Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Hornicko – geologická fakulta
Institut geodézie a důlního měřictví

VYBRANÉ KAPITOLY Z DŮLNÍHO MĚŘICTVÍ

učební texty

Autor : Doc. Ing. Eduard Kubečka, CSc.,

Ostrava 2002

1. Měření směrů magnetickými přístroji

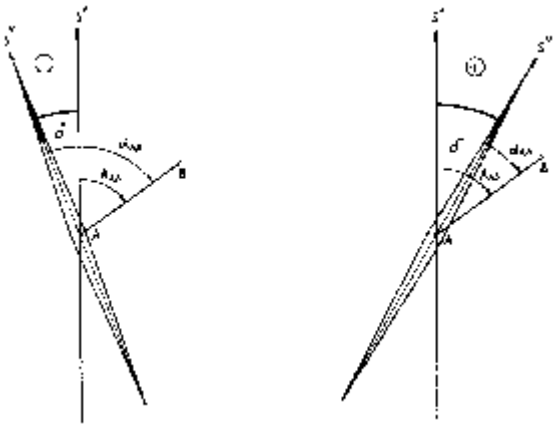
U všech těchto přístrojů se využívá vlastností magnetického pole Země. Při měření směrů teodolity jsme základní nulový směr volili zcela libovolně a od tohoto směru určovali směry okolních bodů. Při magnetickém určování směrů však základní nulový směr klademe do magnetického poledníku (tj. meridiánu), který směřuje do magnetického pólu Země. Do tohoto směru se ustálí magnetka volně podepřená v místě pozorování. Směry zaměřované od tohoto základního směru nazýváme magnetickými směry.

Naše zeměkoule je kulový magnet, jehož magnetické póly nejsou však totožné s póly astronomickými. Z tohoto důvodu nebude magnetický a astronomický směr v libovolném místě na zeměkouli totožný, ale oba směry budou spolu svírat úhel, který nazýváme magnetickou deklinací a označujeme ji δ. Nevýhodou je, že magnetická deklinace není hodnota stálá, ale proměnlivá. Mění se s časem, ale i místem pozorování. Rozeznáváme magnetickou deklinaci kladnou (východní), tj. taková kdy magnetický poledník (S^M) je odchýlen od astronomického k východu (vpravo) a zápornou, při odchýlení k západu (vlevo), tak jak je znázorněno na obr. č. 1. Podle obrázku astronomický směr přímky $\overline{AB}$ určíme jako

$$A_{AB} = \alpha_{AB} - \delta \qquad \text{je-li deklinace západní}$$

nebo

$$A_{AB} = \alpha_{AB} + \delta \qquad \text{je-li deklinace východní}$$



Obr. č. 1 Magnetická deklinace kladná a záporná

Změny magnetické deklinace

Změny magnetické deklinace mohou být:

- Časové
- Místní

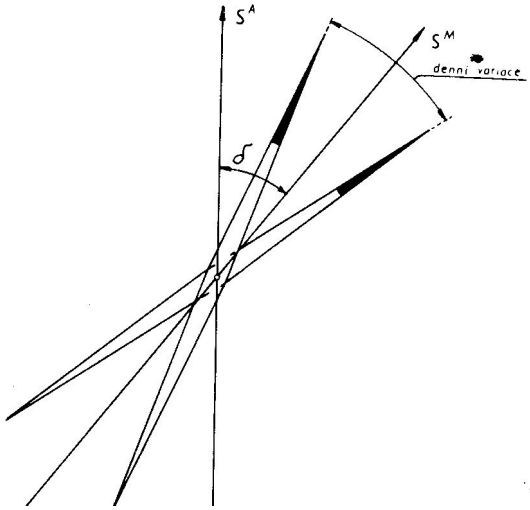
Změny časové

Časové změny rozeznáváme v závislosti na čase jako změny:

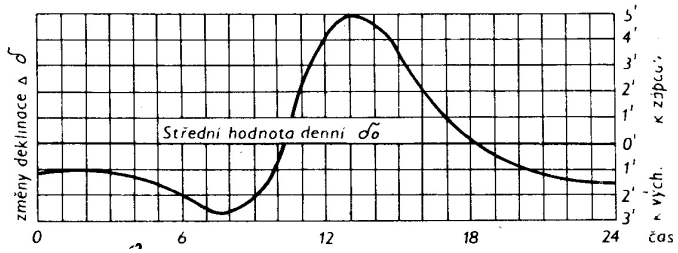
1. denní
2. roční
3. dlouhodobé neboli sekulární

1. Denní změny

Tyto změny se odvozují od sluneční činnosti během dne. Magnetka v průběhu dne vykonává pohyb kolem průměrné denní hodnoty magnetické deklinace směrem západním i východním, tak jak je znázorněno na obr. č. 2. Tyto změny nejsou pravidelné, ale jejich průběh je závislý na denní době, jak vyplývá z diagramu na obr. č. 3. Z průběhu diagramu vyplývá, že nejintenzivnější změny jsou mezi 8 až 14 hodinou (činnost Slunce) a naopak nejmenší změny v nočních a časných ranních hodinách. Proto také tato doba je nejvhodnější pro magnetická měření. Amplituda křivky je závislá na období a bývá až 11´ v letních měsících a 5´v zimních měsících.



Obr. č. 2 Změny magnetické deklinace během dne



Obr. č. 3 Průběh magnetické deklinace během dne

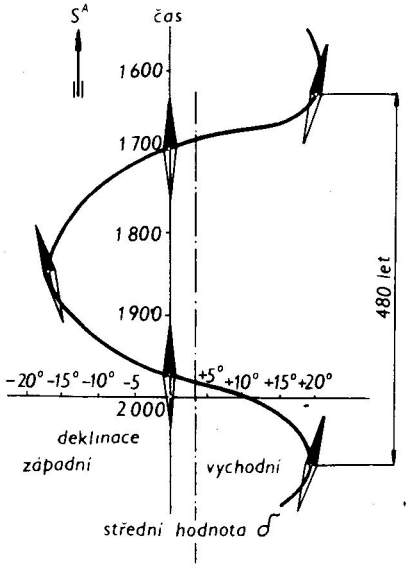
2. Roční změny

Jsou dány změnou amplitudy denních změn.

3. Dlouhodobé změny

Dlouhodobé změny jsou odvozovány od změn stavu zemského nitra, které mají za následek změny permanentního zemského magnetismu. Průběh dlouhodobé změny ukazuje obr. č. 4. Magnetka mění pozvolna svou polohu z krajní hodnoty východní na krajní hodnotu západní a opět se vrací do původní hodnoty východní. Tato změna je udávána periodou 480

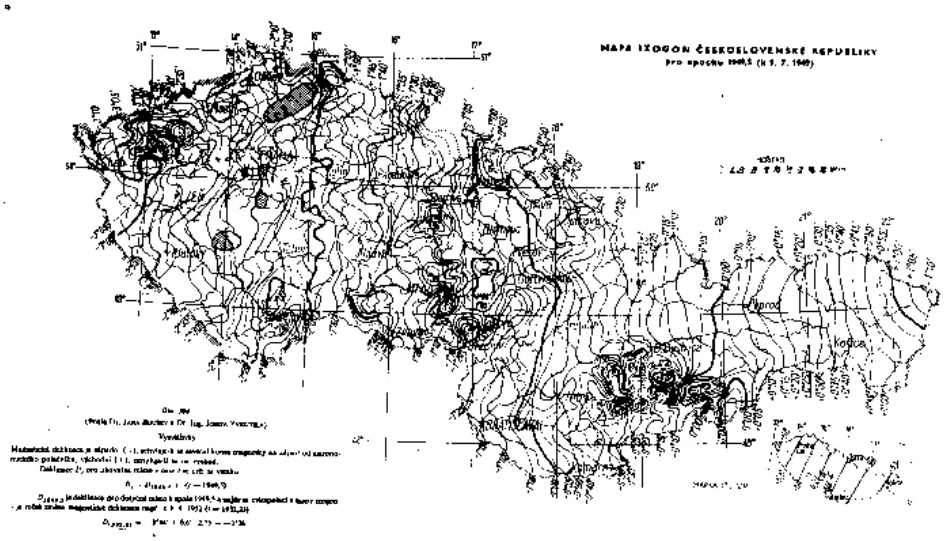
let a amplituda změny během této doby je 35^{o} (změny jsou pozorovány v Londýně od r. 1600).



Obr. č. 4 Dlouhodobá změna zemského magnetismu

4. Změny místní

Místní změny se dají vypočítat z hodnot magnetické deklinace na pozorovacích stanicích a z rozdílu zeměpisné délky pozorovací stanice a místa pozorování, nebo složitějších výrazů v závislosti na rozdílech zeměpisné šířky i délky místa pozorování. Pro běžnou potřebu je možno určit hodnotu magnetické deklinace z mapy isogon. Isogony jsou čáry, které spojují místa stejné magnetické deklinace a dávají přehled o místních změnách magnetické deklinace. Mapa isogon se zpracovává z měřených hodnot magnetické deklinace k určité epoše. Na obr. č. 5 je taková mapa pro území našeho státu k epoše 1949,5 (desetinným číslem 0,5 je vyjádřena část roku, tedy k 1. 7. 1949).



Obr. č. 5 Mapa isogon

Z této mapy je možno s postačující přesností určit deklinaci libovolného místa a období na základě deklinací, které vyznačují isogony, ročních změn magnetických deklinací a rozdílu epochy 1949,5 a doby (převedené na epochu), k níž deklinaci zjišťujeme. Podrobný návod je uveden v mapě. Kromě časových a místních změn existují ještě nepravidelné odchylky, které nazýváme poruchy a mohou mít svůj původ např. v nahromadění feromagnetických látek v zemské kůře, ale třeba i v místě měření (kolejnice, potrubí, atd.), v blízkosti vedení el. proudu a tzv. magnetickými bouřemi, které jsou vyvolány zvýšenou sluneční činností (sluneční erupce). Všechny tyto okolnosti nepříznivě ovlivňují měření a je třeba tyto vlivy z okolí měření odstranit, popř. o výskytu mag. bouře se přesvědčit dotazem na pozorovacích stanicích.

Přístroje založené na principu zemského magnetismu

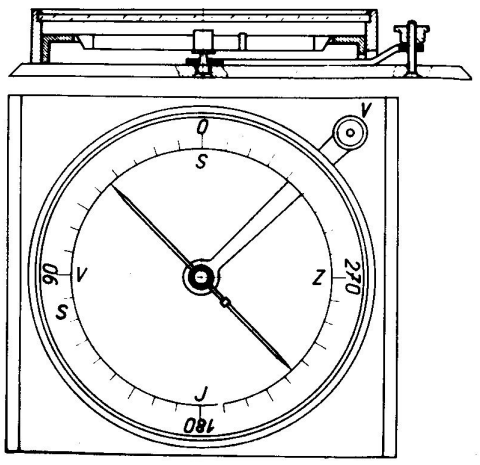
Podle konstrukce a způsobu použití můžeme přístroje rozdělit na:

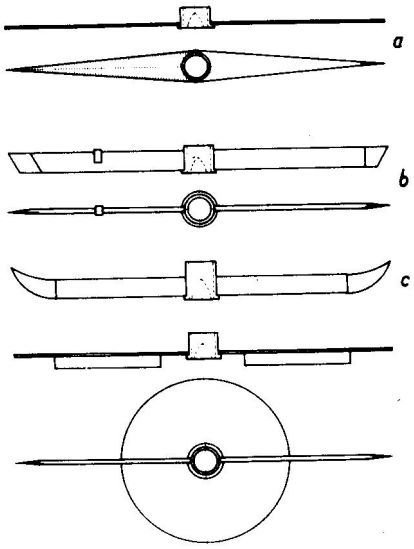
- Kompasy
- Busoly
- Buzolní teodolity

Podstatnou částí všech těchto přístrojů je kompas, který je různě kombinován se záměrnými pomůckami.

Kompasy

Kompas je v podstatě nízká válcová krabice, vyrobená z nemagnetického kovu nebo slitiny. Na obvodu krabice je dělená stupnice. Do středu krabice se stupnicí je umístěn ocelový hrot, na němž je zavěšena deklinační magnetika (magnetka, která má pomocí závažíčka vyváženou svislou složku zemského magnetismu, aby se mohla pohybovat ve vodorovné rovině). Na stupnici je vždy označen 0^o sever (S nebo N), 180^o jih (J, S), 90^o západ (Z, W) a 270^o východ (V, 0). Konstrukci jednoduchého kompasu ukazuje obr. č. 6. Dělení je zpravidla na stupně nebo půlstupně a je levotočivé. Magnetka kompasu je vyrobena z oceli a je přiměřeně zmagnetizována. Tvar magnetek je různý a závisí na kvalitě kompasů. Severní pól magnetky je odlišen barevně. Na obr. č. 7 jsou znázorněny různé tvary magnetek.



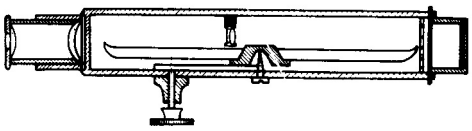


Obr. č. 6 Jednoduchý kompas Obr. č. 7 Různé tvary magnetek

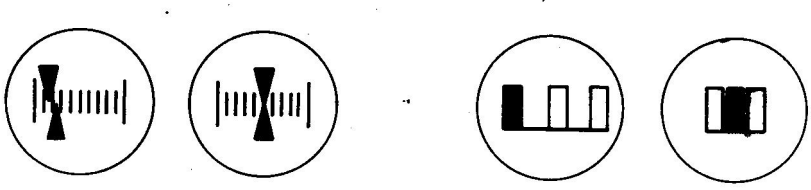
Pro nasazení magnetky na ostrý vybroušený hrot kompasu je magnetka opatřena kloboučkem z achátu nebo rubínu, v němž je vybroušen důlek pro hrot. Kvalita kompasu je dána kvalitou provedení hrotu a kloboučku. Aby se klobouček a hrot při přenášení kompasu nepoškodil, magnetku aretujeme (nadzvednout z hrotu a přitlačit ke skleněnému víku krabice). Aby kompas měl správnou funkci, musí splňovat následující podmínky správnosti:

1. Dělení stupnice má být správné – při dnešní výrobě podmínka zaručena.
2. Kompasová krabice nesmí obsahovat žádné magnetické kovy.
3. Magnetka musí být dostatečně citlivá (musí se ustálit vždy na stejném místě).
4. Magnetka musí vykonávat kmitavý pohyb ve vodorovné rovině.
5. Geometrická osa magnetky musí souhlasit s osou magnetickou.
6. Závěsný hrot má ležet ve středu dělené stupnice a spojnice konců magnetky musí procházet hrotem. Nesplněním této podmínky vzniká výstřednost magnetky.

Všechny tyto podmínky správnosti se ověřují a dají se upravit nebo i postupem měření vyloučit chyby jimi způsobené. Kromě kruhového kompasu je třeba se zmínit o tzv. trubicovém kompasu, který se používá na mnohých teodolitech (např. Meopta T1^{o}). Řez takovým kompasem je na obr. č. 8. Kompas je trubice, ve které je umístěna magnetka se zdviženými konci. Obrazy konců magnetky jsou převáděny do zorného pole okuláru, kde jsou zpravidla nad sebou. Kompas je v rovině magnetického poledníku tehdy, jsou-li oba obrazy nastaveny přesně proti sobě nebo uprostřed symetrické značky – obr. č. 9.



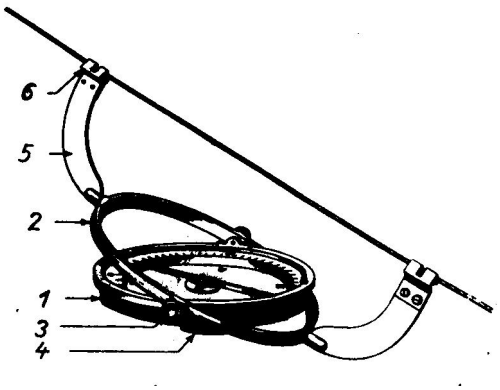
Obr. č. 8 Trubicový kompas



Obr. č. 9 Nastavení trubicového kompasu do směru magnetického poledníku

V důlním měřictví se z magnetických přístrojů nejčastěji používá hornický kompas. Hornický kompas je v podstatě měřický kompas vložený do zvláštního závěsu, který umožňuje zavěšení kompasu na měřickou šňůru (napjatou ve směru polygonové strany) a jeho ustálení vždy ve vodorovné rovině. Hornický závěsný kompas, který je zobrazen na obr. č. 10 sestává z kompasu a hornického závěsu. Hornický závěs je tvořen prstencem 2 spojeným s rameny 5 ukončenými závěsnými háky 6 pro zavěšení na měřickou šňůru. Kompasová

krabice 1 má otvory (ložiska), do kterých zapadají čepy 3 prstence 2 a tím spojují kompas s hornickým závěsem. Otvory v kompasových krabicích jsou v místech dělení 90^o až 270^o a jejich osy představují tzv. osu kompasovou. Čepy v otvorech jsou uloženy volně, takže kompasová krabice se může otáčet a zaujme při zavěšení na šikmé šňůře vždy vodorovnou polohu. Aretace magnetky je dostředná a provádí se šroubem 4.



Obr. č. 10 Hornický závěsný kompas

Postup měření hornickým závěsným kompasem

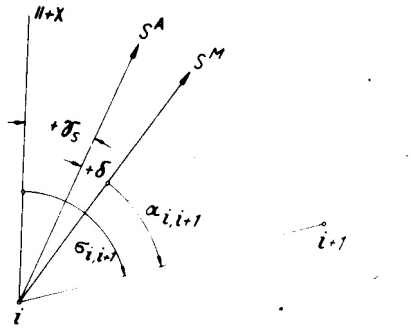
Strany polygonového pořadu jsou před měřením představovány napjatou měřickou šňůrou. Šňůra se napíná mezi měřické mosazné hřeby, které se zavrtávají do výdřevy jako vývrtka. Hřeby jsou mosazné, aby neovlivňovaly magnetku kompasu. Šňůra se na hřeby navazuje vhodným způsobem a měřický bod kompasového polygonového pořadu je představován křížením šňůr sousedních polygonových stran. V důlním díle je tedy polygonový pořad stabilizován napjatou šňůrou. Postup měření je volen podle toho, zda je měření prováděno bez přítomnosti rušivých vlivů, nebo zda je měření prováděno za přítomnosti rušivých vlivů (železa). Potom říkáme, že zaměřujeme prostý kompasový pořad. Uvedeme oba postupy.

