

# VPLIV BOČNE REFRAKCIJE NA MERJENJE HORIZONTALNIH SMERI

# INFLUENCE OF LATERAL REFRACTION ON MEASURED HORIZONTAL DIRECTIONS

*Katja Cergol, Tomaž Ambrožič*

UDK: 528.3  
 Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01  
 Prispelo: 3. 1. 2018  
 Sprejeto: 27. 3. 2018

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.188-200  
 SCIENTIFIC ARTICLE  
 Received: 3. 1. 2018  
 Accepted: 27. 3. 2018

## IZVLEČEK

*V prispevku obravnavamo, kolikšen je vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri. Predstavljena je izmera bočne refrakcije pod različnimi pogoji. Kot izvor bočne refrakcije je bil uporabljen avtomobil. Meritve horizontalnih kotov so bile izvedene, ko je bil avtomobil na različnih oddaljenostih od instrumenta. Rezultate meritev smo primerjali z rezultati, izračunanimi po enačbah iz literature, z upoštevanjem enakih pogojev kot pri meritvah.*

## ABSTRACT

*This article deals with the impact of lateral refraction on the measurement of horizontal directions. The measurement of lateral refraction under different conditions is presented. A car was used as a source of lateral refraction. Horizontal angle measurements were made when the car was at different distances from the instrument. The results of the measurements were compared with the results calculated using the equations from the literature, taking into account the same conditions as were in the measurements.*

## KLJUČNE BESEDE

bočna refrakcija, refrakcijski kot, temperaturni gradient

## KEY WORDS

lateral refraction, angle of refraction, temperature gradient

## 1 UVOD

Pojem refrakcija izvira iz latinske besede 'refractio', kar v splošnem pomeni prelom. S fizikalnega vidika pomeni spremembo smeri valovanja pri prehodu iz ene snovi v drugo. Poznamo refrakcijo svetlobe, refrakcijo zvoka in atmosfersko refrakcijo, kjer svetloba pri prehodu skozi ozračje spremeni smer (SSKJ, 2014). Če gostota zraka ni konstantna na celotni vizuri, potem tudi vizura ni prema linija. V tem primeru govorimo o refrakciji (Schwarz, 1997).

Poznamo vertikalno refrakcijo, ki se pojavlja pri merjenju vertikalnih kotov oziroma zenitnih razdalj, in bočno oziroma horizontalno refrakcijo, ki se pojavlja pri merjenju horizontalnih smeri. V primerjavi z vertikalno refrakcijo je vprašanje bočne refrakcije nekaj slabše predstavljeno in predvsem večkrat zanemarjeno (Brunner in Hennes, 2014). Dobro pa je raziskana vertikalna refrakcija, ki se pojavlja pri niveliranju.

Bočno refrakcijo opredelimo kot nepremočrtnost vizure v horizontalni ravnini, kar posledično privede do spremembe velikosti merjene horizontalne smeri. Refrakcija je nepredvidljiva in je odvisna od lokacije meritev, dnevnega in letnega časa, oddaljenosti vizure od objekta, materiala in barve objekta. Je eden izmed dejavnikov, ki lahko bolj ali manj vpliva na geodetska merjenja.

Bočno refrakcijo prištevamo med pogoške delovnega okolja. Kljub zavedanju in izkušnjam se lahko zgodi, da pri merjenju nastanejo večji pogoški. To se dogaja zlasti pri meritvah, ko vizure potekajo ob objektih, ki zaradi meteoroloških lastnosti spremenijo gostoto zraka in se jim zaradi terenskih danosti ne moremo izogniti. Pri najnatančnejših meritvah vpliva bočne refrakcije ne smemo zanemariti.

V večini del in raziskav opozarjajo, da je pri merjenju horizontalnih smeri vpliv bočne refrakcije treba upoštevati zlasti, kadar gre za meritve večje natančnosti. Pri pregledu literature, ki obravnava bočno refrakcijo, smo prišli do spoznanja, da bočna refrakcija povzroča največjo zaskrbljenost pri gradnji predorov (Johnston, 1991; Koritke, 1990; Redovniković et al., 2011; Redovniković et al., 2013; Velasco-Gómez et al., 2016). Z bočno refrakcijo se srečamo v fazi gradnje predorske cevi in po izgradnji predora. Pri gradnji predora nam bočna refrakcija lahko povzroča težave pri usmerjanju gradnje predora in določevanju konvergenč primarne predorske obloge. V obeh primerih kot izhodišče uporabljamo zunanjo mrežo predora, za katero predpostavimo, da je stabilna. Meritve izvajamo od točk zunanje mreže do čela predora oziroma konvergenčnih profilov. Pri teh meritvah se lahko vizura zelo približa steni predora oziroma izvoru bočne refrakcije. Po izgradnji predora pa spremljamo morebitne pomike sekundarne predorske obloge tudi v zunanjem stabilnem koordinatnem sistemu – meritve izvajamo tudi od zunanje mreže do merskih profilov v predoru. Še posebej moramo biti zato pozorni na bočno refrakcijo pri prehodu meritev s površine v predor (Ingensand et al., 1998) in pozimi, ko je temperaturni gradient velik zaradi velike temperaturne razlike med površino in notranjostjo predora (Glaus in Ingensand, 2002; Bryś, 2014). Grobler (2015) opozarja, da je bočna refrakcija največji vir sistematičnih pogoškov pri gradnji predorov in jamomerstvu. Če se vizura preveč približa steni podzemnega prostora, ki je vir refrakcije in ima različno temperaturo od temperature zraka, potem vizura ni premica, ampak krivulja. V vseh prispevkih svetujejo, da vpliv bočne refrakcije zelo zmanjšamo s 'cikcakasto' obliko poligona (poligonske točke naj bodo izmenično na eni in drugi strani predora), s potekom poligona po sredini predora (kar je v praksi težko doseči zaradi transporta, naprav ...) in vzajemno izvedbo giroskopskih meritev na poligonskih točkah.

