



Durchschlagsprognose für das ÖBB Infrastrukturprojekt „Semmering-Basistunnel neu“

Klaus Macheiner und Johannes Fleckl-Ernst, Graz

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

Kurzfassung

Für lange und komplexe Tunnelprojekte ist eine a-priori-Prognose der zu erwartenden Durchschlagsgenauigkeiten unverzichtbar. Darauf aufbauend werden verbindlich die Anforderungen für den Bau sowie die Vortriebs- und Kontrollvermessungen festgelegt. Anhand des ÖBB Infrastrukturprojekts „Semmering-Basistunnel neu“ werden die Kriterien dieser Prognoserechnungen diskutiert und verschiedene Varianten miteinander verglichen. Besonderheiten wie Zugangsstollen und Schächte bei Zwischenangriffen werden entsprechend berücksichtigt. Die Beachtung von Erfahrungen und Empfehlungen aus anderen Tunnelprojekten führt auch hier zu vergleichsweise geringen Quer- und Höhenkomponenten in den Durchschlagspunkten. Geringe Querfehler können jedoch nur durch den Einsatz von zahlreichen Kreiselazimuten gewährleistet werden, die bei diesem Projekt zu den Schlüsselbeobachtungen zählen.

Schlüsselwörter: ÖBB, Semmering-Basistunnel neu, Durchschlagsprognose, Durchschlagsfehler, Netzsimulation

Abstract

Long and complex tunnelling projects require the a-priori-prognosis of the expected breakthrough accuracies to define the specifications regarding tunnel construction and tunnel surveying. Based on the infrastructure project „Semmering base tunnel“ commissioned by the Austrian Federal Railways (ÖBB) the criteria of such an a-priori-network simulation are discussed and different versions are compared. Specific features like access tunnels and access shafts are regarded. Considering the experiences and recommendations of other tunnelling projects yields relatively small transverse and height errors. Small transverse errors can, however, only be ensured by numerous gyroscope observations. These measurements emerge to the key observations in this project.

Keywords: Austrian Federal Railways (ÖBB), Semmering base tunnel, breakthrough prognosis, breakthrough error, network simulation

1. Einleitung

Vor der Realisierung eines großen Tunnelprojektes ist aus vermessungstechnischer Sicht zu klären, welche Durchschlagsgenauigkeiten bei vorgegebenem Bauablaufplan und existierendem Grundlagennetz zu erreichen sind. Darauf ist unter anderem die Ausschreibung der Bauleistungen bzw. der tatsächlich auszuführenden Vermessungsarbeiten auszurichten.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dieser Thematik und untersucht mit dem Werkzeug der a-priori-Netzsimulation anhand verschiedener Varianten und Szenarien die erreichbaren Genauigkeiten.

2. Projektvorstellung

2.1 Die neue Südbahn

Im Rahmen der „neuen Südbahn“ werden in Österreich derzeit die Großbauprojekte „Hauptbahnhof Wien“, „Semmering-Basistunnel neu“, „Umbau Graz Hauptbahnhof“ und „Koralmbahn“ von der ÖBB-Infrastruktur AG geplant und gebaut. Diese ersetzen bzw. ergänzen die

bestehende Schieneninfrastruktur aus dem 19. Jahrhundert.

Neben der nationalen Bedeutung der „neuen Südbahn“ als Verbindung der Bundeshauptstadt Wien mit den Landeshauptstädten Graz und Klagenfurt sind diese Vorhaben, auch im internationalen Kontext betrachtet, von enormer Wichtigkeit. Als Bestandteil des Baltisch-Adriatischen Korridors wird der Großraum Polen/Tschechien mit der Adria bzw. dem norditalienischen Wirtschaftsraum verbunden, [1].

2.2 Semmering-Basistunnel neu

Der rund 27.3km lange Semmering-Basistunnel neu (SBTN, Abbildung 1) wird künftig die Bahnhöfe Gloggnitz und Müzzzuschlag auf direktem Wege miteinander verbinden. Nach dem Projektauftrag im Frühjahr 2005 wurde die Trasse Pfaffensattel in einem mehrjährigen Planungsprozess aus insgesamt 13 möglichen Varianten als beste Trasse ausgewählt. Diese wurde vertieft erkundet und im Zuge einer zweijährigen Maßnahmenplanung optimiert. Die

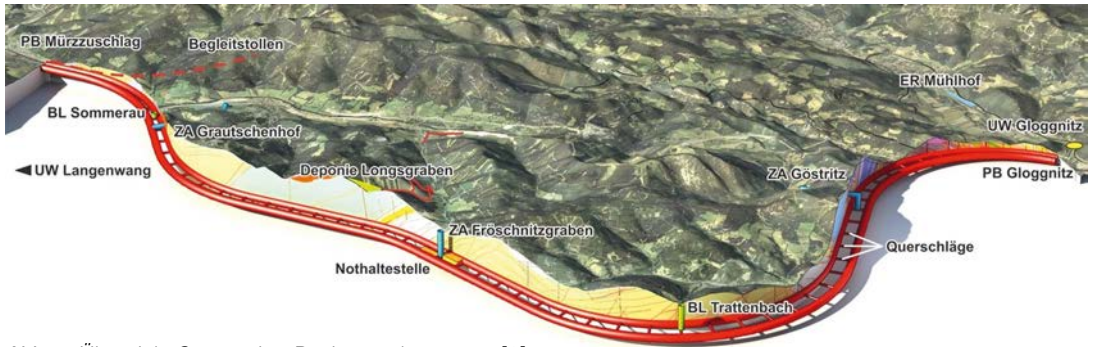


Abb. 1: Übersicht Semmering-Basistunnel neu, aus [2]