Měření prostého kompasového pořadu

Při tomto postupu zaměřujeme čisté magnetické směry stran. Závěsný kompas zavěšujeme přibližně doprostřed napjaté šňůry na polygonové strany. Měříme nejdříve v první poloze kompasu, tzn. že kompas zavěšujeme tak, aby sever byl ve směru postupu měření. Potom měřič odaretuje magnetku a počká až se ustálí. Po stálení magnetky zaznamenává stupňový a minutový údaj ze severního konce magnetky a minutový údaj z jižního konce magnetky. Měřič odčítá minutové údaje pomocí lupy odhadem na desetiny nejmenšího dělení (6´nebo 3´). Pomocník měřiče osvětluje kompas z větší vzdálenosti. Měřič nesmí mít u sebe žádné železné předměty. Po odečtení údajů se kompas převěsí do druhé polohy (jih ve směru měření) a provedou se opět dvě odečtení z obou konců magnetky. Výsledný magnetický směr je dán stupňovým údajem severního konce první polohy magnetky a průměrem ze čtyř hodnot minutových údajů. Délky polygonových stran se změří po šňůrách latěmi nebo i pásmem (nesmí být v blízkosti kompasu) a jejich úklon pomocí závěsného sklonoměru. Závěsný sklonoměr a lupa je vždy součástí výbavy hornického závěsného kompasu. Při výpočtu polygonového pořadu kompasového v platné souřadnicové soustavě musíme znát směrníky geodetické σ, vztažené k ose x. Musíme proto magnetické směrníky přepočíst podle obr. 11.

$$\sigma_{i,+1} = \alpha_{i,i+1} + \delta + \gamma$$

kde $\alpha_{i,i+1}$ jsou měřené magnetické směry
δ je magnetická deklinace
γ je konvergence



Obr. č. 11 závislost mezi směrníky magnetickými a geodetickými

Hodnotu magnetické deklinace je třeba dosazovat pro místo a dobu měření kompasového pořadu. Hodnoty δ a γ je třeba dosazovat s ohledem na znaménka + nebo -. Pro JTSK, kde kladný směr osy x směřuje k jihu, bude výraz pozměněn na

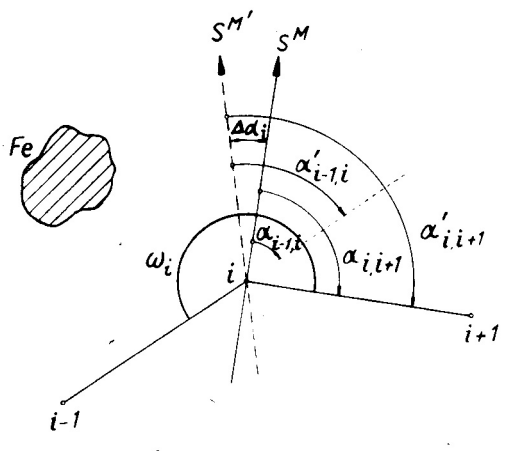
$$\sigma_{i,i+1} = \alpha_{i,i+1} + \delta + \gamma + 180^o$$

Po přepočtu směrníků magnetických na geodetické se provede výpočet kompasového polygonového pořadu, za předpokladu, že známe souřadnice výchozího bodu pořadu, obvyklým způsobem.

Měření za přítomnosti železa (rušivých vlivů)

Kompasem můžeme měřit i v přítomnosti rušivých vlivů. To je velmi důležitá okolnost, neboť v dnešních podmínkách hlubinných dolů se téměř všude vyskytuje železo (výztuž, kolejnice, lutny, potrubí atd.). Přítomnost rušivých vlivů způsobí, že magnetické směry stran by byly ovlivněny rušivými vlivy, a to různě podle vzdálenosti pol. strany od rušivého vlivu. Při měření vycházíme z té skutečnosti, že zavěsíme-li kompas pod měřickým bodem do určitého místa v prostoru a změříme-li v tomto bodě směrník předcházející a následující strany kompasového pořadu, budou tyto směrníky ovlivněny, ale stejně, a můžeme proto z jejich rozdílů vypočíst správný obvodový úhel sousedních stran kompasového pořadu.

Tento důkaz je možno odvodit z obr. č. 12.



Obr. č. 12 Rušivý vliv železa při měření kompasem

Podle obrázku ovlivní přítomnost Fe měřené směrníky předcházející strany $\alpha_{i-1,i}$ a následující strany $\alpha_{i,i+1}$ o hodnotu stejného vlivu $\Delta\alpha_1$, takže naměříme ovlivněné směry

$$\alpha'_{i-1,i} = \alpha_{i-1,i} + \Delta\alpha_i$$

a

$$\alpha'_{i,i+1} = \alpha_{i,i+1} + \Delta\alpha_i$$

Z OBRÁZKU DÁLE PLATÍ, ŽE OBVODOVÝ ÚHEL

$$\omega_i = \alpha'_{i,i+1} - \alpha'_{i-1,i} + 180^o$$

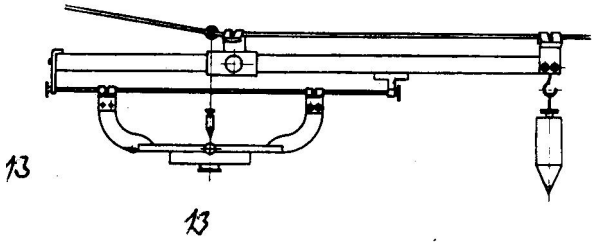
dosadíme-li do této rovnice vztahy předcházející obdržíme důkaz, že

$$\omega_i = \alpha'_{i,i+1} + \Delta\alpha_i - \left(\alpha_{i-1,i} + \Delta\alpha_i\right) + 180^o$$

$$\omega_i = \alpha_{i,i+1} - \alpha_{i-1,i} + 180^o$$

Tedy správný obvodový úhel dostaneme i z ovlivněných směrníků. Proto v přítomnosti rušivých vlivů měříme obvodové úhly.

Abychom však kompas mohli zavěsit pod bod kompasového pořadu a to tak, že jednou bude ve směru předcházející strany a jednou ve směru následující strany, musíme použít tzv. pomocného závěsu podle obr. č. 13.



Obr. č. 13 Pomocný závěs k závěsnému kompasu

Tento závěs nám prodlouží pol. stranu za kompasový bod a kompas můžeme dostředit malou olovničkou přesně pod bod. Při převěšení závěsu na druhou pol. stranu opět dostředíme kompas pod bod, ale kompas musí být ve stejné svislé vzdálenosti pod bodem jako v prvním případě (aby byl ve stejném místě v prostoru). K tomuto výškovému ustavení kompasu slouží kloubové spojení pravítka závěsu. Kompasový pořad měřený za přítomnosti železa musí být usměrněn na známou měřickou přímku, abychom mohli počítat směrníky stran pořadu. Hornického kompasu je možno použít i pro účely grafického mapování. K tomuto účelu používáme tzv. mapovací desky (opět z nemagnetických kovů), do které se kompas vloží. Hrany desky slouží pro rýsování.

Buzoly

Buzoly vzniknou doplněním kompasu záměrnými pomůckami. Záměrné pomůcky mohou být jednoduché ve formě průzorů, nebo jako záměrné pomůcky může být použito i dalekohledu. Takovýchto buzol se používá pro rychlou a méně přesnou orientaci.

Buzolní teodolity

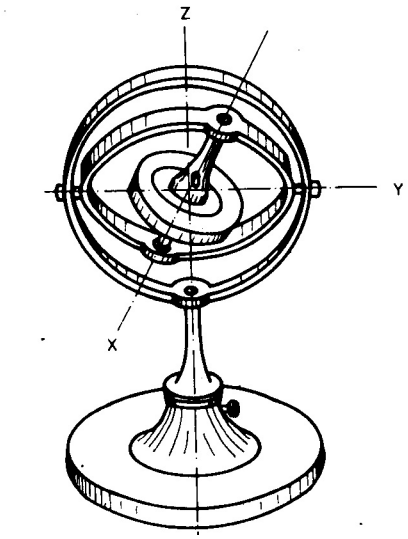
Teodolity, které jsou opatřeny kruhovými stupnicovými a trubicovými kompasy trvale, nebo se na ně dají nasadit, nazýváme buzolními teodolity. Z novějších teodolitů je to např. teodolit fy Zeiss 030, fy Freiberg Th2 a fy Meopta $T1^c$. K třem základním osovým podmínkám správnosti buzolních teodolitů přistupuje ještě podmínka, aby spojnice $0^o - 180^o$ na kompasové krabici byla v záměrné rovině dalekohledu (u sázecích trubicových kompasů buď v záměrné rovině, nebo alespoň s ní rovnoběžná). Nesplněním této čtvrté podmínky správnosti vzniká chyba orientační, tuto chybu nelze měřickým postupem odstranit. Proto se zjišťuje zvláštními postupy, z výsledků měření se odstraňuje opravou o její číselnou hodnotu nebo pootočením krabice na teodolitu.

2. Měření směrů setrvačníkovými přístroji

Setrvačníkovými přístroji určujeme směry vztažené k místnímu poledníku, tj. k astronomickému sevru. Přístroje založené na vlastnostech setrvačníku nacházejícího se v tíhovém poli Země nazýváme gyroteodolity. Gyroteodolit je složen ze dvou základních částí: setrvačníkového kompasu (gyroskopu) a teodolitu jako úhloměrné části. Protože jako setrvačníku se u dnešních gyroskopů používá rotoru asynchronního motoru, je součástí gyroteodolitů generátor a akumulátor jako zdroj proudu. Setrvačníkový kompas může být s teodolitem spojen trvale nebo snímatelně ve formě gyrokompasového nástavce. Princip setrvačníkového kompasu a jeho využití pro určení astronomického směru je znám již od roku 1852 (objev fr. Fyzika Foucalta). První pokusy s jeho využitím byly až v roce 1914, ale k praktickému využití dochází až od padesátých let minulého století.

Všeobecné poznatky o gyrokompasu

Gyrokompasem se nazývá zařízení, ve kterém se tuhé těleso otáčí okolo pevného bodu. V gyroteodolitech je gyroskopem rychle se otáčející setrvačník zavěšený takovým způsobem, aby jeho osa otáčení mohla měnit svou polohu. Pro konstrukci setrvačníku je důležité, aby jeho hmotné body byly rovnoměrně rozloženy, a proto síly působící v takovém tělese se vzájemně ruší, protože každému hmotnému bodu odpovídá jeho souměrný bod. Osa souměrnosti setrvačníku má vždy maximální moment setrvačnosti a označujeme ji osou X. Jestliže osa takového setrvačníku se může současně natáčet podél tří vzájemně kolmých os, říkáme, že setrvačník má 3 stupně volnosti. Bude to např. tehdy, jestliže setrvačník bude vsazen do Cardanova závěsu – obr. č. 14. První stupeň volnosti znamená otáčení kolem osy X, druhý kolem osy Y a třetí kolem osy Z. Bodem závěsu gyroskopu nazýváme pevný bod, kolem kterého se uskutečňují otáčivé pohyby gyroskopu. V obr. č. 14 je to bod 0.



Obr. č. 14 Setrvačník v kardanovém závěsu

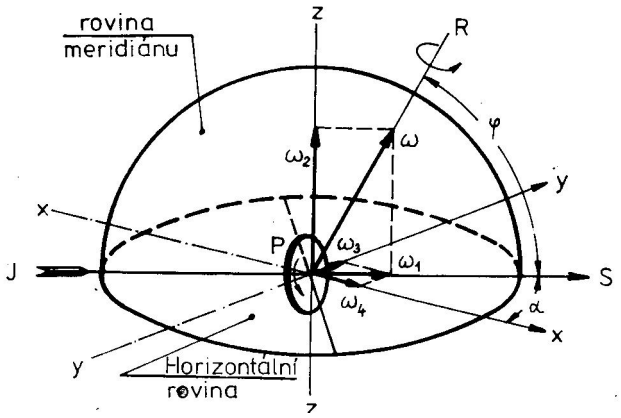
Volným gyrokompasem nazýváme takový, u kterého těžiště setrvačníku je totožné s bodem závěsu a v jehož osách není tření. Při libovolném postavení takového gyrokompasu přitažlivá síla nevyvolá žádné silové momenty vzhledem k bodu závěsu. Je patrné, že volný gyroskop je jen teoreticky možný. Protože u současných gyroskopů se jako setrvačníku používá rotorů asynchronních motorů a vždy v ložiskách os, bude existovat tření nebo i malá

změna polohy těžiště vzhledem k bodu závěsu, budou se takové gyroskopy svými vlastnostmi přibližovat ideálnímu volnému gyroskopu. U rychle se otáčejícího setrvačník u (rotoru) volného gyroskopu jsou důležité tyto dvě vlastnosti:

1. Hlavní osa rotujícího setrvačníku si zachová stálou polohu ve světovém prostoru (součet momentů působících na rotor vzhledem k bodu závěsu bude nulový.
2. Působením vnější síly, která působí na hlavní osu gyrokompasu (osu rotace setrvačníku) bude se hlavní osa gyroskopu pohybovat v rovině kolmé k rovině působící síly. Tento pohyb nazýváme precesním pohybem nebo krátce precesí a představuje reakci setrvačníku na působení vnější síly. Volných gyrokompasů se v geodézii a důlním měřictví nepoužívá.

Možnost použití gyroskopů pro určování astronomických směrů

Podle obr. 15 umístíme do horizontu bodu P na Zemi volný gyroskop. Bod P má zeměpisnou šířku φ. Setrvačník gyroskopu roztočíme a budeme sledovat pohyb osy rotace vzhledem k horizontální rovině.



Obr. č. 15 Pohyb osy setrvačníku vzhledem k horizontu

Podle první vlastnosti gyroskopu zaujme osa gyroskopu vzhledem k světovému prostoru určité pevné postavení. Proto změna její polohy vzhledem k horizontální rovině je podmíněna výhradně změnou polohy horizontu se Zemí. Země, a tím i horizont bodu P se otáčejí od západu k východu a během dne, tj. 86 164,1 sec. vykonají jednu otočku. Úhlová rychlost otáčení Země bude

$$\omega = \frac{2\pi}{86164{,}1} = 7{,}3.10^{-5} \qquad \text{rad/sec}$$

Vektor úhlové rychlosti otáčení Země ω si přeneseme do bodu P (směr rychlosti otáčení Země je v její ose a proto směr PR bude s ním rovnoběžný). Tento vektor ω rozložíme do složky horizontální ω_1 a složky vertikální ω_2, pro které platí:

$$\omega_1 = \omega.\cos\varphi$$

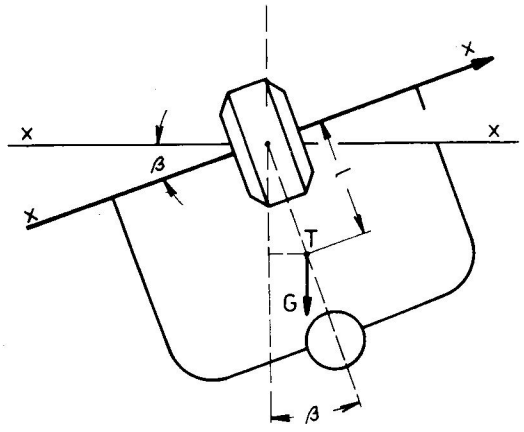
$$\omega_2 = \omega.\sin\varphi$$

Při postavení gyroskopu v bodě P bude hlavní osa gyroskopu (otáčení setrvačníku) horizontální a bude např. svírat s rovinou meridiánu úhel α směrem k východu. Vlivem vertikální složky ω_2 se otáčí meridián v bodě P, ale současně směr hlavní osy gyroskopu zůstane stejný a proto počáteční úhel jejího odklonu se bude zvětšovat. Dále rozložíme horizontální složku ω_1 do směru os Y a X gyroskopu. Podle obr. č. 15 bude platit, že

$$\omega_3 = \omega.\cos\varphi.\sin\alpha$$

$$\omega_4 = \omega.\cos\varphi.\sin\alpha$$

Vektor úhlové rychlosti ω_4 je ve směru osy rotace setrvačníku a jako velmi malá hodnota (ω=1/86164 ot./sec) neovlivní otáčky setrvačníku a je proto zanedbatelný. Složka ω_3 je však aktivní složkou vlivu otáčení Země, neboť způsobuje otáčení horizontální roviny kolem osy Y a uděluje ji úhlovou rychlost otáčení. Otáčení horizontální roviny se projevuje zvedáním severního konce osy gyroskopu nad horizontální rovinu (rychlost zvedání = 0 při α = 0). Otáčení Země tedy způsobuje odklon severního konce osy gyroskopu od meridiánu na východ a současně zvedání nad horizont. V gyroskopech, které se používají v gyroteodolitech, se horizontální osa setrvačníku udržuje v horizontální rovině tím, že se sníží těžiště rotoru pod bod závěsu. Této úpravy se dosáhne tím (obr. č. 16), že k hlavní ose setrvačníku se připevní závaží. Takovou úpravou vzniká tzv. kyvadlový gyroskop.



Obr. č. 16 Omezení jednoho stupně volnosti volného setrvačníku

Snížením těžiště pod bod závěsu vznikne kyvadlo se sílou G na délce ℓ. Působením přitažlivé síly závaží se hlavní osa kyvadlového gyroskopu snaží zaujat horizontální polohu. Kyvadlovému gyroskopu je závažím omezen jeden stupeň volnosti. Setrvačník se může volně otáčet kolem osy X a Z, ale stupeň volnosti (otáčení) je omezen kolem osy Y. Kyvadlový gyroskop má schopnost určovat směr astronomického poledníku. Prakticky se to projeví tím, že hlavní osa rotace setrvačníku bude vzhledem k astronomickému meridiánu vykonávat kmitavý (precesní) pohyb (druhá vlastnost volného gyroskopu). V určitém okamžiku osa setrvačníku gyroskopu bude zaujímat vodorovnou polohu a bude od meridiánu odkloněna o úhel α. Jak bylo uvedeno v předcházejícím vlivem otáčením Země však bude severní konec osy setrvačníku zvednut nad horizontální rovinu (důsledek ω_3) a tím osa X nakloněna o úhel

β. Z obr. č. 16 je vidět, že těžiště gyroskopu se vychýlí z tížnice, která prochází bodem 0 a vnější síla bude na osu X působit momentem

$$M = G.\ell.\sin\beta$$

Vznikající moment bude se snažit natáčet osu X vzhledem k ose Y do původního stavu a osa začne vykonávat precesní pohyb vzhledem k meridiánu. Úhlová rychlost precesního pohybu je dána

$$\omega_P = \frac{M}{J.\omega_S}$$

kde J je moment setrvačnosti setrvačníku vzhledem k jeho hlavní ose
ω_s je úhlová rychlost setrvačníku

Kyvadlovým závěsem se uskutečňuje nepřetržité působení vnějšího momentu, který se snaží uvést osu rotace do horizontální roviny a způsobuje tím precesi osy vzhledem k meridiánu. Proto takový kyvadlový gyroskop má vlastnosti usměrňujícího elementu. Při precesním pohybu bude severní konec osy rotace setrvačníku v důsledku změny úhlu β od horizontu a α od místního meridiánu ve svislé rovině opisovat velmi protáhlou elipsu – obr. č. 17. Malá osa elipsy je totožná se směrem meridiánu. Body 1 a 3 jsou body obratu (reversní) precesního pohybu, kde úhlová rychlost precese je rovna nule a úhel naklonění hlavní osy od horizontu β_o a odklon osy v meridiánu α maximální. V bodech 2 a 4 je úhel β maximální, úhlová rychlost precese maximální a α roven nule, tzn., že hlavní osa gyroskopu je v rovině meridiánu. Výsledkem momentu kyvadla (vnějšího) a reakce na něj od otáčejícího se setrvačníku vzniká usměrňující moment gyrokompasu, který se snaží osu rotace usměrnit do směru meridiánu. Na tento moment má vliv složka úhlové rychlosti ω_3 a proto tento moment je dán výrazem

$$M_u = H.\omega_3$$
$$M_u = H.\omega.\cos\varphi.\sin\alpha$$

kde
$H = J.\omega_{setr.}$
H je kinematický moment setrvačníku
J je moment setrvačnosti setrvačníku gyroskopu vzhledem k jeho hlavní ose X
ω_{setr} je úhlová rychlost otáčení setrvačníku

Veličina usměrňujícího momentu je důležitou veličinou, od které závisí přesnost gyroskopu. Velikost usměrňujícího momentu může být zvětšena jen zvětšením počtu otáček setrvačníku (až na 50 000) vzhledem k tomu, že není možno libovolně zvětšovat rozměry setrvačníku (omezeno rozměry přístroje). Z poslední rovnice vyplývá, že na rovníku (kde $\varphi = 0$) bude velikost usměrňujícího momentu maximální a na pólu $(\varphi = 90^o)$ rovna nule. Proto také není možno ve značných zeměpisných šířkách použít gyroskopů (max. do 70^o). U moderních gyroteodolitů se pohybují hodnoty usměrňujících momentů okolo 10^{-5} Nm a tato hodnota zaručuje dostatečnou přesnost přístrojů. Je to jedna z nejdůležitějších charakteristik

přístroje a bývá udávána pro $\varphi = 60^o$. Precesní pohyb jak byl popsán představuje harmonický pohyb, jehož doba jednoho kyvu

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{H}{G.\ell.\omega.\cos\varphi}}$$

Doba kyvu ovlivňuje podstatně dobu měření (pozorování při sledování doby obratu osy setrvačníku) a proto je důležité, aby byla co nejkratší. Přesto se u moderních gyroteodolitů pohybuje mezi 4-15 minutami.