V prispevku bomo opisali izvedbo izmere refrakcijskega kota v naravi in izračunali refrakcijski kot po enačbah iz literature. Na podlagi praktičnega primera v naravi bomo prikazali vpliv bočne refrakcije pri merjenju horizontalnih smeri pod različnimi pogoji, in sicer glede na temperaturo objekta in ozračja, glede na oddaljenost vizure od objekta in oddaljenost objekta od instrumenta. Teoretične izračune bomo primerjali z dobljenimi iz praktičnega primera.

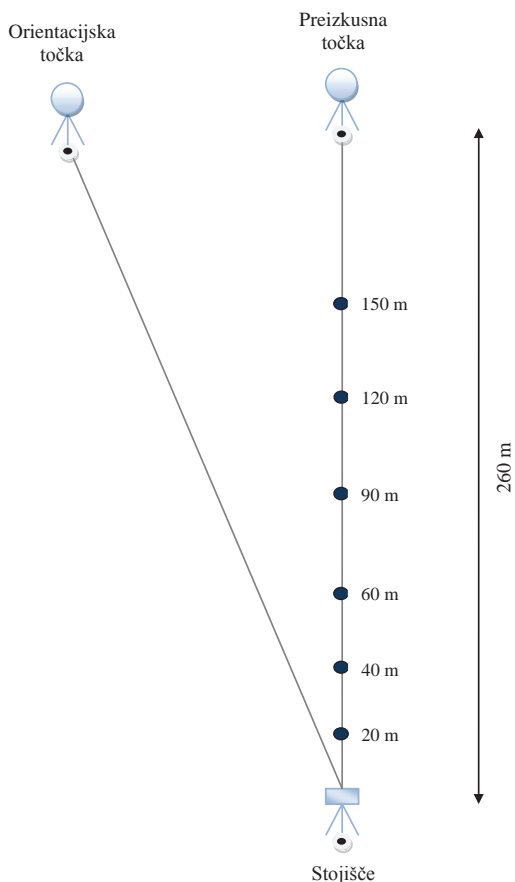
## 2 METODE

### 2.1 Izmera velikosti bočne refrakcije

Pri izbiri območja smo postavili pogoj, da mora biti vzdolž vizure vpliv terena na lomni količnik zraka konstanten. To smo dosegli tako, da smo izbrali čim bolj ravno podlago iz podobnega materiala. Tako smo za lokacijo določili veliko parkirišče na obrobju Ljubljane, ki je namenjeno avtomobilskemu sejmu. Podlaga, na kateri smo izvedli meritve, je bil makadam. Kot objekt, ki bo povzročal bočno refrakcijo, smo izbrali avtomobil temne barve, ki se je na soncu bolj segrel, kot bi se avtomobil svetlejšje barve. Meritve smo izvedli v sončnem vremenu, saj nas je zanimalo, kako bočna refrakcija vpliva na merjenje horizontalnih smeri, ki potekajo ob objektu, če se temperaturi zraka in objekta precej razlikujeta. Instrument smo zaradi sončnega obsevanja zavarovali s senčnikom.

Izbrali smo tri točke testnega polja, ki smo jih stabilizirali s stativi Leica Geosystems GST20. Ena točka je bila stojišče instrumenta, druga je služila za orientacijo izmere, tretja pa je bila preizkusna točka, proti kateri smo določevali bočno refrakcijo (slika 1). Višino vseh treh stativov smo izbrali nizko, zato da je vizura proti preizkusni točki potekala ob boku avtomobila (pod stranskim ogledalom). Orientacijsko točko smo izbrali dovolj stran od preizkusne točke, zato da orientacijska vizura ni bila podvržena bočni refrakciji. Orientacijska točka je morala biti oddaljena vsaj toliko kot preizkusna, kar je splošno veljavno pravilo za orientacijske točke. Tako sta bili orientacijska in preizkusna točka oddaljeni približno 263 metrov od stojišča instrumenta. S prometnimi stožci smo signalizirali točke na vnaprej izbrani oddaljenosti od instrumenta in seveda na primerni oddaljenosti vizure ob avtomobilu (slika 1). Vizuro smo proti preizkusni točki izpostavili bočni refrakciji tako, da smo ob vizuri in ob prometnem stožcu ustavili avtomobil, ki je zaradi veliko višje temperature od ozračja povzročil bočno refrakcijo. Vpliv smo nato izmerili na šestih oddaljenostih od instrumenta: 20, 40, 60, 90, 120 in 150 metrov (slika 1).

Meritve vpliva bočne refrakcije smo izvedli v dveh korakih. Najprej smo vzporedno z vizuro ustavili avtomobil ob prometnem stožcu na določeni oddaljenosti od instrumenta ob preizkusni vizuri. Če je bil avtomobil preblizu preizkusne vizure (približno 3 centimetre), smo ugotovili, da instrument zaradi prevelikega migetanja zraka ob avtomobilu ni mogel fino navizirati na preizkusno prizmo (uporabili smo namreč samodejni način merjenja kotov in dolžin). To oddaljenost avtomobila od preizkusne vizure smo upoštevali v nadaljevanju meritev. Merjenje kota med orientacijsko in preizkusno točko smo opravili po girusni metodi v desetih girusih. V drugem koraku smo nato avtomobil odmaknili ter ponovno v desetih girusih izmerili kot med orientacijsko in preizkusno vizuro. Izmerjeni kot je bil torej brez bočne refrakcije in je služil za kontrolo stabilnosti instrumenta, obeh stativov na orientacijski in preizkusni točki ter »stabilnosti« ozračja. Pri vsakem sklopu meritev smo izmerili temperaturo zraka, zračni tlak, oddaljenost preizkusne vizure od avtomobila in temperaturo avtomobila.