Ergebnisse dieser Untersuchungen waren die Grundlagen für die Ausarbeitung der UVE- und EB-Einreichunterlagen (UVE: Umweltverträglichkeitserklärung, EB: eisenbahnrechtlich). Der Semmering-Basistunnel neu besteht aus zwei parallel verlaufenden, eingleisigen Tunnelröhren (lichte Querschnittsfläche ca. 42 m^2) mit Querschlägen in maximalen Abständen von 500 m, vgl. [2].

Der SBTN wird als Hochleistungsstrecke errichtet und ermöglicht eine bestmögliche Befahrbarkeit für Personen- und Güterzüge. Mindestradien von 2792 m erlauben eine Geschwindigkeit von 230 km/h und Regellängsneigungen von maximal 8,5 Promille erlauben die Führung von schweren Güterzügen in Einfachtraktion. Nach Inbetriebnahme der Strecke wird sich die Fahrzeit von Graz nach Wien von derzeit knapp 2 h 30 min auf unter 2 h reduzieren.

Der SBTN wird an den Tunnelportalen in das ÖBB- Bestandsnetz eingebunden. Die Umbauten in den Bahnhöfen Gloggnitz und Mürrzusschlag stellen die zeitgemäße Verknüpfung für den Personennah- und Fernverkehr dar und ermöglichen die betriebliche Führung (Überholgleise) von bis zu 760 m langen Güterzügen.

Aus baugelastischen und topographischen Gründen wurden drei Zwischenangriffe (ZA Göstritz, ZA Frörschnitzgraben und ZA Grautschenhof) vorgesehen, die das Auffahren des Tunnels in drei Abschnitten ermöglichen. Im mittleren Tunnelabschnitt (Frörschnitzgraben) ist im Endzustand eine

Nothaltestelle situiert, deren Ereignisfalllüftung über einen ca. 400 m hohen Lüftungsschacht mit der Oberfläche verbunden ist. Das Projektgebiet ist in einem geologisch komplex gebauten Abschnitt der Ostalpen gelegen. Auf engem Raum treten hier mehrere geologische Großeinheiten auf, die durch tektonische Deckengrenzen voneinander getrennt sind. Der Untergrund ist aus einer Vielzahl unterschiedlicher Gesteinsarten aufgebaut, die sowohl hinsichtlich geotechnischer als auch hydrogeologischer Eigenschaften eine große Bandbreite aufweisen. Die maximale Überlagerung beträgt 870 m.

Die obertägigen Bauarbeiten im Portalbereich Gloggnitz und im Bereich Frörschnitzgraben laufen bereits. Das erste Tunnelbaulos beginnt mit Jänner 2014 beim ZA Frörschnitzgraben, die Inbetriebnahme des SBTN ist im Jahr 2024 vorgesehen.



Abb. 2: Geplanter Trassenverlauf mit Zwischenangriffen und Durchschlagspunkten

3. Vorgaben und Annahmen für die Durchschlagsimulation

3.1 Rahmenbedingungen aus dem Bauablauf

Gemäß geplantem Bauablauf gibt es drei Durchschlagspunkte, zu denen der Vortrieb von jeweils zwei Seiten erfolgt. Vom Portal Gloggnitz aus wird in Richtung ZA Göstritz vorgetrieben (Durchschlagspunkt D1), von Göstritz aus zu D1 und D2. Der Durchschlagspunkt D2 wird auch vom Vortriebsteil Fröschnitzgraben erreicht (längster Teil mit ca. 8.7 km Vortriebslänge). Vom Schacht Fröschnitzgraben wird in Richtung Mürzzuschlag zum Durchschlagspunkt D3 vorgetrieben, der auch vom ZA Grautschenhof erreicht wird. Vom ZA Grautschenhof erfolgt der Vortrieb bis nach Mürzzuschlag. Vom Portal in Mürzzuschlag aus erfolgt kein klassischer Vortrieb. Der Punkt D4 ist also ein freies Ende eines Vortriebsnetzes und kein klassischer Durchschlagspunkt. Eine Übersicht der Durchschlagspunkte, Portale und Zwischenangriffe zeigt Abbildung 2.

Aus den projektierten Gleisachsen ergeben sich die auftretenden Vortriebslängen gemäß Tabelle 1 (Spalte 6), die aus den Stationen der Portale, Zwischenangriffe und Durchschlagspunkte berechnet werden (Stationen bezogen auf Gleis 1). Weiters können die vorgesehenen Vortriebsmethoden (Vtm.) entnommen werden (NÖT für zyklischen Vortrieb nach der Neuen Österreichischen Tunnelbauweise und TVM für kontinuierlichen Vortrieb mit einer Tunnelvortriebsmaschine).