Konstrukce gyroteodolitů

Gyroteodolit, jak již bylo uvedeno v úvodu této stati, vznikl vhodným spojením gyroskopu a teodolitu. Gyroskop na teodolitu zastává funkci orientačního prvku a teodolit slouží jako záměrná část. Citlivý člen u všech dnešních gyroteodolitů je představován asynchronním motorkem, jehož rotor vykonává funkci setrvačníku. Otáčky motorku jsou značně vysoké, aby se dosáhlo požadovaného usměrňujícího momentu a pohybují se okolo 30 000 ot./min. Proto součástí každého gyroteodolitu je generátor, kterým se získává kmitočet 333 až 500 Hz pro požadované otáčky. Kvalita konstrukce gyroteodolitů závisí na spojení citlivého členu s vlastním teodolitem tak, aby otáčení úhloměrné části neovlivňovalo precesní pohyb citlivého prvku. Podle uložení citlivého členu gyrokompasu můžeme gyroteodolity rozdělit na gyroteodolity:

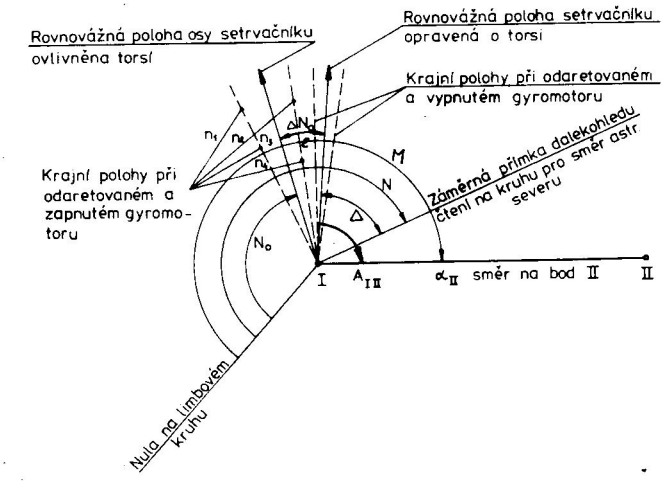
- s plovoucím citlivým členem,
- se závěsným citlivým členem.

U gyroteodolitu s plovoucím citlivým členem – obr. č. 18 je citlivý člen 1 uložen s gyromotorem 2 v nádobě 3 naplněné kapalinou. Přívod energie je přípojkou 4. Na plášti citlivého členu jsou 3 pásové titanové elektrody pro přívod třífázového proudu ke gyromotoru. Na vrchní části citlivého členu je umístěn hrot 5, který při otáčení citlivého členu musí být v jeho ose. Hrot je vyroben z nerezavějící oceli a je uložen v achátovém ložisku 6. Na plášti citlivého členu je upevněno pevně zrcátko pro sledování pohybu citlivého prvku. Pohyb je sledován kolimátorem 7 upevněném na teodolitu 8. Gyroteodolity s plovoucím citlivým prvkem jsou odolnější proti otřesům při měření, ale jsou konstrukčně náročnější. Proto se v současné době požívají převážně gyroteodolity se zavěšeným citlivým prvkem na torsním vlákně – obr. 19. V ochranném válci 1 je na tenkém ocelovém vlákně 2 zavěšen citlivý element 3, v jehož komoře 4 je pevně uložen gyromotor 5. Pro sledování kyvů citlivého členu slouží zrcátko 6. Důležitou součástí gyroteodolitu je autokolimační dalekohled pro sledování krajních bodů obratu citlivého členu. Je připevněn k alhidádě a umožňuje fixovat body obratu.

Důležitou hodnotou je úhel mezi záměrnou rovinou dalekohledu teodolitu a záměrnou rovinou autokolimačního dalekohledu. Tento úhel označujeme jako konstantu přístroje a pohybuje se kolem nuly nebo 90^0 podle umístění autokolimačního dalekohledu na alhiádě. Tato konstanta musí být zavedena do výpočtu měřených směrů. U gyroteodolitů se zavěšeným citlivým členem na torsním vlákně je třeba do výpočtu zavádět i opravu z torse vlákna. Moment torse závěsného vlákna je způsoben natáčením dolního konce vlákna oproti hornímu, který je pevně ukotven.

Pozorování a výpočet astronomického azimutu u gyroteodolitu

Astronomický směr přímky určíme pomocí pozorování bodů obratu citlivého prvku při jeho precesním pohybu kolem astronomického meridiánu. Gyroteodolit proto urovnáme a dostředíme do jednoho bodu na měřené straně. Pomocí magnetického usměrňovače nebo podle pokynů výrobce uvedeme osu rotujícího setrvačníku přibližně do směru astronomického poledníku. Dalekohledem teodolitu zacílíme v obou polohách na druhý koncový bod strany. Zapneme motor gyroskopu a počkáme až docílí provozní otáčky a opatrně uvolníme aretaci. Citlivý člen začne vykonávat precesní pohyb. Necháme zpravidla proběhnout 2 až 3 body obratu bez zaznamenání údajů. Další body obratu již sledujeme autokolimačním dalekohledem a alhidádou. V bodu obratu při zajištěné alhidádě provedeme zpravidla čtyři odečtení n_1, n_2, n_3, n_4, ze kterých vypočteme průměrnou hodnotu N_0 na limbovém kruhu – obr. č. 20.



Obr. č. 20 Určení astronomického směru gyroteodolitem

N_0 vypočteme např. následovně

$$N_0 = \frac{1}{2}\left(N_1 + N_2\right)$$

$$N_1 = \frac{1}{2}\left(\frac{n_1 + n_2}{2} + \frac{n_2 + n_3}{2}\right)$$

$$N_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{n_2 + n_3}{2} + \frac{n_3 + n_4}{2}\right)$$

Průměrnou hodnotu N_0 můžeme počítat i jinými způsoby. Vypočtenou hodnotu N_o je nutno opravit o opravu ε vlivem torse závěsného vlákna, jak již bylo uvedeno v předcházejícím. Tuto opravu zjišťujeme při vypnutém gyromotoru na stupnici autokolimačního dalekohledu.

Citlivý prvek bude kývat kolem nulové polohy. Velikost od nulové polohy se vyjádří ve vteřinách a s ohledem na znaménko. Výsledná hodnota rovnovážné polohy ΔN_0 se vypočte obdobně opět ze čtyř čtení na stupnici autokolimačního dalekohledu. Podle obr. č. 20 určíme čtení na kruhu při určení směru meridiánu.

$$N = N_0 + \Delta N_0 + \Delta$$

Výsledný astronomický směr přímky

$$A_{I,II} = M - N + \Delta$$

Konstantu gyroteodolitu občas kontrolujeme, zda se z různých okolností nezměnila. Ověření se provádí na známé orientační přímce, jejíž astronomický směr je znám. Pro převedení směrníku astronomického na geodetický je třeba znát hodnotu poledníkové sbíhavosti (konvergence) γ. Bude platit, že

$$\sigma_{I,II} = A_{I,II} + \gamma + 180^o$$

Hodnotu konvergence je třeba dosazovat s ohledem na znaménko.

3. Připojovací a usměrňovací měření

Úvod

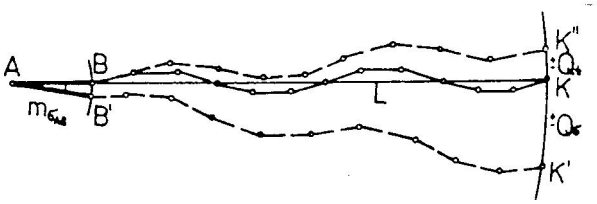
Připojovací a usměrňovací měření patří k základním a nejobtížnějším úkolům důlního měřictví a jeho úkolem je určit souřadnice bodů tzv. základní orientační úsečky na připojovaném horizontu ve stejném souřadnicovém systému, který se používá na povrchu. Jde tedy o přenesení souřadnicového systému, ve kterém se zaměřuje povrchová situace do podzemí. Ze základní orientační úsečky se potom určuje základní důlní bodové pole. Důlní díla musí být zaměřována ve stejné souřadnicové soustavě jako objekty povrchové, abychom mohli stanovit vzájemnou polohu důlních děl v hlubinném dole s objekty na povrchu, s důlními díly ve vlastním dobývacím prostoru nebo dobývacích prostorech sousedních dolů. Vzájemná souvislost povrchových objektů a důlních děl musí být známá z důvodu ochrany objektů před vlivy dobývacích prací a z potřeby projektování a provádění různých bezpečnostních opatření pro jejich ochranu (tak např. ochrannými pilíři jsou chráněny citlivé průmyslové objekty, dopravní cesty, řeky atd.). Vzájemná poloha důlních děl mezi sebou je nutná jak z bezpečnostních důvodů (průvaly vod), tak i pro potřeby dalšího projektování důlních děl. Tato vzájemná poloha důlních děl by mohla být zajištěna v libovolné souřadnicové soustavě. U nás je stanoveno zákonem používání souřadnicového systému JTSK.

Stanovení požadavku na přesnost připojovacího a usměrňovacího měření

Jak již bylo uvedeno úkolem každého připojovacího a usměrňovacího měření je stanovit polohu a směr základní orientační přímky danou koncovými body AB.
Výsledkem připojení je

$$A \equiv (x_A, y_A) \qquad B \equiv (x_B, y_B) \quad \text{a} \quad \sigma_{AB}$$

Pro případ poškození nebo zničení jednoho z koncových bodů základní orientační přímky určujeme zpravidla souřadnice tří bodů. (Při volbě tří bodů je možná i kontrola stálosti polohy bodů měřením polygonového úhlu na prostředním bodě). Umístění základní orientační přímky volíme tak, aby stabilita bodů přímky nebyla ovlivněna pohybem horninového masívu vlivem dobývacích prací. V hlubinných dolech umísťujeme základní orientační přímku na nárážích v ochranných pilířích jam. Ve vodorovných nebo úklonných dílech vždy do podloží těženého ložiska. Stabilizace bodů základní orientační přímky musí být provedena důkladným a trvalým způsobem tak jak určuje platný měřický předpis. Vzdálenost bodů má být co největší (zpravidla okolo 50 m – jedna poloha pásma) a přímá viditelnost mezi body je samozřejmým předpokladem. Rozhodujícím kritériem pro posouzení přesnosti v určení základní orientační přímky je přesnost v určení jejího směrníku ± m σ_{AB}. Stanovme tuto přesnost z následující úvahy. Podle obr. č. 1 bude přesnost bodů na okraji dolového pole dána chybou způsobenou chybným určením základní orientační přímky (chybou ± m σ_{AB}) a chybou, která vznikne z vlastního zaměření polygonálních pořadů až k okraji dobývacího prostoru.



Obr. č. 1 Stanovení přesnosti připojovacího a usměrňovacího měření

Předpokládejme pro jednoduchost přímý polygonový pořad. Příčná odchylka ± Q_σ vlivem chyby v orientační přímce m σ_{AB}. bude

$$Q_\sigma = \pm \frac{m''_{\sigma_{AB}}}{\rho''} \; . \; L \sqrt{\frac{L}{3 \; . \; S}} \qquad (1)$$

a příčná odchylka v důsledku chyb ± m_ω v měřených polygonových úhlech u přímého polygonového pořadu

$$Q_t = \pm \frac{m''_\omega}{\rho''} . L \qquad (2)$$

kde S je průměrná délka polygonových stran,
L je celková délka polygonového pořadu

Celková chyba v poloze bodu na okraji dolového pole bude dána součtem obou chyb

$$Q_c = \pm Q_\sigma \pm Q_t \qquad (3)$$

Hodnotu pro optimální přesnost směrníku základní orientační přímky připojovacího a usměrňovacího měření stanovíme nyní z podmínky, aby příčná odchylka vlivem chybné orientace ± Q_σ nebyla větší než příčná odchylka zaměřeného teodolitového pořadu k okraji dobývacího prostoru ± Q_t. Tedy

$$\pm \frac{m.''_{AB}}{\rho''} . L = \pm \frac{m''_\omega}{\rho''} . L \sqrt{\frac{L}{3S}}$$

potom

$$m\sigma''_{AB} = \pm m''_\omega \sqrt{\frac{L}{3S}} \qquad (4)$$

Bude-li např. L = 3 km, S = 40 m a m_ω= ±5“, bude mσ_{AB} = ± 25“. Zvýšíme-li přesnost m_ω na ± 3“, potom bude mσ_{AB} = ± 15“.
Můžeme proto na základě této úvahy stanovit požadavek na přesnost v určení směru základní orientační přímky hodnotou

$$m\sigma_{AB} = \pm(15''–20'') \qquad (5)$$

Metody připojovacího a usměrňovacího měření

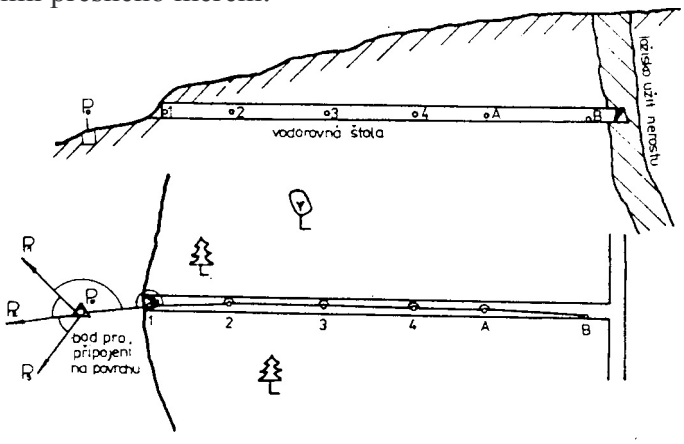
Rozhodující pro volbu metody připojovacího a usměrňovacího měření je způsob jakým je důl přístupný a dále pak přesnost s jakou má být připojovací a usměrňovací měření provedeno. Protože připojovací a usměrňovací měření jsou podle Výnosu ČBÚ o důlní mapové dokumentaci zařazena do kategorie velmi přesných měření, musíme podle daných podmínek volit vždy nejpřesnější způsob připojení a tomu odpovídající měřickou přístrojovou techniku.

Metody připojovací a usměrňovacího měření můžeme rozdělit na:

- Připojovací a usměrňovací měření vodorovným nebo úklonným důlním dílem.
- Připojovací a usměrňovací měření jednou svislou jámou.
- Připojovací a usměrňovací měření dvěma svislými jámami.
- Připojovací a usměrňovací měření méně přesnými způsoby.

Připojovací a usměrňovací měření vodorovným nebo úklonným dílem

Tohoto způsobu připojení se použije všude tam, kde bude důl zpřístupněn alespoň jedním vodorovným nebo úklonným dílem. Postup při tomto způsobu připojení je zřejmý z obr. 2. V dole se v důlním díle zvolí základní orientační přímka $\overline{AB}$ a body přímky se trvalým způsobem stabilizují. (Před ústím štoly se zvolí bod P_o a určí se jeho souřadnice trigonometrickým měřením (např. protínáním zpět). Na tento bod a některý ze zvolených směrů ($\sigma_{P_oP_1}$; σ_{P_oP2} atd.) se připojí a zaměří polygonový pořad, který ukončíme na přímce AB. Protože připojovací a usměrňovací měření patří podle Výnosu Českého báňského úřadu o důlně měřické dokumentaci do kategorie velmi přesných měření, musíme při měření polygonového pořadu měřit délky polohových stran a polohové úhly způsobem, který odpovídá stupni velmi přesného měření.



Obr. č. 2 Připojovací a usměrňovací měření vodorovným nebo úklonným důlním dílem

Aby mohla být zaručena tato přesnost měření, musí být při měření použito takových přístrojů a pomůcek, které tuto přesnost zaručují. Protože u tohoto způsobu připojení používáme otevřený polygonový pořad, u kterého jedinou kontrolou je dvojí nezávislé měření, musí být měření provedeno dvakrát nezávisle na sobě. Přitom musí být splněny dovolené odchylky

dvojího měření stanovené uvedeným výnosem ČBÚ pro kategorii velmi přesných polygonových pořadů. Tímto postupem připojení vypočteme z výchozích hodnot

$$P_0 \equiv (x_0, y_0); \quad \sigma_{P_0P_1}$$

a z hodnot zaměřených polygonových pořadů souřadnice bodů $A_0 \equiv (x_A, y_A)$;

$B_0 \equiv (x_B, y\ )$ a směrník σ_{AB} jako průměrné hodnoty z obou měření polygonového pořadu. Bude-li důl zpřístupněn např. dvěma důlními díly, zaměříme oboustranně nebo jednostranně orientovaný polygonový pořad, který můžeme vyrovnat.

Přesnost připojovacího a usměrňovacího měření vodorovným nebo úklonným dílem

Jak již bylo uvedeno měření otevřeného polygonového pořadu musíme z kontrolních důvodů provést dvakrát. Bude výhodné, aby obě měření postupovala po stejných bodech a tak obdržíme dvojice polygonových úhlů a délek polygonových stran. Z těchto dvojic měření můžeme na základě vyrovnávacího počtu stanovit přesnost úhlového měření jako

$$m_\omega = \pm\sqrt{\frac{(dd)}{2n}} \qquad (6)$$

a délkového měření

$$\lambda = \pm\sqrt{\frac{1}{2n}\left[\frac{dd}{\ell}\right]} \qquad (7)$$

Tyto hodnoty jsou podkladem pro určení střední chyby ve směru poslední strany a v poloze koncového bodu provedeného měření.

$$m\sigma_{AB} = \pm m_\omega.\sqrt{n} \qquad (8)$$

a

$$m_{xy} = \pm\sqrt{\lambda^2.\ L + \frac{m\omega^2}{\rho.2}[RR]} \qquad (9)$$

Takto vypočtené hodnoty by neměly překročit maximální dovolené odchylky stanovené platným důlně měřickým předpisem.

Připojovací a usměrňovací měření jednou svislou jámou

Toto připojovací a usměrňovací měření bude provedeno všude, kde hlubinný důl je zpřístupněn pouze jednou svislou jámou prohloubenou do úrovně připojovaného patra. Připojovací a usměrňovací měření v jedné jámě je nejnáročnější měřický úkol důlního měřiče.

V jedné svislé jámě je možno provést:

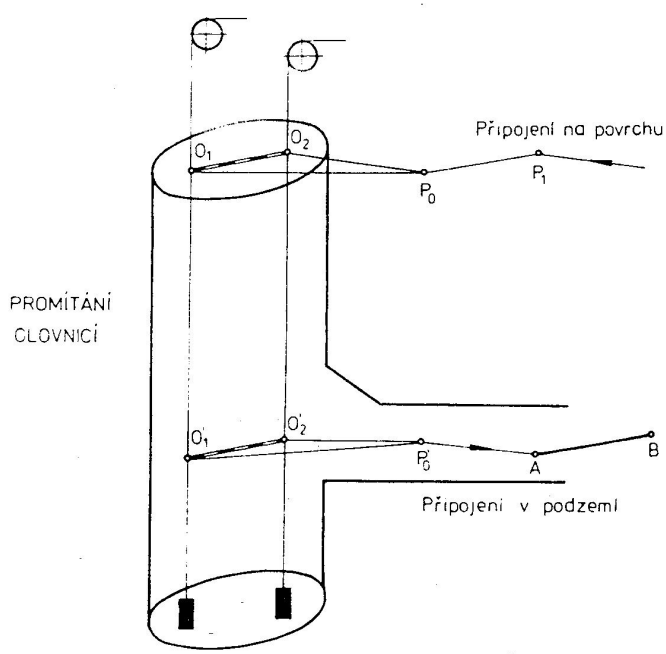
- Připojovací a usměrňovací měření dvěma olovnicemi pomocí připojovacích obrazců. Připojení se provede promítnutím dvou bodů. Body jsou určeny dvěma olovnicemi a jejich spojnicí nazýváme promítanou úsečkou.
- Připojovací a usměrňovací měření magnetické.
- Připojovací a usměrňovací měření gyroteodolitem.

Obě připojovací měření se provedou promítnutím jednoho bodu (jedna olovnice) s určením směru na připojovaném patře.

