INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr II/2/2014, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 585–598
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

DOI: http://dx.medra.org/10.14597/infraeco.2014.2.2.043

INNOWACYJNA METODA ELIMINACJI REFRAKCJI HORYZONTALNEJ W TUNELOWEJ SIECI REALIZACYJNEJ

Henryk Bryś[1], Zbigniew Siejka[2], Edward Osada[3]
Politechnika Krakowska[1], Uniwersytet Rolniczy w Krakowie[2], Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu[3]

INNOVATIVE METHOD OF ELIMINATION HORIZONTAL REFRACTION IN GEODETIC NETWORK IN TUNNELS

Streszczenie

W pracy przedstawiono problem systematycznego wpływu niejednorodnego ośrodka pomiarowego na rezultaty wyznaczania azymutów oraz przenoszenia współrzędnych w geodezyjnej realizacyjnej sieci tunelowej. Zaprezentowano koncepcję wyrównania sieci modularnej z równoczesną eliminacją efektów refrakcji poziomej oraz przykład obliczeń. Automatyczne tachimetry oraz wyniki precyzyjnych pomiarów kątowych i odległości umożliwiają efektywne etapowe wyrównywanie sieci liniowo-kątowej w trakcie drążenia tunelu. Efektem innowacyjnych grupowych wyrównań sieci realizacyjnej są współrzędne sieci oraz eliminacja występujących a nieznanych cząstkowych kątów refrakcji. Przedstawione zostaną dotychczas osiągnięte wyniki badań oraz uzyskiwanych prognoz elipsy błędów dla długich sieci tunelowych.

Słowa kluczowe: tyczenie tunelu, pozioma sieć tunelowa z trawersami, wyrównanie etapowe, przenoszenie azymutu, eliminacja refrakcji poziomej

Summary

The paper presents the problem of systematic influence of homogeneous environment on the results of precise azimuth and coordinates transferring in long geodetic networks for tunnels. A concept of exact solution of

geodetic network for minimization of refraction effect as well as a calculation example is presented. The development of robotic total stations allows for effective refraction angles adjustment directly during measuring in tunnels. Innovative, group adjustment of traverse deviations in local geodetic network allows for reliable control of directional angles transferring. Results of the research and predictions of traverse displacement of coordinates in the elongated, local and unilateral tunnel networks are presented.

Key words: *tunneling, traverse horizontal network, phase adjustment, direction angle propagation, elimination of the horizontal refraction*

WPROWADZENIE, POSTAWIENIE PROBLEMU I CEL BADAŃ

Podczas pomiarów optycznych i laserowych w długich tunelach promień celowej ulega następującym, wzajemnie powiązanym ze sobą zjawiskom fizycznym:

- ekstynkcji, czyli osłabieniu światła przez absorbcję i rozproszenie,
- zmianom propagacji fali świetlnej,
- fluktuacji, tzn. krótkotrwałym zmianom położenia plamki laserowej,
- refrakcji geodezyjnej – załamaniu wiązki świetlnej przy przechodzeniu przez ośrodki o zmiennej gęstości optycznej.

Geometria promienia celowej, a w szczególności jego jednostronne załamanie – refrakcja pozioma, ma fundamentalne znaczenie podczas wyznaczania azymutu lub kąta kierunkowego w trakcie wytyczania osi tunelu. Lokalne warunki ośrodka pomiarowego tunelu, jak: niejednorodne pole gradientów temperatury powietrza atmosferycznego, wilgotność i prądy powietrza, spaliny, pył kamienny, ciemność, wstrząsy, wibracje i in., powodują istotne zakłócenia w przebiegu fal świetlnych oraz w pomiarach katów i odległości, a w efekcie obniżają w istotny sposób dokładność wyników obserwacji geodezyjnych. Szczególny wpływ na precyzyjne wyznaczanie kierunku ma refrakcja horyzontalna wywoływana dużymi gradientami temperatury powietrza w bliskim sąsiedztwie ścian tunelu, których wartość dochodzić może nawet do ponad 2K. Temperatura skał pod Alpami wynosi do 50 K na głębokości 1000 m. Od kilkudziesięciu lat prowadzone są szczegółowe badania teoretyczne i experymentalne dla opracowania alternatywnych strategii minimalizacji wpływu refrakcji (Beluch J., 1990, Beluch J., Bryś H., 2010, Fowler S., 2006, Hennes M., 1998, Hennes M., Böckem B., Flach Ph., 1998, Heister H., 1997, Korrittke N., 1992, Wilhelm W., 1993). Problem ten jest nadzwyczaj istotny w przypadku długich (do ponad dwudziestu kilometrów), realizacyjnych sieci tunelowych. Najdłuższymi aktualnie tunelami świata są: SEIKAN-TUNEL – 53,850 km (Japonia),