#	von	Station	nach	Station	[km]	Vtm.
1	Gloggnitz	76+635	D1	81+297	4.7	NÖT
2	Göstritz	81+849	D1	81+297	0.6	NÖT
3	Göstritz	81+849	D2	83+950	2.1	NÖT
4	Fröschnitz	92+631	D2	83+950	8.7	TVM
5	Fröschnitz	92+631	D3	96+900	4.3	NÖT
6	Grautsch.	100+477	D3	96+900	3.6	NÖT
7	Grautsch.	100+477	D4	103+913	3.3	NÖT
Summe					27.3	

Tab. 1: Geplante Vortriebe

3.2 Besonderheiten und Herausforderungen für die Vermessung

Aus ingenieurgeodätischer Sicht stellen sich neben den generell hohen Anforderungen im Tunnelbau bei der ausgewählten Trasse „Pfaffenstadel“ drei zusätzliche Herausforderungen an die Positions- und Richtungsübertragung:

- Der ZA Göstritz erfolgt über einen ca. 1 km langen Zugangsstollen. Am Ende dieses Stollens führt ein ca. 200 m tiefer Schacht auf das Niveau der Tunnelachse, von wo aus ein beidseitiger Vortrieb erfolgen wird.
- Der Schacht Fröschnitzgraben weist eine Tiefe von über 400 m auf. Von der Schachtsohle aus soll das Tunnelbauwerk in beide Richtungen vorgetrieben werden.
- Vom ZA Grautschenhof erreicht man die Tunnelachse über einen etwas mehr als 1 km langen Zugangsstollen. Auch hier soll anschließend ein beidseitiger Vortrieb erfolgen.

Zuverlässige Ablotungen in derartig tiefen Schächten (z.B. [3]) sind ebenso anspruchsvoll wie die Richtungsübertragung am Ende eines Zugangsstollens bzw. am Schachtfuß (z.B. [4]). Bei der Richtungsübertragung ist der Einsatz von Vermessungskreiseln erforderlich, um Genauigkeitstheoretisch sinnvolle Ergebnisse zu erzielen.

3.3 Präzision der Messungen

Die für die Durchschlagsprognose verwendeten Präzisionen auftretender Messgrößen sind in Tabelle 2 angeführt und beziehen sich auf üblicherweise durch Mehrfachmessungen bestimmte Mittelwerte, die weiterverarbeitet werden. Die Richtungs-, Zenitwinkel-, und Distanzmessung mit den angenommenen Präzisionen ist mit modernen Totalstationen [5] jedenfalls möglich. Die Präzision für Azimute kann gemäß [6] ebenso erreicht werden. Die Ablotungsgenauigkeit wird gemäß [7] festgelegt, Zentrierfehler für Lage und Höhe werden bewusst nicht allzu optimistisch angenommen. Für die Prognoserechnung im Koralmtunnel [8] wurden weitestgehend dieselben Werte angenommen.

Messgröße	Präzision
Richtung	0.3 mgon
Zenitwinkel	0.3 mgon
Schrägdistanz	1 mm + 2 ppm
Azimut	1.0 mgon
Ablotung	3 mm / 100 m
Zentrierung Lage	1 mm
Zentrierung Höhe	1 mm

Tab. 2: Präzision der Messungen

Bei einer a-priori-Prognose werden nur zufällige Effekte in die Gewichtsmatrix eingeführt, z.B. [9]. Genauigkeit wird also mit Präzision gleichgesetzt. Dies ist aber nur dann gerechtfertigt, wenn alle systematischen Effekte vollkommen

erfasst und korrekt an die Messwerte angebracht werden. Bei großen ingenieurgeodätischen Projekten sind dies insbesondere sämtliche Streckenreduktionen (Meteorologie, Höhe bzw. Bezugshorizont, Projektion), die Berücksichtigung von Lotabweichungen und Geoidundulationen (Richtungen, Zenitwinkel; Kombination von Höhen aus GPS-Messungen und Nivellement) sowie die korrekte Reduktion von gemessenen Kreisellazimuten und ggf. rohen Nivellementhöhen. Diese Vorverarbeitungsschritte werden daher für sämtliche nachfolgenden Prognoserechnungen als richtig durchgeführt angesehen.

Die Präzision der aus Zenitwinkeln und Schrägdistanzen mit den in Tabelle 2 angeführten Werten bestimmten Höhenunterschiede (inkl. der Berücksichtigung der Höhen-Zentrierfehler) entspricht bei Visurweiten von ca. 250 m und annähernd horizontalen Visuren jener eines mit ca. 2 mm/km durchgeführten Nivellements. Dieser Kennwert ist weitestgehend repräsentativ für die Situation untertage, sodass für die Simulation der Höhenkomponente des Durchschlagsfehlers die Verwendung von trigonometrisch bestimmten Höhen ausreichend ist. Bei den tatsächlichen Vortriebs- und Kontrollmessungen stellt eine Höhenbestimmung mittels Nivellement eine zusätzliche unabhängige Kontrollmöglichkeit dar, auf die keinesfalls verzichtet werden sollte.

