

# Zur Reduzierung von Refraktionseinflüssen in Tunnel-Vortriebsnetzen

Modelltheoretische Lösung des Problems

## Conception of Elimination of Refraction Influence in Tunnel Networks

Model-theoretic Solution of the Problem

Henryk Bryś  
Edward Osada

Das im vorliegenden Beitrag präsentierte Problem betrifft die systematische Einwirkung des heterogenen Mediums, in dem die Messungen stattfinden, auf die Resultate der präzisen Richtungsmessungen und Koordinatenübertragung in langen Tunnelnetzen. Es wird ein Konzept eines Koordinaten-Ausgleichsverfahrens zur Reduzierung der refraktiven Messeffekte vorgeschlagen und an Berechnungsbeispielen vorgestellt. Die Entwicklung hochpräziser automatischer Tachymeter eröffnet die Möglichkeit zur effektiven Ausgleichung von Refraktionswinkeln direkt während der Vermessungsarbeiten beim Tunnelvortrieb. Innovative, gruppenweise Netzausgleichung gestattet die bei Tunnelvermessungen auftretenden Querauslenkungen der Punktkoordinaten zu ermitteln und die Richtungsübertragung zuverlässig zu kontrollieren. Die bisher erreichten Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen und der getesteten Prognosen für ein ausgedehntes Lagenetzwerk werden kurz dargestellt und diskutiert.

**Schlüsselbegriffe:** Tunnelvortrieb, Traversen-Lagenetzwerk, Etappen-Ausgleichung, Richtungsübertragung, Refraktions-Eliminierung

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 transverse deviations in local geodetic network allows for reliable control of directional angles transferring. Results of the research and predictions of transverse displacement of coordinates in the elongated, local and unilateral tunnel networks are presented.

**Keywords:** tunneling, traverse horizontal network, phase adjustment, direction angle propagation, elimination of horizontal refraction



### 1 Einführung

In der Praxis des Tunnelbaus wird eine Genauigkeitsprognose für das Zusammentreffen der unterirdischen Lagenetze benötigt, die von der Netzkonfiguration, dem spezifischen Refraktionsfeld, den Messdaten und deren Standardabweichungen abhängt. Aufdeckung, Identifizierung und Minimierung von Tunnel-Refraktionseffekten gehören zu den Hauptaufgaben der Untertagevermessungen. Kein Verkehrsbauwerk kann gegenwärtig ohne den Beitrag der Ingenieurgeodäsie geplant und errichtet werden. Das betrifft vornehmlich lange Verkehrstunnel mit



spezifischen unterirdischen Vortriebslagenetzen, zu deren Realisierung ständig Vermessungsaufgaben erforderlich sind. Die Atmosphäre in Tunneln wird durch verschiedene Einflussfaktoren beeinträchtigt, besonders aber durch die sich in Zeit und Raum ändernden Brechungsindexfelder (HENNES 1998). Die Bedeutung des Problems der Richtungsreferenz und deren Veränderlichkeit waren schon den Verkehrs-Geomensoren in der Antike bekannt. Davon zeugt der biblische Hiskia-Trinkwasserversorgungstollen in Jerusalem aus dem 7. Jahrhundert v. Chr., mit einer Länge von 533 m und mit einigen scharfen Windungen. Der Tunnel ruft bei Ingenieuren bis heute Bewunderung hervor. Bei den optischen Messungen in Tunneln tritt eine systematische vertikale und horizontale Lichtstrahlenbrechung – die geodätische Refraktion – auf. Aus praktischen Beobachtungen ist bekannt, dass lokale Umweltbedingungen der Umgebungatmosphäre (inhomogenes Feld der Lufttemperaturgradienten, Luftfeuchtigkeit, Kühlung, Luftströmung, Abgase, durchziehender Wetterstrom, Gesteinstaub, Dunkelheit, Luftverwirbelungen, Vibrationen, Erschütterungen, u. a.) im Tunnelinneren die Repräsentativität der Messwerte erheblich herabsetzen können, da praxisrelevante Störungen im Lichtwellenverlauf auftreten. Als besondere Einflussgröße ist aber die laterale Refraktion zu nennen. Sie wird in erster Linie durch den horizontalen Temperaturgradienten der spezifischen Atmosphäre im Tunnel hervorgerufen, in der sich der Zielstrahl ausbreitet. Seit Jahren wurden diverse Minimierungsstrategien ausgearbeitet, um die Richtungsverschwenkungen und die Querauslenkungen zu vermindern. Messgenauigkeitssteigerung und Erfahrungen mit dem Instrumentarium der neuesten Generation, die in den Grundlagenforschungen und in der geodätischen Praxis gesammelt worden sind, stellen weitere Fortschritte im Tunnelbau in Aussicht. Das Problem der Refraktion gilt besonders für spezielle, sehr lange Netze, wo die refraktiven Effekte seit der Einführung der Elektronik, Informatik und Automation im Gerätebau (hochpräzise *TS 30* Totalstation; *Mekometer ME 5000* (LEICA GEOSYSTEMS), Präzisions-Vermessungskreis *Gyromat 3000* (DMT – DEUTSCHE MONTAN TECHNOLOGIE GmbH), *Gyromax AK-2M* GeoMess Technik (HILLMANN 2010), durch Einfluss der sich mit der Länge des Tunnels verlagernden Temperaturgradientenfelder immer stärker in Erscheinung treten. Experimentelle Beobachtungen des Verfassers in der Richtungsstrecke einer Versuchsgrube ergaben Richtungsänderungen, bewirkt durch die Refraktion, von 1,0 bis 1,9 *mgon / 388 m* und Temperaturgradienten von 0,09 bis 0,23 *K/m* in einem Beobachtungszeitraum von etwa 3 Stunden (BRYŚ 2002). Die Möglichkeit, refraktionsfreie Messwerte zu erhalten, fasziniert seit Jahren breite Fachkreise, die sich mit Refraktionseinwirkungen auf geodätische Beobachtungen höchster Präzision konfrontiert sahen. Das betrifft vor allem die unterirdischen Vermessungen im Markscheidewesen, im Stollen- und Tunnelbau. Die systematischen Refraktionswinkel und die resultierenden linearen Effekte aufgrund inhomogener Temperaturfelder und lokaler Refraktionsanomalien im Tunnelinneren können aufgedeckt und die Messergebnisse rechnerisch korrigiert werden. Das haben die interessanten Resultate der ausführlichen theoretischen und