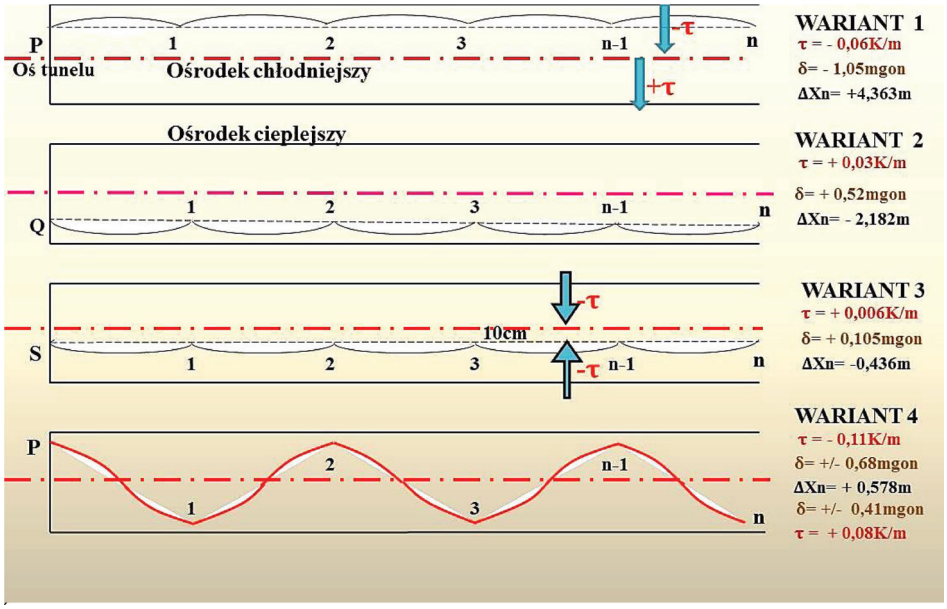
rys.1, EUROTUNEL – 49,940 km (kanał La Manche) oraz GOTTHARD-BASI-STUNNEL – 57,00 km (Szwajcaria).

Źródło: https:// www.google.pl/search?q=seikan+tunnel&oq=seikan&aqs
Source: https:// www.google.pl/search?q=seikan+tunnel&oq=seikan&aqs

Rysunek. 1. Japoński tunel kolejowy Seikan łączący wyspy Honsiu i Hokkaido
Figure 1. Japan Seikan rail tunnel linking the islands of Honshu and Hokkaido

Uogólniona analiza efektów refrakcji poziomej na podstawie ścisłych wzorów autorów (Beluch J., Bryś H., 2000), dla przyjętego dla całej długości tunelu, realistycznego i stałego poprzecznego gradientu temperatury 0,1 K/m wykazała dla 12 km, odchylenie kierunku wynoszące 6,62 m. Wymagane aktualnie dokładności przebitki w kierunku poprzecznym nie mogą przekraczać wartości od 1 do 2 cm/km. Powyższe dane potwierdzają jednoznacznie wagę i znaczenie problemu negatywnego wpływu refrakcji podczas prac realizacyjnych. W fundamentalnej publikacji autor (Korritke N., 1992) donosi o uzyskanej w trakcie tyczenia EUROTUNELU różnicy sumy kątów wierzchołkowych wyznaczanych teodolitem i giroteodolitem wynoszącej 47,0 mgon/2800 m, co odpowiada odchyleniu poprzecznemu +1,11 m w kierunku osi tunelu. Podczas kampanii pomiarowej w marcu 1989, w poligonie o przebiegu „wężykowatym", autor stwierdza wystąpienie na 6,487 km odchyłki poprzecznej wynoszącej + 1,052 m. Kolejne kontrolne pomiary poligonowe wykonane ściśle w osi drążonego tunelu wykazały w dalszym ciągu niespodziewaną odchyłkę liniową

+ 0,521 m/13,85 km (Korrittke N., 1997). W efekcie zmieniono koncepcję pomiarów geodezyjnych i wprowadzono dodatkowe, czasochłonne obserwacje azymutów astronomicznych GYROMATEM 3000 dla średnio co 6-go boku ciągu poligonowego, celem wyznaczania korekcji dla kierunków poziomych. Na rys.2 przedstawiono wyniki analizy wpływu zjawiska refrakcji poziomej na wartość odchylenia kierunku dla alternatywnych przypadków usytuowania ciągów poligonowych oraz dla różnych gradientów temperatury w tunelu o długości 12,600 km oraz dla długości boków poligonu 600 m.



Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 2. Efekty wpływu refrakcji horyzontalnej dla 4 wariantów lokalizacji i przebiegu ciągów poligonowych w tunelu dla następujących danych: L=12,600 km – długość ciągu, D=600 m – długości boków ciągu oraz τ – poziomy gradient temperatury powietrza prostopadły do ściany wyrobiska, δ – cząstkowy kąt refrakcji poziomej, ΔX_n – odchylenie poprzeczne w kierunku osi tunelu

Figure 2. The effects of horizontal refraction for 4 variants of the location and the course traverses the tunnel for the following data: L = 12.600 km – length of the string, D = 600 meters – the length of the sides over and τ – horizontal air temperature gradient perpendicular to the walls of the excavation, δ – partial angle refractive horizontal ΔXn – deviation in the direction transverse axis of the tunnel

Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 3. System konstrukcji sieci geodezyjnych dla realizacji drążenia długich tuneli
Figure 3. The design of geodetic networks for the implementation of drill long tunnels

Jak wynika z powyższych danych, zarówno analizy teoretyczne, jak również wyniki geodezyjnych pomiarów długich osnów poligonowych potwierdzają występowanie znaczących systematycznych wpływów refrakcji na wartości odchyłek współrzędnych, znacznie przekraczające wymagania dokładnościowe stawiane współczesnym pomiarom tunelowym.

Minimalizację efektu refrakcji poziomej przy wyznaczaniu kąta kierunkowego/azymutu oraz istotne podniesienie dokładności współrzędnych punktów osnowy realizacyjnej uzyskać można aktualnie następującymi sposobami:

- Poprzez pomiary kontrolne azymutów astronomicznych giroteodolitami najnowszej generacji (GIROMAT 5000) z odchyleniem standardowym 0,8 mgon (wewnętrznym) i 1,7 mgon (odchylenie standardowe zewnętrzne) oraz wprowadzanie odpowiednich korekcji do pomierzonych lub wytyczanych kierunków. Jest strategią pomiarową aktualnie najczęściej stosowaną w pracach geodezyjnych przy tyczeniu długich

tuneli, ale skuteczna na odcinkach sieci podziemnej dopiero od 1,5 do 2,0 km.
- Wprowadzenie poprawek fizykalnych do pomierzonych kątów/kierunków. Metoda praktycznie możliwa jedynie podczas badań eksperymentalnych. Wymaga dużego nakładu pracy.
- Zastosowanie odpowiednio zaprojektowanych konstrukcji sieci geodezyjnych oraz ścisłe wyrównanie wyników pomiarów i współrzędnych punktów osnowy. Wspomagające pomiary kontrolne giroteodolitem. Metoda aktualnie optymalna i powszechnie stosowana.
- Pomiar kątów poziomych osnowy DYSPERSOMETRAMI, tj. tachimetrami elektronicznymi wyposażonymi w dwu – lub trójbarwne fale nośne. Instrumenty te są aktualnie używane jako prototypy w badaniach laboratoryjnych oraz w pomiarach doświadczalnych.
- Równoczesne stosowanie kombinacji kilku sposobów minimalizacji wpływów refrakcji, które często realizowane jest w pomiarach tunelowych.

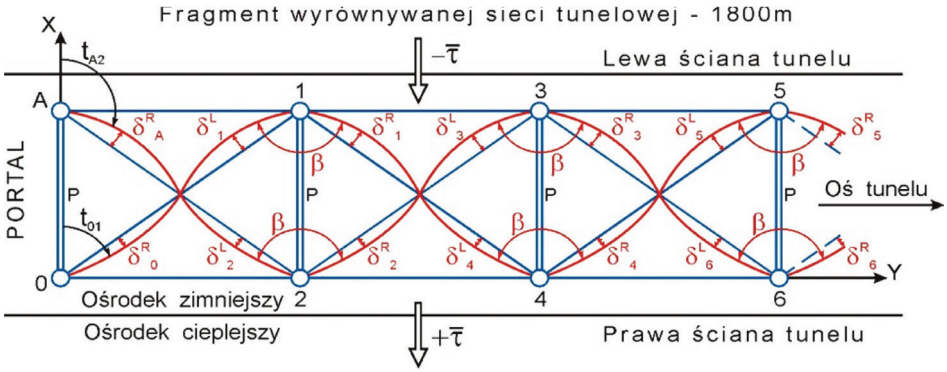
Realizacja współczesnej tunelowej sieci poziomej dla dwustronnego drążenia tunelu wymaga jej dowiązania do nadrzędnych sieci portalowych utworzonych na bazie statycznych pomiarów satelitarnych, co przedstawiono poglądowo na rys. 3.

