracích i při měření v jedné poloze dalekohledu.

Pokud chceme provést kontrolu, zda teodolit nemá úklonnou chybu, řídíme se následujícím postupem. Dalekohledem zacílíme na vysoko položený bod P . Před přístroj umístíme v horizontální poloze a ve vzdálenosti asi 10 až 20 m milimetrové měřítko (přibližně kolmo na záměru). Sklopíme dalekohled a na měřítku přečteme čtení x_1 . Poté proložíme dalekohled do druhé polohy, znovu zacílíme na bod P , sklopíme dalekohled a přečteme čtení x_2 . Pokud $x_1 \neq x_2$ má teodolit úklonnou chybu.

Kolimační chyba

¹² Kromě osových chyb se při měření úhlů vyskytují i další chyby, o nichž se zmiňují v následující kapitole.

Pokud záměrná osa Z není kolmá k točné ose dalekohledu H, nepohybuje se záměrná přímka ve svislé rovině ale po plášti dvojitého kužele. Protože kolimační chyba je symetrická vůči správné záměře, průměr z obou poloh je zbavený vlivu kolimační chyby, tedy $O = \frac{O_1 + O_2}{2}$.

Kolimační chybu tedy vyloučíme měřením ve dvou polohách dalekohledu. Rektifikaci provádíme pouze tehdy, chceme-li měřit jen v jedné poloze dalekohledu a je-li kolimační chyba tak velká, že by ovlivnila přesnost měřeného směru.

Postup pro zjištění kolimační chyby je následující. Dalekohledem teodolitu zacílíme na vzdálený dobře identifikovatelný bod P přibližně v horizontu přístroje. Kolmo na záměru umístíme asi ve vzdálenosti 20 m milimetrové měřítko ležící přibližně v horizontu přístroje. Přečteme údaj vodorovného kruhu O_1 a čtení na měřítku x_1 . Proložíme dalekohled do druhé polohy a na kruhu nastavíme čtení $O_2 = O_1 + 200^s$. Na měřítku přečteme čtení x_2 . Pokud $x_1 \neq x_2$ má přístroj kolimační chybu.

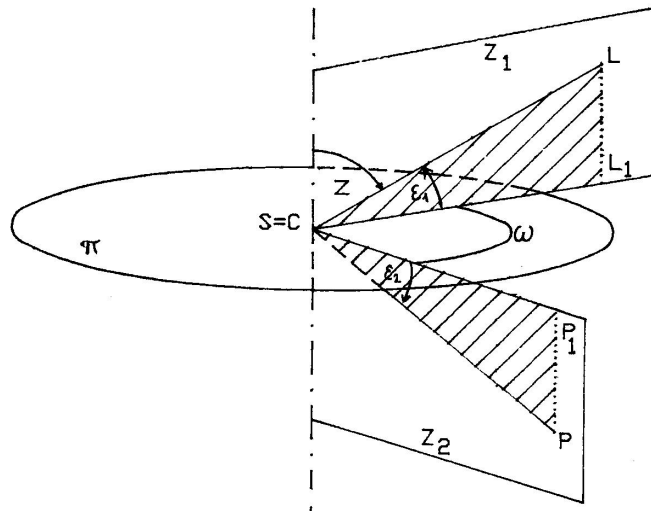
Rektifikace:

Chyba se odstraní pomocí posunu objímky nitkového kříže. Svislá ryska se nastaví na údaj

měřítka $x_3 = \frac{x_1 + x_2}{2}$.

5. Měření úhlů

Vrcholový úhel, který leží ve všeobecné rovině (jeho ramena mají různý sklon), určíme jako průmět do vodorovné a svislé roviny. Tím vzniká vodorovný a svislý úhel.



obr. 5.1 - Vodorovný a svislý úhel [45.]

Vodorovný úhel ω mezi body L a P získáme tak, že směry CL, CP promítáme kolmo do vodorovné roviny π . Úhel mezi průměty CL_1 , CP_1 je vodorovný úhel ω . K odměření vodorovného úhlu můžeme použít libovolný bod na svislici procházející stanoviskem S (= C). Vodorovné úhly jsou odměřovány na vodorovném kruhu teodolitu.

Pokud by levý směr byl

- rovnoběžný s kladným směrem osy x, nazýval by se úhel *ω směrníkem*,
- vložen do směru severní větve zeměpisného poledníku, nazýval by se úhel *ω astronomickým azimutem*,
- vložen do směru severní větve magnetického poledníku, nazýval by se úhel *ω magnetickým azimutem*.

Svislý úhel ε je měřen ve svislé rovině Z_1 (Z_2) a je odměřován na svislém kruhu teodolitu. Svislý úhel měříme od vodorovné roviny π procházející bodem S směrem k bodu L – výškový úhel ε_1 , směrem k bodu P – hloubkový úhel ε_2 , nebo od svislice směrem k bodu L – zenitový úhel z .

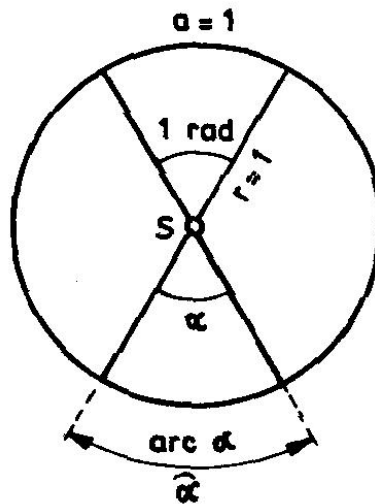
Pozn. Opačným úkonem k měření úhlů je jejich vytýčení (do terénu vynášíme úhel známé velikosti).

Jednotky

Velikost úhlu můžeme vyjádřit v **obloukové** nebo **stupňové** míře.

Jednotkou rovinného úhlu v **obloukové míře** je *radián* (rad)¹.

Radián je rovinný úhel sevřený dvěma radiálními polopaprsky, které vytínají na kružnici oblouk stejné délky, jako má její poloměr.



obr. 5.2 - Radián [29.]

Obloukovou míru používáme zejména při vyjadřování chyb a jejich analýze.

Když máme kružnici o poloměru r , potom pro úhel α° a jemu příslušející oblouk $arc\ \alpha$ platí:

$$\alpha^\circ / 360^\circ = arc\ \alpha / 2\pi \quad \Rightarrow \quad \alpha^\circ = \frac{360^\circ}{2\pi} * \frac{arc\ \alpha}{r} = \rho^\circ * \frac{arc\ \alpha}{r}$$
$$arc\ \alpha = \frac{\alpha^\circ}{\rho^\circ} * r$$

kde $\frac{360^\circ}{2\pi}$ je radián ve stupních (ρ°).²

Radián však není vhodný pro geodetické měření a výpočty. Používáme jej pouze pro převod z délkové míry na míru úhlovou.

V praxi se používají vedlejší jednotky rovinného úhlu (**stupňová míra**).

V *šedesátinném dělení* jsou to:

¹ Radián je jednotkou doplňkovou.

² Analogicky pro α° .

$$1^\circ (\text{úhlový stupeň}) = \pi/180 \text{ rad}$$

$$1' (\text{úhlová minuta}) = 1/60^\circ = \pi/10\,800 \text{ rad}$$

$$1'' (\text{úhlová sekunda}) = 1/60' = \pi/648\,000 \text{ rad}$$

Plný kruh v šedesátinném dělení = 360° .

V *setinném dělení* jsou to:

$$1^g (\text{grad}) = \pi/200 \text{ rad}$$

$$1^{mg} (\text{miligrad}) = 0,001^g = \pi/200\,000 \text{ rad}$$

Nebo se používá dělení gradu na centigrady ($1^c = 1/100^g$) a centicentigrady ($1^{cc} = 1/100^c$).

Plný kruh v setinném dělení = 400^g .³

Převodní vztahy mezi dělením šedesátinným a setinným:

$$360^\circ = 400^g \Rightarrow 1^\circ = 10/9^g \text{ a } 1^g = 9/10^\circ$$

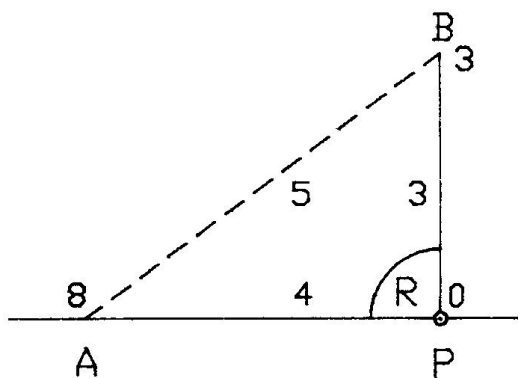
Převodní vztahy mezi vedlejšími jednotkami rovinného úhlu a radiánem:

$$1 \text{ rad} = 57,29578^\circ = 3437,75' = 206264,8'' = 63,66198^g = 63661,98^{mg}$$

5.1 Určování úhlů konstantní velikosti

K určování úhlů konstantní velikosti (pravý, přímý úhel) se používají jednoduché pomůcky – pásma a hranoly.

Pásma se využívá k určení pravého úhlu. Vychází se přitom z Pythagorejského trojúhelníka o stranách rovných násobkům 3, 4, a 5.

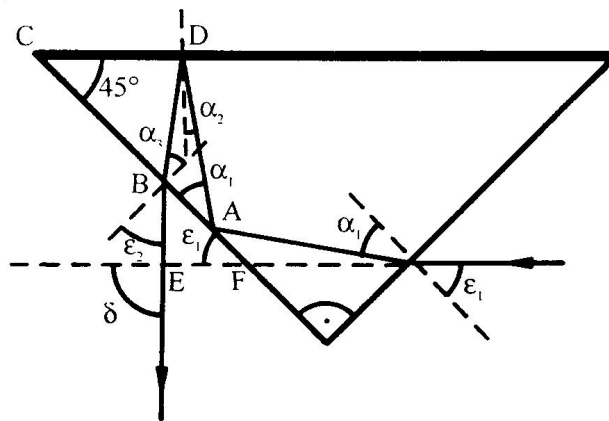


obr. 5.3 – Určení pravého úhlu pomocí pásma [45.]

³ V současnosti je termín grad nahrazován termínem gon a namísto termínu miligrad se používá miligon.

Postup s pásmem je však ještě příliš pracný a proto se při potřebě rychlého vytýčení většího množství pravých úhlů používá trojbokého nebo pentagonálního hranolu.

Trojboký hranol má úhel proti přeponě roven 90° a zbylé dva úhly jsou rovny 45° . Přeponová stěna je pokovená a působí jako zrcadlo (odraz). Na zbylých dvou stěnách dochází k lomu paprsku. Paprsek je po průchodu hranolem posunut o úhel $\delta = 90^\circ$. Hranol je vložen do pouzdra s držákem, které je opatřeno háčkem pro zavěšení olovnice.



obr. 5.4 – Průchod světelných paprsků v trojbokém hranolu [27.]

$$\triangle ACD : \alpha_1 + 45^\circ + 90^\circ + \alpha_2 = 180^\circ \Rightarrow \alpha_1 = 45^\circ - \alpha_2$$

$$\triangle BCD : 90^\circ - \alpha_3 + 45^\circ + 90^\circ - \alpha_2 = 180^\circ \Rightarrow \alpha_3 = 45^\circ - \alpha_2$$

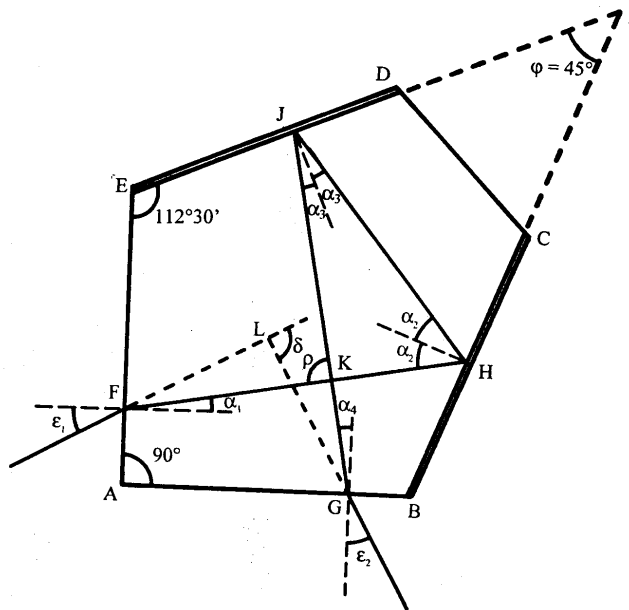
$$\alpha_1 = \alpha_3 \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$\triangle EBF : \delta + \varepsilon_1 + 90^\circ - \varepsilon_2 = 180^\circ$$

$$\delta = 90^\circ$$

Při vytýčení pravého úhlu musí být přeponová stěna přibližně rovnoběžná s měřickou přímkou. Hranolem pohybujeme podél přímky, obraz výtyčky realizující přímkou nám udává směr hledané kolmice.

Pentagonální hranol má jeden úhel pravý a protilehlý úhel má velikost 45° (viz obr. 5.5). Část hranolu u vrcholu I je z důvodu zmenšení hmotnosti a rozměru ubroušena. Stěny BC a DE jsou pokoveny, působí tedy jako zrcadlo a paprsek se na nich odráží. Na stěnách AB a AE dochází k lomu paprsku. Směr vstupujícího paprsku je po průchodu hranolem posunut o úhel $\delta = 90^\circ$.



obr. 5.5 – Průchod světelných paprsků v pentagonálním hranolu [27.]

$$\Delta HIJ : 90^\circ - \alpha_2 + 90^\circ - \alpha_3 + \varphi = 180^\circ$$

$$\varphi = \alpha_2 + \alpha_3$$

$$\Delta HJK : 180^\circ - \rho + 2\alpha_2 + 2\alpha_3 = 180^\circ$$

$$\rho = 2\alpha_2 + 2\alpha_3$$

$$\rho = 2\varphi$$

$$\varphi = 45^\circ \Rightarrow \rho = 90^\circ$$

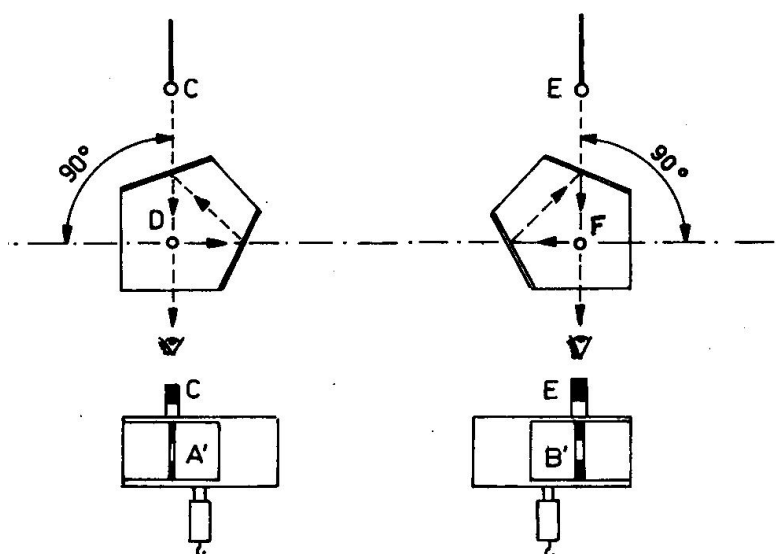
$$\Delta AGKF : 90^\circ + 90^\circ + \alpha_1 + 180^\circ - \rho + 90^\circ - \alpha_4 = 360^\circ$$

$$\alpha_1 = \alpha_4 \Rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_2$$

$$\Delta AGLF : 90^\circ + 90^\circ + \varepsilon_1 + 180^\circ - \delta + 90^\circ - \varepsilon_2 = 360^\circ$$

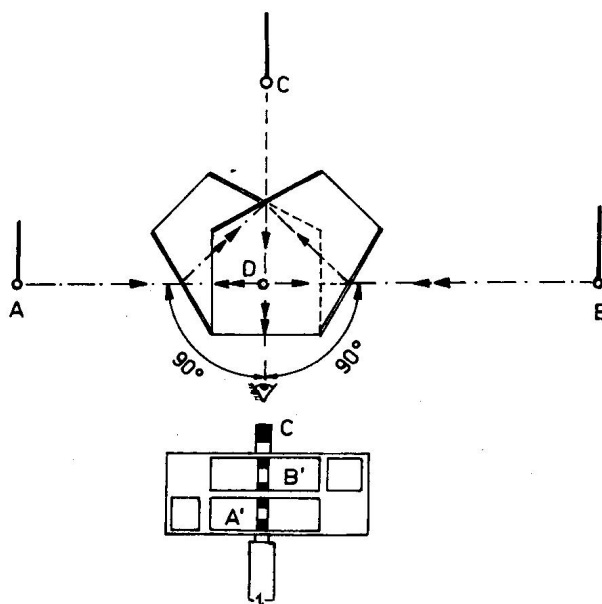
$$\delta = 90^\circ$$

Pentagon se při vytýčení kolmice na přímku AB umístí pomocí olovnice na bod přímky, z něž chceme kolmici vytýčit. Otočí se jednou stěnou k výtýčce označující směr přímky. Ve druhé stěně hranolu se objeví obraz této výtýčky, který nám udává směr hledané kolmice.



obr. 5.6 – Určení kolmice pentagonem [29.]

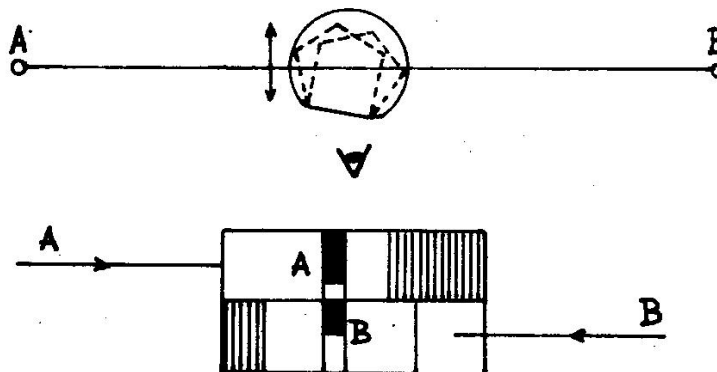
Dvojitý pentagon jsou dva pentagonální hranoly postavené na sebe. Používá se k vytýčení přímého úhlu (obr. 5.7). Dvojitým pentagonem se pohybuje kolmo k dané přímce, až se dosáhne splynutí obrazu výtyčky stojící ve směru na bod A a výtyčky stojící ve směru na bod B. Hledaný bod přímky AB je určen pomocí olovnice.



obr. 5.7 – Chod světelných paprsků v dvojitém pentagonu [29.]

Dvojitý pentagon lze použít také k vytýčení paty kolmice z daného bodu na přímku nebo naopak k vytýčení kolmice z daného bodu přímky. Hranolem se pohybuje podél přímky a kolmo na

přímku až obrazy výtyček realizujících přímku a výtyčky pozorované pouhým okem přes hranol splývají.



obr. 5.8 – Určení kolmice dvojitým pentagonem [53.]

5.2 Určování úhlů libovolné velikosti

K určování úhlů libovolné velikosti, jak v rovině vodorovné, tak svislé, slouží **teodolity**⁴.

5.2.1 Měření vodorovných úhlů

Nelze měřit přímo úhel – **měříme směry** a **vodorovný úhel je rozdílem dvou směrů**. Měříme jej na vodorovném kruhu teodolitu. Pokud na stanovisku měříme více než dva směry, říkáme, že měříme **osnovu směrů**.

5.2.1.1 Příprava teodolitu na stanovisku

Před začátkem měření je třeba zajistit, aby vertikální osa teodolitu byla ve svislé poloze – **horizontace teodolitu**, a byla ztotožněná se svislicí jdoucí vrcholem měřeného úhlu – **centrace teodolitu**.

Příprava teodolitu na stanovisku zahrnuje následující úkony:

- hrubá centrace,
- hrubá horizontace,
- přesná centrace,
- přesná horizontace.

⁴ Popis a dělení teodolitů je uvedeno v předchozí kapitole.

Hrubá centrace

Stativ teodolitu se postaví nad stabilizovaným geodetickým bodem tak, aby střed hlavy stativu byl přibližně nad tímto bodem a hlava stativu byla přibližně vodorovná. Centrace se provádí pomocí olovnice (závěsné, tyčové nebo optické).

Hrubá horizontace

Horizontaci provádíme podle kruhové libely nebo alhidádové libely teodolitu třemi stavěcími šrouby teodolitu. Přístroj se nejprve urovná ve směru dvou stavěcích šroubů (současným protisměrným otáčením těchto šroubů), otočí se o 90° a urovná se pomocí třetího šroubu.

Přesná centrace

Přístroj se posouvá po desce stativu dokud hrot olovnice (záměrný obrazec) není přesně nad značkou stabilizovaného bodu. Pak se přístroj upevní k desce stativu středovým šroubem.

Přesná horizontace

Přístroj se horizontuje alhidádovou libelou ve dvou na sebe kolmých směrech stavěcími šrouby. Poté přístrojem otočíme o 360° a pokud se bublina alhidádové libely nevychýlí, je přístroj horizontován. Pokud tomu tak není, je třeba provést rektifikaci alhidádové libely.

Před měřením je ještě potřeba upravit dalekohled – zaostřit nitkový kříž a obraz zacíleného předmětu.

5.2.1.2 Metody měření vodorovných úhlů

Měření:

- 1) v jedné poloze dalekohledu
- 2) vodorovných směrů v řadách a skupinách
- 3) násobením
- 4) v laboratorních jednotkách
- 5) ve všech kombinacích (Schreiberova metoda)

ad 1) v jedné poloze dalekohledu

Používá se při podrobném polohovém měření (polární metodě, tachymetrii). Úhly jsou zatíženy všemi přístrojovými chybami.

Dalekohledem se zacílí v první poloze na signál, který je ve směru levého ramene úhlu. Utáhnou se hrubé ustanovky. Obraz v dalekohledu se zaostří a svislé vlákno nitkového kříže se jemnými

ustanovkami nastaví přesně na střed cílové značky. Na vodorovném kruhu se přečte čtení o_1 . Stejným způsobem se provede zacílení ve směru pravého ramene úhlu. Na vodorovném kruhu se přečte čtení o_2 . Výsledný úhel $\omega = o_2 - o_1$. Pokud $o_2 < o_1$, potom $\omega = (o_2 + 400) - o_1$.

ad 2) vodorovných směrů v řadách a skupinách

Jedná se o základní metodu při určování bodů polohového pole a většiny měření. Výchozí směr má být dobře viditelný po celou dobu měření. Měří se v obou polohách dalekohledu. Jedna skupina jsou dvě měřické řady. První řada se měří v první poloze dalekohledu. Cílí se od počátečního směru postupně do všech dalších směrů a končí se opětným zacílením do počátečního směru. Uzávěr nesmí být obvykle větší než 2 až 3 násobek základní střední chyby určení směru použitou metodou. Dalekohled se proloží do druhé polohy (otočí se kolem vodorovné osy o 200°) a v druhé řadě se cílí na jednotlivé směry v opačném pořadí. Počet nutných skupin se řídí předpisy. Při každé další skupině se nastavuje na počáteční směr čtení změněné o hodnotu $200^\circ/s$, kde s je počet skupin. Výsledky se ukládají do paměti teodolitu nebo se zapisují do zápisníku (obr. 5.9).

Zvláštním případem je, když se měří ve skupině pouze dva směry, ze kterých se určí úhel ω . Jedná se o polygonové pořady⁵.

⁵ Při měření polygonového pořadu se využívá trojpodstavcové soupravy. Ta se skládá ze tří stativů, teodolitu s dálkoměrem a dvou cílových znaků. Přístroj i cílové znaky se postupně umísťují na tytéž stativy, čímž je zaručena stejná centrace přístroje i cíle.

Zápisník měřených vodorovných směrů

* Nomenklatura: Číslo a název bodu: A39 Na Hlívkách				* Stanovisko: centrické Cíl: excentrický Měřil: J. Tloučel dne: 1.6.86				* Teodolit: THEO 010 č. 38629 postaven na stativu úhl. míra gr. Stav povětrnosti: slunečno														
Směrná	Kada	1. skupina			Průměr skupiny Redukce			2. skupina			Průměr skupiny Redukce			3. skupina			Průměr skupiny Redukce			Průměr ze 3. skupin		
* Počátek Δ 40 Sv. Vavřínc	I	0	00	12	00	14	67	33	10	33	12	133	66	03	66	06						
	II	200	00	16	00	00	267	33	14	00	00	333	66	09	00	00	0	00	00			
30	I	44	61	50	61	52	111	94	60	94	62	178	27	50	27	53						
	II	244	61	55	61	38	311	94	64	61	50	378	27	56	61	47	44	61	45			
33	I	134	87	02	87	05	202	20	11	20	13	268	53	08	53	10						
	II	334	87	08	86	91	2	20	15	87	01	68	53	12	87	04	134	86	99			
14.2	I	175	96	68	96	71	243	29	78	29	82	309	62	70	62	72						
	II	375	96	74	96	57	43	29	86	96	70	109	62	74	96	66	175	96	64			
18.1	I	242	91	84	91	86	310	24	75	24	77	376	57	64	57	67						
	II	42	91	88	91	72	110	24	79	91	65	176	57	70	91	61	242	91	66			
* Počátek Δ 40	I	0	00	07	00	10	67	33	16	33	18	133	66	07	66	10						
	II	200	00	13	99	96	267	33	21	00	06	333	66	12	00	04	0	00	02			

Opravy: $V_i = \sigma - \sigma_i$ $v_i = V_i + \sigma_i$

Poznámka: tečkou je v zápisníku vyznačena adjustace tuší (údaje v záhlaví, označení směrů, redukce skupin, výsledný průměr)

V	$v = V + \sigma_1$	V	$v = V + \sigma_2$	V	$v = V + \sigma_3$	[v]	[vv]
0	-4	0	+3	0	+1	0	26
+7	+3	-5	-2	-2	-1	0	14
+8	+4	-2	+1	-5	-4	+1	33
+7	+3	-6	-3	-2	-1	-1	19
-6	-10	+1	+4	+5	+6	0	152
+6	+2	-4	-1	-2	-1	0	6
[V]=+22	[v]=-2	[V]=-16	[v]=+2	[V]=-6	[v]=0	$\Sigma=0$	$\Sigma=250$
$\sigma_1 = \frac{-22}{6} = -4$		$\sigma_2 = \frac{+16}{6} = +3$		$\sigma_3 = \frac{-6}{6} = -1$			

$$m_o = \sqrt{\frac{[vv]}{(m-1)(s-1)}} = \sqrt{\frac{250}{(6-1)(3-1)}} = \sqrt{\frac{250}{10}} = 5^{cc}$$

$$m_x = \sqrt{\frac{[vv]}{s(m-1)(s-1)}} = \sqrt{\frac{250}{3(6-1)(3-1)}} = \sqrt{\frac{250}{30}} = \frac{m_o}{\sqrt{s}} = \frac{5}{\sqrt{3}} = 3^{cc}$$

m - počet směrů

s - počet skupin

Obr. 105

obr. 5.9 – Zápisník měřených vodorovných směrů [53.]

ad 3) násobením

Umožňuje měřit úhel s větší přesností než je přesnost odečítací pomůcky teodolitu, lze ji použít pouze u přístrojů repetičních. V současnosti se používá již jen ojediněle. Podstatou metody je opakované sčítání (přiřazování, repetice) měřeného úhlu. Zacílí se na levý signál, přečte se čtení O_L , zacílí se na pravý signál, přečte se čtení O_I . Vodorovný kruh se spojí s alhidádou a jejím otočením se zacílí na levý signál, tím se přenese čtení O_I do tohoto směru. Po uvolnění alhidády se postup opakuje. Po n -tém zacílení na pravý signál se přečte údaj O_P . Úhel $\omega = \frac{(O_P - O_L)}{n}$, kde n je počet opakování měření. Měření se provádí v jedné nebo dvou polohách dalekohledu.

ad 4) v laboratorních jednotkách

Metoda zavedená roku 1936 Ing. Jiřím Křovákem se používá ke snížení vlivu všech chyb soustavy teodolit – observační pilíř na minimum. Měření trvá krátkou dobu, takže lze předpokládat stejnou refrakci⁶. Označení „laboratorní“ má vyjádřit, že po krátkou dobu měření mají spojnice teodolit – cíl laboratorní vlastnosti. Metodu lze použít např. pro měření v základní síti.

Principem metody je zaměření úhlu při opakovaném cílení i odečítání, včetně určení odklonu osy alhidády od svislice. Laboratorní jednotka sestává ze zaměření na levý a pravý signál (L – P) a opakovaného měření téhož úhlu v obráceném pořadí (P – L) při dvojnásobném cílení i odečítání, tedy (LPPL). Po proložení dalekohledu do druhé polohy se postup opakuje, ovšem opačně (PLLP). Před každým zacílením se navíc určuje poloha obou konců alhidádové libely na její dělené stupnici. Další laboratorní jednotky se měří na jiných místech děleného kruhu. [45.]

Podrobněji je metoda popsána v [62.].

ad 5) ve všech kombinacích (Schreiberova metoda)

Při této metodě se měří všechny úhly na stanovisku. Podrobnější informace lze nalézt např. v [62.].

5.2.1.3 Analýza chyb při měření vodorovných úhlů

Chyby, které se při měření vodorovných úhlů vyskytují, můžeme rozdělit do tří hlavních skupin:

- 1) přístrojové chyby
- 2) měřické chyby
- 3) vnější chyby (z prostředí)

⁶ Refrakce je způsobena proměnlivou hustotou vzduchových vrstev. Paprsky přicházející z cíle k měřiči jsou odkloněny od geometricky přímé spojnice.

Jedná se o chyby nevyhnutelné, které mohou mít charakter buď chyb systematických nebo nahodilých. Abychom mohli vliv těchto chyb na výsledek měření vyloučit nebo alespoň omezit na nejmenší míru (měřickou metodou, popř. výpočtem), je třeba znát příčinu jejich vzniku i vliv na výsledek měření.

1) přístrojové chyby

a) chyba alhidádové libely

Tato chyba vzniká jako důsledek nesprávné rektifikace alhidádové libely. Pokud alhidádová libela není správně rektifikovaná, není osa alhidádové libely L kolmá na svislou osu alhidády V . Chyba se nedá vyloučit měřením ve dvou polohách dalekohledu.

Vliv chyby na měřený vodorovný směr

Pro vodorovný směr se vyjadřuje vztahem

$$\Delta_v = v * \cot gz * \sin \alpha, \quad (1.)$$

kde v je úhel odklonu osy alhidády od svislice,
 α je úhel, který svírá záměrná rovina s rovinou, v níž došlo k odklonu osy alhidády,
 z je zenitový úhel záměry.

Vliv $\Delta_v = 0$ při vodorovné záměře ($z = 100^g$). U strmých záměr však velikost vlivu chyby rychle roste a maximální hodnoty dosahuje, jestliže $z \rightarrow 0$.

Jestliže úhel $\alpha = 0$, vliv chyby se neprojevuje ani při strmých záměrech. Maximální hodnoty dosahuje, jestliže $\alpha \rightarrow 100^g$ nebo 300^g , kdy $\sin \alpha = \pm 1$ a $\Delta_{v \max} = v * \cot gz$.

Vliv chyby na měřený vodorovný úhel

[45.] Úhel je dán rozdílem dvou směrů (každý z nich je zatížen určitou chybou Δ_v), proto i vliv chyby z nesprávné horizontace na měřený úhel je dán rozdílem chyb v obou směrech:

$$\Delta_{v\omega} = \Delta_{v_2} - \Delta_{v_1} = v(\cot gz_2 * \sin \alpha_2 - \cot gz_1 * \sin \alpha_1).$$

Tato chyba je nebezpečná zejména v případech, kdy $\sin \alpha_2 = -\sin \alpha_1$, tj. pro $\alpha_2 = \alpha_1 \pm 200^g$, protože potom

$$\Delta_{v\omega} = v * \sin \alpha (\cot gz_2 + \cot gz_1).$$

Jsou-li ramena skloněna pod stejným zenitovým úhlem, tj. $z_2 = z_1 = z$, pak

$$\Delta_{v\omega} = 2 * v * \cot gz * \sin \alpha .$$

Maximum nastane pro $\alpha = 100^{\circ}$

$$\Delta_{v\omega} = 2 * v * \cot gz .$$

Při $z_2 = -z_1$ je $\Delta_{v\omega} = 0$.

Odvození vztahu (1.) je uvedeno v [45.].

b) úklonná chyba (chyba ze sklonu točné osy dalekohledu)

Úklonná chyba je způsobená nekolmostí svíslé osy alhidády V k točné ose dalekohledu H.

Vliv chyby na měřený vodorovný směr

Při sklonu točné osy i (úhel mezi točnou osou dalekohledu H a vodorovnou rovinou) a zenitovém úhlu z je vliv chyby na měřený vodorovný směr

$$\Delta_i = i * \cot gz . \quad (2.)$$

Nulový vliv chyby je při $z = 100^{\circ}$, maximální při $z \rightarrow 0$. Vliv úklonné chyby se vyloučí měřeními ve dvou polohách dalekohledu. Protože výrobní tolerance zaručuje vodorovnost točné osy do 10° [38.], je vliv této chyby při měření směrů v jedné poloze zanedbatelný.

Vliv chyby na měřený vodorovný úhel

Úhel měřený pouze v jedné poloze dalekohledu není ovlivněn chybou ze sklonu točné osy, pokud $z_1 = z_2$.

Při rozdílných zenitových úhlech nad nebo pod horizont se výsledný vliv na měřený vodorovný úhel rovná rozdílu vlivu na jednotlivé směry:

$$\Delta_{i\omega} = i(\cot gz_2 - \cot gz_1) .$$

Při rozdílných zenitových úhlech, ale jednou nad a po druhé pod horizont, se výsledný vliv na měřený vodorovný úhel rovná součtu vlivů na jednotlivé směry:

$$\Delta_{i\omega} = i(\cot gz_2 + \cot gz_1) .$$

Úklonná chyba se odstraní měřeními v obou polohách dalekohledu. V první a druhé poloze má vliv sklonu točné osy opačná znaménka. Aritmetický průměr z obou poloh dalekohledu bude tedy chyby ze sklonu točné osy dalekohledu zbaven.

Odvození vztahu (2.) je uvedeno v [45.].

c) kolimační chyba

Kolimační chyba je způsobená nekolmostí záměrné přímky Z k točné ose dalekohledu H.

Vliv chyby na měřený vodorovný směr

Vliv kolimační chyby na vodorovný směr je závislý na velikosti kolimační chyby c a na zenitovém úhlu z :

$$\Delta_c = \frac{c}{\sin z}. \quad (3.)$$

Při vodorovné záměře ($z = 100^g$) je vliv kolimační chyby na vodorovný směr roven přímo kolimační chybě c . Minimální vliv chyby nastává tedy při vodorovné záměře a maximální, jestliže $z \rightarrow 0$.

Vliv chyby na měřený vodorovný úhel

Vliv kolimační chyby na měřený úhel je dán rozdílem chyb v obou směrech:

$$\Delta_{c\omega} = \Delta_{c2} - \Delta_{c1} = c \left(\frac{1}{\sin z_2} - \frac{1}{\sin z_1} \right).$$

Pokud $z_1 = z_2$, je vliv kolimační chyby na vodorovný úhel měřený v jedné poloze nulový. Čím větší je rozdíl hodnot zenitových úhlů, tím větší je vliv chyby na vodorovný úhel.

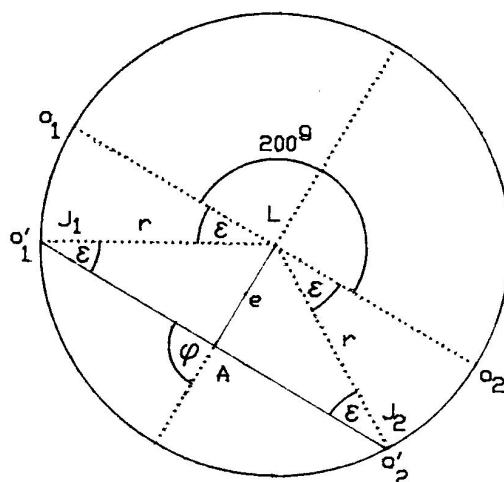
Kolimační chyba se odstraní měřením v obou polohách dalekohledu. V první a druhé poloze má vliv kolimační chyby opačná znaménka. Aritmetický průměr z obou poloh dalekohledu bude tedy kolimační chyby zbaven.

Odvození vztahu (3.) je uvedeno v [45.].

Další strojové chyby:

d) chyba z excentricity alhidády

[45.] Teodolit má chybu z excentricity alhidády, pokud osa alhidády neprochází přesně středem limbu.



obr. 5.10 – Chyba z excentricity alhidády [45.]

Vliv chyby ε se dá určit z $\triangle ALJ$:

$$\sin \varepsilon = \frac{e}{r} \sin \varphi,$$

protože úhel ε je malý, můžeme psát

$$\varepsilon = \rho \frac{e}{r} \sin \varphi.$$

Protože e (excentricita alhidády) a r jsou pro určitý přístroj konstantní, závisí velikost chyby jen na úhlu φ . Úhel φ určuje polohu spojnice odečítacích indexů vzhledem ke směru excentricity alhidády. Při otáčení alhidády se úhel φ a tedy i velikost úhlu ε mění.

Vliv chyby je roven 0, pokud spojnice odečítacích indexů J_1 a J_2 splyne se směrem excentricity e ($\varphi = 0$) a maximální, pokud je excentricita e kolmá na spojnici odečítacích indexů J_1 a J_2 , tj. $\varphi = 100^\circ$, popř. 300° .

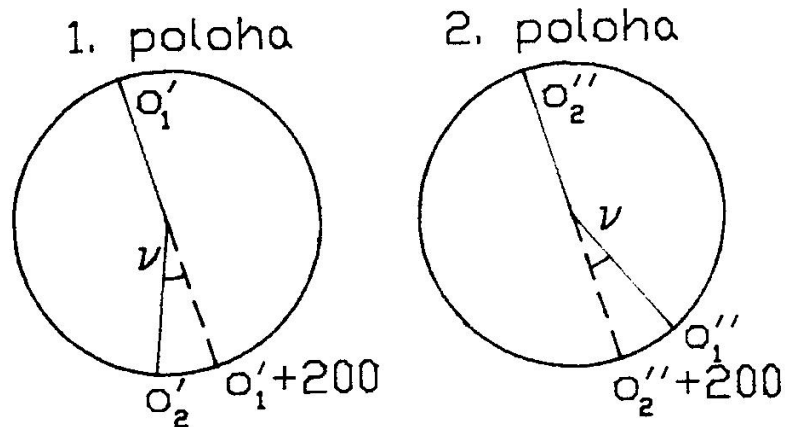
V důsledku excentricity alhidády se při měření odečítají nesprávné hodnoty o_1' a o_2' namísto správných hodnot o_1 a o_2 . Vodorovný úhel ω se určí jako aritmetický průměr správných hodnot, tj. $0,5(o_1 + o_2)$, přičemž $o_1 = o_1' + \varepsilon$ a $o_2 = o_2' - \varepsilon$. Potom pro aritmetický průměr úhlu ω vychází vztah

$$\omega = \frac{o_1 + o_2}{2} = \frac{o_1' + \varepsilon + o_2' - \varepsilon}{2} = \frac{o_1' + o_2'}{2}.$$

Aritmetickým průměrem z odečtení dvou diametrálně postavených odečítacích pomůcek se vliv chyby z excentricity alhidády vyloučí.

e) nediametrální poloha čtecích zařízení

Nejsou-li odečítací indexy přesně diametrálně, bude čtení u jednoho z indexů pochybeno o úhel ν .



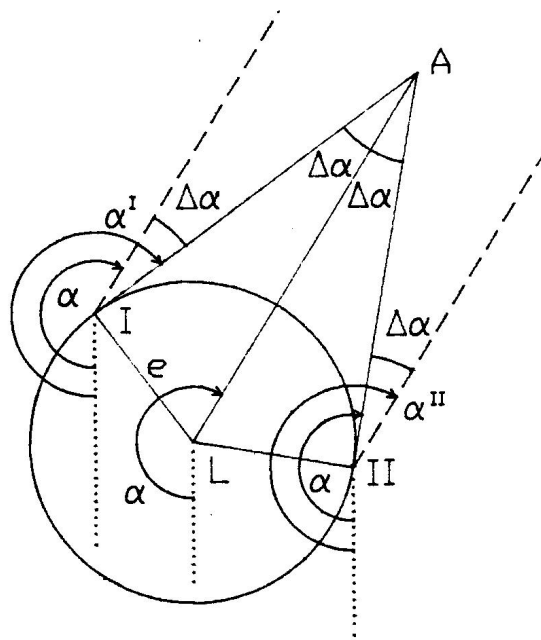
obr. 5.11 – Chyba z nediametrální polohy čtecích zařízení [45.]

Protože se úhel určuje jako rozdíl dvou směrů, z nichž každý je zatížen stejnou chybou, nemá chyba z nediametrální polohy čtecích zařízení vliv na vodorovný úhel měřený v jedné poloze dalekohledu.

