

Sledování velikosti a časových změn vlivu terestrické refrakce při geodetických měřeních

Doc. Ing. Radim Blažek, CSc.,
Katedra geodézie a pozemkových úprav Fakulty stavební ČVUT v Praze
Ing. Jiří Pospíšil, CSc.,
Katedra speciální geodézie Fakulty stavební ČVUT v Praze

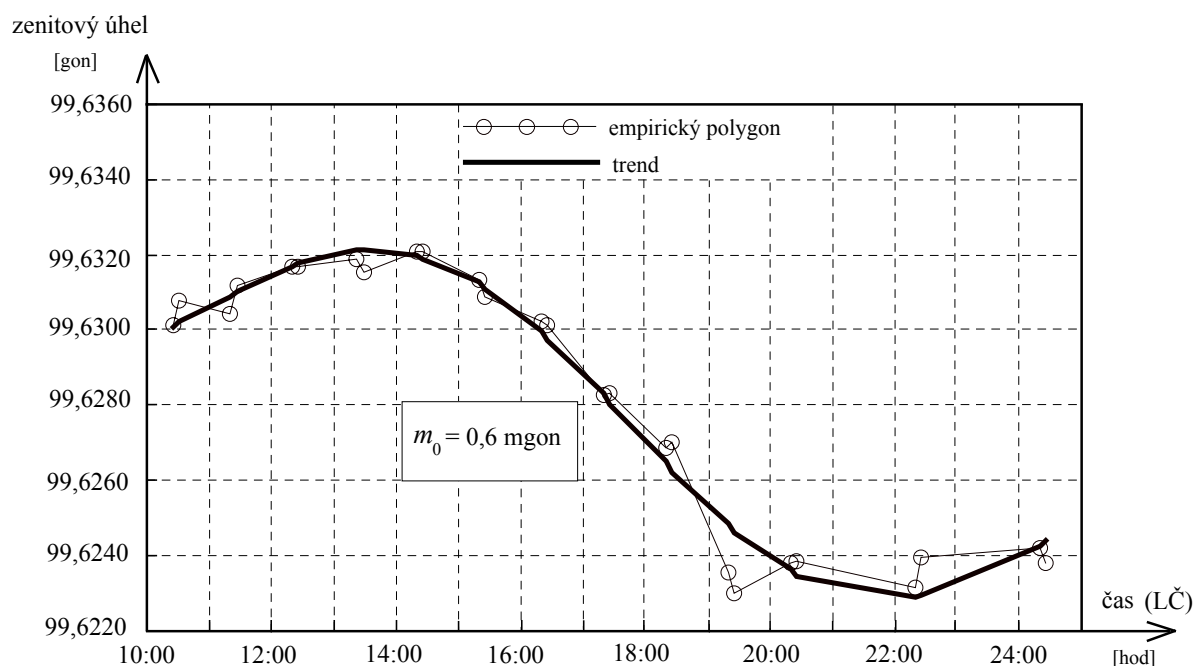
Fakulta stavební ČVUT v Praze se podílí na řešení výzkumného záměru „Laserové systémy a jejich aplikace“ etapou H: „Laserové systémy v průmyslové metrologii“. V rámci této etapy jsou řešeny tyto okruhy :

- Interferometrické metody měření, Holografická interferometrie – skupina Doc. Mikše,
- 3D systémy určování polohy ve stavebnictví – skupina Doc. Hánka,
- Řízení stavebních strojů – skupina Doc. Kašpara,
- Sledování vlivu prostředí na měření v geodézii a stavebnictví – skupina Ing. Pospíšila, Zde budeme prezentovat výsledky poslední skupiny.