Autorzy prezentują w pracy wyniki teoretycznych badań nad innowacyjną metodą etapowego wyrównania symetrycznej sieci realizacyjnej z poprzeczkami (trawersami), przy założeniu nieznajomości niesymetrycznie występujących cząstkowych kątów refrakcji poziomej podczas procesu pomiarowego. Celem przeprowadzonych wyrównań współrzędnych sieci na podstawie symulacyjnych danych kątów poziomych oraz odległości boków było wykazanie, że eliminacja systematycznego wpływu refrakcji w poziomych osnowach tunelowych jest w pełni realna.

INNOWACYJNA LINIOWO-KĄTOWA SIEĆ TUNELOWA Z TRAWERSAMI

Tradycyjne, pojedyncze i podwójne, jednostronnie dowiązane ciągi poligonowe – prostoliniowe oraz wężykowate, stanowią od dawna krytycznie oceniane osnowy poziome dla realizacji pomiarów tunelowych z powodu braku jakiejkolwiek kontroli zamknięć sumy kątów wierzchołkowych. Są one najprostszymi, ale obecnie wyjątkowo stosowanymi osnowami tunelowymi. Aktualnie najczęściej stosowanymi konstrukcjami sieci realizacyjnych są różne kombinacje sieci liniowo-kątowych. Autorzy prezentują hybrydowo-modularny model specjalnej sieci skonstruowanej z krzyżujących się ciągów poligonowych

z dodatkowymi odcinkami – trawersami oraz osnowami poligonowymi wzdłuż ociosów bocznych (ścian wyrobiska) tunelu. Jak wykazały rezultaty wyrównań modelowych, prezentowany wariant zoptymalizowanej sieci liniowo-kątowej stanowi konstrukcję osnowy charakteryzującą się niemal całkowitą eliminacją cząstkowych kątów refrakcji horyzontalnej. Zasada ścisłego wyrównania współrzędnych sieci symulacyjnej polega na grupowych, kolejno po sobie następujących wyrównaniach etapowych, od portalu do frontu drążonego tunelu. Wyrównanie wykonywane jest autorskim programem komputerowym **ReTuNetz** na bazie programu MATHCAD 14. Cały odcinek rozbudowywanej stopniowo osnowy tunelowej dzielony zostaje na n równych części (w prezentowanym przykładzie obliczeniowym 1800 m), wyrównywanych sukcesywnie w miarę postępu prac drążeniowych.



Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 4. Fragment konstrukcji poziomej hybrydowej sieci tunelowej z przebiegiem zdeformowanych celowych w niejednorodnym polu refrakcyjnym
Firure 4. A part of the horizontal structure of the hybrid network tunnel to the course of the deformed targeted in a heterogeneous field of refractive

Po każdym wyrównaniu etapowym otrzymujemy współrzędne punktów sieci-trawersów będącymi podstawą do dalszej realizacji zadań geodezyjnych czyli wytyczania roboczych punktów sieci jako stanowisk swobodnych z zastosowaniem zmotoryzowanych TOTAL STATION. Ze stanowisk tych następuje stałe pozycjonowanie kierunku na monitorze układu sterującego kombajnu drążącego TBM (Tunnel-Bohring-Machine) oraz kontrola parametrów geometrycznych prawidłowego drążenia wyrobiska tunelu – w poziomie oraz w pionie.

Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 5. Pomiary laserowe z punktów pomocniczych sieci realizacyjnej w trakcie kierowania układem sterującym maszyny drążącej TBM
Figure 5. Laser measurements of network realization auxiliary points during the drive control system TBM tunnel boring machine

ALGORYTM WYRÓWNANIA TUNELOWEJ SIECI HYBRYDOWEJ ORAZ PRZYKŁAD OBLICZEŃ

Funkcjonalny model etapowego wyrównania prezentowanej sieci tunelowej z efektywną eliminacją cząstkowych kątów refrakcji wg. zasady Minimum Kwadratów Summy Poprawek opracowano na podstawie poniższego algorytmu w zapisie macierzowym:

$$\boldsymbol{v} \coloneqq \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{l} \qquad Wektor\ poprawek\ niewiadomych \qquad (1)$$

$$\boldsymbol{N} \coloneqq \boldsymbol{A^T PA} \qquad Macież\ równań\ normalnych \qquad (2)$$