3.4 Netzkonfiguration obertage

Für eine frühere Variante des Semmering-Basistunnels wurde in den Jahren 1990 bis 1994 ein Grundlagennetz angelegt, das ausführlich in [10] beschrieben ist. Zahlreiche Stabilisierungen (Pfeiler) dieses Netzes sind noch unversehrt vorhanden.

Bedingt durch die Projektsänderung führt die neue Trasse (SBTN, Abbildung 2) jedoch in Bereiche, die vom ursprünglichen Grundlagennetz nicht erfasst wurden. Somit wurden bis zum Jahr 2011 das Grundlagennetz mehrfach durch GPS-Messungen erweitert und Teile des ursprünglichen Netzes überprüft, vgl. [11]. Ausgewählte Netzpunkte aus [11] werden mit ihren vorläufigen Gebrauchskordinaten als Ausgangspunkte für die Durchschlagssimulation verwendet, wobei ein zwangsfreies, homogenes und formtreues Netz vorausgesetzt wird.

Bei Portalen bzw. Zwischenangriffen und Schachtbauwerken werden, wenn vorhanden, bereits bei der Erweiterung des Grundlagennetzes bestimmte Punkte als Anschlusspunkte verwendet. Zudem werden je Portal drei Pfeiler in unmittelbarer Nähe des Bauwerks angenommen,

die einen Übergang zwischen obertägigem und untertägigem Netz ermöglichen.

Für die Richtungsübertragung werden in jedem Portalnetz Fernziele angenommen. Diese werden gemäß tatsächlicher Sichtbarkeit bzw. mit Hilfe von Punktopographien nahegelegener amtlicher Festpunkte ausgewählt.

Bei den Zwischenangriffen Göstritz und Grautschenhof sind Zugangsstollen vorgesehen, in denen ebenfalls Netzpunkte angenommen werden. In Göstritz und beim Schacht im Frörschnitzgraben sind zudem Ablotungen erforderlich (Höhenunterschied: 247 m bzw. 406 m).

3.5 Netzkonfiguration untertage

Die für die Prognoserechnung angenommene Konfiguration des untertägigen Netzes lehnt sich stark an die Empfehlungen in [7] und [12] an:

- In jeder Tunnelröhre wird ein Präzisionspolygonzug geführt, Querverbindungsmessungen werden zwischen jedem 3. bis 4. Querschlag (Abstand: ca. 1.4 bis 1.8 km) vorgesehen. In Stations- und Kavernenbereichen (Zwischenangriffe) werden auch am Beginn und am Ende des Kavernenbauwerks Verbindungsmessungen vorgesehen. Da noch kein endgültiger Ablaufplan für die Errichtung der Querschläge existiert, werden auch Varianten ohne Querverbindungsmessungen berechnet. Der Verzicht auf Querverbindungen ist jedoch für eine spätere Realisierung nicht empfehlenswert, die Varianten sollen nur die Wichtigkeit dieser Messungen unterstreichen.
- Die Visurweiten richten sich nach der Achsgeometrie und den Regelquerschnitten. Der minimal auftretende Bogenradius beträgt $R = 2792$ m, ein mittlerer Radius für den Regelquerschnitt ist $r = 4$ m. Eine sinnvolle Visurweite im Bogenbereich beträgt somit ca. 250 m. In geraden Abschnitten werden Visurweiten von 400 m vorgesehen.
- Wenn möglich sollen übergreifende Messungen vorgesehen werden (Visuren auch zum vorletzten bzw. übernächsten Punkt). Dies würde jedoch bedingt durch die Achsgeometrie teilweise sehr kurze Visurweiten erfordern. In Bogenabschnitten (Großteil des Tunnels) wurde daher zugunsten größerer Visurweiten auf übergreifende Messungen verzichtet. Diese Vorgehensweise wird auch in [7] empfohlen.
- Das untertägige Netz wird in regelmäßigen Abständen durch Kreisellazimute in jeder Röhre gestützt. Die Anzahl der Azimute wird durch verschiedene Varianten festgelegt. Bei

Zwischenangriffen und Schächten (Ablotung!) wird jedenfalls davon ausgegangen, dass die Richtungsübertragung mit Kreisellazimuten erfolgt.

Die Präzisionen der in der genannten Konfiguration verwendeten Messgrößen wurden bereits in Abschnitt 3.3 festgelegt und sind bewusst eher konservativ angenommen, um den nicht optimalen Messbedingungen untertage Rechnung zu tragen.

4. Beurteilungskriterien für die Durchschlagsqualität

4.1 Relative Fehlerellipsen und Durchschlagsfehler

Die Beurteilung der Durchschlagsqualität bei Tunnelbauprojekten erfolgt üblicherweise mit Hilfe der (mittleren) relativen Fehlerellipsen der in den jeweiligen Vortriebsteilen mit unterschiedlicher Punktnummer, jedoch identen (Näherungs-) Koordinaten geführten Durchschlagspunkte, vgl. z.B. [12], [13] und [14]. Aufgrund der Distanz Null zwischen unterschiedlichen Punkten mit identen Koordinaten ist diese relative Fehlerellipse datumsunabhängig. Die berechneten Werte gelten somit unabhängig von der Netzlagerung (sämtliche verwendeten simulierten Messdaten sind als korrekt reduziert angesehen, vgl. Abschnitt 3.3).