Připojovací a usměrňovací měření dvěma olovnicemi pomocí připojovacích obrazců

Princip připojení je znázorněn na obr. č. 3. Do jámy zavěsíme dvě olovnice 0_1 a 0_2 a určíme jejich souřadnice v platné souřadnicové soustavě. Zpravidla polygonovým pořadem. Této části připojení říkáme připojení na povrchu.

V další části připojení je třeba promítnout závěsné body olovnice 0_1 a 0_2 na připojované patro. Říkáme, že určujeme polohu olovnic v tížnicích. Tuto část nazýváme promítání olovnicí. V poslední části připojení, kterou označujeme jako připojení v podzemí (na patře) určíme souřadnice bodů orientační úsečky z určených souřadnic olovnic 0_1, 0_2 opět polygonovým pořadem. Protože teodolit na povrchu ani v dole není možno dostředit v olovnicích (dostředně), musíme jej stavět mimostředně v blízké vzdálenosti olovnic. Proto toto připojení označujeme jako mimostředné. Spojnice teodolitu a olovnic tvoří tzv. připojovací obrazec. Dostředné připojovací a usměrňovací měření, které by bylo vlastně plynulým zaměřováním polygonového pořadu se nedá po měřické stránce, ale hlavně z bezpečnostních důvodů uskutečnit. Budeme se v dalším věnovat jednotlivým částem připojovacího a usměrňovacího měření.



Obr. č. 3 Připojovací a usměrňovacích měření ve svislé jámě pomocí olovnic a připojovacího obrazce

Promítání závěsných bodů olovnic mechanickou olovnicí

Promítaná úsečka tvořena spojnicí olovnic je zpravidla velmi krátká,. Její délka je dána průměrem jámy a nebývá větší než 2-3 m. V jámě je umístěno těžní zařízení a další výstroj, která neumožní dosáhnout větších délek promítané úsečky. Bude proto nutno promítnout závěsné body olovnic se značnou přesností, aby natočení promítané úsečky bylo minimální.

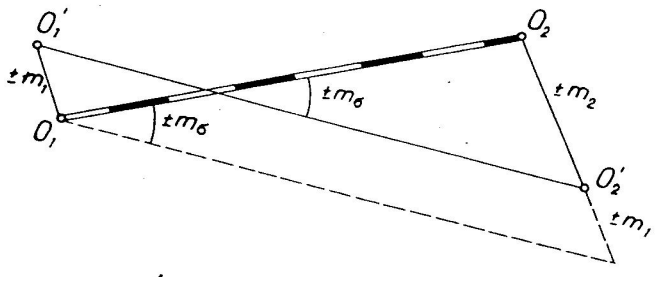
Stanovení požadavku na přesnost směrníku promítané úsečky

Přesnost směrníku odvodíme z obr. 4. Předpokládejme, že chyba v promítnutí olovnice 0_1 bude $\pm m_1$ a olovnice $0_2 \pm m_2$. Tyto chyby způsobí chybu ve směrníku promítané úsečky $\pm m_\sigma$. Protože m_σ je malý úhel, bude platit, že:

$$m_\sigma = \rho'' \frac{\pm m_1 \pm m_2}{S_{0_1 0_2}} \qquad (10)$$

a po odstranění střídavých znamének

$$m_\sigma = \pm \rho'' \frac{\sqrt{m_1^2 + m_2^2}}{S_{0_1 0_2}} \qquad (11)$$



Obr. č. 4 Stanovení chyby ve směrníku promítané úsečky

Dále budeme předpokládat, že obě chyby ± m_1 = ± m_2 = ± m. Výraz dostane konečný tvar

$$m_{\sigma\max} = \pm\rho'' \frac{m.\sqrt{2}}{S_{0_1 0_2}} \qquad (12)$$

Protože podle obrázku jsme předpokládali, že chyby v promítnutí jsou kolmé na $S_{0_1 0_2}$, bude výraz (12) určovat maximální chybu v natočení směrníku $\sigma_{0_1 0_2}$. V každé jiné poloze chyb m vzhledem k promítané úsečce bude i chyba m_σ menší než udává odvozený výraz.

Pro průměrnou chybu se dá odvodit výraz ve tvaru:

$$m_\sigma = \pm\rho'' \frac{m}{S_{0_1 0_2}} \qquad (13)$$

Porovnáním obou výrazů je vidět, že

$$m\sigma_{\max} = \pm m\sigma.\sqrt{2} \qquad (14)$$

Pro představu stanovme mσ pro délku promítané úsečky $S_{0_1 0_2} = 2m$ a chybu v promítnutí olovnic ± 1 mm

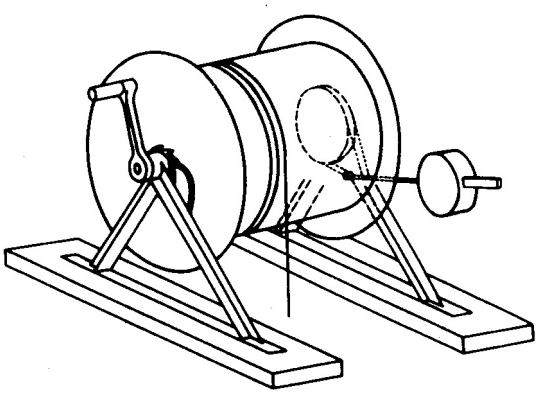
$$m\sigma = \pm \frac{206.25''.1}{2000} = \pm 103''$$

Z příkladu je vidět, že vypočtená hodnota chyby směrníku je značná a několikrát překračuje stanovený požadavek na chybu ve směrníku orientační přímky (± 15 – 20“). K této chybě mσ přistupují ještě další chyby z připojení na povrchu i v dole. Bude proto nutné zvýšit přesnost v promítání olovnic desetinásobně, tj. na hodnoty ± 0,1 mm. To je požadavek velmi přísný, který lze splnit jen při dodržení určitých postupů při vlastním měření.

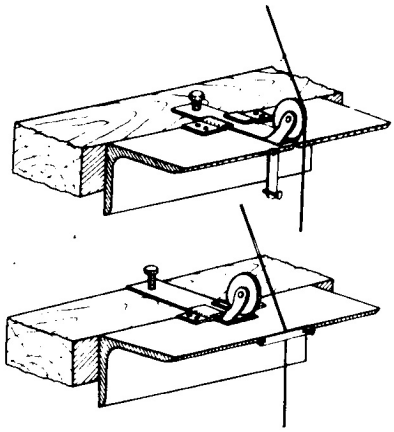
Postup při promítání mechanickou olovnicí u připojovacího a usměrňovacího měření

Úkolem promítání je určit polohu olovnice v tížnici procházející závěsným bodem olovnice. Olovnice je realizována ocelovým drátem, na kterém je zavěšeno těžké závaží.

- Ocelový drát - vysoká pevnost ø 1 – 4 mm, drát je křehký proto opatrné zacházení, drát navinut na bubnu vrátku, vrátek opatřen rohatkou a západkou a pásovou brzdou. Vrátek je na obr. č. 5 Ocelový drát veden přes kladku ve výšce 2 – 4 m – obr. č. 6.

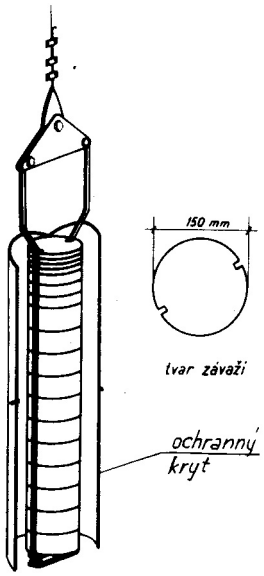


Obr. č. 5



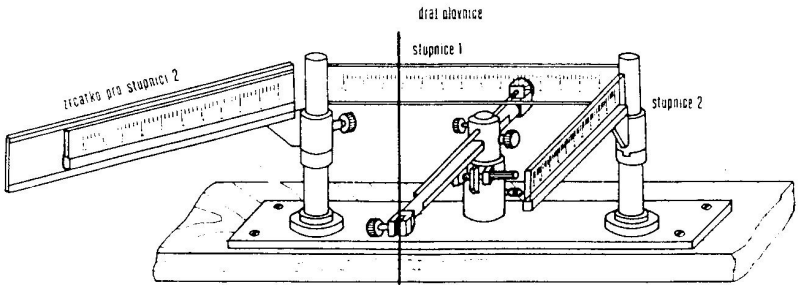
Obr. č. 6

- Závaží je o hmotnosti 50 – 500 kg. Závaží se sestavuje až po popuštění drátu na určitý horizont. Celková hmotnost závaží se sestavuje z menších závaží, která se vkládají do zvláštního rámu - obr. č. 7. Celý rám má plechový kryt.

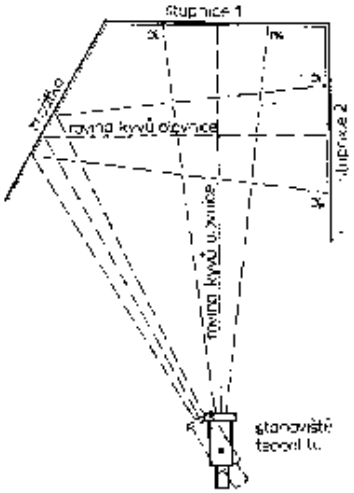


Obr. č. 7

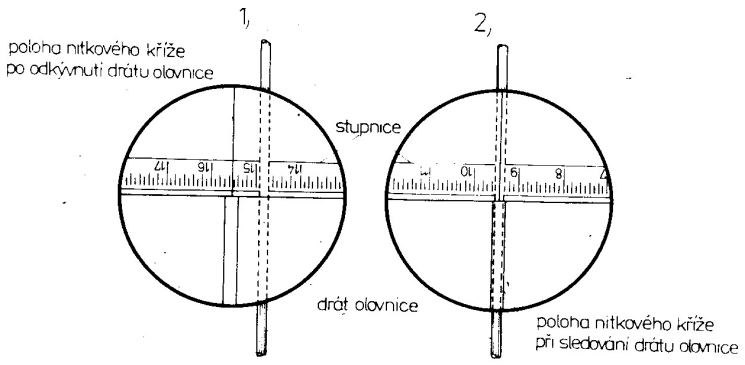
Důležitým předpokladem je volný průvěs olovnice v jámě, neboť k přesnému promítnutí závěsného bodu používáme kyvy nuceně rozkývané olovnice. Středy kyvů vyšetřujeme ve dvou na sobě kolmých směrech na stupnicích promítacího přístroje – viz obr. č. 8. Po odkývání a výpočtu středů kyvů na obou stupnicích se olovnice upne do ramene a nastaví na vypočtené středy kyvů, takže olovnice zaujímá polohu v tížnici. Kývání olovnice (krajní body drátu) sledujeme teodolitem – viz obr. č. 9. Krajní hodnoty kyvů (levých a pravých) odečteme na stupnicích pomocí nitkového kříže dalekohledu teodolitu – viz obr. č. 10



Obr. č. 8 Promítací přístroj VŠB-TUO

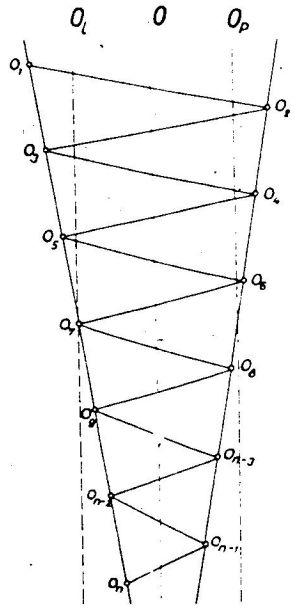


Obr. č. 9 Pozorování kyvů na promítacím přístroji



Obr. č. 10 Odečítání kyvů drátu olovnice pomocí nitkového kříže

Celkový počet krajních hodnot kyvů v jedné řadě kyvů je vždy lichý a bývá zpravidla v počtu 21 (10 celých kyvů). Levých bodů obratu je 11 a pravých 10. Větší počet kyvů se zpravidla nepozoruje, neboť kývání tak trvá delší dobu, během které se mohou vyskytnout rušivé vlivy působící na drát olovnice (vodní kapky, nepravidelnosti v proudění větrů apod.). Je tedy vhodné odečíst raději více řad kyvů o menším počtu kyvů než menší počet řad kyvů s větším počtem kyvů. Zpravidla pozorujeme 2 až 3 řady kyvů po 21 pozorováních bodů obratu na obou stupnicích. Výpočet středu kyvů je možno počítat několika způsoby. Ze způsobů, které jsou uváděny v důlně měřické literatuře se zde zmíním o dvou nejčastěji používaných. Nejvíce používaný a nejjednodušší způsob výpočtu středu kyvů je výpočet aritmetickým průměrem. Kyvy olovnice představují tlumené kyvy, jejichž ideální průběh lze znázornit dvěma přímkami, které jsou souměrné středu kyvů – obr. 11.



Obr. č. 11 Ideální průběh kyvů olovnice, které jsou souměrné k hodnotě středu kyvů.

Průměrnou hodnotu levých kyvů vypočteme jako

$$0_L = \frac{[o_r]}{\frac{n+1}{2}} \qquad (15)$$

a pravých kyvů

$$0_P = \frac{[o_P]}{\frac{n-1}{2}} \qquad (16)$$

kde n je počet všech odečtení krajních hodnot kyvů. Hodnota středu kyvů v řadě kyvů potom je

$$0 = \frac{0_L + 0_P}{2} \qquad (17)$$

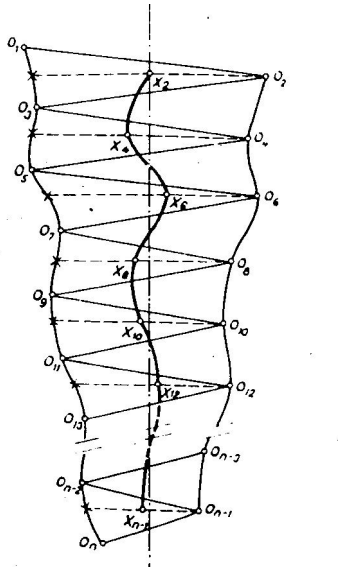
Obdobně vypočteme středy kyvů v dalších řadách kyvů (např. při třech řadách), ze kterých pak určíme výsledný střed kyvů na první stupnici jako

$$0^1 = \frac{0_1^{\cdot\cdot} + 0_2^{''} + 0_3^{\cdot\cdot\prime}}{3} \qquad (18)$$

Obdobným způsobem určíme i střed kyvů na stupnici druhé (kolmé na první)

$$0^2 = \frac{0_1^{\cdot\cdot} + 0_2^{''} + 0_3^{\cdot\cdot\prime}}{3} \qquad (19)$$

Na takto vypočtené středy kyvů se drát olovnice nastaví a upevní v rameni promítacího přístroje a může se provádět další část připojovacího měření. Při nastavování drátu olovnice na vypočtené středy kyvů je důležité, aby zrcátko, ve kterém se pozorovaly kyvy na boční stupnici, bylo ve stejné poloze jako při pozorování kyvů. Zrcátko se musí v určité poloze zajistit a při manipulaci s olovnicí nesmí se jeho poloha porušit. Po nastavení drátu olovnic na vypočtené středy kyvů se musí porovnat vzdálenost mezi olovnicemi na povrchu a v dole.



Obr. č. 12 Určování středu kyvů podle Uhlicha

Další způsob výpočtu středů kyvů je způsob podle Uhlicha. Tímto způsobem výpočtu můžeme zjistit nepravidelnosti v kývání olovnice způsobené rušivými vlivy v jámě, které ovlivňují vypočtené středy kyvů a tím zmenšují přesnost naměřených výsledků. Zde počítáme vždy ze tří po sobě jdoucích odečtení střed kyvů a z takto určených hodnot se vypočte

výsledný střed kyvů řady kyvů. Postup je znázorněn na obr. 12. Pro jednotlivé středy kyvů platí:

$$x_2 = \frac{1}{2}\left(\frac{o_1 + o_3}{2} + o_2\right)$$

$$x_4 = \frac{1}{2}\left(\frac{o_3 + o_5}{2} + o_4\right) \qquad (20)$$

$$x_{n-1} = \frac{1}{2}\left(\frac{o_{n-2} + o_n}{2} + o_{n-1}\right)$$

Takto vypočtené středy kyvů by měly vždy vykazovat co nejmenší rozptyl, jestliže měření je prováděno bez rušivých vlivů nebo alespoň za stejných podmínek. Jestliže hodnoty x budou vykazovat větší rozdíly, pak takovouto řadu kyvů z měření musíme vyloučit a měření opakovat. Z vypočtených hodnot x pak určíme výsledný střed kyvů aritmetickým průměrem jako

$$x_0 = \frac{[x]^2_{n-1}}{\frac{n-1}{2}} \qquad (21)$$

Složité Wilského promítání

Rozborem vlivů působících na zavěšenou olovnici v jámě zejména při promítání do velkých hloubek se zabývalo mnoho důlních měřičů, kteří navrhli a teoreticky zdůvodnili různé postupy měření. Uspokojivé řešení tohoto problému navrhl prof. Wilski, který provedl analýzu všech chyb při promítání olovnicí a navrhl vhodný postup měření.

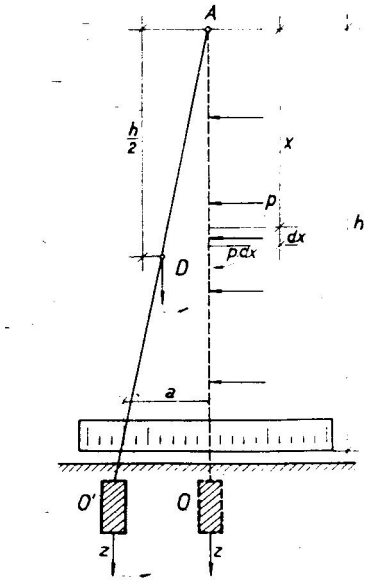
Připomeňme zde některé z rušivých vlivů ovzduší v jámě, které obklopuje visící olovnici. Předně je to samotné proudění větrů v jámě. Téměř vždy měření provádíme ve vtažné nebo výdušné jámě, kde proudění větrů nebude plynulé. Způsob proudění bude závislý na rychlosti proudícího vzduchu, průřezu jámy a konečně i výstroji, která klade odpor proudění a způsobuje různé nepravidelnosti. Proudění v jámě můžeme nejlépe přirovnat k šroubovitému proudění. Značný vliv na drát visící olovnice a samotnou olovnici má změna směru větrního proudu na nárazištích. Olovnice je touto silou, která je zpravidla kolmá, maximálně

vychylována z rovnovážné polohy. Chránit celou délku drátu v nárážích je velmi obtížné. Z tohoto důvodu se snažíme alespoň vytvořit stálé podmínky při měření tím, že vlastní závaží olovnice kryjeme plechovým krytem, který má stejný povrch a tak způsobuje stejný vliv větrů při různě těžkých závažích. Stálost větrního proudu může být narušena i tím, že na vzdáleném místě v dole dojde k otevření větrních dveří. Tato okolnost se během krátké doby projeví u jámy a ovlivní i kývání olovnice. Další nepříznivý vliv na olovnici způsobují padající vodní kapky, které mohou na drát olovnice dopadat přímo nebo odrazem z výstroje a výztuže jámy. Tato okolnost je prakticky neovlivnitelná. Napjatý drát představuje prakticky strunu a při nárazu vodní kapky na drát může s drát rozkmitat a tyto tzv. sekundární kmity mohou narušovat kývání olovnice. Dá se odvodit, že vhodnou volbou závaží můžeme sekundární kmity eliminovat. Na kývání olovnice mají vliv i takové okolnosti jako je nepevná poloha závěsného bodu, tuhost drátu olovnice a torsní kmity způsobené tím, že drát při výrobě je tažen ve šroubovici. Z toho co zde bylo uvedeno vyplývá, že postihnout nebo eliminovat všechny vlivy je prakticky nemožné a že kývání olovnicí musíme provádět s maximální pečlivostí a přesností.