Slika 1: Geometrija in organizacija testnega polja.

## 2.2 Uporabljen instrumentarij in oprema

Horizontalni kot med orientacijsko in preizkusno točko smo izmerili z instrumentom Leica Geosystems TS30 R1000 z natančnostjo merjenja kotov  $\sigma_{ISO-THEO} = 0,5''$  (Leica, 2017). Orientacijsko in preizkusno točko smo signalizirali s preciznim reflektorjem Leica Geosystems GPH1P, ki smo ga postavili na precizen nosilec reflektorjev Leica Geosystems GZR3 in podnožje Leica Geosystems GDF121. Temperaturo ozračja smo izmerili z Assmannovim aspiracijskim psihrometrom z ločljivostjo  $0,1^{\circ}\text{C}$ , temperaturo avtomobila pa s tipalnim termometrom Testo 110 z natančnostjo  $0,2^{\circ}\text{C}$  ( $-20$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ ) in ločljivostjo  $0,1^{\circ}\text{C}$  (Testo, 2017). Zračni tlak smo izmerili s preciznim barometrom Paroscientific z natančnostjo  $0,08$  hPa in ločljivostjo  $0,001$  hPa (Paroscientific, 2017). Oddaljenost preizkusne vizure od avtomobila smo izmerili z ročnim merskim trakom Leica Geosystems GHM007.

## 3 REZULTATI

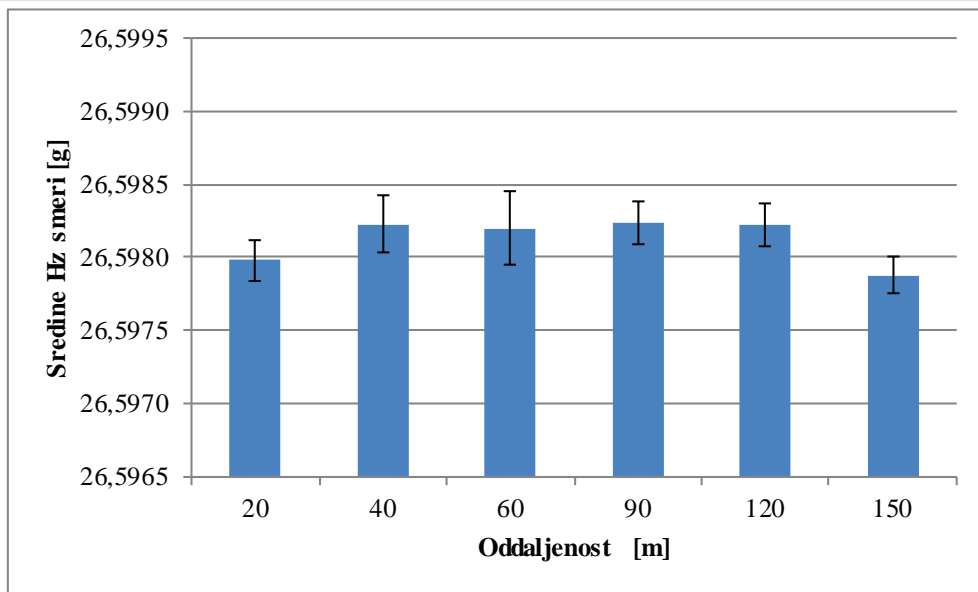
Po opravljenih meritvah smo za vsako posamezno oddaljenost avtomobila od instrumenta izračunali srednje vrednosti reduciranih horizontalnih smeri iz desetih girusov s pripadajočimi standardnimi devi-

acijami merjenih horizontalnih smeri v  $n$  girusih z upoštevanjem pogreška začetne smeri  $\sigma_{ng}$  (Macarol, 1978), kar prikazujemo v preglednici 1.

Iz rezultatov meritev smo najprej preverili stabilnost stativov med meritvami. Stabilnost stativov dobimo kot razliko smeri med orientacijsko in preizkusno vizuro, ko ta ne poteka ob avtomobilu – vrednosti kotov s pripadajočimi standardnimi deviacijami prikazujemo v preglednici 1 in na sliki 2.

Preglednica 1: Srednje vrednosti reduciranih horizontalnih smeri s pripadajočimi standardnimi deviacijami

Oddaljenost [m]	Ob avtomobilu – z refrakcijo		Brez avtomobila – brez refrakcije		Opombe
	Hz smer [g]	$\sigma_{ng}$ [cc]	Hz smer [g]	$\sigma_{ng}$ [cc]	
20	26,59958	3,4	26,59798	1,4	–
40	26,59915	3,8	26,59823	1,9	–
60	26,59893	2,8	26,59820	2,5	–
90	26,59834	1,6	26,59824	1,5	v prvih 4 girusih oblak – nihanje temperature
120	26,59842	2,9	26,59822	1,5	–
150	26,59805	1,3	26,59788	1,3	v zadnjih 3 girusih oblak in močnejši veter



Slika 2: Stabilnost stativov med merjenjem.