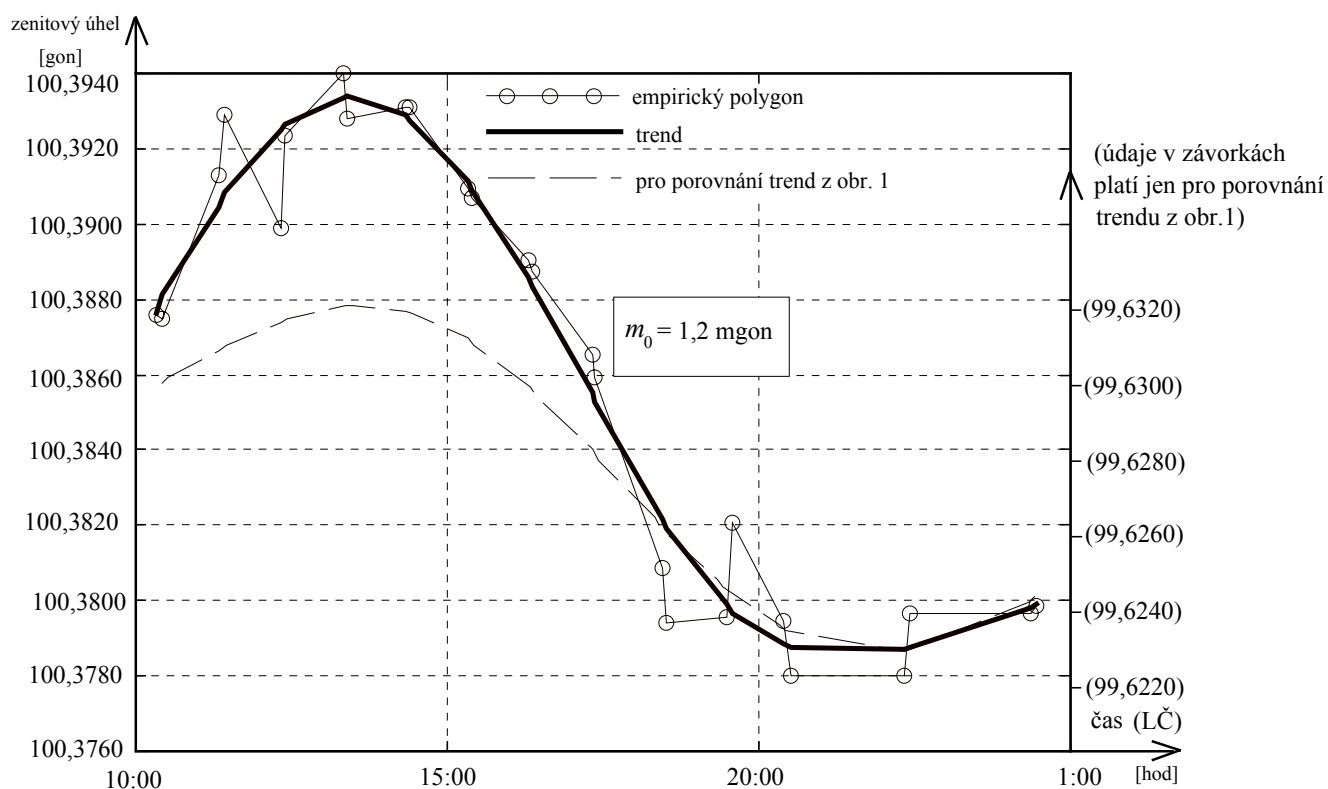
Výsledky experimentálních měření

Pro lepší představu o možné velikosti vlivu vertikální složky refrakce a jejích časových změnách uvedeme výsledky časového sledování oboustranně měřeného zenitového úhlu v účelové síti ve Starém Městě pod Sněžníkem. Pro tento účel byla vybrána refrakčně nepříznivá (téměř vodorovná) záměra délky cca 1,7km s minimální výškou záměry a navíc výraznou asymetrií nad terénním reliéfem.

Měření bylo provedeno v časovém rozsahu cca 14 hodin za jasného podzimního dne, kdy se dají očekávat nejmarkantnější časové změny vertikálního teplotního gradientu a tím i vlivu refrakce na měřené zenitové úhly. Dosažené výsledky byly pro větší přehlednost a názornost zpracovány grafickou formou, zobrazující závislost obousměrně (TAM a ZPĚT) měřeného zenitového úhlu na čase (obr.1 a obr.2).



Obr.1 Časová změna měřeného zenitového úhlu (Tábor - Kunčice)

