

## Sledování velikosti a časových změn vlivu refrakce při geodetických měřeních

Doc. Ing. Radim Blažek, CSc.,  
Dr. Ing. Zdeněk Skořepa,  
katedra geodézie a pozemkových úprav  
Fakulty stavební ČVUT v Praze

528.3/.4:528.088:535.3

### Abstrakt

*Příspěvek upozorňuje nejenom na existenci tohoto fyzikálního jevu (stručná teorie refrakce), ale především na případné důsledky a velikost chyb, které může způsobit zanedbávání vlivu refrakce, nebo častěji používání nevhodného refrakčního modelu, či nerespektování krátkodobých refrakčních změn v čase při běžných geodetických měřeních.*

### Monitoring Value and Time Variation of Refraction Influences During Geodetic Surveys

### Summary

*The paper is oriented not only to bring reader's attention to the existence of this physical phenomenon (by short theory of refraction), but also to eventual consequences and values of errors that may be caused by the neglecting of refraction influence or by more often practised application of unsuitable refraction model or neglecting short-period refraction variations in time during usual geodetic surveys.*

## 1. Úvod

Veškerá geodetická měření se uskutečňují v nejnižších labilních vrstvách zemské atmosféry, které jsou již samy o sobě velmi složitým a v čase se měnícím optickým prostředím. V inženýrské geodézii se navíc záměry velmi často přibližují ke konstrukčním prvkům na vzdálenost několika málo decimetrů, někdy dokonce centimetrů, nežádka s omezenou možností proudění vzduchu. Dochází pak k průchodu záměry tzv. mikroklimatem, které vzniká též v bezprostřední blízkosti zemského povrchu zejména tehdy, když výrazně absorbuje či naopak vyzařuje (respektive odráží) tepelné záření a tím ochlazuje či ohřívá nejnižší vzduchové vrstvy, které jsou pak rozvrstveny přibližně rovnoběžně s terénem. Přes nesporný pokrok dosažený v posledních letech zůstává v těchto podmínkách vliv refrakce základním limitujícím faktorem zvyšování přesnosti měření v geodézii. V inženýrské geodézii může pak při vyšších nárocích na přesnost ovlivnit i kratší záměry (řádově 100 m), u nichž se vliv refrakce běžně zanedbával. Jednoduché, obecně platné a prakticky použitelné řešení tohoto problému stále ještě neexistuje. Současná geodézie však zná celou řadu teoretických a dnes i prakticky ověřených postupů, které umožňují v konkrétních specifických podmínkách uspokojivě eliminovat podstatnou část vlivu refrakce na měřenou veličinu i s přesností srovnatelnou s možnostmi běžných moderních elektronických přístrojů používaných v praxi.

## 2. Stručná teorie refrakce

Atmosférickou refrakci obvykle rozumíme souhrn všech refrakčních jevů v atmosféře způsobujících plynulé spojité zakřivení viditelného či neviditelného paprsku při průchodu nehomogenním prostředím, které je navíc závislé a vlnové délce použitého světla. Z toho vyplývá zřejmý kvalitativní rozdíl při studiu vlivu refrakce např. mezi optickými a laserovými přístroji. Paprsek pak prochází tímto prostředím vždy časově nejkratší cestou (Fermatův princip).

Protože hustota atmosféry obecně klesá s nadmořskou výškou, je refrakční křivka při dostatečné výšce záměry nad terénem (např. v horách, při triangulaci, nebo alespoň zvýšených postaveních přístroje) obvykle konkávní k zemskému povrchu. To platí při tzv. standardním modelu zemské atmosféry, kde teplota a tlak a tím i hustota a index lomu vzduchu obecně klesá s nadmořskou výškou. Velikost refrakčního úhlu pak navíc obvykle nepřesáhne hodnotu 1 mgon. Pouze v těchto podmínkách lze pro běžné práce menšího rozsahu, zejména při nižších požadovaných nárocích na přesnost, používat dále uvedený konstantní refrakční koeficient či dokonce vliv refrakce vědomě zanedbávat.

Naopak v labilní přízemní vrstvě, kde se provádí naprostá většina běžných podrobných geodetických měření a v inženýrské geodézii zvláště, často nastává taková teplotní inverze, že je výsledná refrakční křivka k zemskému povrchu konvexní a velikost refrakčních úhlů může přesáhnout i 10 mgon. Při volbě metody řešení vlivu refrakce na měřené veličiny musíme pak být velice obezřetní.