experimentellen Grundlagenforschungen eindeutig bewiesen (HENNES 1998), (HEISTER 1997), (KORITKE 1997), (WILHELM 1993), (SCHWARZ 1993). Die längsten in Betrieb befindlichen Tunnel der Welt sind z. Zt: SEIKAN-TUNNEL – 53,850 km (Japan), EUROTUNNEL – 49,940 km (Frankreich-Großbritannien), LÖTSCHBERG-BASISTUNNEL – 34,576 km (Schweiz). Die Vortriebsarbeiten am GOTTHARD-BASISTUNNEL mit der Länge von 57 km wurden am 15. Oktober 2010 beendet. Die Fertigstellung des Tunnels soll Ende 2016 erfolgen. Es wurde eine Genauigkeitsanalyse für einen im ganzen Tunnel als konstant angenommenen realistischen Temperaturgradienten von 0,1 *K/m* senkrecht zur Tunnelachse für eine Entfernung von 12 km durchgeführt. Daraus ergab sich, dass eine maximale systematische Querabweichung von der Geradlinigkeit von 6,62 m auftritt, wobei die einzuhaltende Durchschlagsgenauigkeit (HENNECKE 1989) etwa 1 bis 3 *cm/1 km* beträgt. Die Refraktionserscheinungen wirken permanent (Windstille), zufällig (Luftdurchsatz, Bewitterung) oder während einer vorsehbaren Zeitspanne (planmäßige Entlüftungen). Bei Horizontalwinkelmessungen mit Präzisionstachymetern der höchsten Genauigkeitsklasse übersteigt die Refraktionsunsicherheit wesentlich die instrumentell erreichbare Messgenauigkeit. Zum erfolgreichen Tunneldurchstich wurden im Laufe des letzten Jahrhunderts verschiedene Tunnel-Refraktionstheorien, Vermessungsstrategien und -techniken entwickelt. Obwohl in den letzten beiden Jahrzehnten bedeutsame Fortschritte auf dem Gebiet der praktischen Forschungen gemacht wurden (HENNES 1998), (HENNES u. a. 1998), (KORITKE 1997), sind bisher befriedigende Resultate bei der Lösung des Refraktionsproblems nicht gefunden, wobei die Genauigkeitsanforderungen sehr groß sind. Die folgenden Betrachtungen der Verfasser beschränken sich auf die heute in der vermessungstechnischen Praxis dominierenden Richtungs-Strecken-Netze. Im vorliegenden Beitrag wurde in einem von den Autoren (BELUCH u. a. 2010) vorgeschlagenen Tunnel-Modell-Lagenetz, bestehend aus zwei schlangenhafte offenen Polygonzügen mit Traversen, der systematische Einfluss der Seitenrefraktion auf die Querabweichungen aller Netzpunktkoordinaten und die Praxiserfahrungsmöglichkeiten in die geodätische Messtechnik getestet, bewertet und diskutiert. Es dient zur Identifizierung, Auswertung und Eliminierung mittels strenger gruppenweiser Ausgleichung der Brechungswinkel und im Resultat der Koordinaten und der Richtungskorrektur der ausgeschwenkten Zielstrahlen. Aufgrund dieser Mess- und Ausgleichungsverfahren lassen sich die systematischen Refraktionsfehler bei Tunnelmessungen effektiver minimieren. Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Koordinaten- und Richtungsübertragung, wie die simulierten Modell-Berechnungsbeispiele zeigen, werden eindeutig gesteigert. Das oberirdische Portalnetz mit den Anschlüssen wurde in diesem Beitrag, wegen lokalen Refraktionschwankungen und -anomalien (WILHELM 1993) nicht berücksichtigt und analysiert. Da zufällige und systematische Messabweichungen keine Fehler sind, sie werden u. a. durch Bedingungen des Messraumes verursacht (SCHWARZ 2004), werden alle ausgewerteten Größen konsequent als Abweichungen bezeichnet. Als Beurteilungs-

