

Zur Problematik der Minimierung des Einflusses der Horizontalrefraktion in Tunnel-Vortriebs-Lagenetzen

Józef Beluch, Henryk Bryś

Vorliegender Beitrag stellt die Problematik der systematischen Einwirkung der Seitenrefraktion und deren Minimierung/Eliminierung in unterirdischen Tunnel-Netzen vor. Es werden mathematische Formeln für die Ermittlung der partiellen Refraktionswinkel und von linearen Refraktionseffekten im inhomogenen Temperaturfeld des Tunnels präsentiert und Berechnungsbeispiele dargestellt. Für verschiedene Modell-Varianten von Vortriebskontrollnetzen werden die Querauslenkungen der X-Koordinaten aufgrund einer strengen funktionalen Netzausgleichung bestimmt und die fast völlige Eliminierung der refraktiven Einwirkungen in den analysierten Netzarten bewiesen. Die Resultate der theoretischen Forschungen der Refraktions-einfluss-Prognosen für untersuchte Netz-Varianten sind kurz dargestellt und diskutiert.

1 Einleitung und Problemstellung

Mikroklimatische und meteorologische Bedingungen, Luftturbulenzen, atmosphärische Störeinflüsse und Refraktionsprobleme spielen bei optischen Vermessungen, nach wie vor, eine besonders negative Rolle. Die refraktiven Einwirkungen auf die horizontalen Winkelmessungen verursachen den entscheidenden genauigkeitsmindernden Faktor bei der Ausführung von Messaufgaben für den unterirdischen Netzteil eines Tunnelbauwerks. Das betrifft vornehmlich die Stollen, Auto-, Eisen- und U-Bahnen, Vermessung von Linearbeschleunigern u.a. Tunnel und Stollen verlaufen nicht unbedingt geradlinig. Es treten oft Kreisbögen, Korbbögen und Klotoiden in Kehr-, Spiral- und Kreiskehrtunneln auf. Bei der Vermessung von Linearbeschleunigern sind Komponenten mit einer Standardabweichung von 0,5 mm quer zur Strahlrichtung und 0,2 mm in der Höhe als Nachbargenauigkeit über einen Entfernungsbereich von ca. 600 m genau auszurichten (SCHWARZ 2006). Bei der Realisierung von ausgedehnten Untertage-Netzen handelt es sich um die Aufgabe, eine geometrisch definierte räumliche Achse und diverse Bauteile höhen- und lagemäßig im Tunnelin-

neren abzustecken. Das Problem gilt besonders für spezielle, sehr lange unterirdische Tunnelnetze, wo die Refraktionseffekte seit Einführung der Optoelektronik in den Gerätebau bei gleichzeitiger Automatisierung des Messprozesses durch Einflüsse des Messungsmediums immer stärker in Erscheinung treten. Durch Refraktionserscheinungen im Tunnelinneren können Richtungsfehler bis zu 10,0 mgon auftreten. Auf diese Erscheinungen ist besonders zu achten (HENNECKE 1989). Experimentelle Untersuchungen der Refraktionseinwirkungen auf Richtungsmessungen einer 200 m langen Polygonzugseite im kreisbogenförmigen Tunnel haben laterale Winkelauslenkungen im Bereich von 0,5 bis 3,5 mgon ergeben (MENDEL 1976). Während Absteckungsmessungen mit Theodoliten und präzisen automatischen Vermessungskreiseln im langen Tunnel von 2800 Metern, trat eine summarische Winkelabweichung wegen Seitenrefraktion von 47,0 mgon auf (KORITKE 1992). Die Differenzen bei Richtungsmessungen können sogar Werte von bis zu 7,0 mgon erreichen (EICHHOLZ; SCHMIDT 1980). Die Steigerung der Winkelmessgenauigkeiten durch Eliminierung bzw. Minimierung der extremen Umwelteinflüsse auf die Messungen ist weiterhin eine aktuelle Frage der theoretischen und experimentellen Forschungen in der Geodäsie. Automatische hochpräzise Tachymeter erlauben heutzutage Winkelmessungen mit Standardabweichungen von 0,1 mgon. Hochauflösende Distanzmessungen können mit Millimeterbruchteilen ausgeführt werden (GEOMENSOR CR 204: $\sigma_L = 0,1 \text{ mm} + 0,1 \text{ ppm}$, MEKOMETER ME 5000: $\sigma_L = 0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm}$). Dennoch bewirken die realen Bedingungen des lokalen Mediums in langen Tunnelräumen, dass die Ergebnisse der Richtungsmessungen bei der Netzrealisierung wegen refraktiver Einflüsse nicht fehlerfrei bestimmt werden. Das entscheidende Kriterium für die Genauigkeit der Absteckung sind die Durchschlagfehler, von denen der Querfehler besonders interessant ist. Aus theoretischen Untersuchungen und in Auswertung praktischer Messungen erhält man hierfür Werte von 1 bis 3 cm/km (HENNECKE 1989). Es erhebt sich die Frage, ob eine sinnvolle Korrektur der durch die Refraktion beeinflussten Winkel überhaupt möglich ist und wie groß die linearen Effekte sind? Welchen Anteil haben die negativen Umwelteinwirkungen im gesamten Fehlerbudget der Koordinatenberechnung? Im vorliegenden Beitrag wurde für verschiedene Varianten von Netz-Modellen der systematische Einfluss der lateralen Refraktion auf die Querabweichung der X-Koordinate der Endpunkte