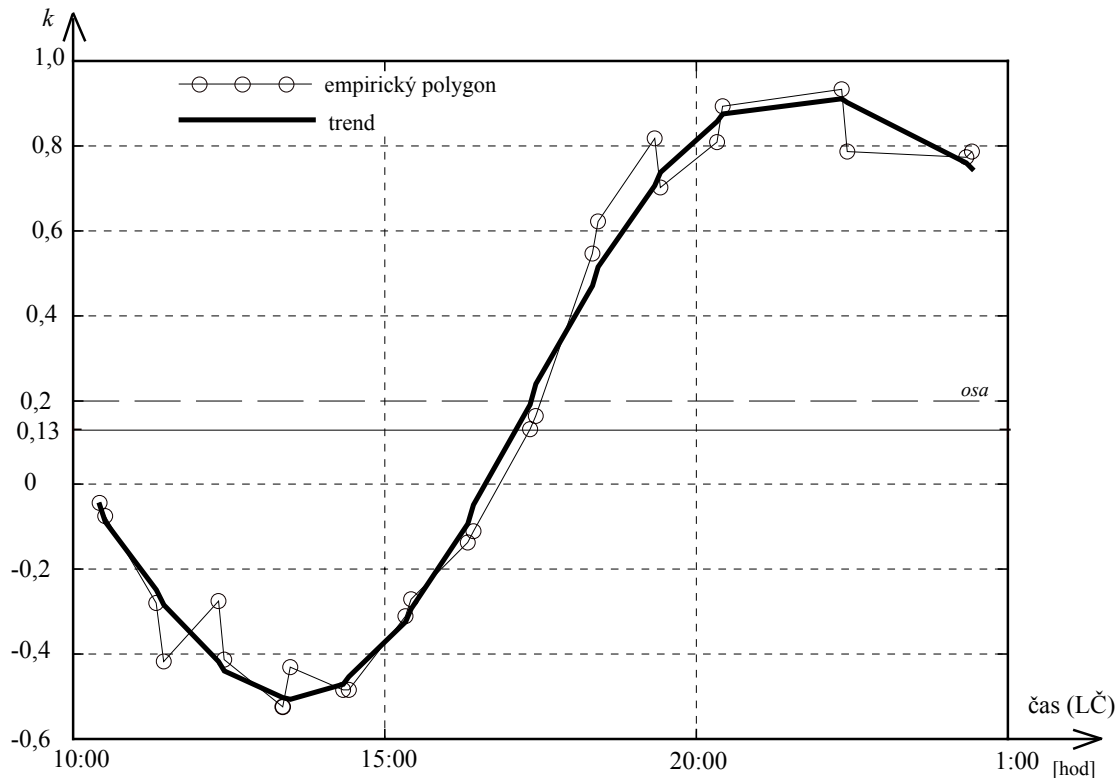


Obr.2 Časová změna měřeného zenitového úhlu (Kunčice - Tábor)

Na první pohled je zřejmé, že časový vývoj vlivu vertikální složky refrakce na měřený zenitový úhel má v obou případech přibližně periodický charakter a trend vývoje je dobře aproximovatelný sinusoidou. Řadou bodů (empirický polygon) byla proložena trigonometrická Fourierova řada (součet dvou jednoduchých sinusoid) podle postupu uvedeného v [1], která vystihuje podstatný charakter časových změn a přitom ještě částečně potlačuje vliv několika odlehlejších měření, ke kterým ve větších souborech měření zákonitě dochází. Aposteriorní střední chyba jednotková m_0 vypočtená z oprav, pro záměru z bodu Tábor je příznivější (0,6mgon), než pro záměru z bodu Kunčice (1,2mgon). Stejně tak poněkud větší amplituda časových změn (7,4mgon) na obr.2 je logicky vysvětlitelná asymetrií záměry, která je u bodu Kunčice blíže terénnímu reliefu, než na bodě Tábor (4,6mgon) - obr.1. Proto se musíme vyvarovat již při volbě konfigurace sítě zejména jednostranných asymetrických záměr téměř kopírujících terén.

V dalším uvedeném obr.3 je znázorněn časový vývoj určovaného refrakčního koeficientu k z uvedené oboustranně a současně měřené záměry. Všimněme si především extrémních hodnot:

- Minimum -0,52 nastává těsně po poledni (přízemní záměry stejně jako geometrickou nivelaci se nedoporučuje měřit v poledních hodinách), k maximum +0,93 dochází kolem půlnoci, kdy obvykle v praxi neměříme.
- Křivka je přibližně symetrická kolem „střední“ hodnoty 0,20. Hodnota 0,13 by v našem konkrétním případě paradoxně platila jen mezi 17. - 18. hod. LČ-září, tj. obecně před západem Slunce, kdy se podle dřívějších zkušeností neměly měřit zenitové úhly.