$$\boldsymbol{Q} \coloneqq \boldsymbol{N^{-1}} \qquad Macież\ odwrotnosci\ wag \qquad (3)$$

$$\boldsymbol{n} \coloneqq \boldsymbol{A^T Pl} \qquad Wektor\ wyrazów\ wolnych\ (P - waga\ obserwacji) \qquad (4)$$

$$\boldsymbol{x} \coloneqq -\left(\boldsymbol{A^T P A}\right)^{-1} \boldsymbol{A^T P l} \quad \textit{Wektor niewiadomych} - \textit{resultaty wyrównania} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{C_X} \coloneqq \left(\boldsymbol{A^T P A}\right)^{-1} \ \boldsymbol{i} \coloneqq \mathbf{1,2} \quad \textit{Macież kowariancji z wyrównanych współrzednych punktów sieci i kątów refrakcji} \tag{6}$$

$$\boldsymbol{A^T P v} \quad \textit{Kontrola wyrównania} \tag{7}$$

$$\boldsymbol{S_0} = \sqrt{\boldsymbol{v^T P v}/\boldsymbol{n-u}} \quad \textit{Odchylenie standardowe obserwacji o wadze } p = 1 \tag{8}$$

$$\boldsymbol{S_{l_i}} = \boldsymbol{S_0} \cdot \sqrt{\boldsymbol{Q_{l_i l_i}}} \quad \textit{Odchylenie standardowe obserwacji po wyrównaniu} \tag{9}$$

$$\textit{gdzie: } \boldsymbol{Q_{l_i l_i}} = \boldsymbol{A Q A^T} \quad n - \textit{ilość obserwacji}, u - \textit{ilość niewiadomych}$$

$$n - u = r \ - \ \textit{ilość obserwacji nadliczbowych}$$

$$|\mathbf{v_i}| \leq \mathbf{k} \cdot \boldsymbol{S_0} \quad \mathbf{k} \coloneqq \mathbf{1,2} \quad \text{Test standaryzowanych poprawek} \tag{10}$$

$$\boldsymbol{S(t)^2} = \boldsymbol{S_{X_i}^2} \cdot \boldsymbol{cos(t)^2} + \boldsymbol{S_{X_i Y_i}} \cdot \mathbf{sin(2t)} + \boldsymbol{S_{Y_i}^2} \cdot \boldsymbol{sin(t)^2} \tag{11}$$

Równanie (11) opisuje krzywą błędu położenia punktu względnej elipsy błędów o półosiach A i B w dowolnym kierunku kąta kierunkowego lub azymutu *t*.

Równanie to umożliwia wyznaczanie zależnych od kierunku odchyłek pomiaru. Dla kątów kierunkowych $t_A = 0{,}^g0000$ oraz t_B=$100{,}^g0000$, otrzymujemy dla półosi A i B względnej elipsy błędów – nieskalowanej (Rys.3), $A = S(t)_A = S_Q \ \ i \ \ B = S(t)_B = S_L$,gdzie:.$S_Q \ i \ S_L$ oznaczają wektory radialne względnej krzywej błędów (11).

Wyniki wyrównań etapowych uważa się za prawidłowe, jeżeli spełniony zostanie warunek: $S_0 \cong 1{,}0$, z ewentualną tolerancją nie przekraczającą 10%.

Dla wyrównań testowych kolejnych fragmentów sieci tunelowej przyjęto następujące realistyczne dane pomiarowe, odchylenia standardowe oraz wartości cząstkowych kątów refrakcji horyzontalnej:

$L = 1800{,}000\ m$ – Długość fragmentu sieci symulacyjnej

$D = 600{,}000\ m$ – Długość boków osnowy

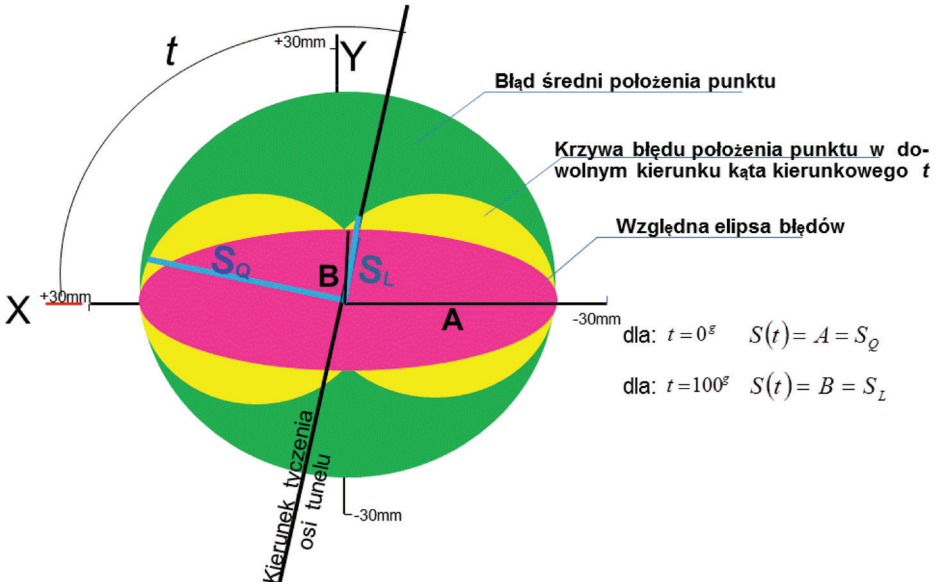
$p = 5{,}000\ m$ – Długość trawersu

$\beta = 198{,}^g9380$ – Kąty załamania (wierzchołkowe)

$t_{A2} = 100^g_{,}5305$ – Wyjściowy kąt kierunkowy nawiązania sieci tunelowej

$S_{t_{A2}} = 0{,}2\ mgon\ ,\quad S_\beta = 0{,}2\ mgon,\quad S_D = 1{,}0\ mm,\quad S_p = 1{,}0\ mm$

$\delta = od\ 0{,}2\ mgon\ \ do\ \ 0{,}8\ mgon$ – cząstkowe kąty refrakcji horyzontalnej.



Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 6. Graficzny obraz krzywych charakteryzujących odchyłki punktów sieci tunelowej po wyrównaniu
Figure 6. Graphic image of curves characterizing the deviation of the tunnel network points after adjusting

Oddzielna analiza odchyłek systematycznych oraz błędów przypadkowych sieci tunelowej pozwala na oszacowanie wpływu refrakcji na kąty kierunkowe oraz na współrzędne X dla całej wyrównanej sieci hybrydowej oraz dla osnowy w postaci „wężykowatych" ciągów poligonowych (O, 1, 4, 5, … n oraz A, 2, 3, 6, … n). Odchylenia poprzeczne końcowej współrzędnej X dla „wężykowato" przebiegającego ciągu poligonowego (rys. 4) bez wyrównania wyliczamy z poniższego wzoru w mierze łukowej (Beluch J., Bryś H., 2000):

$$Q_{P_n} = \Delta Y_{An} \cdot \left|\delta_A^R\right| - \Delta Y_{2n} \cdot \left|\delta_2^L + \delta_2^R\right| + \Delta Y_{3n} \cdot \left|\delta_3^L + \delta_3^R\right| - \Delta Y_{6n} \cdot \left|\delta_6^L + \delta_6^R\right| + \cdots \ldots \ldots \ldots \pm$$
$$\pm \Delta Y_{(n-1)n} \cdot \left|\delta_{(n-1)n}^L + \delta_{(n-1)n}^R\right| \qquad (12)$$

Dla oceny minimalizacji systematycznych wpływów refrakcyjnych w realizowanej tunelowej sieci modularnej autorzy proponują stosowanie następującego kryterium niezawodności zewnętrznej:

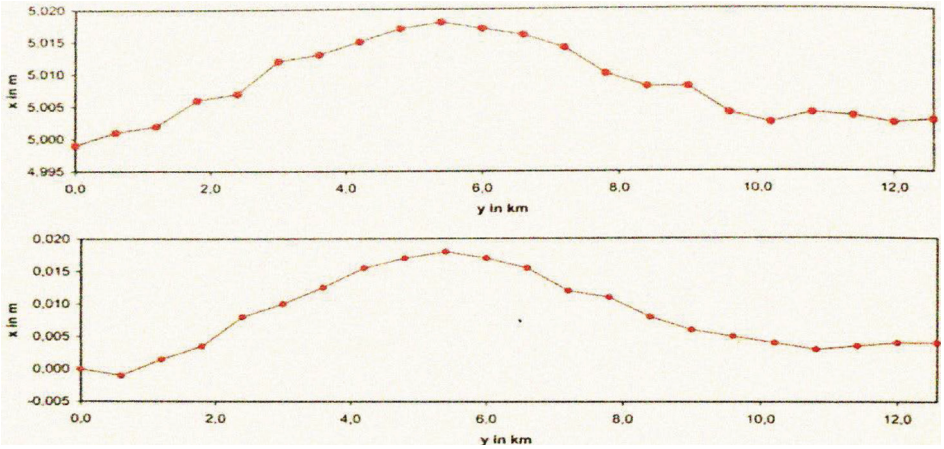
$$Z_i = 1 - S_X^2 / Q_{PM}^2 \tag{13}$$

gdzie:

S_X – odchylenie standardowe współrzędnej X po wyrównaniu etapowym

Q_{PM} – uśrednione odchylenie współrzędnej X punktu z dwóch ciągów poligonowych

Wzrost wartości *Z* wraz z długością fragmentu sieci oznacza wzrost jej niezawodności, jak również stopnia skuteczności minimalizacji wpływu refrakcji na wyznaczane współrzędne X.



Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Rysunek 7. Wykresy odchyłek poprzecznych punktów sieci usytuowanych wzdłuż lewej (góra) i prawej (dół) strony tunelu po ostatecznym wyrównaniu sieci hybrydowej dla L=12,600 km

Figure 7. Charts transverse displacements network points located along the left (top) and right (bottom) side of the tunnel after the final alignment of the hybrid network for L = 12.600 km

Szczegółowe wyniki kolejnych wyrównań etapowych przestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie wyników wyrównań symulacyjnych, obliczeń odchyłek dla modelowej tunelowej sieci hybrydowej oraz prognoz przebitki
Table 1. Summary of the results of any adjustments to the simulation, calculation of displacement of tunnel hybrid network model and forecasts preprints

Odcinek sieci	Długości: Odcinka sieci Boku sieci D [m]	Symulowane Kąty refrakcji δ [mgon] Ściana lewa	Ściana prawa	Numer punktu sieci	Wyrównane współrzędne X Xśr - trawersów [m] Współczynnik niezawodności zewnetrznej WNZ	Odchylenia standardowe: Sx So PROGNOZY przebitki dla t=100,0000 SQ SL [mm]	Odchylenia poprzeczne bez wyrównania refrakcji Qp [mm]	Uśredniony kąt po wyrównaniu t [gon]	Różnice kątów kierunkowych PO wyrównani Δt [mgon]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
A	1800/600	0,4	0,2	8 7	+5,001 -0,001 +2,500 0,4403	7,6 1,00 7,5 1,1	+11,3 +5,5	99,9998	-0,8
A+B	3600/600	0,4 0,6	0,2 0,4	13 14	+5,011 +0,011 +2,511 0,4467	17,4 1,01 17,4 1,5	+32,1 +35,8	99,9998	-0,6
A+B+C	5400/600	0,4 0,6 0,8	0,2 0,4 0,6	20 19	+5,025 +0,025 +2,525 0,6160	29,3 1,07 29,3 1,8	+81,1 +71,5	99,9999	-1,6
A+B+C+D	7200/600	0,4 0,8 0,6 0,8	0,2 0,4 0,6 0,6	25 26	+5,015 +0,014 +2,514 0,6819	43,1 1,07 43,1 2,1	+133,9 +137,1	100,0003	-1,7
A+B+C+D +E	9000/600	0,4 0,8 0,6 0,8 0,8	0,2 0,6 0,4 0,6 0,6	32 31	+5,011 +0,009 +2,510 0,7238	58,6 1,04 58,6 2,4	+216,7 +207,6	100,0001	-3,6
A+B+C+D +E+F	10800/600	0,4 0,8 0,6 0,8 0,8 0,8	0,2 0,6 0,4 0,6 0,6 0,6	37 38	+5,004 +0,003 +2,504 0,7575	75,6 1,09 75,5 2,6	+312,6 +310,2	100,0001	-2,8
A+B+D+E +F+G	12600/600	0,4 0,8 0,6 0,8 0,8 0,8 0,8	0,2 0,6 0,4 0,6 0,6 0,6 0,6	43 44	+5,003 +0,004 +2,504 0,7782	94,1 1,05 94,0 2,8	+435,6 +411,9	99,9999	-4,8

Źródło: Badania własne
Source: Own calculation

Analiza wyników ścisłego wyrównania zoptymalizowanej sieci tunelowej (rys. 4) wykazała jednoznacznie, że możliwa jest skuteczna eliminacja zjawiska niesymetrycznej refrakcji poziomej wywołanej niejednorodnym polem temperatury. Odchyłka ostatniej współrzędnej X sieci (Tabela 1, kolumna 6, D=12,600 km) wynosi 4 mm i jest znikomo mała w stosunku do prognozowanej wartości półosi A względnej elipsy błędów SQ = 94 mm. Natomiast średnia odchyłka poprzeczna końcowych punków niewyrównywanych „wężykowatych" ciągów poligonowych wynosi +423.75 mm (Tabela 1, kolumna 8) i znacznie przekracza wymagania dokładnościowe stawiane wartościom prognozy przebitki tunelowej realizowanej technikami i technologiami najnowszej generacji.