bis zur Ortsbrust ermittelt und diskutiert. Das oberirdische Haupt- und Mundlochnetz mit Anschlüssen wurde in dieser Bearbeitung nicht berücksichtigt.

2 Mathematische Formeln zur Bestimmung der Refraktionseffekte auf die Richtungen

Beim Durchgang elektromagnetischer Wellen durch Medien verschiedener Dichte treten stets vier miteinander verbundene markante physikalische Effekte auf:

1. Lichtstreuung,
2. Lichtschwächung,
3. Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit und
4. Richtungsablenkung – die geodätische Refraktion.

Die horizontale Komponente, die laterale Refraktion, ist bei Vortriebsmessungen eine oftmals unterschätzte systematische Einflussgröße, welcher durch entsprechende Maßnahmen begegnet werden kann (KORITKE 1997). Der systematisch anwachsende Einfluss der Seitenrefraktion auf die nacheinander folgenden Netzkoordinaten ist auf die rein geometrisch-anschauliche Art kaum zu deuten. Die vereinfachte graphische Darstellung der Geometrie des Lichtkurvenverlaufes und die partiellen Refraktionswinkel im temperaturinduzierten inhomogenen Refraktionsfeld in Tunneln sind in Abbildungen 1a und 1b schematisch dargestellt.

Die partiellen Refraktionswinkel für die parallel zur Tunnelachse und für die schräg verlaufenden Polygonzugseiten werden aus der identischen Näherungsformel

$$\delta_A[mgon] = \frac{\Delta d}{D} \sum_{i=1}^{i=N} \nabla_x^T n_i (D - y_i) \rho[mgon] \quad (1)$$

mit dem entsprechenden Vorzeichen ermittelt.

Die praktische Näherungsformel (1) wurde auf der Grundlage der bisher komplexesten Theorie der geodätischen

Refraktion von Prof. Moritz (MORITZ 1968) aufgestellt. Setzt man ein lückenloses und homogenes Refraktionsfeld mit einem konstanten, horizontalen Gradienten des Brechungsindex der Luft senkrecht zur Ziellinie voraus, folgt die Lichtbahn einem kreisbogenförmigen Wellenweg (Abb. 1a)

$$\delta_A[mgon] = \frac{1}{2} D \nabla_x^T n_K \rho[mgon] \quad (2)$$

In den Formeln bedeuten:

D – Länge der Ziellinie [m]

Δd – angenommenes Berechnungsintervall [m]

y_i – Distanz vom Netzknoten A bis zum Intervallpunkt i

N – Anzahl der Intervalle

$\rho[mgon] = 63662$

$$\nabla_x^T n_i = -81,82 \cdot 10^{-6} \frac{P}{T^2} \tau_i = -0,92 \cdot 10^{-6} \tau_i [m^{-1}]$$

– Gradient des Brechungsindex der Luft senkrecht zum Lichtwellenverlauf (BRYŚ 1995)

worin: $T = 303 \text{ K}$ – mittlere Lufttemperatur im Tunnelinneren

$P = 1030 \text{ hPa}$ – mittlerer Luftdruck

$$\tau_i = \frac{\partial T}{\partial x} \cong \frac{\Delta T}{\Delta x_{\Delta x \rightarrow 0}} \left[\frac{K}{m} \right] \quad \text{– bestimmter Lufttemperaturgradient}$$

$$\nabla_x^T n_k \text{ – konstanter Gradient des Brechungsindex der Luft } [m^{-1}]$$