Obr.3 Časová změna refrakčního koeficientu určeného z oboustranné záměry

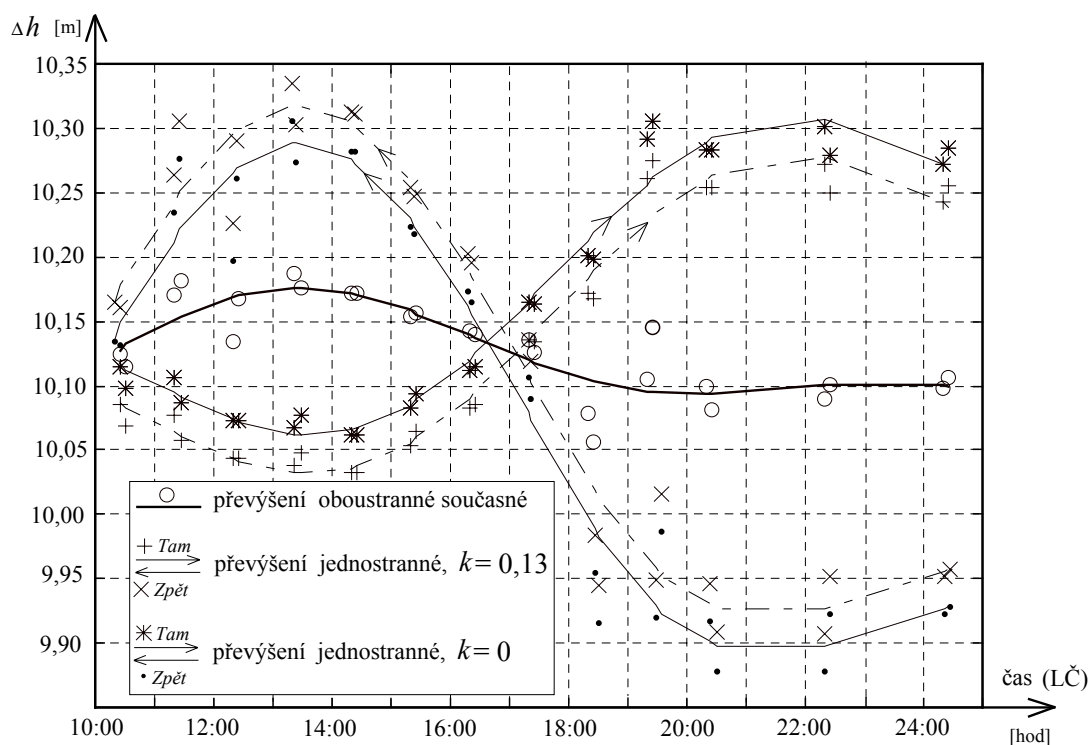
Z uvedených výsledků je zřejmá výhoda oboustranně a současně měřených zenitových úhlů, která i v těchto refrakčně složitých podmínkách umožní vypočítat refrakční úhel a následně koeficient pro každou oboustranně a současně zaměřenou záměru. Vývoj takto získaných převýšení (26 jednotek¹) během více než 14 hodin je opět znázorněn graficky na obr.4. Přesnost výsledného celodenního převýšení 10,131 m z celého souboru měření lze charakterizovat střední chybou aritmetického průměru 0,007m, amplitudou 0,041m s nejdlejšími výsledky +0,055m, -0,075m a střední chybou jednotkového převýšení 0,036m - tab.1.

Kdyby se však dané převýšení určovalo jednostranně s využitím konstantního refrakčního koeficientu $k = 0,13$ resp. analogicky s úplným zanedbáním vlivu refrakce položením $k = 0$, změnil by se sice celodenní průměrný výsledek jen nepatrně, dosažená přesnost by však významně poklesla a riziko získat odlehlejší výsledky by narostlo. Amplituda se pak výrazně zvětší, ale je (stejně jako použité charakteristiky přesnosti) při jakémkoliv konstantním refrakčním koeficientu stejná, grafy jsou pouze posunuty ve směru svislé osy grafu o rozdíl pořadnic os jednotlivých sinusoid - tab.1. Dokazuje to jednu z cest, jak kromě volby co nejvěrnějšího refrakčního modelu s ohledem na průběh záměr, lze u jednotlivých refrakčně problematických záměr zvýšit přesnost výsledků celodenním měřením, nebo pouhým rozdělením observace na dopolední a odpolední část např. 8. - 10. a 17. - 19. hod. Průměr z takto rozdělené observace obvykle dostatečně nahradí případné celodenní měření, které by bylo v běžné praxi neekonomické. Pro náš případ výběru $10^{40} - 11^{40}$ a $15^{40} - 16^{40}$ (LČ) jsme vypočetli následující hodnoty v tab.1 - časové údaje ve všech obrázcích jsou ponechány v LČ, který platil v době měření.