## 3. Klasifikace refrakčních vlivů

Základní dělení bývá uváděno podle povahy měřených cílů. Rozlišujeme pak:

- refrakci astronomickou – způsobenou vlivem celé atmosféry, např. při měření na nebeské cíle, nebo dnes častěji při využívání metody GPS (Global Positioning System). Celkový vliv atmosféry se pak dá poměrně věrně modelovat (vliv refrakce je navíc tím menší, čím je záměra bližší k zenitu). Pro potřeby tohoto článku se jí nebudeme dále zabývat.
- refrakci terestrickou – při měření dat naterestrické cíle – vliv nejnižších přízemních vrstev atmosféry.

Další specifikací, která zohledňuje již výšku záměry nad terénním reliefem, je oddělené zkoumání vlivu refrakce ve vysokohorském a plochém terénu, kde převýšení nepřesahují 10 % délky, tj.  $\Delta h \leq 0,1 D$ . Právě v plochém terénu dochází



nejčastěji k refrakčně složitým podmínkám, které nás v tomto příspěvku nejvíce zajímají.

Přitom je třeba si uvědomit, že záměra je vždy tečnou k obecně zakřivené prostorové dráze paprsku, odchylující se od přímé spojnice o refrakční úhel  $\rho$ . Ten je možné (a v geodézii vhodné vzhledem k charakteru měřených veličin) rozložit do dvou složek ve svislé, respektive vodorovné rovině:

$\rho_z$  – ovlivňující měřené zenitové úhly<sup>1)</sup> – vliv vertikální refrakce,

$\rho_\alpha$  – ovlivňující měřené vodorovné směry – vliv horizontální (též příčné nebo laterální) refrakce.

Velikost složek refrakčního úhlu je obecně dána mírou zakřivení paprsku a závisí na gradientu indexu lomu v příslušné rovině vertikální nebo horizontální, ale vždy ve směru kolmém k elementu jeho dráhy. Z toho vyplývá důležitý obecný poznatek, že např. vliv vertikální složky refrakce na daném stanovišti je největší v vodorovných záměrech a vliv horizontální složky refrakce, který je obvykle mnohem menší, lze očekávat u stanoviště v blízkosti svislých ploch, u nichž je významný gradient indexu lomu (např. vlivem výrazné teplotní změny) ve vodorovném směru. Empiricky bylo zjištěno, že v případě běžných (maximálně 2 km dlouhých, málo skloněných a alespoň symetrických) záměrů, kde vertikální složka refrakce obvykle výrazně převažuje, bude refrakční křivka velmi plochá a blízká kružnicovému oblouku, který aproximuje průmět obecně prostorové refrakční křivky do svislé roviny (model s konstantním refrakčním koeficientem pro záměr – viz dále). Dokonalejší, ale složitější náhradou je použití části větve hyperboly (s plynule měnící se křivostí), která již respektuje poznatek, že refrakční úhel na téže oboustranně měřené záměře je obvykle menší na bodě s výrazně větší nadmořskou výškou [1].

V souladu se zvyšující se přesností elektronických dálkoměrů se samostatně zkoumá vliv refrakce na elektronicky měřenou délku, tj. rozdíl měřené délky od přímé spojnice.

#### 4. Metody zkoumání a určování vlivu refrakce

V historickém vývoji zkoumání refrakčních vlivů se vystřídala celá řada kvalitativně odlišných způsobů a metod jak v maximální možné míře eliminovat vliv tohoto faktoru na přesná geodetická měření. V geodetické literatuře se nejčastěji setkáváme s následujícími způsoby:

- a) pomocí refrakčního koeficientu  $k$  (matematické metody),
- b) pomocí indexu lomu vzduchu  $n$  (fyzikální metody založené na měření meteorologických veličin),
- c) přímým určováním refrakčního úhlu (v reálném čase).

U prvních dvou uvedených metod se nejčastěji jedná o dodatečné korekce měřených veličin, zatímco posledním trendem výzkumu je snaha určovat a eliminovat vliv refrakce na měřené veličiny (úhly, směry, délky, čtení na lati apod.) již během měření.

ad a) Tento způsob je historicky nejstarší a pro svou jednoduchost (nevyžaduje žádné speciální přístrojové vybavení) je v běžné geodetické praxi nejužívanější. I jeho zejména mechanické univerzální používání má však svá úskalí, která budou uvedena v závěru tohoto odstavce.

Vliv refrakce se zde určuje matematicky na základě geometrických podmínek, které by měly nadbytečně měřené ze-

nitové úhly splňovat za předpokladu platnosti určité hypotézy tzv. refrakčního modelu, který má fyzikální opodstatnění vždy jen v určitých specifických podmínkách.