Aus den relativen Fehlerellipsen werden mit den bekannten Richtungswinkeln der Tunnelachse(n) in den Durchschlagspunkten die Längs- und Querkomponenten des Durchschlagsfehlers berechnet. Für die Höhenkomponente ergibt sich der Durchschlagsfehler aus den Höhenfehlern der beiden getrennt geführten Durchschlagspunkte.

Die berechneten Komponenten (längs, quer, Höhe; eindimensionale Zufallsvariablen) beziehen sich auf eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von $P = 68\%$ („ 1σ “). Für eine höhere Sicherheitswahrscheinlichkeit (z.B. $P = 95\%$) sind die Komponenten mit den entsprechenden Quantilen der Normalverteilung zu multiplizieren. Wäre stattdessen ein Vertrauensbereich für die (relative) 2D Punktlage gesucht, müsste die Skalierung der (relativen) Fehlerellipse mit den Quantilen der Chi-Quadrat-

Verteilung erfolgen. Dies ist jedoch hier nicht von Interesse.

4.2 Zuverlässigkeit

Neben der Durchschlagsprognose basierend auf den aus den relativen Fehlerellipsen gewonnenen Längs- und Querkomponenten ist eine Analyse der Zuverlässigkeit des Netzentwurfs empfehlenswert. Bedingt durch die ungünstige Ausgangssituation untertage (langgestreckte Polygonzüge bzw. -netze) sind jedoch z.B. minimal detektierbare nicht-zufällige Fehler von Richtungsbeobachtungen teilweise groß im Verhältnis zur Messpräzision. Die Zuverlässigkeit des Netzentwurfs ist nicht optimal – bauwerksbedingt jedoch nicht anders lösbar. Die Analyse der Zuverlässigkeit im untertägigen Netz wird mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit für die Individualtests von $P = 99.9\%$ und einer Testgüte von 80% durchgeführt. Für die Begriffsbestimmungen siehe z.B. [13].

5. Varianten und Ergebnisse

5.1 Anzahl und Verteilung von Kreisellazimuten

Für die Untersuchung verschiedener Varianten werden zunächst vier unterschiedliche Konfigurationen hinsichtlich der Anzahl der zu beobachtenden Kreisellazimute (Az.) festgelegt (Varianten V1 bis V4, Tabelle 3). Diese Varianten gehen von möglichen Querverbindungsmessungen bei jedem 3. bis 4. Querschlag (ca. alle 1.4 bis 1.8 km) zwischen beiden Tunnelröhren aus.

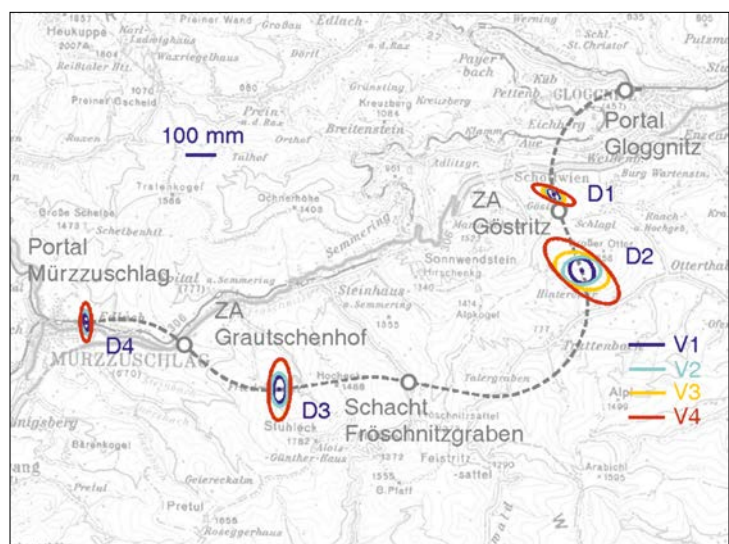


Abb. 3: Relative Fehlerellipsen in den Durchschlagspunkten D1 bis D4 für vier verschiedene Varianten

Die angenommenen Varianten erstrecken sich von der erforderlichen Mindestkonfiguration (V4) bis hin zur ausreichend mittels Kreiselazimuten kontrollierten Version (V1). Eine Richtungsübertragung vollkommen ohne Verwendung von Kreismessungen, beispielsweise durch Ausnützung von jeweils zwei Schächten (mindestens zwei Abblotungspunkte), führt aufgrund der geringen Lotungsabstände zu keinen genaugkeitstheoretisch vertretbaren Ergebnissen und wird nicht weiter verfolgt.

Zwischen zwei Varianten wird die Anzahl der Azimute jeweils in etwa verdoppelt bzw. halbiert. Die große Spannweite der Konfigurationen soll den Größenordnungsunterschied in den Durchschlagspunkten deutlich machen. Bei der tatsächlichen Durchführung von Messungen wird man versuchen, sich so nah wie möglich im Bereich von V1 zu bewegen. Für die Bezeichnung der Vortriebssteile in den Anmerkungen von Tabelle 3 siehe Tabelle 1.