Z obrázku je patrné, že chyby v první a druhé poloze mají opačná znaménka, a proto je lze vyloučit měřením ve dvou polohách dalekohledu.

f) chyba z excentricity záměrné roviny Z

[45.] Není-li dalekohled umístěn centricky, neprochází záměrná rovina osou alhidády – je excentrická a při otáčení alhidády bude mít od osy otáčení, procházející středem limbu L, stále stejnou vzdálenost e . Ve svislém průmětu se záměrná rovina projeví jako tečna ke kružnici o poloměru e se středem v bodě L.



obr. 5.12 – Vliv chyby z excentricity záměrné roviny na vodorovný směr [45.]

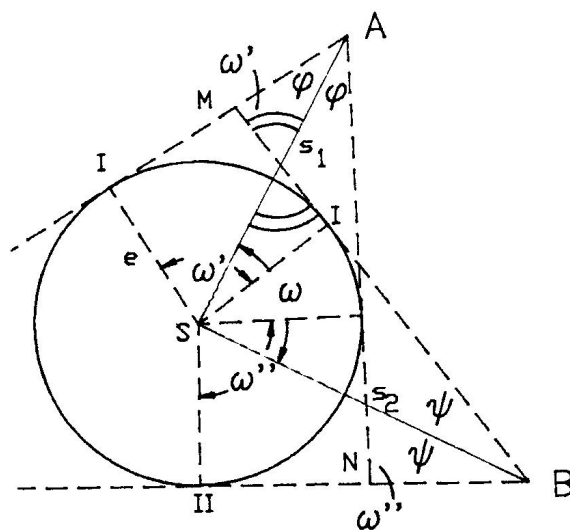
Při zaměřování směru na bod A v první poloze obdržíme namísto správného údaje α údaj zvětšený o $\Delta\alpha$. Údaj $\Delta\alpha$ můžeme vypočítat ze vztahu

$$\sin \Delta\alpha = \frac{e}{s}, \Delta\alpha \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta\alpha = \rho \frac{e}{s}.$$

V druhé poloze bude údaj α zmenšený o $\Delta\alpha$.

Průměr z obou čtení bude tedy zbaven vlivu chyby z excentricity záměrné roviny.

Pokud měříme vodorovný úhel $\omega = ASB$, zaměříme dalekohledem na oba body nejprve v první poloze dalekohledu a místo správného úhlu ω zaměříme úhel ω' , o který se pootočí jak záměrná rovina, tak odečítací indexy. Rozdíl $\Delta\omega = \omega - \omega'$, který udává vliv této chyby na měřený úhel v jedné poloze dalekohledu, můžeme určit ze čtyřúhelníka ASBM:



obr. 5.13 – Vliv chyby z excentricity záměrné roviny na vodorovný úhel [45.]

$$\omega + \psi = \omega' + \varphi \Rightarrow \omega - \omega' = \varphi - \psi = \Delta\omega.$$

Úhly φ , ψ a $\Delta\omega$ vypočítáme z excentricity e a délek stran s_1 a s_2 :

$$\sin \varphi = \frac{e}{s_1} \Rightarrow \varphi = \rho \frac{e}{s_1}$$

$$\sin \psi = \frac{e}{s_2} \Rightarrow \psi = \rho \frac{e}{s_2}$$

$$\Delta\omega = \varphi - \psi = \rho \left(\frac{e}{s_1} - \frac{e}{s_2} \right) = \frac{e}{\rho} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2} \right)$$

Při stejně dlouhých záměrách se vliv chyby z excentricity záměrné roviny na měřený úhel v jedné poloze neprojeví. Se zvětšujícím se rozdílem v délkách stran se zvětšuje také vliv chyby.

g) chyba z nestejnorného dělení kruhu

Dnešní přístroje mají limby velmi přesně dělené, neboť se zhotovují velmi jemnými dělicími stroji, které pracují automaticky. Žádný stroj však není dokonalý. Vlivem nahodilých a systematických chyb dělicích strojů nejsou stupnice dělených kruhů zcela přesně stejnoměrné.

Zkoušku dělení kruhu je možné provést zvláštními stroji s mikroskopy nebo měřením úhlů určité velikosti na různých místech limbu po celém jeho obvodu.

Vliv chyby způsobené nestejnorným dělením kruhu se snižuje opakovaným měřením a čtením vždy na jiném místě kruhu.

h) chyba ze sklonu roviny limbu

U novějších přístrojů se již s touto chybou prakticky nesetkáme. Pouze u starších přístrojů se může vyskytnout případ, že se při výrobě nepodaří vyhovět požadavku kolmosti limbové roviny ke svislé ose alhidády. Vliv sklonu limbové roviny na měřený vodorovný směr je dán vztahem $\Delta\varepsilon_{\max} = \frac{\varepsilon^2}{4\rho}$, kde ε je sklon limbové roviny. I ten je ale nepatrný a tudíž zanedbatelný.

i) runová chyba

Vzniká tím, že délka stupnice pro jemné čtení neodpovídá délce jí odpovídajícího intervalu limbu (vlivem nesprávného zvětšení čtecího mikroskopu). U moderních optických teodolitů je již tato chyba zanedbatelná.

2) měřické chyby

a) chyba z nesprávné horizontace přístroje

Při nesprávném urovnání přístroje je osa alhidády odchýlena od svislice o úhel v , o který je odkloněna i rovina limbu od vodorovné roviny (rovina limbu je kolmá k ose alhidády). Protože $H \perp V$, poruší se také vodorovnost točné osy. Vliv chybné horizontace přístroje na měřený vodorovný směr je stejný jako vliv chyby alhidádové libely, tedy:

$$\Delta_v = v * \cot gz * \sin \alpha.$$

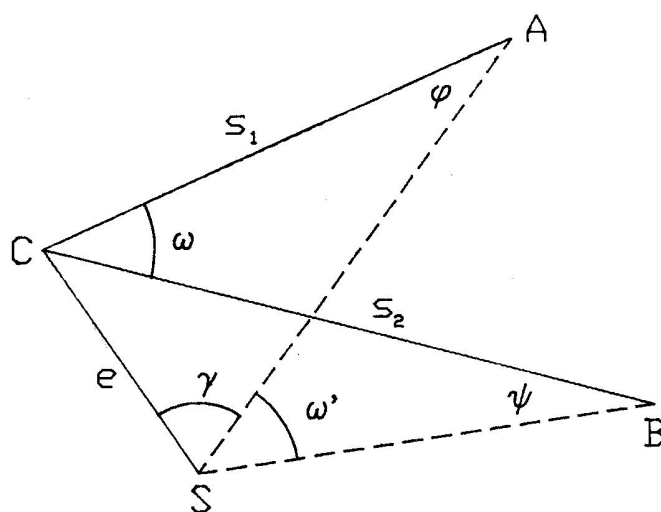
Vliv nesprávné horizontace na měřený úhel je opět stejný jako vliv chyby alhidádové libely, tedy:

$$\Delta_{v\omega} = \Delta_{v2} - \Delta_{v1} = v(\cot gz_2 * \sin \alpha_2 - \cot gz_1 * \sin \alpha_1).$$

b) chyba z nesprávné centrace přístroje

[45.] V důsledku nepřesného provedení centrace je teodolit místo na bod C dostředěn na bod S s chybou e a místo správného úhlu ω mezi body A a B měříme chybný úhel ω' . Tím vzniká chyba

$$\Delta\omega = \omega - \omega'.$$



obr. 5.14 – Chyba z nesprávného dostředění přístroje [45.]

Z obrázku je zřejmé, že

$$\omega + \varphi = \omega' + \psi \text{ a chyba } \Delta\omega = \omega - \omega' = \psi - \varphi.$$

Protože hodnota e je vzhledem k délkám stran s_1 a s_2 velmi malá, jsou velmi malé i úhly φ a ψ . Z toho plyne

$$\varphi = \rho \frac{e}{s_1} \sin \gamma$$

$$\psi = \rho \frac{e}{s_2} \sin(\omega' + \gamma).$$

Protože $\omega \approx \omega'$, je možné psát

$$\Delta\omega = \rho \left[\frac{e}{s_2} \sin(\omega' + \gamma) - \frac{e}{s_1} \sin \gamma \right].$$

Tato chyba nabude maximální hodnoty při $\gamma = 100^\circ$ a $\omega' = 200^\circ$, tedy když bude $e \perp s$ a $\omega \approx \omega' = 2R$, potom

$$\Delta\omega_{\max} = \rho \left[-\frac{e}{s_2} - \frac{e}{s_1} \right]$$

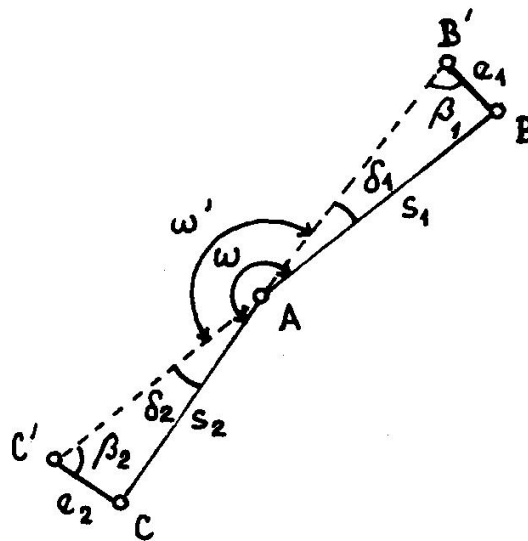
a pro $s_1 \approx s_2 \approx s$

$$\Delta\omega_{\max} = -2 * \rho * \frac{e}{s}.$$

Závěr: čím jsou záměry kratší, tím přesněji je třeba teodolit centrovat.

c) chyba z nesprávné centrace signálu

Chyba z nesprávné centrace signálu má na měřený vodorovný úhel obdobný vliv jako nepřesná centrace teodolitu na stanovisku.



obr. 5.15 – Chyba z nesprávné centrace signálu [45.]

$$\Delta\omega = \omega - \omega' = \delta_1 + \delta_2.$$

Protože hodnota e je vzhledem k délkám stran s_1 a s_2 velmi malá, jsou velmi malé i úhly δ_1 a δ_2 . Z toho plyne

$$\delta_1 = \rho \frac{e_1}{s_1} \sin \beta_1$$

$$\delta_2 = \rho \frac{e_2}{s_2} \sin \beta_2.$$

Maximální hodnoty opět dosáhne, bude-li excentricita e kolmá k záměře. Pak

$$\Delta\omega_{\max} = \rho \left[\frac{e_1}{s_1} + \frac{e_2}{s_2} \right].$$

Pro $e_1 = e_2$ a $s_1 = s_2 = s$ bude

$$\Delta\omega_{\max} = 2 * \rho \frac{e}{s},$$

tedy stejné jako v předcházejícím případě. Opět tedy platí, že čím jsou záměry kratší, tím přesněji je třeba signalizovat zaměřovaný bod.

d) chyba z nepevného postavení přístroje

Teodolit je pevně spojen s hlavou stativu. Jakýkoliv pohyb či změna polohy stativu při měření se přenáší i na přístroj, a tím i na polohu děleného kruhu, na kterém se odečítá. Proto je nutno před měřením zajistit neměnnou polohu stativu, tj. pevně zašlápnout nohy stativu do země, přezkoušet pevnost šroubů upevňujících nohy k hlavě stativu, ověřit dostatečné utažení středního šroubu spojujícího teodolit se stativem, neopírat se při měření o stativ a opatrně přecházet kolem stativu, aby se zabránilo jeho otřesům, které se přenášejí na přístroj. [45.]

Aby nedocházelo k jednostrannému zahřívání stativu slunečními paprsky a tím ke kroucení stativu a tedy i natáčení základního nulového směru, chrání se stativ měřickým slunečníkem. Měřický slunečník se používá také k ochraně přístroje před přímým působením slunečních paprsků a tedy oteplováním jednotlivých částí přístroje.

e) chyba v cílení

Chyba v cílení vzniká nepřesným nastavením nitkového kříže na svislou osu cílové značky.

Chyba v cílení závisí na:

- vlastnostech dalekohledu, tj. na výkonnosti dalekohledu (zvětšení, jasnost, rozlišovací schopnost), na úpravě nitkového kříže, síla rysek apod., na stabilitě záměrné osy při přeastřování,
- vlastnostech cíle, tj. velikosti, barvě a tvaru cílové značky, také na osvětlení cíle a jeho pozadí, na směru osvětlení,
- fyzikálních vlastnostech prostředí, kterým prochází paprsek, zejména na průhlednosti a teplotě ovzduší,
- zkušenosti a zručnosti pozorovatele, ale též na jeho duševním a tělesném stavu.

Chyba v cílení má náhodný charakter a její velikost značně kolísá v závislosti na podmínkách. Obecně je možno určit střední chybu v cílení podle přibližného vzorce

$$m_c = \frac{k}{\sqrt{z}}, \text{ kde } k = 9^{\text{cc}} \text{ až } 36^{\text{cc}} \text{ a } z \text{ je zvětšení dalekohledu [53].}$$

f) chyba ve čtení stupnice

U přístrojů se skleněnými kruhy vzniká chyba v odečtení buď nesprávným odhadem části nejmenšího dílku stupnice podle polohy odečítacího indexu nebo při koincidenčním

způsobu odečítání nepřesným nastavením obrazu rysek do koincidence optickým mikrometrem.

Velikost chyby v odečtení závisí zejména na:

- jemnosti dělení hlavní stupnice,
- odečítacím zařízením,
- schopnostech měřiče.

U elektronických teodolitů je chyba ve čtení uvedena na prospektu a měřič ji prakticky nemá možnost ovlivnit.

3) vnější chyby (z prostředí)

a) chyba z refrakce

Paprsky se šíří přímočaře pouze ve vakuu, v atmosféře dochází při průchodu paprsku různě hustými vzduchovými vrstvami⁷ k lomu světla, tzv. **refrakci**.

Paprsky přicházející z cíle k měřiči jsou odkloněny od geometricky přímé spojnice. Odchylka paprsku ve směru vertikálním je poměrně značná a projevuje se při měření svislých úhlů. Odchylka paprsku ve směru horizontálním je podstatně menší. Označuje se jako **horizontální (boční) refrakce** a projevuje se při měření vodorovných úhlů.

Horizontální refrakce se zohledňuje se při měření vodorovných úhlů se zvýšenou přesností (např. při měření v trigonometrických sítích).

V přízemních vrstvách jsou větší teplotní rozdíly a tedy také větší horizontální refrakce. Ve větších výškách se teploty vyrovnávají, vzduch je stejnorodější a refrakce podstatně menší. Prospěšný je mírný vítr, protože přemísťuje vzduchové sloupce různé teploty, promíchává je a tím ruší nebo alespoň zmenšuje jejich systematický vliv.

Refrakční chyba σ má složku systematickou c a složku proměnlivou γ

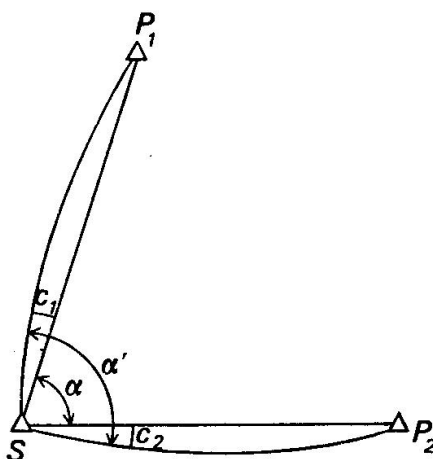
$$\sigma = c + \gamma.$$

Systematická složka v podstatě závisí na profilu terénu pod záměrou, na vlastnostech terénu a na klimatických poměrech v daném území. Má tedy různou hodnotu pro jednotlivé směry na tomtéž stanovisku a je také různá na různých bodech. Nelze ji zcela vyloučit ani dlouhodobým měřením za různých atmosférických podmínek.

Proměnlivá složka se mění s denní dobou a se změnami atmosférických podmínek. Během jednoho měření úhlu (po krátkou dobu) působí jako chyba systematická. Při měření v jiný den a v jiné době může mít jinou hodnotu i znaménko (může nabýt

⁷ Hustota vzduchu závisí především na teplotě.

charakteru náhodné chyby). Při dostatečném vystřídání podmínek bude její střední hodnota $M(\gamma) \approx 0$ a tedy střední hodnota refrakční chyby $M(\sigma) \approx c$.



obr. 5.16 – Horizontální refrakce [62.]

Na obrázku (obr. 5.16) je c_1 systematická složka refrakce v záměře na bod P_1 a c_2 v záměře na bod P_2 . V důsledku refrakce pak naměříme úhel α' namísto úhlu α , který bychom naměřili v homogenním prostředí.

Studiem refrakce se zabývala řada autorů. Problém příčné refrakce však stále není vyřešen. Výpočet refrakce vyžaduje (zvláště v členitém terénu) mnoho času, koeficienty v existujících vzorcích jsou empirické a nebudou vhodné pro jiné půdní, terénní a klimatické podmínky, než jsou ty, pro které byly určeny.

Obvykle se tedy volí druhý způsob snížení vlivu refrakce. Opakovaná měření téhož úhlu se dělí do různých dnů (nejméně tří) s odlišnými atmosférickými podmínkami. Kombinuje se měření denní a noční. Nejvhodnější doba pro měření je asi 3 – 4 hodiny před západem Slunce a po něm: nejvhodnější podmínky jsou zatažená obloha, mírný vítr (při malých rozdílech denních a nočních teplot). Záměry mají vést nejméně 5 m nad terénem, nad porostem nebo objekty. Pilíř, na který se staví teodolit, musí být dostatečně vysoký, aby všechny záměry byly nad přízemními vrstvami vzduchu, kde jsou nepříznivé refrakční podmínky. [62.]

Ani uvedená opatření však refrakci zcela nevyloučí.

b) chyba z vibrace

Vibrace způsobuje chvění cílové značky. Je způsobená turbulentním prouděním vzduchu. Teplejší přízemní vrstvy vzduchu jsou lehčí než nad nimi ležící vrstvy studenějšího vzduchu. Tím vzniká stálé stoupání teplých vrstev – vlnění, vibrace. Typická je pro letní dny při teplotách větších než 25°C . Závisí ale také na vlhkosti půdy a úpravě povrchu

terénu (asfalt). Vibrace však není nebezpečná, protože je viditelná. Pokud je vlnění silné a stěžuje cílení, přestaneme měřit.

5.2.1.4 Rozbor přesnosti měření vodorovných směrů a úhlů

Základní charakteristikou přesnosti měření vodorovných směrů a vodorovných úhlů je **střední chyba m** . Tato chyba vznikne spolupůsobením všech chyb přístrojových, měřických a vnějších.

$$m = \sqrt{m_i^2 + m_\omega^2 + m_s^2 + m_t^2}$$

kde m_i – souhrnná střední chyba všech přístrojových chyb,
 m_ω – střední chyba vlastního měření,
 m_s – střední chyba v centraci signálu,
 m_t – střední chyba v centraci teodolitu.

Měřickým postupem a správnou rektifikací přístroje usilujeme o to, aby hodnota $m_i \rightarrow 0$. Střední chyba vlastního měření m_ω zahrnuje chybu z cílení m_c a chybu ve čtení stupnice m_o . Střední chyby v centraci nelze uvést průměrnou hodnotou, neboť jejich velikost a vliv závisí nejen na použitém způsobu centrace, ale také na vzdálenosti cíle, musíme je tedy uvažovat zvlášť.

Vzhledem k tomu, že vliv centrace uvažujeme zvlášť a že přístrojové chyby vhodným způsobem vyloučíme, **střední chyba směru měřeného v jedné poloze dalekohledu je**

$$m_\psi = \sqrt{m_c^2 + m_o^2}$$

a **střední chyba směru měřeného v obou polohách dalekohledu je**

$$m_\psi = \frac{\sqrt{m_c^2 + m_o^2}}{\sqrt{2}},$$

protože střední chyba ubývá s odmocninou z počtu pozorování.

Střední chyba úhlu měřeného v jedné poloze dalekohledu

Úhel je roven rozdílu dvou směrů $\omega = \psi_2 - \psi_1$, a tedy střední chyba

$$m_\omega^2 = m_{\psi_2}^2 + m_{\psi_1}^2.$$

Protože lze předpokládat, že oba směry byly měřeny se stejnou přesností $m_{\psi_1} = m_{\psi_2} = m_\psi$, můžeme psát

$$m_\omega = m_\psi * \sqrt{2} = \sqrt{2 * (m_c^2 + m_o^2)}.$$

Střední chyba úhlu měřeného v obou polohách dalekohledu

Výsledný úhel je aritmetickým průměrem z měření v obou polohách dalekohledu a střední chyba ubývá s odmocninou z počtu pozorování, tedy

$$m_{\omega} = \frac{m_{\psi} * \sqrt{2}}{\sqrt{2}} = m_{\psi} = \sqrt{m_c^2 + m_o^2}.$$

Střední chyba úhlu měřeného v s skupinách

$$m_{\omega-skup} = \frac{m_{\omega}}{\sqrt{s}} = \sqrt{\frac{m_c^2 + m_o^2}{s}}.$$

Střední chyba v centraci signálu m_s a v centraci teodolitu m_t ⁸

Střední chyba úhlu způsobená nesprávným dostředěním signálů je

$$m_s^2 = \frac{1}{2} \rho^2 * \left(\frac{e_1^2}{s_1^2} + \frac{e_2^2}{s_2^2} \right).$$

Pro $e_1 = e_2 = e_s$ je

$$m_s = \rho \frac{e_s}{2s_1s_2} \sqrt{2(s_1^2 + s_2^2)}. \quad (4.)$$

Střední chyba úhlu způsobená nesprávným dostředěním teodolitu je

$$m_t = \rho \frac{e_t}{2s_1s_2} \sqrt{2(s_1^2 + s_2^2 - 2s_1s_2 \cos \omega')}. \quad (5.)$$

Pokud dosadíme jednotlivé střední chyby do vzorce pro celkovou střední chybu m

$$m = \sqrt{m_{\omega}^2 + m_s^2 + m_t^2},$$

dostaneme výraz

$$m = \sqrt{m_{\omega}^2 + \frac{\rho^2}{2s_1^2s_2^2} [e_s^2(s_1^2 + s_2^2) + e_t^2(s_1^2 + s_2^2 - 2s_1s_2 \cos \omega')]} \quad (6.)$$

⁸ Odvození vztahu (4.) a (5.) je uvedeno v [54.].

Pro $s_1 = s_2 = s$ budu mít vzorec (6.) tvar

$$m = m_\omega + \frac{\rho}{s} \sqrt{e_s^2 + (1 - \cos \omega') * e_t^2}.$$

Tento výraz je možné dále zjednodušit pokud $e_t = e_s = e$

$$m = m_\omega + \frac{\rho * e}{s} \sqrt{2 - \cos \omega}.$$

Pro celkovou střední chybu směru platí vzorec [1.]

$$m^2 = m_\omega^2 + \frac{1}{4s^2} (e_s^2 + e_t^2).$$

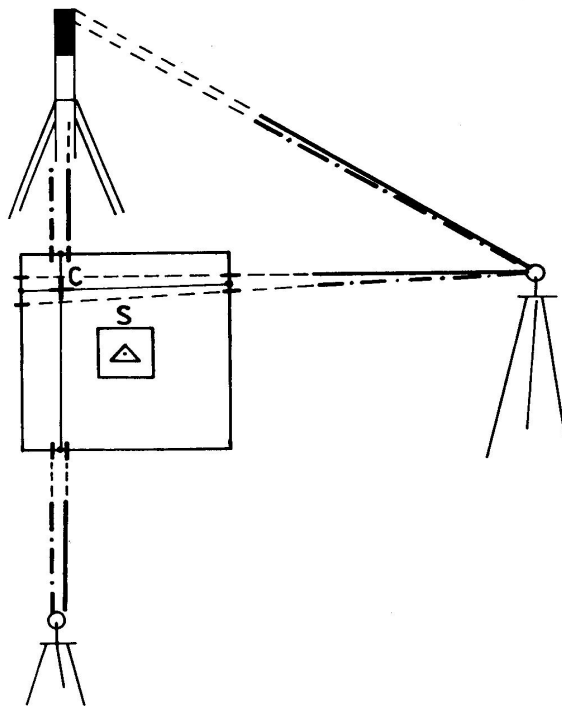
5.2.1.5 Centrace měřených vodorovných směrů

Jedná se o situaci, kdy osnova vodorovných směrů byla, z důvodu nemožnosti centrických postavení, měřena na excentrickém stanovisku a i signály cílových bodů byly excentrické⁹. Každá záměra z excentricky zaměřené osnovy vodorovných směrů musí být opravena o **centrační změny – centrační změnu z excentricity stanoviska δ** a **centrační změnu z excentricity cíle δ_c** . K výpočtu centračních změn je třeba znát **centrační prvky: délku excentricity e** a **centrační úhel ψ** . Délka excentricity je délka spojnice excentr a centr. Centrační úhel je úhel, který svírá směr na počátek osnovy směrů se směrem excentricity. Směr excentricity se měří až na konci skupiny, a to proto, aby se nemuselo přestřovat během měření osnovy (délka excentricity je ve srovnání s délkami záměr nesrovnatelně kratší). Centrační prvky se určují buď přímo, nebo nepřímo.

Přímé určení centračních prvků

Při určení centračních prvků cíle se záměrná cílová značka promítne do úrovně stabilizační značky ze dvou směrů přibližně na sebe kolmých. Z každého směru se promítá v obou polohách dalekohledu, protože postavení teodolitu nebývá příliš vzdáleno od cíle (jedná se tedy o strmou záměru). Vzdálenost promítnutého záměrného bodu od středu je délka excentricity, tedy první centrační prvek. Druhým centračním prvkem je směr excentricity, který se zaměří od počátečního směru spolu se směry osnovy.

⁹ Pokud při měření vodorovných úhlů střed limbu leží ve svislici procházející středem měřické značky, říkáme, že stanovisko je centrické. Stejně i signály cílových bodů mají být centrické. Pokud tomu tak není, mluvíme o excentrickém stanovisku, popř. cíli.



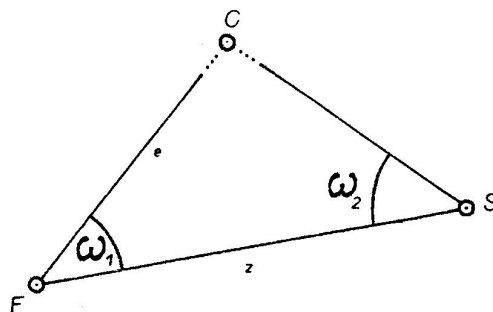
obr. 5.17 – Přímé určení centračních prvků [52.]

Při určení centračních prvků stanoviska se postupuje obdobně.

Nepřímé určení centračních prvků

Není-li možné centrum promítnout do přístupného místa v úrovni terénu, musí se centrační prvky určit nepřímě.

- a) **Je-li excentrické stanovisko v úrovni terénu**, zvolí se za jeden konec základny trojúhelníku, ze kterého se excentricita určí.

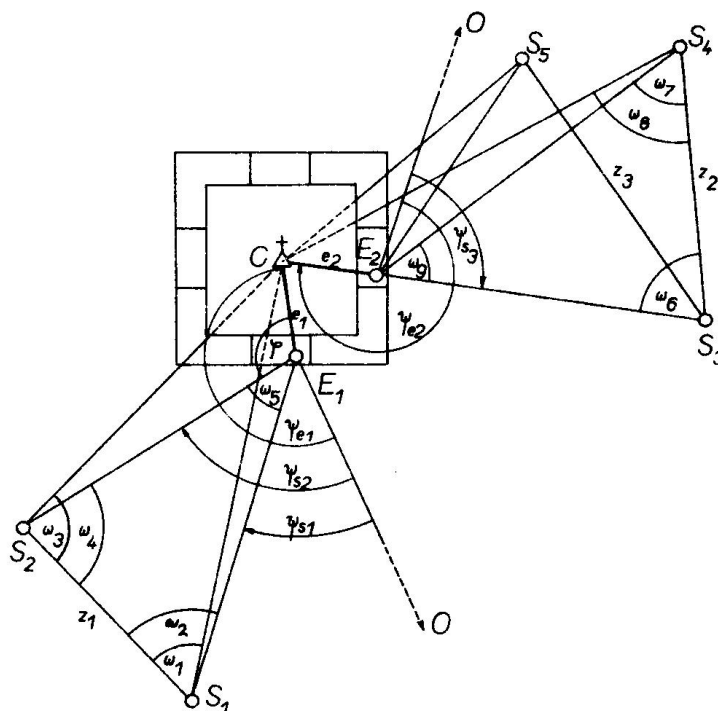


obr. 5.18 – Nepřímé určení centračních prvků – stanovisko v úrovni terénu

Na obrázku (obr. 5.18) značí E excentrické stanovisko, C centrum a z základnu. Délka excentricity e se určí ze vztahu $e = \sin \omega_2 * \frac{z}{\sin(\omega_1 + \omega_2)}$. Pro kontrolu se volí ještě jedna základna, nejjednodušeji opět s jedním koncem v excentrickém stanovisku.

Směr excentricity se změří v osnově směrů.

- b) **Pokud excentrické stanovisko nelze volit v úrovni terénu**, je možné délku excentricity určit jako nepřístupnou vzdálenost¹⁰ ze základny z_1 mezi stanovisky S_1 a S_2 , a z úhlů ω_1 až ω_4 .



obr. 5.19 – Nepřímé určení centračních prvků – stanovisko nelze volit v úrovni terénu [14.]

Směr excentricity ψ_{e1} dostaneme zařazením směrů měřených na excentrickém stanovisku E_1 od počátku O na stanoviska S_1 a S_2 do osnovy směrů, a pomocí vypočteného úhlu φ , ze vztahu

$$\psi_{e1} = \psi_{s2} + \varphi.$$

Pokud by bylo možné umístit jeden konec základny na spojnici excentr – centr, je výpočet podstatně jednodušší. Zpravidla se nejprve volí konec základny a z něj se vytyčuje excentrické stanovisko dalekohledem teodolitu, zaměřeným na centrum C. Ze základny z_2

¹⁰ Určení nepřístupné vzdálenosti je uvedeno v kapitole Souřadnicové výpočty v rovině.

a z úhlů ω_6 až ω_8 se vypočte délka excentricity e_2 jako rozdíl stran CS_3, E_2S_3 . Pro kontrolu se určení e_2 provede ještě z trojúhelníků $CS_2S_5, E_2S_3S_5$.

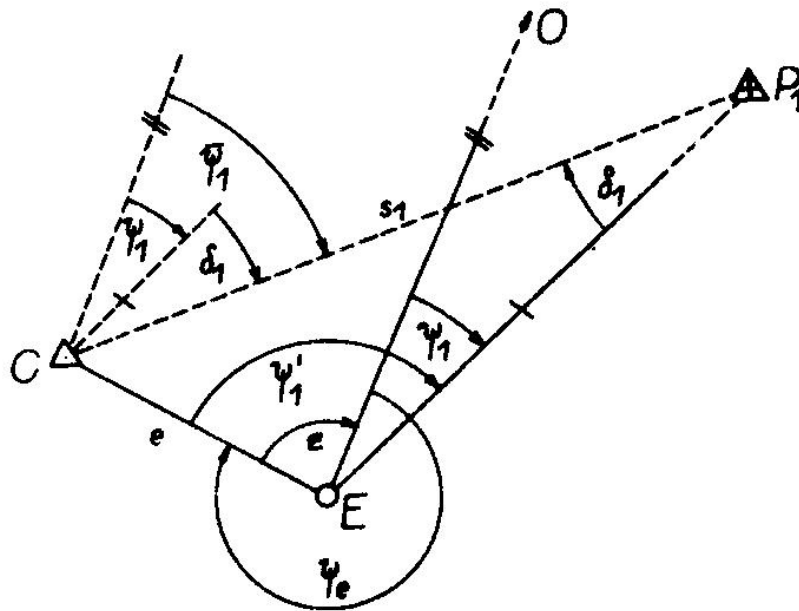
Pro druhý centrační prvek platí

$$\psi_{e_2} = \psi_{s_3} + 200^g .$$

Výpočet centračních změn

Úloha centrace měřených vodorovných směrů se skládá z dílčích úloh dostředění stanoviska a cíle. Dalším často používaným způsobem je způsob uvedený v [1.] provádějící centraci osnovy vodorovných směrů výpočtem souřadnic excentrických stanovisek a cílů.

Centrace stanoviska



obr. 5.20 – Centrace stanoviska [14.]

Na excentrickém stanovisku E byla zaměřena osnova i směrů. Pro jednoduchost uvažujeme pouze směr ψ_1 , měřený od počátku O na bod P_1 . Centračními prvky jsou délka excentricity e a směr ψ_e . Strana s_1 se vypočte ze souřadnic bodů C, P_1 .

Úkolem je vypočítat centrovaný směr $\overline{\psi_1}$, na centru C mezi rovnoběžkou s EO a spojnicí CP_1 . Z obrázku je zřejmé, že $\overline{\psi_1} = \psi_1 + \delta_1$.

Aby se centrační změny vypočetly se správným znaménkem, zavádí se na excentru E od směru excentricity ke směru na počátek v geodetickém smyslu úhel ε

$$\varepsilon = 400^g - \psi_e .$$

Připočteme-li úhel ε ke všem hodnotám měřených směrů, tj. orientujeme-li měřenou osnovu na směr EC, dostaneme orientované směry $\psi'_i = \psi_i + \varepsilon$, které použijeme pro výpočet centračních změn buď přesným vzorcem

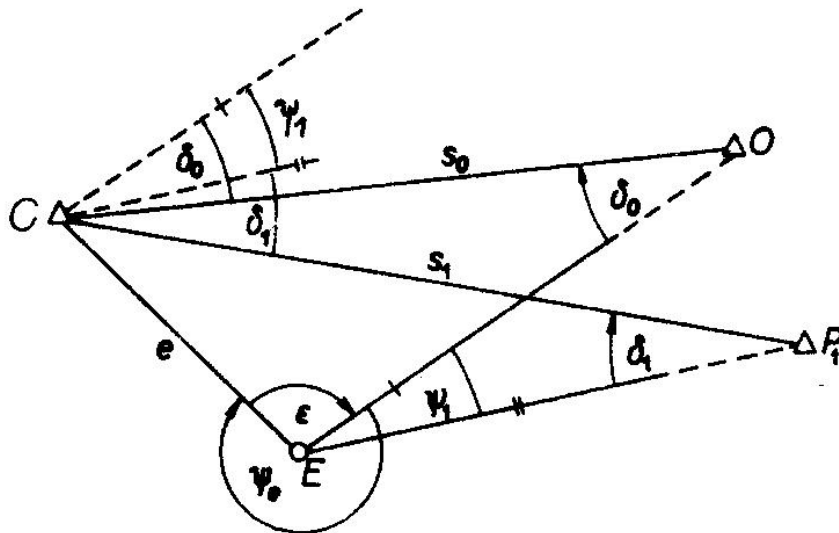
$$\sin \delta_i = \frac{e}{s_i} \sin \psi'_i$$

nebo přibližným vzorcem

$$\delta_i = \rho \frac{e}{s_i} \sin \psi'_i .$$

Centrovaný směr $\overline{\psi}_1$ z centra C již nemíří na počáteční bod O, který jsme zvolili na excentrickém stanovisku E. Pokud byla volba počátečního směru libovolná, nemusí se k této okolnosti přihlížet. Pokud však je počáteční směr směrem osnovy, musí se uvážit i jeho centrační změna.

V případě, že musíme uvažovat i centrační změnu počátečního směru osnovy, je třeba znát vzdálenost počátečního bodu s_0 .



obr. 5.21 – Centrace počátečního směru [14.]

Z obrázku vyplývá, že

$$\delta_1'' = \rho \frac{e}{s_1} \sin(\psi_1' - \delta_1').$$

Obecný tvar rovnic pro výpočet centrační změny δ_i je následující:

$$\delta_i' = \rho \frac{e_i}{s_i} \sin \psi_i'$$

$$\delta_i'' = \rho \frac{e_i}{s_i} \sin(\psi_i' - \delta_i').$$

Pro centrovaný směr $\bar{\psi}$ platí

$$\bar{\psi} = \psi + \delta_1$$

a v obecné podobě

$$\bar{\psi}_i = \psi_i \pm \delta_i.$$

Centrace stanoviska i cíle

Na excentrickém stanovisku E_s se změří osnova směrů, z nichž uvažujeme jen směr ψ_1 a směry excentricit ψ_e a ψ_{es} .



obr. 5.23 – Centrace stanoviska i cíle [14.]

Nejprve vypočteme centrační změnu δ_s z excentrického stanoviska:

$$\varepsilon_s = 400^g - \psi_{es},$$

$$\psi'_s = \psi_1 + \varepsilon_s,$$

$$\delta_s = \rho \frac{e_s}{s_1} \sin \psi'_s.$$

Vypočteného centrovaného směru $\overline{\psi}_1 = \psi_1 + \delta_s$ se použije pro výpočet centrační změny δ_c z excentrického cíle tímto postupem:

$$\varepsilon_c = 200^g - \psi_{ec},$$

$$\text{kde } \psi_{ec} = \psi_{es} - 200^g + \omega,$$

$$\psi'_c = \overline{\psi}_1 + \varepsilon_c,$$

$$\delta'_c = \rho \frac{e_c}{s_1} \sin \psi'_c \text{ a } \delta''_c = \rho \frac{e_c}{s_1} \sin(\psi'_c - \delta'_c).$$

Výsledný centrovaný směr

$$\overline{\psi} = \psi + \delta_c.$$

5.2.2 Magnetické azimuty

K orientaci vodorovných směrů, resp. k měření úhlů tam, kde není možné připojení na body bodového pole, lze využít magnetického pole Země.

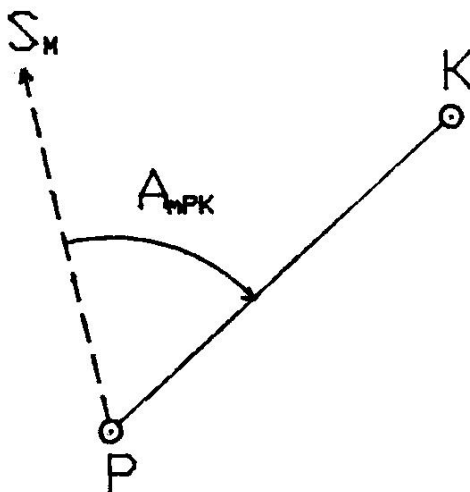
Země vytváří magnetické pole, ve kterém magnetické siločáry vycházejí z jižního magnetického pólu a směřují do severního magnetického pólu. Na obou pólech jsou magnetické siločáry svislé a na rovníku mají směr vodorovný.

V důsledku působení magnetického pole Země ukazuje jeden konec volně zavěšené magnetky vždy k severnímu magnetickému pólu. Směr severního magnetického poledníku je základním směrem pro měření magnetických azimutů (viz. Základní pojmy).

Základní pojmy

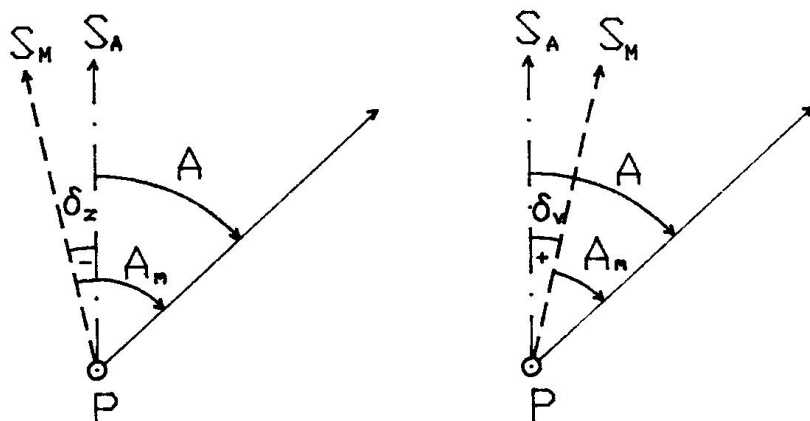
Magnetický meridián pozorovacího místa je průsečnice svíslé roviny, proložené osou ustálené deklinační magnetky se zemským povrchem. Osou magnetky je spojnice obou koncových hrotů, která prochází středem magnetky.

Magnetický azimut je úhel měřený v místě pozorování od severní větve magnetického meridiánu na určovaný bod ve směru číslování na hodinách. Je vždy kladný a počítá se od 0° do 360° (příp. od 0^g do 400^g). Na obrázku (obr. 5.24) je šipka S_M směr magnetického meridiánu a úhel A_{PK} je magnetický azimut strany PK v bodě P.



obr. 5.24 – Magnetický azimut [45.]