V plochem terénu bude, při alespoň přibližně symetrickém průběhu záměry nad terénem a tím velmi podobných refrakčních poměrech na obou koncích nepříliš (maximálně 2 km) dlouhé záměry, platit hypotéza, že vliv refrakce je (pochopitelně ve stejném čase) na obou koncích záměry přibližně stejný. Dostáváme se tak k refrakčnímu modelu s konstantním refrakčním koeficientem pro záměr (průmět refrakční křivky do svislé roviny je v tomto zjednodušeném případě nahrazen kružnicovým obloukem – určujeme tedy pouze vertikální složku refrakčního úhlu.) Refrakční koeficient pro každou oboustranně a současně měřenou záměru se vypočte z měřených zenitových úhlů  $z_{ij}$ , respektive  $z_{ji}$  (opravených pouze o případnou rozdílnou výšku přístroje a cíle) podle jednoduchého vztahu:

$$k_{ij} = \frac{2 \rho_{ij}}{\varphi_{ij}},$$

kde

$$\rho_{ij} = \frac{\rho_i + \rho_j}{2} = 100'' + \frac{\varphi_{ij}}{2} - \frac{z_{ij} + z_{ji}}{2}$$

a

$\varphi_{ij}$  je geocentrický úhel sbíhavosti tížnic respektive normál – pro tento účel zcela postačí  $\varphi_{ij} \approx 0,01 D_{ij}^{(km)}$ .

Z uvedeného je zřejmé, že vliv vertikální složky refrakce na měřený úhel je zde prakticky vyřešen měřickou metodou oboustranným a současným měřením zenitových úhlů, které se společně s elektronickým měřením délek používá při trigonometrickém určování výškových rozdílů. Jedinou podmínkou je alespoň přibližná platnost uvedeného refrakčního modelu.

V podhorském, horském a zejména vysokohorském terénu, kde se volí stanoviště na ostrých horských vrcholcích, ztrácí předchozí model postupně své fyzikální opodstatnění. Velká a rozdílná převýšení mezi sousedními stanovišty bodů sítě musí nutně vyvolat odlišné refrakční poměry (např. změna teploty a tlaku) a tím i různé refrakční koeficienty na obou koncích každé záměry. Stanoví se proto jen hypotéza, že vliv refrakce na stanovišti nezávisí na azimutu záměry, což umožní při dostatečném počtu nadbytečných měření nejprve oddělit vliv refrakce od vlivu relativních tížnicových odchylek, které v horách již nelze zanedbávat, a následně pak vede k refrakčnímu modelu s konstantním refrakčním koeficientem pro stanoviště [2].

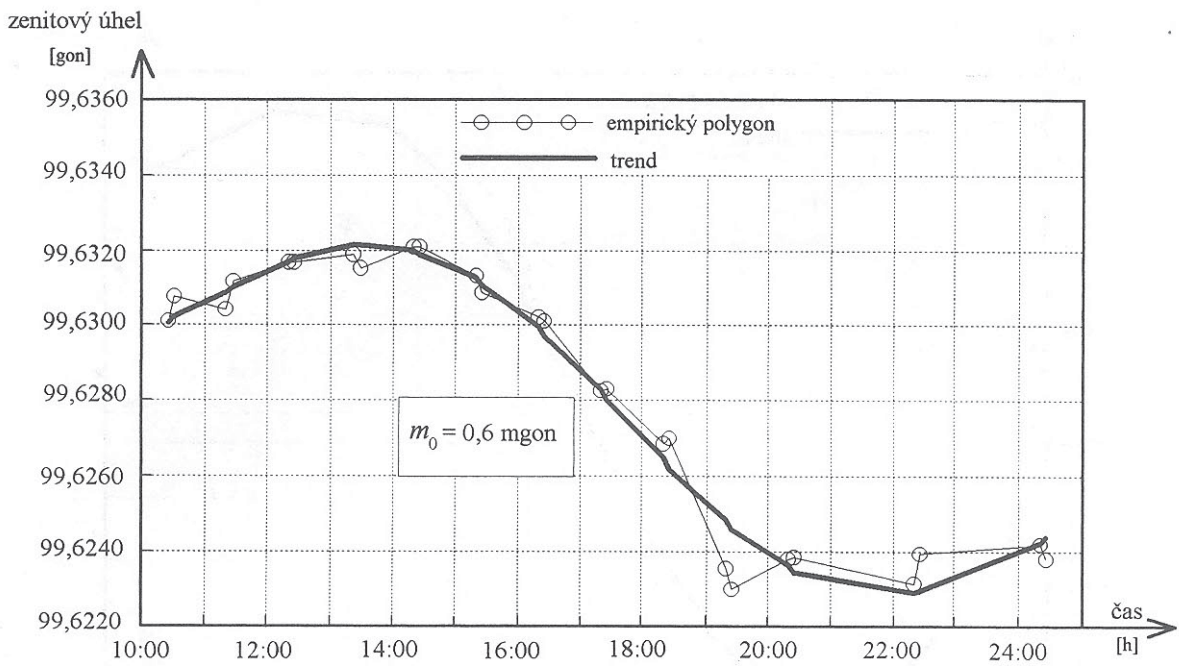
Postupným průměrováním takto určovaných hodnot refrakčních koeficientů z historických měření v evropských trigonometrických a výškových sítích vznikly první střední hodnoty refrakčních koeficientů již v letech 1736–1875 v intervalu 0,1053–0,1678, a to zcela empiricky bez jakéhokoliv fyzikálního opodstatnění. V Německu a v sousedních středoevropských zemích je nejnámější a nejužívanější konstantní (průměrná) hodnota refrakčního koeficientu

