



## Drei große Eisenbahn-Tunnelprojekte in Österreich – ein Vergleich ausgewählter Aspekte aus der Sicht der ingenieurgeodätischen Praxis

Klaus Macheiner, Graz

Dieser Beitrag wurde als „reviewed paper“ angenommen.

### Kurzfassung

Eisenbahn-Tunnelprojekte wie der Semmeringbasistunnel, der Koralmtunnel und der Brennerbasistunnel, welche sich derzeit in unterschiedlichen Errichtungsphasen befinden, sind aus ingenieurgeodätischer Sicht eine große Herausforderung. Um jedem einzelnen Projekt zum durchschlagenden Erfolg im wahrsten Sinne des Wortes zu verhelfen, sind umfangreiche Vorarbeiten erforderlich. Diese umfassen im Wirkungsbereich des Geodäten die Untersuchung und Realisierung eines geeigneten Grundlagentznetzes in Lage und Höhe unter Berücksichtigung der Einflüsse des Erdschwerefeldes. Weiters sind bereits in der Anfangsphase der Planungsarbeiten Berechnungen über die erzielbaren Durchschlagsgenauigkeiten anzustellen, um planungsseitig diesbezüglich Vorkehrungen treffen zu können. Ein Vergleich dieser Vorarbeiten bei allen drei Tunnelprojekten ist der Inhalt dieses Beitrags. Die Betrachtung der ausgewählten Aspekte erfolgt aus der Sicht der ingenieurgeodätischen Praxis.

**Schlüsselwörter:** Semmeringbasistunnel, Koralmtunnel, Brennerbasistunnel, Grundlagenvermessung, Durchschlagfehler

### Abstract

Railway tunnels like the Semmering base tunnel, the Koralm tunnel and the Brenner base tunnel, which are currently in different realization phases, are challenging projects – not only from a constructional, but also from a geodetic view. To lead each project to a success, comprehensive studies have to be undertaken. Considering the geodesist, these studies comprise the selection and realization of an appropriate basic surveying network (position and height) including influences of the Earth's gravity field. Moreover, calculations dealing with the attainable breakthrough errors have to be carried out at an early stage of the planning process in order to take appropriate measures. A comparison of these studies for the three mentioned tunnel projects is carried out in this article. The selected topics are compared as seen from geodetic practice.

**Keywords:** Semmering base tunnel, Koralm tunnel, Brenner base tunnel, basic surveying, breakthrough error

## 1. Einleitung

In Österreich werden derzeit drei Eisenbahn-Tunnelprojekte umgesetzt, welche vom Umfang und den Eckdaten international keinen Vergleich scheuen müssen. Es sind dies entlang des baltisch-adriatischen Korridors, [1], bzw. der „neuen Südbahn“ zum einen der Semmering Basistunnel (SBT) und der Koralmtunnel (KAT), zum anderen entlang der Achse Berlin – Palermo der Brenner Basistunnel (BBT). Durch den SBT wird die bestehende und für den aktuellen Personen- und Güterverkehr nicht mehr zeitgemäße Gebirgsbahn über den Semmering entlastet, der KAT ist Teil der neuen Koralmbahn zwischen Graz und Klagenfurt. Der BBT schafft eine direkte und leistungsfähige Verbindung zwischen Innsbruck und Franzensfeste (Italien). Eine schematische Situierung der drei Tunnelprojekte im übergeordneten Streckennetz der ÖBB zeigt Abbildung 1.

Diese drei Tunnelprojekte sind auch für die an der Grundlagen-, Vortriebs- und Kontrollvermessung beteiligten Ingenieurgeodäten eine große

Herausforderung, zumal sie Eckdaten aufweisen, welche in Österreich bisher einzigartig sind. Dies sind beispielsweise projektbezogene Besonderheiten wie Zugangstunnel und Schächte, aber auch die teilweise großen Vortriebs- bzw. Tunnelgesamtlängen. Aufgrund dieser Besonderheiten erscheint es lohnend, die drei Vorhaben aus ingenieurgeodätischer Sicht miteinander zu vergleichen. Dies soll wertfrei erfolgen und die



Abb. 1: Übersicht der drei Tunnelprojekte SBT, KAT und BBT (Quelle Hintergrundgrafik: ÖBB)

jeweiligen Vor- und Nachteile der getroffenen Festlegungen und Herangehensweisen herausstreichen. Die Gegenüberstellung erhebt keinesfalls den Anspruch auf Vollständigkeit, beachtet aber Aspekte, welche der Autor zumindest in Teilen bei jedem der drei vorgestellten Projekte bearbeitet hat. Dazu gehören einerseits einige Überlegungen und die praktische Umsetzung der Grundlagenvermessung mit allen relevanten Aspekten und andererseits die Untersuchungen zur erreichbaren Genauigkeit bei den Vortriebs- bzw. Kontrollmessungen.