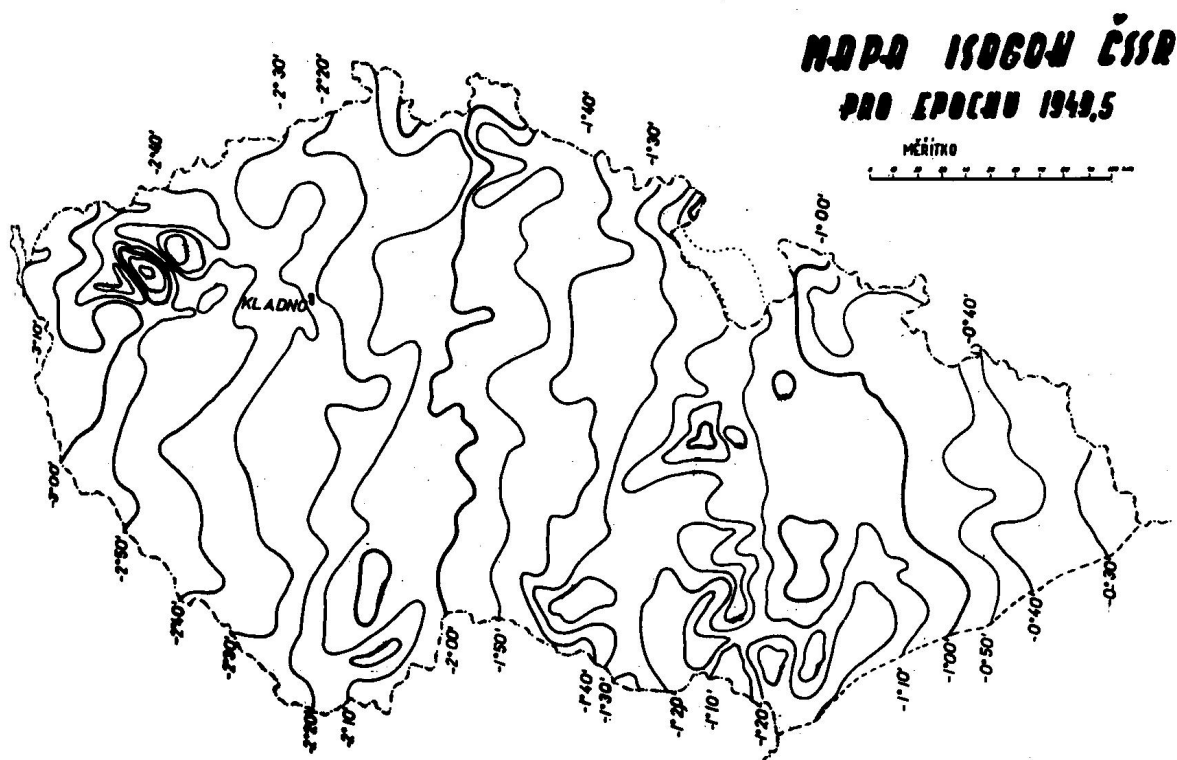
Magnetická deklinace δ je úhel, který v místě pozorování svírá směr magnetického meridiánu S_M s astronomickým meridiánem S_A (viz obr. 5.25). Jestliže se severní hrot magnetky odklání k západu od astronomického meridiánu, je deklinace západní – záporná, odklání-li se k východu, je deklinace východní – kladná.



obr. 5.25 – Magnetická deklinace [45.]

Astronomický azimut A tedy získáme přičtením magnetické deklinace k naměřenému magnetickému azimutu. Protože poloha magnetického meridiánu se mění a astronomický meridián má polohu stálou, mění se velikost magnetické deklinace δ . Změna velikosti magnetické deklinace závisí na místě a čase.

Změna deklinace s místem je patrná z magnetických map (obr. 5.26), na kterých čáry spojující místa se stejnou hodnotou magnetické deklinace se nazývají **izogony**. Izogony probíhají přibližně ve směru zemských poledníků. Největší změna deklinace se změnou pozorovacího místa nastává ve tedy směru východ – západ.



obr. 5.26 – Mapa izogon [53.]

Pokud změny velikosti magnetické deklinace s časem probíhají v pravidelných časových obdobích, nazývají se **variace**. Podle délky periody rozlišujeme variace denní, roční a sekulární.

Pro přesné práce je tedy třeba znát místo a dobu (epochu), kde a kdy se měření konalo.

Kromě poměrně pravidelných změn magnetické deklinace mohou nastat také nepravidelné změny, neboli **poruchy**. Příčinou magnetických poruch mohou být např. magnetické bouře provázející polární záři nebo související s obdobím výskytu zvýšeného počtu slunečních skvrn, příčinou může také být vliv feromagnetických kovů, vliv elektrického proudu, vliv nepravidelně rozložených železných a ocelových součástí vlastního přístroje atd.

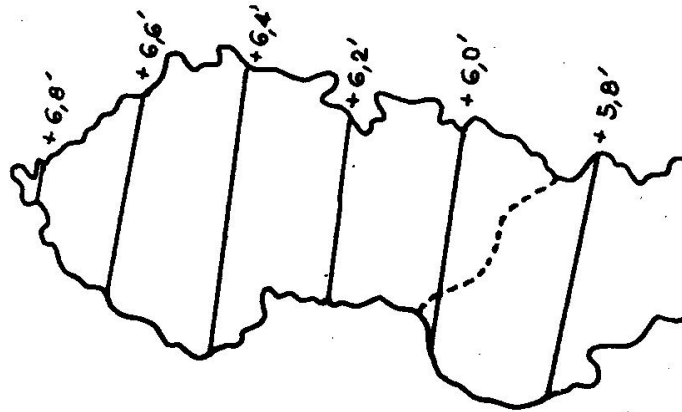
Určování hodnoty deklinace

Hodnotu deklinace pro méně přesné práce je možné určit interpolací z magnetických map, které na základě magnetických měření sestavuje Geofyzikální ústav. Mapa izogon podává obraz skutečného zemského magnetického pole pro určitou epochu.

Magnetická deklinace δ_t pro libovolné místo v čase t se určí ze vztahu

$$\delta_t = \delta_o + v \cdot (t - t_o),$$

kde δ_o je magnetická deklinace pozorovacího místa k epoše t_o a zjistí se lineární interpolací z mapy izogon,
 v je roční změna magnetické deklinace a zjistí se z mapy izopor (obr. 5.27),
 t je časový údaj.

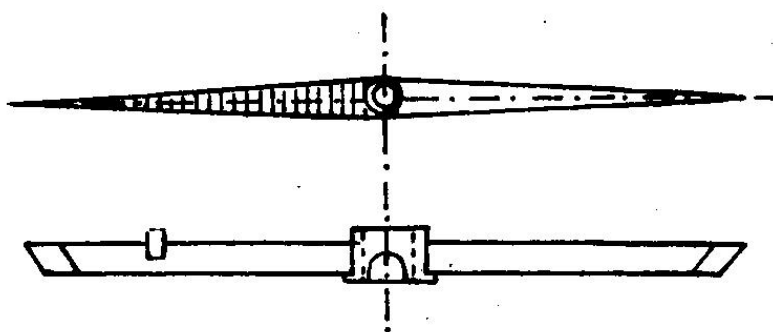


obr. 5.27 – Mapa izopor [53.]

Magnetické přístroje

Součástí každého magnetického přístroje je **deklinální magnetka**, která je umístěna v pouzdru z nemagnetického materiálu, opatřeném děleným kruhem, nazývaným též hodinovým.

Deklinální magnetka je tenká, lehká, ocelová, silně zmagnetizovaná tyčinka různého tvaru (obr. 5.28). Spojnice obou koncových hrotů magnetky se nazývá osa magnetky. Uprostřed na ose magnetky (v těžišti) je ložisko z tvrdého materiálu. Prostřednictvím tohoto ložiska spočívá magnetka na ocelovém hrotu umístěném ve středu děleného kruhu a může se volně otáčet ve vodorovné rovině. Jeden konec magnetky, zvaný severní, směřuje vždy k severnímu geomagnetickému pólu a bývá zpravidla modře zakalen. Druhý konec, zvaný jižní, směřující k jižnímu magnetickému pólu se pro zřetelné rozlišení nezbarvuje.



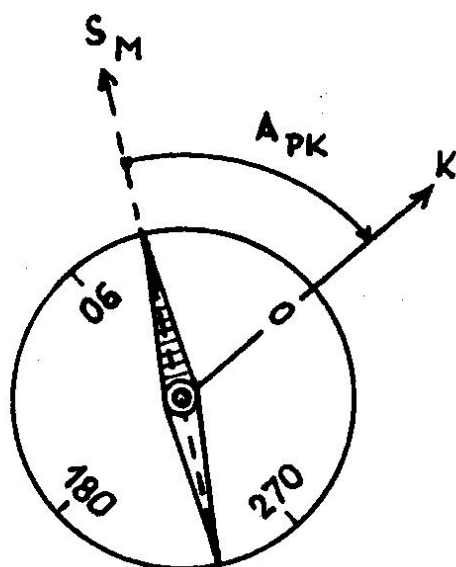
obr. 5.28 – Deklinační magnetka [53.]

Magnetka je dále vybavena aretačním zařízením, kterým se dá vyjmout z hrotu a tak chránit před poškozením či přílišným opotřebením. Obvykle se používá pákové aretace, ovládané obvodovým šroubem. U citlivějších magnetek se k aretaci používá středový šroub, kterým se docílí pozvolného spouštění, takže magnetka dosedne jemně bez nárazu na hrot.

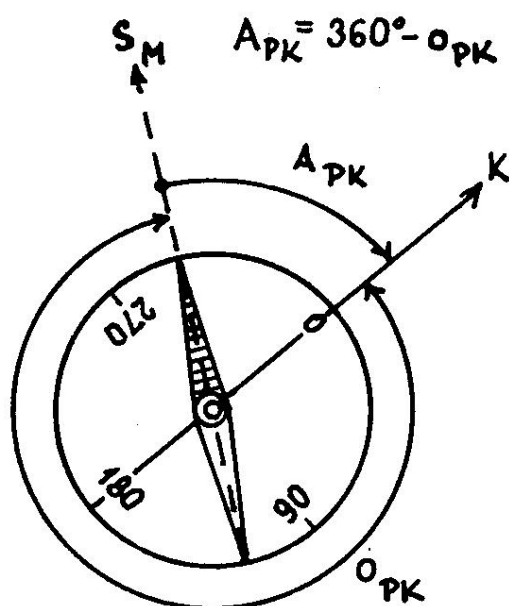
Citlivost magnetky závisí na její délce, váze, intenzitě zmagnetizování a na tvaru a tvrdosti ložiska i hrotu, na němž magnetka spočívá. Magnetka je tím citlivější, čím je delší, lehčí, silněji zmagnetizována a čím přesněji se po vychýlení opět ustálí v původní poloze.

Stupnice děleného kruhu je dělena na 400^{s} . Hodnota nejmenšího dílku stupnice závisí na poloměru děleného kruhu. Při odečítání se poloha hrotu magnetky odhaduje pomocí lupy. Dělené kruhy se u novějších magnetických přístrojů číslovají proti směru číslování na hodinách. Jako odečítací index slouží osa magnetky.

Je-li záměrná rovina nastavena do směru magnetického meridiánu, udává severní hrot magnetky odečtení 0° . Otáčí-li se nyní rovina záměrná i s děleným kruhem ve směru pohybu hodinových ručiček, narůstají údaje indexu (magnetky) stejně jako vzrůstá magnetický azimut (obr. 5.29). Je-li tedy úhломěrná stupnice číslována proti směru pohybu hodinových ručiček, ukazuje magnetka jako odečítací index přímo hodnotu magnetického azimutu. Pokud číslování postupuje v kladném smyslu, je třeba určovaný azimut vypočítat jako doplněk odečtené hodnoty do 360° (obr. 5.30).



obr. 5.29 – Číslování stupnice v záporném smyslu [53.]



obr. 5.30 – Číslování stupnice v kladném smyslu [53.]

Magnetické přístroje se dělí do 3 skupin:

- kompas,
- busoly,
- busolní teodolity.

Kompasy

Kompasy jsou magnetky, umístěné v kruhovém pouzdře z neferomagnetického kovu, opatřené kruhovou libelou a případnými dalšími doplňky, které však nejsou vybaveny záměrnými zařízeními.

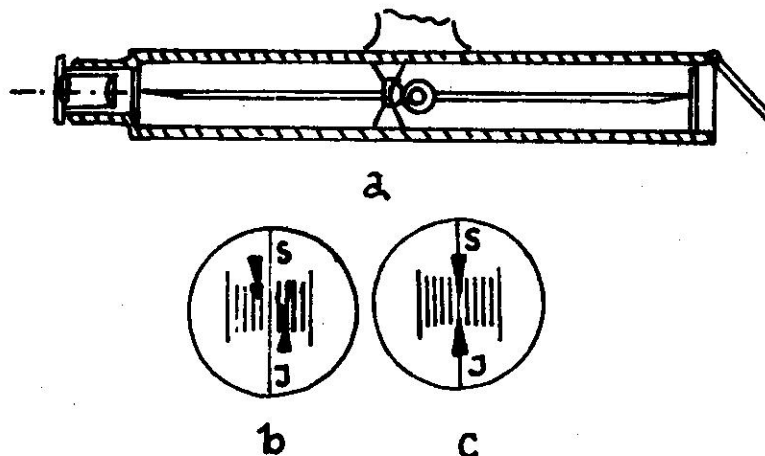
Busoly

Busoly jsou kompas doplněné o záměrné zařízení.

Busolní teodolity

Jedná se o normální teodolity doplněné sázecím plnokruhovým kompasem nebo tzv. *trubicovým usměrňovačem*.

Trubicový usměrňovač (obr. 5.31a) je válcové pouzdro, v němž je na hrotu zavěšena magnetka, opatřená aretačním zařízením. Obrazy obou konců magnetky se převádějí optickou cestou do zorného pole usměrňovače (obr. 5.31b). Magnetka je urovnána, pokud se otáčením alhidády dosáhne koincidence obou obrazů (obr. 5.31c). Tím se současně záměrná přímka uvede do směru magnetického meridiánu.



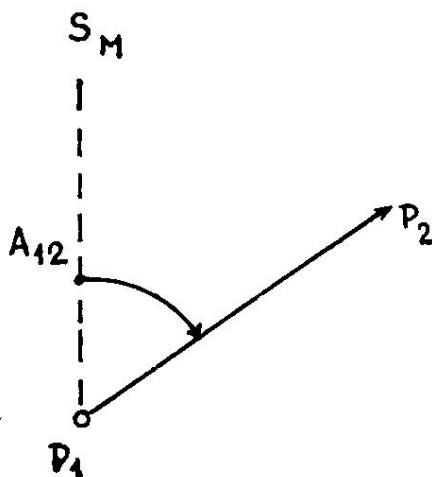
obr. 5.31 – Trubicový usměrňovač [53.]

Měření magnetických azimutů

Magnetické azimuty se měří dvěma způsoby:

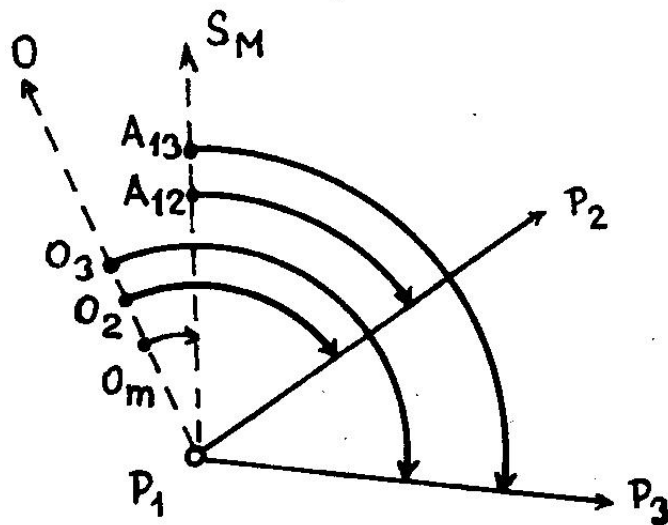
- 1) přímo,
 - 2) nepřímo.
-
- 1) Při přímém způsobu měření magnetických azimutů se azimuty čtou přímo na děleném kruhu busoly. Příklad se dostředí a urovná na bodě P_1 . Magnetka, dosud aretovaná, se

uvolní vypínacím zařízením a dalekohledem se zacílí na bod P_2 . Po ustálení magnetky se odečítá poloha jejích hrotů na děleném kruhu. Před odečtením je vhodné jemně přejet nehtem po vroubkované hlavě aretačního šroubu, aby se odstranilo případné tření v ložisku a magnetka se ustálila ve správné poloze. Při odečítání je žádoucí, aby měřič stál ve směru osy magnetky, aby se zabránilo vzniku paralaxy. Výsledný azimut A_{12} tvoří odečtení celých stupňů severního hrotu magnetky, doplněné aritmetickým průměrem z odečtených minut pro oba hroty.



obr. 5.32 – Přímé určení magnetického azimutu [53.]

- 2) Při nepřímém způsobu se azimuty čtou na vodorovném kruhu teodolitu. Podstatou je určení příslušného odečtení o_m (viz. obr. 5.33), odpovídajícího té poloze alhidády, při které se záměrná rovina ztotožňuje se směrem magnetického meridiánu S_M . Dále se již jedná o známé zaměření osnovy směrů, která se orientuje k základnímu směru S_M magnetického meridiánu. Záměrná rovina se nastaví do směru magnetického meridiánu takto: Aretovaná magnetka se uvolní a alhidáda se otáčí tak dlouho, až severní hrot magnetky ukazuje přibližně k nule děleného kruhu. Hrubá ustanovka se upne a jemnou se přesně nastaví na děleném kruhu odečtení 0° . V této poloze alhidády se odečte na limbu příslušné čtení o_m . Potom se magnetka aretuje, zaměří se směry na dané body P_2 a P_3 a odečtou se na limbu hodnoty o_2, o_3 . Výsledné azimuty se odvodí redukováním směrů k základnímu směru o_m . Tedy $A_{12} = o_2 - o_m$ a $A_{13} = o_3 - o_m$. Přesnost magnetického azimutu se dá zvýšit opakováním nastavení záměrné roviny do směru meridiánu S_M a zavedením aritmetického průměru.



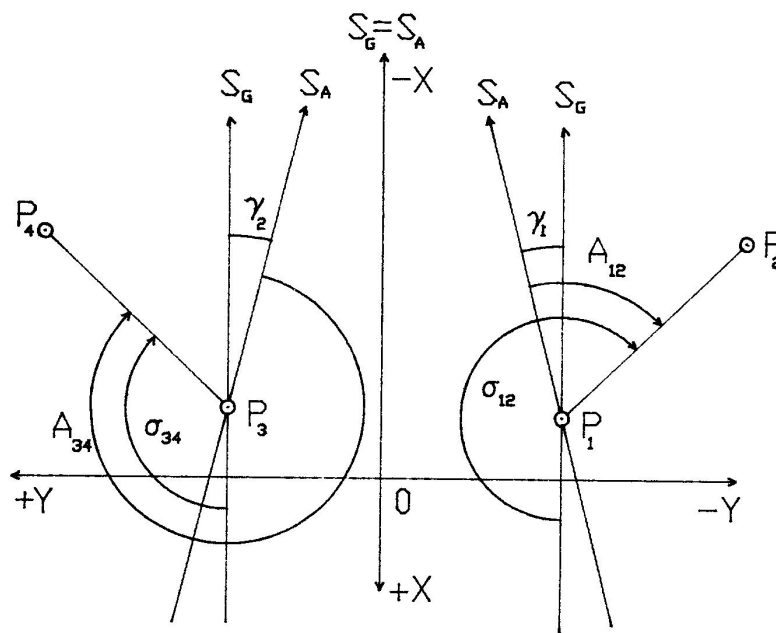
obr. 5.33 – Nepřímé určení magnetického azimutu [53.]

5.2.3 Astronomické azimuty [53.]

Astronomický azimut je úhel, který svírá svislá záměrná rovina s rovinou astronomického meridiánu v místě pozorování. Měří se od severní větve poledníku ve směru číslování na hodinách od 0° do 360° . Pro určení astronomického azimutu je tedy třeba předem znát směr místního poledníku jako základního směru.

Určení směru místního poledníku výpočtem meridiánové konvergence

[45.] Tento způsob předpokládá znalost pravoúhlých souřadnic koncových bodů a tedy i směrníku σ strany, jejíž astronomický azimut má být určen. U souřadnicových systémů pravoúhlých souřadnic, které byly nebo jsou na území naší republiky používány, zaujímá osa X směr místního poledníku procházejícího počátkem souřadnicového systému s výjimkou souřadnicového systému s počátkem v trigonometrickém bodu Gusterberg. V tomto systému při orientaci poledníku vznikla chyba $\Delta = 4'22,3''$, o kterou je kladná větev osy X stočena na západ a je tedy nutno s ní při určování směru místního poledníku počítat. Protože poledníky se na severní polokouli sbíhají k severnímu pólu, je zřejmé, že rovnoběžka s osou X a místní poledník procházející tímž bodem spolu svírají úhel γ , který se nazývá **meridiánová konvergence** (obr. 5.34).



obr. 5.34 – Určení směru místního poledníku pomocí meridiánové konvergence [45.]

Velikost úhlu γ závisí jednak na vzdálenosti od osy X, jednak na zeměpisné šířce:

$$\gamma = \Delta\lambda * \sin \varphi,$$

kde $\Delta\lambda$ je rozdíl zeměpisných délek místního poledníku a poledníku procházejícího počátkem souřadnicového systému,
 φ je zeměpisná šířka místa pozorování.

Úhel $\Delta\lambda$ je možno nahradit výrazem

$$\Delta\lambda = \frac{Y}{R * \cos \varphi},$$

kde Y je ypsilonová souřadnice stanoviska teodolitu,
 R je zemský poloměr.

Potom je možno vzorec pro meridiánovou konvergenci psát ve tvaru

$$\gamma = \rho \frac{Y}{R} \operatorname{tg} \varphi.$$

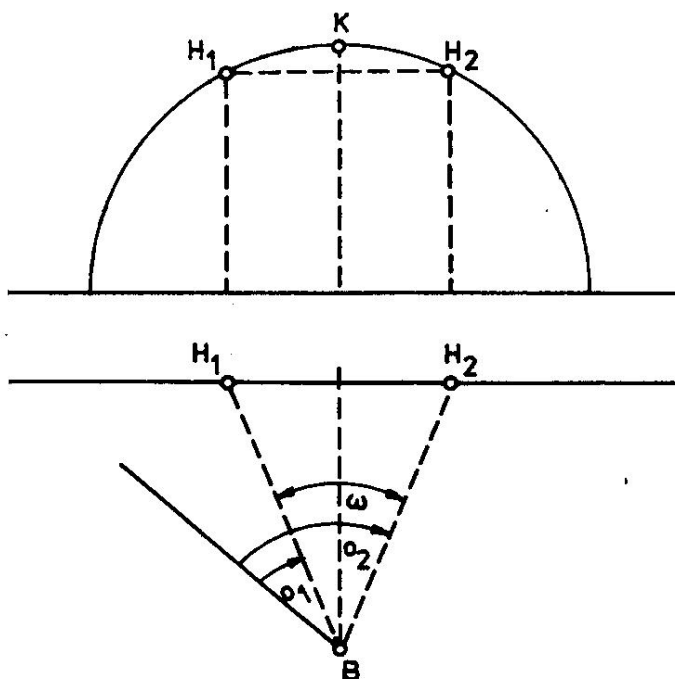
Z obrázku (obr. 5.34) je zřejmé, že astronomický azimut pro body ležící na východ od osy X bude $A_{12} = \sigma_{12} + \gamma_1 \pm 180^\circ$ a pro body ležící na západ od osy X $A_{34} = \sigma_{34} - \gamma_2 \pm 180^\circ$.

V souřadnicovém systému s počátkem v trigonometrickém bodě Gusterberg by se u bodů ležících na východ od osy X místo úhlu γ připočítávala hodnota $\beta_1 = \gamma + \Delta$ a u bodů ležících na západ od osy X by se místo úhlu γ odečítala hodnota $\beta_2 = \gamma - \Delta$.

Výpočtem astronomického azimutu je dán i směr místního poledníku.

Určení místního poledníku metodou stejných výšek hvězdy

[45.] V důsledku otáčení Země kolem své osy od západu k východu se nebeská báň zdánlivě otáčí od východu k západu. Každá hvězda tedy zdánlivě vychází (na východě), kulminuje v rovině místního poledníku a zapadá (na západě). Hvězdy s menší vzdáleností od světového pólu než činí zeměpisná šířka φ místa pozorování nikdy nezapadají, nýbrž pohybují se po uzavřených křivkách. Takové hvězdy se nazývají **cirkumpolární**. Rovina místního poledníku, ve které jednotlivé hvězdy kulminují, je rovinou symetrie jejich kruhových drah, tzn., ze místní poledník púlí úhel, který svírají záměry na hvězdu nalézající se ve stejných výškách nad horizontem před kulminací i po ní (obr. 5.35).



obr. 5.35 – Určení místního poledníku metodou stejných výšek hvězdy [29.]

Zacílíme-li tedy přesně dostředěným a urovnaným vteřinovým teodolitem střed nitkového kříže na některou hvězdu, která je blízko kulminačního bodu, odečteme na vodorovném kruhu hodnotu úhlu o_1 . Potom při utažené vertikální ustanovce sledujeme zdánlivý pohyb hvězdy a do okamžiku, kdy se hvězda po průchodu kulminačním bodem znovu ztotožní se středem nitkového kříže a odečteme na vodorovném kruhu údaj o_2 . Rozdílem obou čtení určíme úhel $\omega = o_2 - o_1$ a

osa tohoto úhlu určuje směr místního poledníku. Pro zpřesnění výsledku se poloha místního poledníku určuje vícekrát z pozorování několika hvězd.

Pozn. Metody určování směru místního poledníku jsou podrobněji probírány v předmětu Geodetická astronomie. K určení směru místního poledníku lze také použít gyroteodolitu¹¹.

5.2.4 Měření svislých úhlů

Svislý úhel se na rozdíl od vodorovného úhlu získá zaměřením pouze jednoho směru (na cílovou značku příslušného signálu). Druhým směrem je směr základní – vodorovný pro výškový úhel, svislý pro zenitový úhel. Velikost svislého úhlu se odečítá na vertikálním kruhu. Zařízením, které realizuje základní směr, je indexová libela nebo kompenzátor.

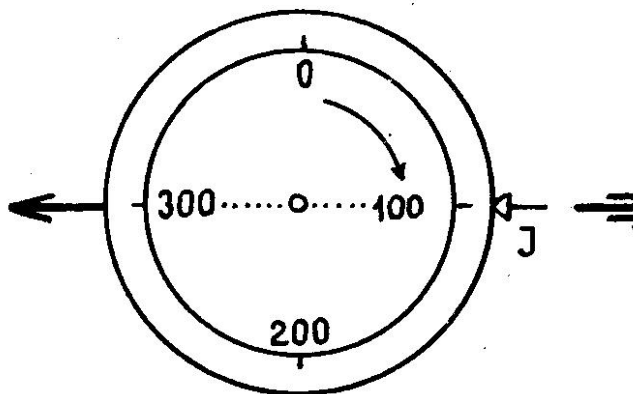
Vertikální kruh

Při měření svislých úhlů je třeba si podrobněji všimnout úpravy vertikálního kruhu. Na rozdíl od měření vodorovných úhlů, při kterém limbus zůstává nehybný a otáčí se alhidáda s odečítacími indexy, při měření svislých úhlů se při sklápění dalekohledu otáčí vertikální kruh současně s vodorovnou točnou osou dalekohledu, se kterou je pevně spojen, kdežto odečítací indexy, spojené s dalekohledovou vidlicí, zůstávají pevné.

Dělení kruhu může být šedesátinné nebo setinné. Pro určení výsledné hodnoty svislého úhlu je důležité znát, v jakém smyslu je vertikální kruh číslován a na kterém místě stupnice, vzhledem k odečítacím indexům, se nalézá nula.

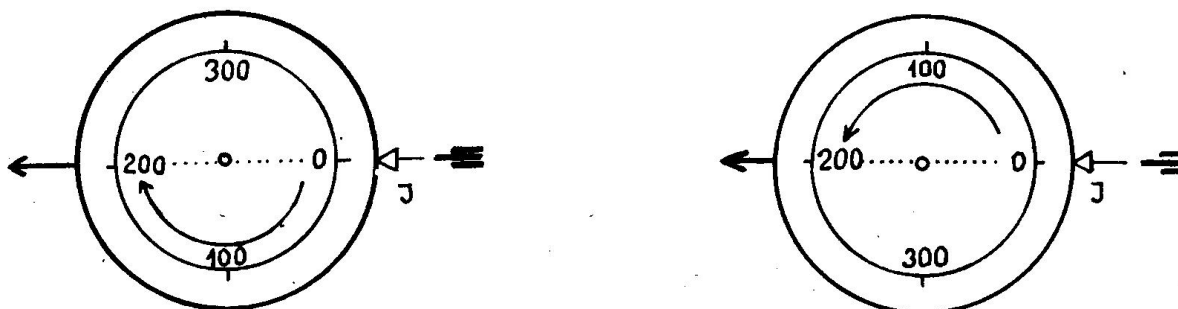
Vertikální kruhy mohou být číslovány buď ve směru číslování na hodinách nebo proti směru číslování na hodinách. Pro měření zenitových úhlů je výhodnější pokud je kruh číslován ve směru hodin a vodorovné záměře odpovídá $z = 100^{\circ}$.

¹¹ Gyroteodolit vznikne spojením teodolitu a elektricky hnaného setrvačnicku (gyrokompasu). Gyrokompas je gyroskop, jehož osu rotace přinutíme, aby se pohybovala ve vodorovné rovině, a to např. tím, že setrvačnick zavěsíme vysoko nad svým těžištěm. Pokud setrvačnicku udělíme dostatečně vysoké otáčky ($20\,000$ až $30\,000\text{min}^{-1}$), bude reagovat na otáčení Země tak, že svou osou rotace bude oscilovat okolo roviny meridiánu. Výkyvy jsou symetrické, proto určením jejich středu dostaneme astronomický sever (avšak pouze pro zeměpisné šířky $< 75^{\circ}$).



obr. 5.36 – Číslování kruhu pro měření zenitových úhlů [53.]

Pro měření výškových úhlů odpovídá vodorovné záměře $\varepsilon = 0^\circ$ a výhodnější číslování kruhu je protisměrné.



obr. 5.37 – Číslování kruhu pro měření svislých úhlů [53.]

5.2.4.1 Metody měření svislých úhlů

- 1) v jedné poloze dalekohledu
- 2) v obou polohách dalekohledu

ad 1) v jedné poloze dalekohledu

Před měřením provedeme pečlivou horizontaci a centraci teodolitu. Zjistíme indexovou chybu i (viz dále). Pokud je indexová chyba i větší než požadovaná přesnost, provedeme buď rektifikaci¹²

¹² Při rektifikaci opětně zacílíme na bod, na který jsme cílili při zjišťování indexové chyby. Otáčením ustanovky indexové libely nastavíme odečítací pomůcku na správné čtení. Bublina libely se vychýlí. Výchylku opravíme rektifikačním zařízením libely. Pokud je teodolit vybaven kompenzátořem, nastavíme správné čtení. Vertikální ryska nitkového kříže se nám vychýlí ze směru na cílový bod o hodnotu indexové chyby. Rektifikačními šrouby nitkového kříže posuneme kříž tak, aby vodorovná ryska ležela opět na bodě, na který jsme cílili.

teodolitu, nebo opravíme naměřené úhly o hodnotu i . Úhel měříme v první poloze dalekohledu (vertikální kruh je vlevo). Na cílovou značku cílíme nejprve přibližně a po utažení hrubých ustanovek zacílíme jemnými ustanovkami vodorovným vláknem nitkového kříže přesně. Po zacílení se urovná indexová libela a na vertikálním kruhu se odečte hodnota svislého úhlu o_1 . Pokud je přístroj vybaven kompenzátozem, odpadá urovnání indexové libely.

ad 2) v obou polohách dalekohledu

Po urovnání teodolitu na stanovisku, zacílení v 1. poloze dalekohledu na cíl, urovnání indexové libely a čtení o_1 , zacílíme na cíl ve 2. poloze, urovnáme indexovou libelu a přečteme čtení o_2 . Pokud je přístroj vybaven kompenzátozem, odpadá urovnání indexové libely. Výsledný svislý úhel se určí jako aritmetický průměr úhlu změřeného v 1. a úhlu změřeného v 2. poloze dalekohledu.

Při měření svislých úhlů, zejména při větších sklonech dalekohledu a vzdálenějších cílech, probíhá záměra různě hustými vzduchovými vrstvami, takže výsledky jsou ovlivněny refrakcí. Z tohoto důvodu je nutné, aby záměry v 1. a 2. poloze dalekohledu probíhaly v co nejmenším časovém odstupu. Proto nelze kombinovat měření vodorovných úhlů s určováním úhlů svislých nebo měřit soubor svislých úhlů nejprve v první a poté v druhé poloze dalekohledu.

Způsob zapisování měřených hodnot je patrný ze vzoru zápisníku výškových úhlů, kde kromě popisných údajů o stanovisku jsou ještě uvedeny nákresy cílů s označením, kam bylo cíleno. Kontrola ve sloupci číslo 7 je vlastně dvojnásobek indexové chyby.

na nejmenší míru (měřickou metodou, popř. výpočtem), je třeba znát příčinu jejich vzniku i vliv na výsledek měření.

1) přístrojové chyby

a) kolimační chyba

Pokud není splněna podmínka $Z \perp H$, má přístroj kolimační chybu. Vliv této chyby na svislý úhel udává vztah

$$\Delta_{\varepsilon c} = -\frac{c^2}{2\rho} * \operatorname{tg} \varepsilon \text{ pro výškový úhel} \quad (7.)$$

a

$$\Delta_{zc} = +\frac{c^2}{2\rho} * \operatorname{cot} g z \text{ pro zenitový úhel.} \quad (8.)$$

Odvození vzorců (7.) a (8.) pro výpočet vlivu kolimační chyby na svislý úhel je uvedeno v [45.].

Vliv kolimační chyby na svislý úhel je prakticky nulový, ani při strmých záměrech nedosahuje hodnot, které by podstatně ovlivnily výsledek.

b) úklonná chyba (chyba ze sklonu točné osy dalekohledu)

Pokud není splněna podmínka $H \perp V$, svírá točná osa dalekohledu s vodorovnou přímkou úhel i . Výškový úhel je zatížen chybou

$$\Delta_{\varepsilon i} = -\frac{i^2}{2\rho} * \operatorname{tg} \varepsilon. \quad (9.)$$

Vliv této chyby je zanedbatelný, neboť výrobní tolerance kolmosti točné osy dalekohledu k vertikální ose je do $10''$ (30^c).

Odvození vzorce (9.) je uvedeno v [45.].

c) chyba alhidádové libely

Pokud není splněna podmínka $L \perp V$, má přístroj chybu alhidádové libely. Vliv této chyby na zenitový úhel je vyjádřen vzorcem odvozeným v [45.]:

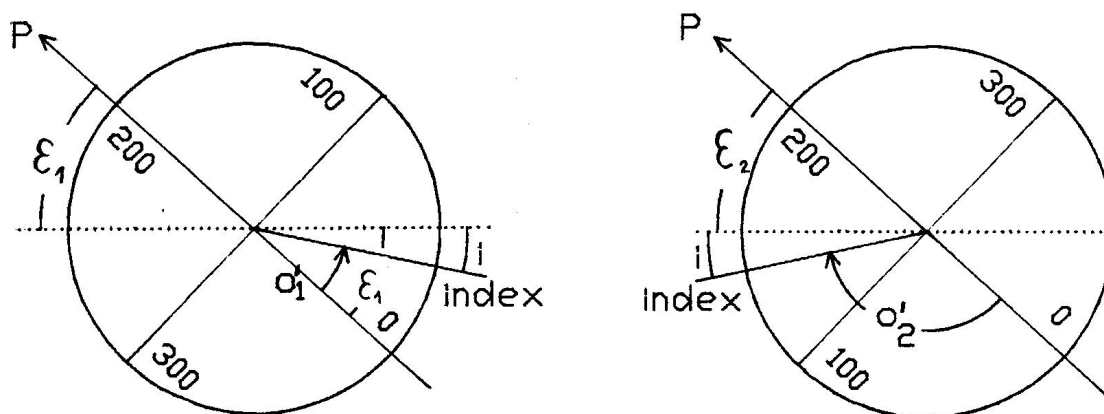
$$\Delta_{zv} = v * \cos \alpha.$$

Chyba je tedy přímo úměrná velikosti odklonu v a závisí na úhlu α , který svírá záměrná rovina s rovinou, ve které nastal odklon osy alhidády od svislice.

d) indexová chyba

Indexová chyba i vznikne pokud odečítací indexy neleží v základním směru. Tj. pokud spojnice odečítacích indexů není rovnoběžná se záměrnou přímkou dalekohledu nebo s osou indexové libely (popř. kompenzátoru). Vztahy pro určení i jsou závislé na typu a směru číslování vertikálního kruhu.

- vertikální kruh je číslován proti směru hodinových ručiček a nula stupnice odpovídá vodorovné záměře



obr. 5.39 – Určení indexové chyby, pokud je vertikální kruh číslován proti směru hodinových ručiček a nula stupnice odpovídá vodorovné záměře [45.]

Pokud má přístroj indexovou chybu, čteme namísto správných hodnot o_1 (ε_1) a o_2 (ε_2) hodnoty zatížené chybou o_1' a o_2' . Platí, že

$$\begin{aligned} o_1 &= o_1' + i \quad \text{a} \quad o_2 = 200^s - (o_2' + i) \\ o_1' + i &= 200^s - o_2' - i \\ 2i &= 200^s - (o_1' + o_2') \\ i &= \frac{200^s - (o_1' + o_2')}{2} \end{aligned}$$

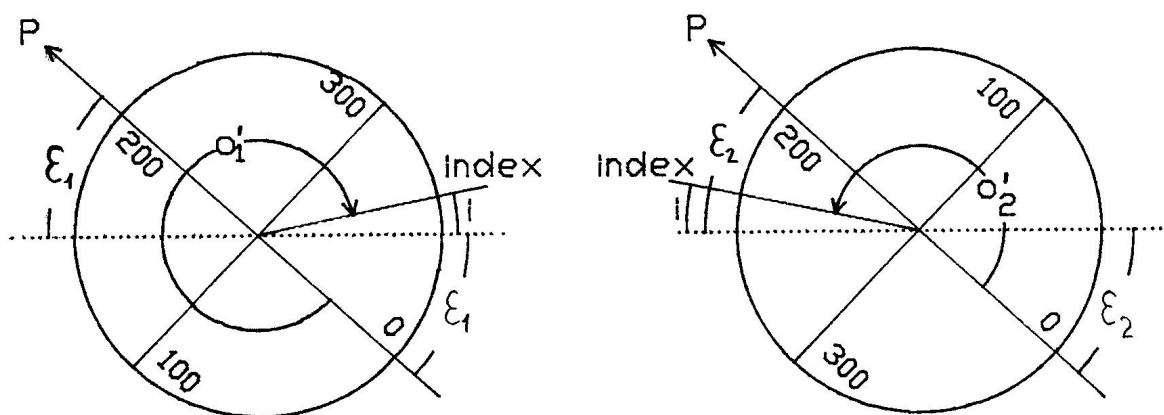
Indexovou chybu tedy zjistíme z měření ve dvou polohách dalekohledu.

Pro ε platí:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} = \frac{o_1' + i + 200^s - o_2' - i}{2} = \frac{o_1' + (200^s - o_2')}{2},$$

tedy indexovou chybu můžeme eliminovat čtením v obou polohách dalekohledu.

- vertikální kruh je číslován po směru číslování na hodinách a nula stupnice odpovídá vodorovné záměře



obr. 5.40 - Určení indexové chyby, pokud je vertikální kruh číslován po směru číslování na hodinách a nula stupnice odpovídá vodorovné záměře [45.]

Pro výpočet indexové chyby platí následující vztahy:

$$\begin{aligned}
 o_1 &= 400^s - (o'_1 + i) \\
 o_2 &= o'_2 + i - 200^s \\
 400^s - (o'_1 + i) &= o'_2 + i - 200^s \\
 2i &= 600^s - o'_1 - o'_2 \\
 i &= \frac{600^s - (o'_1 + o'_2)}{2}
 \end{aligned}$$

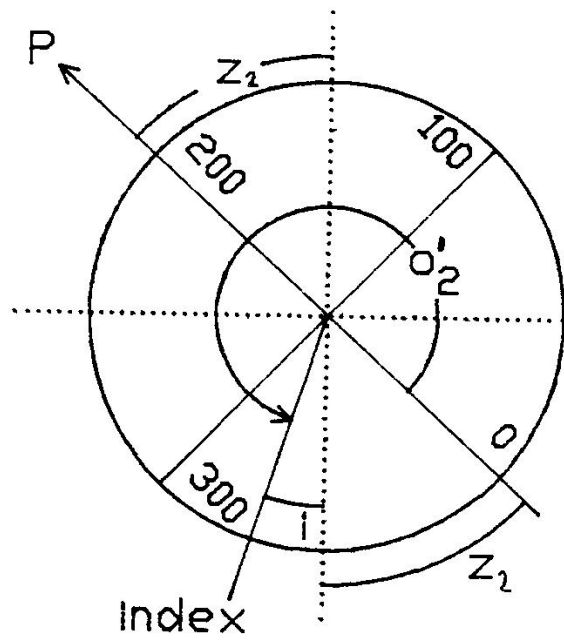
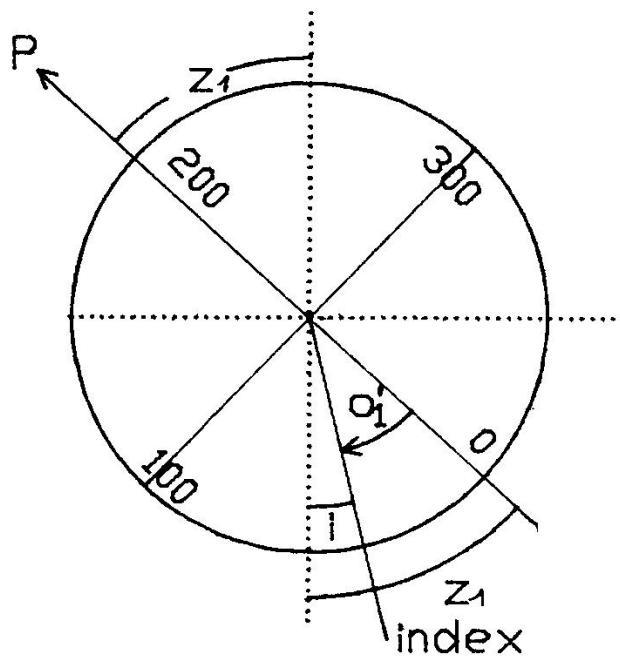
Indexovou chybu tedy zjistíme z měření ve dvou polohách dalekohledu.