$$k_0 = 0,1306$$

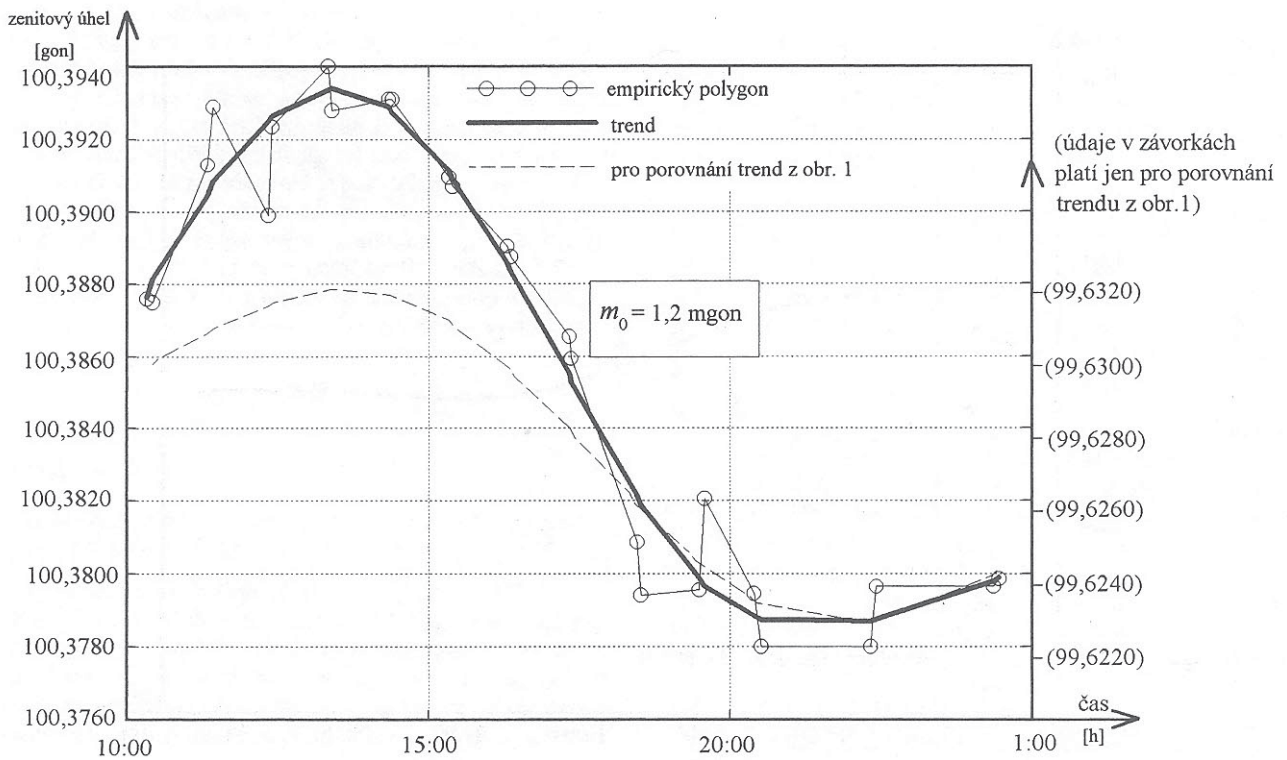
stanovená Gaussem v letech 1823–1826 z vyrovnání tzv. Hannoverského stupňového měření (sít s 28 body s délkami stran 5–85 km) mezi Göttingenem a Altonou, která se ne vždy zcela správně používá (jako univerzální konstanta řešící problema-

<sup>1)</sup> Stejná složka refrakčního úhlu, ovlivňující vodorovné záměry v těsné blízkosti zemského povrchu (0,25 m–3 m) při geometrické nivelaci ze středu, představuje vliv tzv. nivelační refrakce.