Die aufgestellten Formeln (1) und (2) zur Berechnung der Refraktionseinflüsse zeigen, dass die entscheidende Größe bei der Gestaltung der Refraktionskurve der Gradient des Brechungsindex der Luft ist (BRYŚ 1995). Werden während Richtungsmessungen höchster Genauigkeit horizontale Lufttemperaturgradienten senkrecht zur Netzseite mit einem präzisen elektronischen Messgerät gemessen, können die partiellen Refraktionswinkel δ berechnet und im Ausgleichsmodell berücksichtigt werden. Ein vielfaches Bestimmen des Temperaturgradienten erlaubt die Ermittlung des Mittelwertes mit Standardabweichung von $\sigma_\tau \cong 0,05 [Km^{-1}]$ (BRYŚ 1994). Die horizontalen Temperaturgradienten in Tunneln betragen, wie praktische Untersuchungen zeigen, durchschnittlich 10,11 bis 10,41 $[Km^{-1}]$ und die vertikalen Temperaturgradienten 10,51 bis 11,01 $[Km^{-1}]$. Die Temperaturunterschiede hängen von den im Gebirge und im Tunnel herrschenden Temperaturen ab und können Werte bis zu etwa 120 K betragen (z. B. im EURO-Tunnel, ALBULA-Tunnel, GOTT-HARD-Basistunnel u.a.). Wegen zeitlicher Änderungen des inhomogenen Temperaturfeldes müssen die Richtungsbeobachtungen und die Temperaturgradientenmessungen simultan durchgeführt werden.

3 Berechnungsbeispiele

Nachstehend sollen exemplarisch die Rechnungsvorgänge kurz dargestellt werden. Setzen wir eine in 10 äquidistante Intervalle unterteilte Polygonzugseite mit der Länge von 100 m voraus. Die Berechnungsintervalle betragen also 10 m. In den Tabellen 1 und 2 sind die in Abb. 2 entsprechenden Eingabe-Daten aufgelistet.

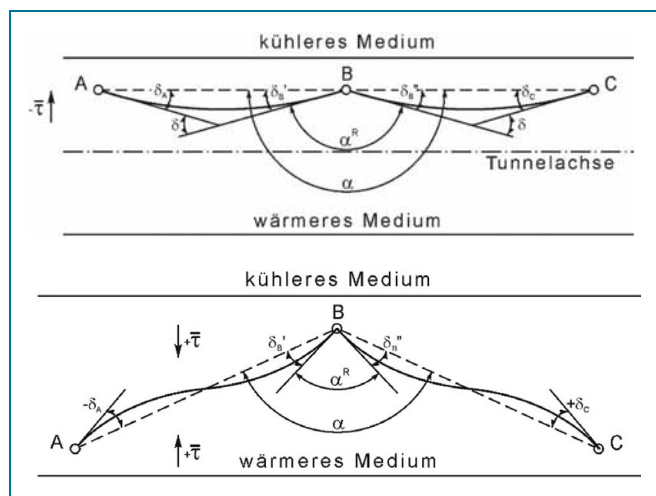


Abb. 1a und 1b: Geometrisch-anschauliche Darstellung des Lichtwellenverlaufes bei verschiedener Anordnung der Netzknoten im Tunnel (1a – Trajektorie der Lichtwellen beim parallelen Verlauf der Polygonzüge zur Tunnelwand; 1b – Trajektorie der Lichtwellen bei schräg verlaufenden Polygonzugseiten)