kriterium werden refraktiv bedingte lineare Querabweichungen und Richtungsabweichungen vor und nach der Ausgleichung sowie stochastische Standardabweichungen berechnet. Obwohl die Refraktionseffekte grundsätzlich durch allgemeine Modellansätze leicht beherrschbar sind, hat sich deren Anwendung nicht konsequent durchgesetzt, da die Erfassung der aktuellen Luftbrechungsindexe sehr aufwändig ist (HENNES 2002). Erst zum Zeitpunkt des Durchschlags ist es feststellbar, ob das Zusammenspiel von Konzeption, Qualität der Außenetze und Ausführungsvermessung im Untertagebau korrekt und somit erfolgreich war (WEITHE 2010). Die vorliegende Bearbeitung ist ein Ansatz zur modelltheoretischen Lösung des im Titel des Beitrages angesprochenen Problems ohne Kenntnisse der in der Tunnelaibung aktuell auftretenden Lufttemperaturgradienten.

## 2 Das innovative Tunnelnetz-Ausgleichungs-System

Die herkömmlichen, einzelne und doppelte, einseitig angeschlossene geradlinige und schlangenartige Polygonzüge, sind wegen hohen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitsanforderungen kritisch anzusehende schwachförmige geodätische Lagenetze für die Tunnelvermessungen. Sie sind derzeit die simpelsten Messverfahren zur präzisen Richtungs- und 2D-Koordinatenübertragung bei Vortriebsarbeiten. Sie gewährleisten aber keine Kontrolle, weder während, noch nach der Beendigung der Messarbeiten. Für die funktionale Optimierung der unterirdischen Lagenetze wurde in den letzten beiden Jahrzehnten eine Vielzahl von fehlermindernden günstigen Netzformen vorgeschlagen (KRÜGER 1985), (BELUCH u.a. 2010). Die Kombination von schlangenartigen Polygonzügen mit Traversen bildet genauigkeitssteigernde Netzfiguren. Im Folgenden wird ein modulares, hybrides Netz-Modell aus gekreuzten Polygonzügen und Traversen mit zusätzlichen Streckenverstärkungen präsentiert. Wie zahlreiche Modelltestberechnungen zeigten, ist diese Variante von Sondernetzen mit fehlermindernden Eigenschaften für die Tunnelmessungen am günstigsten, da eine fast völlige Beseitigung der unbekanntem Refraktionswinkel im Netz durchaus möglich ist. Das Prinzip des Simulationsmodells für die Koordinatenberechnung und die Azimut- und Punktverlagerungskorrekturen beruht auf den separaten, nacheinander folgenden Etappenausgleichungen

bis zur Ortsbrust unter Einbeziehung der schon abgesteckten Netzpunkte. Mit einem von den Autoren erstellten Computerprogramm-ReTuNetz (MATHCAD 14), können die Etappen-Ausgleichungen direkt an Ort und Stelle, am Instrumentenstandpunkt, schnell ausgeführt, ausgewertet und die Punktkoordinaten, Azimute und ggf. Brechungswinkel bestimmt werden. Die Vorgehensweise des Modell-Ausgleichungsansatzes soll im Folgenden dargestellt und die Idee des Ausgleichsverfahrens verdeutlicht werden. Die ganze beliebige Tunnelnetzstrecke wird in  $n$  äquidistante Teilstrecken (in den Berechnungsbeispielen jeweils 1800 m (Abb. 1)) eingeteilt, geordnet und nacheinander sukzessiv ausgeglichen. Der verantwortliche Vermessungsingenieur bekommt für jedes Traversen-Netzpunkt-Paar der Neupunkte des folgenden Netzabschnittes nach der Neuausgleichung die endgültigen Koordinatenwerte. In der Tab. 3 sind die Ergebnisse der Modell-Test-Ausgleichungen, das sind: die Prognose-Querabweichungen, Standardabweichungen, berechnete Richtungswinkel, zusammengestellt.

## 3 Effekte der Horizontalrefraktion im inhomogenen Lufttemperaturgradientenfeld

Für die Bestimmung der zur Berechnung der partiellen Refraktionswinkel nötigen Temperaturgradienten im Tunnelquerschnitt sei auf die ausführlichen Formeln (HENNES 1998) verwiesen. Die Temperaturgradienten in den gegenüberliegenden Netzpunkten 2 und 3 (bei den Konsolen Abb. 1) werden mit einem präzisen elektronischen Temperaturgradientenmesser mit einer Standardabweichung von  $\sigma_{\Delta T} \cong 0,04 \text{ K/m}$  ermittelt (BRYŚ 1994). Aus der folgenden Näherungs-Formel (BELUCH u.a. 2010)

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

erhält man die refraktiven Horizontal-Winkeleffekte  $\delta_2$  und  $\delta_3$  für eine festgelegte Netz-Seite.