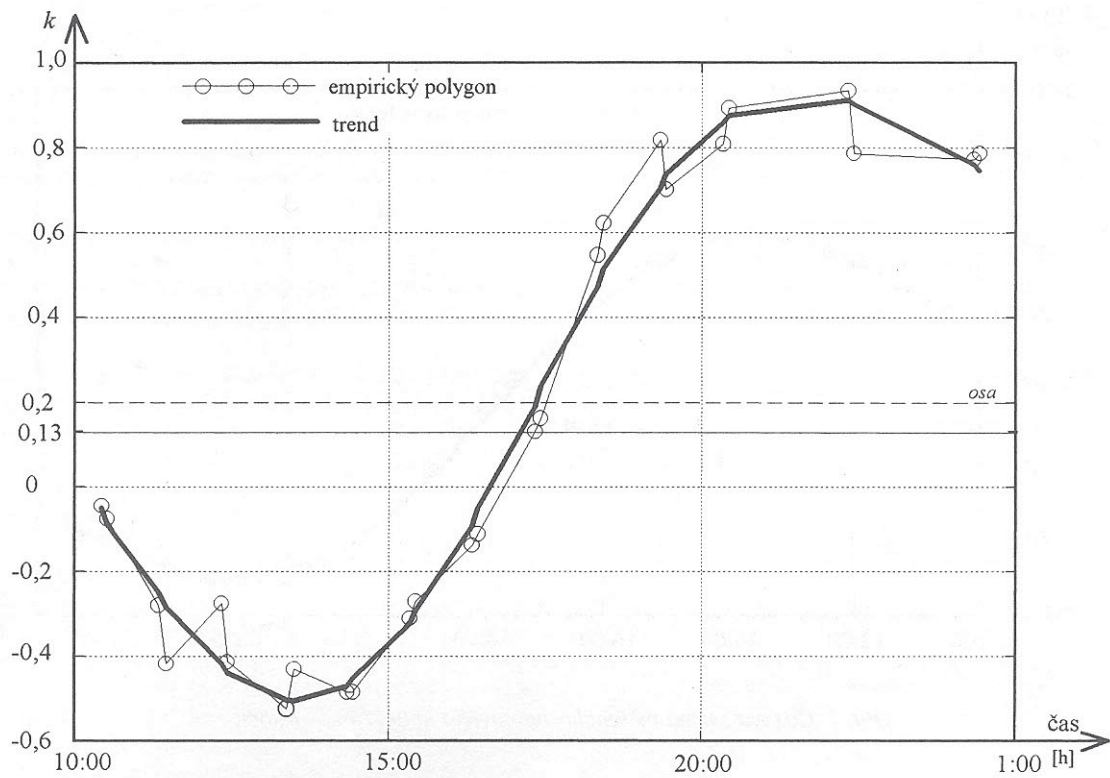




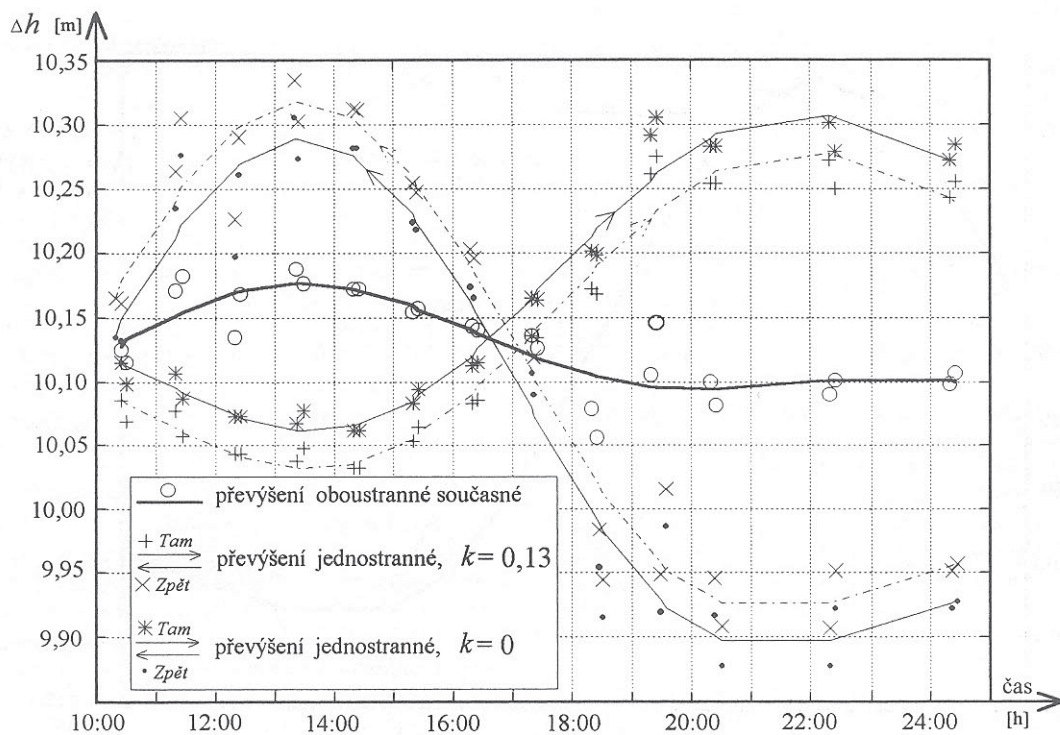
Obr. 1 Časová změna měřeného zenitového úhlu (Tábor–Kunčice)