Pro ε platí:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} = \frac{400^s - o'_1 - i - 200^s + o'_2 + i}{2} = \frac{o'_2 + 200^s - o'_1}{2},$$

tedy indexovou chybu můžeme eliminovat čtením v obou polohách dalekohledu.

- vertikální kruh je číslován po směru hodinových ručiček a upraven k přímému odečítání zenitových úhlů



obr. 5.41 - Určení indexové chyby, pokud je vertikální kruh číslován po směru hodinových ručiček a upraven k přímému odečítání zenitových úhlů [45.]

Pro výpočet indexové chyby platí následující vztahy:

$$z_1 = o_1 = o'_1 + i$$

$$z_2 = 400^s - o_2 = 400^s - (o'_2 + i) = z_1$$

$$o_1 + o_2 = 400^s$$

$$2i = 400^s - (o'_1 + o'_2)$$

Indexovou chybu opět zjistíme z měření ve dvou polohách dalekohledu.

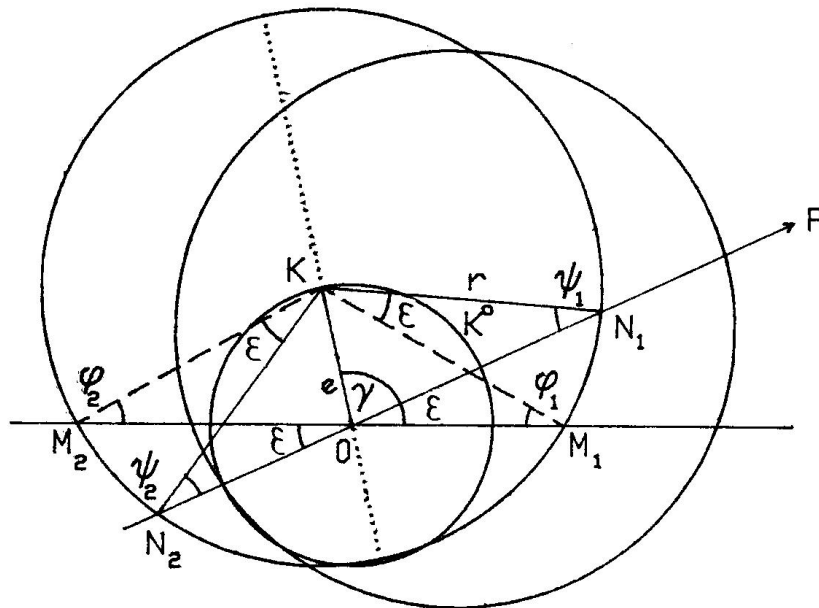
Pro z platí:

$$z = \frac{z_1 + z_2}{2} = \frac{o'_1 + i + 400^s - o'_2 - i}{2} = \frac{o'_1 + (400^s - o'_2)}{2},$$

tedy indexovou chybu můžeme eliminovat měřením v obou polohách dalekohledu.

e) chyba z excentricity točné osy dalekohledu H

Excentricita vodorovné točné osy dalekohledu způsobuje, že při sklápění dalekohledu se vertikální kruh neotáčí kolem svého středu K , ale jako excentr kolem bodu točné osy O (viz. obr. 5.42).



obr. 5.42 – Chyba z excentricity točné osy dalekohledu [45.]

Pokud zacílíme na bod P pod výškovým úhlem ε , otočí se střed kruhu K^0 po kružnici o poloměru rovném excentricitě e , také o úhel ε a přejde do bodu K .

Podle obrázku platí:

$$\begin{aligned}\varepsilon + \varphi_1 &= \varepsilon_1 + \psi_1 \Rightarrow \varepsilon - \varepsilon_1 = \psi_1 - \varphi_1 \\ \varepsilon + \psi_2 &= \varepsilon_2 + \varphi_2 \Rightarrow \varepsilon - \varepsilon_2 = \varphi_2 - \psi_2\end{aligned}$$

Protože $M_1M_2 = N_1N_2$, platí:

$$\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi \text{ a } \psi_1 = \psi_2 = \psi.$$

Dále platí

$$\begin{aligned}\sin \psi &= \frac{e}{r} \sin \gamma \\ \sin \varphi &= \frac{e}{r} \sin(\gamma + \varepsilon)\end{aligned}$$

Protože úhly φ a ψ jsou malé můžeme psát

$$\begin{aligned}\psi &= \rho \frac{e}{r} \sin \gamma \\ \varphi &= \rho \frac{e}{r} \sin(\gamma + \varepsilon)\end{aligned}$$

Vliv chyby z excentricity dalekohledu na výškový úhel je dán vztahem

$$\Delta_{\varepsilon e} = \varepsilon - \varepsilon_1 = \psi - \varphi = \pm 2\rho \frac{e}{r} \cos\left(\gamma + \frac{\varepsilon}{2}\right) * \sin \frac{\varepsilon}{2}.$$

Maximální hodnoty dosáhne pro $|\gamma| = \frac{\varepsilon}{2}$.

Vliv chyby se vyloučí aritmetickým průměrem z odečtení na diametrálních místech kruhu.

f) Chyba z excentricity záměrné přímky

Vliv chyby se vyloučí zavedením aritmetického průměru ze čtení v obou polohách dalekohledu. Pokud se měří pouze v jedné poloze dalekohledu platí, že vliv chyby je tím menší, čím je záměra delší.

2) měřické chyby

a) chyba z nesprávné horizontace přístroje

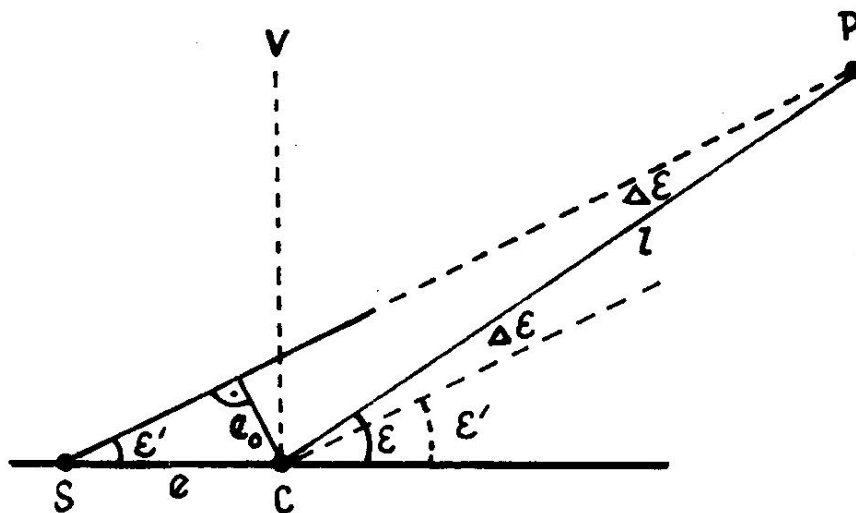
Chyba má stejný charakter jako chyba způsobená nesprávnou rektifikací alhidádové libely. Vliv chyby je vyjádřen vztahem

$$\Delta_{\varepsilon'} = v * \cos \alpha,$$

kde v je úhel odklonu vertikální osy přístroje od svislice
 α je úhel, který svírá záměrná rovina s rovinou, ve které nastal odklon osy alhidády od svislice.

b) chyba z nesprávného dostředění přístroje

Nejnepříznivějším případem (obr. 5.43) je případ, kdy k chybě v dostředění došlo ve směru na zaměřovaný bod P. Na obrázku značí e chybu v dostředění, l šikmou vzdálenost, ε a ε' správný a naměřený výškový úhel.



obr. 5.43 - chyba z nesprávného dostředění přístroje [53.]

Platí vztah:

$$\Delta_{\varepsilon} = \frac{e}{l} * \sin \varepsilon'$$

Vliv chyby z nesprávné centrace na svislý úhel se uplatňuje zejména při krátkých a strmých záměrech.

c) chyba v cílení a chyba v odečtení

Obě chyby jsou obdobné jako u vodorovných úhlů.

d) chyba z urovnání indexové libely

obrázku značí r poloměr tohoto oblouku, R poloměr Země, φ a 2ρ středové úhly odpovídající vzdálenosti AB, pro kterou vzhledem k velmi malému výškovému rozdílu h platí $AB \approx AB_0$.

$$s = R\varphi = r2\rho$$

$$\rho = \frac{R}{r} \frac{\varphi}{2} = k \frac{\varphi}{2},$$

kde k je refrakční koeficient.

Vliv refrakce na výškový rozdíl je dán vztahem

$$\Delta_r = s\rho = sk \frac{\varphi}{2} = ks \frac{s}{2R} = k \frac{s^2}{2R}.$$

Refrakční koeficient nemá stálou hodnotu. Závisí na nadmořské výšce, geografické poloze krajiny, porostu krajiny, mění se s teplotou, atmosférickým tlakem. Při výpočtu výškových oprav se zpravidla používá střední hodnota $k = 0,1306$ stanovená Gaussem.

Kromě korekce se vliv refrakce snižuje opakováním měření za odlišných atmosférických podmínek.

b) chyba z vibrace

Je obdobná jako u vodorovných úhlů.

5.2.4.3 Rozbor přesnosti měření svislých úhlů

Vliv přístrojových chyb na měřený svislý úhel je velice nebezpečný. Proto je třeba měřit přístrojem, který je řádně rektifikován a přezkoušen. Zbytkové chyby po rektifikaci již mají na svislý úhel pouze zanedbatelný vliv.

Pečlivým měřením se také vyloučí chyby z nesprávného postavení přístroje.

Zbylé chyby (chyba v cílení, odečtení a urovnání indexové libely) jsou nahodilé a na sobě nezávislé.

Střední chyba v měřeném svislém úhlu m se vypočte podle následujícího vztahu:

$$m = \sqrt{m_c^2 + m_o^2 + m_i^2},$$

kde m_c je střední chyba v cílení,
 m_o je střední chyba v odečtení,
 m_i je střední chyba v urovnání indexové libely.

Pokud se svislý úhel měří v obou polohách dalekohledu je

$$m_\varepsilon = \frac{m}{\sqrt{2}} = \sqrt{\frac{1}{2}(m_c^2 + m_o^2 + m_i^2)}.$$

6. Měření délek

Délkou rozumíme vodorovnou vzdálenost mezi dvěma body vyjádřenou v délkových jednotkách [58.]. Pro další výpočty se délky redukuje do nulového horizontu a převádějí se do zobrazovací roviny.

Jednotky

Základní délkovou jednotkou je podle ČSN 01 1300 **metr**, který je definován takto:

Metr je délka dráhy, kterou uletí světelný paprsek ve vakuu za $1/299\,792\,458$ s.

Z metru jsou odvozeny další jednotky pro měření délek, které jsou násobky nebo zlomky metru:

1 km (kilometr) = 1 000 m = 10^3 m
1 cm (centimetr) = 0,01 m = 10^{-2} m
1 mm (milimetr) = 0,001 m = 10^{-3} m
1 μ m (mikrometr) = 0,000 001 m = 10^{-6} m
1 nm (nanometr) = 0,000 000 001 m = 10^{-9} m

Vedle metrické soustavy se v praxi dosud můžeme setkat s **mírou sáhovou**, používanou na území Rakouska-Uherska do roku 1876.

Základem této soustavy je vídeňský sáh ($^{\circ}$), který se dále dělí na 6 stop ($'$), 72 palců ($''$) a 864 čárek ($'''$).

Převodní vztahy mezi metrickou soustavou a sáhovou mírou:

$1^{\circ} = 6' = 1,896484$ m
 $1' = 12'' = 0,316081$ m
 $1'' = 12''' = 0,0263401$ m
 $1''' = 0,002195$ m

Vývoj definice metru a délkového etalonu

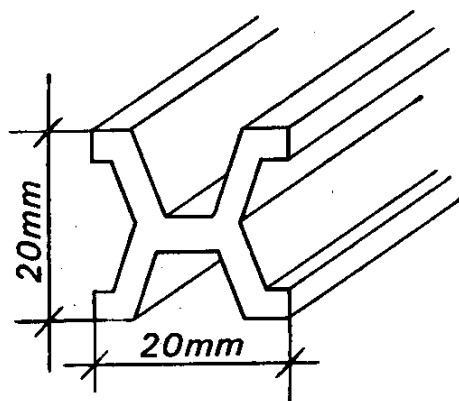
V 18. století se používaly v jednotlivých státech různé soustavy délkových jednotek. S rozvojem vědy, techniky, výroby a obchodu po Velké francouzské revoluci (1789) vyvstala potřeba zavedení jednotné mezinárodní délkové jednotky.

Roku 1791 byla vytvořena Komise pro míry a váhy, která přijala návrh, aby nová délková jednotka měla délku rovnou desetimiliónté části kvadrantu zemského poledníku, procházejícího pařížskou hvězdárnou. Tato jednotka již nesla označení metr a její velikost byla 0,513 073 98 toise do Pérou (1 m). Etalonem byla platinová tyč délky jednoho metru¹ zhotovená s přesností

¹ Tento etalon je koncovým měřidlem, oproti tomu etalon z roku 1874 je již čárkovým měřidlem.

0,01 mm. „Archivní metr“ je uložen ve francouzském státním archívu. Protože platinový archivní metr byl poměrně měkký a opotřebovával se, nebyl vhodný k určování délek národních etalonů a vyvstal požadavek, aby byl zhotoven a definován mezinárodní prototyp metru.

Roku 1875 byla vytvořena Metrická konvence, což bylo seskupení většiny evropských států, které již zavedly nebo se zavázaly zavést metrický systém. Již roku 1874 bylo vyhotoveno 30 platinoirodových tyčí délky 102 cm a profilu ve tvaru písmene X (obr. 6.1).



obr. 6.1 – Mezinárodní prototyp metru [62.]

Navržený profil zamezuje prohnutí, má značný povrch k rychlému přizpůsobení okolní teplotě a malou hmotnost (3,3 kg). Na tyto tyče byla přenesena délka archivního metru. Na každém konci jsou vyryty tři rysky vždy v odstupu 0,5 mm. Metr je určen vzdáleností středních rysek. Za mezinárodní prototyp metru byl prohlášen metr č. 6, který nejlépe souhlasil s archivním metrem. Mezinárodní metr byl pak definován materiálně jako vzdálenost dvou středních rysek na prototypu, uloženém v Mezinárodním úřadě pro míry a váhy v Sèvres u Paříže, při teplotě 0°C, tlaku jedné atmosféry, v horizontální poloze a při podepření ve dvou bodech nejmenšího průhybu. Ostatní vyhotovené metry byly losem rozděleny členskými státy Metrické konvence jako národní prototypy. Naše republika přistoupila oficiálně k metrické konvence r. 1922² a prototyp metru č. 7 získala r. 1928. Jeho délka je dána rovnicí

$$1 \text{ m} + 0,1 \mu\text{m} + (3,606 \text{ t } ^\circ\text{C} + 0,001 777 \text{ t}^2 \text{ } ^\circ\text{C}) \pm 0,2\mu\text{m}.$$

S rozvojem vědy a techniky vyvstala možnost vyhotovit nový mezinárodní prototyp s přesněji vyneseny ryskami, situace by se však za nějakou dobu pravděpodobně opakovala. Proto bylo rozhodnuto přijmout novou definici metru, která je založená na přírodním jevu. Roku 1960 byla přijata definice: Metr je délka, rovnající se 1 650 763,73 násobku vlnové délky záření širícího se ve vakuu, které přísluší přechodu mezi energetickými hladinami $2p_{10}$ a $5d_5$ atomu kryptonu 86. Poslední definice metru byla schválena r. 1983 a zní: Metr je délka dráhy, kterou projde světlo ve vakuu za 1/299 792 458 s.

² V bývalém Rakousku-Uhersku byla metrická míra uzákoněna již r. 1871 a používána od r. 1876.

Metrologie délek

Geodetická pracoviště mají povinnost ověřovat a kontrolovat svá měřidla. Pro geodetická pracoviště je vypracován systém přenosu rozměru metru na etalony nižších řádů a na provozní měřidla. Etalonáž měřidel lze rozdělit do tří stupňů: primární etalonáž, sekundární etalonáž, pracovní měřidla.

Při primární etalonáži se realizuje délková jednotka podle její platné definice. Primární etalon získáme prostřednictvím vhodného monochromatického laserového světla. Sekundární etalony se odvozují z primárních opět interferenční metodou a pomocí sekundárních etalonů se komparují provozní měřidla (pro geodetické práce jsou to zejména nivelační latě, paralaktické latě a elektronické dálkoměry).

Pracovištěm, které za úplatu ověřuje všechny druhy geodetických měřidel a o vykonané komparaci vydává osvědčení, je Státní metrologické středisko ve Výzkumném ústavu geodetickém, topografickém a kartografickém v Praze ve Zdibech. K zajištění jednotnosti a správnosti rozměru u geodetických přístrojů a pomůcek toto pracoviště využívá komparátor s interferenčním laserovým systémem pro určování rozměrů délkových stupnic.

Větší geodetická pracoviště se starají převážně o kontrolní a provozní měřidla. Kontrolními měřidly se ověřují jen přesnější přístroje a pomůcky, běžná měřidla podléhají jen provozní kontrole.

Srovnávací geodetické základny³ v ČR

V bývalém Československu se především pro komparaci invarových drátů a přesných optických a paralaktických dálkoměrů využívalo celostátní srovnávací základny v Praze v oboře Hvězda. S nástupem laserových dálkoměrů, které umožňují měřit délky s relativní přesností 1:1 000 000, pozbyla geodetická základna ve Hvězdě svého původního významu. Proto byla na konci 70. let přebudována k testování elektronických dálkoměrů. Protože však má některé nedostatky (nepříznivý profil, značná návštěvnost parku), byla vybudována nová základna v Košticích v Severních Čechách.

Pro potřeby geodetických ústavů a podniků, byly po druhé světové válce vybudovány další srovnávací základny, na kterých bylo možné komparovat optické a některé druhy světelných dálkoměrů. V současnosti si větší geodetické organizace budují ke komparaci a testování elektronických a optických dálkoměrů vlastní srovnávací základny v blízkosti svého sídla. Tyto základny mají charakter kontrolních měřidel.

³ Srovnávací geodetická základna je v terénu vybudovaný etalon k porovnání měřidel určených na měření geodetických základen a na prověrku dálkoměrů. [58.]

6.1 Metody přímého měření délek

Při přímém měření délky zjišťujeme, kolikrát je délka měřidla obsažena v měřené vzdálenosti a jaký je zbytek. K přímému měření délek se používají pásma, invarové dráty a měřické latě.

6.1.1 Měření délek pásmem

K přímému měření délek se používá ocelových, plastových nebo invarových pásem. Nejčastěji se v současnosti používají ocelová pásma. Ocelová pásma se vyrábějí z oceli válcované za studena nebo z pérové oceli, do které jsou k ochraně proti korozi přidávány různé přísady. Pásma jsou opatřována ochrannými vrstvami. Dělení pásem bývá buď vyraženo nebo vyleptáno. Zpravidla první decimetr stuhu je dělen po milimetru a další části po centimetru. Číslovány jsou pouze dílky označující decimetry a metry.



obr. 6.2 – Číslování pásma [37.]

Pásma se svinují a podle způsobu jejich uložení rozlišujeme pásma na vidlici, v pouzdře a pásma na kruhu.

Pásma na vidlici je ocelová stuha délky 10, 15, 20, 30, 50 m a průřezu 10 x 0,3 mm až 15 x 0,5 mm. Konec stuhu je upevněn krátkým řemínkem k otáčivé hřídeli, která je vsazena mezi dvě vidlice na dřevěné rukojeti.



obr. 6.3 – Pásma na vidlici

Pásma v pouzdře jsou svými vlastnostmi shodná s pásmo na vidlici. Jejich výhodou je lepší ochrana navinutého pásma. Nevýhodou je obtížné držení konce pásma při měření.



obr. 6.4 – Pásmo v pouzdře

Pásma na kruhu se v současnosti již nepoužívají.

Postup při měření délek pásmem

Při měření délek pásmem se kromě pásma používají ještě další pomůcky, např. měřické hřeby, olovnice, sklonoměry, siloměry, výtyčky, stojánky na výtyčky a další. Podle požadované přesnosti se metody měření dělí na metody technické a metody přesné.

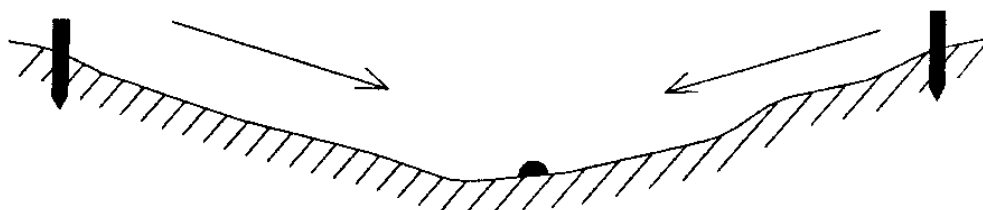
1) Technické metody

Střední chyba metody je několik centimetrů na 100 m. Technické metody se používají při měření polohopisu metodou pravoúhlých souřadnic, konstrukčně oměrných atd.

Před vlastním měřením je třeba označit počáteční a koncový bod výtyčkami umístěnými do stojánků. Jsou-li koncové body měřené délky od sebe vzdáleny více než tři klady pásma, nebo ve svažitém terénu, je nutné vytýčit ještě mezilehlé body a také je označit výtyčkami.

a) Měření délky v rovinném nebo mírně svažitém terénu

Délka se měří vždy ve vodorovné poloze pásma. Každá z délek se zásadně měří dvakrát. V rovinném terénu se měří délka tam a zpět, ve svažitém terénu se měří ze svahu. Pokud je mezi počátečním a koncovým bodem měřené délky údolí, rozdělí se měřená délka mezilehlým bodem na dva úseky, aby mohla být délka měřena vždy ze svahu.



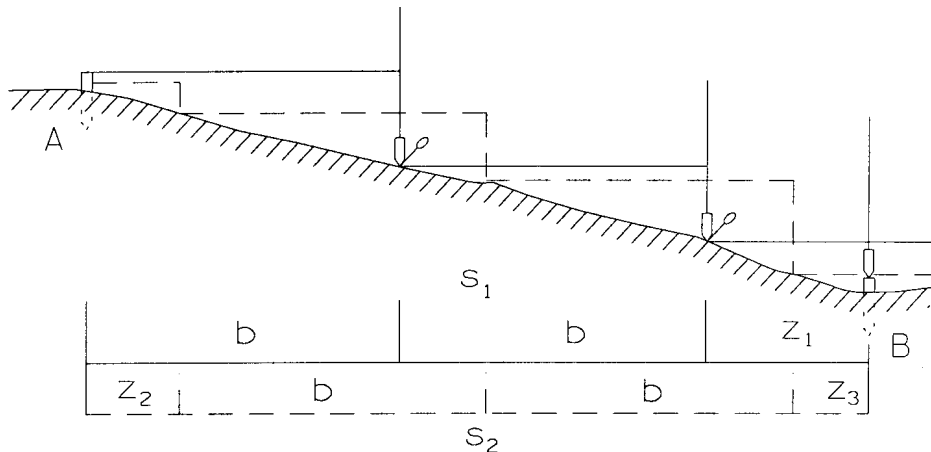
obr. 6.5 – Měření délky přes údolí [37.]

Měření začíná přiřazením nuly pásma na počáteční bod délky. Pásmo se zařadí do směru spojnice koncových bodů a uvede se do vodorovné polohy. Pásmo se napne silou, která by měla odpovídat 100 N. Po napnutí pásma a přesném nastavení nuly pásma na počáteční značku pomocník na druhém konci pásma prováží konec pásma na terén pomocí olovnice a toto místo označí měřickým hřebem, zapíchnutým šikmo do terénu, nebo v případě tvrdého terénu křídou.

Při dalších kladech se postup měření opakuje. Počet kladů n se zaznamenává do zápisníku. Zadní pomocník sbírá pro kontrolu měřické hřeby, jejichž počet musí souhlasit s počtem kladů zaznamenaných do zápisníku. Zbytek z délky mezi posledním kladem a koncovým bodem měřené délky se přečte podle přiloženého pásma. Délka z prvního měření je tedy

$$s_1 = n * b + z_1,$$

kde n je počet kladů pásma,
 b je délka pásma,
 z je zbytek délky.



obr. 6.6 – Měření délek ze svahu [37.]

Při opakovaném měření je vhodné, aby na počáteční bod délky se přiřadilo pásmo např. na hodnotu 1 m, tj. aby průměty konce pásma nebyly ve stejných místech jako při prvním měření. Délka z druhého měření je

$$s_2 = z_2 + n * b + z_3.$$

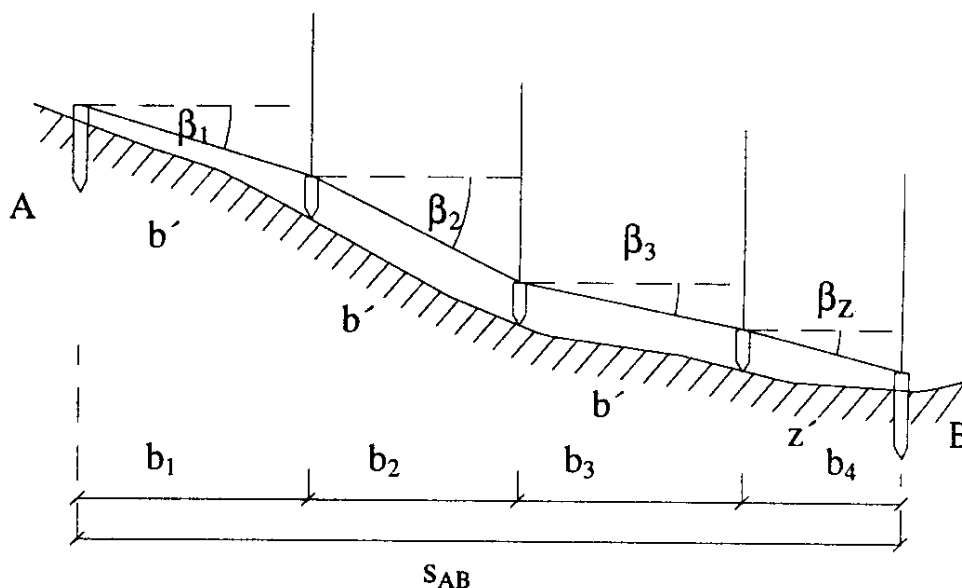
Rozdíl obou měření nesmí být větší než povolená odchylka⁴. Výsledná délka se vypočte jako aritmetický průměr obou měření:

$$s = \frac{s_1 + s_2}{2}.$$

⁴ Povolené odchylky jsou pro jednotlivé druhy prací určeny předpisy a směrnicemi.

b) Měření délky ve svažitém terénu

Ve svažitém terénu, kde pásma nejde urovnat do vodorovné polohy ani provázit jeho konec pomocí olovnice, je nutné měřit délky v šikmých polohách pásma. Postup měření je obdobný jako v předešlém případě. Šikmé kladu je však třeba převést na vodorovné. K tomu je třeba změřit sklon β_i každého kladu pásma sklonoměrem.



obr. 6.7 – Měření sklonu pásma [37.]

Vodorovné průměty b_i šikmých kladu b' se vypočtou ze vztahu

$$b_i = b' \cos \beta_i.$$

Vodorovný průmět celé délky je dán vztahem

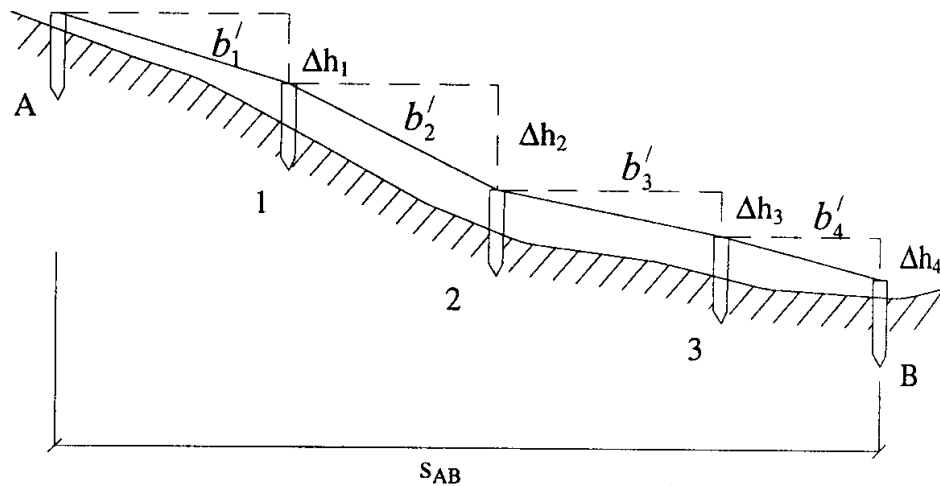
$$s_{AB} = \sum_{i=1}^n b' \cos \beta_i + z' \cos \beta_z.$$

Délka se opět měří dvakrát a určí se jako aritmetický průměr.

2) Přesné metody

Střední chyba metody je do 1 cm na 100 m. K měření délek se musí použít komparovaná ocelová pásma.

Před měřením se vytýčí teodolitem mezilehlé body ve vzdálenostech menších než je délka pásma. Tyto body se stabilizují většinou dřevěnými kolíky. Převýšení sousedních kolíků Δh_i se určí geometrickou nivelací nebo pomocí zenitových úhlů.



obr. 6.8 – Přesné měření délek [37.]

Po napnutí pásma se na kolíky mezilehlých bodů vyznačí ryskou celý centimetr. Tímto postupem budou všechny úseky změřeny v centimetrech, jen poslední úsek ke koncové značce se čte na milimetry.

Šikmé délky bi' se zpravidla měří třikrát. Pásma je nutné napínat konstantní silou 100 N, čehož se dosáhne pomocí siloměru. Šikmé délky se převedou na vodorovné Pythagorovou větou a výsledná vodorovná délka se vypočte jako aritmetický průměr.

$$s_j = \sum_{i=1}^n \sqrt{b_i'^2 - \Delta h_i^2} \quad \text{a} \quad s = \frac{\sum_{j=1}^3 s_j}{3}.$$

Přesnost přímého měření délek

Měření délek pásmem je zatíženo chybami systematickými a náhodnými, z nichž nebezpečnější jsou chyby systematické. Jejich vliv je třeba z měření vyloučit nebo alespoň jejich vliv snížit a to buď matematickou opravou nebo metodou měření. O velikosti náhodných chyb rozhoduje pečlivost prováděných úkonů a znalost zdrojů těchto chyb.

Chyby systematické

- a) chyba z nesprávné délky pásma
- b) chyba ze změny délky pásma vlivem teploty
- c) chyba z průhybu pásma
- d) chyba z protažení pásma

- e) chyba z nevodorovné polohy pásma
- f) chyba z vybočení pásma ze směru
- g) chyba z určení sklonu nebo převýšení pásma

ad a) chyba z nesprávné délky pásma

Jedná se o chybu konstantní velikosti. Je rozdílem mezi skutečnou délkou pásma (etalonu) oproti délce kontrolovaného pásma. Každé pásmo se liší o konstantní hodnotu oproti skutečné délce pásma. Tato hodnota nesmí překročit povolenou odchylku, která je stanovena pro různé délky pásma a řídí se ČSN 251105. Délka pásma se opravuje o hodnotu v_l která se získá z komparační opravy v_k :

$$v_l = v_k * s.$$

ad b) chyba ze změny délky pásma vlivem teploty

Chyba vzniká zanedbáním vlivu teploty na materiál stuhy pásma. Pokud se s pásmem měří za jiné teploty, než za jaké bylo komparováno, mění se jeho skutečná délka. Se zvětšující se teplotou se stuha protahuje a se zmenšující teplotou se zkracuje. Délka pásma se opravuje o hodnotu v_2 :

$$v_2 = \alpha * b(t - t_0),$$

kde α je koeficient roztažnosti materiálu, z něhož je stuha pásma vyrobena,
 b je délka pásma (nebo jeho části),
 t je teplota pásma⁵ při měření,
 t_0 je teplota, při které bylo pásmo komparováno.

ad c) chyba z průhybu pásma

Chyba se vyskytuje u všech měřených délek, pokud se pásmo neklade na pevný podklad. Průhyb pásma může být způsoben menší napínací silou, nebo působením větru. Proto se při přesných pracích kontroluje napětí siloměrem a nedoporučuje se měřit při silnějším větru. Oprava z průhybu se vypočte ze vztahu:

$$v_3 = -\frac{1}{24} \frac{\gamma_i^2 * b^3}{F^2},$$

kde γ_i je hmotnost délkového metru v kilogramech,
 b je délka pásma v metrech,
 F je napínací síla v desítkách Newtonů.

ad d) chyba z protažení pásma

⁵ Teplota pásma se určuje dotykovými elektronickými čidly.

Chyba vznikne, pokud je pásmo napínáno větší silou než při jaké bylo komparováno. Má opačné znaménko než chyba z průhybu a vypočte se ze vztahu:

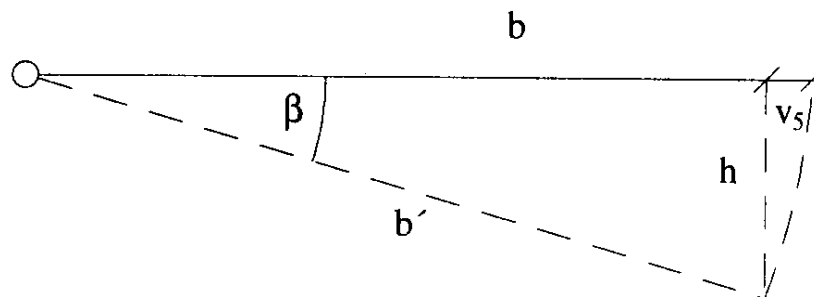
$$v_4 = b * \frac{F - F_k}{A * E},$$

kde b je délka pásma v metrech,
 E je modul pružnosti v N.m^{-2} ,
 F je napínací síla v Newtonech,
 F_k je napínací síla v Newtonech při komparaci,
 A je průřez pásma v m^2 .

ad e) chyba z nevodorovné polohy pásma

Chyba vznikne nepřesným urovnáním pásma do vodorovné polohy. Oprava se vypočte ze vztahu:

$$v_5 = b * (1 - \cos \beta) = \frac{\Delta h^2}{2b}.$$



obr. 6.9 – Chyba z nevodorovné polohy pásma [37.]

ad f) chyba z vybočení pásma ze směru

Chyba vznikne nedokonalým zařazením do požadovaného směru. Má stejný charakter i stejnou velikost jako chyba z nevodorovné polohy pásma. Dodržíme-li předpoklad, že žádný klad pásma nevybočuje ze směru více jak 50 mm (při zařazení do směru od oka), je vliv této chyby prakticky zanedbatelný.

ad g) chyba z určení sklonu nebo převýšení pásma

Tato chyba se může uplatnit při měření šikmých délek. Předcházíme jí dostatečně přesně určeným převýšením, pak je její vliv prakticky nulový.

Závěr: Pokud označíme systematickou chybu jednoho metru měřené délky λ a b bude značit délku, pak celkový vliv systematických chyb:

$$m_{\text{sys}} = \lambda * b .$$

Celkový vliv systematických chyb roste úměrně s délkou.

Chyby náhodné

- a) chyba z provázení konce pásma
- b) chyba z vyznačení kladu pásma
- c) chyba z přiřazování pásma
- d) chyba ze čtení

ad a) chyba z provázení konce pásma

Chyba je při použití olovnice závislá na svažitosti terénu, na povětrnostních podmínkách a pečlivosti měřiče. Ve svažitém terénu je vhodné měřit délku po kratších úsecích.

ad b) chyba z vyznačení kladu pásma

Tato chybu by v technických metodách neměla překročit hodnotu 3 mm. U přesných prací 2 mm.

ad c) chyba z přiřazování pásma

Velikost chyby je závislá na přiřazení počáteční značky pásma na koncovou značku předcházejícího kladu pásma a na kvalitě vyznačení předcházejícího kladu pásma.

ad d) chyba ze čtení

Chyba závisí na typu dělení pásem a na kvalitě čtecího indexu.

Závěr: Pokud označíme náhodnou chybu jednoho metru měřené délky μ a b bude značit délku v metrech, pak celkový vliv náhodných chyb:

$$m_{\text{nah}} = \mu\sqrt{b} .$$

Celkový vliv náhodných chyb roste úměrně s odmocninou z délky.

Kromě systematických a náhodných chyb je třeba vzít v úvahu také chyby, které nezávisí na délce pásma a na měřené délce (např. chyba ze čtení), které označíme v . Pak celková střední chyba měřené délky m :

$$m = \lambda * b + \mu\sqrt{b} + v .$$

Přesnost měřené délky je možné zvýšit opakováním měření, neboť střední chyba se zmenšuje s odmocninou z počtu měření n :

$$m_x = \frac{m}{\sqrt{n}}.$$

Přesnost měřických dvojic

V praxi se často délky měří jen dvakrát, tím získáme tzv. **měřickou dvojici**.

Z jedné měřické dvojice získáme vyrovnanou hodnotu délky s aritmetickým průměrem.

Ke stanovení přesnosti je třeba vypočíst rozdíly měřených délek

$$d_i = s'_i - s''_i.$$

Velikost rozdílu d nesmí překročit tzv. **mezní odchylku**. Mezní odchylka je dána výrazem:

$$\Delta s = k_1 s + k_2 \sqrt{s} + k_3,$$

kde s je měřená délka,
 k_1 vyjadřuje vliv systematických chyb,
 k_2 vyjadřuje vliv náhodných chyb,
 k_3 vyjadřuje vliv chyb nezávislých na délce.

Koeficienty k_1, k_2, k_3 se vyjadřují podle požadavků na přesnost.

Ke stanovení přesnosti se určuje střední rozdíl souboru měřických dvojic:

$$m_D = \sqrt{\frac{[dd]}{n}}.$$

Střední chybu m_i jednoho měření vypočteme ze souboru měřických dvojic podle vztahu:

$$m_i = \pm \sqrt{\frac{[dd]}{2n}}.$$

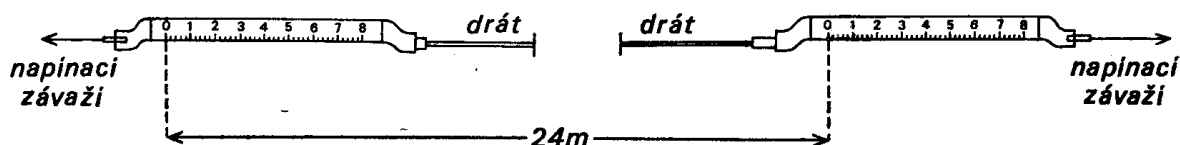
Střední chybu aritmetického průměru m_x kterékoli dvojice vypočteme ze vztahu:

$$m_x = \pm \frac{m_i}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{[dd]}{n}}.$$

6.1.2 Velmi přesné měření délek invarovými dráty

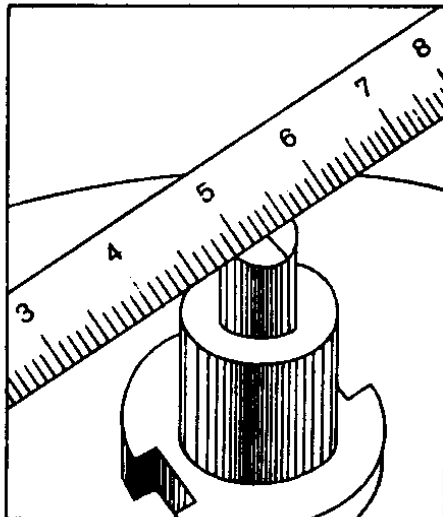
Měření délek invarovými⁶ dráty se používalo především k měření základen, sloužících k určení měřítka triangulačních základen a k přesnému změření národních a podnikových srovnávacích sítí. S rozvojem světelných dálkoměrů, kterými lze měřit délku s relativní chybou do $1 \cdot 10^{-6}$, ztratily invarové dráty na významu.