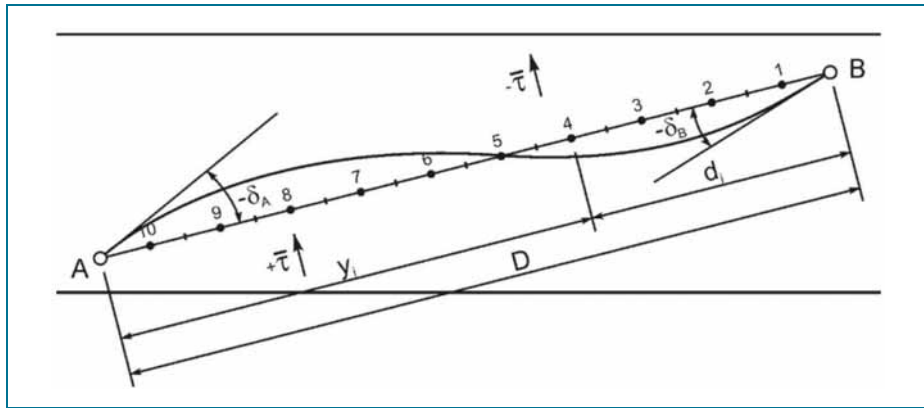


Abb. 2: Darstellung der partiellen Refraktionswinkel und der Geometrie der Refraktionskurve beim Lichtwellenverlauf längs einer schräg verlaufenden Polygonzugseite

Tabelle 1: Daten für die Berechnung des partiellen Refraktionswinkels nach Abb. 1a

Temperaturgradient-Messpunkt Nr	d_i [m]	y_i [m]	Δd [m]	τ_i [$\frac{K}{m}$]
1	5	95	10	-0,40
2	15	85	10	-0,35
3	25	75	10	-0,40
4	35	65	10	-0,40
5	45	55	10	-0,35
6	55	45	10	-0,35
7	65	35	10	-0,40
8	75	25	10	-0,40
9	85	15	10	-0,40
10	95	5	10	-0,35

Die Berechnung des Refraktionswinkels aus den Daten der Tabelle 1 ergibt $\delta_A = +1,113 \text{ mgon}$

Tabelle 2: Daten für die Berechnung des partiellen Refraktionswinkels nach Abb. 2

Temperaturgradient-Messpunkt Nr	d_i [m]	y_i [m]	Δd [m]	τ_i [$\frac{K}{m}$]
1	5	95	10	-0,40
2	15	85	10	-0,30
3	25	75	10	-0,10
4	35	65	10	0
5	45	55	10	0
6	55	45	10	0
7	65	35	10	0
8	75	25	10	+0,10
9	85	15	10	+0,30
10	95	5	10	+0,40

Die Berechnung des Refraktionswinkels aus den Daten der Tabelle 2 ergibt $\delta_A = -0,363 \text{ mgon}$

4 Summarische Einwirkung der Horizontalrefraktion auf die Querauslenkungen der Endpunkte in Polygonzügen

Die wegen Seitenrefraktion verursachte Ablenkung der letzten X-Koordinate einer geradlinigen endlichen Polygonzugstrecke wird aus der im Beitrag (BELUCH; BRYŚ 2000) hergeleiteten Gleichung

$$X_n = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R + nD\delta_P + (n-1)D(\delta'_1 + \delta''_1) + (n-2)D(\delta'_2 + \delta''_2) + \dots + D(\delta'_{n-1} + \delta''_{n-1}) \quad (3)$$

bestimmt.

Bei der Voraussetzung

$$\delta = \delta_P = \delta'_1 = \delta''_1 = \delta'_2 = \delta''_2 = \dots = \delta'_{n-1} = \delta''_{n-1}$$

und nach Summation erhält man

$$X_n = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R + n^2 D \delta = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R + nS\delta \quad (4)$$

Daraus ergibt sich die endgültige Formel für den linearen Wert des summarischen Refraktionseffektes (in Bogenmaß)

$$E_{X_n}^R = -nS\delta \quad (5)$$

Die verwendeten Bezeichnungen bedeuten:

- n – Anzahl der Polygonzugpunkte
- D – Länge der Polygonzugseite [m]
- S – Strecke des Polygonzuges [m]
- $\Delta X_{(i-1)i}^R$ – Koordinatendifferenz, belastet mit Refraktionsfehlern [m]
- δ – Partieller Refraktionswinkel [mgon]

Für einen schlängelförmig verlaufenden Polygonzug, wie in Abb. 4, gilt für die letzte X-Polygonzugskoordinate

$$X_n = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R + \Delta Y_{Pn}\delta_P - \Delta Y_{1n}(\delta'_1 + \delta''_1) + \Delta Y_{2n}(\delta'_2 + \delta''_2) - \dots \pm \Delta Y_{(n-1)n}(\delta'_{n-1} + \delta''_{n-1}) \quad (6)$$

In Gl. (6) ergibt sich für die geraden Punktnummern ein positives und für die ungeraden Nummern ein negatives Vorzeichen.