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

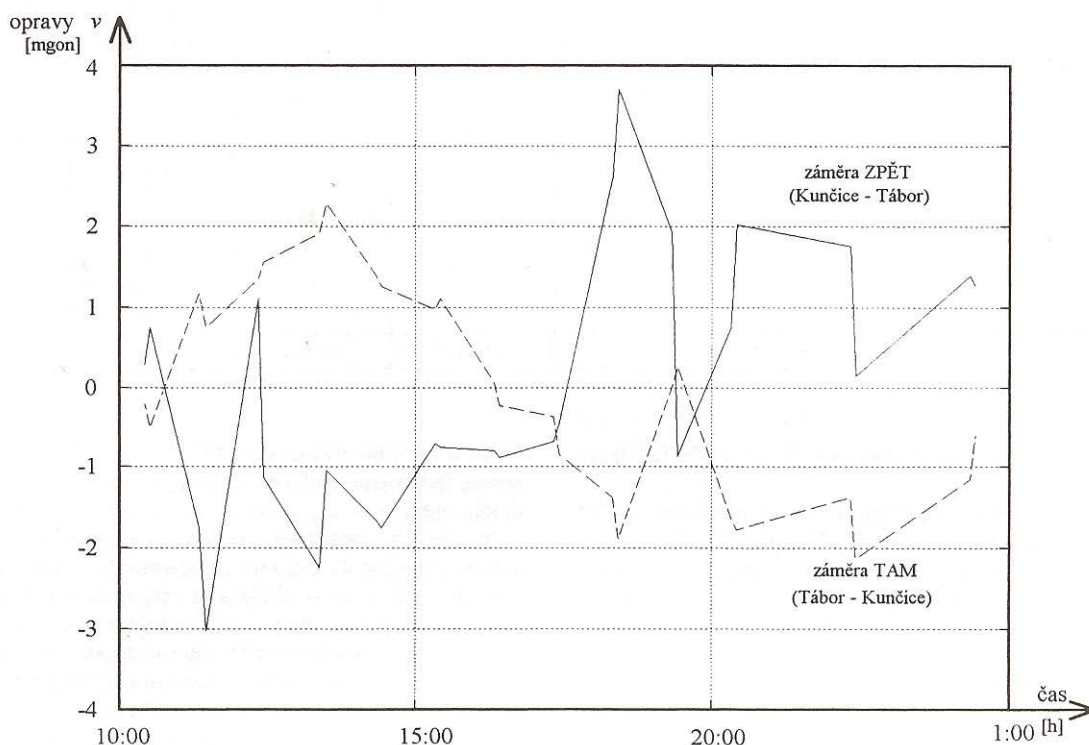


Obr. 3 Časová změna refrakčního koeficientu určeného z oboustranné záměry



Obr. 4 Časová změna převýšení vypočtených podle různých variant





Obr. 5 Graf výsledných oprav zenitových úhlů po vyrovnání

tiku refrakce) též u nás i v podmínkách zcela odlišných tēm, za kterých byla určena [3].

Ve všech ostatních případech současné geodetické praxe, a v inženýrské geodézii zvláště, mohou být tyto podmínky porušeny např. konfigurací (výskyt poměrně krátkých a zejména asymetrických záměr s malou výškou nad terénem), nebo vlivem okamžitého stavu atmosféry (např. teplotní inverze, záměry nad vodními či písčnými plochami, nebo jen významné kolísání vertikálního teplotního gradientu během dne – zejména při východu a západu Slunce – od jeho střední hodnoty  $-0,01 [C^{\circ} m^{-1}]$ ). Výsledkem jsou značné rozdíly skutečného refrakčního koeficientu od této konstantní hodnoty a její mechanické zavádění může pak dokonce (v případě, že je  $k < 0,065$ , což je v přízemních vrstvách velmi časté<sup>2)</sup>) způsobit větší chybu ve výškovém rozdílu, než úplné zanedbání opravy z vlivu refrakce, položením  $k = 0$ . Dochází pak k paradoxu, že uvedeným postupem zaváděná oprava z refrakce, respektive souhrnná oprava ze zakřivení Země a refrakce

$$O_1 = -\frac{D_2^2}{2R} k_0, \text{ respektive } O_2 = \frac{D_2^2}{2R} (1 - k_0),$$