In der obigen Formel bedeuten:

- $D$  – Länge der Polygonzugseite [m]
- $\Delta d$  – Berechnungsintervall [m]
- $y_i$  – Distanz vom Polygonzugpunkt zum Mittelpunkt des Intervalls [m]
- $N$  – Anzahl der Berechnungsintervalle

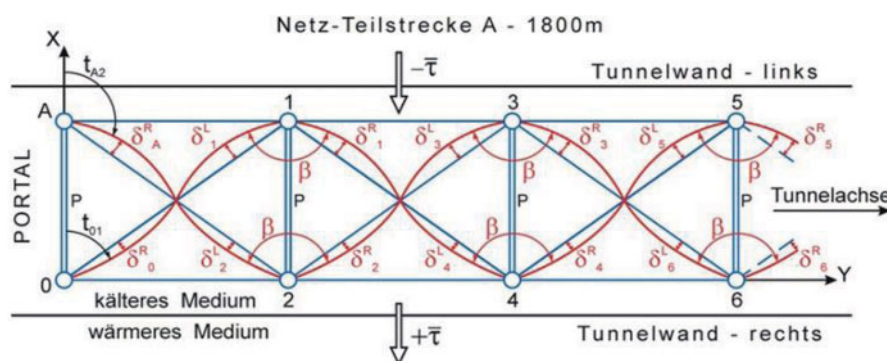


Abb. 1: Graphisch-anschauliche Darstellung eines Tunnelnetz-Teilabschnitts mit Zielstrahlenverlauf im inhomogenen Refraktionsfeld (wobei: A, O – Portalanschlusspunkte)



**Tab. 1: Daten für die Berechnung des partiellen Refraktionswinkels  $\delta_2$  nach Gl. (1) und Abb. 1**

| Berechnungs-Intervall Nr | $y_i$ [m] | $d_i = D - y_i$ [m] | $\Delta d = D/10$ [m] | $\tau_i$ [K/m] |
|--------------------------|-----------|---------------------|-----------------------|----------------|
| 10                       | 570       | 30                  | 60                    | +0,198         |
| 9                        | 510       | 90                  |                       | +0,154         |
| 8                        | 450       | 150                 |                       | +0,110         |
| 7                        | 390       | 210                 |                       | +0,066         |
| 6                        | 330       | 270                 |                       | +0,022         |
| 5                        | 270       | 330                 |                       | -0,016         |
| 4                        | 210       | 390                 |                       | -0,047         |
| 3                        | 150       | 450                 |                       | -0,078         |
| 2                        | 90        | 510                 |                       | -0,109         |
| 1                        | 30        | 570                 |                       | -0,140         |

$\nabla_{\bar{x}}^T n_i$  – Gradient des Luftbrechungsindex (bei:  $T = 303\text{ K}$  – mittlere Lufttemperatur im Messumfeld und  $P = 1030\text{ hPa}$  – mittlerer Luftdruck im Tunnel) =  $-0,92 \cdot 10^{-6} \tau_i$  [ $\text{m}^{-1}$ ]

$\tau_i$  – Lufttemperaturgradient [K/m],  
 $\rho$  – Radiant [mgon]

Der als Refraktionseffekt auffassbare partielle Winkel  $\delta$  (Abb. 1) repräsentiert den auf die gesamte Lichtkurve einwirkenden inhomogenen Luftbrechungsindex, sowohl mit positiven, als auch negativen Vorzeichen (etwa bis zu Tunnelmitte, Abb. 1). Bei umgekehrten Temperaturgradienten verläuft die Refraktionskurve entgegengesetzt. Nachstehend sollen exemplarisch die Berechnungsvorgänge der Refraktionswinkel nach Gl. (1) mit vorberechneten Daten (Tab. 1 und 2) für eine Netzseite von  $D = 600\text{ m}$  dargestellt werden. Die auf den Neupunkten 2 und 3 einer Netzseite, aus mehreren Beobachtungsreihen ermittelten Temperaturgradienten:

**Tab. 2: Daten für die Berechnung des partiellen Refraktionswinkels  $\delta_3$  nach Gl. (1) und Abb. 1**

| Berechnungs-Intervall Nr | $y_i$ [m] | $d_i = D - y_i$ [m] | $\Delta d = D/10$ [m] | $\tau_i$ [K/m] |
|--------------------------|-----------|---------------------|-----------------------|----------------|
| 1                        | 30        | 570                 | 60                    | -0,198         |
| 2                        | 90        | 510                 |                       | -0,154         |
| 3                        | 150       | 450                 |                       | -0,110         |
| 4                        | 210       | 390                 |                       | -0,066         |
| 5                        | 270       | 330                 |                       | -0,022         |
| 6                        | 330       | 270                 |                       | +0,016         |
| 7                        | 390       | 210                 |                       | +0,047         |
| 8                        | 450       | 150                 |                       | +0,078         |
| 9                        | 510       | 90                  |                       | +0,109         |
| 10                       | 570       | 30                  |                       | +0,140         |

ten:  $\tau_2 = -0,156\text{ K/m}$  und  $\tau_3 = +0,220\text{ K/m}$  (mit umgekehrten Vorzeichen in den Temperaturgradienten für die Berechnungen im Tunnelprofil), und die nach den Temperaturgradientenformeln von (HENNES 1998) im Tunnelquerschnitt bestimmten  $\tau_i$  (Tab. 1 und 2) sind Grundlage für Ermittlung der Refraktionswinkel:  $\delta_2 = +0,81\text{ mgon}$  und  $\delta_3 = +1,36\text{ mgon}$ . Die Fehleranalyse hat gezeigt, dass die Winkel mit einer Genauigkeit von 0,15 mgon bestimmt werden können. Die Messung erfolgt ausschließlich über Konsolen, senkrecht zur Ziellinie und im Abstand von ca. 0,80 m von den Tunnelulmen.

### 4 Formelapparat für die Ausgleichung der Messdaten und Analyse der Standardabweichungen der Festpunktkoordinaten

Das aufgestellte funktionale Ausgleichungsmodell zur stufenweisen Messdatenausgleichung mit effektiver Eliminierung von Refraktionseffekten nach dem Prinzip der Minimierung der Quadratsumme der Verbesserungen ( $\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} = \text{Minimum}$ ) ist gegeben durch folgenden Algorithmus in der Matrixschreibweise:

$\mathbf{v} := \mathbf{A} \mathbf{x} + 1$  Verbesserungsvektor der Unbekannten  
 $\mathbf{N} := |\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A}|$  Normalgleichungsmatrix  
 $\mathbf{Q} := \mathbf{N}^{-1}$  Gewichtsreziprokenmatrix  
 $\mathbf{n} := \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$  Absolutgliedvektor ( $P$  – Gewicht der Messung)

$\mathbf{x} := -\mathbf{Q} \mathbf{n} = -(\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{l}$  Vektor der Unbekannten (Ausgleichungs-Resultate)

$\mathbf{C}_x := (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A})^{-1} \quad i := 1, 2$  Kovarianzmatrix von ausgeglichenen Netz-Punktkoordinaten und Refraktionswinkeln

$\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{v}$  Ausgleichungsprobe  
 $S_0 = \sqrt{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v} / n - u}$  Standardabweichung der Gewichtseinheit  
 ( $n$  – Anzahl der Beobachtungen,  $u$  – Anzahl der Unbekannten,  $n - u = r$  – Anzahl der Überbestimmungen = Freiheitsgrade)

$S_{xi} = S_0 \cdot \sqrt{Q_{xx}}$  Standardabweichung der Unbekannten  $X_i$   
 $S_{li} = S_0 \cdot \sqrt{Q_{l_i l_i}}$  Standardabweichungen der Messungen nach der Ausgleichung (a posteriori)

wobei:  $Q_{l_i l_i} = \mathbf{A} \mathbf{Q} \mathbf{A}^T$  und  
 $|v_i| \leq k \cdot \sigma_{v_i}$  mit  $k := 3$  Test der standardisierten Verbesserungen

$$S(t)^2 = S_{X_i}^2 \cdot \cos(t)^2 + S_{X_i Y_i} \cdot \sin(2t) + S_{Y_i}^2 \cdot \sin(t)^2 \quad (2)$$

Die obige Gleichung beschreibt die Fußpunktkurve einer relativen Fehlerellipse mit den Halbachsen A, B und dem Azimut bzw. dem Richtungswinkel  $t$  (OSADA 2001). Die Fußpunktkurve ermöglicht die Bestimmung der richtungsabhängig korrekten Messabweichungen. Bei den Richtungswinkeln:  $t_A = 0,^s0000$  und  $t_B = 100,^s0000$ , gilt





Tab. 3: Zusammenstellung der Ergebnisse von Simulationsausgleichungen und Berechnungen der getesteten Tunnel-Modell-Teilstrecken-Lagenetze