## 2. Projekte im Detail

### 2.1 Semmering Basistunnel

Der rund 27,3 km lange SBT wird die Bahnhöfe Gloggnitz und Mürzzuschlag unterirdisch miteinander verbinden. Die Gleise werden pro Richtung jeweils in einer eigenständigen Röhre geführt, die beiden Tunnelröhren werden alle 500 m durch Querschläge miteinander verbunden, [2]. Die Längsneigung beträgt nahezu konstant 8,5 Promille, um den Höhenunterschied von rund 230 m zwischen den beiden genannten Bahnhöfen zu überwinden. Radien von 2800 m ermöglichen Geschwindigkeiten von bis zu 230 km/h.

Für die Errichtung des Tunnelbauwerkes wurden neben dem klassischen Portal (PB) in Gloggnitz drei Zwischenangriffe (ZA) vorgesehen: Göstritz, Fröschnitz und Grautschenhof. ZA sind bei langen Tunnels aufgrund der ansonsten extrem langen Bauzeit und einer anders kaum durchführbaren Logistik unvermeidlich. Vom Portal in Mürzzuschlag erfolgt kein Vortrieb. Sämtliche ZA erfolgen aufgrund der Topographie entweder über einen Zugangstunnel (ZT) mit anschließenden Vertikalschächten (Göstritz) oder über Vertikalschächte (Fröschnitz, Grautschenhof). Eine schematische Übersicht des SBT

zeigt Abbildung 2. Der Vortrieb von Fröschnitz in Richtung Göstritz wird mittels Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) aufgeföhren, alle übrigen Vortriebe konventionell (Sprengvortrieb, NÖT).

Die Vorarbeiten zum SBT sind seit 2013 im Gange, das erste Tunnelbaulos SBT 2.1 (Fröschnitzgraben) seit Jänner 2014. Das zweite Baulos SBT 1.1 (Gloggnitz) läuft seit Juli 2015, das dritte (SBT 3.1, Grautschenhof) wird im Mai 2016 starten. Die Inbetriebnahme ist für 2026 geplant.

### 2.2 Koralmtunnel

Der zweite Basistunnel entlang der „neuen Südbahn“ unterquert das Massiv der Koralpe zwischen Deutschlandsberg (Steiermark) und St. Andrä im Lavanttal (Kärnten). Der 32,9 km lange KAT ist das Herzstück der „Koralmbahn“, welche als Neubaustrecke Graz über die Weststeiermark und das Lavanttal mit Klagenfurt verbinden wird. Teile der Koralmbahn sind als Nahverkehrsstrecke bereits in Betrieb (Abschnitt Graz - Wettmannstätten). Wie der SBT ist der KAT als zweiröhriker Tunnel mit je einem Streckengleis pro Röhre konzipiert. Querschläge zwischen den Röhren sind alle 500 m vorgesehen, [3]. Die Gradienten des KAT weist ein Dachprofil auf: Vom Ostportal bei Frauental steigt die Gleisachse mit 5,44 Promille bis zum Hochpunkt, nach ca. 18 km fällt die Achse mit 3,00 Promille bis zum Westportal bei St. Andrä. Der weitgehend geradlinige Verlauf des KAT geht erst in Kärnten in einen Linksbogen über (minimaler Radius: 3000 m) und ermöglicht Betriebsgeschwindigkeiten von bis zu 200 km/h (trassierungstechnisch bis zu 250 km/h).

Die Errichtung des KAT erfolgt sowohl vom Ost- als auch vom Westportal. Zusätzlich sind ca. 3,5 km nach dem Ostportal der ZA Leibenfeld und ca. 0,7 km vor dem Westportal der ZA Mitterpichling eingerichtet. Von diesen beiden



Abb. 2: Schematischer Verlauf des SBT, aus [2]