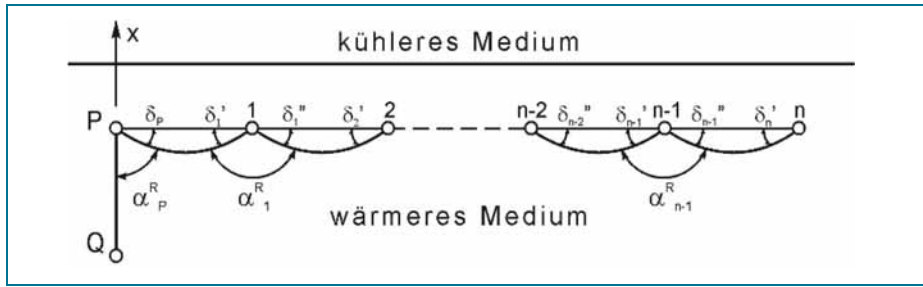


Abb. 3: Parallel zur Tunnelwand verlaufender offener Polygonzug

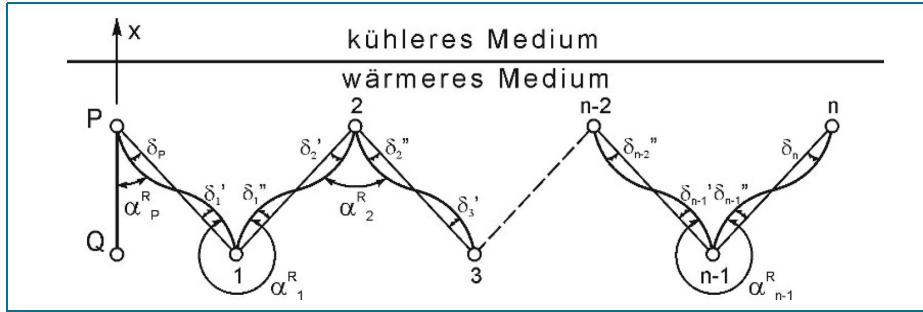


Abb. 4: Schräg verlaufender Polygonzug im Tunnel

Für die ungeraden Punktnummern bekommt man dann

$$X_n = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R - \Delta Y_{n(n+1)} \delta \quad (7)$$

worin für den dritten Term in Gl. (7) gilt

$$\Delta Y_{n(n+1)} = D \cdot \sin A_{n(n+1)} \quad (8)$$

Für eine gerade Polygonzug-Punktnummer erhält man

$$X_n = X_P + \sum_{i=1}^n \Delta X_{(i-1)i}^R = 0 \quad (9)$$

Nach Berücksichtigung der Vorzeichen der Refraktionswinkel betragen die linearen Refraktionseffekte letztendlich

$$E_{X_n}^R = -\Delta Y \delta \quad \text{bzw.} \quad E_{X_n}^R = 0 \quad (10)$$

Bekanntlich werden in der Praxis bei Tunnelvermessungen zweckmäßig hochpräzise und automatisch temperaturkalibrierte Vermessungskreise GYROMAT 3000 mit einer Standardabweichung von $\delta_A^K = 0,1 \text{ mgon}$ nach der Norm DIN 18723 eingesetzt. Die Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsdefizite werden im Resultat wesentlich behoben. Die theoretisch refraktionsfreien Kreiselazimute A^T werden auf Grund der gemessenen geographischen Azimute A^K und Gegenazimute aus den folgenden Formeln bestimmt:

Für einen in Abb. 4 dargestellten Polygonzug gilt

$$\begin{aligned} A_{P1}^T &= \frac{1}{2} (A_{P1}^K + A_{1P}^K \pm 200 - 2\delta) \\ A_{12}^T &= \frac{1}{2} (A_{12}^K + A_{21}^K \pm 200 + 2\delta) \\ &\vdots \\ A_{(n-1)n}^T &= \frac{1}{2} (A_{(n-1)n}^K + A_{n(n-1)}^K \pm 200 + 2\delta) \end{aligned} \quad (11)$$

Die Koordinatenberechnung mit den ermittelten Kreiselazimuten ergibt für die Endpunkte der Polygonzüge (Abb. 4) identische Refraktionseffekte wie in Gl. (10). In einem Kreiselazimut-Polygonzug (Abb. 3) werden die systematischen refraktiven Richtungsverschwankungen theoretisch fast völlig eliminiert. Leider ist für diese Art von Einzel-Kreisel-Polygonzügen keine Kontrolle und Zuverlässigkeit gegeben.