| 1                |  | 2  |                   | 3                |  | 4  | 5  | 6   | 7 | 8 |
|------------------|--|--|-------------------|------------------|--|--|--|---|---|---|
| Netz-Teilstrecke | Netzstreckenlänge L<br>Seitenlänge D [m] | Simulierte partielle Refraktionswinkel $\delta$ [mgon] |                   | Netzpunkt Nummer | Refraktiv bedingte Querabweichungen der X-Koordinaten nach Ausgleichung Qx [mm]<br><br>Traversen-Mittelpunkt X-Koordinate [mm]<br><br>Relatives Zuverlässigkeitskriterium der Refraktions-Minimierung Zj | Standard-Abweichungen Sx<br>So [mm]<br><br>Durchschlags- Quer- und Längsabweichung für $t=100\%$ S <sub>Q</sub><br>S <sub>L</sub> [mm] | Statischer Verschwenkungsbetrag der X-Koordinaten der Polygonzüge ohne Traversen und ohne Ausgleichung Q <sub>p</sub> [mm] | Gemittelte Vortriebs-Richtungswinkel nach Ausgleichung t [gon]<br><br>Richtungswinkel-Differenzen VOR und NACH der Ausgleichung $\Delta t$ [mgon] |   |   |
|                  |  | Linke Tunnelwand                                       | Rechte Tunnelwand |                  |  |  |  |   |   |   |
| A                | 1800/600                                 | 0,4  | 0,2               | 8<br>7           | +1<br>-1<br>2500<br>0,2028   | 7,6<br>1,00<br>7,5<br>1,1  | +11,3<br>+5,5  | 99,9998<br>-0,8   |   |   |
|                  |  | 0,4<br>0,6   | 0,2<br>0,4        | 13<br>14         | +11<br>+11<br>2511<br>0,7373   | 17,4<br>1,01<br>17,4<br>1,5  | +32,1<br>+35,8   | 99,9998<br>-0,6   |   |   |
| A+B+C            | 5400/600                                 | 0,4  | 0,2               | 20               | +25  | 29,3   | +81,1  | 99,9999   |   |   |
|                  |  | 0,6  | 0,4               | 19               | +25  | 1,07   | +71,5  | -1,6  |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 2525<br>0,8525   | 29,3<br>1,8  |  |   |   |   |
| A+B+C+D          | 7200/600                                 | 0,4  | 0,2               | 25               | +15  | 43,1   | +133,9   | 100,0003  |   |   |
|                  |  | 0,6  | 0,4               | 26               | +14  | 1,07   | +137,1   | -1,7  |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 2514   | 43,1   |  |   |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 0,8988   | 2,1  |  |   |   |   |
| A+B+C+D+E        | 9000/600                                 | 0,4  | 0,2               | 32               | +11  | 58,6   | +216,7   | 100,0001  |   |   |
|                  |  | 0,6  | 0,4               | 31               | +9   | 1,04   | +207,6   | -3,6  |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 2510   | 58,6   |  |   |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 0,9237   | 2,4  |  |   |   |   |
| A+B+C+D+E+F      | 10 800/600                               | 0,4  | 0,2               | 37               | +4   | 75,6   | +312,6   | 100,0001  |   |   |
|                  |  | 0,6  | 0,4               | 38               | +3   | 1,09   | +310,2   | -2,8  |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 2504   | 75,5   |  |   |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 0,9412   | 2,6  |  |   |   |   |
| A+B+C+D+E+F+G    | 12 600/600                               | 0,4  | 0,2               | 43               | +3   | 94,0   | +435,6   | 99,9999   |   |   |
|                  |  | 0,6  | 0,4               | 44               | +4   | 1,05   | +411,9   | -4,8  |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 2504   | 94,0   |  |   |   |   |
|                  |  | 0,8  | 0,6               |                  | 0,9508   | 2,8  |  |   |   |   |

- Durch Einbeziehung von zusätzlichen Streckenmessungen im Tunnel-Absteckungsnetz erhöht sich die Redundanz und damit die Zuverlässigkeit der Ausgleichungsergebnisse. Einseitig wirkende systematische Effekte auf Grund der gefährlichen Horizontalrefraktion können effektiver minimiert werden.
- Mit Zunahme der Tunnellänge nimmt die Bedeutung des im Beitrag vorgestellten Untertagenetzes, der Messtechnologie und des Ausgleichungsverfahrens zu.