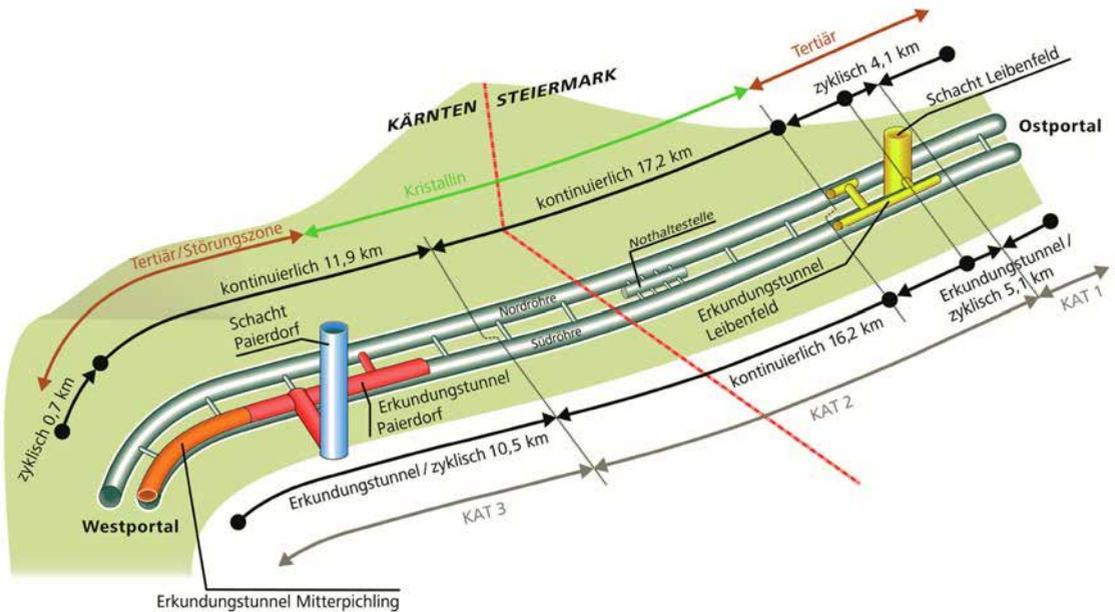


Abb. 3: Schematischer Verlauf des KAT (Quelle: ÖBB)

Zwischenangriffen erfolgen die Hauptarbeiten. Von Leibenfeld Richtung Kärnten werden beide Röhren mittels TVM aufgeföhren, ebenso vom ZA Mitterpichling in der Nordröhre Richtung Osten (Steiermark). Alle übrigen Vortriebe werden konventionell aufgeföhren. Über den Lüftungsschacht Paierdorf (ca. 3.7 km vom Westportal entfernt) sind geodätische Messungen möglich. Schematisch ist der KAT in Abbildung 3 dargestellt.

Seit 2008 laufen die eigentlichen Bauarbeiten zum KAT, wobei das Baulos KAT1 (Ostportal – Leibenfeld) durchgeschlagen ist und nunmehr die Lose KAT2 (von Leibenfeld aus) und KAT3 (vom Westportal bzw. Mitterpichling aus) vorgefahren werden. Der erste Durchschlag dieser beiden Hauptbaulose ist in der Süd- röhre geplant. Nach derzeitigem Stand (08/2015) sind in der Süd- röhre noch 7 km aufzuföhren. Die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2023 geplant.

### 2.3 Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel (BBT; schematisch in Abbildung 4 dargestellt) unterquert als Kernstück der Verbindung Berlin – Palermo das Zentralalpenmassiv und verbindet die Städte Innsbruck und Franzensfeste (und somit Österreich und Italien). Die direkte Verbindung (ohne die Einbeziehung der Umfahrung Innsbruck) ist ca. 55 km lang. Auch dieser Tunnel wird zwei- röhrig ausgeföhrt, die beiden Gleisachsen sind

70 m seitlich versetzt. Im Abstand von 333 m sind Querschläge vorgesehen. Zusätzlich zu den beiden Hauptröhren wird ein Erkundungsstollen (EKS) in der Mitte der beiden Röhren vorgefahren, welcher ca. 12 m tiefer als die beiden Hauptröhren liegt. Dieser wird später für die Wartung bzw. die Tunnelentwässerung genutzt. Auch für die geodätischen Messungen ist er von Bedeutung, [4]. Die Längsneigung beträgt auf österreichischer Seite 6.7 Promille, auf italienischer Seite 4.0 Promille. Der Scheitelpunkt liegt exakt auf der Staatsgrenze, jedoch 580 m tiefer als der Brennerpass.

Bei der Errichtung können die beteiligten Unternehmungen auf einen klassischen Portalbereich (Sillschlucht, für EKS) sowie vier ZA (Ampass, Ahrental, Wolf und Mauls) zurückgreifen. Von den ZA werden die Tunnelröhren über ZT zwischen 1.4 und 4.0 km Länge erreicht. In Abbildung 4 sind die Portale und ZT in blau dargestellt, in rot sind sämtliche Durchschlagpunkte und zugehörigen Vortriebslängen eingetragen (Stationierungen in schwarz).

Die Arbeiten am EKS in Südtirol sind seit 2006 im Gange, seit 2011 befindet sich das Projekt in der Hauptbauphase. Die ZT Ampass, Ahrental und Mauls sind ausgebrochen, Wolf wird errichtet. Der Vortrieb der Hauptröhren wurde von Mauls aus bereits begonnen. Mit Ausnahme kurzer Abschnitte im Bereich der ZA erfolgt der Großteil der Vortriebsarbeiten beim BBT mittels TVM.