¹ Za měřickou jednotku bylo zvoleno zaměření zenitového úhlu na dvě symetrická rozhraní válcového signálu. Na každé rozhraní bylo měřeno v jedné, tzv. laboratorní jednotce (dvanáct zacílení) - [2].

Tab. 1 Porovnání výsledků převýšení vypočtených podle různých alternativ (velikosti souboru a platnosti hypotéz o vlivu refrakce)

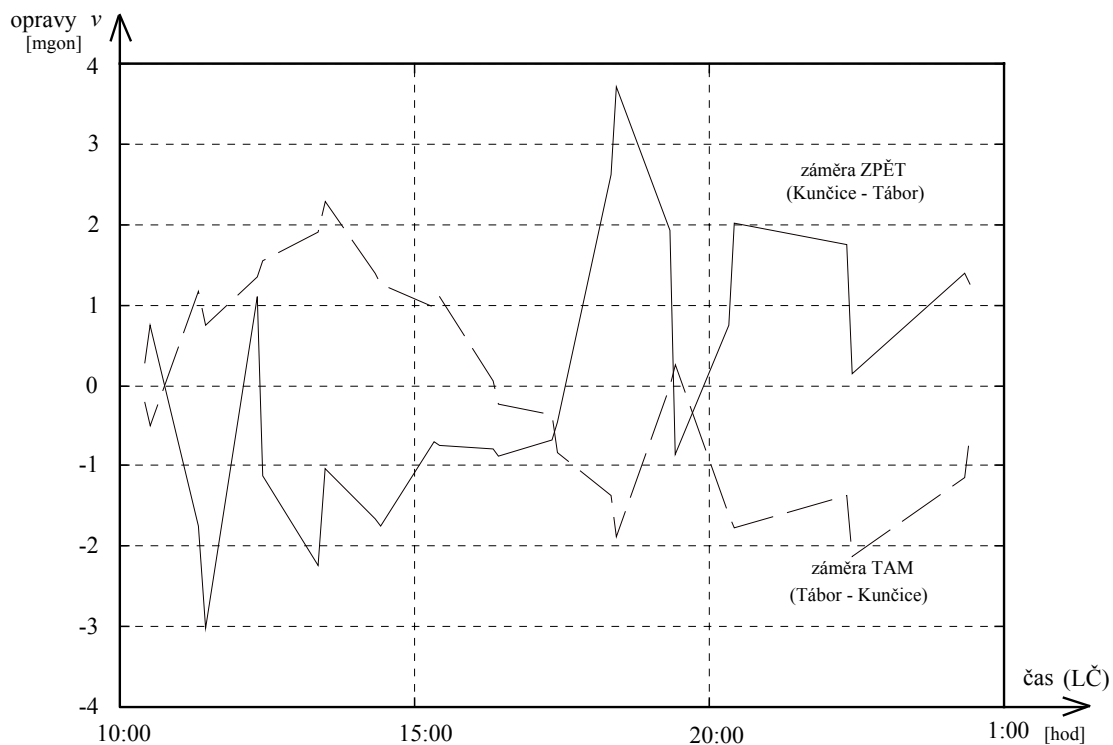
PŘEVÝŠENÍ REFR. MODEL	JEDNOTKOVÉ (J)		CELODENNÍ (26J)		VÝBĚROVÉ (4J+4J)	
	$m_{\Delta h}$	nejodlehlejší výsledky	$\Delta \bar{h}$	$m_{\Delta \bar{h}}$	$\Delta \bar{h}_v$	$m_{\Delta \bar{h}_v}$
	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)	(m)
Oboustranné současné $-0,52 < k < +0,93$	0,036	+0,055 -0,075	10,131	0,007	10,148	0,008
Jednostranné $k = 0,13$	TAM 0,092	-0,102 +0,141	10,164	0,018	10,072	0,004
	ZPĚT 0,153	+0,207 -0,221	10,099	0,030	10,224	0,018
Jednostranné $k = 0$	dtto	dtto	10,134 10,128	dtto	10,102 10,194	dtto
Velmi přesná nivelace (VPN)			10,1313	0,0012		