## 5 Absteckung der Vortriebsrichtung

Die fortlaufende Richtungsübertragung erfolgt heutzutage mittels der längs der Tunnelachse, als Boden- bzw. Firstpunkte vermarkten, Tachymeterstandpunkte und aufgrund von ausgeglichenen Winkel-Strecken-Netz-Koordinaten. Um die hohen Genauigkeitsansprüche der Vortriebsrichtung von 1-3 cm / 1 km mit Sicherheit erfüllen zu können, muss die effektive Verknüpfung von zielorientierten Mess-, Auswerte-, Spezialprogrammen und Ausgleichungsverfahren erfolgen. Die X-Koordinaten der Hauptinstrumentenstandpunkte können bei geradlinigem Vortrieb, mit Grundformeln der analytischen Geometrie, als Schnittpunkte der im Tunnelprojekt vorgegebenen Achsengeraden eines Tunnelprofils, mit einer Reihe von Traversen-Abschnitten mittels *COGO*-Programm bestimmt werden. Diese Koordinaten sind in der Regel nicht unbedingt identisch mit den mittigen Traversen-Punkten und können einige zehn Millimeter verlagert werden. Der Hauptvorteil dieses Berechnungsprinzips besteht darin, dass keine zusätzlichen Winkelmessungen die X-Koordinaten verfälschen. Mit elektronischen Tachymetern der höchsten Genauigkeitsklasse von Leica Geosystems: *TC2002* (Präzisionstheodolit + EDM), *TP30* (Präzisions-TOTAL STATION), *TM30* (motorisiertes Tachymeter) erfolgt eine Koordinatenkontrolle durch Rückwärts-einschneiden zu 4 Netzpunkten mit automatischer Zielerfassung und gleich danach die präzise Anzeige der SOLL-Richtung mit sichtbarem roten Laserstrahl für die automatische Vortriebssteuerung der Bohrmaschine mit Anwendung des *Echtzeitanzeigen Display-TunnelBeamer*. Alle Berechnungen der Koordinaten und Richtungswinkel bzw. Azimute erfolgen mit praxisorientierten *TPS-System 1000*-Anwendungsprogrammen *SmartWorx*-Standardsoftware *RoadRunner Tunnel (PROSPEKTE GEOMATIX Leica)*, speziell zur Richtungsabsteckung beim Vortrieb mit einem *TMB (Tunnel-Maschinen-Bohrer)* konzipiert. Somit erfolgt eine ständige Überprüfung der Angaben, der Fortführung der SOLL-Vortriebsrichtung und der Position der Maschine mit einer theoretischen Standardabweichung von 0,3 mgon, was einer linearen Querabweichung von 0,47 mm / 100 m entspricht. Für den folgenden Absteckungsprozess müssen die Achsen-Instrumentenstandpunkte mittig entlang der Messstrecke etwa je alle 50 bis 100 m ergänzt werden. Nach ca. 300 bis 500 m erfolgt der Netzausbau um eine weitere Traversen-Vermarkung mit 2 Konsolen, und es erfolgen die Netzvermessungen in der Nähe der Ortsbrust. Das bedeutet, dass bei einem mittleren Abbaufortschritt von ca. 15 m pro Tag sich das Sondernetz im Zeitabstand von etwa 4 Wochen

verlängert und gleichzeitig eine neue strenge Teilstrecken-Netzausgleichung für die Weiterübertragung der Tunnelachse durchgeführt wird. Beim maschinellen Tunnelbau müssen die ausgeglichenen Koordinaten möglichst schnell auf den Tachymeterstandpunkten zur Verfügung stehen. Nach jedem Kilometer erfolgt eine übergreifende Hauptkontrolle der Messdaten zur Datenaktualisierung mit allen erforderlichen Genauigkeitsanalysen und Auswertungen. Die Verwaltung der Messdaten erfolgt über das kompatible Computer-Programmpaket an der Ortsbrust mittels des örtlichen Tunnelinformationssystems. So wird das gesamte Vortriebsverfahren vor Ort erheblich vereinfacht und die Kommunikation mit dem Zentralrechner, ggf. Laptop und mit Hilfe von geodätischen Spezialprogrammen, optimiert. Nach derselben Absteckungstechnik werden nach ähnlichen Mess-, Auswertungs-, Absteckungs- und TMB-Steuerungsprinzipien mit Spezialsoftware kreisförmige Tunnelstrecken aufgeföhren. Für die ingenieurtechnischen Tunnelmessaufgaben lassen sich leider keine allgemeinen Richtlinien und Anleitungen angeben, da die technischen, hydrogeologischen und Umweltbedingungen und diverse Baukonstruktionen im Tunnelinneren so verschieden sind, dass für jedes Verkehrsbauwerk ein langgestrecktes Sondernetz angelegt werden muss, das eigene Konzeption und Ausführung verlangt.

## 6 Schlussfolgerungen, Bemerkungen und Ausblick

- Das im Beitrag präsentierte Verfahren und die Folgerungen zur Risikominimierung und Prognosen von systematischen Refraktionsabweichungen sind eine Alternative für die in der Tunnelbaupraxis herkömmlichen Messmethoden.
- Durch Inhomogenitäten des meteorologischen Feldes treten im Tunnelinneren, vornehmlich längs den Umlinwänden, negative, einseitige Refraktionswinkel und daraus resultierend Richtungsverschwenkungen auf. Wegen der Tunnelbelüftung kann das Refraktionsfeld an den gegenüberliegenden Tunnelwänden differenziert auftreten. Die Temperaturgradienten steigen allmählich vom Tunnel-Portal bis zur Ortsbrust (*HENNES 1998*).
- Die durchgeführten Analysen haben gezeigt, dass die auf den ersten Netzseiten auftretenden Refraktionswinkel den allergrößten Einfluss auf die Querauslenkungen der Endkoordinaten hervorrufen. Diese Tatsache hat eine relevante Bedeutung bei der Konzeption und Planung von unterirdischen Tunnelnetzen, der Fehlervorbeugungsstrategie, der Modifikation der Netzgeometrie und der Ausführung von vortriebs-messtechnischen Arbeiten.
- Die vorgeschlagene Tunnelnetz-Geometrie-Variante mit Traversen bringt trotz erhöhtem Messaufwand wegen der Distanzmessungen bedeutende Genauigkeits- und Zuverlässigkeitssteigerungen, und das hat eine fundamentale Relevanz für die präzise Richtungsübertragung auf der Basis der ausgeglichenen Netzpunktkoordinaten. Die während der Brechungswinkelmessungen