Wilski, který se tímto problémem zabýval došel k závěru, že rozhodující vliv na zavěšenou olovnici v jámě má větrní proud v jámě a zejména pak vliv větru na nárážích. Jeho metodou promítání je možné tyto rušivé vlivy potlačit. Dalším předpokladem pro jeho metodu promítání je stálost větrního proudu během měření a předpoklad proudění větru v jámě ve směru šroubovice. Na tom do jaké míry se podaří splnit tyto předpoklady budou závislé i výsledky měření. Wilski odvodil nejdříve závislost odchylky olovnice z tížnice na velikosti síly větrního proudu. Podle obr. č. 13 je olovnice zavěšena v bodě A. Na olovnici působí síla větru na jednotku délky p, tíha závaží Z a hmotnost drátu D působící v těžišti drátu ve vzdálenosti h/2 od závěsného bodu. Tyto síly způsobí vychýlení olovnice z rovnovážné polohy o výchylku a. Výchylku a můžeme vypočíst z rovnovážného stavu všech momentů působících na olovnici. Součet momentů vzhledem k závěsnému bodu musí být roven 0. Jednotlivé momenty působící na olovnici budou:

Moment závaží $$M_Z = Z.a \qquad (22)$$

Moment způsobený hmotností drátu $$M_D = D.\frac{a}{2} \qquad (23)$$



Obr. č. 13

Moment způsobený silou větru M_P stanovíme z diferenciálního momentu způsobeným jednotkovou silou p na diferenciálním úseku d x ve vzdálenosti x od závěsného bodu.

$$dM_p = p.dx.x$$

Výsledný moment síly větru obdržíme integrací diferenciálního momentu

$$M_p = \int_0^h p.x.dx = p.\left|\frac{x^2}{2}\right|_O^h = \frac{p.h^2}{2} \qquad (24)$$

Pro rovnovážný stav momentů platí

$$M_Z + M_D - M_P = O \qquad (25)$$

a po dosazení za jednotlivé momenty

$$Z.a + D.\frac{a}{2} - \frac{p.h^2}{2} = 0$$

obdržíme

$$a = \frac{p.h^2}{2\left(Z + \frac{1}{2}D\right)} \qquad (26)$$

Podle Wilského volíme hmotnost celkového promítacího závaží jako součet závaží Z a jedné poloviny váhy drátu. Označíme-li tento součet jako celkové závaží Q a protože

předpokládáme, že poměry během měření jsou stálé (p = konst.) a nemění se ani hloubka h, můžeme psát, že

$$a = \frac{K}{Q} \qquad (27)$$

Podle tohoto výrazu nekonečně velké závaží ustálí olovnici v tížnici, protože potom a = O. Wilski podle obr. č. 14 volí pro promítání dvě závaží, pro která při stejné síle větrního proudu při měření můžeme napsat, že pro závaží Q_1 bude

$$a_1 = \frac{K}{Q_1} \qquad (27)$$

a

$$a_2 = \frac{K}{Q_2}$$

Hodnoty a_1 a a_2 jsou tedy výchylky od polohy olovnice v tížnici, která prochází závěsným bodem A. Tyto odchylky budou dány hodnotami A_1 a A_2 , což jsou vypočtené středy kyvů (zjištěné např. Uhlichovým způsobem) pro jednotlivá závaží. Polohu olovnice v tížnici A_0 dosud neznáme. Pro polohu olovnice v tížnici však z obr. č. 296 platí

$$A_0 = A_1 - a_1$$

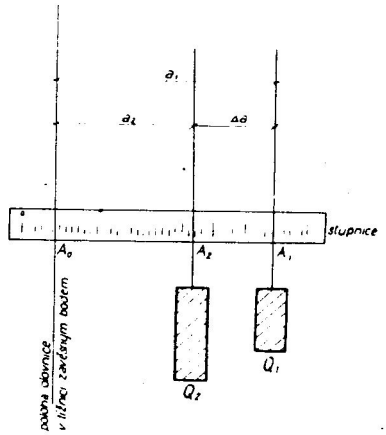
a (28)

$$A_0 = A_2 - a_2$$

Dále platí, že

$$\Delta a = a_1 - a_2 = A_1 - A_2 \qquad (29)$$

Δa je tedy hodnota známá, kterou vypočteme jako rozdíl středu kyvů obou závaží.



Obr. č. 14 Wilského složité promítání se dvěma závažími

Pro poměr odchylek podle (27) můžeme psát

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{\frac{K}{Q_1}}{\frac{K}{Q_2}} = \frac{Q_2}{Q_1} \qquad (30)$$

a také, že

$$a_1 = a_2 . \frac{Q_1}{Q_2} \qquad (31)$$

Rovnici (31) dosadíme do vztahu (29)

$$\Delta a = a_2 . \frac{Q_2}{Q_2} - a_2$$

a odtud (32)

$$a_2 = \Delta a \ . \frac{Q_1}{Q_2 - Q_1}$$

Obdobně vyjádříme-li ze vztahu (30) za a_2 a dosadíme zpět do (29) obdržíme, že

$$a_1 = \Delta a \ . \frac{Q_2}{Q_2 - Q_1} \qquad (33)$$

Tím jsme určili hodnoty a_1 a a_2 a můžeme proto ze vztahu (28) určit rovnovážnou polohu olovnice v tížnici jako

$$A_0 = A_1 - a_1$$

nebo

$$A_0 = A_2 - a_2$$

Z uvedeného postupu je vidět, že pro určení hodnoty A_0 postačí použít dvě různě těžká závaží. V praxi však používáme zpravidla 4 závaží a obdržíme tak nadbytečná pozorování a použitím vyrovnávacího počtu metodou nejmenších čtverců můžeme určit nejpravděpodobnější hodnotu A_0 a její střední chybu, která je důležitou hodnotou pro rozbor přesnosti celého připojovacího měření. Nepoužijeme-li metody vyrovnání, může se hodnota A_0 vypočíst z několika kombinací dvojic závaží. Podle toho co bylo uvedeno o promítání mechanickou olovnicí je vidět, že promítání mechanickou olovnicí při připojovacím měření jednou jámou je jednou z nejobtížnějších úloh důlního měřiče a vyžaduje i při propracovaných postupech značnou zkušenost. Rozhodující roli zde sehrávají podmínky při měření, které mnohdy důlní měřič nemůže ovlivnit.

Optické promítání bodů

Obtížnost při mechanickém promítání závěsných bodů vedla konstruktéry měřických přístrojů ke konstrukci promítacích přístrojů nebo též nazývaných optických olovnic. Princip optického promítání je velmi jednoduchý a spočívá v tom, že záměrná přímka přístroje, který je dostředěn nad promítaným bodem se urovná do svislé polohy. Záměrná přímka u promítacích přístrojů se urovnává do svislé polohy přesnou libelou nebo u novějších samočinně kompenzátorem. U některých novějších přístrojů je k promítání použito i laserového svazku paprsků.

Použití optických promítacích přístrojů postup promítání bodů podstatně zjednoduší a urychlí, ale jeho použití je omezené z důvodu požadované přesnosti a dosahu hloubky promítání.

Přesnost promítání je dána přesností v urovnání záměrné přímky do svislé polohy. Pro urovnání se na přístrojích používají velmi přesné libely s citlivostí okolo 5-7“. Provedeme-li urovnání libely s přesností 1/10 dílku dělení, pak můžeme předpokládat přesnost ± 0,5“. Tato přesnost způsobí např. při hloubce 200 m přesnost v promítnutí bodu ± 0,5 mm. Tato hodnota již značně převyšuje požadavek na přesnost promítání při připojovacím měření dvěma olovnicemi v jedné jámě. Bude proto možné tohoto způsobu použít při připojovacím měření dvěma jámami, nebo v jedné jámě, připojujeme-li promítáním jednoho bodu a určováním směru na připojovaném horizontu. V těchto případech promítání bodů z povrchu do dolů nemusí být provedeno s velkou přesností.

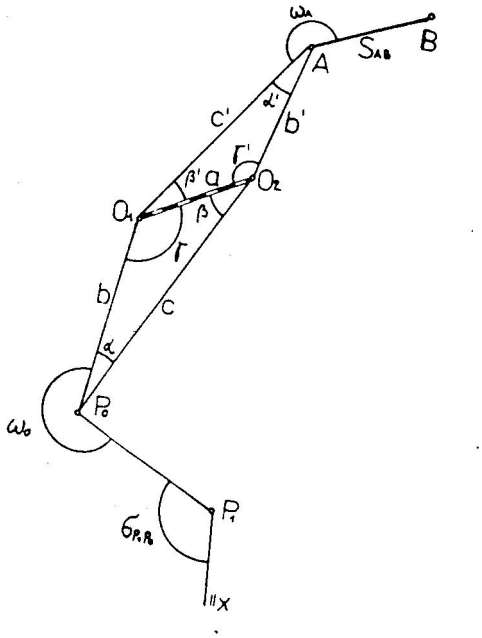
Připojovací obrazce

Jak již bylo uvedeno slouží u mimostředného připojovacího měření k určení souřadnic a směrníku olovnic 0_1, 0_2 připojovací obrazce. To je úkol připojení na povrchu. V dole pak opět pomocí připojovacích obrazců přenášíme souřadnice a směr promítané úsečky na základní orientační přímku na patře.

Z připojovacích obrazců se nejčastěji používá připojovací trojúhelník a Foxův připojovací čtyřúhelník. Postup při použití těchto obrazců s rozborem přesnosti zde bude proto uveden.

Připojovací trojúhelník

Situaci při připojení připojovacím trojúhelníkem na povrchu i v dole ukazuje obr. č. 15. Stanoviště teodolitu (na povrchu v bodě P_0 a v dole v bodě A) volíme podle poměru v nárážích jámy. Volba by měla být taková, aby strana c byla přibližně trojnásobkem délky promítané úsečky a. Bod P_0 je určen zpravidla polygonovým pořadem z bodů P_1 ….. P_n. Ve vrcholech připojovacích trojúhelníků (excentrických stanovištích) jsou měřeny úhly α, (ά) a polygonové úhly ω, (ω_A). Dále v trojúhelnících jsou měřeny vždy všechny tři strany a, b, c (a´, b´, c´).



Obr. č. 15 Připojení připojovacím trojúhelníkem

Na povrchu nejdříve určíme směrník $\sigma_{0_1 0_2}$ promítané úsečky. K výpočtu směrníku musíme znát přípojný úhel γ (nebo β). Protože úhly nemůžeme přímo měřit, vypočteme je z naměřených hodnot. K výpočtu použijeme zpravidla sinových vět.

$$\sin\gamma = \frac{c}{a}.\sin\alpha \qquad \text{resp.} \qquad \sin\beta = \frac{b}{a}.\sin\alpha \qquad (34)$$

Směrník $\sigma_{0_1 0_2}$ určíme postupně

$$\sigma_{0_1 0_2} = \sigma_{P_0 0_1} + (360 - \gamma) - 180^o$$

Protože

$$\sigma_{P_0 0_1} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 - 180^o$$

bude $$\sigma_{0_1 0_2} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 - 180^o + 360^o - \gamma - 180^o$$

a $$\sigma_{0_1 0_2} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 - \gamma \qquad (35)$$

Obdobně pomocí úhlu β

$$\sigma_{0_2 0_1} = \sigma_{P_0 0_2} + \beta - 180^o$$

a $$\sigma_{P_0 0_2} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 + \alpha - 180^o$$

potom $$\sigma_{0_2 0_1} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 + \alpha - 180^o + \beta - 180^o$$

$$\sigma_{0_2 0_1} = \sigma_{P_1 P_0} + \omega_0 + \alpha + \beta - 360^o \qquad (36)$$

Musí platit, že $$\sigma_{0_1 0_2} = \sigma_{0_1 0_2} + 180^o \qquad (37)$$

Souřadnice olovnic 0_1 a 0_2 určíme

$$y_{0_1} = y_{P_0} + b.\sin\sigma_{P_0 0_1}\ ; \qquad y_{0_2} = y_{P_0} + c.\sin\sigma_{P_0 0_2}\ ;$$

$$x_{0_1} = x_{P_0} + b.\cos\sigma_{P_0 0_1}\ ; \qquad x_{0_2} = x_{P_0} + b.\cos\sigma_{P_0 0_2}\ ; \qquad (38)$$

V dole určíme směrník orientační přímky σ_{AB} a souřadnice bodů A a B.

$$\sigma_{AB} = \sigma_{0_1 A} + \omega_A - 180^o$$

$$\sigma_{AB} = \sigma_{0_2 A} + \omega_A + \alpha' - 180^o$$

Protože

$$\sigma_{0_1 A} = \sigma_{0_1 0_2} - \beta' \qquad \text{a} \qquad \sigma_{02 A} = \sigma_{0_2 0_1} + \gamma'$$

bude

$$\sigma_{AB} = \sigma_{0_1 0_2} - \beta + \omega_{\acute{A}} - 180^o \qquad (39)$$

$$\sigma_{AB} = \sigma_{0_2 0_1} + \gamma' + \omega_{\acute{A}} + \alpha' - 180^o \qquad (40)$$

Souřadnice bodu A budou:

$$y_A = y_{0_1} + c'.\sin\sigma_{0_1 A} \qquad y_A = y_{0_2} + b'.\sin\sigma_{0_2 A} \qquad (41)$$

$$x_A = x_{0_1} + c'.\cos\sigma_{0_1 A} \qquad x_A = x_{0_2} + b'.\cos\sigma_{0_2 A}$$

a souřadnice bodu B:

$$y_B = y_A + S_{AB}.\sin\sigma_{AB}$$

$$x_B = x_A + S_{AB}.\sin\sigma_{AB} \qquad (42)$$

Stanovením směrníku a souřadnic bodů základní orientační přímky je připojovací a usměrňovací měření jednou jámou a dvěma olovnicemi provedeno.

Přesnost v určení přípojného úhlu $\gamma\ (\beta)$

Přesnost ve výpočtu směrníku $\sigma_{0_1 0_2}$ podle rovnic (35) a (36) a dále směrníku σ_{AB} podle (39) a (40) bude kromě měřených úhlů závislá i na přesnosti s jakou budou vypočteny přípojné úhly. Protože přesnost přípojných úhlů počítáme z veličin přímo měřených, které budou měřeny s určitými středními chybami, můžeme podle zákona o hromadění chyb určit střední chyby ve vypočítávaných přípojných úhlech. Na přesnost směrníku $\sigma_{0_1 0_2}$ nebude mít vliv přesnost v určení polohy bodu mimostředného stanoviska teodolitu. Důvod je v tom,že chyby v poloze tohoto bodu ovlivní olovnice 0_1 a 0_2 stejným hodnotami a tak bude orientační úsečka o tyto hodnoty pouze posunuta, ale chyby nezpůsobí její natočení. Pro přípojné úhly platí výrazy (34).

$$\sin\gamma = \frac{c}{a}.\sin\alpha \qquad \text{a} \qquad \sin\beta = \frac{b}{a}.\sin\alpha$$

$$\gamma = arc\ \ \sin\frac{c}{a}.\sin\alpha \qquad\qquad \beta = arc\ \ \sin\frac{b}{a}.\sin\alpha \qquad (43)$$

Střední chybu např. v úhlu γ vyjádříme na základě zákona přenášení chyb jako

$$m\gamma = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial a}.m_a\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}.m_c\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \alpha}.m_\alpha\right)^2} \qquad (44)$$

Vyjádříme jednotlivé parciální derivace funkce (43) podle proměnných a, c a α.
Použijeme tvaru funkce

$$y = arc\ \ \sin\ \ x \qquad \text{kde} \qquad \sin\ \ x = \frac{c}{a}.\sin\alpha$$

$$y' = \frac{1}{\sqrt{1-x^2}}.dx$$

$$\frac{\partial f}{\partial a} = -\frac{c.\sin\alpha}{1-\left(\frac{c}{a}.\sin\alpha\right)^2}.\frac{1}{a^2} = -\frac{c}{a^2}.\frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-\left(\frac{c}{a}.\sin\alpha\right)^2}}$$

Výraz $$\sqrt{1-\left(\frac{c}{a}.\sin\alpha\right)^2} = \sqrt{1-\sin^2\gamma} = \cos\gamma$$

Protože $$\frac{c}{a}.\sin\alpha = \sin\gamma$$

Potom $$\frac{\partial f}{\partial a} = -\frac{c}{a^2}.\frac{\sin\alpha}{\cos\gamma}$$

Dosadíme-li za $\sin\alpha = \frac{a}{c}.\sin\gamma$ bude

$$\frac{\partial f}{\partial a} = -\frac{c}{a^2}.\frac{a}{c}.\frac{\sin\gamma}{\cos\gamma} = -\frac{1}{a}.tg\gamma$$

$$\frac{\partial f}{\partial c} = \frac{\sin\alpha}{\sqrt{1-\left(\frac{c}{a}.\sin\alpha\right)^2}}.\frac{1}{a} = \frac{1}{a}.\frac{\sin\alpha}{\cos\gamma}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = \frac{\cos\alpha}{\sqrt{1-\left(\frac{c}{a}.\sin\right)^2}}.\frac{c}{a} = \frac{c}{a}.\frac{\cos\alpha}{\cos\gamma}$$

Jednotlivé parciální derivace dosadíme do vztahu (44) a obdržíme

$$m\gamma = \pm\sqrt{\frac{1}{a^2}.tg^2\gamma.m_a^2 + \frac{1}{a^2}.\frac{\sin^2\alpha}{\cos^2\gamma}.m_c^2 + \frac{c^2}{a^2}.\frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\gamma}.m_\alpha^2} \qquad (45)$$

V tomto vztahu musíme všechny parciální derivace dosazovat ve stejných jednotkách, a proto chybu m_α musíme dosadit v míře obloukové jako $m_\alpha = \pm\frac{m\alpha''}{\rho''}$.

Pro zjednodušení položíme, že $\pm m_a = \pm m_c = \pm m_s$ (všechny strany v připojovacím trojúhelníku budou změřeny s přibližně stejnou střední chybou m_s) a $\sin\alpha = \frac{a}{c}.\sin\gamma$. Výraz (45) tak dostane tvar pro m_γ ve vteřinách.

$$m\gamma'' = \rho''\frac{1}{a}\sqrt{tg^2\gamma.m_s^2 + \frac{a^2}{c^2}.\frac{\sin^2\gamma}{\cos^2\gamma}.m_s^2 + c^2\frac{\cos^2\alpha}{\cos^2\gamma}.\frac{m\alpha''^2}{\rho''^2}}$$

$$m\gamma'' = \rho'' \frac{1}{a} \sqrt{tg^2\gamma . m_s^2 \left(1 + \frac{a^2}{c^2} \right) + c^2 \frac{\cos^2 \alpha}{\cos^2 \gamma} . \frac{m\alpha''^2}{\rho''^2}} \qquad (46)$$

V tomto výrazu první člen pod odmocninou vyjadřuje vliv chyb délkového měření a druhý vliv chyb úhlového měření. Protože však víme, že délkové měření i při největší pečlivosti nedovedeme provést na úrovni přesnosti úhlového měření, budeme se snažit, aby vliv prvního členu byl minimální. Bude to tehdy, když

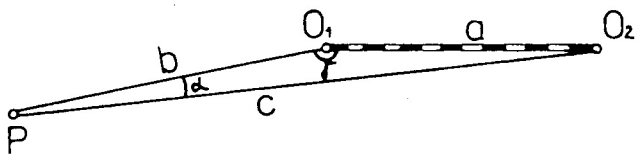
$tg\gamma \to 0$ tj., když $\gamma \to 0^o$ nebo 180^o.