5 A priori Prognosen der refraktiven Einwirkungen in diversen Modell-Varianten von Vortriebskontrollnetzen

In den letzten drei Jahrzehnten wurde für die Anlage der unterirdischen Tunnel-Netze eine Vielzahl von fehlertheoretisch günstigen Netzformen ausgearbeitet und analysiert (BELUCH 1991), (KOVACEVIC 1980). Weiterhin werden Richtungs-Strecken-Netze mit verstärkter geometrischer Struktur vorgeschlagen. Für die Genauigkeitsprognosen von unterirdischen Kontroll-Lagenetzen unter besonderer Berücksichtigung des systematischen Einflusses der Horizontalrefraktion wurden sechs Modell-Varianten ausgewählt (Abb. 5).

Die simpelste Art von Kontrollnetzen für Tunnel-Absteckungs-Vermessungen stellen die Varianten A und E dar. Die systematischen gegenseitigen Auslenkungen der X-Koordinaten von zwei parallelen Polygonzügen werden im Resultat der Koordinatenmittelung wesentlich minimiert. Symmetrische Netz-Modelle mit zusätzlichen Strecken-Verstärkungen mit Redundanzanteil bilden die Lagenetze B, C, D und F, die die für Tunnelnetze typische Form eines relativ schmalen Netzgebildes ergeben. Diese Modelle propagieren eine Art von Sondernetzen mit Fehlerminderungseigenschaften für die Tunnelausführung. Für die Bestimmung des Querfehlers der X-Koordinaten der Endpunkte wurde eine strenge, simulierte Netz-

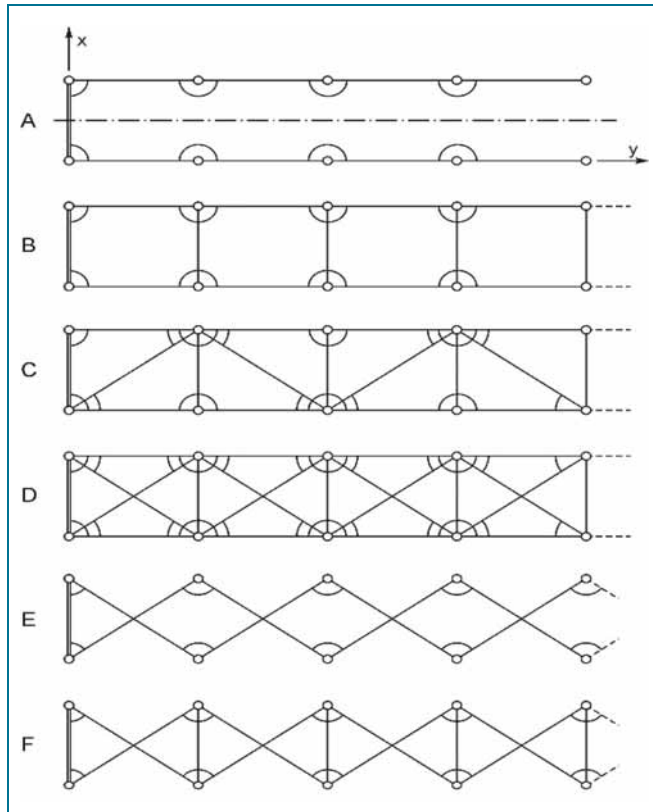


Abb. 5: Unterirdische Tunnel-Modell-Lagenetze

ausgleichung der Beobachtungen in freien Netzen vorgeschlagen. Das aufgestellte Ausgleichungsverfahren ist auf eine Modellierung systematischer Fehlereinflüsse orientiert. In dem funktionalen Lagenetz-Ausgleichungsmodell gilt für die Verbesserungsgleichungen

$$\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

In Gl. (12) treten zwei Gruppen von Verbesserungen auf:
 v_1 – für die Winkelbeobachtungen
 v_2 – für die Streckenbeobachtungen

Aus dem Minimum der Quadratsumme der Verbesserungen folgt der Ausgleichungs-Formel-Apparat in der Matrixschreibweise, gegeben durch:

– Gewichtsreziprokenmatrix

$$Q = [A_1^T P_1 A_1 + A_2^T P_2 A_2]^{-1} \quad (13)$$

– Vektor der Unbekannten

$$X = -Q[A_1^T P_1 + A_2^T P_2] \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Das Absolutglied L_1 beinhaltet den zufälligen L'_1 und den systematischen Teil $E_{L_1}^R$ der Beobachtungs-Fehler

$$L_1 = L'_1 + E_{L_1}^R \quad (15)$$

Nach Berücksichtigung in Gl. (14) der Gl. (15), folgt der X-Koordinatenfehler zu

$$E_X^R = -Q A_1^T P_1 E_{L_1}^R \quad (16)$$

Für die strengen Gesamt-Ausgleichungen der in Abb. 5 präsentierten Modell-Varianten wurden folgende Messdaten angenommen:

$$S = 1000 \text{ m}, D = 100 \text{ m}, \sigma_D = 5 \text{ mm}, \alpha_P = 100 \text{ g}, \\ \alpha = 200 \text{ g}, \sigma_{\alpha_P} = \sigma_\alpha = 0,6 \text{ mgon}$$

$N = 20, p = 2 \text{ m}, \sigma_P = 1 \text{ mm}$, wobei: p – Traverse: Querabstand zwischen zwei benachbarten Netzknoten.

In Tabelle 3 sind folgende Maßeinheiten einzuführen: [mgon] – für die Refraktionswinkel und [mm mgon⁻¹] für die vorstehenden Koeffizienten. Die zusammengestellten Ausgleichungsergebnisse der a priori Prognosen tragen lediglich Informationen über Querauslenkungen der X-Netzkoordinaten.

Tabelle 3: Lineare Refraktionseffekte für Modell-Varianten und Netzlänge von 1 km nach der Koordinatenausgleichung

Lagenetz-Modell-Variante	Refraktionseffekt $-E_X^R$ [mm]
A	157,08 δ
B	1,00 δ
C	0,61 δ
D	0,42 δ
E	0
F	0,32 δ

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

- Die Analysen der statischen Refraktionsmodelle und der theoretischen Fehlervorhersagen haben deutlich aufgezeigt, dass eine wesentliche Minimierung der Refraktionseinflüsse in Tunnelnetzen durchaus möglich ist.
- Als Beurteilungs- und Netzgütekriterium für die Durchschlagsprognose wurde im vorliegenden Beitrag *ausschließlich* der Einfluss der horizontalen Refraktionseinwirkung und deren Eliminierung bzw. Minimierung berücksichtigt und analysiert.
- Die Resultate der strengen Netzkoordinaten-Ausgleichung mit den Vorinformations-Prognosen zeigen eindeutig, dass die Fehlerfortpflanzung systematischer Einflüsse der Seitenrefraktion, außer bei der Modell-Variante A, erheblich vermindert werden kann. Der Genauigkeitsabfall im Netz wird geringer, die Durchschlagparameter und die Zuverlässigkeit werden besser.
- Bei einseitig angeschlossenen Polygonzügen (Variante A und E) ist für den Durchschlagpunkt wegen fehlender Überbestimmungen keine Zuverlässigkeit gegeben, obwohl rein theoretisch betrachtet keine Koordinatenverfälschungen in der Variante E auftreten.
- Es ist bemerkenswert, dass den allergrößten Einfluss auf die X-Koordinaten der Endpunkte der Polygonzüge die auf den Netz-Anfangspunkten wirkenden Refraktionserscheinungen hervorrufen. Die refraktiven Einflüsse auf die Koordinatenverfälschungen der letzten Netz-Punkte sind relativ kleiner. Diese Tatsache ist äußerst interessant und hat eine relevante Bedeutung für die Retraktionskorrektur.