Na podlagi rezultatov v preglednici 1 smo izračunali, ali so bili stativi med meritvami stabilni. Predpostavili smo, da so pogreški meritev normalno porazdeljeni. Enako so porazdeljene tudi količine, ki so linearne funkcije meritev (Turk, 2011). Stabilnost stativov smo izračunali po naslednjem postopku:

- izbrali smo si stopnjo zaupanja  $1 - \alpha = 95\%$ ;

- postavili smo ničelno in alternativno hipotezo:  
 $H_0$ : stativ se med trajanjem izmere statistično značilno ni premaknil in  
 $H_a$ : stativ se je statistično značilno premaknil med trajanjem izmere;
- za standardizirano normalno porazdelitev smo izračunali kritično vrednost  $T_{krit}$  za dvostranski test, ki je 1,96;
- izračunali smo aritmetično sredino horizontalnih smeri na preizkusno točko, ko vizura ne poteka ob avtomobilu:  $H_{z_{sred}} = \frac{\sum_1^6 H_{z_i}}{6}$ ,  $i = 20, 40, 60, 90, 120, 150$ ;
- izračunali smo standardno deviacijo aritmetične sredine horizontalnih smeri:  

$$\sigma_{H_{z_{sred}}} = \sqrt{\frac{\sum_1^6 (H_{z_i} - H_{z_{sred}})^2}{6-1}}$$
;
- izračunali smo razlike za posamezno oddaljenost avtomobila od instrumenta med posamezno vrednostjo horizontalne smeri na preizkusno točko, ko vizura ne poteka ob avtomobilu  $H_{z_i}$ , in srednjo vrednostjo horizontalne smeri  $H_{z_{sred}}$ ;  $raz_i = |H_{z_i} - H_{z_{sred}}|$ ;
- izračunali smo standardne deviacije razlike  $raz_i$  z uporabo zakona o prenosu varianc in kovarianc:  

$$\sigma_{raz_i} = \sqrt{(\sigma_{ng_i}^2 + \sigma_{H_{z_{sred}}}^2)}$$
;
- izračunali smo testne statistike:  $T_i = \frac{raz_i}{\sigma_{raz_i}}$ ;
- primerjali smo testne statistike  $T_i$  s kritično vrednostjo  $T_{krit}$ :  
 če je  $T_i \leq T_{krit}$ , potem ničelne hipoteze ne moremo zavrniti in lahko trdimo z verjetnostjo  $1 - \alpha$ , da se stativ med trajanjem izmere ni statistično značilno premaknil;  
 če je  $T_i > T_{krit}$ , potem ničelno hipotezo zavrnemo in lahko trdimo z verjetnostjo  $1 - \alpha$ , da se je stativ statistično značilno premaknil med trajanjem izmere.

Rezultate testiranja stabilnosti stativov prikazujemo v preglednici 2, kjer lahko vidimo, da so bili stativi med izvajanjem meritev stabilni.

Preglednica 2: Rezultati testiranja stabilnosti stativov

Oddaljenost [m]	$raz_i$ [cc]	$\sigma_{raz_i}$ [cc]	$T_i$	Stativ stabilen
20	1,4	2,1	0,69	da
40	1,1	2,5	0,43	da
60	0,7	2,9	0,26	da
90	1,2	2,2	0,53	da
120	1,0	2,2	0,44	da
150	2,4	2,0	1,21	da

Ker smo s kontrolnimi meritvami, ko vizura ni potekala ob avtomobilu, dokazali, da so bili stativi stabilni, smo v naslednjem koraku izračunali refrakcijske kote v odvisnosti od oddaljenosti avtomobila od instrumenta. Refrakcijski kot  $\delta_i$  smo dobili kot razliko med srednjo vrednostjo reducirane smeri proti preizkusni vizuri, ko avtomobila ni bilo zraven  $H_{z_{brez_i}}$ , in srednjo vrednostjo reducirane smeri

proti preizkusni vizuri ob avtomobilu  $HZ_{ob_i}$  (seveda lahko računamo s posamezno srednjo vrednostjo reducirane smeri, saj se reducirane smeri nanašajo na orientacijsko točko, ki je bila v vseh meritvah ista) – glej preglednico 3:

$$\delta_i = HZ_{brez_i} - HZ_{ob_i}, \quad i = 20, 40, 60, 90, 120, 150.$$

Natančnost določitve refrakcijskega kota smo dobili na podlagi zakona o prenosu varianc in kovarianc (preglednica 3):

$$\sigma_i = \sqrt{(\sigma_{HZ_{brez_i}}^2 + \sigma_{HZ_{ob_i}}^2)},$$

kjer so:

$\sigma_{\delta_i}$  ... natančnost refrakcijskega kota,

$\sigma_{HZ_{brez_i}}$  ... natančnost srednje vrednosti reducirane smeri proti preizkusni vizuri, ko avtomobila ni bilo zraven, in

$\sigma_{HZ_{ob_i}}$  ... natančnost srednje vrednosti reducirane smeri proti preizkusni vizuri ob avtomobilu.

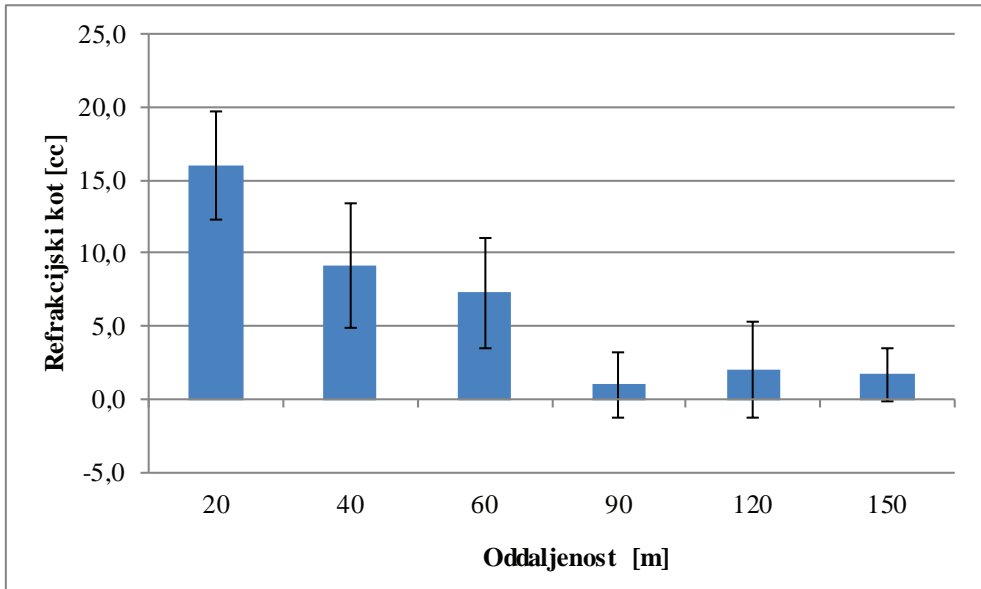
Izračunali smo testno statistiko:

$$T_i = \frac{\delta_i}{\sigma_{\delta_i}},$$

s katero smo testirali, ali je refrakcijski kot statistično značilno določen. Stopnjo zaupanja  $1 - \alpha = 95\%$  smo izbrali enako kot pri testiranju stabilnosti stavov. Velikost kritične vrednosti  $T_{krit}$  za dvostranski test znaša 1,96. Če je  $T_i > T_{krit}$ , potem trdimo z verjetnostjo  $1 - \alpha$ , da je refrakcijski kot statistično značilno določen. Če je  $T_i \leq T_{krit}$ , pa trdimo, da refrakcijski kot ni statistično značilno določen. Rezultate testiranja prikazujemo v preglednici 3.

Preglednica 3: Refrakcijski kot s pripadajočo natančnostjo in rezultati testiranja refrakcijskega kota

Oddaljenost [m]	$\delta_i$ [cc]	$\sigma_{\delta_i}$ [cc]	$T_i$	Statistično značilen
20	16,0	3,7	4,35	da
40	9,2	4,2	2,17	da
60	7,3	3,8	1,94	ne
90	1,0	2,2	0,46	ne
120	2,0	3,3	0,61	ne
150	1,7	1,8	0,92	ne



Slika 3: Refrakcijski kot.

## 4 ANALIZA

Izmerjene rezultate refrakcijskega kota smo želeli primerjati z rezultati izračunanega refrakcijskega kota z enačbami iz literature.

### 4.1 Predstavitev enačb za izračun refrakcijskega kota

Trije strokovnjaki Geodetske fakultete v Zagrebu (Redovniković et al., 2011, 2013) so predstavili zahtevnost in kompleksnost meritev v predorih glede na natančnost preboja. V svojih delih so analizirali merjenja v različnih atmosferskih pogojih in različnih oddaljenostih vizure od stene predora. Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri so analizirali v predoru Dolje na Hrvaškem. Zapisano enačbo je predlagal A. Bilajbegović v delu *Idejni projekt geodetske mreže tunela Čičarija*. Oznake smo prevzeli po izvornih člankih:

$$\varepsilon'' = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^j l_i L_i \cdot 0,29993 \cdot 10^{-6} \frac{p}{\alpha T_i^2} \text{ grad } T, \quad (1)$$

kjer so:

$\varepsilon''$  ... refrakcijski kot ["],

$d$  ... skupna dolžina vizure med dvema točkama [m],

$l_i$  ... dolžina stene v predoru, ki povzroča bočno refrakcijo [m],

$L_i$  ... oddaljenost od sredine objekta, ki povzroča refrakcijo do končne točke [m],

$p$  ... zračni tlak [mbar],



$\alpha$  ... temperaturni razteznostni koeficient zraka  $\alpha = 1/273,2$  [ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ],

$T_i$  ... temperatura [K] in

$\text{grad}T$  ... horizontalni temperaturni gradient [K/m].

Naslednji enačbi sta leta 1988 predlagala W. Wilhelm in H. J. Matthias, ko sta proučevala vpliv refrakcije na devetih različnih objektih. W. Wilhelm je enaki enačbi zapisali tudi v poznejših objavah (Wilhelm, 1993, 1994). Oznake smo povzeli po izvirnem članku:

$$\delta^{\alpha} = \int_{s=0}^{s=D} \frac{D-s}{D} \kappa_s ds \quad \text{in} \quad (2)$$

$$\delta^{\alpha} \approx \sum_{i=1}^n \frac{D-s_i}{D} \kappa_{s_i} \Delta s_i, \quad (3)$$

kjer so:

$\delta$  ... refrakcijski kot [cc],

$s$  ... oddaljenost od instrumenta do sredine objekta, ki povzroča refrakcijo [m],

$D$  ... skupna dolžina vizure med dvema točkama [m],

$$\kappa_s = -2,28 \frac{P}{T^2} 29,3 \frac{dt}{dx} \quad \dots \text{ radij ukrivljenosti svetlobnega žarka – vizure [cc/m]}, \quad (4)$$

$\Delta s$  ... dolžina objekta, ki povzroča refrakcijo [m],

$P$  ... srednji zračni tlak [mmHg],

$T = T_0 + t = 273,15 \text{ K} + t$  ... srednja temperatura zraka [K],

$t$  ... srednja temperatura zraka [ $^{\circ}\text{C}$ ],

$$\frac{dt}{dx} = \text{grad}t_{T_1, T_2} \quad \dots \text{ horizontalni temperaturni gradient [K/m ali } ^{\circ}\text{C/m]}, \quad (5)$$

$dt = t_{T_2} - t_{T_1}$  ... temperaturna razlika med temperaturo objekta  $t_{T_2}$  in temperaturo na vizuri  $t_{T_1}$  [K ali  $^{\circ}\text{C}$ ] ter

$dx = x_{T_2} - x_{T_1}$  ... oddaljenost od objekta  $x_{T_2}$  do vizure  $x_{T_1}$  [m].