Invarové měřické dráty mají délku zpravidla 24 m (8 m, 4 m), jsou kruhového průřezu o průměru 1,65 mm. Na obou koncích jsou opatřeny milimetrovými stupničkami, dlouhými 8 cm. Obě stupničky jsou číslovány ve stejném směru (zleva doprava).



obr. 6.10 – Milimetrové stupničky [62.]

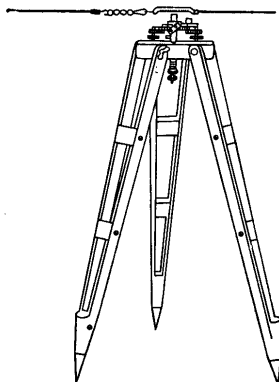
Základna se volí v násobku 24 m. Čtecí značka je dána ostrou jemnou ryskou na horní ploše šikmo seříznutého kovového válečku, ke které se přiřazuje stupnička.



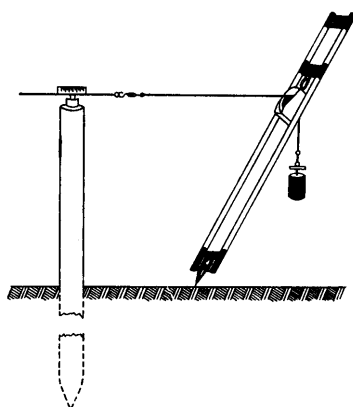
obr. 6.11 – Ryska [62.]

Na konci stupniček jsou umístěny třmeny, do kterých se zapínají karabiny napínacích ocelových drátů nebo pásků, vedených přes kladku „berliček“ zatížených desetikilogramovým závažím. Čtecí značky se umísťují do trojnožek stativu (obr. 6.12), nebo se zašroubují do dřevěných kůlů (obr. 6.13). Do jedné měřické soupravy patří sada několika drátů, které se navíjí na bubny.

⁶ Invar je slitina 64 % železa a 36 % niklu s koeficientem tepelné roztažnosti rovným $1,5 \cdot 10^{-6}$.

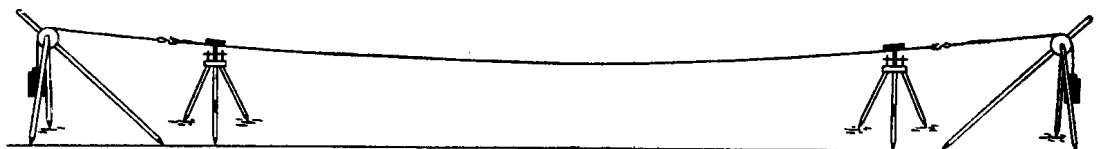


obr. 6.12 – Umístění čtecí značky na stativu [62.]



obr. 6.13 – Umístění čtecí značky na kůlu [62.]

Měřické práce začínají vytyčením směru základny pomocí teodolitu. Délka se rozměří po 24 m, označí se kolíkem nebo se do země zapustí kůl. Převýšení sousedních bodů se zjistí nivelací. Drát se přiloží stupničkami ke čtecím značkám a napíná se pomocí napínacího zařízení. Potom se čtou současně čtení na obou stupničkách a teplota. Každý úsek se měří několikrát, vždy s malým posunem drátu na kládkách. Při pečlivém měření je možno určit délky základen dlouhých 1 km a více s relativní chybou až $1 \cdot 10^{-6}$.

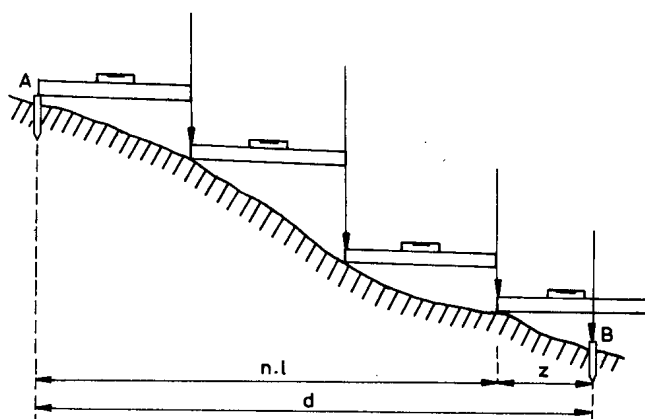


obr. 6.14 – Měření invarovými dráty [62.]

6.1.3 Měřické latě

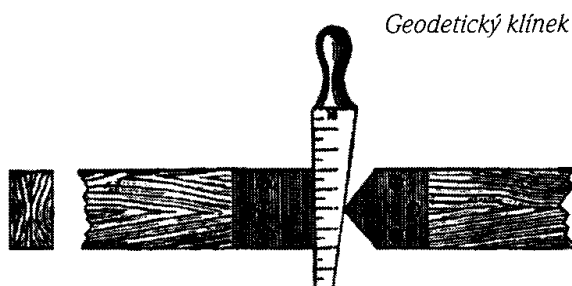
Měřické latě jsou dřevěná nebo kovová koncová měřidla s obdélníkovým nebo čtvercovým průřezem. Dělení latí je decimetrové, popř. centimetrové (podle účelu měření). Latě jsou opatřeny libelou, ke stanovení vodorovné polohy. [58.]

Při měření se používá souprava dvou latí. Způsob měření je následující: Počátek první tyče se přiloží na počátek měřené délky. Pomocí libely uvedeme tyč do vodorovné polohy. Druhou tyč přiložíme na konec první tyče a opět ji uvedeme do vodorovné polohy. Postup opakujeme dokud nám nezůstane úsek kratší než je délka latě, který doměříme čárkovým měřidlem.



obr. 6.15 – Měření délky latí [32.]

V minulosti se používala koncová měřidla, což byly latě, které nebyly opatřeny dělením (byla známa jejich délka). Těmito měřidly se měřily geodetické základny (pomocí geodetických základen se určoval rozměr trigonometrické sítě). První geodetickou základnu změřil dřevěnými latěmi r. 1615 Snellius. Dřevěnými latěmi se měřilo až do konce 18. století. Roku 1792 vyrobil Borda první základnovou soupravu, pro stupňové měření k určení délky jednoho metru. První základnové soupravy měřidla ve tvaru kovových tyčí. Měřidla se nedorážela k sobě, ale ponechávala se mezi nimi malá mezera, která se měřila geodetickým klínkem (obr. 6.16) nebo výsuvným měřidlem (z tyče).



obr. 6.16 – Geodetický klínek [13.]

Později se měřidla zařazovala pod mikroskopy a mezery mezi nimi se měřily opticky. Dnes je již tento způsob určování geodetických základů dávno překonán, neboť k určení rozměru sítě v triangulaci je možno přímo měřit délky zvolených trigonometrických stran elektronickými dálkoměry nebo vybudovat síť metodou trilaterace. [62.]

V současnosti se v praxi s koncovými měřidly setkáme již pouze při komparaci měřidel (souprava normálního metru) [33.] používaných k velmi přesnému měření délek.

6.2 Metody nepřímého měření délek

Při nepřímém měření délek se neměří přímo žádaná délka, ale veličiny, ze kterých tuto délku určíme.

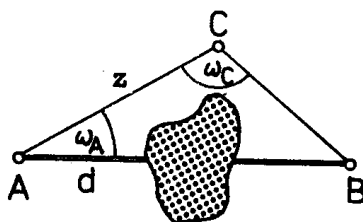
6.2.1 Trigonometrické určování délek

Trigonometrické určování délek se používá tehdy, pokud je jeden z koncových bodů měřené délky nepřístupný nebo není mezi koncovými body měřené délky přímá viditelnost.

V tomto případě se vychází z řešení všeobecného trojúhelníka, v kterém určovaná délka d je neznámou stranou. Protože se jedná o výpočet z trojúhelníků, nazývá se toto určování délek trigonometrickým. Neznámou délku d je třeba vypočítat s nezávislou kontrolou. Výsledná hodnota při trigonometrickém určování délek je vždy vodorovná délka, i když oba koncové body přímky leží v různých výškách (vyplývá z definice vodorovného úhlu).

Příkladem může být určování vodorovné délky d mezi body A a B (obr. 6.17). Protože tato délka je přerušena překážkou (není zde přímá viditelnost), zvolíme bod C a určíme např. délku CA (základna). Základnu můžeme získat buď přímým nebo nepřímým měřením, nebo např. výpočtem ze známých souřadnic jejích dvou koncových bodů či odvozením z jiné neznámé délky. Teodolitem odměříme úhly ω_A a ω_C a výslednou délku určíme pomocí sinusové věty:

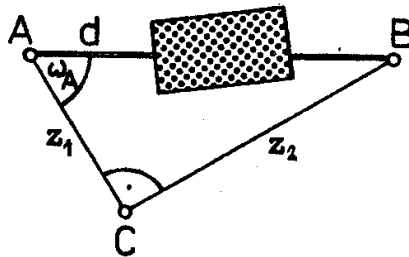
$$d = \frac{z \sin \omega_C}{\sin(\omega_C + \omega_A)}$$



obr. 6.17 – Určení délky d sinusovou větou [50.]

Dalším příkladem může být určení délky d přerušené překážkou výpočtem z pravoúhlého trojúhelníka (obr. 6.18). V tomto případě změříme dvě základny z_1 a z_2 a délka d se získá z Pythagorovy věty:

$$d = \sqrt{z_1^2 + z_2^2} .$$

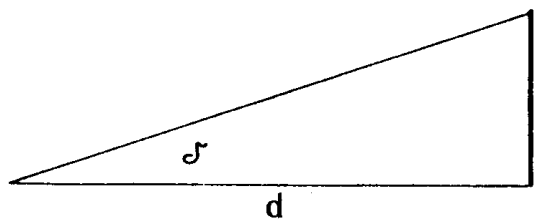


obr. 6.18 – Určení délky d Pythagorovou větou [50.]

Další příklady lze nalézt např. v [37.].

6.2.2 Optické měření délek

Optické měření délek představuje skupinu různých metod různých přesností. Geometrickým principem je řešení pravoúhlého dálkoměrného trojúhelníka, který tvoří delší odvěsna d (hledaná délka), kratší odvěsna l (základna) a dálkoměrný paralaktický úhel δ .



obr. 6.19 – Dálkoměrný trojúhelník [33.]

V tomto trojúhelníku platí vztah

$$d = l * \cot g \delta .$$

Při praktické realizaci tohoto způsobu určování délek pracují některá zařízení tak, že jeden z prvků l , δ zůstává konstantní a v závislosti na velikosti délky d se mění druhý prvek.

V některých dálkoměrech (zejména autoredukčních) se mění při měření oba dva prvky. Základnu

l tvoří buď úsek latě, nebo úsek stupnice v přístroji. Úhel δ se vytváří optickými klíny nebo se měří přímo teodolitem.

6.2.2.1 Paralaktické určování délek

Paralaktické měření délek se používá v rozsahu délek do 100 až 120 m. Při paralaktickém měření délek se měří paralaktický úhel δ , pod kterým vidíme oba záměrné terčíky základnové latě. K tomu se používá vteřinový teodolit.

Základnová lať je složena ze dvou částí, které je nutno před měřením správně sesadit. Poté lať zasuneme svislým čepem do centrační podložky vycentrovaného stativu. Provedeme přesnou centraci a horizontaci latě (pomocí kruhové libely). Pomocí kolimátoru lať natočíme kolmo na měřenou délku a zabezpečíme její polohu utáhnutím ustanovky na centrační podložce. Na druhém koncovém bodě měřené délky připravíme k měření teodolit.

Postup měření je následující: nejprve se zaměří na levý terčík základnové latě – čtení L_1 , poté na pravý terčík – čtení P_1 . Jemnou ustanovkou porušíme zacílení a točítkem mikrometru také koincidenci. Opět zacílíme na pravou značku latě – čtení P_2 , otočením přístroje stále ve stejném smyslu ukončíme měření záměrou na levý terčík – čtení L_2 . Z rozdílů čtení vodorovného kruhu na pravý a levý terčík se získá dvakrát měřený dálkoměrný úhel δ . Před měřením další skupiny se pootočí limbem teodolitu o malou hodnotu a celý postup se opakuje. Druhé měření by mělo začínat záměrou na pravou značku latě s protisměrným otáčením teodolitu.

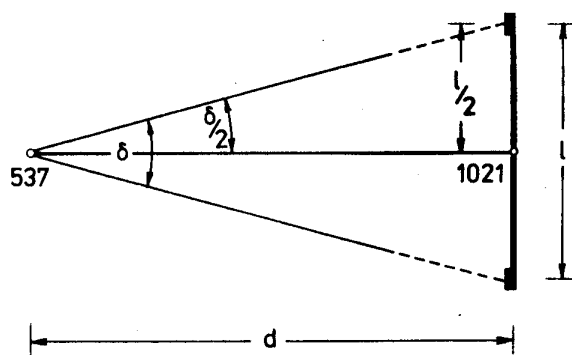
Paralaktický úhel tvoří dvě svislé roviny proložené stanovištěm přístroje a koncovými body základny. Tento úhel se měří pouze v jedné poloze dalekohledu. Protože obě cílové značky leží ve stejném horizontu, přístrojové chyby zatíží obě záměry stejnou hodnotou, která se při rozdílu vyloučí. Počet měření závisí na měřené délce a na požadované přesnosti. Obvykle se měří dvě až čtyři skupiny.

Určovaná délka je vždy vodorovná a vypočte se ze vztahu

$$d = \frac{l}{2} \cot g \frac{\delta}{2},$$

kde ale l – délka latě (základna) – je konstantní (obvykle 2 m) a tedy

$$d = \cot g \frac{\delta}{2}.$$



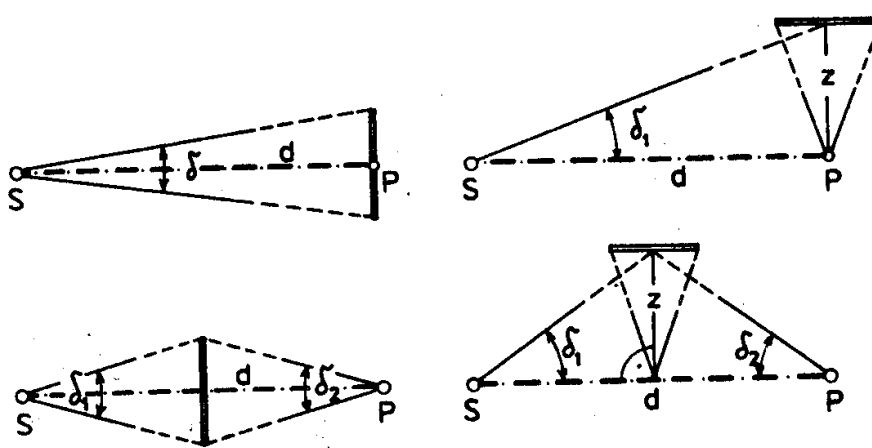
obr. 6.20 – Paralaktické určování délek [49.]

Přesnost délky se vypočte ze vzorce odvozeného diferencováním základní rovnice pro výpočet vzdálenosti

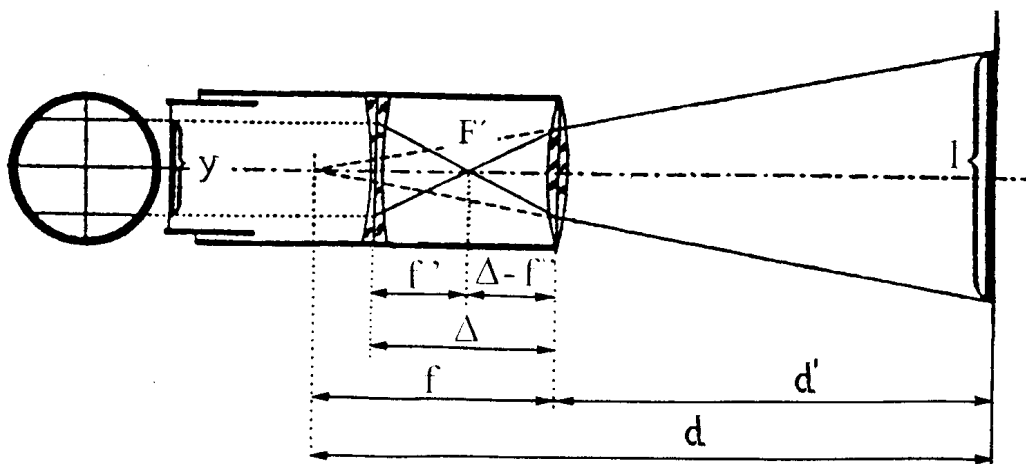
$$m_d = \frac{d^2}{2} * m_\delta,$$

kde m_d je střední chyba měřené délky,
 d je vypočtená délka,
 m_δ je střední chyba měřeného paralaktického úhlu.

Střední chyba tedy roste lineárně se střední chybou měřeného paralaktického úhlu a zároveň se čtvercem měřené délky. Pokud potřebujeme dosáhnout určité přesnosti, můžeme měřit délky jen do určité velikosti. Chceme-li měřit paralaktickým způsobem přesně větší délky, rozdělíme délku na více úseků a určíme tuto délku pomocí základního paralaktického článku (geometrického uspořádání základnové latě a měřené délky), nebo zvolíme jiný paralaktický článek.



obr. 6.21 – Příklady paralaktických článků [50.]



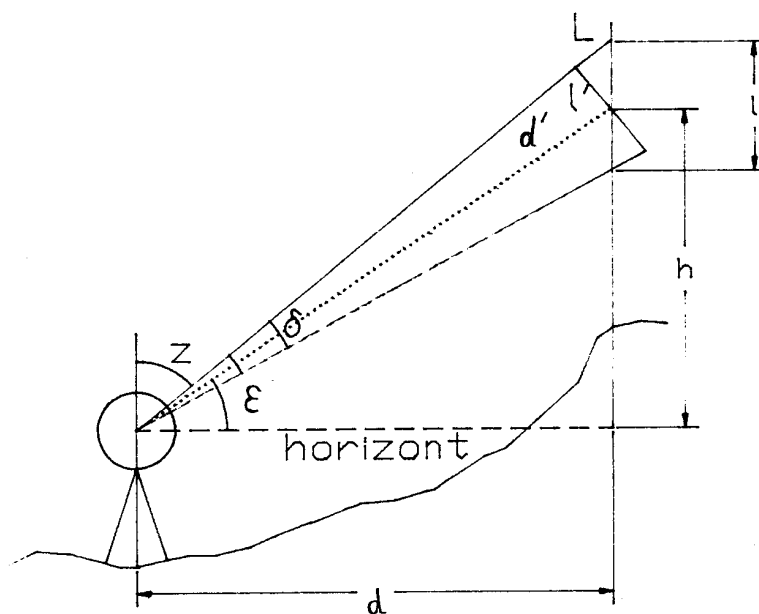
obr. 6.23 – Analaktický dalekohled [27.]

Pokud bychom měřili délku pod výškovým úhlem ε , bude platit vztah

$$d = k * l * \cos^2 \varepsilon .$$

Popř. pro měřený zenitový úhel z platí

$$d = k * l * \sin^2 z$$



obr. 6.24 – Určení vodorovné délky a převýšení nitkovým dálkoměrem [45.]

Nitkovým dálkoměrem se dá také určit převýšení, a to z vodorovné délky a výškového úhlu podle vzorce:

$$h = d * \operatorname{tg} \varepsilon .$$

Pro stanovení přesnosti nitkového dálkoměru se vychází z rovnice

$$d = k * l * \sin^2 z .$$

Použije-li se zákona o přenášení chyb, bude střední chyba v délce m_d dána výrazem

$$m_d^2 = (k * \sin^2 z)^2 m_l^2 + (k * l * \sin 2z)^2 m_z^2 ,$$

kde m_l je přesnost určení laťového úseku,
 m_z je přesnost určení zenitového úhlu.

6.2.2.3 Dvojobrazové dálkoměry

U dvojobrazových dálkoměrů je do směru světelných paprsků v jedné polovině zorného pole zařazen optický klín, který odchyluje paprsky a tím i obraz o úhel δ . Pokud zacílíme na vodorovnou číslovanou lať, vidíme v zorném poli vzájemně vůči sobě posunuté obrazy dolní a horní poloviny latě. Posun (laťový úsek) je funkcí vzdálenosti podle vztahu:

$$d = l * \cot g \delta .$$

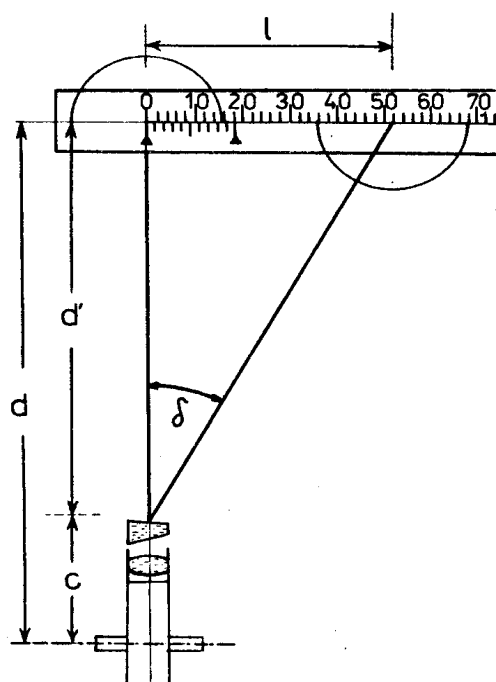
Pro $\delta = 34'22,6''$ je $\cot g \delta = 100$ a rovnice přejde na tvar

$$d = 100 * l .$$

Dvojobrazové dálkoměry lze dělit na dálkoměry s latí a dálkoměry bez latě (základna je umístěna v přístroji).

Dvojobrazové dálkoměry s latí

Dvojobrazové dálkoměry s latí lze použít pro měření délek do 100 až 150 m.



obr. 6.25 – Princip dvojobrazového dálkoměru s latí [50.]

Délka se vypočte podle obr. 6.25 ze vzorce

$$d = c + d',$$

kde c je vzdálenost od klínu k vertikální ose přístroje,
 d' vypočteme podle vzorce (viz. obrázek) $d' = l * \cot g \delta$,
kde úsek l přečteme na vodorovné dálkoměrné lati.

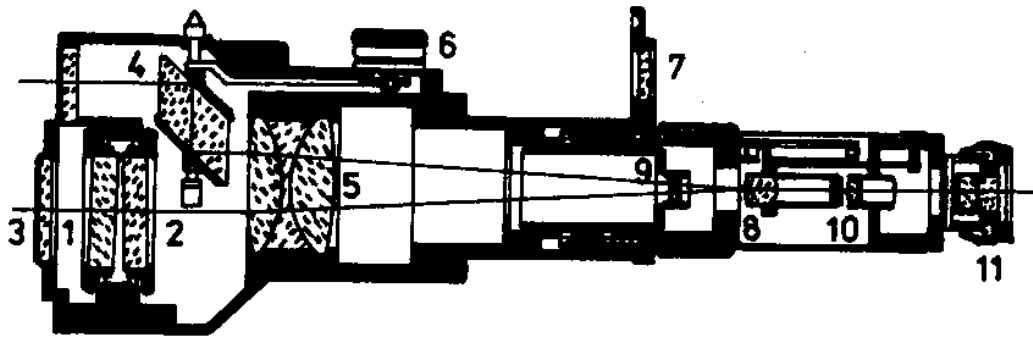
Dálkoměrný klín zakrývá pouze část objektivu. Jedna část světelných paprsků, které vycházejí z dálkoměru, projde skrz nezakrytou část objektivu, druhá část přes část objektivu zakrytou dálkoměrným klínem. Tato druhá část světelných paprsků je od původního směru odchýlena o dálkoměrný úhel δ . V zorném poli proto vidíme dva vzájemně posunuté obrazy a tento jejich posun představuje laťový úsek l . Zbroušení klínu je voleno tak, aby hodnota $\cot g \delta = 100$. To je splněno pro $\delta = 34'22,6''$. Pak se rovnice pro výpočet délky d zjednoduší na tvar:

$$d = c + 100 * l = c + k * l,$$

kde k je násobná konstanta,
 c je součtová konstanta.

Lať, na níž se čte laťový úsek l , je vybavena základní stupnicí a vernierem. Pro přesnější určení délky se používá také optického mikrometru. Pro odstranění součtové konstanty je vlastní nula vernieru posunuta oproti nule hlavní stupnice ve směru číslování o hodnotu c/k .

Pro určení přímo vodorovné délky se používají dálkoměry autoredukční. Příkladem autoredukčního dálkoměru je Zeiss Redta 002, jehož řez je na obrázku (obr. 6.26). U tohoto dálkoměru se redukce délky dosahuje dvojicí optických klínů, které se protisměrně otáčejí kolem osy dalekohledu v závislosti na výškovém úhlu ε .



obr. 6.26 – Řez dálkoměrem Redta 002 [32.]

Při sklonu dalekohledu o úhel ε se v protisměru o stejný úhel otočí také optické klíny 1 a 2. Před těmito klíny je umístěný rektifikační klín 3, kterým se justuje úhel klínů 1 a 2 tak, aby násobná konstanta k byla přesně 100. Rombický hranol 4 posouvá paralelně záměrný svazek paprsků a také slouží jako planoparalelní destička optického mikrometru 6, který je zvětšován lupou 7. Klíny 1, 2 a 3 spolu s rombickým hranolem 4 jsou umístěné před objektivem 5. Oddělení přímého obrazu latě a jejího vychýleného obrazu zabezpečuje Fresnelův hranol 8. Dalšími součástmi dalekohledu jsou zaostřovací čočka 9, převraccující systém 10 a okulár 11.

Pro stanovení přesnosti dvojobrazových dálkoměrů se vychází z rovnice

$$d = k * l + c .$$

Použije-li se zákona o přenášení chyb, bude střední chyba v délce m_d dána výrazem

$$m_d = \sqrt{(km_l)^2 + (lm_k)^2 + m_c^2} ,$$

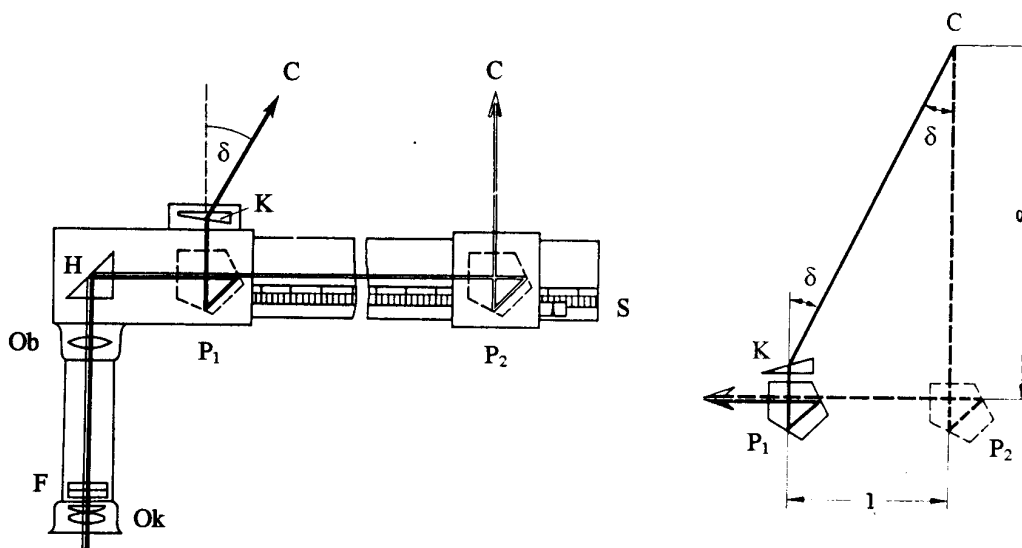
kde chyby m_l , m_k a m_c se skládají z jednotlivých chyb způsobených různými vlivy (např. stavem přístroje a ostatních měřících pomůcek a zařízení, vlivem prostředí, stavem samotného měřiče).

V praxi se namísto zjišťování těchto jednotlivých chyb zjišťuje jejich celkový vliv na měřenou délku a to na srovnávací základně vhodným postupem [32.].

Dvojobrazové dálkoměry bez latě

U těchto dálkoměrů je vodorovná základna proměnné velikosti přímo součástí přístroje. Dalekohled přijímá v horní a dolní polovině zorného pole obrazy předmětu umístěného na druhém konci měřené vzdálenosti. Tyto obrazy vznikají po průchodu dvěma hranoly – pevným a posuvným, které tvoří základnu a jsou umístěné v různých výškách. Před pevný hranol je vložen

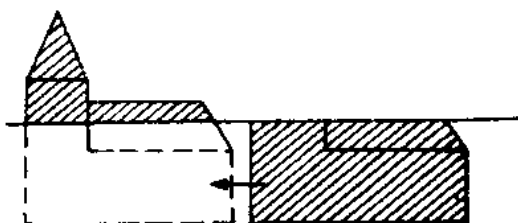
optický klín, který mění směr paprsku o stálý úhel δ . Oba poloviční obrazy jsou převedeny do okuláru trojbokým hranolem. Od sebe jsou tyto obrazy odděleny Fresnelovým hranolem.



obr. 6.27 – Princip dvojobrazového dálkoměru bez lati [27.]

V okamžiku koincidence obrazů v jediný, čehož docílíme posunem pohyblivým hranolem po základně, odečteme na základně vzdálenost, z níž již můžeme určit hledanou šikmou délku ze vztahu:

$$d = l * \cot g \delta .$$



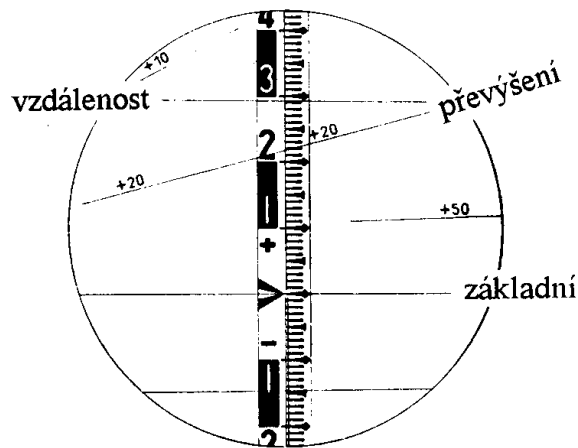
obr. 6.28 – Koincidence obrazu [27.]

Tímto přístrojem lze měřit délky do 60 m a při použití speciálního terče a lati do 180 m. Nejrozšířenějším dvojobrazovým dálkoměrem bez lati je dálkoměr BRT 006.

6.2.2.4 Diagramové dálkoměry

Diagramové dálkoměry fungují na principu nitkových dálkoměrů, jen namísto dálkoměrných rysek mají v zorném poli dalekohledu diagramy, pomocí kterých je možné odečítat přímo vodorovné délky a převýšení nad horizontem stroje.

V zorném poli přístroje je viditelná soustava křivek (obr. 6.29), jejichž odstup je automaticky proměnlivý v závislosti na skonu záměry. Tyto křivky vymezují na lati úsek, který odpovídá příslušné vodorovné vzdálenosti.



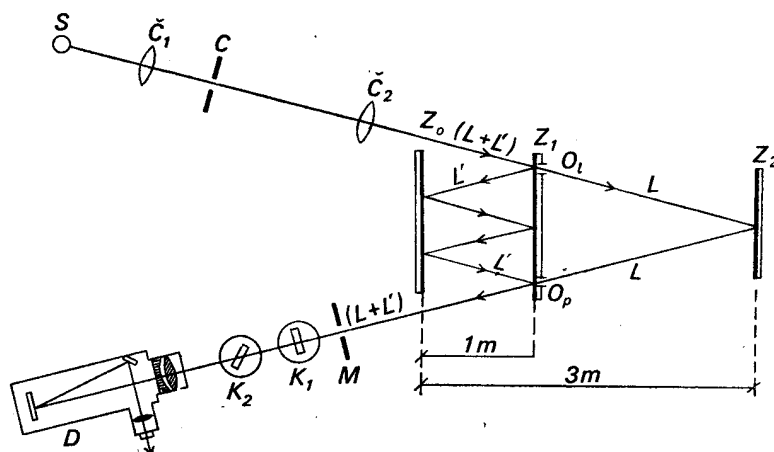
obr. 6.29 - Zorné pole diagramového dálkoměru [27.]

Přesnost diagramových dálkoměrů je shodná s přesností nitkových dálkoměrů.

6.2.3 Fyzikální dálkoměry

[62.] Fyzikální dálkoměry využívají jevu známého z fyziky – **interference světla**. Tento jev spočívá v tom, že dva koherentní světelné paprsky (vycházející současně ze stejného zdroje), projdou-li dvě různé dráhy, vytvoří při vzájemném setkání světlo silnější či slabší. Je-li rozdíl drah násobkem délky světelné vlny, světlo se maximálně zesílí. Je-li tento rozdíl násobkem poloviny délky vlny, světlo vymizí. Pro bílé světlo, jehož paprsky mají vlnové délky od 0,40 μm do 0,75 μm , nastává zřetelná interference pouze v případě, že dráhy koherentních paprsků jsou téměř stejné.

Roku 1923 finský fyzik, astronom a geodet Y. Väisälä využil interference bílého světla a vypracoval metodu, při které se postupným násobením známé délky měří vzdálenosti – multiplikační metodu. Tato metoda se v geodézii nejprve používala pro komparaci invarových drátů a později též pro měření srovnávacích základů.



obr. 6.30 – Princip multiplikační metody [51.]

Při multiplikační metodě se vychází z koncového měřidla o délce rovné 1 m. Pomocí tohoto měřidla se nastaví vzájemná vzdálenost dvou zrcadel Z_0 a Z_1 . Další zrcadlo Z_n se umístí ve vzdálenosti n metrů od prvního zrcadla Z_0 . Bílé světlo ze zdroje S se pomocí kolimátoru (dvě čočky \check{C}_1 a \check{C}_2 a clony C) upravuje na svazek rovnoběžných paprsků. Tento svazek paprsků jde mimo zrcadlo Z_0 a dopadá na zrcadlo Z_1 v místě, kde je levý otvor O_1 o průměru cca 2 cm. Střední paprsky L projdou otvorem a dopadnou na zrcadlo Z_2 , odrazí se, projdou pravým otvorem O_p v zrcadle Z_1 a jdou (mimo zrcadlo Z_0) přes mřížku M a kompenzátory K_1 a K_2 do lomeného dalekohledu D . Ostatní světelné paprsky L' , které dopadají na zrcadlo Z_1 vedle otvoru, se odrazí o zrcadla Z_1 a Z_0 a po posledním odrazu na zrcadle Z_1 jdou do dalekohledu společně s paprsky, které přicházejí po odrazu od zrcadla Z_2 . Počet odrazů mezi zrcadly Z_0 a Z_1 závisí na úhlu dopadu paprsků, který je možno měnit změnou polohy světelného zdroje a kolimátoru.

Jsou-li zrcadla přesně rovnoběžná, vzdálena navzájem např. v poměru 1 : 3 a rozdíl drah obou paprsků je menší než $\pm 3 \mu\text{m}$, objeví se v dalekohledu interferenční proužky.

K nastavení zrcadla Z_2 se odměří vzdálenost přesným měřidlem, zrcadlo se ustaví a posunuje, až se objeví první známky interference. Zaostření se dosáhne pomocí kompenzátorů K_1 a K_2 . Natáčením kompenzátorů se mění optická dráha jednoho svazku paprsků vůči druhému. Rozdíl drah paprsků se určí z úhlu pootočení kompenzátorů a připojí se jako korekce.

Tímto postupem se velice přesně určí vzdálenost zrcadel Z_0 a Z_2 . Vypustíme-li zrcadlo Z_1 , můžeme opakováním postupu určit přesnou vzdálenost dalšího zrcadla, např. ve vzdálenosti 24 m od zrcadla Z_0 . Tak se vytvářejí interferenční komparátory pro invarové dráty.

Významem multiplikační metody bylo zejména značné zvýšení přesnosti při měření geodetických základen a také to, že touto metodou je možné měřit i větší délky přímo v terénu. Použití metody je omezeno pouze na vhodné atmosférické podmínky. Atmosféra pohlcuje světlo a působí rušivě na koherentnost paprsků.

Dalším příkladem dálkoměru využívajícího interference světla je např. Michelsonův interferometr [37.]. Tento interferometr využívá laserového záření.

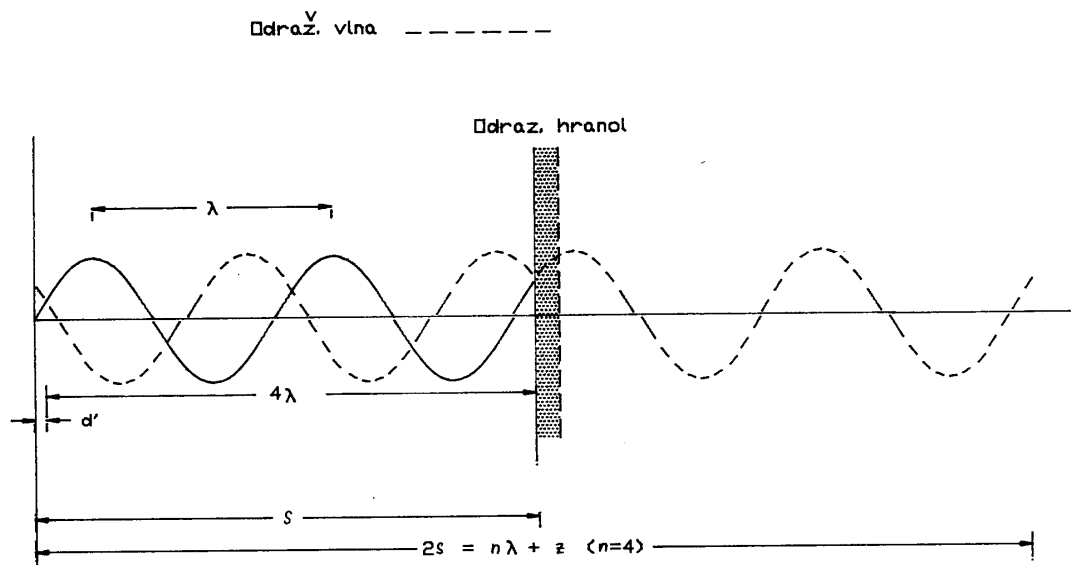
6.2.4 Elektronické dálkoměry

Elektronické měření délek využívá elektromagnetického vlnění. Principem je určení vzdálenosti ze známé rychlosti šíření elektromagnetických vln v a tranzitního času t , který potřebuje vlna k překonání vzdálenosti od vysílače k odraznému zařízení a zpět:

$$2s = \frac{c}{n} * t = v * t .$$

Protože rychlost šíření elektromagnetických vln je velmi velká, je tranzitní čas pomocí něhož se určuje měřená délka, velmi krátký. Měřená délka se tedy častěji určuje z počtu celých period použité vlnové délky a doměrku, který se určí měřením:

$$2s = n * \lambda + d .$$



obr. 6.31 – Princip elektronického měření délek [45.]

Přístroje, kterých se k tomuto účelu používá, dělíme na dvě základní skupiny podle druhu vlnění, které využívají: světelné (světelné vlnění) a radiové dálkoměry (radiové vlnění). Tyto dva druhy vlnění se od sebe liší dosahem a přesností.

Elektronické dálkoměry lze dále dělit dle dosahu na [33.]:

- malé (do 3 až 5 km),
- střední (do 15 km),
- velké (nad 15 km).

6.2.4.1 Šíření elektromagnetického záření v prostoru

V homogenním izotropním prostředí se elektromagnetické vlny šíří stejnou rychlostí, ve všech směrech a přímočaře. Atmosféra je však prostředí různorodé a značně proměnlivé. Tato nestejnorodost atmosféry působí změny jak v rychlosti šíření elektromagnetických vln, tak ve tvaru jejich dráhy. Znalost vlastností atmosféry má vliv na kvalitu elektronicky měřených délek.

Atmosféru z fyzikálního hlediska charakterizuje zejména teplota T , tlak vzduchu p a vlhkost e . Z optického hlediska stav fyzikálních vlastností atmosféry souhrnně vyjadřuje index lomu atmosféry n a jeho změny dn , které mají vliv na rychlost šíření elektromagnetických vln a na geometrické vlastnosti jejich průběhu (např. refrakce). Index lomu atmosféry závisí také na vlnové délce záření λ a mění se v přízemních vrstvách atmosféry v závislosti na místě a času.

Hodnota indexu lomu se určuje empiricky. K určení normálního indexu lomu se používá Searsův-Barrellův vztah

$$n_0 = 1 + 10^{-7} (2876,04 + 16,288\lambda^{-2} + 0,136\lambda^{-4}).$$

Tento vztah platí pro monochromatické, nemodulované světlo vlnové délky λ , šířící se suchým vzduchem při teplotě 0°C a tlaku $101,325\text{ kPa}$.

Index lomu n vzduchu o teplotě T , tlaku vzduchu p a napětí vodních par e je

$$n = 1 + \frac{n_0 - 1}{\alpha T} * \frac{p}{101,325} - \frac{e 41 \cdot 10^{-8}}{\alpha T},$$

kde α je koeficient tepelné roztažnosti vzduchu ($366 \cdot 10^{-5}$).