Var.	Az	Abstand [km]	Anmerkung
V1	38	ca. 1.5–2	Az. auch kurz vor Durchschlag
V2	22	ca. 1.5–2	kein Az. 1 km vor Durchschlag
V3	10	ca. 3–4	Az. nur bei Vortrieben 1 und 4
V4	6	—	Az. nur bei ZA / Schächten

Tab. 3: Berechnungsvarianten mit unterschiedlicher Anzahl an Kreiselazimuten (Az.)

In Abbildung 3 sind die relativen Fehlerellipsen in den Durchschlagspunkten D1 bis D4 für die Varianten V1 bis V4 aus Tabelle 3 dargestellt. Die Vergrößerung der Halbachsen mit abnehmender Anzahl der Kreiselazimute ist klar ersichtlich. Beachtenswert ist auch die Verdrehung der großen Halbachsen der relativen Fehlerellipsen (und auch der nicht gezeigten Fehlerellipsen am Ende der Vortriebssteile) gegenüber der Tunnelachse bei bogenförmigem Verlauf. In diesem Fall haben sowohl Richtungs- als auch Distanzmesspräzision einen Einfluss auf den Fehleranteil quer zur Achse. Im Gegensatz dazu wird bei geradlinigem Verlauf der Queranteil maßgeblich von der Richtungspräzision beeinflusst.

Die aus den relativen Fehlerellipsen und dem Achsverlauf berechneten Querfehler werden in Abbildung 4 gezeigt. Die Variante V1 mit 38 zu beobachtenden Kreiselazimuten (19 je Tunnelröhre) führt in keinem Durchschlagspunkt zu einem Querfehler von mehr als 45 mm (Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 68\%$, „ 1σ “). Mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% kann daher angenommen werden, dass beim

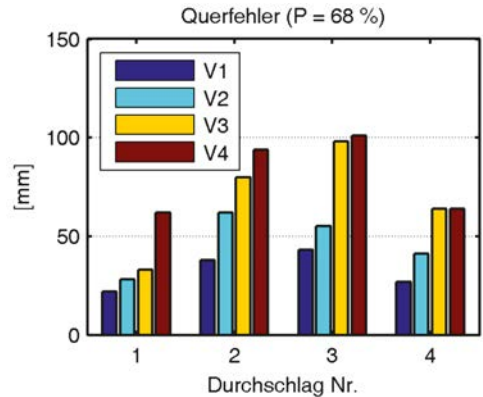


Abb. 4: Querfehler in den Durchschlagspunkten für vier verschiedene Varianten

gesamten Tunnelprojekt kein Querfehler 90 mm überschreitet.

Bei einer nicht empfehlenswerten Reduktion der Kreiselazimute auf weniger als 10 (5 je Röhre) vergrößern sich die Querfehler auf bis zu 100 mm. Querfehler von bis zu 20 cm sind daher mit einer Wahrscheinlichkeit von 95% keine Abweichungen vom angenommenen Modell.

Die in [7] vorgeschlagene Messanordnung für Kreiselazimute (Abstand 1.5 bis 2 km) wird daher auch für die Vortriebs- und Kontrollmessungen beim SBTN empfohlen. Wenn möglich sollen zur Richtungsstabilisierung auch Messungen kurz vor den Durchschlagspunkten erfolgen.

5.2 Verbindungsmessungen zwischen beiden Tunnelröhren

Da noch kein endgültiger Zeitplan für die Errichtung der Querschläge existiert, werden die Varianten V1 bis V4 auch ohne Verbindungsmessungen zwischen beiden Tunnelröhren

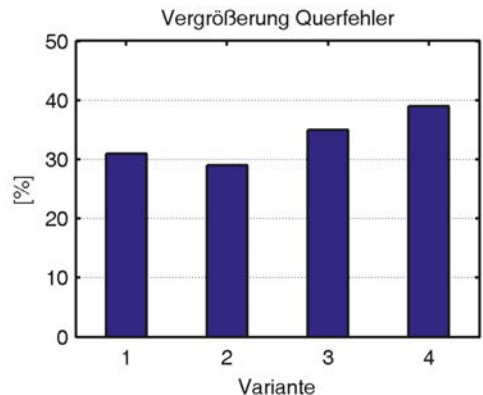


Abb. 5: Durchschnittliche Vergrößerung des Querfehlers in den Durchschlagspunkten für die Varianten V1 bis V4 ohne Querschläge

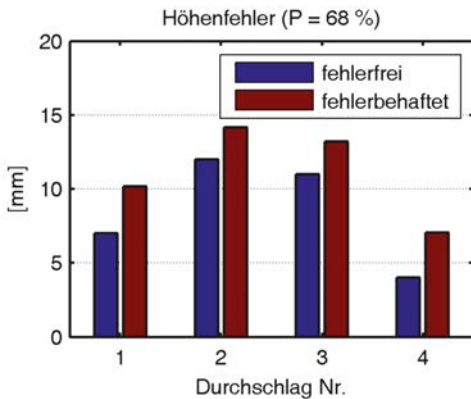


Abb. 6: Höhenfehler in den Durchschlagpunkten bei fehlerfreiem und fehlerbehaftetem Grundlagennetz

berechnet. Dabei ergeben sich die in Abbildung 5 dargestellten durchschnittlichen prozentuellen Änderungen je Variante (die Abweichungen vom Mittelwert je Durchschlagspunkt betragen ca. 5% und werden nicht gesondert dargestellt). Ohne Messungen über Querschläge zwischen den untertägigen Teilnetzen in beiden Röhren ergibt sich daher ein um mehr als 30% schlechteres Ergebnis.