V raziskavah Wilhelm (1993, 1994) je avtor poleg enačb (2) in (3) dodal še enačbo, ko imamo poleg vizure le en objekt, ki povzroča refrakcijo:

$$\delta^{\alpha} = \frac{D-s}{D} \kappa_s \Delta s. \quad (6)$$

V raziskavi Redovniković (2013) so avtorji na podlagi meritev popravili enačbi (1) in (3) in ju zapisali kot:

$$\varepsilon'' = \frac{\rho''}{d} \sum_{i=1}^n l_i L_i \cdot 8,41367 \cdot 10^{-9} \frac{P}{\alpha T_i^2} \text{grad}T \quad \text{in} \quad (7)$$

$$\delta^{\alpha} \approx \sum_{i=1}^n \frac{D-s_i}{D} \left( -2,014535 \frac{P}{T^2} \frac{dt}{dx} \right) \Delta s_i. \quad (8)$$

## 4.2 Izračun refrakcijskega kota

Refrakcijske kote, ko je bil avtomobil od instrumenta oddaljen 20, 40, 60, 90, 120 in 150 metrov, smo izračunali po enačbah iz literature iz merskih podatkov, ki smo jih izmerili na terenu. Izmerjene podatke prikazujemo v preglednici 4. Nekateri merski podatki so bili enaki pri vseh oddaljenostih avtomobila od instrumenta:

- dolžina vizure od instrumenta do prizme: 263,54 m;
- dolžina izvora bočne refrakcije: 4 m;
- srednji zračni tlak: 985 hPa = 738,8 mmHg.

Preglednica 4: Izmerjeni podatki na terenu

Opis parametra	Enota						
Dolžina vizure od instrumenta do sredine izvora bočne refrakcije	[m]	21,5	41,5	61,5	91,5	121,5	151,5
Temperatura zraka	[°C]	18,1	18,5	18,7	20,0	19,3	20,0
Temperatura izvora bočne refrakcije	[°C]	39	42	38	35	35	33
Oddaljenost vizure od izvora bočne refrakcije	[m]	0,13	0,16	0,16	0,20	0,14	0,17

Če smo izračunali horizontalne temperaturne gradiente po enačbi (5) tako, da smo jih izračunali iz merskih podatkov, kolikšni so na oddaljenosti enega metra od avtomobila ( $x_{T2} = 1$  m in  $x_{T1} = 0$  m), smo dobili vrednosti refrakcijskih kotov po enačbah (1), (6), (7) in (8), ki jih podajamo v preglednici 5. V Wilhelm (1993) so na podlagi meritev prikazali, da sega vpliv segretega objekta do približno tolikšne razdalje.

Preglednica 5: Izračunani refrakcijski koti na podlagi izračunanih horizontalnih temperaturnih gradientov glede na oddaljenost enega metra

Opis parametra	Enota						
Horizontalni temperaturni gradient (5)	[°C/m]	-20,9	-23,5	-19,3	-15,0	-15,7	-13,0
Radij ukrivljenosti vizure (4)	[cc/m]	12,2	13,6	11,2	8,6	9,1	7,5
Refrakcijski kot (1)	[cc]	46,5	47,8	35,7	23,4	20,3	13,2
Refrakcijski kot (6)	[cc]	44,7	46,0	34,3	22,5	19,5	12,7
Refrakcijski kot (7)	[cc]	1,3	1,3	1,0	0,7	0,6	0,4
Refrakcijski kot (8)	[cc]	1,3	1,4	1,0	0,7	0,6	0,4

Če pa smo ocenili vrednosti temperatur na vizuri na oddaljenosti  $x_{T2}$  (podajamo jih v preglednici 6) in iz njih izračunali horizontalne temperaturne gradiente po enačbi (5), smo dobili vrednosti refrakcijskih kotov po enačbah (1), (6), (7) in (8), ki jih podajamo v preglednici 6. Horizontalne temperaturne gradiente smo torej v tem primeru izračunali glede na oddaljenost vizur od izvora bočne refrakcije ( $x_{T2} =$  oddaljenost vizure od izvora bočne refrakcije in  $x_{T1} = 0$  m).

Preglednica 6: Izračunani refrakcijski koti na podlagi ocenjene vrednosti temperatur na vizuri in izračunanih horizontalnih temperaturnih gradientov glede na oddaljenost vizure od izvora bočne refrakcije

Opis parametra	Enota						
Ocenjena temperatura zraka na vizuri	[°C]	38	41	37	34,5	34,5	32,5
Horizontalni temperaturni gradient (5)	[°C/m]	-7,7	-6,3	-6,3	-2,5	-3,6	-2,9

Radij ukrivljenosti vizure (4)	[cc/m]	4,5	3,6	3,6	1,4	2,1	1,7
Refrakcijski kot (1)	[cc]	17,1	12,7	11,6	3,9	4,6	3,0
Refrakcijski kot (6)	[cc]	16,4	12,2	11,1	3,7	4,4	2,9
Refrakcijski kot (7)	[cc]	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1
Refrakcijski kot (8)	[cc]	0,5	0,4	0,3	0,1	0,1	0,1

## 5 RAZPRAVA

Iz preglednic 5 in 6 vidimo, da so izračunani refrakcijski koti po enačbah (1) in (6) ter (7) in (8) podobne velikosti.