- Der Variantenvergleich zeigt, dass die einfachsten Netz-Modelle zu zufrieden stellenden Ergebnissen führen, wenn symmetrische Netzarten mit zusätzlichen Traversen p vorgesehen werden. Obwohl die Unterschiede zwischen den in Tabelle 3 zusammengestellten vorausgerechneten linearen Refraktionseffekten nicht so groß sind, wird die Struktur des Netz-Modells der Variante F aus dem Gesichtspunkt des Vermessungsaufwandes, der Prognose-Genauigkeit und Zuverlässigkeit, als optimal anzusehen sein.
- Bekanntlich können bei realen Bedingungen des Messungsmediums zufällige Temperaturfluktuationen auftreten und differenzierte Refraktionswinkel hervorrufen. Diese Erscheinung kann durch Wiederholungsmessungen weitgehend eliminiert werden. Die im Aufsatz präsentierten Formeln können also als plausibel angesehen werden.
- Bei der Planung, der Ausführung und Vermessung der unterirdischen Vortriebs-Kontroll-Netze im Tunnelbau haben die Refraktions-Minimierungs-Strategie, die Optimierung von Netz-Strukturen (Anzahl der Netzknoten, Länge der Netzseiten, Abstand der montierten Messkonsolen von der Tunnelwand), als auch die Genauigkeitssteigerung und Erhöhung der Zuverlässigkeit der Durchschlagsparameter eine prinzipielle Bedeutung. Die vorberechneten Durchschlagfehler, d.h. die Quer- und Höhenkomponente, ermöglichen die Aktualisierung des Tunnel-Netzes und eine Absicherung der fehlerfreien Vortriebsrichtung. Die Festlegung der Netzknoten ist mit einem Abstand mindestens 1 Meter von den Tunnel-Seitenwänden auszuführen.
- Gegenwärtig werden experimentelle Forschungen über die Optimierung der Ermittlungsgenauigkeit von Temperaturgradienten im Tunnelinneren durchgeführt. Eine Steigerung der Genauigkeit bis zu $\approx 0,03[K\ m^{-1}]$ ist durchaus real. Das ergibt einen Unsicherheitsbeitrag von $\delta = 0,17\ mgon$ für eine Ziellinie von 200 m und entspricht einer Querabweichung von 0,53 mm.

Literatur

- [1] 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, 1991
- [2] 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 for Mining Surveying, Cracow, Poland, September 2000, Vol. 1
- [3] BRYŚ, H. (1994) – Ein moderner Lufttemperaturgradientenmesser mit Digitalanzeige für geodätische Refraktionsforschungen und -bestimmungen. Der Vermessungsingenieur, Nr. 2, 1994
- [4] BRYŚ, H. (1995) – Theoretische Grundlagen der Refraktion beim trigonometrischen Nivellement höchster Genauigkeit. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, Nr. 2, 1995
- [5] BRYŚ, H. (1995) – Geometria refrakcji oraz jej wpływ na pomiary kątów poziomych na terenach zakładów przemysłowych, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków, Z.3-B/1995
- [6] EICHHOLZ, K., SCHMIDT, G. (1980) – Erfahrungen bei Durchschlagmessungen im Bergbau sowie Vermessungskonzepte für rationelle und zulässige Durchschlagsangaben, VIII Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Dümmler Verlag, 1980
- [7] HENNECKE, F. (1989) – Vermessungstechnik für Bauingenieure, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin, 1989.
- [8] KORITKE, N. (1992) – Horizontalrefraktion in langen Tunneln, XI Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Dümmler Verlag, 1992
- [9] KORITKE, N. (1997) – Zur Anwendung hochpräziser Kreismessungen im Bergbau und Tunnelbau, DMT-Berichte aus Forschung und Entwicklung, Essen, 1997
- [10] KOVACEVIC, D. (1980) – Underground Geodetic Networks, In: Ingenieurvermessung 1980, D 10, Verlag Dümmler, 1980
- [11] MENDEL, W. – Refraktionsmodelle für Ingenieurvermessung unter besonderer Berücksichtigung des Stollenbaues, VII Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung hoher Präzision, Band II, Herausgeber Institut für Geodäsie, TH Darmstadt, 1976
- [12] MORITZ, H. (1968) – Zur Geometrie der Refraktion, Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen, Nr. 1, 1968
- [13] SCHWARZ, W. (2006) – Den Elementarteilchen den Weg weisen, www.intergeo.de/de/deutsch/vortragsarchiv/php?

Anschriften der Verfasser:

o. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. JÓZEF BELUCH, Katedra Geomatyki, Wydział Geodezji i Inżynierii Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, 30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30, E-Mail: beluch@agh.edu.pl
 o. Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. HENRYK BRYŚ, Instytut Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, E-Mail: hbrys@usk.pk.edu.pl

Summary

This paper presents the problem of systematic influences of the horizontal refraction and its minimization/elimination in tunnel-networks. Mathematical formulas for determining the partial refractions angle and the linear refractions effects in inhomogeneous temperature field in the tunnel mediums and examples presented. For various model variants the transverse deflection of the X-coordinates due to a strict elimination of the refractive phenomenon in the studied network types are shown. Practical recommendations to minimize refraction influence on results of directional observations are presented. The results of the theoretical research of refraction forecasts for underground-network-variants are discussed.