Potom též $\alpha \to 0^o$

Ve výrazu (45) potom bude $\cos \alpha \doteq 1$ a $\cos \gamma \doteq 1$ a výraz nabude jednoduchého tvaru

$$m''_\gamma = \pm \frac{c}{a} . m''_\alpha \qquad (47)$$

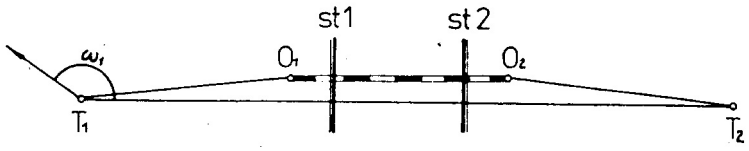
Z uvedeného vyplývá, že při plochém tvaru připojovacího trojúhelníku potlačíme vliv chyb úhlového měření a přesnost v přípojném úhlu bude závislá jen na poměru stran c/a a na přesnosti měřeného úhlu α na mimostředném stanovisku. Při praktickém měření volíme mimostředné stanovisko teodolitu téměř v prodloužení olovnic 0_1, 0_2 – obr. č. 16. Úhel α by neměl přesáhnout hodnotu 1^o. Dalším požadavkem je, aby úhel α byl měřen co nejpřesněji a měří se zpravidla přesněji než polygonový úhel na mimostředném stanovisku (např. osminásobnou repeticí). Poměr stran c/a by neměl přesáhnout hodnotu 3. Jestliže dodržíme tyto zásady při volbě tvaru připojovacího trojúhelníku, nemusí být trojúhelník vyrovnán metodou nejmenších čtverců. V trojúhelníku jsou totiž změřeny čtyři prvky (a, b, c, α) a je jedním prvkem přeurčen. V plochém trojúhelníku odpadá vliv chyb délkového měření na výpočet přípojného úhlu. Jestliže poměry v náraží neumožní volbu velmi plochého trojúhelníka a musí být zvolen trojúhelník s větším úhlem α, pak takový tvar trojúhelníka podstatně zhorší přesnost přípojného úhlu γ. Další výhodný připojovací obrazec je Foxův připojovací čtyřúhelník.



Obr. č. 16 Plochý tvar připojovacího trojúhelníku

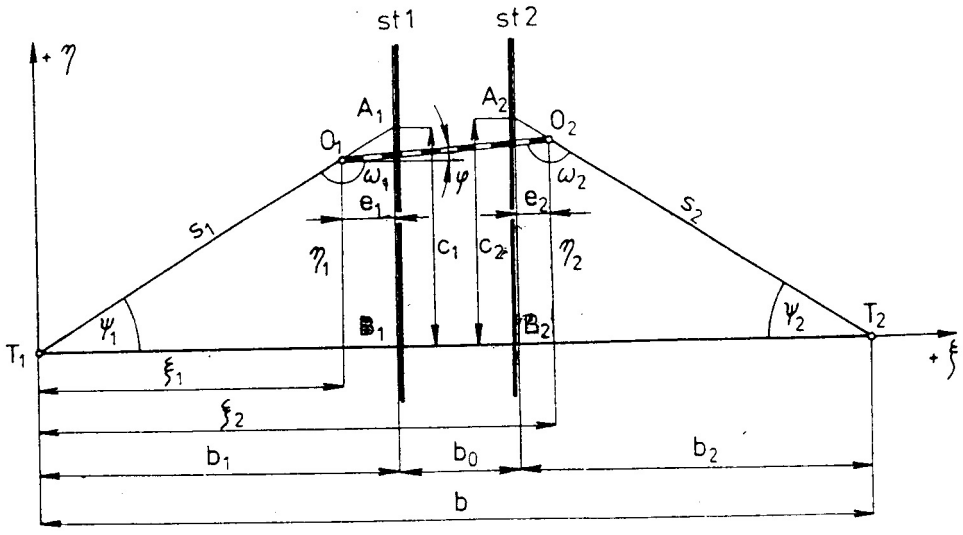
Foxův připojovací čtyřúhelník

Připojovací obrazec je velmi plochý čtyřúhelník, ve kterém neměříme žádné úhly. Vrcholy čtyřúhelníka tvoří dvě olovnice 0_1, 0_2 a dvě stanoviště teodolitů. Stanoviště teodolitů volíme téměř na spojnici (nebo poblíž) olovnic – obr. č. 17.



Obr. č. 17 Volba stanovišť teodolitu u Foxova připojovacího čtyřúhelníku

Použití takového postavení teodolitů předpokládá průchozí náraží. Stanoviště teodolitů T_1, T_2 jsou určena z předchozího polygonového zaměření a tvoří základnu čtyřúhelníka. Směrem od obou stanovisek teodolitů umístíme za každou olovnici stupnici kolmo na základnu. Na těchto stupnicích určujeme z jednotlivých stanovisek T_1 a T_2 zpravidla Wilského složitým promítáním středy kyvů A_1 a A_2. Všechny měřené hodnoty jsou vyznačeny na obr. č. 18, který je nakreslen zkresleně, aby bylo možné měřené hodnoty v něm vyznačit. Hodnoty B_1 a B_2 získáme odečtením na stupnicích při zacílení teodolitu T_1 na T_2 a opačně.



Obr. č. 18 Foxův připojovací čtyřúhelník

TAKTO ZÍSKÁME VZDÁLENOSTI

$$c_1 = B_1 - A_1$$

a

$$c_2 = A_2 - B_2 \qquad (48)$$

podle toho, kde je počátek dělení stupnic.
Dále pak zpravidla při nejtěžším závaží rozkýváme olovnice kolmo na stupnice a na jednoduchém přiloženém měřítku určíme pouze z řady několika kyvů středy kyvů v tomto

směru a obdržíme hodnoty e_1 a e_2. Potom změříme ocelovým pásmem co nejpřesněji vzdálenost b_1, b_2 a b_0. Pro kontrolu změříme i vzdálenost b. Musí platit, že

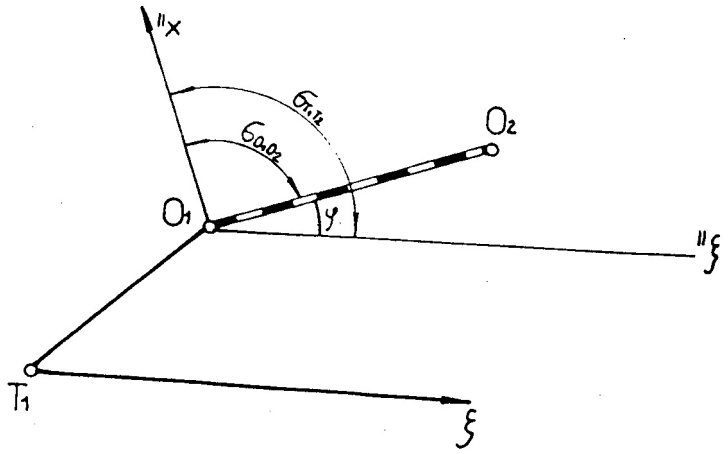
$$b = b_1 + b_2 + b_0 \qquad (49)$$

Z těchto naměřených vzdáleností provedeme další výpočet. Zvolíme pomocnou souřadnicovou soustavu a to tak, že do bodu T_1 vložíme počátek souřadnicové soustavy a osu ξ ztotožníme se základnou čtyřúhelníka – obr. č. 18. Potom v této souřadnicové soustavě musíme určit úhel φ, abychom mohli vypočíst ze známého směrníku základy $\sigma_{T_1T_2}$ směrník promítnuté úsečky (na povrchu) a v dole ze směrníku promítnuté úsečky směrník základny čtyřúhelníku – viz obr. 19. Na povrchu

$$\sigma_{0_1 0_2} = \sigma_{T_1T_2} - \varphi\,, \qquad (49)$$

v dole

$$\sigma_{T_1T_2} = \sigma_{0_1 0_2} + \varphi \qquad (50)$$



Obr. č. 19 Vztah mezi směrníkem promítané úsečky a směrníkem základny Foxova připojovacího čtyřúhelníka

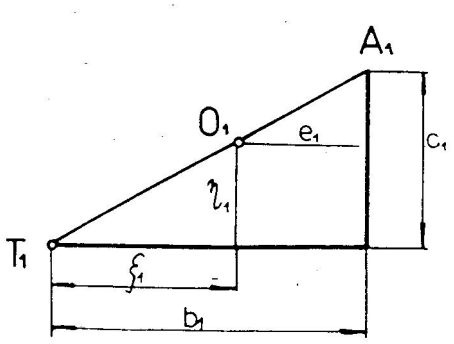
Úhel φ vypočteme pomocí tangenty

$$tg\ \varphi = \frac{\Delta\eta_{12}}{\Delta\xi_{12}} = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\xi_2 - \xi_1} \qquad (51)$$

Souřadnice ξ_1 a ξ_2 budou:

$$\xi_1 = b_1 - e_1\,; \qquad \xi_2 = b_1 + b_0 + e_2 \qquad (52)$$

Souřadnice η_1 a η_2 vypočteme na základě podobnosti trojúhelníků.



Obr. č. 20 Určení souřadnic

Z obr. 20 vyplývá:

$$b_1 : c_1 = e_1 : (c_1 - \eta_1)$$

$$b_1 c_1 - b_1 \eta_1 = c_1 . e_1$$

$$\eta_1 = c_1 \left(1 - \frac{e_1}{b_1} \right) \qquad (53)$$

a obdobně

$$\eta_2 = c_2 \left(1 - \frac{e_2}{b_2} \right)$$

Po dosazení do výrazu (51) obdržíme

$$tg\ \varphi = \frac{c_2 \left(1 - \frac{e_2}{b_2} \right) - c_1 \left(1 - \frac{e_2}{b_1} \right)}{b_0 + e_1 + e_2} \qquad (53)$$

V dalším je třeba určit souřadnice olovnic 0_1 a 0_2 při připojení na povrchu. K výpočtu musíme znát úhly ψ_1 a ψ_2, které vypočteme ze vztahů:

$$tg\ \psi_1 = \frac{\eta_1}{\xi_1} \qquad tg\ \psi_2 = \frac{\eta_2}{b - \xi_2} \qquad (54)$$

Potřebné délky S_1 a S_2 vypočteme následovně:

$$S_1 = \frac{\xi_1}{\cos\psi_1} = \frac{\eta_1}{\sin\psi_1} \qquad (55)$$

$$S_2 = \frac{\xi_2}{\cos\psi_2} = \frac{\eta_2}{\sin\psi_2} \qquad (56)$$

Směrníky $\sigma_{T_1 0_1}$ a $\sigma_{T_2 0_2}$ budou:

$$\sigma_{T_1 0_1} = \sigma_{T_2 T_1} + 360^o - \psi_1 - 180^o = \sigma_{T_2 T_1} - \psi_1 - 180^o = \sigma_{T_1 T_2} - \psi_1 \qquad (57)$$

$$\sigma_{T_2 0_2} = \sigma_{T_1 T_2} + \psi_2 - 180^o = \sigma_{T_2 T_1} + \psi_2 \qquad (58)$$

Z délek a směrníků pak obvyklým způsobem vypočteme souřadnice olovnic 0_1 a 0_2

$$y_{0_1} = y_{T_1} + S_1.\sin\sigma_{T_1 0_1} \qquad x_{0_1} = x_{T_1} + S_1.\cos\sigma_{T_1 0_1}$$

$$y_{0_2} = y_{T_2} + S_2.\sin\sigma_{T_2 0_2} \qquad x_{0_2} = x_{T_2} + S_2.\cos\sigma_{T_2 0_2} \qquad (59)$$

Při připojení v podzemí určujeme souřadnice bodů T_1 a T_2 ze souřadnic olovnic 0_1 a 0_2.
Potřebné vrcholové úhly ω_1 a ω_2 určíme následovně:

$$\omega_1 = 180^o - (\psi_1 - \varphi)$$
$$\omega_2 = 180^o - (\psi_2 - \varphi) \qquad (60)$$

Délky stran určíme stejným způsobem jako na povrchu, tj. ze vztahů (55) a (56). Směrníky $\sigma_{0_1 T_1}$ a $\sigma_{0_2 T_2}$ budou:

$$\sigma_{0_1 T_1} = \sigma_{0_1 0_2} + \omega_1$$
$$\sigma_{0_2 T_2} = \sigma_{0_2 0_1} - \omega_2 \qquad (61)$$

Z délek a směrníků určíme souřadnice bodů T_1 a T_2

$$y_{T_1} = y_{0_1} + S_1.\sin\sigma_{0_1 T_1} \qquad x_{T_1} = x_{0_1} + S_1.\cos\sigma_{0_1 T_1}$$
$$y_{T2} = y_{0_2} + S_2.\sin\sigma_{0_2 T_2} \qquad x_{T_2} = x_{0_2} + S_2.\cos\sigma_{0_2 T_2} \qquad (62)$$

Tím je připojení pomocí Foxova připojovacího čtyřúhelníku provedeno.

Přesnost připojení Foxovým připojovacím čtyřúhelníkem

Přesnost připojení bude dána přesností v určení přípojného úhlu φ, pro který platí

$$tg\ \varphi = \frac{\Delta_\eta}{\Delta_\xi} \qquad (63)$$

Nepřesnost v určení souřadnicových rozdílů $\pm m_{\Delta\eta}$ a $\pm m_{\Delta\xi}$ způsobí chybu v přípojném úhlu φ, kterou vyjádříme podle zákona o hromadění chyb jako

$$m_\varphi + \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \Delta\xi}.m_{\Delta\xi}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \Delta\eta}.m_{\Delta\eta}\right)^2} \qquad (64)$$

Pro určení parciálních derivací použijeme pro určující funkční závislost funkcí

$$y = arc\ tg\ x \qquad \text{a} \qquad y' = \frac{1}{1+x^2}.dx$$

VYJÁDŘÍME JEDNOTLIVÉ PARCIÁLNÍ DERIVACE

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta\xi} = -\frac{1}{1+\frac{\Delta\eta^2}{\Delta\xi^2}}.\frac{\Delta\eta}{\Delta\xi^2} = -\frac{\Delta\eta}{\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2}$$

a protože $\Delta\xi^2 + \Delta\eta^2 = S^2_{0_1 0_2}$

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta\xi} = -\frac{\Delta\eta}{S^2_{0_1 0_2}}$$

$$\frac{\partial f}{\partial \Delta\eta} = \frac{1}{1+\frac{\Delta\eta^2}{\Delta\xi^2}}.\frac{1}{\Delta\xi} = \frac{\Delta\xi}{\Delta\xi^2.\Delta\eta^2} = \frac{\Delta\xi}{S^2_{0_1 0_2}}$$

Hodnoty parciálních derivací dosadíme do vztahu (64) a dostáváme

$$m\varphi = \pm\sqrt{\left(\frac{\Delta\eta}{S^2_{0_1 0_2}}.m\Delta\xi\right)^2 + \left(\frac{\Delta\xi}{S_{0_1 0_2}}.m\Delta\eta\right)^2}$$

Zde vyjádříme $\frac{\Delta\eta}{S_{0_1 0_2}} = \sin\varphi$ a $\frac{\Delta\xi}{S_{0_1 0_2}} = \cos\varphi$ a obdržíme výsledný vztah

$$m\varphi = \pm\frac{1}{S_{0_1 0_2}}\sqrt{\sin^2\varphi.m\Delta\xi^2 + \cos^2\varphi.m\Delta\eta^2} \qquad (65)$$

Z odvozeného výrazu pro střední chybu přípojného úhlu φ vyplývá, že bude-li připojovací čtyřúhelník plochý $(\varphi\langle 10')$, potom $\sin\varphi \Rightarrow 0$ a $\cos\varphi \Rightarrow 1$ a pro m_φ můžeme psát jednoduchý výraz

$$m\varphi'' = \pm\rho''\frac{m\Delta\eta}{S_{0_1 0_2}} \qquad (66)$$

Střední chyba přípojného úhlu φ je závislá jen na přesnosti určení souřadnicového rozdílu $\Delta\eta$. To je také důvod proč postačí vyšetřovat středy kyvů složitým Wilského promítáním pouze ve směru souřadnic η (kolmo na směr promítané úsečky). Chyba v určení souřadnicového rozdílu $\Delta\xi$ se na přesnosti nepodílí, a proto v tomto směru zjišťujeme středy kyvů jen z několika kyvů na přiložené stupnici. Tato skutečnost umožňuje zkrátit dobu potřebnou pro měření až o 50 %. K hospodárnosti přistupuje ještě ta okolnost, že pozorování může být prováděno současně dvěma teodolity. Další výhodou je i to, že se nemusí vypočítávat středy kyvů na místě a olovnice v těchto polohách ustalovat pro další měření. Uvážíme-li, že připojovací měření pomocí připojovacího trojúhelníka trvá 8 hod. i více, a že po tuto dobu je jáma vyřazena z provozu, pak použití Foxova připojovacího obrazce zkrátí tuto dobu až o 70 %. Rovněž se tento způsob připojení osvědčuje i z hlediska přesnosti.

Kromě zde uvedených obrazců se mohou u mimostředného připojení použít připojovací čtyřúhelníky s úhlovým i délkovým měřením. Úhlové měření vyžaduje značnou přesnost a pro výpočet je nutné i vyrovnání měřených hodnot, neboť čtyřúhelník je zpravidla přeurčen několika prvky. Proto se těchto připojovacích obrazců používá jen zřídka.

Přesnost připojovacího a usměrňovacího měření dvěma olovnicemi v jedné jámě

Přesnost usměrňovacího a připojovacího měření je posuzována podle střední chyby ve směrníku základní orientační přímky na připojovaném patře. Pro střední chybu platí výraz

$$m\sigma = \pm\sqrt{m^2\sigma_P + m_P^2 + m^2\sigma_d} \qquad (67)$$

v tomto výrazu znamená:

- $m\sigma_P$ – chyba, která vznikne z připojovacího měření na povrchu. Protože připojovací měření na povrchu sestává se zaměření polygonového pořadu, v kterém měříme polygonové úhly s přesností $\pm m\omega_P$ a ze zaměření připojovacího obrazce při určování směrníku promítané úsečky $\sigma_{0_1 0_2}$, můžeme pro celkovou chybu připojení na povrchu napsat

$$m\ \sigma_P = \pm\sqrt{n_1.m_\omega^2 + m^2\gamma_P} \qquad (68)$$

n_1 - počet úhlů v připojovacím polygonu na povrchu

$\pm\ m_\omega$ - přesnost v měření polygonových úhlů,

$\pm\ m\ \gamma_P$ - přesnost přípojného úhlu v připojovacím obrazci na povrchu.

- $m\ \sigma_d$ - chyba, která vznikne z připojovacího měření v dole. Na této chybě se opět podílí přesnost v měření polygonových úhlů polygonového pořadu zaměřovaného k základní orientační přímce v podzemí a přesnost přípojného úhlu připojovacího obrazce použitého v podzemí. Bude platit, že

$$m\ \sigma_d = \pm\sqrt{n_2.m_\omega^2 + m^2\gamma_d} \qquad (69)$$

n_2 - počet úhlů polygonového pořadu zaměřovaného k základní orientační přímce v podzemí

m_P - je střední chyba ve směrníku promítané úsečky vlivem promítání. Pro tuto chybu platí výraz (13)

$$m_P = \pm\rho''.\frac{m}{a} \qquad (13)$$

$\pm\ m$ - střední chyba v ustálení olovnice v tížnici

a - délka promítané úsečky

Po dosazení těchto výrazů do vztahu (67) dostaneme

$$m_\sigma = \pm\sqrt{n_1.m^2\omega_P + m^2\gamma_P + n_2.m^2\omega_d + m^2\gamma_d + \rho^2.\frac{m^2}{a^2}} \qquad (70)$$

Tato výsledná chyba ve směrníku orientační přímky by neměla překročit hodnotu 15-20“. Platný měřický předpis stanoví dovolené odchylky pro dvojí nezávislé měření v závislosti na hloubce promítání.