Obr. 4 Časová změna převýšení vypočtených podle různých alternativ

Na závěr bylo provedeno též vyrovnání celodenního měření TAM a ZPĚT metodou nejmenších čtverců podle modifikovaného stochastického modelu uvedeného v [3]. Všechny zenitové úhly mají váhu $p = 1$, aposteriorní odhad jednotkové střední chyby je 1,5 mgon. Výsledkem výpočtu je vyrovnané převýšení $\Delta \bar{h} = 10,131\text{m}$ se střední chybou $m_{\Delta \bar{h}} = 0,006\text{m}$ (viz první řádek -26J- v tab.1). Odhad refrakčního koeficientu

v závislosti na čase odpovídá přesně průběhu trendu určeného z oboustranné záměry (obr.3). Na obr.5 je nakreslen průběh zbytkových oprav v měřených zenitových úhlů po eliminaci vlivu refrakce. Průběh oprav v čase již nesleduje trend periodických změn a má téměř náhodný charakter.



Obr.5 Graf výsledných oprav zenitových úhlů po vyrovnání

Další možný postup pro snížení vlivu terestrické refrakce při trigonometrickém určování výškového rozdílu v plochem terénu vychází z teorie radiační bilance zemského povrchu.

Rozdíl mezi celkově pohlceným slunečním zářením a efektivním vyzařováním je celkovou radiační bilancí \tilde{R} zemského povrchu

$$\tilde{R} = Q(1 - A) - E^* .$$

Radiační bilance se mění v závislosti na zeměpisné šířce φ , období roku a dne, povětrnostních podmínkách atd. Celodenní průběh radiační bilance je na obr. 6 [4], kde 1 je radiační bilance, 2 je přímé sluneční záření I' , 3 je zpětné záření atmosféry δE , 4 je rozptýlené záření J , 5 je odražené krátkovlnné záření $Q \cdot A$ (kde A je albedo zemského povrchu), 6 je efektivní vyzařování E^* , 7 je vyzařování zemského povrchu G .

Radiační bilance \tilde{R} má podstatný vliv na rozdělení teploty v půdě a v přízemní vrstvě atmosféry, na procesy vypařování a další jevy.

Ve dne obvykle převažuje příkon slunečního záření nad efektivním vyzařováním a radiační bilance \tilde{R} je kladná. V noci chybí sluneční záření a radiační bilance nabývá záporných hodnot, neboť efektivní vyzařování má zpravidla kladnou hodnotu (až na vyjíměčné případy, kdy zpětné záření atmosféry je větší než vlastní vyzařování zemského povrchu).

Průchod radiační bilance nulou ($\tilde{R} = 0$) pro dané pozorování nastává při výšce Slunce $h_{\Theta} = 10^{\circ} - 15^{\circ}$ a tedy nikoliv přesně při východu nebo západu Slunce.

Vliv oblačnosti a albeda na radiační bilanci je znázorněn na obr. 7 [4] a obr. 8 [4]. Doba průchodu radiační bilance nulou se mírně posouvá.

K atmosférické refrakci nedochází, je-li gradient indexu lomu vzduchu roven nule. Při trigonometrickém určování výškového rozdílu v plochem terénu při oboustranně, současně měřeném zenitovém úhlu v praxi určujeme refrakční koeficient z oboustranné záměry. K refrakci pak nedochází, je-li tento refrakční koeficient roven nule. S ohledem na dříve popsané jevy lze za vhodné období pro měření považovat dobu kolem vzniku a rozpadu noční inverze, tj. v období s nulovou radiační bilancí ($\tilde{R} \approx 0$). K anulování radiační bilance zemského povrchu dochází v období cca 0,5 – 2,5 hodiny po východu Slunce a 2,5 – 0,5 hodiny před západem Slunce. Proto doporučujeme měřit symetricky k okamžiku, kdy $\tilde{R} \approx 0$ a to cca po dobu 1,5 hodiny před a po $\tilde{R} \approx 0$ v co možná nejkratších časových intervalech. Tento postup byl úspěšně vyzkoušen při metodě měření k laserové záměrné přímce [5],[6]. V případě trigonometrického měření sestojíme grafickou závislost trigonometricky určeného převýšení na refrakčním koeficientu k . V okolí $\tilde{R} \approx 0$ průběh aproximujeme lineární závislostí $h = a \cdot k + b$ a pro refrakční koeficient $k = 0$ určíme z této závislosti hledané převýšení $h(0) = b$.