- auf tretenden unsymmetrischen refraktiven Effekte werden bei den Etappen-Ausgleichungen fast völlig beseitigt. Dank der ausgeglichenen Netzkoordinaten kann ein optimales Durchschlagsprogramm für die präzise Richtungsangabe erstellt bzw. können die schon verwendeten Spezialprogramme modifiziert werden.
- Die neuen EDV-Einrichtungen müssen den Bedürfnissen der fachspezifischen Messdatenerhebung, -ausgleichung, -auswertung und dem Datenteletransfer mittels Lichtleiterkabel gerecht werden.
  - Werden die Vorteile des präsentierten Sondernetzes und die Untersuchungsergebnisse der Autoren in der Tunnelbaupraxis bestätigt, dann erübrigen sich sogar die kostspieligen Kreisel-Kontroll-Messungen mit der praktisch erreichbaren Standardabweichung von bis zu 1,5 *mgon*.
  - Die Resultate der Tunnellagenetz-Ausgleichungs-Simulationen mit dem präsentierten Ausgleichungs-Algorithmus wurden in früheren Veröffentlichungen noch nicht betrachtet.

## 7 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
- [2] BELUCH, J., BRYŚ, H.: (2010) – *Zur Problematik der Minimierung des Einflusses der Horizontalrefraktion in Tunnelvortriebs-Lagenetzen*. Allgemeine Vermessungs-Nachrichten, 2/2010
- [3] BRYŚ, H.: (1994) – *Ein moderner Lufttemperaturgradientenmesser mit Digitalanzeige für geodätische Refraktionsforschungen und -bestimmungen*. Der Vermessungsingenieur, 2/1994
- [4] BRYŚ, H.: (2000) – *Forschungsbericht* (unveröffentlicht)
- [5] HEISTER, H.: (1997) – *Experimentelle Untersuchungen zur Horizontalrefraktion im Tunnelbau*. IX. Int. Geodätische Woche, Obergurgl. In: Institutsmittelungen Heft 17, Fachvorträge, Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie
- [6] HENNECKE, F.: (1989) – *Vermessungstechnik für Bauingenieure*, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin
- [7] 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
- [8] HENNES, M., BÖCKEM, B., FLACH, Ph.: (1998) – *Recent Developments for Refraction-free Optical Measurements*. Paper to FIG, XXI International Congress, Brighton, 19.-26. Juli 1998
- [9] HENNES, M.: (2002) – *Zum Refraktionseinfluss auf terrestrische geodätische Messungen im Kontext der Messtechnik und der Instrumentenentwicklung, Flächenmanagement und Bodenordnung*, 2/2002
- [10] INTERNET: <http://sciencev.orf.at./news/88545.html>
- [11] KRÜGER, J.: (1985) – *Absteckungsnetze, speziell für Tunnelabsteckungen*, In: PELZER, H.; Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II
- [12] KORITKE, N.: (1992) – *Horizontalrefraktion in langen Tunneln*. XI. Int. Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich, Band 2, Paper IV/4, Dümmler Verlag, Bonn
- [13] OSADA, E. : (2001) – *Geodezja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław*
- [14] PROSPEKTE: GEOMATIX – Leica



- [15] SCHWARZ, W.: (1993) – *Applied Geodesy for Particle Accelerators*. In: Linkwitz, Eisele, Mönicke: IAG-Symp. Applications of Geodesy to Engineering, Stuttgart, 1991, Bd 108, Springer Verlag, 1993
- [16] SCHWARZ, W.: (2004) - *Genauigkeitsmasse richtig interpretieren*. Schriftenreihe des DVW, Band 46, Wißner Verlag, Augsburg
- [17] WEITHE, G.: (2010) – *Tunnelvermessung am Beispiel des Neuen Jagdbergtunnels (BABA 4) in Thüringen*. Vermessung und Geoinformation – MAGAZIN, 5/2010
- [18] WILHELM, W.: (1993) - *Empirische Bestimmung der Seitenrefraktion an 10 Objekten der Praxis*, Bericht 219, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich
- Anschriften der Verfasser:  
o. Univ. Prof. Dr-Ing. habil. HENRYK BRYŚ  
Instytut Geotechniki  
Politechnika Krakowska  
ul. Warszawska 24, 31-155 KRAKÓW  
E-Mail: hbrys@usk.pk.edu.pl
- o. Univ. Prof. Dr-Ing. habil. EDWARD OSADA  
Wydział Nauk Technicznych  
Dolnośląska Szkoła Wyższa  
ul. Strzegomska 47, 53-611 WROCLAW  
E-Mail: edward.osada@pwr.wroc.pl