Verbindungsmessungen zwischen beiden Tunnelröhren über Querschläge tragen also wesentlich zur Qualitätssteigerung im untertägigen Netz bei und dürfen keinesfalls außer Acht gelassen werden. Die Herstellung der Querschläge und deren Nutzung für die Vermessung wird daher im Bauablauf entsprechend vorgesehen.

5.3 Fehlerfreies vs. fehlerbehaftetes Grundlagennetz

Sämtliche bisher beschriebenen Berechnungen gehen von einem fehlerfreien homogenen Grundlagennetz aus, um ausschließlich den untertägigen Netzentwurf zu beurteilen (Ablotungen, Vortriebslängen, Kreiselazimute, Querverbindungsmessungen). Die Homogenität wird durch das Grundlagennetz aus [11] in hohem Maße bestätigt. Fehlerfreiheit für die Grundlagenpunkte kann jedoch nicht vorausgesetzt werden. Somit werden sämtliche Varianten unter der Annahme von fehlerbehafteten Ausgangspunkten (Portalpunkte, Fernziele) wiederholt. Als Standardabweichungen für Lagekoordinaten und Höhen werden dabei $s_y = s_x = s_H = 10\text{mm}$ angenommen. Die Auswirkungen auf Längs- und Querfehler betragen zwischen 1 und 3mm und sind im Vergleich zu den in Abbildung 4 dargestellten Werten vernachlässigbar. Den Vergleich zwischen den Höhenfehlern in den Durchschlagpunkten bei fehlerfreiem bzw. fehlerbehaftetem Grundlagennetz zeigt Abbildung 6.

Die Auswirkung der Unsicherheit der Ausgangshöhen beträgt jeweils ca. 3mm. In jedem Durchschlagspunkt kann also ein Höhenfehler von weniger als 15mm erreicht werden. Mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95% wird also in keinem Durchschlagspunkt ein Höhenfehler von mehr als 30mm auftreten.

5.4 Zuverlässigkeit

Exemplarisch wird die Analyse für die Variante V1 beschrieben. Für die weiteren Varianten ergeben sich zum Teil noch ungünstigere Werte. Erläutert wird nachfolgend der Einfluss von gerade nicht erkennbaren nicht-zufälligen Fehlern (MDB, minimal detectable bias), welche in der Ausgleichung verbleiben, ohne mit Hilfe der Teststatistik eindeutig als Ausreißer identifiziert und nachfolgend eliminiert werden zu können.

Die Grundform des untertägigen Netzes (langgestreckte Polygonzüge mit Querverbindungen bzw. wenn möglich übergreifenden Messungen) erschwert eine hohe Zuverlässigkeit des Entwurfs. Die minimal detektierbaren nicht-zufälligen Fehler für Richtungsbeobachtungen liegen beispielsweise je nach Abschnitt (Querschlag oder Kreiselazimut in der Nähe) im Bereich von 3 bis 7 mgon. Dies bedeutet, dass mit Hilfe statistischer Tests nicht-zufällige Fehler erst ab einer Größenordnung entdeckt werden können, die das zehn- bis zwanzigfache der angenommenen Messpräzision erreichen. Größte Sorgfalt ist daher bekanntermaßen bei der Durchführung der Richtungsmessung erforderlich (z.B. Seitenrefraktion durch punktuelle Wärmequellen).

Für Zenitwinkel- und Streckenbeobachtungen ist die Situation etwas besser, da durch (verschränkte) Hin- und Rückmessungen eine höhere Kontrollierbarkeit gegeben ist als bei Richtungen. Die minimal detektierbaren nicht-zufälligen Fehler liegen hier bei ca. 2 mgon für Zenitwinkel und ca. 10mm für Strecken. Dies bedeutet aber trotzdem einen Faktor von ca. 7 bis 10 im Vergleich zur Messpräzision. Zenitwinkel und Strecken sind daher ebenfalls sorgfältig zu beobachten, vor allem, wenn man an die ebenfalls nicht optimale Situation unter Tage denkt.

Azimute sind um einiges besser kontrolliert als Richtungen, die zugehörigen MDBs liegen zwischen ca. 5 und 7 mgon. Aber auch hier sind eindeutig detektierbare nicht-zufällige Fehler um ein Vielfaches (Faktor 5 bis 7) größer als die angenommene Messpräzision.