Z obrázku 3 vyplývá, že k anulování radiační bilance zemského povrchu $\tilde{R} \approx 0$ dochází přibližně v 16 hodin SEČ, proto podle dříve uvedené metodiky použijeme naměřených hodnot, respektive vypočítaných refrakčních koeficientů z intervalu cca 1,5 hodiny před a 1,5 hodiny po tomto okamžiku. V tabulce 2 jsou uvedeny tyto vybrané hodnoty času měření t (SEČ), refrakční koeficient k určený z oboustranné záměry a převýšení h vypočítané z oboustranně měřených zenitových úhlů, zcentrovaných a zredukovaných na spojnici stabilizačních znaků a šikmé vzdálenosti (spojnice) stabilizačních znaků (1701,878 m).

Tab. 2

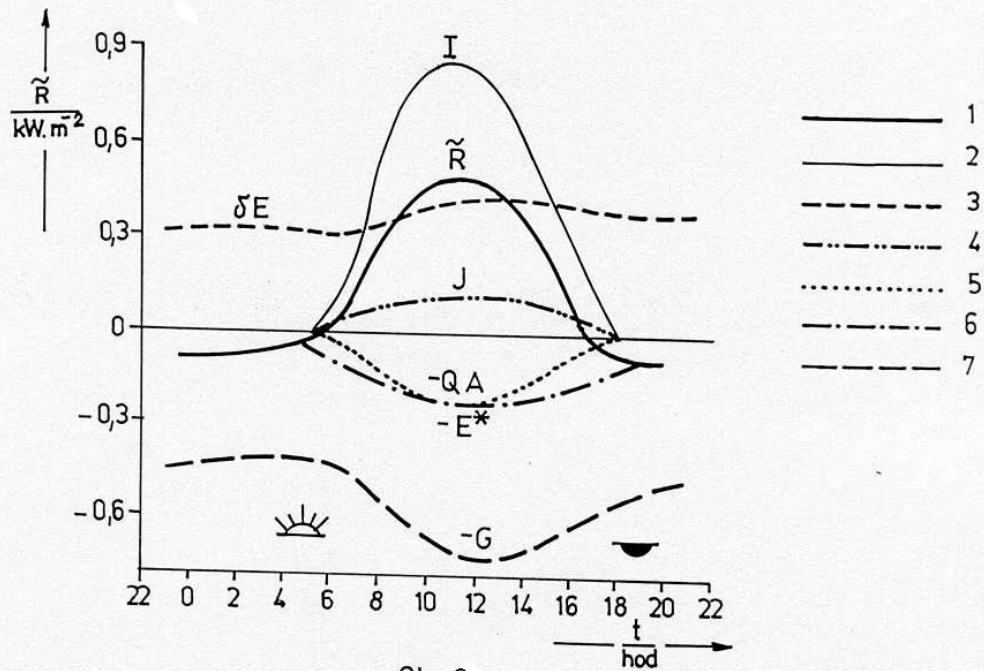
t / hod	k	h / m
14:42	-0,280	10,1558
15:32	-0,142	10,1427
15:42	-0,120	10,1400
16:32	0,124	10,1355
16:42	0,157	10,1264
17:32	0,541	10,0780

Aproximujeme-li tento průběh lineární závislostí

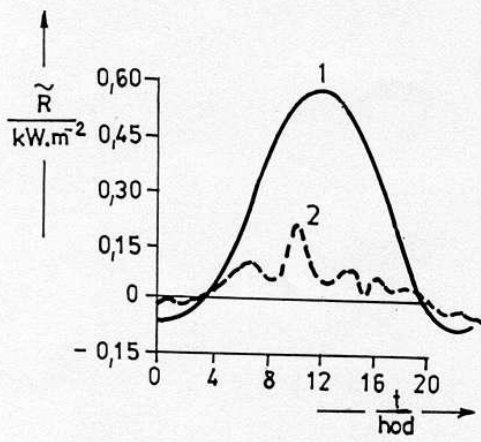
$$h = a \cdot k + b$$

dostáváme pro koeficienty lineární regresní rovnice hodnoty $a = -0,08823$ ($s_a = 0,01330$) a $b = 10,13386$ m ($s_b = 0,00363$ m) a koeficient korelace = -0,957.