(kde  $R = 6\,380$  km je střední poloměr Země)

jednotlivá, zejména jedním směrem určená, převýšení nejenom nepřesňuje, ale často doslova znehodnocuje (obr. 4).

ad b) Snaha o co nejpřesnější a přitom nejjednodušší fyzikální formulaci zákonitostí atmosférické refrakce sahá rovněž daleko do minulosti. Optická hustota prostředí a tím i index lomu závisí na přímo měřitelných meteorologických veličinách, především na teplotě, tlaku a vlhkosti vzduchu. Sledování gradientu indexu lomu, který je pro míru zakřivení

paprsku nejpodstatnější, bývá v řadě studií nahrazováno snazším sledováním vertikálního teplotního gradientu

$$\frac{d_t}{d_h} [C^{\circ} m^{-1}],$$

kteřý rozhodujícím způsobem ovlivňuje hustotu vzduchu a může i během dne nabývat značně odlišných hodnot. Zjednodušeně lze pro potřeby běžné geodetické praxe konstatovat, že znaménko a velikost teplotního gradientu v podstatě determinuje tvar refrakční křivky (zda je konkávní, či konvexní k zemskému povrchu)<sup>3)</sup> a míru jejího zakřivení.

ad c) Počet studií zaměřených na určování vlivu refrakce fyzikálními metodami výše uvedeným klasickým postupem pomocí indexu lomu (s dodatečnou korekcí měřených dat) určováním gradientů přímo měřitelných meteorologických veličin (teploty a tlaku vzduchu ve vybraných bodech záměry), které jsou rozhodující při výškových měřeních, stále klesá.

Současný trend výzkumu této problematiky dnes směřuje k disperzním metodám využívajícím elektromagnetických vln značně odlišné vlnové délky a tím i různého lomového čísla, určujícím index lomu, který je rozhodující veličinou při opravě rychlosti elektronicky měřených délek. Výhodou tohoto postupu, který se začíná využívat při konstrukci tzv. „dvoubarevných“ dálkoměrů, je určení vlivu okamžitého stavu atmosféry na elektronicky měřenou délku již během měření (hlavním problémem u prvních prototypů je cenová

<sup>2)</sup> Např. na stavbě SJ-magistrály v Praze byly zjištěny záporné hodnoty refrakčních koeficientů (inverze refrakce) kolem  $-1,0$ .

<sup>3)</sup> Hranicí je přibližně hodnota teplotního gradientu  $-0,01 [C^{\circ} m^{-1}]$ . Při menších hodnotách (výraznějším poklesu teploty s přibývajícím nadmořskou výškou) je refrakční křivka konkávní, při výrazně větších (nárůst teploty – tzv. teplotní inverze) konvexní k zemskému povrchu.



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

PŘEVÝŠENÍ REFRAKČNÍ MODEL (m)	JEDNOTKOVÉ (J)		CELODENNÍ (26 J)		VÝBĚROVÉ (4 J+4J)	
	$m_{\Delta h}$ (m)	nejodlehlejší výsledky (m)	$\Delta \bar{h}$ (m)	$m_{\Delta \bar{h}}$ (m)	$\Delta \bar{h}_v$ (m)	$m_{\Delta \bar{h}_v}$
Oboustranné současné $-0,52 < k < +0,93$	0,036	+0,055   -0,075	10,131	0,006	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	dtto	10,102	dtto
			10,128		10,194	
Velmi přesná nivelace			<b>10,1313</b>	<b>0,0012</b>		

nákladnost přímé modulace krátkovlnného – „modrého“ laserového zdroje).

Protože přímé určení gradientu indexu lomu z determinujících meteorologických veličin v celém průběhu delší (např. kilometrové) záměry je v tentýž časový okamžik prakticky nemožné a měření v několika (nejčastěji pouze dvou) bodech záměry nedokáží vystihnout proměnlivost atmosféry, ubírá se současný výzkum zcela novými směry. Příkladem může být např. odvození gradientu indexu lomu z atmosférické turbulence, či určení vlivu refrakce v reálném čase integrální metodou pomocí chvění obrazu na základě větrného profilu – podrobněji [7].