WNIOSKI KOŃCOWE I ZALECENIA

1. Niejednorodne pole refrakcyjne występujące w ośrodku pomiarowym tunelu w bezpośreniej bliskości ścian wywołuje systematyczne odchylenia kierunku, które wynosić mogą nawet 11,7 mgon/400 m, co odpowiada odchyłce poprzecznej 74 mm.
2. Analizy wykazały, że największy wpływ na odchylenia poprzecze współrzędnej X końcowych punktów sieci wywołują efekty refrakcyjne na pierwszych kierunkach boków osnowy poziomej, tuż na portalem. Fakt ten ma fundamentalne znaczenie w planowaniu, projektowaniu i modyfikacji geometrii sieci oraz w strategii minimalizacji wpływu zjawiska refrakcji horyzontalnej przy wykonywaniu precyzyjnych pomiarów kątowych oraz przenoszeniu kąta kierunkowego/azymutu.
3. Proponowany w pracy wariant modularnej sieci tunelowej z poprzeczkami, dzięki dużej ilości elementów nadliczbowych, charakteryzuje się wyższą niezawodnością wewnętrzną i zewnętrzną oraz istotną minimalizacją wpływu refrakcji poziomej.
4. Precyzyjne wytyczanie kąta kierunkowego lub azymutu o dokładności submilimetrowej uzyskujemy aktualnie stosując tachimetry zmotoryzowane z automatycznym śledzeniem pryzmatów na punktach sieci oraz specjalistycznemu oprogramowaniu np. ***SmartWorx*** – Programy standardowe*:* ***RoadRunner Tunnel – LEICA GEOSYSTEMS.***
5. Prezentowana w pracy metodyka wyrównania etapowego poziomej sieci modularnej ze skuteczną eliminacją zjawiska refrakcji jest alternatywą dla tradycyjnych metod realizacji tunelowych osnów realizacyjnych specjalnego przeznaczenia.
6. Jeżeli potwierdzone zostaną wyniki badań modelowych sieci modularnych w praktyce tyczenia tuneli, to wykonywanie czasochłonnych pomiarów azymutów astronomicznych z odchyleniem standardowym „zewnętrznym" wynoszącym 1,7 mgon oraz wprowadzanie koniecznych korekt kierunków stanie się, jako nieekonomiczne zbędne.

LITERATURA

Beluch, J. (1991). *Chains of elongated figures as control networks in mines and tunnels. Applications of Geodesy to Engineering*, Symposium No 108, Springer Verlag, Stuttgart.

Beluch, J., Bryś, H. (2000). *Minimisation of the effect of horizontal refraction on the accuracy of breaking through in underground drivages. 11th International Congress of the International Society of Mining Surveying*, Cracow, Poland, September 2000, Vol.1.

Fowler, S. (2006). *Design and preanalysis of underground control networks for tunnnel construktion. Dissertation,* University of Otago, Dunedin, New Zealand.

Hennes, M. (1998). *Zum Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder auf die Verschwenkung offener Polygonzüge am Beispiel des Tunnelvortriebs*. Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Mitteilungen Nr.65.

Hennes, M., Böckem, B., Flach, Ph. (1998). *Recent Developments for Refraction Free Optical Measurements*. Paper to FIG, XXI International Congress, Brighton, 19.-26. Juli.

Heister, H. (1997). *Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau*. IX. Int. Geodätische Woche, Obergurgl. In: Institutmitteilungen Heft 17, Fachvorträge, Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie.

Korittke, N. (1992). *Horizontalrefraktion in langen Tunneln*. XI. Int. Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, Band 2, Paper IV/4, Dümmler Verlag, Bonn.

Korittke, N. (1997). *Zur Anwendung hochpräziser Kreiselmessungen im Bergbau und Tunnelbau*. DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Nr. 65, Essen.

Wilhelm, W. (1993). *Empirische Bestimmung der Seitenrefraktion an 10 Objekten der Praxis*. Bericht 219, IGP, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.

Prof. dr hab. inż. Henryk Bryś
Politechnika Krakowska
Instytut Geotechniki
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
E-mail: hbrys@pk.edu.pl
tel. kom: 603 468 077

Dr inż. Zbigniew Siejka
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
ul. Balicka 253a, 30-198 Kraków
E-mail: rmsiejka@cyf-kr.edu.pl

Prof. dr hab. inż. Edward Osada
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu
Instytut Geodezji i Informatyki
ul. Grunwaldzka 53
E-mail: edward.osada@pwr.wroc.pl