Pro určení hledaného převýšení dosadíme za refrakční koeficient $k = 0$ a dostáváme $h(0) = b = 10,134$ m. Tuto hodnotu porovnáme s hodnotou převýšení získanou velmi přesnou nivelací $h_{\text{VPN}} = 10,131$ m. Rozdíl $\Delta h = -0,003$ m je v rámci směrodatné odchylky s_b .

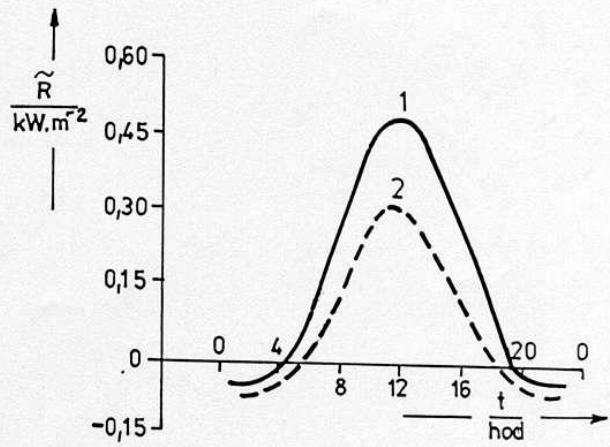


Obr. 6



1 - jasná obloha
2 - oblačná obloha

Obr. 7



1 - nad úhorem
2 - nad ozimý

Obr. 8

Závěr

Pro maximální možnou eliminaci refrakčních vlivů na výsledky geodetických měření (uvedená experimentální měření se týkala vlivu jen vertikální složky refrakce) je třeba věnovat pozornost již při návrhu konfigurace účelové sítě. V plochém terénu, který u nás převažuje, jsou z refrakčního hlediska problematické především záměry v těsné blízkosti terénu (též nejrůznějších překážek) a záměry výrazně asymetrické. Vhodnou technologii měření (oboustranné a současné měření zenitových úhlů), která vede k použití modelu s určeným konstantním refrakčním koeficientem pro každou záměru, lze dosáhnout i v těchto případech přesnosti srovnatelné s technickou nivelací. Zpřesnění na úroveň přesné nivelace (IV.řád) je možné pouze na úkor celodenního měření, při využití teorie radiční bilance zemského povrchu lze dosáhnout přesnosti významně lepší než je přesnost technické nivelace. Zlepšení výsledků lze dosáhnout též budováním zvýšených stanovisek přístroje.

V žádném případě nelze však pro tyto účely doporučovat jednostranné měření zenitových úhlů a následný výpočet s konstantním refrakčním koeficientem 0,13 (resp. 0), který se používá pro záměry s dostatečnou výškou nad terénem. V našem testovaném případě by výsledné chyby dosáhly až několika decimetrů. V rámci dalšího výzkumu této problematiky se připravuje nezávislé porovnání určeného výškového rozdílu s výsledky získanými družicovou metodou GPS.

Literatura:

- [1] BÖHM, J. - RADOUCH, V. - HAMPACHER, M.: Teorie chyb a vyrovnávací počet. Praha, Geodetický a kartografický podnik 1990.
- [2] BLAŽEK, R. – SKOŘEPA, Z.: Geodézie 30 (Výškopis). Praha, ČVUT 1999.
- [3] ŠTEMPELOVÁ, M.: Riešenie refrakčných vplyvov z trigonometricky meraných prevýšení bodov. Praha, Geodetický a kartografický obzor, 39/81,1993, č.10.
- [4] POSPÍŠIL, J. : Podmínky pro využití He-Ne laseru v inženýrské geodézii. [Kandidátská disertace], katedra speciální geodézie, ČVUT Praha, 1986.
- [5] POSPÍŠIL, J. : Vliv prostředí na měření s He-Ne lasery. In : Hornická Příbram ve vědě a technice – sekce důlní měřictví a inženýrská geodézie, Příbram 1986, s. 125 – 134.
- [6] POSPÍŠIL, J. : Vybrané výsledky z měření s lasery v různém prostředí. In : X. vědecká konference, odborná sekce 4 – Geodézie a kartografie. VUT FAST Brno 1989, s. 64 – 68.

Příspěvek byl vypracován v rámci Výzkumného záměru ČVUT CEZ J04/98:210000022.