Insgesamt ist bei der späteren Beobachtung selbst größte Sorgfalt erforderlich, um die für die Simulationen angenommenen Präzisionen auch

tatsächlich unter realen Bedingungen zu erzielen – die Kennwerte der Instrumentenhersteller verführen hier leicht zu allzu optimistischen Annahmen. Aus dem untertägigen Netzentwurf selbst ist bedingt durch die ungünstige Geometrie eine eindeutige Identifizierung von Ausreißern mit Größenordnungen von z.B. 2 mgon für Richtungen nicht möglich.

6. Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag befasste sich mit der Durchschlagsprognose für das Projekt „Semmering-Basistunnel neu“. Der Bauablauf für diesen Tunnel sieht drei klassische Durchschlags-szenarien und ein offenes Ende bei Müzzuschlag vor. Vortriebe erfolgen vom Portal Gloggnitz, zwei Schächten (einer davon mit Zugangsstollen) und einem Zugangsstollen ohne Schacht aus.

Anhand verschiedener Varianten wurde gezeigt, dass die im Tunnelbau besonders wichtigen Querfehler in allen Durchschlagspunkten maximal 10 cm (1σ) betragen. Bei der favorisierten Variante V1 bleibt der Querfehler überall unter 5 cm. Mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % kann daher für V1 ausgeschlossen werden, dass der Querfehler tatsächlich größer als 10 cm sein wird.

Der größte Höhenfehler bleibt selbst bei der Annahme eines fehlerbehafteten Grundlagentetzes unter 15 mm, sodass mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von 95 % angenommen werden kann, dass kein Höhenfehler mehr als 3 cm betragen wird.

Alle diese Angaben beziehen sich auf rein zufällige Effekte bei den durchzuführenden Messungen und setzen voraus, dass sämtliche systematischen Einflüsse korrekt berücksichtigt werden.

Referenzen

- [1] Eicher H. (2006): Kärnten und die Baltisch-Adriatische-Verkehrsachse. Schriftenreihe der Verkehrsplanung in Kärnten, Heft 4, Klagenfurt
- [2] Ekici Z., Wagner O. K., Rüegg C., Weigl J., Wilfinger N. (2011): Selection of tunnelling methods for the New Semmering Base Tunnel. In: Geomechanics and Tunneling 4/2011, No. 5, S. 544 -552

- [3] Schätti I., Ryf A. (2004): Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. In: Geomatik Schweiz 7/2004, S. 424 - 427
- [4] Neuhierl T. (2007): Quo vadis Gotthard Basistunnel? – Wie die Richtungsübertragung für den längsten Tunnel der Welt sichergestellt wird. In: Mitteilungen des DVW Bayern 4/2007, S. 449 - 465
- [5] Leica Geosystems (2009): Leica TPS 1200 Serie – Technische Daten. Leica Geosystems AG, Heerbrugg (CH)
- [6] Grillmayer E. (2003): Untersuchungen systematischer Fehlereinflüsse bei Messungen mit dem Kreisel DMT Gyromat 2000. Shaker, Aachen
- [7] Stengele R., Schätti-Stählin I. (2010): Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel. In: Geomatik Schweiz 12/2011, S. 548-557
- [8] ARGE Vermessung Koralmbahn ÖAW-TUG-Permann-Rinner (2009): Durchschlagssimulation Koralmtunnel: Berechnung von prognostizierten Durchschlagsfehlern im Koralmtunnel nach geplantem Bauprogramm. Unpublizierter Technischer Bericht, Vermessung H. Rinner (GZ 10569/11), Graz
- [9] Niemeier W. (2002): Ausgleichsrechnung: eine Einführung für Praktiker und Studierende des Vermessungs- und Geoinformationswesens. de Gruyter, Berlin
- [10] ARGE Vermessung Semmeringtunnel (1994): Semmering Basistunnel. Geodätische Grundlagen. Technischer Bericht, Vermessung Stolitzka, Maletz, Kollnprat; Wien, Villach, Klagenfurt
- [11] Döller H. (2011): GNSS-Grundlagentnetz Semmering-Basistunnel neu. Unpublizierter Technischer Bericht, Vermessung H. Döller (GZ 1755/08), Waidhofen / Thaya
- [12] Möser M., Müller G., Schlemmer H., Werner H. (Hrsg.; 2000): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Grundlagen. 3. Auflage. Wichmann, Heidelberg
- [13] Carosio A. (2008): Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung. Band 1. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 310, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich
- [14] Carosio A. (2006): Fehlertheorie und Ausgleichsrechnung. Band 2. Schriftenreihe des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie, Bericht Nr. 311, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich

Anschrift der Autoren

Dipl.-Ing. Dr. techn. Klaus Macheiner, Vermessungsbüro Dipl.-Ing. Horst Rinner, Kaiser-Franz-Josef-Kai 38, 8010 Graz.
E-Mail: klaus.macheiner@gmail.com

Dipl.-Ing. Johannes Fleckl-Ernst, ÖBB Infrastruktur AG, Geschäftsbereich Engineering Services, Vermessung & Datenmanagement, Griesgasse 11/I, 8020 Graz.
E-Mail: johannes.fleckl@oebb.at