Připojovací a usměrňovací měření magnetické

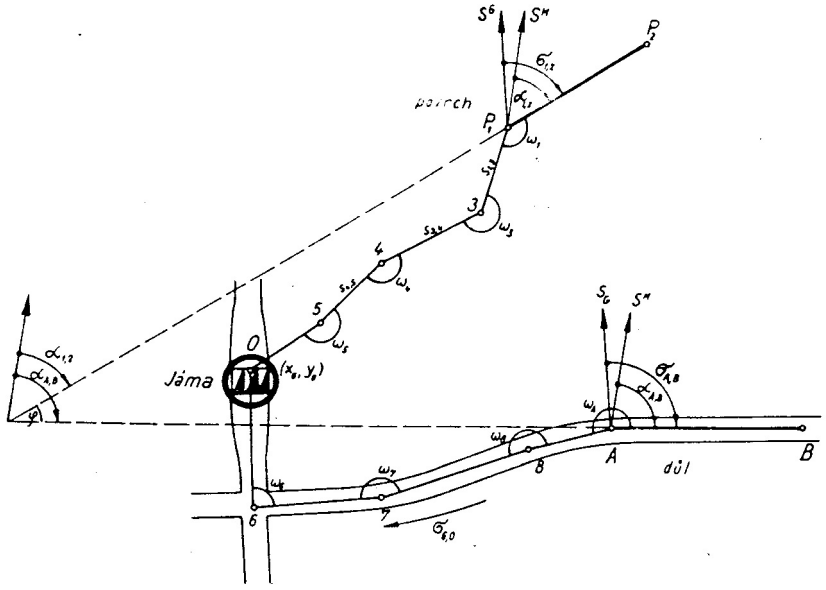
Toto připojovací a usměrňovací měření se provede promítnutím jednoho bodu a určením magnetického směru v podzemí. Magnetické měření můžeme provádět jen tam, kde jsou k tomu podmínky tzn., že nesmí být v blízkém okolí rušivá magnetická pole, železné předměty nebo feromagnetické horniny. Najít takové místo v dole je velmi obtížné neboť se převážně používá ocelová výztuž, všude je kolejová doprava, rozvod elektrického proudu a rozvod vzduchu a vody potrubím. Najde-lise takové místo, potom tam určíme magnetický směr. K měření se používá teodolitu se sázecím deklinatoriem, nejčastěji Schmidt-Neumayerovým. Toto deklinatorium má velmi citlivou magnetku tvořenou čtyřmi lamelami. Magnetka je uložena v měděném pouzdru a je podepřena ostrým ocelovým hrotem. Magnetka má dvojitý klobouček, takže umožňuje měření ve dvou polohách magnetky. Sázecí deklinatorium ve spojení s teodolitem tvoří dostatečně přesný přístroj vhodný pro magnetické připojovací měření. Princip připojení je velmi jednoduchý a je znázorněn na obr. č. 21.

Na známé přímce na povrchu určené souřadnicemi bodů P_1 a P_2 a na přímce v dole se současně určí magnetické směry. Z těchto magnetických směrů určíme natočení obou přímek

$$\varphi = \alpha_{AB} - \alpha_{P_1P_2} \qquad (71)$$

Protože můžeme určit ze souřadnic bodů směrník $\sigma_{P_1P_2}$ pomocí

$$tg\ \sigma_{P_1P_2} = \frac{y_2 - y_2}{x_2 - x_1} \qquad (72)$$



Obr. č. 21 Princip magnetického připojení

Můžeme určit i směrník přímky v podzemí

$$\sigma_{AB} = \sigma_{P_1P_2} + \varphi \qquad (73)$$

Dále je třeba určit ještě polohu přímky, tj. určit souřadnice bodů A, B. Zavěsíme proto do jámy olovnici a promítneme závěsný bod. Promítání v tomto případě stačí provést jednoduchým způsobem, tj. použitím jednoho závaží (100 kg) a jednoduchým výpočtem středů kyvů olovnice. Přesnost v promítnutí závěsného bodu olovnice ovlivní pouze polohu přímky v podzemí. Souřadnice olovnice v jámě určíme zaměřením polygonového pořadu ze známé přímky $\overline{P_1P_2}$ obvyklým způsobem. Podle obr. č. 21 to bude

$$x_0 = x_1 + \left[S.\cos\sigma\right]_{1,3}^{5,0}$$
$$y_0 = y_1 + \left[S.\sin\sigma\right]_{1,3}^{5,0} \qquad (74)$$

V podzemí zaměříme rovněž polygonový pořad od přímky $\overline{AB}$ k olovnici 0 v jámě. Abychom mohli navázat polygonový pořad na olovnici, musíme zjistit směrník σ_{06}. Tento směrník určíme ze směrníku σ_{AB}, který je již určen a měřených polygonových úhlů. Podle obr. č. 21 to bude

$$\sigma_{06} = \sigma_{AB} - \left[\omega\right]_A^6 + 4.180^0 \qquad (75)$$

Souřadnice bodů A a B pak určíme

$$x_A = x_0 + \left[S.\cos\sigma\right]_{06}^{8,A} \qquad x_B = x_A + S_{AB}.\cos\sigma_{AB}$$
$$y_A = y_0 + \left[S.\sin\sigma\right]_{06}^{8,A} \qquad y_B = y_A + S_{AB}.\sin\sigma_{AB} \qquad (76)$$

Protože přímka v podzemí, na níž byl určen magnetický směr nebude zpravidla základní orientační přímkou, musíme určit souřadnice orientační přímky zaměřením dalšího polygonového pořadu vycházejícího z některého bodu polygonového pořadu spojujícího přímku $\overline{AB}$ s olovnicí. Při magnetickém měření musíme vyloučit vliv změny magnetické deklinace během měření. Zde má platit zásada, aby celé magnetické měření proběhlo v co nejkratší době a aby se měření provádělo pokud možno v noční době, kdy časové změny magnetické deklinace jsou minimální.
Přesnost ve směrníku magneticky usměrněné orientační úsečky se pohybuje okolo

$$m_\sigma = \pm 30''$$

a je prakticky dána přesností měření pomocí přenosného deklinatoria. Dnes se používá magnetického připojovacího měření velmi málo a nahradí jej co do přesnosti, rychlosti i možnosti použití gyroteodolity.

Připojovací a usměrňovací měření gyroteodolitem

Princip připojovacího a usměrňovacího měření gyroteodolitem je obdobný jako u magnetického připojení. Směrník přímky v podzemí však určujeme gyroteodolitem. Postup určení směrníku přímky gyroteodolitem byl probrán v kapitole 2. Pro směrník platí, že

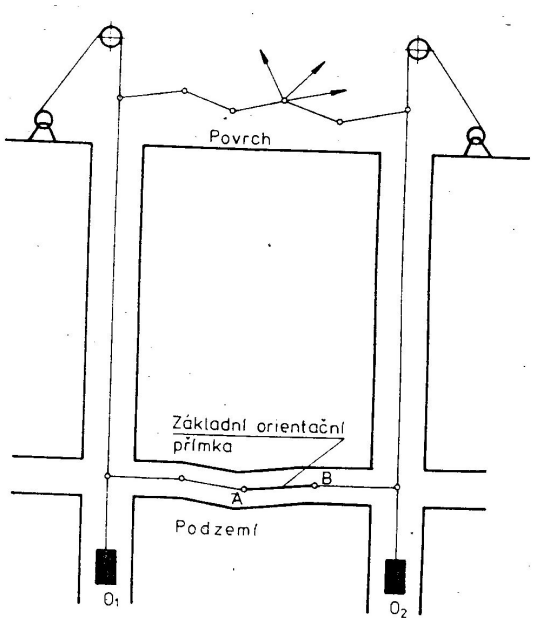
$$\sigma_{AB} = A_{AB} + \gamma \qquad (77)$$

Vzhledem k tomu, že gyroteodolit je možno použít v dole téměř v každém místě, určujeme směrník přímo základní orientační přímky v podzemí. Při měření gyroteodolitem postupujeme zpravidla tak, že na znám přímce na povrchu ověříme konstantu gyroteodolitu a pak určíme směr základní orientační přímky v podzemí.

Pro určení polohy přímky určíme souřadnice jedné olovnice zavěšené v jámě. Při výpočtu souřadnic bodů základní orientační přímky musíme nejdříve určit směrník první polygonové strany a olovnice zpětným výpočtem ze směrníku strany, jejíž směr byl určen gyroteodolitem. Souřadnice pak určíme stejným způsobem jako při magnetickém připojovacím a usměrňovacím měření. Vzhledem k tomu, že dnešní dokonalé gyroteodolity mají vysokou přesnost, poměrně malé rozměry a měření nevyžaduje dlouhou dobu, je možno považovat připojovací a usměrňovací měření gyroteodolity jak z hlediska přesnosti, tak i z hlediska časové náročnosti za nejvhodnější. Další výhodou gyroteodolitů je možnost jejich použití prakticky v kterémkoliv místě v dole, což umožňuje kontrolovat směr polygonových stran značně vzdálených od místa připojení zatíženého chybami velkého počtu polygonových úhlů.

Připojovací a usměrňovací měření dvěmi svislými jámami

Tohoto způsobu připojení použijeme všude tam, kde je důl zpřístupněn dvěma svislými jámami prohloubenými do úrovně připojovaného horizontu. Princip připojovacího měření je patrný z obr. 22. V každé ze dvou jam je zavěšena olovnice a jejich poloha se určí v platné souřadnicové soustavě. V další části pak promítneme závěsné body olovnic 0_1 a 0_2 na připojovaný horizont a na připojovaném horizontu mezi olovnice zaměříme vsunutý polygonový pořad. Některá ze stran polygonového pořadu je volena za základní orientační přímku na připojovaném horizontu.



Obr. č. 22 Princip připojovacího a usměrňovacího měření dvěma jámami

Můžeme tedy připojovací a usměrňovací měření dvěma jámami opět rozdělit na:
- Připojení na povrchu,
- Promítání závěsných bodů olovnic,
- Připojení v podzemí.

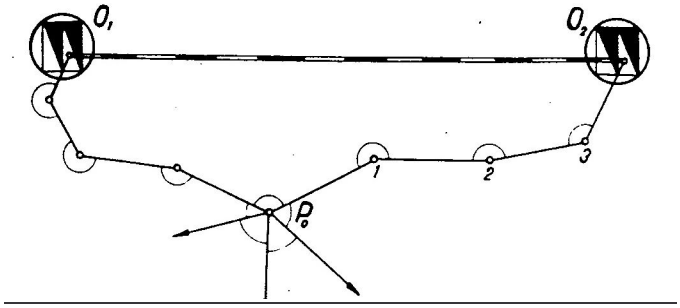
Připojení na povrchu

Úkolem této části připojení je určit souřadnice olovnic. Potřebujeme znát $0_1 \equiv (x_1, y_1)$ a $0_2 \equiv (x_2, y_2)$, abychom mohli určit σ_{12} jako

$$\sigma_{12} = arc\ tg \frac{y_{0_2} - y_{0_1}}{x_{0_2} - x_{0_1}} \qquad (78)$$

Při určování souřadnic olovnic můžeme postupovat dvěma způsoby

1. Poblíž každé jámy určíme body P_0 a P'_0 zpravidla protínáním z okolních bodů trigonometrické sítě a z těchto bodů určíme souřadnice olovnic 0_1 a 0_2 krátkými polygonovými pořady – obr. 23.



Obr. č. 23 Určení souřadnic olovnic prvním způsobem

STANOVME PŘESNOST VE SMĚRNÍKU $\sigma_{0_1 0_2}$.

Pro přesnost ve směrníku promítané úsečky byl uveden výraz

$$m\sigma = \pm\rho'' \frac{m}{S_{0_1 0_2}} \qquad (79)$$

kde m je střední chyba v určení polohy olovnic. Pro souřadnice olovnic bude platit, že

$$x_{0_1} = x_{P_0} + \left[S.\cos\sigma\right]_{P_0 1}^{n_1 0_1}$$
$$y_{0_1} = y_{P_0} + \left[S.\sin\sigma\right]_{P_0 1}^{n_1 0_1} \qquad (80)$$

a

$$x_{0_2} = x'_{P_0} + \left[S.\cos\sigma\right]_{P'_0 1}^{n,0_2}$$
$$y_{0_2} = y'_{P_0} + \left[S.\sin\sigma\right]_{P'_0 1}^{n,0_2} \qquad (81)$$

Střední chyba v poloze 0_1 nebo 0_2 bude závislá na chybách v poloze bodů P_0 a P'_0 a chybách ze zaměření krátkých polygonových pořadů. Budeme předpokládat, že $\pm\ m_{0_1} = \pm\ m_{0_2} = \pm\ m$. Potom bude platit:

$$m^2 = m_{P_0}^2 + m_{xy}^2 \qquad (82)$$

Chyba m_{xy} je chybou v poloze koncového bodu u zaměřovaného polygonového pořadu a platí, že

$$m_{xy}^2 = \lambda^2 \quad \left[s\right] + \frac{m_\omega^2}{\rho 2}.\left[RR\right] \qquad (83)$$

Po dosazení do výrazu (82) bude

$$m^2 = m_{P_0}^2 + \lambda^2\left[s\right] + \frac{m_\omega^2}{\rho^2}.\left[RR\right] \qquad (84)$$

Pro představu velikosti chyby m ji stanovíme pro: $m_{P_0} = m_{P'_0} \pm 5{,}0cm$; $\left[s\right] = 120m$, $\lambda = \pm 0{,}5mm/m$, $m_\omega = \pm 4''$, $s = 40m$ (průměrná délka stran v polygonových pořadech) a $S_{0_1 0_2} = 100m$ (vzdálenost olovnic).

$$m = 5^2.10^{-4} + 5^2.10^{-8}.1{,}2.10^2 + \frac{4^2}{2{,}06^2.10^{10}}.\left[RR\right]$$

$$[RR] = s^2\left(\frac{n^3}{3} + \frac{n^2}{2} + \frac{n}{6}\right) = 1600\left(\frac{27}{3} + \frac{9}{2} + \frac{3}{6}\right) = 22400$$

$$m^2 = 25.10^{-4} + 0{,}3.10^{-4} + 0{,}08.10^{-4} \doteq 0{,}002538m$$

$$m = \pm\ 50mm$$

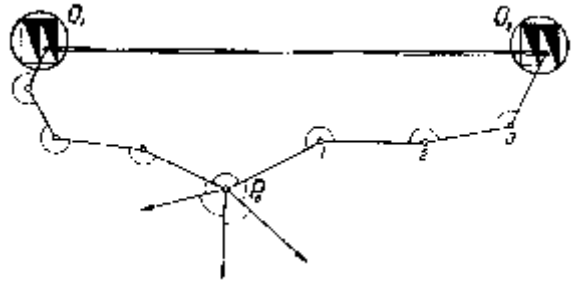
Z velikosti jednotlivých členů je vidět, že rozhodujícím způsobem se na chybě m podílí střední chyba v určení bodů P_0 nebo P'_0. Taková chyba způsobí natočení směru promítané úsečky.

$$m\ \sigma_{0_1 0_2} = \pm\rho.\frac{m}{S_{0_1 0_2}} = 2{,}06.10^5.\frac{5.10^{-2}}{10^2} = 1000''$$

To je hodnota neúnosná, a proto tohoto způsobu připojení na povrchu pro malé vzdálenosti mezi jámami nemůžeme použít. Jestliže si stanovíme podmínku, aby chyba v natočení směrníku promítané úsečky z povrchového připojení nebyla větší než 10“, můžeme určit vzdálenost mezi jámami, od které tato hodnota natočení nebude překročena. Bude to

$$S_{0_1 0_2} = \rho''.\frac{m}{m\sigma_{0_1 0_2}} = 2{,}06.10^5.\frac{5.10^{-2}}{10^1} = 100m \qquad (85)$$

Proto pro vzdálenosti mezi olovnicemi kratší než 1 000 m použijeme způsobu:



2. K určení souřadnic olovnic 0_1 a 0_2 použijeme jediný bod P_0 – viz obr. 24, který určíme protínáním z trigonometrické sítě. Bod P_0 by měl ležet nejlépe uprostřed vzdálenosti mezi olovnicemi. Souřadnice olovnic určíme polygonovými pořady vedenými přímými směry z bodu P_0 k olovnicím. U tohoto způsobu připojení chyba v poloze bodu P_0, protože bude mít stejný vliv na obě olovnice, ovlivní pouze jejich polohu a nezpůsobí natočení promítané úsečky. Na natočení promítané úsečky budou mít vliv jen chyby v poloze olovnic, způsobené zaměřením polygonových pořadů z bodu P_0 k olovnicím. Pro stejné poměry jako v předcházejícím příkladu to bude

$$m^2 = \lambda^2[s] + \frac{m_\omega^2}{\rho''}\ [RR] \qquad (86)$$

$$m^2 = 0{,}38.10^{-4}$$

$$m = \pm 6{,}1mm$$

Takováto chyba způsobí natočení

$$m\sigma_{0_1 0_2} = \pm\rho''.\frac{m}{S_{0_1 0_2}} = 2{,}06.10^5.\frac{6.10^{-3}}{10^2} = 12''$$

Promítání závěsných bodů olovnic

Promítaná úsečka tvořena spojnicí olovnic 0_1 a 0_2 bude u tohoto způsobu připojovacího a usměrňovacího měření podstatně delší než v případě promítání v jedné jámě. Proto požadavek na přesnost promítání závěsných bodů olovnic nebude tak přísný. Postačí proto určit středy kyvů drátu olovnic, jednoduchým způsobem. Postup a metodika sledování kyvů drátu olovnic je stejná jako při promítání v jedné jámě, ale pro zatížení drátu používáme zpravidla jen jedno závaží s hmotností okolo 100 kg pro hloubky do 500 m. Pro větší hloubky volíme těžší závaží. Průměrné hodnoty levých a pravých kyvů počítáme podle vzorců (15) a (16), tedy

$$0_L = \frac{o_\ell}{\frac{n+1}{2}}$$

a

$$0_P = \frac{o_P}{\frac{n-1}{2}}$$

Hodnoty středu kyvů podle (17)

$$0 = \frac{0_L + 0_P}{2}$$

Zpravidla pozorujeme tři řady kyvů na každé stupnici, takže výsledný střed kyvů na stupnici 1 bude podle (18)

$$0^1 = \frac{0_1 + 0_2 + 0_3}{3}$$

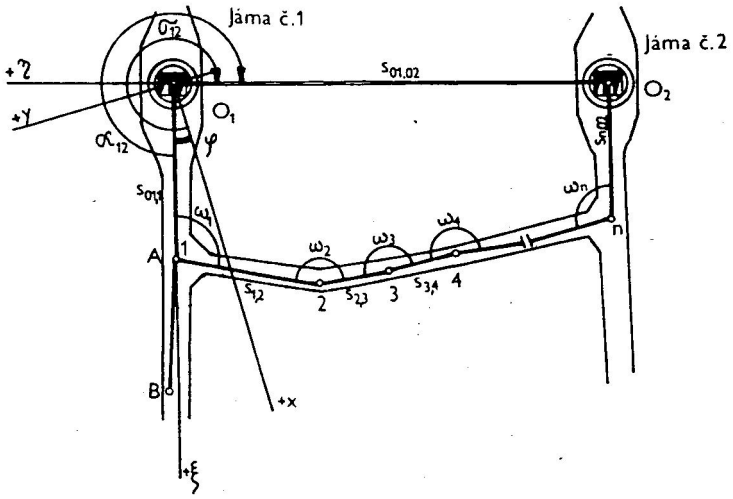
$$0^2 = \frac{0'_1 + 0'_2 + 0'_3}{3}$$

Po nastavení drátu olovnice na vypočtené středy kyvů promítacím přístrojem se provede zaměření vsunutého polygonového pořadu na připojovaném horizontě. Jednoduchým způsobem promítání je zaručena přesnost v promítnutí závěsných bodů olovnic zpravidla s přesností ± 3 mm. Tato přesnost natočí promítanou úsečku např. 100 metrové délky

$$m\ \sigma_P = \pm\rho'' \frac{m}{S_{0_1 0_2}} = 2{,}06.10^5 . \frac{3.10^{-3}}{10^2} = \pm 6''$$

Připojení v podzemí

Protože není možné provést přímou záměru z bodu 0_1 na 0_2, musíme pro přenesení směru promítané úsečky zaměřit vsunutý polygonový pořad. Podle obr. 25 bude polygonový pořad zaměřen v důlních dílech, která spojují obě jámy.