Šíření elektromagnetického vlnění doprovází některé fyzikální jevy, které mají vliv na výslednou přesnost měřených délek. Jsou to hlavně absorpce, difúze, odraz, difrakce a refrakce⁷.

Absorpce

Při šíření elektromagnetických vln atmosférou je část energie záření pohlcována (absorbována). Tato pohlcená energie se mění na jiné formy energie (převážně na energii tepelnou). Absorpce působí potíže zejména při měření světelnými dálkoměry. Vliv absorpce na ultrakrátké vlny, které používají radiové dálkoměry, je téměř zanedbatelný.

Difúze

Při šíření elektromagnetických vln atmosférou je část energie záření rozptylována (difundována). Rozptyl elektromagnetických vln se projevuje odchylováním částí elektromagnetického signálu

⁷ Podrobnější informace o těchto fyzikálních jevech doprovázejících šíření elektromagnetického záření v prostoru lze nalézt např. v [36.].

od původního směru šíření. K rozptylu dochází zejména u světelných paprsků. U ultrakrátkých radiových vln dosahuje difúze jen malých hodnot.

Odraz

Při průchodu elektromagnetického vlnění různými prostředími dochází na rozhraní těchto prostředí k odrazu a k lomu. K rušivým odrazům může docházet, pokud je v blízkosti dráhy světelných paprsků nějaká odrazná ploška (např. sklo) nebo pokud je např. odrazný hranol prasklý. Do přijímače dálkoměru se pak kromě signálu šířícího se po přímé dráze měřené délky dostávají i nežádoucí a mnohem slabší signály odražené od jiné odrazné plochy. Na vstupu přijímače pak dochází k interferenci obou signálů, jejímž výsledkem je vlnění o stejné frekvenci, ale s posunutou fází. Tím dochází k chybám v měřené délce.

Difrakce

Tento jev se vyskytuje prakticky pouze u radiových vln. Difrakcí se mění intenzita šířícího se elektromagnetického vlnění. Jedná se vlastně o ohyb záření na hranách překážek. Difrakci dělíme na spodní a horní podle toho, zda probíhá přímá dráha signálu v malé výšce nad překážkou, nebo zda dráha signálu tuto překážku protíná. U světelných paprsků nemá difrakce prakticky žádný vliv na přesnost měřené délky.

Refrakce

Refrakcí rozumíme odklon či zakřivení paprsků oproti geometricky přímé spojnici koncových bodů měřené délky v důsledku proměnlivosti prostředí a jeho fyzikálních vlastností (zejména proměnlivosti hustoty prostředí). Vliv refrakce se vyjadřuje koeficientem či úhlem refrakce.

Koeficient refrakce $k = \frac{R}{r}$, kde R je poloměr náhradní koule Země a r je poloměr oblouku

kružnice, kterým se nahrazuje dráha elektromagnetických vln. Hodnota koeficientu k pro lokální, resp. regionální poměry a různá období se určuje z geodetických měření (zejména zenitových úhlů). Jeho průměrná hodnota pro světelné vlny je 0,13 a pro ultrakrátké vlny 0,25. Refrakci je

možné také vyjádřit úhlem refrakce $\rho = k * \frac{\gamma}{2}$, kde k je koeficient refrakce a γ středový úhel

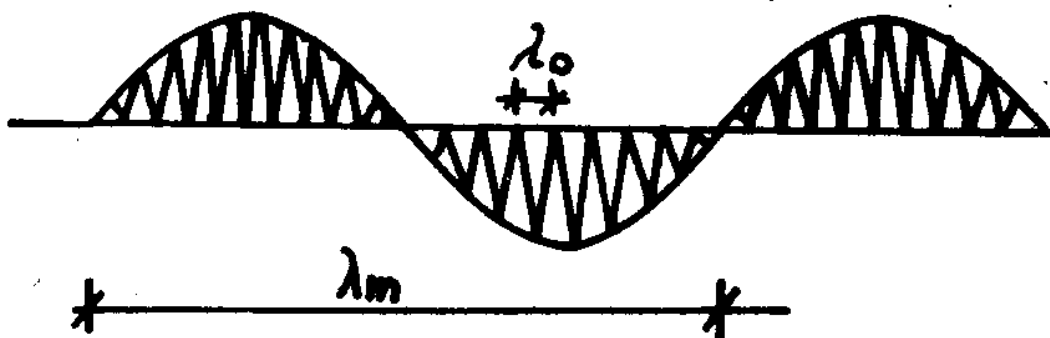
koncových bodů měřené délky příslušející ke středu náhradní koule Země.

Závěr:

Jak jsem se již zmínila, k měření délek elektronickými dálkoměry se používají světelné a radiové vlny. Světelné vlny mají některé příznivější vlastnosti pro měření délek než radiové vlny. Dráha světelných paprsků je méně zakřivená, jejich rychlost méně ovlivňuje nehomogenita prostředí a je možné je vhodným optickým systémem soustřeďovat do úzkého svazku. Naproti tomu špatné atmosférické podmínky nepříznivě ovlivňují měření světelnými dálkoměry. Hustá mlha a silnější déšť je téměř znemožňují. V takovýchto podmínkách je výhodnější použití radiových dálkoměrů.

6.2.4.2 Modulace elektromagnetických vln

Důvodem, proč se elektromagnetické vlny modulují, je jejich malá vlnová délka. Modulací se mění buď jeden nebo více parametrů vlnění. Podle toho, který z parametrů je modulován, se rozeznává modulace amplitudová, frekvenční a fázová. Světlo se moduluje pouze amplitudově, kdežto radiové vlny se mohou modulovat amplitudově, frekvenčně i fázově. Protože v poslední době se používají v geodézii téměř výhradně světelné dálkoměry, má rozhodující význam amplitudová modulace.



obr. 6.32 – Amplitudová modulace sinusového tvaru [40.]

6.2.4.3 Metody elektromagnetického měření délek

Metody, které se používají k elektromagnetickému měření délek, jsou dvojí:

- metody přímého měření tranzitního času t ,
- metody nepřímého měření tranzitního času t (měření fázového rozdílu).

Přímé měření tranzitního času

Metoda přímého měření tranzitního času t se používá jak u světelných tak i radiových dálkoměrů. Elektromagnetické impulsy jsou velmi krátké. Čas, za který projde impuls dvojnásobnou délkou se měří čítačem. Dvojnásobná délka se počítá z rovnice

$$2s = v * t.$$

Protože rychlost šíření elektromagnetických vln v atmosféře je blízká rychlosti šíření světla ve vakuu c ($299\,792\,458 \pm 1,2 \text{ ms}^{-1}$), metody založené na přímém měření tranzitního času se spíše používají pro velké vzdálenosti. Délky několik desítek kilometrů se většinou určují nepřímým měřením času t (měřením fázového rozdílu).

Nepřímé měření tranzitního času

Protože rychlost šíření vlnění je konečná, vrací se vlnění po odrazu v koncovém bodě od odrazného zařízení zpět do přijímače s určitým fázovým posunem $\Delta\varphi_n$. Tento fázový posun, který

představuje doměrek měřené délky, se určí ze vzájemného porovnání okamžité velikosti fáze vlny vysílané a odražené. Protože se délky měří pomocí více frekvencí (2 až 3), umí měřicí zařízení určit i násobek celých vlnových délek λ_m , které se do měřené délky vejdu.

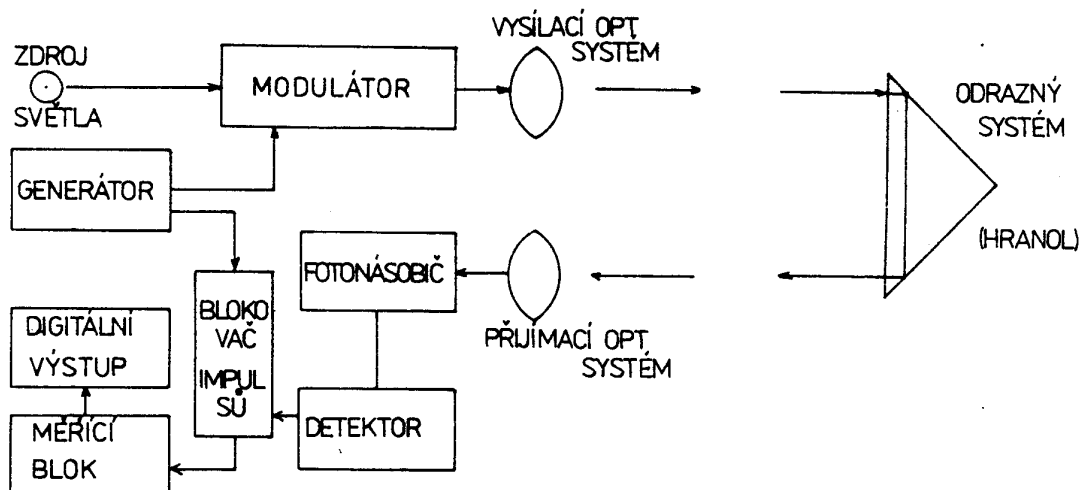
Výsledná délka se tedy počítá ze vztahu

$$2s = n * \lambda_m + d .$$

6.2.4.4 Světelné dálkoměry

Jednotlivé typy světelných dálkoměrů se od sebe liší konstrukčním uspořádáním, zdrojem světelných vln, frekvencí modulovaných vln, druhem modulátoru a uspořádáním vysílacího a přijímacího systému.

Princip činnosti světelných dálkoměrů je následující: zdroj (infračervená polovodičová dioda, helium-neonový laser) umístěný na jednom konci měřené vzdálenosti vyše vhodně modulovanou (amplitudově) světelnou vlnu směrem ke druhému konci měřené vzdálenosti. Tam dopadne vlna na reflektor (odrazný hranol, zrcadlo, odrazná fólie), kterým projde a postupuje opačným směrem k přijímacímu systému. Zde jde vlna do fotonásobiče, kde se světelný signál změnil na elektrický a přes detektor (demodulátor) a blokovací impulsu se přivádí již společně se signálem přiváděným z generátoru do měřicího bloku. Zde se oba signály porovnají a určí se fázový rozdíl odpovídající doměrku měřené vzdálenosti. Výsledná měřená délka se zobrazí na displeji dálkoměru.



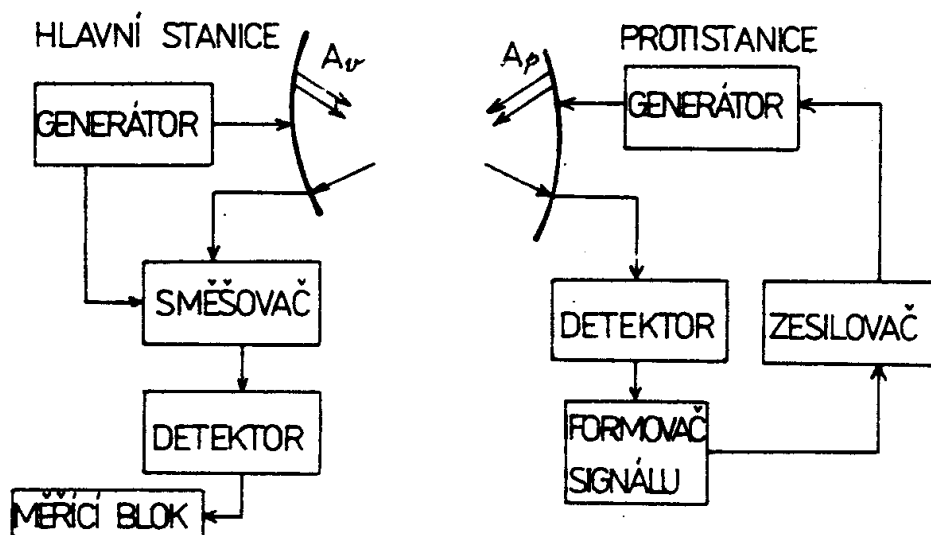
obr. 6.33 – Schéma světelného dálkoměru [51.]

Současné světelné dálkoměry jsou již většinou vybaveny elektronickými výpočetními systémy, které automaticky či poloautomaticky redukuje šikmo měřené vzdálenosti na vodorovné, vypočítávají výškové rozdíly, případně provádějí i souřadnicové výpočty. K přístroji je možné

také připojit registrační zařízení, které měřené údaje registruje a usnadňuje jejich další automatizované zpracování.

6.2.4.5 Radiové dálkoměry

Radiové dálkoměry lze použít i za zhoršených atmosférických podmínek. Tyto dálkoměry se někdy také označují jako tellurometry. Měřickou soupravu tvoří dva přístroje – hlavní (vysílací) stanice a protistanice (funguje jako odrazné zařízení). Princip jejich činnosti je následující: na jednom konci měřené délky se umístí vysílací stanice pracující s centimetrovými vlnami amplitudově či frekvenčně modulovanými. Signál vyslaný z vysílací antény A_v dopadne na přijímací anténu A_p . Přijatý signál se vede do detektoru (demodulátoru), kde se odstraní nosné vlnění. Demodulovaný signál se upraví ve formovači signálu a po zesílení se vrací do generátoru, kde se moduluje a vysílá anténou A_p zpět k hlavní stanici. Zde je přijat, ve směšovači se „sejde“ se signálem vysílaným z hlavní stanice. Oba signály jsou v detektoru demodulovány a v měřícím bloku fázově porovnány. Ze zjištěného fázového rozdílu (doměrku měřené délky) je poté automaticky určena měřená vzdálenost.



obr. 6.34 – Schéma radiového dálkoměru [51.]

Dosah radiových dálkoměrů je až 100 km, poměrná chyba je ovšem větší než u dálkoměrů světelných.

6.2.4.6 Přesnost elektronických dálkoměrů

Přesnost elektronických dálkoměrů je dána vztahem

$$m_d = a + b * s * 10^{-6} \text{ [mm]},$$

kde konstanty a , b jsou udány výrobcem dálkoměru. Obvykle je $a = 0,1$ až 10 mm, $b = 1$ až 20 a hodnota vzdálenosti s se dosazuje v km.

K zajištění správnosti měřených délek je samozřejmě nutné zajistit potřebný servis používaných dálkoměrů a pomocných přístrojů (aneroidů, teploměrů, vlhkoměrů). Jedná se zejména o kontrolu modulační frekvence (násobné konstanty), součtové konstanty, krátkoperiodické chyby dálkoměru a chyb ze stupnic pomocných přístrojů.

Základní kontrola dálkoměru se provádí na srovnávací základně v Praze ve Hvězdě a v Košticích. Kontrola modulační frekvence se provádí porovnáním s frekvenčním normálem. Součtová konstanta se rovná rozdílu délky srovnávací základny a délky určené dálkoměrem. Součtová konstanta odrazného systému se obvykle neurčuje a uvažuje se hodnota udaná výrobcem. Určení krátkoperiodické chyby spočívá v nalezení vztahu mezi čtením na displeji dálkoměrů a rozdíly v měřených délkách, který má zpravidla periodický průběh. Obvykle se provádí graficky. Ve směru osy x se vynášejí hodnoty čtení displeje dálkoměru a ve směru osy y rozdíly délek. Vzniklá funkční závislost se vyjádří proložením bodové řady hladkou křivkou. Z této funkční závislosti se vypočtou opravy, o které se opraví naměřené délky. Pomocné přístroje se kalibrují např. v Hydrometeorologickém ústavu.

Přehled vybraných dálkoměrů spolu se základními charakteristikami je uveden v následující tabulce:

Radiové dálkoměry				
Výrobce	Typ	Dosah	Přesnost	Hmotnost
Telluometr London	MRA-2	0.2 - 60 km	$5.0 \text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	17 kg
Telluometr London	MRA-3	0.1 - 50 km	$1.5 \text{ cm} + 4 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	16 kg
Telluometr London	MRA-4	0.05 - 60 km	$0.3 \text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	19 kg
Telluometr London	MRA-101	0.1 - 50 km	$1.5 \text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	12 kg
MOM Budapešť	Get A2+	0.1 - 50 km	$2.0 \text{ cm} + 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	5 kg
Wild Heerbrugg	Distomat DI-50	0.1 - 50 km	$2.0 \text{ cm} + 1 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	18 kg
Siemens Zürich	SIAL MD 60-S	0.02 - 150 km	$2.0 \text{ cm} + 3 \cdot 10^{-6} \text{ s}$	11.6 kg

Světelné dálkoměry				
Výrobce	Typ	Dosah km	Přesnost	Hmotnost kg
Zeiss	EOK 2000	1.2 - 2.5	10mm	12
Zeiss	EOT 2000	1.0 - 3.0	10mm	10.5
Zeiss	EOS	10.0 - 15.0	5mm + 2ppm	27
Zeiss	RECOTA	1.0 - 3.0	5mm + 2ppm	12.5
Zeiss	RETA	1.0 - 3.0	5mm + 2ppm	11
Kern	DM 102	1.0 - 1.7	5mm + 5ppm	1.7
Kern	DM 501	1.0 - 2.0	5mm + 5ppm	1.6
Kern	DM 502	1.2 - 2.0	3mm + 5ppm	1.6
Kern	DM 503	1.5 - 5.0	3mm + 2ppm	1.6
Kern	ME 3000	1.5 - 3.0	0.2mm + 1ppm	14.5
Wild	Citation CI 410	0.6 - 2.8	5mm + 5ppm	2.6
Wild	Citation CI 450	0.8 - 4.0	5mm + 5ppm	2.8
Wild	Distomat Di 4	0.6 - 2.0	5mm + 5ppm	1.1
Wild	Distomat Di 4 L	1.2 - 5.0	5mm + 5ppm	1.1
Wild	Distomat DI 5	1.2 - 7.0	5mm + 2ppm	1.1
AGA	Geodimeter 12	0.7 - 1.7	5mm + 5ppm	2.5
AGA	Geodimeter 110	0.7 - 3.0	5mm + 5ppm	2.5
AGA	Geodimeter 122	2.5 - 5.5	5mm + 5ppm	2.8
AGA	Geodimeter 210	2.3 - 5.5	3mm + 2ppm	
AGA	Geodimeter 216	1.0 - 2.2	5mm + 5ppm	
AGA	Geodimeter 220	2.0 - 7.0	2mm + 2ppm	
Sokkisha	RED MINI 2	0.8 - 1.5	5mm + 5ppm	0.9
Sokkisha	RED 3	2.0 - 5.0	5mm + 5ppm	
Sokkisha	RED 2	2.0 - 5.0	5mm + 5ppm	
Sokkisha	SDM 3	0.8 - 2.5	5mm + 5ppm	7.6
Sokkisha	OT 20E	3	3mm + 2ppm	5
Opton	Eldi 1	3.0 - 7.0	5mm + 2ppm	8
Opton	Eldi 2	0.7 - 2.0	5mm + 2ppm	4.2
Opton	Eldi 3	0.4 - 1.0	10mm + 2ppm	
Opton	Elta 20	1.6 - 2.5	5mm + 2ppm	13.5
Opton	Elta 3	1.2 - 2.0	10mm + 2ppm	
Topcon	GTS 2	1.4 - 2.4	5mm + 5ppm	6
Topcon	ET 1	1.4 - 2.0	5mm + 5ppm	7.5
Topcon	GTS 4	1.4 - 4.0	3mm + 2ppm	6.9
Topcon	DM A 5	0.6 - 1.1	5mm + 7ppm	1.4

tab. 6.1 – Přehled vybraných elektronických dálkoměrů

6.3 Redukce měřených délek

Před prováděním tzv. matematických redukcí je třeba, aby měřené délky byly opraveny o redukce fyzikální. Tyto redukce redukuje naměřenou délku o vliv prostředí. Způsob výpočtu těchto redukcí je zpravidla uveden v návodu pro použití jednotlivých typů dálkoměrů. Redukce se většinou zavádí přímo do paměti dálkoměru.

6.3.1 Převod na referenční plochu

Převod měřené délky na referenční plochu probíhá v šesti krocích [62.]:

- a) k měřené délce D vypočteme délku přímé spojnice d koncových bodů měřené délky,
- b) k přímé spojnici se vypočte odpovídající délka tětivy t na vhodně zvolené náhradní kouli o poloměru R ,
- c) k tětivě t se vypočte příslušný kruhový oblouk s' ,
- d) oblouk s' se převede na eliptický oblouk \bar{s} ,
- e) eliptický oblouk \bar{s} se převede na oblouk elipsy s_0 ,
- f) oblouk elipsy s_0 se převede na délku geodetické čáry s .

ad a) výpočet přímé spojnice d koncových bodů měřené délky

Měřená délka D leží v normálové rovině dané normálou k elipsoidu v počátečním bodě P_1 . Tuto délku lze považovat za oblouk kružnice o poloměru

$$r = \frac{R}{k},$$

kde R je poloměr Země,
 k je refrakční koeficient.

Přímou spojnice d bodů P_1 a P_2 vypočteme ze vzorce:

$$d = 2r \sin \frac{D}{2r}. \quad (1)$$

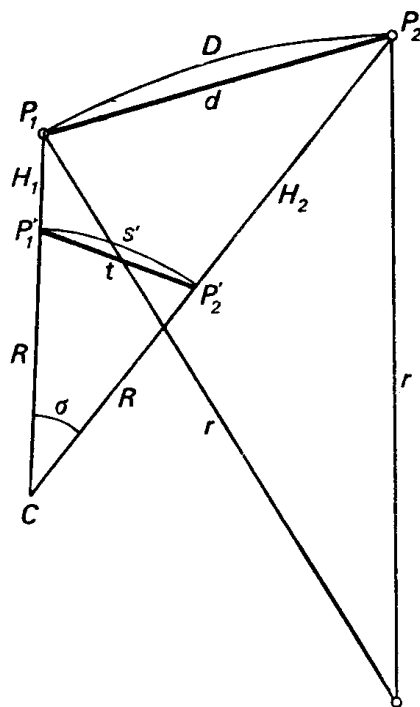
Funkci $\sin \frac{D}{2r}$ rozvineme v řadu a dosadíme do vzorce (1):

$$d = D - \frac{D^3}{24r^2} + \frac{D^5}{1920r^4} - \dots$$

Třetí člen je nepatrný a tedy může být zanedbán:

$$d = D - \frac{D^3}{24r^2} = D - \Delta D. \quad (2)$$

Teprve pro $D = 25$ km dosáhne korekce ΔD hodnoty 1 mm (u světelných vln).



obr. 6.35 – Převod měřené délky D na přímou spojnicí d , jí odpovídající tětivu t a jí odpovídající kruhový oblouk s' [62.]

ad b) výpočet tětivy t k dané hodnotě d

Na obrázku značí H_1 výšku bodu P_1 , H_2 výšku bodu P_2 nad náhradní koulí o poloměru R . V trojúhelníku P_1P_2C platí kosinová věta:

$$d^2 = (R + H_1)^2 + (R + H_2)^2 - 2(R + H_1)(R + H_2) \cos \sigma. \quad (3)$$

Stejně i v trojúhelníku $P_1'P_2'C$ platí kosinová věta:

$$t^2 = 2R^2 - 2R^2 \cos \sigma. \quad (4)$$

Z rovnice (4) vyjádříme $\cos \sigma$:

$$\cos \sigma = \frac{2R^2 - t^2}{2R^2} = 1 - \frac{t^2}{2R^2}$$

a dosadíme do rovnice (3). Po úpravě dostaneme:

$$d^2 = (H_2 - H_1)^2 + \left(1 + \frac{H_1}{R}\right) \left(1 + \frac{H_2}{R}\right) t^2.$$

Vyjádříme t a označíme rozdíl $H_2 - H_1 = h$:

$$t = \sqrt{\frac{d^2 - h^2}{\left(1 + \frac{H_1}{R}\right) \left(1 + \frac{H_2}{R}\right)}}. \quad (5)$$

ad c) výpočet kruhového oblouku s' k těživě t

Kruhový oblouk s' vypočteme ze vzorce:

$$s' = 2R \arcsin \frac{t}{2R}.$$

Pokud funkci $\arcsin \frac{t}{2R}$ rozvineme v řadu, dostaneme po úpravě:

$$s' = t + \frac{t^3}{24R^2} + \frac{3t^5}{640R^4} + \dots$$

Třetí člen se obvykle zanedbává, potom:

$$s' = t + \frac{t^3}{24R^2} = t + \Delta t.$$

Pro $t < 10$ km je $\Delta t < 1$ mm.

ad d) převod kruhového oblouku s' na eliptický oblouk \bar{s}

Dosadíme-li za $R = N_1$ (příčný poloměr křivosti v bodě P_1), pak

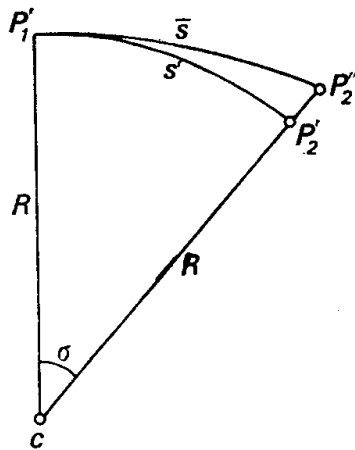
$$s' = N_1 \sigma.$$

Pokud je $\bar{s} < 100$ km, lze pro délku \bar{s} psát [62.]:

$$\bar{s} = N_1 \sigma - \frac{1}{6} N_1 \sigma^3 \eta_1^2 \cos^2 \alpha_1,$$

kde α_j je azimut normálového řezu v bodě P_1 ,

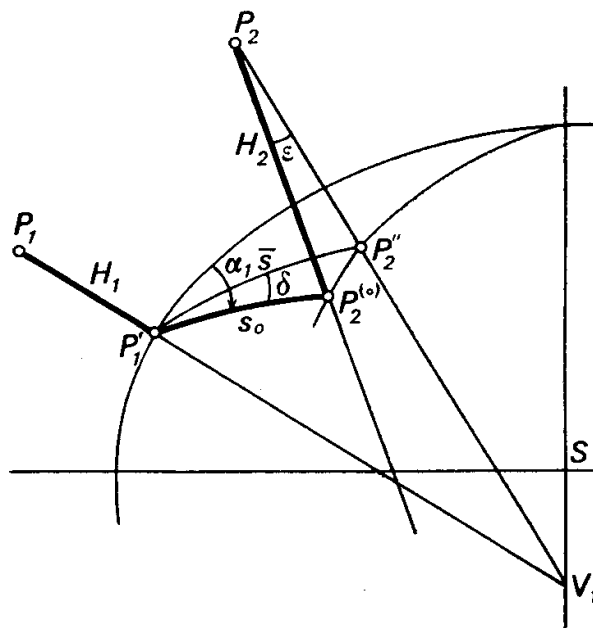
$\eta_1^2 = e'^2 \cos^2 \varphi_1$, kde e'^2 je druhá excentricita, φ je geodetická šířka.



obr. 6.36 – Převod kruhového oblouku na eliptický [62.]

Rozdíl obou délek ($\bar{s} - s$) je pro délky do 25 km menší než 0,2 mm a tedy tato korekce může být zanedbána.

ad e) převod oblouku \bar{s} na oblouk elipsy



obr. 6.37 – Převod eliptického oblouku na oblouk elipsy [62.]

Protože úhel δ mezi oblouky \bar{s} a s_0 je velmi malý, můžeme psát:

$$s_0 - \bar{s} = \widehat{P_2^{(0)}P_2''} = -H_2 \varepsilon. \quad (6)$$

Úhel ε se může vyjádřit vztahem [62.]:

$$\varepsilon = \frac{\bar{s}}{N_1} \eta_1^2 \cos \alpha_1. \quad (7)$$

Po dosazení (7) do (6) dostaneme:

$$s_0 - \bar{s} = -\bar{s} \frac{H_2}{N_1} \eta_1^2 \cos \alpha_1 = -\bar{s} \frac{H_2}{R} \eta_1^2 \cos \alpha_1.$$

ad f) převod oblouku elipsy s_0 na délku geodetické čáry s

Pro rozdíl délky normálového řezu s_0 a délky geodetické čáry s platí vztah [62.]:

$$s - s_0 = -\frac{s}{360} \left(\frac{s}{N_1} \right)^4 \eta_1^4 \sin^2 2\alpha_1.$$

Pro $s = 1000$ km dosáhne tento rozdíl maximálně 0,08 mm a je tedy prakticky zanedbatelný.

Protože v současnosti se přesnost elektrooptických dálkoměrů charakterizuje relativní chybou až $1 \cdot 10^{-6}$, je třeba počítat korekce velmi přesně. Proto se dnes spíše pro převod měřené délky na referenční plochu používá **postup podle Rinnera**:

K naměřené délce D se vypočte přímá spojnice d koncových bodů měřené délky podle vztahu (2).

Tětiva t se vypočte podle vztahu (5) na kouli o poloměru $R = N_1$.

K tětivě t se vypočte délka přímé prostorové spojnice mezi průměty koncových bodů měřené délky na elipsoid, tedy elipsoidická tětiva t_e . K této tětivě se vypočte délky geodetické čáry s na elipsoidu.

Pro délky do 100 km platí zjednodušené vztahy:

$$t_e = t \left(1 - \frac{H_1 + H_2}{2N_1} \eta_1^2 \cos^2 \alpha_1 + \frac{H_1^2 + H_2^2}{2N_1^2} \eta_1^2 \cos^2 \alpha_1 + \frac{H_1 + 2H_2}{2N_1^2} t \eta_1^2 \operatorname{tg} \varphi_1 \cos \alpha_1 \right).$$

$$s = t_e \left[1 + \frac{1}{24} \left(\frac{t_e}{R_0} \right)^2 + \frac{3}{640} \left(\frac{t_e}{R_0} \right)^4 \right],$$

kde $R_0 = \sqrt{R_1 R_2}$,

$$\text{kde } R_1 = \frac{N_1}{1 + \eta_1^2 \cos^2 \alpha_1} \text{ a } R_2 = \frac{N_2}{1 + \eta_2^2 \cos^2 \alpha_2}.$$

Pro délky do 50 km lze tyto vzorce dále zjednodušit:

Pokud do vzorce (5) dosadíme

$$R = R_1 = \frac{N_1}{1 + \eta_1^2 \cos^2 \alpha_1},$$

dostaneme

$$t \approx t_e = \sqrt{\frac{d^2 - h^2}{\left(1 + \frac{H_1}{R_1}\right)\left(1 + \frac{H_2}{R_1}\right)}}.$$

Délku geodetické čáry s k těživě t_e můžeme počítat s postačující přesností jako délku oblouku kružnice o poloměru R_1 , tedy

$$s = t_e + \frac{t_e^3}{24R_1^2} = t_e + \Delta t_e.$$

6.3.2 Převod do zobrazovací roviny

V praxi je třeba pro řešení geodetických úloh v zobrazovací rovině znát měřené délky v rovině kartografického zobrazení (zobrazovací rovině). V geodézii se používá konformních zobrazení, pro něž lze použít obecného vzorce:

$$S = \frac{1}{6}(m_1 + 4m_n + m_2)s, \quad (8)$$

kde s je délka na referenčním elipsoidu,
 m_1, m_n, m_2 jsou měřítka (zkreslení) v počátečním, středním a koncovém bodě geodetické čáry.

Převod do roviny Křovákova zobrazení

V Křovákově zobrazení se nejprve konformně zobrazuje Besselův elipsoid na Gaussovu kouli. Zkreslení délek při tomto zobrazení dosáhne pro strany dlouhé 60 km maximálně ± 4 mm a zpravidla se zanedbává.

V praxi se používají tabulky (obr. 6.38) hodnot délkového zkreslení, které jsou sestaveny k argumentu $R_i = \sqrt{X_i^2 + Y_i^2}$, kde X_i a Y_i jsou rovinné souřadnice uvažovaného bodu. Určené hodnoty zkreslení⁸ se pak dosazují do vzorce (8).

R (km)	Měřitko (m)	Diference pro 1 km	R (km)	Měřitko (m)	Diference pro 1 km	R (km)	Měřitko (m)	Diference pro 1 km
1150	1,000 1804	-38,0	1250	0,999 9287	-11,4	1350	0,999 9327	+13,2
1155	1,000 1614	-36,6	1255	0,999 9230	-10,2	1355	0,999 9393	+14,2
1160	1,000 1431	-35,4	1260	0,999 9179	-8,8	1360	0,999 9464	+15,6
1165	1,000 1254	-33,8	1265	0,999 9135	-7,6	1365	0,999 9542	+16,6
1170	1,000 1085	-32,4	1270	0,999 9097	-6,2	1370	0,999 9625	+17,8
1175	1,000 0923	-31,2	1275	0,999 9066	-5,2	1375	0,999 9714	+18,8
1180	1,000 0767	-29,8	1280	0,999 9040	-3,8	1380	0,999 9808	+20,2
1185	1,000 0618	-28,4	1285	0,999 9021	-2,6	1385	0,999 9909	+21,2
1190	1,000 0476	-27,0	1290	0,999 9008	-1,4	1390	1,000 0015	+22,4
1195	1,000 0341	-25,8	1295	0,999 9001	-0,2	1395	1,000 0127	+23,6
1200	1,000 0212	-24,4	1300	0,999 9000	+1,2	1400	1,000 0245	+24,8
1205	1,000 0090	-23,0	1305	0,999 9006	+2,4	1405	1,000 0369	+25,8
1210	0,999 9975	-21,8	1310	0,999 9018	+3,4	1410	1,000 0498	+27,0
1215	0,999 9866	-20,4	1315	0,999 9035	+4,8	1415	1,000 0633	+28,0
1220	0,999 9764	-19,2	1320	0,999 9059	+6,0	1420	1,000 0773	+29,4
1225	0,999 9668	-17,8	1325	0,999 9089	+7,0	1425	1,000 0920	+30,2
1230	0,999 9579	-16,6	1330	0,999 9124	+8,4	1430	1,000 1071	+31,6
1235	0,999 9496	-15,2	1335	0,999 9166	+9,6	1435	1,000 1229	+32,6
1240	0,999 9420	-14,0	1340	0,099 9214	+10,8	1440	1,000 1392	+33,6
1245	0,999 9350	-12,6	1345	0,999 9268	+11,8	1445	1,000 1560	+34,8
1250	0,999 9287		1350	0,999 9327		1450	1,000 1734	

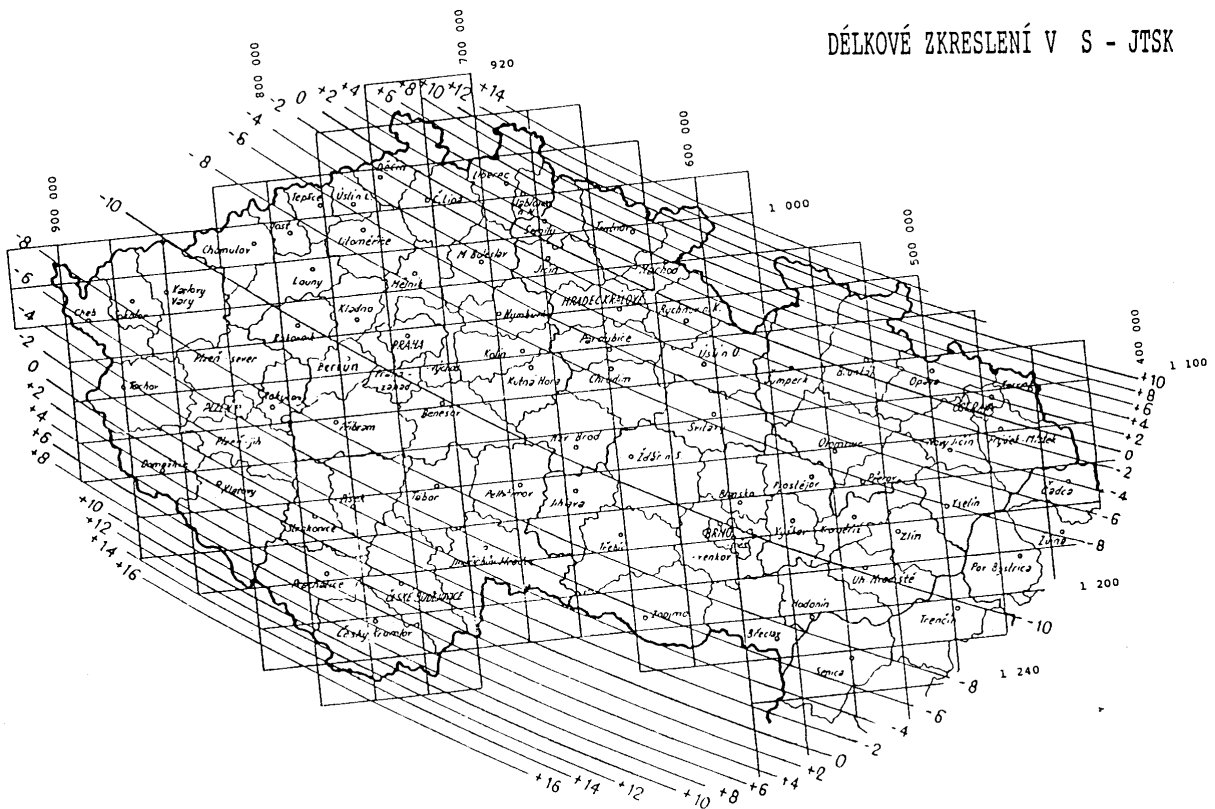
obr. 6.38 - Tabulka hodnot délkového zkreslení k argumentu R [55.]

Pro délky kratší než 5 km lze použít vzorce pro zkreslení ve středu vzdálenosti

$$S = s * m_n .$$

Délkové korekce v Křovákově zobrazení dosahují na našem území hodnot -10 až +14 cm na jeden kilometr.

⁸ Tabelovaná hodnota m' značí jednu šestinu reciproké hodnoty, tj. $m = 1/6m'$.



obr. 6.39 – Průběh délkového zkreslení v Křovákově zobrazení [45.]

Převod do roviny Gaussova zobrazení

V Gaussově zobrazení je zkreslení funkcí dvou proměnných a vzorec (8) se upravuje na tvar:

$$S = \left[1 + \frac{1}{6R_m^2} (y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2) - \frac{5}{288R_m^4} (y_1 + y_2)^4 \right] * s, \quad (9)$$

kde y_1, y_2 jsou pořadnice koncových bodů strany,

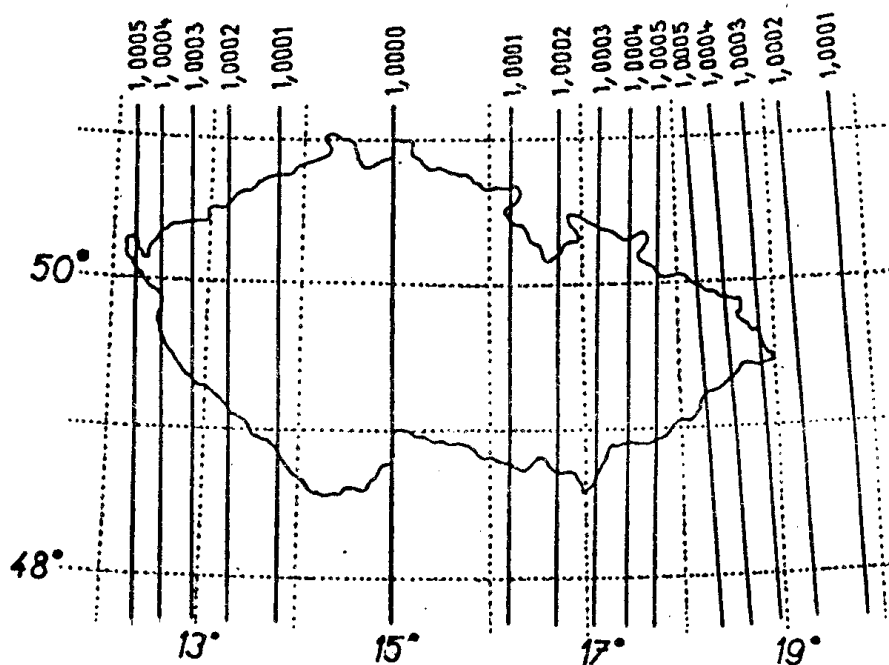
$R_m = \sqrt{MN}$ je střední poloměr křivosti elipsoidu vypočtený ke střední zeměpisné šířce

$$\varphi_m = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}.$$

Vzorec (9) postačí pro délky do 60 km. Pro strany do 20 km pak lze zanedbat třetí člen a používat vzorec:

$$S = \left[1 + \frac{1}{6R_m^2} (y_1^2 + y_1 y_2 + y_2^2) \right] * s.$$

Délkové korekce v Gaussově zobrazení dosahují na našem území maximálních hodnot ± 57 cm na jeden kilometr na okraji šestistupňového pásu a ± 14 cm na jeden kilometr na okraji třístupňového pásu.



obr. 6.40 – Průběh délkového zkreslení v Gaussově zobrazení [5.]

Velmi podrobný výklad této problematiky lze nalézt v [4.].