Všechny tyto metody mají nesporný význam při teoretickém studiu vlivu refrakce a pro konstrukci nových typů geodetických přístrojů, které mají respektovat vliv prostředí již během měření. Pro naprostou většinu potřeb praktické geodézie jsou však příliš složité a náročné na speciální přístrojové vybavení.

### 5. 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 1,7 km 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, obr. 2).

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 [5], 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 jednotková chyba  $m_0$  pro záměru z bodu Tábor je příznivější (0,6 mgon) než pro záměru z bodu Kunčice (1,2 mgon). Stejně tak poněkud větší amplituda časových změn (7,4 mgon) na obr. 2 je logicky vysvětlena asymetrií záměry, která je u bodu Kunčice blíže terénnímu reliéfu než na bodě Tábor (4,6 mgon) – obr. 1.

Proto se musíme vyvarovat již při volbě konfigurace sítě zejména jednostranných asymetrických záměr, téměř kopírujících terén.

Na 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 vykonávat 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. h letního času – září, tj. obecně před západem Slunce, kdy se podle zkušeností nemají měřit zenitové úhly.

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 jednotek<sup>4)</sup> během více než 14 hodin je znázorněn na obr. 4. Přesnost výsledného celodenního převýšení 10,131 m z celého souboru měření lze charakterizovat střední chybou aritmetického průměru 0,007 m, amplitudou 0,041 m s nejodlehlejšími výsledky  $+0,055$  m,  $-0,075$  m a střední chybou jednotkového převýšení 0,036 m – tab. 1.

Kdyby se však dané převýšení určovalo jednostranně s využitím konstantního refrakčního koeficientu  $k = 0,13$ , respektive 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 měření na dopolední a odpolední část např. 9.–11. a 15.–17. h. Průměr z takto rozděleného měření obvykle dostatečně nahradí případné celodenní měření, které by bylo v běžné praxi neekonomické. Pro náš případ výběru  $9^{40}$ – $10^{40}$  a  $14^{40}$ – $15^{40}$  (SEČ) jsme vypočetli následující hodnoty – tab. 1 (časové

<sup>4)</sup> 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) – [4]



údaje ve všech obrázcích jsou ponechány v letním čase, který platil v době měření).

Na závěr bylo provedeno též vyrovnání celodenního měření TAM a ZPĚT metodou nejmenších čtverců podle modifikovaného stochastického modelu uvedeného v [6]. Všechny zenitové úhly mají váhu  $p = 1$ , aposteriorní odhad jednotlivé střední chyby je 1,5 mgon. Výsledkem výpočtu je vyrované převýšení  $\Delta h = 10,131$  m se střední chybou  $m_{\Delta h} = 0,006$  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 znázorněn průběh zbytkových oprav v měřených zenitových úhlu po eliminaci vlivu refrakce. Průběh oprav v čase již nesleduje trend periodických změn a má téměř náhodný charakter.

## 6. 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 technologií měření (oboustranné a současné měření zenitových úhlů), která vede k použití modelu s určováním 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, nebo alespoň do dvou denních etap rozděleného měření. 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 (respektive 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 určovaného výškového rozdílu s výsledky získanými družicovou metodou GPS.

## LITERATURA:

- [1] PELIKÁN, M.: Aproximace refrakční křivky hyperbolou. Praha, Acta polytechnica 1982.
- [2] HRADILEK, L.: Vysokohorská geodézie. Praha, Academia 1984.
- [3] JORDAN, W.–EGGERT, O.–KNEISSL, M.: Handbuch der Vermessungskunde. Band II / 2. Stuttgart 1956.
- [4] BLAŽEK, R.–SKOŘEPA, Z.: Geodézie 30 (Výškopis). Praha, ČVUT 1999.
- [5] BŮHM, J.–RADOUCH, V.–HAMPACHER, M.: Teorie chyb a vyrovnávací počet. Praha, Geodetický a kartografický podnik 1990.
- [6] ŠTEMPELOVÁ, M.: Riešenie refrakčných vplyvov z trigonometricky meraných prevýšení bodov. Geodetický a kartografický obzor, 39(81), 1993, č. 10.
- [7] WITTE, B.–DEUBEN, D.–CASOTT, N.: Současné metody pro určení geodetické refrakce při pozemních přesných měřeních. Geodetický a kartografický obzor, 46(88), 2000, č. 1.

*Příspěvek byl vypracován v rámci Výzkumného záměru ČVUT CEZ J 04/98: 210000022.*

Do redakce došlo: 15. 8. 2000

**Lektoroval:**  
**Doc. RNDr. Miloslav Švec, DrSc.,**  
**Ústav geodézie FAST VUT v Brně**