Obr. č. 25 Zaměření polygonového pořadu mezi olovnicemi v podzemí

Podkladem pro další výpočet budou naměřené strany $S_{0_1,1} ....S_{n,0_2}$ a polygonové úhly $\omega_1 ...\omega_n$. Postup výpočtu vsunutého polygonového je zde uveden jako součást výpočtu připojovacího měření. Orientace polygonového pořadu se provede výpočtem ve vlastní síti, jejíž počátek vložíme do olovnice 0_1 a osu ξ ztotožníme s první polygonovou stranou. Směrníky v pomocné soustavě ξ; η označíme α.. Pro souřadnice bodu 0_1 bude platit

$$\xi_{0_1} = 0 \qquad \text{a} \qquad \eta_{0_1} = 0$$

Pro směrník první strany

$$\alpha_{0_1 1} = 0$$

Směrníky ostatních stran polygonového pořadu vypočteme obvyklým způsobem a budou:

$$\alpha_{12} = \alpha_{0_1 1} + \omega_1 - 180^0 = \omega_1 - 180^0$$
$$\alpha_{23} = \alpha_{12} + \omega_2 - 180^0$$
$$\alpha_{34} = \alpha_{23} + \omega_3 - 180^0$$
$$\downarrow$$
$$\alpha_{n0_2} = \alpha_{n-1,n} + \omega_n - 180^0$$

kontrolní rovnice

$$\alpha_{n,0_2} = \alpha_{0_1 1} + [\omega]_1^n - k.180^0 \qquad (87)$$

Známe-li směrníky, počítáme souřadnice ξ a η.

$$\xi_{0_1} = 0 \qquad \eta_{0_1} = 0$$
$$\xi_1 = S_{0_1 1} \qquad \eta_1 = 0$$
$$\xi_2 = \xi_1 + S_{12}.\cos\ \alpha_{12} \qquad \eta_2 = \eta_1 + S_{12}.\sin\ \alpha_{12}$$
$$\downarrow \qquad \downarrow$$
$$\xi_{0_2} = \xi_n + S_{n0_2}.\cos\alpha_{n0_2} \qquad \eta_{0_2} = \eta_n + S_{n0_2}.\sin\alpha_{n0_2}$$

Kontrolní rovnice

$$\xi_{0_2} = S_{0_1 1} + [S.\cos\alpha]_{12}^{n,O_2} \qquad \eta_{0_2} = [S.\sin\alpha]_{12}^{n,0_2} \qquad (88)$$

Ze souřadnic bodů 0_1 a 0_2 vypočteme směrník spojnice $S_{0_1 0_2}$ (promítané úsečky)
a) v pomocné souřadnicové soustavě (ξ, η)

$$tg\alpha_{0_1 0_2} = \frac{\eta_{02} - \eta_{01}}{\xi_{02} - \xi_{01}} = \frac{\eta_{02}}{\xi_{02}} \qquad (89)$$

b) původní souřadnicové soustavě (x, y)

$$tg\sigma_{0_1 0_2} = \frac{y_{02} - y_{01}}{x_{02} - x_{02}} \qquad (90)$$

Z rozdílu směrníku $\alpha_{0_1 0_2}$ a $\sigma_{0_1 0_2}$ vypočteme úhel natočení obou soustav.

$$\varphi = \sigma_{0_1 0_2} - \alpha_{0_1 0_2} \qquad (91)$$

O tento úhel natočení opravíme směrníky stran α vypočtené v pomocné soustavě, abychom je převedli na směrníky σ v soustavě povrchové. Bude platit

$$\sigma_{0_1 1} = \alpha_{0_1 1} + \varphi = \varphi$$

$$\sigma_{12} = \alpha_{12} + \varphi$$

$$\downarrow$$

$$\sigma_{n0_2} = \alpha_{n0_2} + \varphi$$

Z těchto vypočtených směrníků σ a délek polygonových stran vypočteme souřadnice bodů v původní soustavě obvyklým způsobem:

$$x_1 = x_{01} + S_{0_1 1}.\cos\sigma_{0_1 1} \qquad y_1 = y_{0_1} + S_{0_1 1}.\sin\sigma_{0_1 1}$$

$$x_2 = x_1 + S_{12}.\cos\sigma_{12} \qquad y_2 = y_1 + S_{12}.\sin\sigma_{12}$$

$$\downarrow \qquad\qquad \downarrow$$

$$x'_{0_2} = x_n + S_{n0_2}.\cos\sigma_{n0_2} \qquad y'_{0_2} = y_n + S_{n0_2}.\sin\sigma_{n0_2}$$

Kontrola:

$$x'_{0_2} = x_{0_1} + \left[S.\cos\sigma\right]_{0_1 1}^{n0_2} \qquad y'_{0_2} = y_{0_1} + \left[S.\sin\sigma\right]_{0_1 1}^{n0_2}$$

Vlivem nahodilých chyb v délkovém a úhlovém měření při zaměřování polygonových pořadů nebudou souřadnice x'_{0_2} a y'_{0_2} souhlasit se souřadnicemi x_{0_P} a y_{0_2}. Odchylky nesmí překročit stanovenou mez danou předpisy. Vyrovnání polygonového pořadu na souřadnice x_{0_P} a y_{0_2} se provede přibližným způsobem (např. úměrně délkám stran).

Základní orientační přímka na připojovaném patře může být volená jako některá ze stran vsunutého polygonového pořadu nebo může být umístěna i na jiném místě na připojovaném patře. V tom případě základní orientační přímku určíme zaměřením polygonového pořadu, který je napojen na vsunutý polygonový pořad.

Přesnost připojovacího a usměrňovacího měření dvěma jámami

Přesnost připojovacího měření bude charakterizována stejně jako u předcházejících způsobů připojovacích měření přesností ve směrníku základní orientační přímky $m\sigma_{AB}$.
Na této chybě se budou podílet chyby všech tří samostatných částí připojovacího směru. Pro střední chybu směrníku základní orientační přímky můžeme napsat vztah

$$m\sigma_{AB} = \pm\sqrt{m^2\sigma_{0_1 0_2} + m^2\sigma_P + i.m^2\omega + m^2\alpha_{0_1 0_2}} \qquad (93)$$

v tomto výrazu značí

$m\sigma_{0_1 0_2}$ - chyba ve směrníku základní orientační přímky způsobená vlivem připojení na povrchu,

$m\sigma_P$ - chyba ve směrníku základní orientační přímky způsobená chybami v promítání závěsných bodů olovnic ± m,

$m\alpha_{0_1 0_2}$ - chyba ve směrníku základní orientační přímky způsobená vlivem zaměření vsunutého polygonového pořadu v podzemí,

$\sqrt{i.m_0}$ - chyba ve směrníku základní orientační přímky způsobená vlivem zaměření

polygonového pořadu spojujícího orientační přímku se vsunutým polygonovým pořadem. Zde je m_ω přesnost v měření polygonových úhlů spojujícího polygonového pořadu a i jejich počet. Bude-li základní orientační přímka určena některou stranou vsunutého polygonového pořadu, tento výraz ve vztahu (93) neuvažujeme.

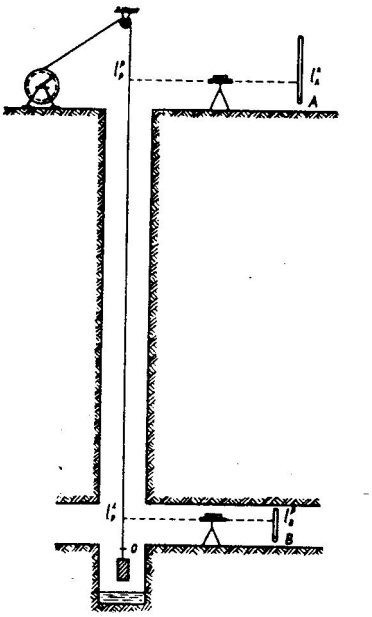
Připojovací a usměrňovací měření dvěma olovnicemi je nejpřesnější a nejjednodušší způsob připojení. Zaměřením vsunutého polygonového pořadu získáme současně větší počet bodů důlního bodového pole, které můžeme využít i pro další měření. Proto důlně měřický předpis stanoví, že připojovací měření provedeno tímto způsobem je definitivní. Z připojovacích měření v jedné jámě jako definitivní formy připojení povoluje důlně měřický předpis připojovací a usměrňovací měření gyroteodolitem. Připojovací a usměrňovací měření dvěma olovnicemi v jedné jámě je považováno za prozatímní a bude-li připojovaný horizont zpřístupněn druhou jámou, musí se provést definitivní připojovací a usměrňovací měření dvěma jámami.

4. Hloubkové měření v dole

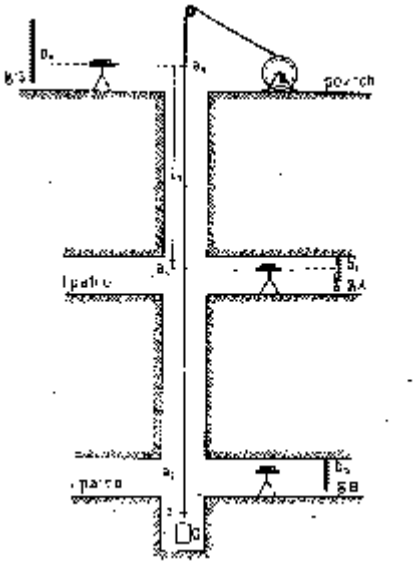
K určení výšek výchozích výškových bodů v hlubinném dole se používá metod hloubkového měření. Je tedy úkolem hloubkového měření přenést výškový systém používaný na povrchu do dolů. Nejpoužívanější a dosud nejpřesnější způsob hloubkového měření je hloubkové měření ocelovým pásmem.

Hloubkové měření dlouhým ocelovým pásmem

Princip metody je patrný z obr. 1. V jámě visí hloubkové pásmo, na kterém je zavěšeno závaží. Nula dělení pásma je stejně jako u nivelační latě dole. Z výchozího výškového bodu A, který je na povrchu, je třeba odvodit výšku výchozího bodu B na příslušném patře. Doprostřed vzdálenosti mezi bodem A na povrchu a pásmem postavíme nivelační přístroje a provedeme odečtení na latích, postavených na bodech A a B na pásmu.



Obr. č. 1 : Postup při hloubkovém měření hloubky. ocelovým pásmem



Obr. č. 2 : Současné určení bodů na více patrech

Odečtení na latích postavených na bodech A, B jsou ℓ_A, ℓ_B. Odečtení na hloubkovém pásmu ℓ_P. Pro stanovení výšky bodu B platí(obr. č. 1) jednoduchý vztah

$$v_B = v_A + \ell_A^Z + \ell_P^Z - \ell_P^\rho - \ell_B^\rho \qquad (1)$$

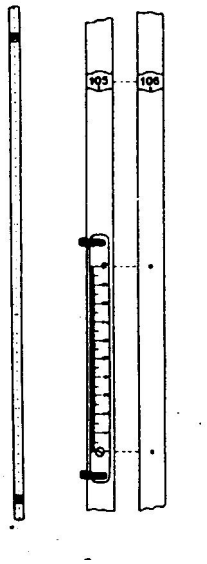
Při hloubkovém měření je však možno určit současně výšky výchozích bodů na různých patrech. Hloubkové pásmo spustíme až pod úroveň nejnižšího patra, na kterém určujeme výšku. Na povrchu a na jednotlivých patrech pak umístíme nivelační přístroje a latě, pomocí kterých výškové připojení provedeme. Takovou situaci ukazuje obr. č. 2.

Pro výšky bodů A a B na jednotlivých patrech pak podle obr. č. 2 platí :

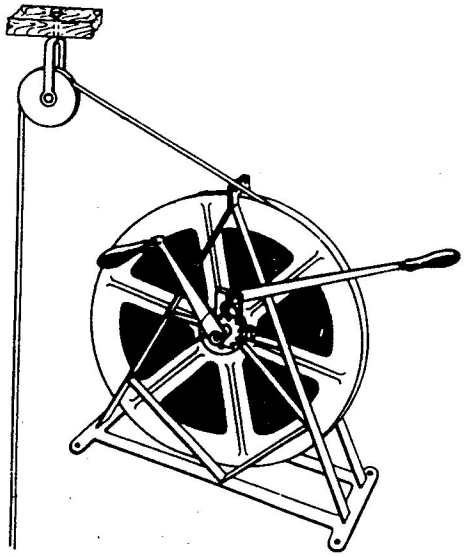
$$v_A = v_{13} + b_o\left(a_o - a_1\right) - b_1 \qquad (2)$$

$$v_B = v_{13} + b_o\left(a_o - a_2\right) - b_2 \qquad (3)$$

Hloubkové pásmo je ocelové pásmo délky 500 – 1 000m. Je podobné ocelovému pásmu na vidlici pro délkové měření. Má však jiný průřez (5-5,5 mm^2) a jiné dělení. Dělení pásma bývá různě provedeno. Zpravidla každý půlmetr je vyznačen kruhovým otvorem (prům. 1 mm) a každý metr kruhovým otvorem a mosazným štítkem a označením metru. Pro přesné odečtení dm, cm a mm na pásmu se používá pomocné měřítko, které je děleno na mm, a které můžeme upevnit do kruhových otvorů v pásmu. Pomocné měřítko umístíme na pásmu do místa předpokládaného odečtení. Můžeme též použít papírového milimetrového měřítka, které na pásmo připevníme pomocí svorek nebo lepící pásky. Existují též hloubková pásma, která mají milimetrová dělení po celé délce pásma. Dělení pásma a upevnění pomocného měřítka ukazuje obr. č. 3. Hloubková pásma jsou navinuta na bubnech na jednoduchém vrátku, který je opatřen klikou ke spouštění pásma. Na bubnu je rohatka, západka a ruční pásová brzda. Pásmo spouštíme do jámy přes vodící kladku. Hloubkové pásmo navinuté na vrátku ukazuje obr. 3. Postup při hloubkovém měření je tedy obdobný jako u nivelace a je jednoduchý. Při výpočtu je však třeba počítat systematické opravy, které nemůžeme stanovit zcela přesně a ovlivní tedy přesnost hloubkového měření.



Obr. č. 3 Hloubkové pásmo s příložným měřítkem



Obr. č. 4 Hloubkové pásmo navinuté na vrátku

Při výpočtu musíme brát v úvahu tyto systematické chyby:

1) chyba z nepřesně děleného pásma – komparace
2) chyba z protažení pásma vlastní tíhou
3) chyba z protažení pásma tíhou závaží
4) chyba z protažení pásma vlivem tíhy převěšku pásma
5) chyba z teploty

1) <u>Chyba z nepřesně děleného pásma – chyba z komparace</u>

U hloubkového pásma je třeba stanovit jeho přesnou délku, aby tak mohla být do výpočtu zavedena oprava z komparace. Můžeme použít některého způsobu komparace pásem pro délkové měření. Některé tyto postupy jsou však pracné a pro pásma délky 500 – 1 000 m by byly nehospodárné. Je proto vhodné hloubková pásma komparovat po delších úsecích 5 – 10 m. Pro tyto úseky je pak vhodné stabilizovat krátké komparační základny. Pro komparované hloubkové pásmo pak sestavujeme podle komparovaných úseků tabulku nebo graf, z kterých můžeme stanovit pro použitý úsek opravu z komparace.

2) <u>Chyba z protažení pásma vlastní tíhou</u>

je dána výrazem:

$$\Delta\ell = \frac{1}{ES} \cdot \frac{g.\ell^2}{2} = \frac{G.\ell}{2} \cdot \frac{1}{E\ .\ S} \qquad (4)$$

JE-LI G HMOTNOST 1 BM PÁSMA PAK HMOTNOST CELÉHO PÁSMA JE

$$G = g.\ell$$

3) <u>Chyba z prodloužení pásma tíhou závaží</u>

Tato oprava je počítána podle známého vztahu při opravě z prodloužení napínací silou u délkového měření:

$$\Delta\ell'' = \frac{Q\ell}{ES} \qquad (5)$$

4) <u>Chyba z protažení pásma vlivem tíhy převěšku pásma</u>

Délka pásma ℓ', které visí pod připojovaným horizontem, způsobí protažení, které způsobuje tíha převěšku. Protažení je dáno výrazem

$$\Delta\ell' = \frac{g.\ell'.\ell}{ES} \qquad (6)$$

Celková oprava z prodloužení pásma bude dána součtem výrazů (4), (5) a (6).

$$\Delta\ell_p = \Delta\ell + \Delta\ell' + \Delta\ell'' = \frac{1}{ES}\left(\frac{g.\ell^2}{2} + g.\ell'.\ell + Q.\ell\right) \qquad (7)$$

5) Chyba z teploty

Opravu hloubkového úseku pásma počítáme podle známého výrazu

$$\Delta\ell_t = \alpha.\ell(t - t_o) \qquad (8)$$

Rozhodující vliv na přesnost v určení této opravy má přesné určení teploty t. Teplotu pro výpočet této opravy bychom měli určit s přesností ± 0,5^o C. Měření teploty v jámě je však obtížné z mnoha příčin. V jámě proudění větrů je velice nepravidelné a teplota se může měnit i vlivem změny počasí na povrchu. Teplotu mohou ovlivnit i vodní kapky na teploměru. S měnící se hloubkou se mění teplota hornin, a tím i ovzduší. Všechny tyto okolnosti ovlivňují přesné určení teploty v jámě. Proto musíme pro měřený úsek v jámě použít několik teploměrů. Nejvhodnější je použití 5-ti teploměrů. První je umístěn na povrchu, druhý 5 m pod ohlubní, třetí v první třetině hloubky, čtvrtý v druhé třetině hloubky a pátý 5 m nad úrovní patra, na kterém se určuje výška. Průběh teploty vynášíme do grafu v závislosti na hloubce.

Celková oprava z teploty se vypočte jako součet dílčích teplotních oprav, počítaných pro každý úsek zvlášť, kde teplotu uvažujeme jako střední hodnotu ze dvou měřených teplot.

$$\Delta \ell_{t_i} = \ell_i . \alpha . \left(\frac{t_i + t_{i+1}}{2} - t_o \right) \qquad (9)$$

Celková oprava je dána součtem dílčích oprav

$$\Delta \ell_t = \Delta \ell_{t_1} + \Delta \ell_{t_2} + ... + \Delta \ell_{t_n} \qquad (10)$$

Teploměry mají být umístěny poblíž visícího pásma. Všechny konstanty používané pro výpočet systematických oprav mají stejné rozměry jako u systematických chyb délkového měření.
Přesnost hloubkového měření bude dána součtem náhodných chyb jednotlivých určujících veličin. Podle výrazu (1) pro výšku základního bodu na patře platí

$$v_B = v_A + \ell_A^Z + \ell_P^Z - \ell_P^P - \ell_B^P$$

Budeme-li předpokládat, že úsek na pásmu bude stanoven s přesností ± m_p, odečtení na lati s přesností ± m_i, a výška výchozího bodu v_A s přesností ± m_{vA}, pak přesnost v určení výšky bodu v_B bude

$$m_{v_B} = \pm \sqrt{m_{v_A}^2 + 2m_i^2 + m_p^2} \qquad (11)$$

Výška bodu A bude určena nivelací, a proto přesnost výšky výchozího bodu je závislá na střední kilometrové chybě nivelace a délce nivelačního pořadu. Proto

$$m_{v_A} = \pm m_o \sqrt{L} \qquad (12)$$

Úsek hloubkového pásma je dán rozdílem odečtení na pásmu a součtem systematických oprav. Proto jeho přesnost bude závislá na přesnosti odečtení a přesnosti výpočtu jednotlivých systematických oprav. Proto můžeme vyjádřit

$$m_P = \pm \sqrt{2m_i^2 + m_{\Delta \ell_k}^2 + m_{\Delta \ell_t}^2 + m_{\Delta \ell_p}^2} \qquad (13)$$

Kdybychom do výše uvedených výrazů dosadili hodnoty středních chyb, které dosahujeme v praxi, můžeme např. pro hloubku 500 m stanovit přesnost hloubkového měření hodnotou ±4-7 mm. Přitom je třeba zdůraznit, že na uvedené přesnosti se nejvíce podílí přesnost výpočtu systematické opravy z teploty. Proto je třeba měření teploty v jámě věnovat velkou pozornost a používat větší počet teploměrů, které musí být umístěny v blízkosti pásma. Opravy musí být počítány pro jednotlivé úseky na pásmu.