6.3.3 Topografická redukce

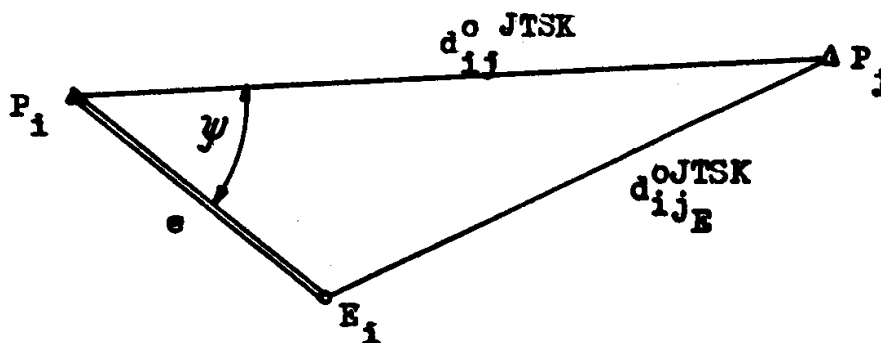
Pojem topografická redukce značí centraci excentricky zaměřených délek. Předpokládáme, že excentricky zaměřená délka je již matematicky redukována. Vlastní řešení pak již spočívá pouze v řešení vztahů v rovinných trojúhelnících.

Jednostranná centrace délky s úhlem ψ měřeným na centru

Měřena je excentrická délka $d_{ij_E}^m \rightarrow d_{ij_E}^{oJTSK}$ (excentrická délka opravená o matematické

redukce), excentricita e a úhel ψ .

Určujeme centrickou délku d_{ij}^{oJTSK} .



obr. 6.41 - Jednostranná centrace délky s úhlem měřeným na centru [1.]

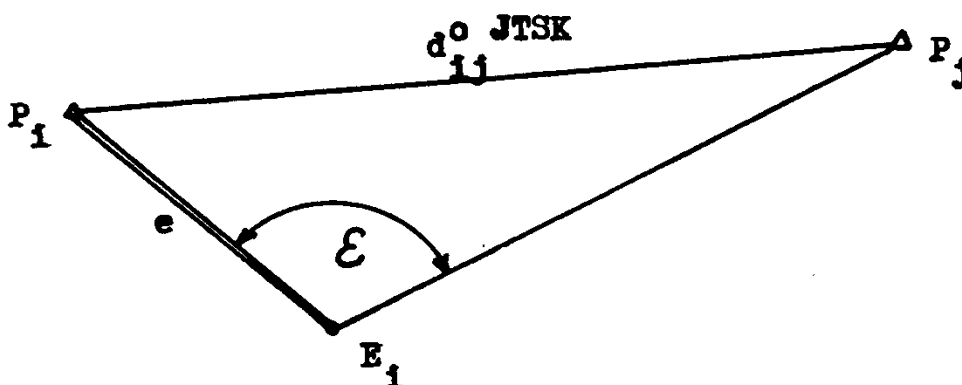
Centrická délka d_{ij}^{oJTSK} se vypočte ze vztahu

$$d_{ij}^{oJTSK} = e * \cos \psi \pm \sqrt{\left(d_{ijE}^{oJTSK}\right)^2 - e^2 * \sin^2 \psi}.$$

Jednostranná centrace délky s úhlem ε měřeným na excentru

Měřena je excentrická délka $d_{ijE}^m \rightarrow d_{ijE}^{oJTSK}$ (excentrická délka opravená o matematické redukce), excentricita e a úhel ε .

Určujeme centrickou délku d_{ij}^{oJTSK} .



obr. 6.42 - Jednostranná centrace délky s úhlem měřeným na excentru [1.]

Centrická délka d_{ij}^{oJTSK} se vypočte z kosinové věty pro stranu podle vztahu

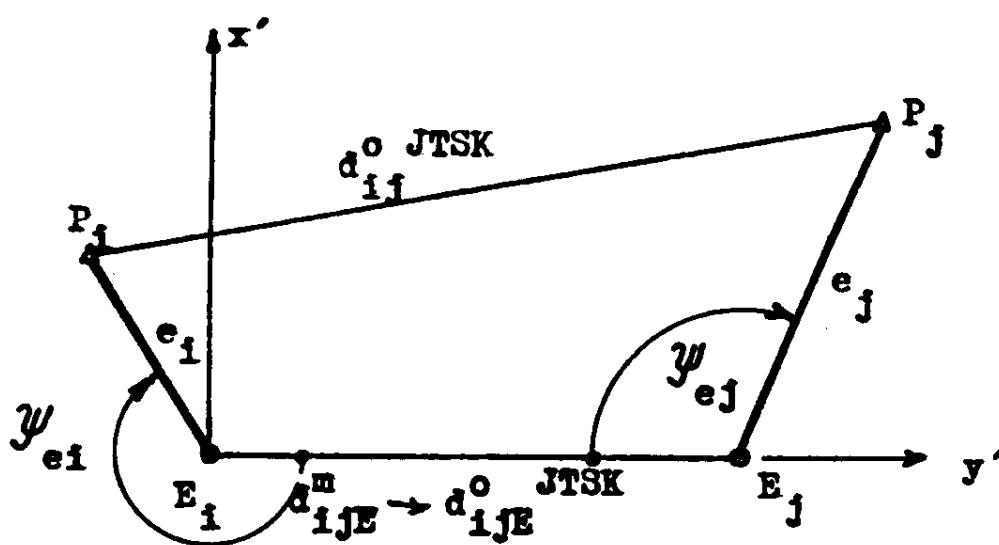
$$d_{ij}^{oJTSK} = \left| \sqrt{e^2 + \left(d_{ijE}^{oJTSK} \right)^2 - 2 * e * d_{ijE}^{oJTSK} * \cos \varepsilon} \right|.$$

Oboustranná centrace délky s úhly měřenými na excentrických stanoviskách

Měřeny jsou excentrická délka $d_{ijE}^m \rightarrow d_{ijE}^{oJTSK}$ (excentrická délka opravená o matematické

redukce), excentricity e_1 a e_2 a úhly ψ_{ei} a ψ_{ej} .

Určujeme centrickou délku d_{ij}^{oJTSK} .



obr. 6.43 - Oboustranná centrace délky s úhly měřenými na excentrických stanoviskách [1.]

Zavedeme místní souřadnicovou soustavu s počátkem v bodě E_i a osou y' vloženou do směru strany $\overline{E_i E_j}$. Nejprve určíme směrníky $\sigma_i = \psi_{ei} + 100^s$ a $\sigma_j = \psi_{ej} - 100^s$. Úlohou rajonu (viz. kapitola Souřadnicové výpočty) určíme souřadnice $P_i[x'_i, y'_i]$ a $P_j[x'_j, y'_j]$, ze kterých určíme

centrickou délku d_{ij}^{oJTSK} podle vzorce

$$d_{ij}^{oJTSK} = \sqrt{\Delta x_{ij}'^2 + \Delta y_{ij}'^2}.$$

6.4 Elektronické tachymetry

Až do roku 1971 se kombinoval elektronický dálkoměr s optickým teodolitem. Roku 1971 byl do geodetické praxe uveden první elektronický přístroj, který automaticky určoval úhly i délky – AGA 700 firmy Geodimeter. Označení těchto přístrojů je v literatuře rozdílné, používají se názvy jako digitální, číslicový, kompaktní, přesný elektronický či elektronický tachymetr. Výrobci používají označení totální stanice.

Vybavení elektronických tachymetrů

Zdrojem proudu pro elektronické tachymetry jsou interní baterie s různým napětím a kapacitou. K některým přístrojům lze dokoupit externí baterii s vyšší kapacitou. Externí baterie se připojuje k elektronickému tachymetru kabelem. Baterie se dobíjejí nabíječkami (doba nabíjení bývá 14 hodin) či rychlonabíječkami (doba nabíjení se pohybuje okolo 1 až 1 a půl hodiny).

Ke čtení úhlů se používají inkrementální či kódové kruhy nebo je také možné použití dynamického či elektroindukčního systému (viz. kapitola Geodetické přístroje).

K měření délek se používají světelné dálkoměry s přesností měřené délky v rozsahu středních chyb od $1\text{mm} + 1\text{ppm} \cdot s$ až $5\text{mm} + 5\text{ppm} \cdot s$ s dosahem od 500 m do 5 km, výjimečně do 15 km.

Přístroje se horizontují pomocí dvojosého kompenzátor (viz. kapitola Geodetické přístroje) a krabicové libely.

K centraci přístroje se používá optické olovnice (viz. kapitola Geodetické přístroje) vestavěné do alhidády či trojnožky. Nejnovější přístroje mají i laserový paprsek vyzařovaný ve směru vertikální osy.

Elektronické tachymetry jsou vybaveny dvěma páry ustanovek. Pro speciální účely byly vyvinuty přístroje s pohybem servomotory.

Měřené veličiny a další informace se zobrazují na jednom či dvojici displejů. Nejčastěji se vyrábí čtyřřádkové displeje. Tři řádky zobrazují měřená data a jeden řádek nabízí význam funkčních kláves umístěných přímo u displeje.

K registraci měřených veličin a dalších doplňujících informací jsou přístroje vybaveny pevnou pamětí či paměťovou kartou. Registrovaná data lze samozřejmě při měření prohlížet a případně také editovat.

Do příslušenství elektronických tachymetrů patří stativ, již zmíněná nabíječka, odrazný hranol s držákem, trojnožka a další stativ či výtyčka pod hranol. Hranolové systémy jsou tvořeny jedním či více hranoly s pevnými nebo naklonitelnými držáky. Bývají doplněny signálními terči, cílovými výtyčkami, minihranoly, odraznými terči apod. Přístroje s pamětí jsou vybaveny propojovacími kabely k počítači, případně čtecím zařízením. K rozšíření využitelnosti přístroje

mohou být elektronické tachymetry doplněny speciálním vybavením, např. magnetickým usměrňovačem, hranolovým okulárem a dalšími pomůckami.

Elektronické tachymetry mohou mít vestavěné programy umožňující zpracování přímo měřených veličin, souřadnicové úlohy a další výpočty. Samozřejmostí je převod polárních souřadnic na pravouhlé a výpočet převýšení. V případě měření nadbytečného počtu veličin jsou přístroje schopny počítat průměry, odhady přesnosti, případně i provést vyrovnání MNČ. Následující kancelářské práce jsou tak sníženy na minimum. V současnosti se již vyrábějí přístroje s novou filozofií – vytváření mapy přímo v terénu (firma Spectra Precision).

Přehled elektronických tachymetrů spolu se základními charakteristikami je uveden v následující tabulce:

Výrobce	Teodolit	Dosah dálkoměru km	Počet hranolů	Přesnost
Leica	TC 400	0.7	1	5mm+5ppm
		1.1	3	
Leica	TC 500	1.1	1	3mm+3ppm
		1.6	3	
Leica	TC 605	1.1	1	3mm+3ppm
		1.6	3	
Leica	TC 805	2.5	1	2mm+2ppm
		3.5	3	
Leica	TC 905	2.5	1	2mm+2ppm
		3.5	3	
Leica	TC 1100	2.5	1	2mm+2ppm
		3.5	3	
Leica	TC 1105	2.5	1	2mm+2ppm
		3.5	3	
Leica	TC 1800	2.5	1	1mm+2ppm
		3.5	3	
Carl Zeiss	Elta 2	1.8	1	2mm+2ppm
		2.5	3	
		3	7	
Carl Zeiss	Elta 3	1.6	1	3mm+2ppm
		2	3	
Carl Zeiss	Elta 4	1	1	3mm+3ppm
		1.5	3	
Carl Zeiss	Elta 50 R	1.3	1	5mm+3ppm
		1.6	3	
Sokkia	SET5F	1.2	1	3mm+2ppm
		1.6	3	
Sokkia	SET2000	2.5	1	2mm+2ppm
		3.3	3	
Sokkia	SET3000	2.3	1	2mm+2ppm

		3.1	3	
Sokkia	SET4000	1.7	1	2mm+2ppm
		2.2	3	
Sokkia	SET500	2.1	1	3mm+2ppm
		2.3	3	
Sokkia	SET600	1.7	1	3mm+2ppm
		1.9	3	
Spectra Precision	Geodimeter 464	3.3	1	2mm+3ppm
		4.5	3	
Spectra Precision	Geodimeter 468DR	2	1	5mm+5ppm
Spectra Precision	Geodimeter 510	1	1	3mm+3ppm
		1.6	3	
Spectra Precision	Geodolite 506	1.2	1	5mm+5ppm
		1.8	3	
Topcon	GTS-211D	1.1	1	3mm+2ppm
		1.7	3	
Topcon	GTS-6A	2.1	1	3mm+2ppm
		2.9	3	
Topcon	GTS-310	2.5	1	2mm+2ppm
		3.3	3	
Topcon	GTS-700	2.5	1	2mm+2ppm
		3.3	3	
Topcon	GTS-800	2.1	1	2mm+2ppm
		2.8	3	
Nikon	DTM-460	3.6	1	2mm+2ppm
Nikon	DTM-520	2.8	1	2mm+2ppm
Nikon	DTM-550	3.6	1	2mm+2ppm
Nikon	DTM-820	2.3	1	3mm+3ppm
Nikon	DTM-850	3.1	1	2mm+2ppm

tab. 6.2 – Přehled vybraných elektronických tachymetrů

7. Souřadnicové výpočty v rovině

7.1 Základní vlastnosti

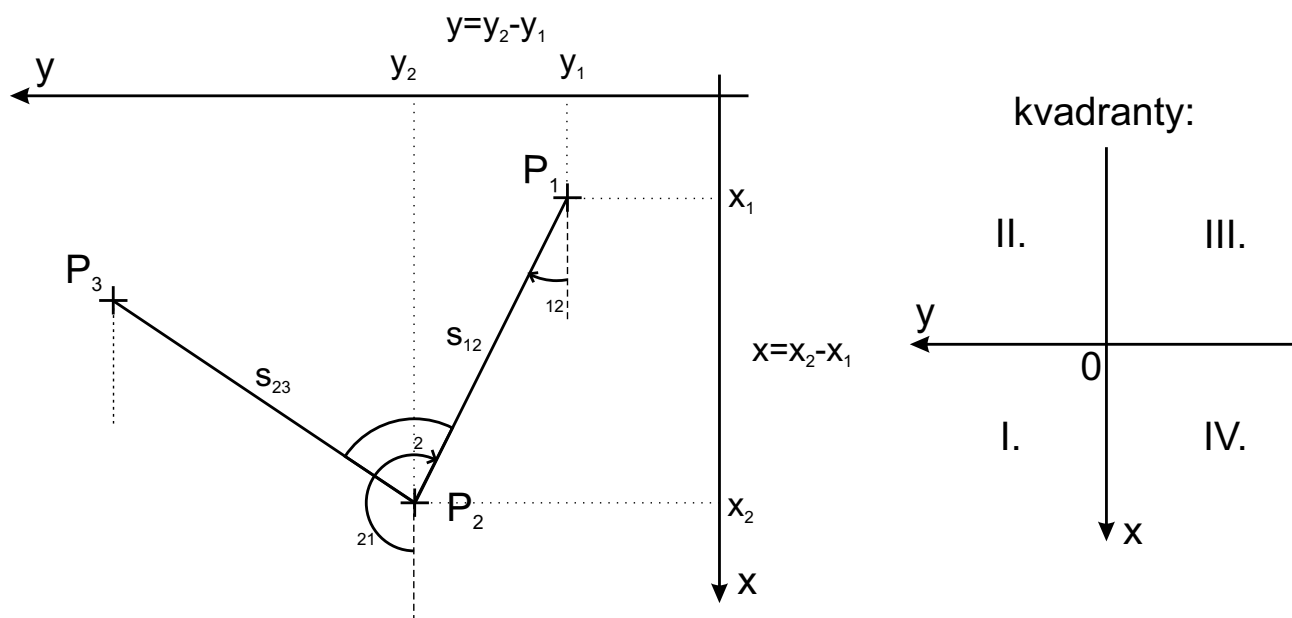
Soustava souřadnic

Určit polohu naměřených bodů znamená určit souřadnice těchto bodů v nějakém souřadnicovém systému. Výpočty budeme provádět pouze v rovině, potřebujeme tedy dvě osy x , y . Geodeticky kladný směr je směr matematicky záporný, tedy směr otáčení ručiček na hodinkách.

Pro zeměměřické práce v civilním sektoru se v České republice používá systém S-JTSK. Ten je určen Křovákovým zobrazením a jeho kladná poloosa x směřuje k jihu, kladná poloosa y potom vede na západ. Tuto orientaci os budeme dodržovat pro názornost i ve výpočtech. Celé území České republiky leží v I. kvadrantu, souřadnice Y má rozsah přibližně 430 000–900 000 m a souřadnice X asi 950 000–1 230 000 m. Je zvykem uvádět nejprve souřadnici Y , k jejich záměně však právě kvůli různým rozsahům hodnot nemůže dojít.

Označení symbolů

ψ	měřený směr
ω	měřený vrcholový úhel
σ_{12}	směrník od bodu 1 do bodu 2 vypočtený ze souřadnic
α	směrník vypočtený z naměřených hodnot
R	pravý úhel



obr. 7.1 – Souřadnicové rozdíly, vodorovná vzdálenost, směrníky a kvadranty

Souřadnicové rozdíly

Platí: $\Delta y_{12} = s_{12} \sin \sigma_{12}$ (1)

$$\Delta x_{12} = s_{12} \cos \sigma_{12}$$

Vodorovná vzdálenost

Platí:

$$s_{12} = \sqrt{\Delta x_{12}^2 + \Delta y_{12}^2} \quad (2)$$

Pokud ovšem známe směrnik σ_{12} , je přesnější vyjít ze vztahů (1) a počítat vzdálenost jedním ze vzorců:

$$s_{12} = \left| \frac{\Delta y_{12}}{\sin \sigma_{12}} \right| \quad (3)$$

$$s_{12} = \left| \frac{\Delta x_{12}}{\cos \sigma_{12}} \right|$$

Použije se ten z dvojice vzorců, ve kterém se počítá s *větším* souřadnicovým rozdílem.

Směrnik

Směrnik je úhel měřený v geodeticky kladném směru, který svírá osa x se stranou stanoviště – měřený bod. Protože kladná poloosa x směřuje k jihu, nazývá se tento směr také jižník. Pro jednotlivé kvadranty platí následující dvojice vztahů:

vypočítaný úhel	$\alpha_{12} = \operatorname{arctg} \frac{ \Delta y_{12} }{ \Delta x_{12} }$	$\bar{\alpha}_{12} = \operatorname{arctg} \frac{\Delta y_{12}}{\Delta x_{12}}$	
1. kvadrant	$\sigma_{12} = \alpha_{12}$	$\sigma_{12} = \bar{\alpha}_{12}$	(4)
2. kvadrant	$\sigma_{12} = 2R - \alpha_{12}$	$\sigma_{12} = 2R + \bar{\alpha}_{12}$	
3. kvadrant	$\sigma_{12} = 2R + \alpha_{12}$	$\sigma_{12} = 2R + \bar{\alpha}_{12}$	
4. kvadrant	$\sigma_{12} = 4R - \alpha_{12}$	$\sigma_{12} = 4R + \bar{\alpha}_{12}$	

Směrnik σ_{12} je směrnik vedoucí z *bodu 1 do bodu 2*. Pozor: $\sigma_{12} \neq \sigma_{21}$, ale platí (plyne z obrázku):

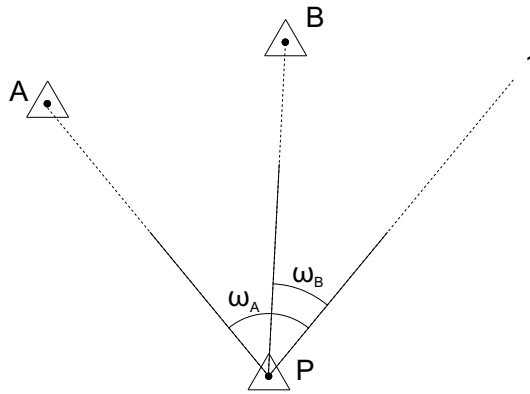
$$\begin{aligned} \sigma_{21} &= \sigma_{12} + 2R && \text{pro } \sigma_{12} < 2R \\ \sigma_{21} &= \sigma_{12} - 2R && \text{pro } \sigma_{12} \geq 2R \end{aligned} \quad (5)$$

Vyrovnaný směrnik

V některých případech je měřeno ze známého stanoviště na více bodů o známých souřadnicích a současně je nutné určit směrnik na bod o neznámých souřadnicích. Může to nastat například pokud při výpočtu orientovaného polygonu máme orientace na počátečním bodu na více pevných bodů.

Potom je nutné směrnik na neznámý bod vyrovnat (směrniky σ_{P1}^A a σ_{P1}^B vyjdou různé).

$$\begin{aligned} \sigma_{P1}^A &= \sigma_{PA} + \omega_A \\ \sigma_{P1}^B &= \sigma_{PB} + \omega_B \\ \bar{\sigma}_{P1} &= \frac{\sigma_{P1}^A + \sigma_{P1}^B}{2} \end{aligned}$$

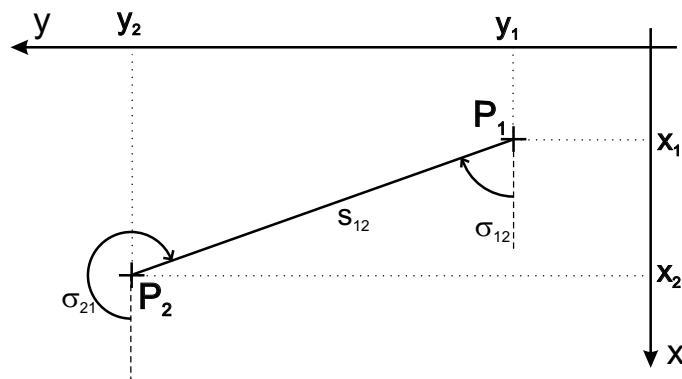


obr. 7.2 – Vyrovnání směrník

Pro více než 2 pevné body by se opět spočítaly jednotlivé směrníky a určil jejich aritmetický průměr.

7.2 Základní geodetické úlohy

7.2.1 1. geodetická úloha



obr. 7.3 – 1. geodetická úloha

Dáno: $P_1[y_1, x_1]$, $P_2[y_2, x_2]$

Určit: s_{12} , σ_{12}

Výpočet:

V podstatě se jedná o převod kartézských souřadnic na polární.

1. výpočet souřadnicových rozdílů podle (1)
2. s_{12} podle (2)
3. σ_{12} podle (4)

Příklad

Dáno: body 9 1225 0035, 10 0000 4019

Určit: $s_{35-4019}$, $\sigma_{35-4019}$

Výpočet:

1. souřadnicové rozdíly:

$$\Delta X_{35-4019} = X_{4019} - X_{35} = -497,75$$

$$\Delta Y_{35-4019} = Y_{4019} - Y_{35} = -689,72$$

2. vzdálenost:

$$s_{35-4019} = \sqrt{\Delta X_{35-4019}^2 + \Delta Y_{35-4019}^2} = 850,57 \text{ m}$$

3. úhel:

$$\alpha_{35-4019} = \arctg \frac{\Delta Y_{35-4019}}{\Delta X_{35-4019}} \doteq 60^{\text{g}} 20^{\text{c}} 35^{\text{cc}}, \text{ a protože bod 4019 leží vzhledem k bodu 35}$$

ve třetím kvadrantu, což plyne ze záporných znamének u $\Delta X_{35-4019}$ a $\Delta Y_{35-4019}$,

$$\text{směrník je } \sigma_{35-4019} = 2R + \alpha_{35-4019} = 200^{\text{g}} + 60^{\text{g}} 20^{\text{c}} 35^{\text{cc}} = 260^{\text{g}} 20^{\text{c}} 35^{\text{cc}}.$$

7.2.2 2. geodetická úloha

Dáno: $P_1[y_1, x_1], s_{12}, \sigma_{12}$

Určit: $P_2[y_2, x_2]$

Zde se jedná o úlohu podobnou převodu polárních souřadnic do kartézské soustavy souřadné. Někdy se pro tuto úlohu používá i pojem **rajón**, což je orientovaná a délkově zaměřená spojnice daného a určovaného bodu. Vzdálenost s_{12} je délkou po matematické i fyzikální redukci!

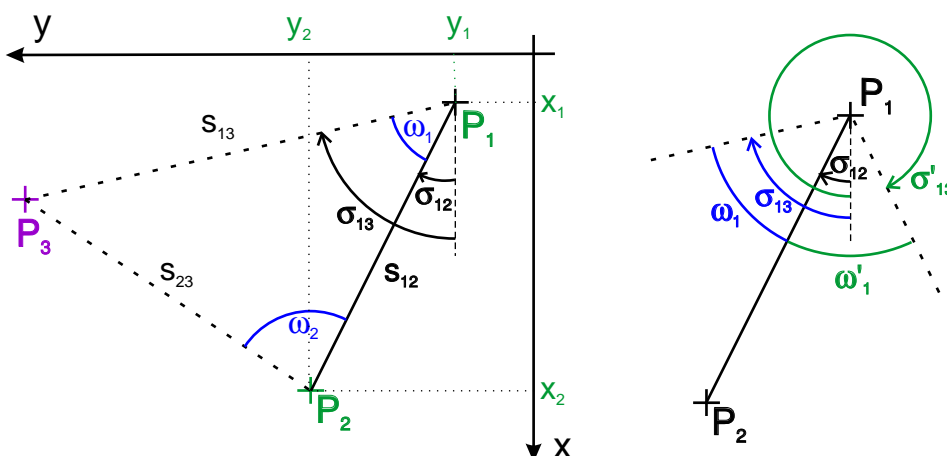
$$y_2 = y_1 + \Delta y = y_1 + s_{12} \sin \sigma_{12}$$

(6)

$$x_2 = x_1 + \Delta x = x_1 + s_{12} \cos \sigma_{12}$$

7.3 Metody protínání

7.3.1 Protínání vpřed z úhlů



obr. 7.4 – Protínání vpřed z úhlů

Dáno:

bod $P_1[y_1, x_1], P_2[y_2, x_2]$

Měřeno:úhly ω_1, ω_2 **Určit:**bod $P_3[y_3, x_3]$

Jedná se o určení polohy nového bodu P_3 ze směrů měřených na 2 daných bodech A, B .

Výpočet souřadnic se provádí pomocí 2. geodetické úlohy. K té je nutné znát délku strany s_{13} a směrnik σ_{13} (nebo s_{23}, σ_{23}). Délka strany se spočítá sinovou větou, k výpočtu směrniku se použije 1. geodetická úloha a naměřený úhel. U naměřeného úhlu je však důležitá orientace – úloha může mít teoreticky 2 řešení. Při výpočtu je tedy potřeba uvažovat orientaci naměřených úhlů (situace na obrázku vpravo)!

Je vhodné kvůli kontrole správnosti výpočtu určit bod P_3 jak z bodu P_1 (viz. dále), tak z bodu P_2 (analogicky). Výsledky musí vyjít stejně, až na případnou zaokrouhlovací chybu. Bod P_3 není totiž přeurčen, tedy nejedná se o vyrovnání, jen o ověření výpočtu.

1. s_{12} : výpočet z (2)

$$2. s_{13}: \text{ze sinové věty } \frac{s_{13}}{\sin \omega_2} = \frac{s_{12}}{\sin(2R - (\omega_1 + \omega_2))} \Rightarrow s_{13} = s_{12} \frac{\sin \omega_2}{\sin(\omega_1 + \omega_2)}$$

3. σ_{12} : výpočet z (4)

4. σ_{13} : v závislosti na orientaci ω_1 platí: $\sigma_{13} = \sigma_{12} \pm \omega_1$. Platí, že pokud je zachováno pořadí bodů P_1, P_2, P_3 ve směru hodinových ručiček, je znaménko kladné

5. $P_3[y_3, x_3]$: z 2. geodetické úlohy

$$y_3 = y_1 + \Delta y_{13} = y_1 + s_{13} \sin \sigma_{13}$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x_{13} = x_1 + s_{13} \cos \sigma_{13}$$

Poznámka:

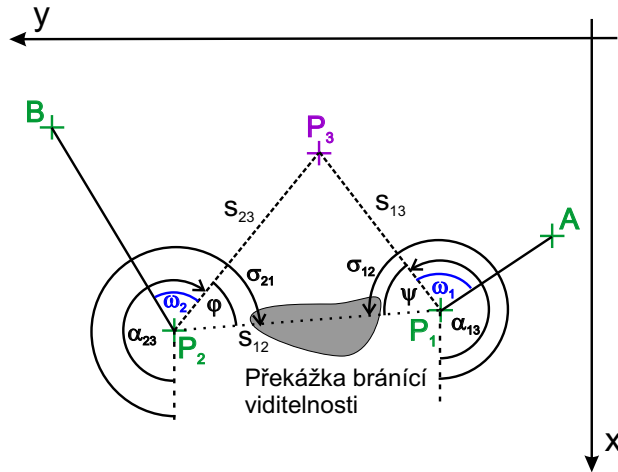
Výpočet lze také provést transformací souřadnic. Potom při zachované orientaci bodů P_1, P_2, P_3 vyjdou vztahy:

$$x_3 = x_1 + \frac{\Delta x_{21} \cotg \omega_1 - \Delta y_{21}}{\cotg \omega_1 + \cotg \omega_2} \quad (7)$$

$$y_3 = y_1 + \frac{\Delta x_{21} + \Delta y_{21} \cotg \omega_1}{\cotg \omega_1 + \cotg \omega_2} \quad (8)$$

7.3.2 Protínání vpřed ze směrů

Dáno:body $A[y_A, x_A], B[y_B, x_B], P_1[y_1, x_1], P_2[y_2, x_2]$ **Měřeno:**úhly ω_1, ω_2 **Určit:**bod $P_3[y_3, x_3]$



obr. 7.5 – Protínání vpřed ze směrů

Použití: Používá se například v situaci, kdy mezi body P_1 a P_2 je překážka bránící viditelnosti, a tedy není možné použít protínání vpřed z úhlů. V tomto příkladu se používají směrničky, které získáváme měřením, ne výpočtem ze souřadnic, tedy v souladu s konvencí je budeme označovat α a ne σ (což označuje směrničky spočítané ze souřadnic).

Výpočet převedením na protínání z úhlů

$$y_3 = y_1 + \Delta y_{13} = y_1 + s_{13} \sin \sigma_{13} = y_2 + \Delta y_{23} = y_2 + s_{23} \sin \sigma_{23}$$

$$x_3 = x_1 + \Delta x_{13} = x_1 + s_{13} \cos \sigma_{13} = x_2 + \Delta x_{23} = x_2 + s_{23} \cos \sigma_{23}$$

Určení σ_{13}, σ_{23} :

$$\sigma_{13} = \sigma_{1A} - \omega_1$$

$$\sigma_{23} = \sigma_{1A} + \omega_2$$

σ_{1A} se určí podle (4). Je opět potřeba dát pozor na to, aby body P_2, B, P_3 a P_1, P_3, A šly po směru hodinových ručiček v tomto pořadí, jinak se mění znaménka u úhlu ω .

Určení s_{13}, s_{23} :

$$\varphi = \sigma_{21} - \sigma_{23}$$

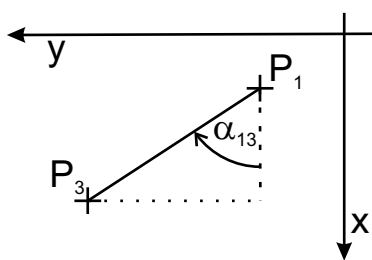
$$\psi = \sigma_{13} - \sigma_{12}$$

$$s_{12} = \sqrt{\Delta x_{21}^2 + \Delta y_{21}^2}$$

$$s_{13} = s_{12} \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}$$

$$s_{23} = s_{12} \frac{\sin \psi}{\sin(\varphi + \psi)}$$

Analytické řešení



Bod P_3 se určí jako průsečík dvou přímek; první prochází bodem P_1 a její směrnici lze vyjádřit pomocí směrníku α_{13} , druhá analogicky prochází bodem P_2 a její směrnici určíme ze směrníku α_{23} . V levotočivé kartézské soustavě platí pro směrnici (pozor na pořadí všech indexů!):

obr. 7.6 – Analytické řešení

$$k_1 = \cotg \alpha_{13} = \frac{X_3 - X_1}{Y_3 - Y_1}. \quad (9)$$

Platí tedy:

$$X_3 - X_2 = k_2(Y_3 - Y_2) \quad (10)$$

$$X_3 - X_1 = k_1(Y_3 - Y_1) \quad (11)$$

Odečtením (11) od (10) dostaneme:

$$\begin{aligned} (X_3 - X_2) - (X_3 - X_1) &= k_2 Y_3 - k_2 Y_2 - k_1 Y_3 + k_1 Y_1 \\ -(X_2 - X_1) &= Y_3(k_2 - k_1) - k_2 Y_2 + k_1 Y_1 + (k_2 Y_1 - k_2 Y_1) \\ -(X_2 - X_1) &= Y_3(k_2 - k_1) - k_2(Y_2 - Y_1) - Y_1(k_2 - k_1) \\ -(X_2 - X_1) &= (k_2 - k_1)(Y_3 - Y_1) - k_2(Y_2 - Y_1) \\ Y_3 - Y_1 &= \frac{k_2(Y_2 - Y_1) - (X_2 - X_1)}{k_2 - k_1} = M \end{aligned} \quad (12)$$

$$Y_3 = Y_1 + M$$

Z (9), (11) a (12) plyne:

$$X_3 - X_1 = k_1(Y_3 - Y_1) = k_1 M = M \cotg \alpha_{13}$$

$$X_3 = X_1 + M \cotg \alpha_{13}$$

$$\text{Kde } M = \frac{k_2(Y_2 - Y_1) - (X_2 - X_1)}{k_2 - k_1} = \frac{\Delta Y_{12} \cotg \alpha_{23} - \Delta X_{12}}{\cotg \alpha_{23} - \cotg \alpha_{13}}$$

7.3.3 Protínání vpřed z délek

Dáno:

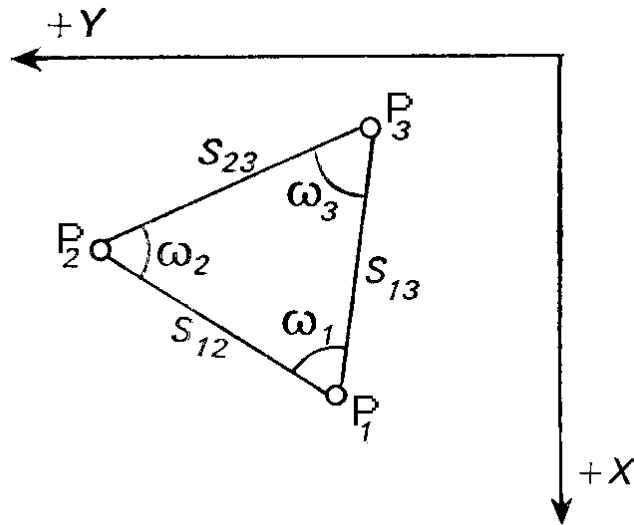
body $P_1[y_1, x_1], P_2[y_2, x_2]$

Měřeno:

délky s_{13}, s_{23}

Určit:

bod $P_3[y_3, x_3]$



obr. 7.7 – Protínání vpřed z délek

Použití: Protínání vpřed z délek použijeme, pokud jsou zaměřeny délky ze známých stanovisek na neznámý bod. Předpokládáme, že měřené délky jsou již opraveny o fyzikální a matematické redukce.

Postup řešení:

1. výpočet směrníku σ_{12}, σ_{21} podle (4) a strany s_{12} podle (3)
2. výpočet úhlů $\omega_1, \omega_2, \omega_3$

$$s = \frac{s_{12} + s_{13} + s_{23}}{2}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_1}{2} = \sqrt{\frac{(s - s_{13})(s - s_{12})}{s(s - s_{23})}}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_2}{2} = \sqrt{\frac{(s - s_{23})(s - s_{12})}{s(s - s_{13})}}$$

$$\operatorname{tg} \frac{\omega_3}{2} = \sqrt{\frac{(s - s_{13})(s - s_{23})}{s(s - s_{12})}}$$

Kontrolou je $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 2R$.

3. Tím je úloha převedena na protínání z úhlů.

7.3.4 Protínání zpět

Dáno:

body $P_1[y_1, x_1], P_2[y_2, x_2], P_3[y_3, x_3]$

Měřeno:

úhly ω_1, ω_2

Určit:

bod $P_4[y_4, x_4]$

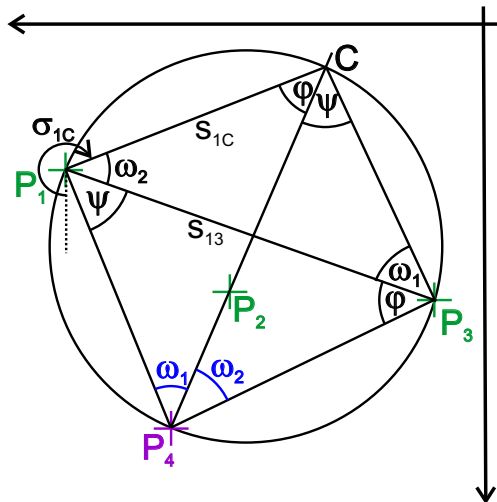
Použití: Protínání zpět použijeme v situaci, kdy na stanovišti, jehož souřadnice neznáme, zaměříme na tři body, jejichž souřadnice známe. Je však třeba dávat pozor, aby všechny tyto čtyři body neležely na jedné kružnici. Pak totiž úloha nemá řešení. Tři body, na které zaměřujeme, tedy jednoznačně určují tzv. *nebezpečnou kružnici*, v jejímž okolí nesmí ležet naše stanoviště (tedy měřený bod). Pokud by taková situace nastala, je potřeba měřit na jiné body, protože při měření bodů ležících blízko nebezpečné kružnice je výsledek výpočtu velice nepřesný! Nejlepší situace nastává, pokud určovaný bod leží uvnitř nebezpečné kružnice. Limitní hodnoty úhlů, pro které dává protínání zpět rozumné výsledky, jsou: $30^\circ < \omega_i < 270^\circ$.

Proto touto metodou neurčíme body ZPBP ani body PPBP 1. třídy přesnosti.

Řešení pomocí Colinsova bodu

Řešení spočívá v tom, že si nejprve najdeme pomocný (Colinsův) bod, který je průsečíkem kružnice určené 3 body (2 známé, P_4) a přímkou určené dvěma body (zbylým známým a opět P_4). Pomocí tohoto bodu pak najdeme souřadnice neznámého bodu.

Poznámka: Při řešení úlohy se využívá skutečnosti, že velikost obvodového úhlu nad tětivou kružnice je stejná pro libovolný bod kružnice. Konkrétně potom např. platí: $\angle P_1P_4C = \angle P_1P_3C$.



obr. 7.8 – Protínání zpět pomocí Colinsova bodu

1. Nalezení Colinsova bodu:

$$y_C = y_1 + s_{1C} \sin \sigma_{1C} = y_3 + s_{3C} \sin \sigma_{3C}$$

$$x_C = x_1 + s_{1C} \cos \sigma_{1C} = x_3 + s_{3C} \cos \sigma_{3C}$$

kde

$$\sigma_{1C} = \sigma_{13} - \omega_2$$

$$s_{1C} = s_{13} \frac{\sin \omega_1}{\sin(\omega_1 + \omega_2)}$$

2. Nalezení bodu P_4 : Bod se nalezne protínáním vpřed z úhlů z bodů P_1 a C . K tomu je potřeba nejprve určit úhly φ, ψ :

$$\varphi = \sigma_{C1} - \sigma_{C2} + 4R$$

$$\psi = \sigma_{C2} - \sigma_{C3}$$

$$\sigma_{14} = \sigma_{13} + \psi$$

$$s_{14} = s_{13} \frac{\sin \varphi}{\sin(\varphi + \psi)}$$

a konečně

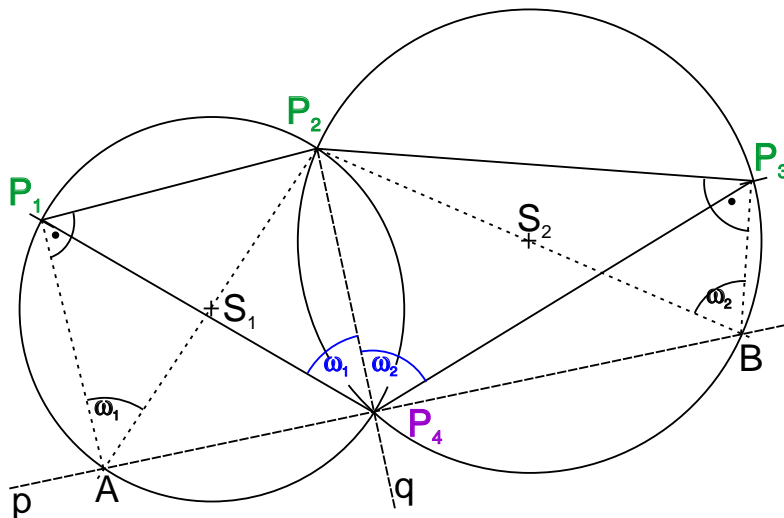
$$y_4 = y_1 + s_{14} \sin \sigma_{14}$$

$$x_4 = x_1 + s_{14} \cos \sigma_{14}$$

kde směrníky $\sigma_{13}, \sigma_{C1}, \sigma_{C2}, \sigma_{C3}$ se určí dle (4).

Poznámka: Pro $\omega_1, \omega_2 > R$ se dosazuje do výpočtů $\omega'_1 = 2R - \omega_1$ a $\omega'_2 = 2R - \omega_2$.