Refrakcijski koti, izračunani po enačbah (7) in (8), so obakrat (preglednici 5 in 6) manjši od izmerjenih. Iz preglednice 5 pa vidimo, da po enačbah (1) in (6) izračunamo prevelike vrednosti glede na izmerjene.

Precej podobne vrednosti merjenim izračunamo z enačbama (1) in (6), ko smo v izračunu horizontalnega temperaturnega gradienta uporabili podatek, koliko pade temperatura do oddaljenosti vizure od izvora bočne refrakcije – preglednica 5.

Na podlagi spoznanj iz Wilhelm (1993) smo želeli izračunati temperature na vizuri pri avtomobilu, saj jih nismo izmerili, ker za to nismo imeli tehničnih možnosti. Wilhelm je v svojem delu ugotavljal, kako temperatura pada v odvisnosti od oddaljenosti od izvora refrakcije ter v Tab. II.01, stran II/11, in Abb. II.04, stran II/9 (Wilhelm, 1993) podal izmerjene vrednosti. Iz teh vrednosti je bilo razvidno, da temperatura pada z oddaljenostjo po eksponentni krivulji. Tako smo na podlagi tega dejstva aproksimirali krivuljo padanja temperature po eksponentni aproksimacijski krivulji  $y = ax^{-b}$  ter vrednosti koeficientov  $a$  in  $b$  izračunali iz izmerjenih podatkov. Na podlagi aproksimirane krivulje smo izračunali, kakšne naj bi bile temperature na vizuri pri avtomobilu. Iz izračunanih vrednosti temperatur smo izračunali horizontalne temperaturne gradiente, ki so imeli prevelike vrednosti. Iz njih izračunani refrakcijski koti so bili preveliki, zato rezultatov ne podajamo.

Refrakcijske kote smo poskušali izračunati tudi po enačbah prof. Chrzanowskega (1981) – njegovo enačbo za izračun refrakcijskega kota je v svoji doktorski disertaciji povzel tudi Grobler (2015) in prof. Bryša s sodelavci (Beluch in Bryś, 2010; Bryś in Osada, 2011; Bryś in Justyniak, 2016) –, vendar dobimo prevelike vrednosti, ker navedeni raziskovalci upoštevajo, da je na vsej dolžini vizure enak temperaturni gradient (v našem primeru ni bilo tako, saj je imel naš objekt, ki je povzročal temperaturni gradient, le določeno dolžino).

## 6 SKLEP

V prispevku smo želeli prikazati, kako smo izmerili in izračunali velikost vpliva bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri. Izvedli smo meritve na terenu in kot izvor bočne refrakcije uporabili avtomobil temne barve. Kot med orientacijsko in preizkusno točko smo izmerili dvakrat – prvič je vizura potekala ob avtomobilu, ki je povzročal bočno refrakcijo, drugič, ko smo avtomobil odmaknili, pa je vizura potekala nemoteno proti preizkusni točki. Prvo meritev smo uporabili za izračun vpliva bočne refrakcije, drugo za kontrolo stabilnosti stavov in »ozračja«. Avtomobil smo ustavili na različnih oddaljenostih od instrumenta, da smo testirali tudi ta vpliv. Med meritvami je bilo vreme stabilno in temperature precej

visoke. Merske podatke smo obdelali ter s statističnim testiranjem in z izbrano stopnjo zaupanja potrdili, da so bili vsi trije stativi med meritvami stabilni.

Izmerjene vrednosti refrakcijskih kotov smo primerjali z vrednostmi, ki smo jih izračunali po enačbah iz literature. V izračunih smo seveda upoštevali parametre, ki smo jih izmerili na terenu. Izračunane vrednosti z enačbami iz Wilhelm (1993, 1994) in Redovniković et al. (2011, 2013) so se najbolj ujemale z izmerjenimi vrednostmi. Potrdili smo dejstvo, da je bočna refrakcija naraven pojav, na katerega vpliva izredno veliko dejavnikov, ki jih je zelo težko zajeti z enačbami.

Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri je sistematični pogrešek, ki ga v veliki večini primerov ne bi smeli zanemariti, zlasti če imamo opravka z visoko natančnimi meritvami. V predorih pride vpliv bočne refrakcije močno do izraza, in sicer:

- pri prehodu meritev iz površine v predor;
- pozimi, ko je velika temperaturna razlika med temperaturo, izmerjeno na površini, in v predoru;
- ko se vizura približa steni podzemnega prostora, ki je vir refrakcije in ima različno temperaturo od temperature zraka v predoru.

Na podlagi meritev ugotovimo, da lahko vpliv bočne refrakcije manjšamo:

- če vizura poteka čim dlje od objekta, ki povzroča bočno refrakcijo;
- če se temperaturi ozračja in objekta, ki povzročata bočno refrakcijo, ne razlikujeta;
- z večanjem dolžine med instrumentom in objektom, ki povzroča bočno refrakcijo.

Če se vizuram, potekajočim blizu izvora, ki povzroča bočno refrakcijo, ne moremo izogniti, lahko vpliv slednje zmanjšamo tako, da meritve izvedemo v oblačnem vremenu z zmernimi temperaturami.

### Literatura in viri:

Brunner, F. K., Hennes, M. (2014). Refraktion – Rückschau auf Publikationen der letzten 25 Jahre in der AVN. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 121 (4), 131–140.

Beluch, J., Bryš, H. (2010). Zur Problematik der Minimierung des Einflusses der Horizontalrefraktion in Tunnel-Vortriebs-Lagenetzen. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 117 (2), 71–76.

Bryš, H., Osada, E. (2011). Zur Reduzierung von Refraktionseinflüssen in Tunnel-Vortriebsnetzen, Modelltheoretische Lösung des Problems. *Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*, 118 (5), 170–178.

Bryš, H. (2014). The problem of horizontal refraction in setting out tunnel control networks. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 4, 25–35. DOI: <http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2014.4.25>

Bryš, H., Justyniak, N. (2016). Mathematical-physical model of horizontal refraction in measuring alignment of elongated engineering objects. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, 1, 25–32. DOI: <http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2016.1.25>

Chrzanowski, A. (1981). Optimization of the Breakthrough Accuracy in Tunneling Surveys. *The Canadian Surveyor*, 35 (1), 5–16.

Glaus, R., Ingensand, H. (2002). Tunnel surveys for new CERN particle accelerators. *Proceedings of the FIG XXII international congress*, Washington, D.C. USA, April 19-26 2002 (str. 1–12), Washington: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. [http://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/FIG\\_2002\\_CERN\\_Glaus.pdf](http://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/FIG_2002_CERN_Glaus.pdf), pridobljeno 14. 11. 2017.

Grobler, H. C. I. (2015). Spatial positioning of sidewall stations in a narrow tunnel environment: a safe alternative to traditional mine survey practice. *Doktorska disertacija*. Johannesburg: University of the Witwatersrand. Faculty of Engineering and the Built Environment. <http://hdl.handle.net/10539/18634>, pridobljeno 14. 11. 2017.

Ingensand, H., Ryf, A., Stengele, R. (1998). The Gotthard Base Tunnel – a challenge for geodesy and geotechnics. V: H. Kahmen (ur.), E. Brückl (ur.), T. Wunderlich (ur.), *Proceedings of the Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering*, Eisenstadt, Austria, 20–22 April 1998 (str. 1–8). Zürich: Institute of Geodesy and Photogrammetry, Swiss Federal Institute of Technology. <http://www.geometh-data.ethz.ch/downloads/eisenstadt98.pdf>, pridobljeno 14. 11. 2017.

Johnston, A. (1991). Lateral refraction in tunnels. *Survey Review*, 31 (242), 201–220. DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/sre.1991.31.242.201>

Korittke, N. (1990). Influence of Horizontal Refraction on the Traverse Measurements in Tunnels with Small Diameters. *Proceedings of the second international workshop on accelerator alignment*. Hamburg, Germany (str. 315–331). Deutsches Elektronen Synchrotron DESY. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.495.9696&rep=rep1&type=pdf>, pridobljeno 14.

11. 2017.

Leica. (2017). Leica TS30, Angle measurement. <http://hds.leica-geosystems.com/en/77873.htm>, pridobljeno 14. 11. 2017.

Macarol, S. (1978). Praktična geodezija. Zagreb: Tehnička knjiga.

Paroscientific. (2017). DigiQuartz® Broadband Barometers. [http://lemi.pl/www\\_pdf/ALTHEN/baroStds\\_EN03.pdf](http://lemi.pl/www_pdf/ALTHEN/baroStds_EN03.pdf), pridobljeno 14. 11. 2017.

Redovniković, L., Džapo, M., Kapović, Z. (2011). Ispitivanje utjecaja bočne refrakcije na merjenja horizontalnih pravaca u tunelu. Geodetski list, 65 (88) (3), 241–259. <http://hrcak.srce.hr/77844>

Redovniković, L., Ališić, I., Luketić, A. (2013). Influence of lateral refraction on measured horizontal directions. Survey Review, 45 (331), 285–295.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1752270612Y.0000000037>

Schwarz, W. (1997). Concept for the Alignment of the planned Linear Collider at DESY. V: H. Friedsam (ur.), Accelerator alignment. Proceedings of the 5th International Workshop, IWAA97 October 13–17, 1997, Argonne USA (str. 1–10). <http://www.slac.stanford.edu/econf/C971013/papers/029.PDF>, pridobljeno 14. 11. 2017.

SSKJ. 2014. <http://www.fran.si/iskanje?View=1&Query=refrakcija>, pridobljeno 14. 11. 2017.

Testo (2017). Testo 110 – 1 Channel NTC Thermometer. <http://www.testolimited.com/testo-110-1-channel-ntc-thermometer>, pridobljeno 14. 11. 2017.

Turk, G. (2011). Verjetnostni račun in statistika. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta

za gradbeništvo in geodezijo.

Velasco-Gómez, J., Prieto, J. F., Molina, I., Herrero, T., Fábrega, J., Pérez-Martín, E. (2016). Use of the gyrotheodolite in underground networks of long high-speed railway tunnels. Survey Review, 48 (350), 329–337.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1179/1752270615Y.0000000043>

Wilhelm, W. (1993). Empirische Bestimmung der Seitenrefraktion an 10 Objekten in der Praxis. Issue 219 of Bericht. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie.

Wilhelm, W. (1994). Die Seitenrefraktion: Ein unbeliebtes Thema? Oder ein Thema nur für Insider? Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik = Mensuration, photogrammétrie, génie rural, 92 (2), 75–82.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5169/seals-235045>



Cergol K., Ambrožič T. (2018). Vpliv bočne refrakcije na merjenje horizontalnih smeri. Geodetski vestnik, 62 (2), 188–200. DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2018.02.188-200

**Katja Cergol, dipl. inž. geod.**  
Škocjan 32a, SI-6000 Koper  
e-naslov: [cergol.katja@gmail.com](mailto:cergol.katja@gmail.com)

**Izr. prof. dr. Tomaž Ambrožič, univ. dipl. inž. geod., univ. dipl. inž. rud.**

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo  
Jamova cesta 2, SI-1000 Ljubljana  
e-naslov: [tomaz.ambrozic@fgg.uni-lj.si](mailto:tomaz.ambrozic@fgg.uni-lj.si)