Cassiniho řešení



obr. 7.9 – Protínání zpět Cassiniho řešením

Postup řešení:

1. Výpočet bodů A, B protínáním vpřed ze směrů:

$$y_A = y_2 + \frac{-(y_2 - y_1) \cotg(R - \omega_1) + (x_2 - x_1)}{\cotg(R - \omega_1) + \cotg R}$$

$$x_A = x_2 + \frac{-(x_2 - x_1) \cotg(R - \omega_1) + (y_2 - y_1)}{\cotg(R - \omega_1) + \cotg R}$$

$$y_B = y_2 + \frac{-(y_2 - y_3) \cotg(R - \omega_2) + (x_2 - x_3)}{\cotg(R - \omega_2) + \cotg R}$$

$$x_B = x_2 + \frac{-(x_2 - x_3) \cotg(R - \omega_2) + (y_2 - y_3)}{\cotg(R - \omega_2) + \cotg R}$$

Platí:

$$\cotg R = 0$$

$$\cotg(R - \omega) = \operatorname{tg} \omega$$

Tedy po dosazení:

$$y_A = y_2 + \frac{-(y_2 - y_1)\cotg(R - \omega_1) + (x_2 - x_1)}{\cotg(R - \omega_1) + 0} = y_2 - (y_2 - y_1) + \frac{x_2 - x_1}{\operatorname{tg} \omega_1} = y_2 - (y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)\cotg \omega_1$$

V dalších výpočtech budeme však potřebovat souřadnicové rozdíly, tedy:

$$\Delta y_{2A} = y_A - y_2 = -(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)\cotg \omega_1$$

analogicky upravíme ostatní výrazy a dostaneme:

$$\Delta y_{2A} = -(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1)\cotg \omega_1$$

$$\Delta x_{2A} = -(x_2 - x_1) - (y_2 - y_1)\cotg \omega_1$$

$$\Delta y_{2B} = -(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)\cotg \omega_2$$

$$\Delta x_{2B} = -(x_2 - x_3) + (y_2 - y_3)\cotg \omega_2$$

2. výpočet směrnice přímky $p = AB$:

$$k_p = \operatorname{tg} \sigma_{AB} = \operatorname{tg} \arctg \frac{\Delta y_{AB}}{\Delta x_{AB}} = \frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} = \frac{(y_B - y_2) - (y_A - y_2)}{(x_B - x_2) - (x_A - x_2)} = \frac{\Delta y_{2B} - \Delta y_{2A}}{\Delta x_{2B} - \Delta x_{2A}}$$

3. výpočet směrnice přímky $q = BP$:

$$k_q = -\frac{1}{k_p} = \frac{\Delta x_{2A} - \Delta x_{2B}}{\Delta y_{2B} - \Delta y_{2A}}$$

4. výpočet souřadnic bodu P_4 protínáním vpřed ze směrů:

$$y_4 = y_2 + M_2 k_q$$

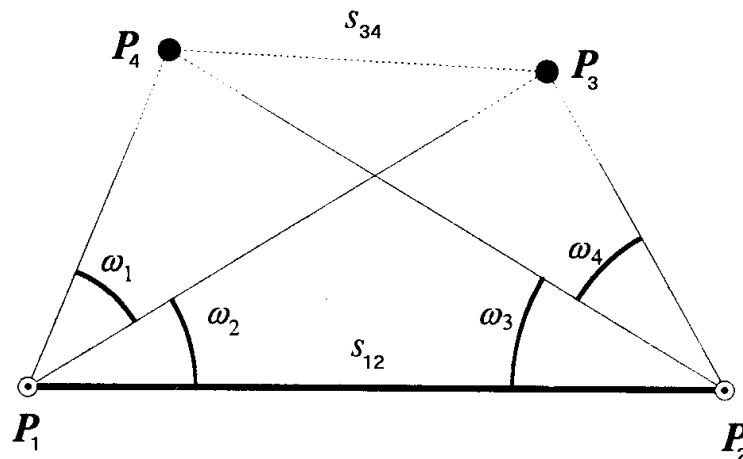
$$x_4 = x_2 + M_2$$

$$M_2 = \frac{(y_A - y_2)k_q + (x_A - x_2)}{1 + k_q^2}$$

7.3.5 Určení nepřístupné vzdálenosti

Pokud potřebujeme určit vzdálenost mezi dvěma nepřístupnými body, volíme dva body pomocné, mezi kterými je možné vzdálenost určit. Spojnice těchto bodů by měla být přibližně rovnoběžná se spojnicí nepřístupných bodů, tj. bodů mezi nimiž potřebujeme určit vzdálenost. Na pomocných

bodech se změří vodorovné úhly. Tyto úhly nesmí být příliš ostré ani příliš tupé. Toho docílíme zvolením vhodné vzdálenosti mezi spojnicemi pomocných a nepřístupných bodů.



obr. 7.10 – Určení nepřístupné vzdálenosti

Dáno:

body $P_1[y_1, x_1], P_2[y_2, x_2]$

Měřeno:

úhly $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$

Určit:

body $P_3[y_3, x_3], P_4[y_4, x_4]$

1. výpočet délky s_{12} podle (2)
2. výpočet souřadnic P_3 a P_4 protínáním vpřed z úhlů
3. výpočet s_{34} podle (2)

7.4 Polygonové pořady

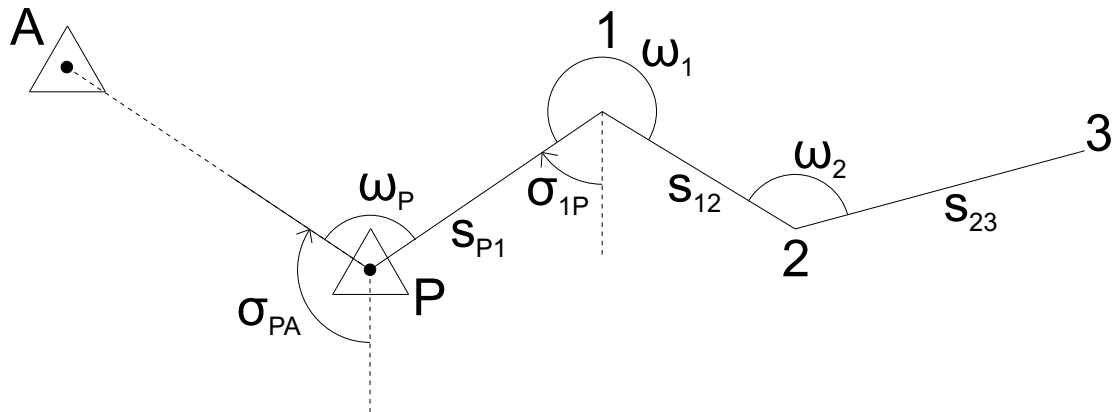
Poznámka k označování veličin

V polygonových pořadech budou veličiny označeny následovně:

P	počáteční bod polygonového pořadu se známými souřadnicemi $P[Y_P, X_P]$
1, 2, ..., n	neznámé body polygonového pořadu
	n je tedy počet neznámých bodů polygonu, celkový počet bodů polygonu je u volného a uzavřeného $n+1$, jinak $n+2$.
K	koncový bod polygonového pořadu, pokud má známé souřadnice $K[Y_K, X_K]$
A, B	připojovací body polygonového pořadu (počáteční a koncový)
ω_i	měřený levostranný úhel na bodě i (platí $i=0 \dots$ bod P, $i=n+1 \dots$ bod K)
$\omega_P = \omega_0$	úhel na bodu P mezi připojovacím bodem A a prvním bodem polygonu
$\omega_K = \omega_{n+1}$	úhel na bodu K mezi posledním bodem polygonu a připojovacím bodem B

Poznámka: je nutné, aby měřené úhly ω byly levostranné, jinak výpočet nebude vycházet! Určované veličiny jsou u všech polygonových pořadů souřadnice bodů 1, 2, ..., n.

7.4.1 Volný polygonový pořad



obr. 7.11 – Volný polygonový pořad

Dáno:

body A, P

Měřeno:

úhly: $\omega_P, \omega_1, \omega_2, \dots$

strany: $s_{P1}, s_{12}, s_{23}, \dots$

Výpočet připojovacího směrníku z bodu P na bod 1

Pokud je na bodu P měřena pouze 1 orientace, je výpočet jednoduchý:

$$\sigma_{P1} = \sigma_{PA} + \omega_P$$

Pokud je na bodu P měřeno více orientací, je vhodnější použít postup uvedený v kapitole vyrovnání směrníku.

Výpočet směrníků stran polygonového pořadu

Směrník na daném bodě můžeme vždy snadno spočítat ze směrníku na bodě předcházejícím a z měřeného levostranného úhlu:

Platí:

$$\sigma_{12} = \sigma_{1P} + \omega_1, \quad \sigma_{1P} = \sigma_{P1} - 2R,$$

$$\sigma_{12} = \sigma_{P1} - 2R + \omega_1 = \sigma_{PA} + \omega_P - 2R + \omega_1 = \sigma_{PA} - 2R + \omega_0 + \omega_1$$

To lze zobecnit i pro další úhly, obecně tedy potom platí:

$$\sigma_{i,i+1} = \sigma_{PA} - i \cdot 2R + \sum_{j=0}^i \omega_j$$

Výpočet souřadnicových rozdílů

Souřadnicové rozdíly z bodu P na bod 1 nyní snadno spočítám, protože znám směrník i vzdálenost. Tím určím souřadnice bodu 1. Z něj pak mohu stejným postupem získat souřadnice bodu 2 atd. Nejprve si tedy spočítám souřadnicové rozdíly a z nich potom postupně souřadnice jednotlivých bodů.

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_P + \Delta Y_{P1} &= Y_P + s_{P1} \cdot \sin \sigma_{P1} & X_1 &= X_P + \Delta X_{P1} &= X_P + s_{P1} \cdot \cos \sigma_{P1} \\ Y_2 &= Y_1 + \Delta Y_{12} &= Y_1 + s_{12} \cdot \sin \sigma_{12} & X_2 &= X_2 + \Delta X_{12} &= X_2 + s_{12} \cdot \cos \sigma_{12} \end{aligned}$$

výše uvedené vztahy lze potom sepsat do obecného vzorce:

$$Y_i = Y_P + s_{P1} \cdot \sin \sigma_{P1} + s_{12} \cdot \sin \sigma_{12} + s_{23} \cdot \sin \sigma_{23} + \dots = Y_P + s_{P1} \cdot \sin \sigma_{P1} + \sum_{j=2}^i s_{j-1,j} \cdot \sin \sigma_{j-1,j}$$

$$X_i = X_P + s_{P1} \cdot \cos \sigma_{P1} + s_{12} \cdot \cos \sigma_{12} + s_{23} \cdot \cos \sigma_{23} + \dots = X_P + s_{P1} \cdot \cos \sigma_{P1} + \sum_{j=2}^i s_{j-1,j} \cdot \cos \sigma_{j-1,j}$$

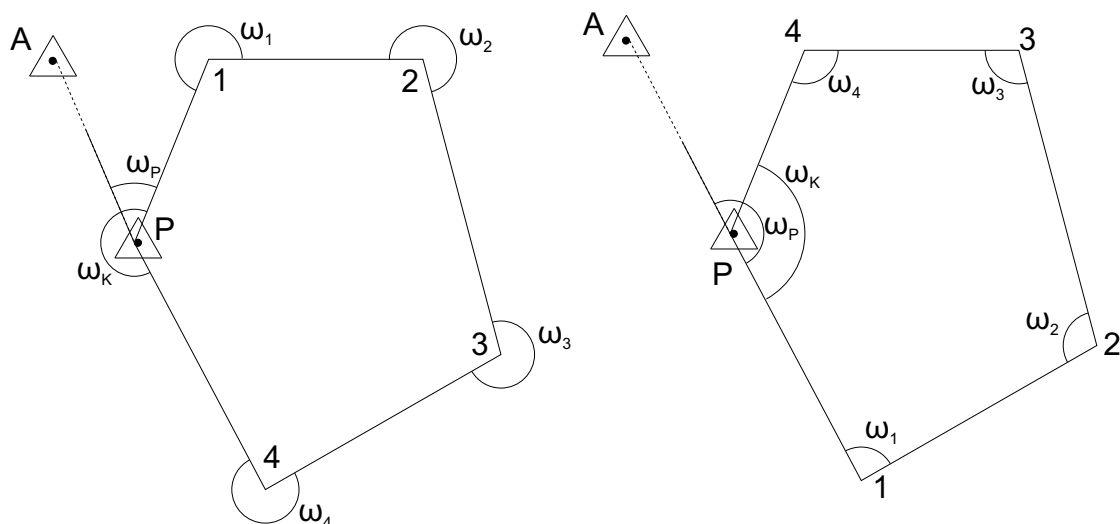
Uvažujeme-li bod P jako bod 0 tak vyjdou jednodušší tvary:

$$Y_i = Y_P + \sum_{j=1}^i s_{j-1,j} \cdot \sin \sigma_{j-1,j}$$

$$X_i = X_P + \sum_{j=1}^i s_{j-1,j} \cdot \cos \sigma_{j-1,j}$$

V tomto typu polygonového pořadu se však hromadí chyby a není zde žádná kontrola. Proto lze takto počítat maximálně tři body. Opodstatněné speciální použití je pak při zaměřování v podzemních prostorách, kde se pak používají speciální gyroteodolity, aby se omezila hromadící se úhlová chyba.

7.4.2 Uzavřený polygonový pořad



obr. 7.12 – Uzavřený polygonový pořad

Dáno:

body P, A

Měřeno:

úhly $\omega_P, \omega_K, \omega_1, \omega_2, \dots$

strany $s_{P1}, s_{12}, s_{23}, \dots$

Pozor na označení úhlů ω_P a ω_K ! Abych měl jednotné označení pro všechny druhy polygonů (a tím i stejné vzorce), úhel ω_P musí být úhel mezi přípojovacím bodem a prvním bodem polygonu, ne vrcholový úhel polygonu! Ten označuji ω_K . Číslo n označuje počet neznámých bodů, celkový počet vrcholů mnohoúhelníka je tedy $n+1$!

Úhlové vyrovnání

Musím měřit levostranné úhly, tedy v závislosti na orientaci polygonového pořadu měřím buďto vnitřní nebo vnější úhly n -úhelníku. Pro konvexní n -úhelník platí (pro vnitřní, respektive vnější úhly, m ... počet vrcholů):

$$\sum \omega_i = (m-2).2R$$

$$\sum \omega_i = (m+2).2R$$

Tento vztah přepíšeme pro náš polygonový pořad. Počet neznámých bodů v polygonu označuje n , tedy i s bodem P platí $m = n + 1$. Úhly sčítám pro $i = 1..n$ a pro vrcholový úhel na bodu P ($\omega_K = \omega_{n+1}$). Tedy:

$$\sum_{i=1}^{n+1} \omega_i = (n-1).2R \quad \text{nebo} \quad \sum_{i=1}^{n+1} \omega_i = (n+3).2R$$

V důsledku měřických chyb těchto hodnot však nedosáhnou. Spočítám tedy tzv. **úhlový uzávěr**:

$$d\omega = (n-1).2R - \sum_{i=1}^{n+1} \omega_i \quad \text{nebo} \quad d\omega = (n+3).2R - \sum_{i=1}^{n+1} \omega_i$$

Tuto hodnotu porovnáme s dopustnou odchylkou $\Delta\omega$. Je-li spočítaná odchylka v absolutní hodnotě větší než dopustná, je měření chybné, jinak provedu úhlové vyrovnání (rozdělím odchylky rovnoměrně na všechny úhly kromě úhlu ω_P , to není vrcholový úhel n -úhelníka):

$$o_\omega = \frac{d\omega}{n+1}$$

$$\overline{\omega}_i = \omega_i + o_\omega, \quad \text{pro } i = \{1..n+1\}$$

V dalších výpočtech již pracujeme pouze s vyrovnanými úhly (nepíšu nad již pruh)!

Výpočet vyrovnaných směrniců jednotlivých stran

Nejprve spočítám směrník z bodu P na bod 1:

$$\sigma_{P1} = \sigma_{PA} + \omega_P$$

Pak můžeme počítat směrníky jednotlivých dalších stran polygonového pořadu:

$$\sigma_{12} = \sigma_{1P} + \omega_1 = \sigma_{P1} + \omega_1 - 2R$$

obecně potom (stejně jako u volného pořadu)

$$\sigma_{i,i+1} = \sigma_{PA} - i \cdot 2R + \sum_{j=0}^i \omega_j$$

Výpočet souřadnicových rozdílů

Vydeme ze stejných vztahů, kterým jsme došli u volného pořadu:

$$Y_i = Y_P + \sum_{j=1}^i s_{j-1,j} \cdot \sin \sigma_{j-1,j}$$

$$X_i = X_P + \sum_{j=1}^i s_{j-1,j} \cdot \cos \sigma_{j-1,j}$$

Tyto rovnice musí platit i pro poslední bod, tedy opět pro bod P:

$$Y_P = Y_P + \sum_{j=1}^n \Delta Y_{j-1,j} = Y_P + \sum_{j=1}^n s_{j-1,j} \cdot \sin \sigma_{j-1,j}$$

$$X_P = X_P + \sum_{j=1}^n \Delta X_{j-1,j} = X_P + \sum_{j=1}^n s_{j-1,j} \cdot \cos \sigma_{j-1,j}$$

Mělo by tedy platit:

$$\sum_{i=1}^n \Delta Y_{i-1,i} = \sum_{i=1}^n \Delta X_{i-1,i} = 0$$

Vlivem měřických chyb nám však vyjdou určité souřadnicové odchylky dY , dX , spočítáme tedy polohovou odchylku dp (odchylka je však hodnota „mělo vyjít“ – „vyšlo“, tedy zde 0 – „vyšlo“, proto záporné znaménko):

$$dY = -\sum_{i=1}^n \Delta Y_{i-1,i}$$

$$dX = -\sum_{i=1}^n \Delta X_{i-1,i}$$

$$dp = \sqrt{d_X^2 + d_Y^2}$$

Tuto hodnotu porovnáme s maximální dopustnou polohovou odchylkou Δ_P . Pokud je vypočítaná odchylka menší, měřili jsme správně a můžeme provést souřadnicové vyrovnání.

Souřadnicové vyrovnání

Zatímco při úhlovém vyrovnání jsme rozdělili odchylky rovnoměrně, zde je budeme rozdělovat poměrně délkám jednotlivých úseků. Tedy delší strany budou mít větší opravu než kratší strany. Toto vyrovnání budeme dělat zvlášť pro obě souřadnice.

$$oY_{i-1,i} = \frac{dY}{\sum_j |\Delta Y_{j-1,j}|} |\Delta Y_{j-1,j}|$$

$$oX_{i-1,i} = \frac{dX}{\sum_j |\Delta X_{j-1,j}|} |\Delta X_{j-1,j}|$$

$$\overline{\Delta X}_{i-1,i} = \Delta X_{i-1,i} + oX_{i-1,i} = s_{i-1,i} \cdot \cos \overline{\omega}_i + oX_{i-1,i}$$

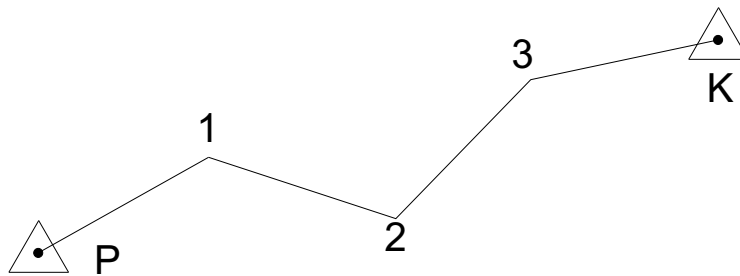
$$\overline{\Delta Y}_{i-1,i} = \Delta Y_{i-1,i} + oY_{i-1,i} = s_{i-1,i} \cdot \sin \overline{\omega}_i + oY_{i-1,i}$$

Nyní již z vyrovnaných souřadnicových rozdílů snadno spočítám výsledné souřadnice:

$$X_i = X_P + \sum_{j=1}^i \overline{\Delta X}_{j-1,j}$$

$$Y_i = Y_P + \sum_{j=1}^i \overline{\Delta Y}_{j-1,j}$$

7.4.3 Vetknutý polygonový pořad (oboustranně připojený)



obr. 7.13 – Vetknutý polygonový pořad

Dáno:

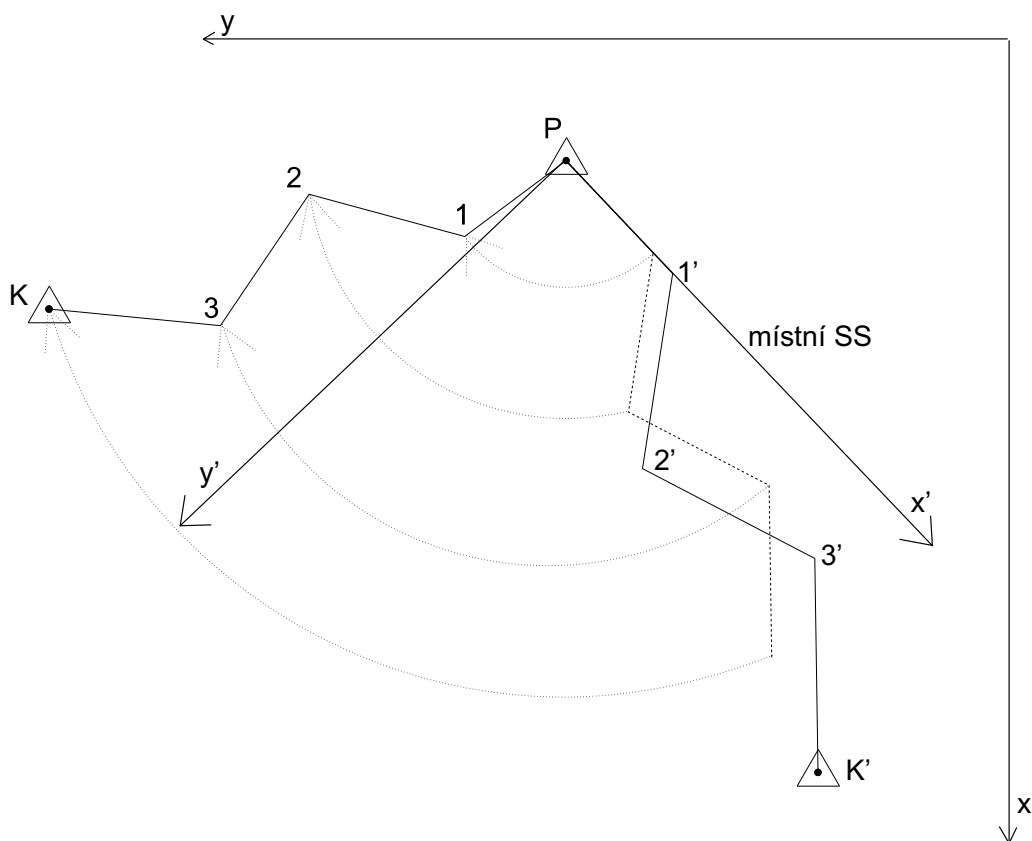
počáteční bod P $[Y_P, X_P]$, koncový bod K $[Y_K, X_K]$

Měřeno:

úhly a délky mezi jednotlivými body polygonu ω_i a $s_{i,i+1}$

Protože v tomto případě nemohu spočítat připojovací směr, řeší se tato úloha nejlépe transformací souřadnic: nejprve spočítám souřadnice v místním souřadném systému, a pak celý tento souřadný systém transformuji tak, aby si odpovídaly koncové body polygonu v obou souřadných systémech. Používá se lineární transformace – ta umožňuje polygon otočit (abych jej otočil na správný bod K), změnit měřítko (tím se opraví chyby měření délek stran) a posunout (posun do bodu P, v pomocném SS začínám v bodě $[0, 0]$).

Výpočet v pomocném SS



obr. 7.14 – Výpočet v pomocném souřadném systému

Nový souřadný systém je určen body $P'[0, 0]$ a $1'[s_{P1}, 0]$.

V tomto SS snadno spočítám souřadnice dalších bodů jako u volného polygonového pořadu, kde připojovací směrnik σ_{P1} je $3R$ (viz. obrázek). Podle kapitoly výpočet volného polygonového pořadu tedy spočítám souřadnice bodů $2'$, $3'$ a posledního bodu K' .

Transformace SS

Rovnice lineární transformace má v levotočivém systému tvar:

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{pmatrix} + m \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix}$$

Zde jsou 4 neznámé ΔX , ΔY , m a φ . Mám 2 body, tedy 4 souřadnice, a mohl bych tedy sestavit 4 rovnice o 4 neznámých a jejich řešením zjistit koeficienty transformace. Zde však uvedu, jak koeficienty spočítat postupně snadněji.

Koeficienty ΔX a ΔY známe, jsou to souřadnice bodu P , abychom zajistili, že se posune $P'[0, 0]$ do $P[Y_P, X_P]$ (je současně středem otáčení).

Nyní určím současně zvětšení a koeficienty rotace. Rovnici transformace si přepíšu na tvar:

$$\begin{aligned}
 X - \Delta X &= X' m \cos \varphi - Y' m \sin \varphi \\
 Y - \Delta Y &= X' m \sin \varphi + Y' m \cos \varphi \\
 X_K - X_P &= X'_K a_1 - Y'_K a_2 \\
 Y_K - Y_P &= X'_K a_2 + Y'_K a_1
 \end{aligned}
 \quad
 \begin{aligned}
 a_1 &= m \cos \varphi \\
 a_2 &= m \sin \varphi
 \end{aligned}$$

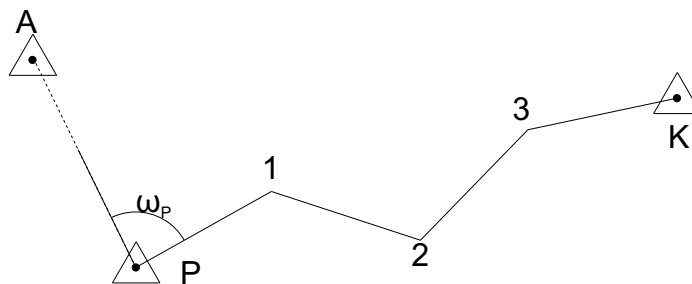
Nyní vyjádřím a_1 a a_2 :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{(X_K - X_P)X'_K + (Y_K - Y_P)Y'_K}{X_K'^2 + Y_K'^2} \\
 a_2 &= \frac{(Y_K - Y_P)X'_K - (X_K - X_P)Y'_K}{X_K'^2 + Y_K'^2}
 \end{aligned}$$

Nyní mohu transformovat všechny body polygonu (kontrolně též bod K) podle vzorců:

$$\begin{aligned}
 X_i &= X_P + X'_i a_1 - Y'_i a_2 \\
 Y_i &= Y_P + X'_i a_2 + Y'_i a_1
 \end{aligned}$$

7.4.4 Polygonový pořad oboustranně připojený a jednostranně orientovaný



obr. 7.15 – Oboustranně připojený a jednostranně orientovaný polygonový pořad

Dáno:

body P, K, A

Měřeno:

úhly $\omega_P, \omega_1, \omega_2 \dots$

strany $s_{P1}, s_{12}, s_{23}, \dots$

Výpočet se provede podobně jako u uzavřeného pořadu: nejprve si spočítám připojovací směrník, pak postupně směrníky jednotlivých stran a souřadnicové rozdíly. Koncový bod mi vyjde vlivem měřických chyb vedle, takže se provede souřadnicové vyrovnání.

Výpočet směrníků

Připojovací směrník σ_{P1} se spočítá snadno 2. geodetickou úlohou.

Směrník první strany podle vztahu:

$$\sigma_{PI} = \sigma_{PA} + \omega_P$$

Další směrníky potom (vysvětlení viz. uzavřený polygonový pořad):

$$\sigma_{i, i+1} = \sigma_{i-1, i} - 2R + \omega_i$$

$$\sigma_{i, i+1} = \sigma_P - i \cdot 2R + \sum_{j=0}^i \omega_j$$

Výpočet souřadnicových rozdílů a souřadnicové vyrovnání

Postup je analogický jako u uzavřeného pořadu. Pomocí směrníků a délek stran spočítám jednotlivé souřadnicové rozdíly $\Delta X_{i-1, i}$, $\Delta Y_{i-1, i}$.

$$\Delta Y_{i, i+1} = s_{i, i+1} \cdot \sin \sigma_{i, i+1} \quad \Delta X_{i, i+1} = s_{i, i+1} \cdot \cos \sigma_{i, i+1}$$

Pro poslední bod pak musí platit:

$$X_K = X_P + \sum_{j=0}^n \Delta X_{j, j+1}$$

$$Y_K = Y_P + \sum_{j=0}^n \Delta Y_{j, j+1}$$

Mělo by tedy platit:

$$X_K - X_P - \sum_{i=0}^n \Delta X_{i, i+1} = 0$$

$$Y_K - Y_P - \sum_{i=0}^n \Delta Y_{i, i+1} = 0$$

Vlivem měřických chyb nám však vyjdou určité souřadnicové odchylky dY , dX , spočítáme tedy polohovou odchylku dp :

$$dX = X_K - X_P - \sum_{i=0}^n \Delta X_{i, i+1}$$

$$dY = Y_K - Y_P - \sum_{i=0}^n \Delta Y_{i, i+1}$$

$$dp = \sqrt{dX^2 + dY^2}$$

Tuto hodnotu porovnáme s maximální dopustnou polohovou odchylkou Δ_P . Pokud je vypočítaná odchylka menší, měřili jsme správně a můžeme provést souřadnicové vyrovnání.

Opět budeme rozdělovat odchylky podle délky strany polygonového úseku v dané souřadnici. Jinou možností by bylo rozdělovat chybu podle celkové délky strany polygonového pořadu.

$$oX_{i-1,i} = \frac{dX}{\sum_j |\Delta X_{j-1,j}|} |\Delta X_{j-1,j}|$$

$$oY_{i-1,i} = \frac{dY}{\sum_j |\Delta Y_{j-1,j}|} |\Delta Y_{j-1,j}|$$

$$\overline{\Delta X_{i-1,i}} = \Delta X_{i-1,i} + oX_{i-1,i}$$

$$\overline{\Delta Y_{i-1,i}} = \Delta Y_{i-1,i} + oY_{i-1,i}$$

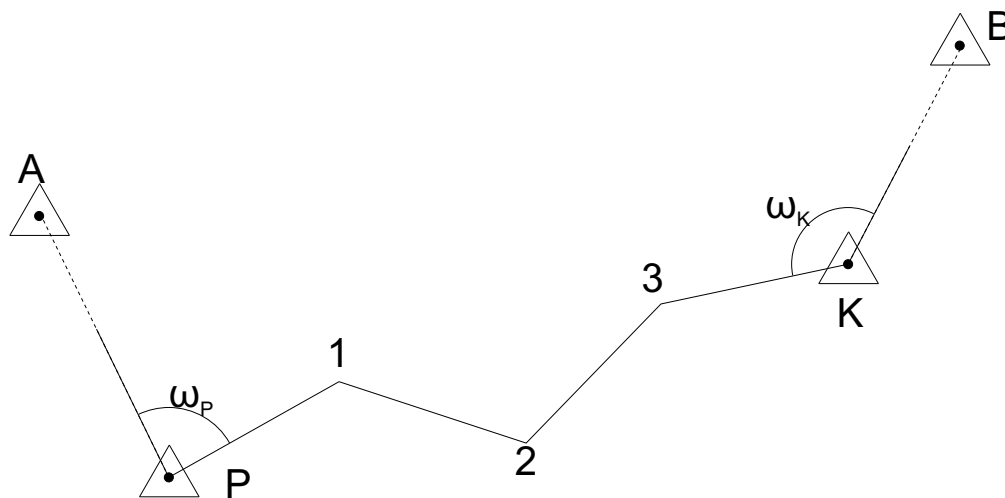
Nyní již z vyrovnaných souřadnicových rozdílů snadno spočítám výsledné souřadnice:

$$X_i = X_P + \sum_{j=1}^i \overline{\Delta X_{j-1,j}}$$

$$Y_i = Y_P + \sum_{j=1}^i \overline{\Delta Y_{j-1,j}}$$

Kontrolou výpočtu je porovnání vypočítaných souřadnic bodu K se zadanými. Hodnoty by se měly lišit jen o zaokrouhlovací chyby.

7.4.5 Polygonový pořad oboustranně polohově připojený a oboustranně orientovaný



obr. 7.16 – Oboustranně připojený a oboustranně orientovaný polygonový pořad

Dáno:

body P, K, A, B

Měřeno:

úhly $\omega_P, \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N, \omega_K$

strany $s_{P1}, s_{12}, s_{23}, \dots$

Postup výpočtu

1. výpočet připojovacího směrničku a směrničků stran

2. úhlové vyrovnání (rovnoměrně na všechny úhly)
3. výpočet souřadnicových rozdílů
4. souřadnicové vyrovnání (úměrné délkám stran)
5. výpočet jednotlivých souřadnic

Všechny uvedené postupy již byly vysvětleny v předcházejících částech, takže postup výpočtu již bude pouze stručný.

Výpočet přípojovacího směrnicku a směrnicků stran

Přípojovací směrnick σ_{PI} se spočítá snadno 2. geodetickou úlohou. Směrnick první strany podle vztahu

$$\sigma_{PI} = \sigma_{PA} + \omega_P$$

Další směrnicky potom:

$$\sigma_{i, i+1} = \sigma_{i-1, i} - 2R + \omega_i \text{ nebo } \sigma_{i, i+1} = \sigma_{PA} - i \cdot 2R + \omega_P + \sum_{j=1}^i \omega_j = \sigma_{PA} - i \cdot 2R + \sum_{j=0}^i \omega_j$$

Koncový směrnick ω_K má potom velikost $\sigma_{KB} = \sigma_{PA} + \sum_{i=1}^k \omega_i$

Úhlové vyrovnání

Na konci polygonového pořadu nám vyjde směrnick σ_{KB} vypočítaný z měřených úhlů rozdílný od směrnicku $\overline{\sigma_{KB}}$ vypočítaného ze souřadnicových rozdílů bodů K a B. Rozdíl těchto hodnot tvoří úhlový uzávěr $d\omega$, který se rovnoměrně rozloží na všechny měřené úhly ω_i . Tím získáme vyrovnané úhly $\overline{\omega}_i$, které se budou používat pro výpočet souřadnicových rozdílů.

$$d\omega = \overline{\sigma_{KB}} - \sigma_{KB}$$

Opět je nutné zkontrolovat, zda je velikost odchylky $d\omega$ menší než dopustná odchylka $\Delta\omega$.

$$o\omega = \frac{d\omega}{n+2} \quad (\text{chyby se rozdělují na úhly } n \text{ neznámých bodů, ale i na } \omega_P, \omega_K, \text{ proto } n+2)$$

Vyrovnané úhly se spočítají snadno, z nich se potom určí vyrovnané směrnicky

$$\overline{\omega}_i = \omega_i + o\omega \quad \text{pro } i = \{0..n+1\}$$

$$\overline{\sigma}_{i, i+1} = \sigma_{PA} - i \cdot 2R + \sum_{j=0}^i \overline{\omega}_j$$

nebo mohu určit vyrovnané směrnicky přímo:

$$\overline{\sigma}_{i, i+1} = \sigma_{i, i+1} + (i+1) \cdot o\omega$$

Výpočet souřadnicových rozdílů a souřadnicové vyrovnání

Je naprosto totožné s výpočtem jednostranně připojeného polygonového pořadu, jen do výpočtu souřadnicových rozdílů vstupují vyrovnané směrničky $\overline{\sigma_{i,i+1}}$.

7.4.6 Nepřímo připojený polygonový pořad

Tato metoda se použije v případě, že u polygonového pořadu je nepřístupný první nebo poslední bod (popřípadě oba). Tato situace může nastat například pokud je počátečním bodem polygonového pořadu kostel. Určením nepřístupné vzdálenosti u prvního (posledního) bodu mi pak umožní polygonový pořad přeci jenom spočítat, a to jako jednostranně orientovaný, případně vetknutý.

Zvolím si pomocnou základnu z , ze které je viditelnost na bod P i bod 1, a na bod 1 lze měřit vzdálenost. Potom změřím úhel ω_A , ω_{1A} a velikost pomocné základny z . Pomocí sinové věty pak snadno určím nepřístupnou vzdálenost.

$$s_{P1} = z \frac{\sin \omega_A}{\sin(\omega_A + \omega_{1A})}$$

Trojúhelník P1A by měl být rovnostranný, nebo alespoň rovnoramenný. Pro přesnější výpočty je rovněž vhodné, aby se použilo více různých pomocných bodů a tedy i více pomocných základen.

7.5 Metody výpočtu souřadnic podrobných bodů

Jako příklady metod měření polohopisu vybírám polární a ortogonální metodu.

7.5.1 Polární metoda

Dáno:

bod P, A

Měřeno:

úhly $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots$

strany s_1, s_2, s_3, \dots

Určit:

souřadnice bodů 1, 2, 3...

Úhly ω_i jsou levostranné úhly měřené od bodu A.

Výpočet je velmi jednoduchý – nejprve se spočítá směrnička σ_{PA} 1. geodetickou úlohou, potom se spočítají jednotlivé směrničky σ_{Pi} :

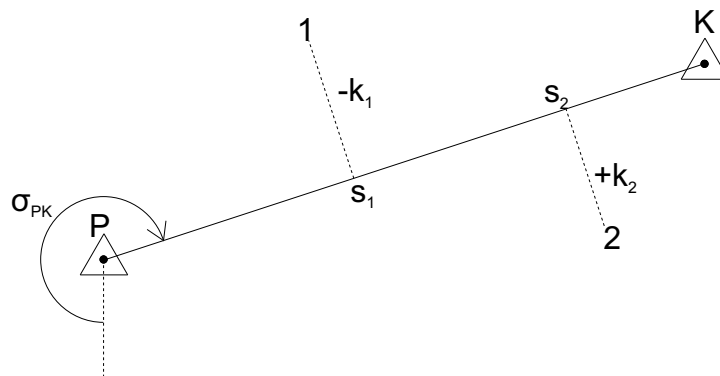
$$\sigma_{Pi} = \sigma_{PA} + \omega_i$$

Souřadnice jednotlivých podrobných bodů se pak spočítají 2. geodetickou úlohou:

$$Y_i = Y_P + \sin \sigma_{Pi}$$

$$X_i = X_P + \cos \sigma_{Pi}$$

7.5.2 Ortogonální metoda



obr. 7.17 – Ortogonální metoda

Dáno:

Body P, K

Měřeno:

délky staničení a kolmic s_i, k_i

délka s_{PK}

Určit:

souřadnice bodů 1, 2, ..., n

Pozor, je nutné dodržet, že kolmice mají kladné znaménko vpravo od polopřímky PK!

Nejprve zkontrolujeme přesnost měření. Porovnáme vzdálenost bodů P, K spočítanou ze souřadnic \bar{s}_{PK} s měřenou délkou s_{PK} . Pokud je menší než dopustná odchylka, můžeme pokračovat ve výpočtu. Všechny měřené délky změňme v poměru vypočítané / změřené délky:

$$\bar{s}_i = \frac{s_{PK}}{\bar{s}_{PK}} s_i \quad \bar{k}_i = \frac{s_{PK}}{\bar{s}_{PK}} k_i$$

Nyní si souřadnice bodu 1 rozložíme na tři části a ty postupně vyjádříme:

$$\begin{aligned} Y_1 &= Y_P + \Delta Y_{S1} + \Delta Y_{K1} & X_1 &= X_P + \Delta X_{S1} + \Delta X_{K1} \\ \Delta Y_{S1} &= \bar{s}_1 \cdot \sin \sigma_{PK} & \Delta X_{S1} &= \bar{s}_1 \cdot \cos \sigma_{PK} \\ \Delta Y_{K1} &= \bar{k}_1 \cdot \sin(\sigma_{PK} + R) = \bar{k}_1 \cdot \cos \sigma_{PK} & \Delta X_{K1} &= \bar{k}_1 \cdot \cos(\sigma_{PK} + R) = -\bar{k}_1 \cdot \sin \sigma_{PK} \\ Y_1 &= Y_P + \bar{s}_1 \cdot \sin \sigma_{PK} + \bar{k}_1 \cdot \cos \sigma_{PK} & X_1 &= X_P + \bar{s}_1 \cdot \cos \sigma_{PK} - \bar{k}_1 \cdot \sin \sigma_{PK} \end{aligned}$$

Ke stejným výsledkům se lze dostat i užitím transformace souřadnic, zavedeme-li místní souřadný systém s počátkem v bodu P a osu x vložíme do přímky PK. Maticové vyjádření transformace

s posunem do bodu P, rotací o úhel σ_{PK} a změnou měřítka v poměru $\frac{s_{PK}}{\bar{s}_{PK}}$ dostaneme transformační rovnici:

$$\begin{pmatrix} Y_i \\ X_i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_P \\ X_P \end{pmatrix} + \frac{s_{PK}}{\bar{s}_{PK}} \begin{pmatrix} \sin \sigma_{PK} & \cos \sigma_{PK} \\ \cos \sigma_{PK} & \sin \sigma_{PK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_i \\ k_i \end{pmatrix}$$