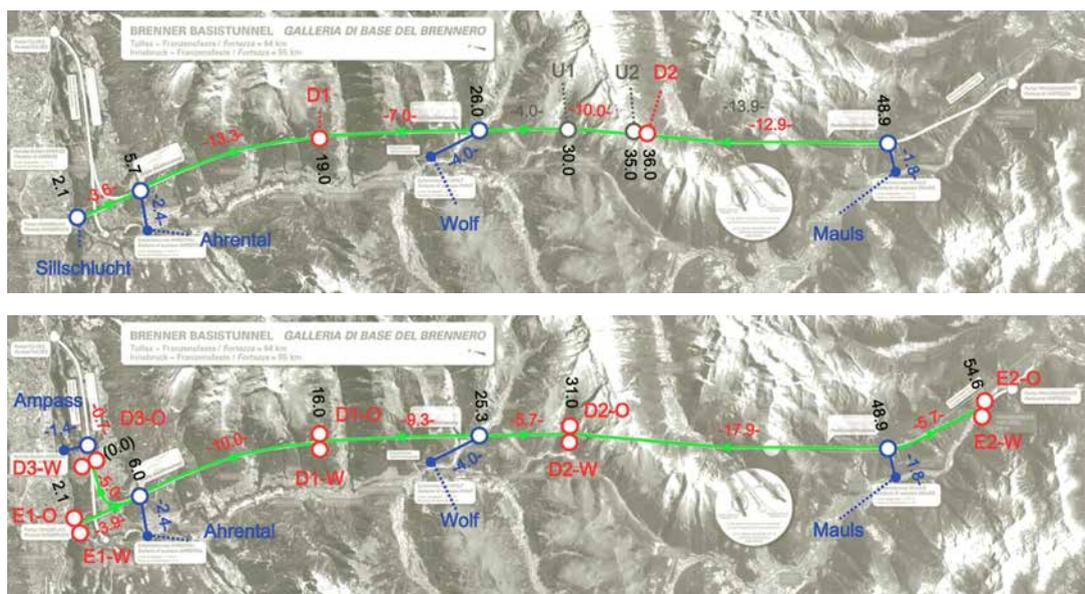


Abb. 4: Schematischer Verlauf des BBT; EKS (oben) und Haupttröhren (unten), aus [4]

## 2.4 Eckdaten im Vergleich

Die Eckdaten der drei vorgestellten Tunnelprojekte sind in Tabelle 1 gegenübergestellt. L bezeichnet dabei die Gesamtlänge des Tunnels, die Spalte „P / ZA“ listet die Portale (P) und Zwischenangriffe (ZA) auf. Die Abkürzung „V“ steht für die maximal auftretende Vortriebslänge.

Der SBT ist der kürzeste der drei Tunnel, auch die maximale Vortriebslänge von 8.7 km ist im Vergleich die geringste. Aufgrund der komplexen Trassenführung sowie der Schächte bei den ZA (schwierige und aufwändige Richtungsübertragung) verbleiben trotzdem große Herausforderungen für den Ingenieurgeodäten.

Der KAT ist um 5.6 km länger als der SBT, hier sticht besonders die maximale Vortriebslänge von 18.9 km ins Auge, welche ab dem ZA Leibenfeld ohne Positions-Zwischenstützung aufgeföhren werden.

Die Gesamtlänge des BBT ist die größte der drei Tunnel – der BBT ist fast exakt doppelt so lang wie der SBT. Damit gehört der BBT auch international gesehen zu den längsten bestehenden bzw. projektierten Eisenbahntunnels und wird nach seiner Fertigstellung Platz zwei hinter dem Gotthard-Basistunnel (57 km) einnehmen. Die maximale Vortriebslänge (inkl. ZT) ist vergleichbar mit jener des KAT.

Tunnel	von	Nach	L [km]	P / ZA	V [km]
SBT	Gloggnitz	Mürzzuschl.	27.3	1 + 3	8.7
KAT	Dtldsbg.	St. Andrä	32.9	2 + 2	18.9
BBT	Innsbruck	Franzensf.	54.6	1 + 4	19.7

L Gesamtlänge des Tunnels  
 P/ZA Portal/Zwischenangriff  
 V maximale Vortriebslänge

Tab. 1: Kenndaten von SBT, KAT und BBT

## 3. Bezugssysteme und Grundlagenvermessung

### 3.1 Vorbemerkungen

Jedes ingenieurgeodätische Projekt stellt eigene Anforderungen an die Grundlagenvermessung hinsichtlich der Wahl des Koordinaten- und Höhensystems. Dabei spielen sowohl theoretische Überlegungen eine Rolle, aber auch praktische Rahmenbedingungen wie existierende Bestandsaufnahmen oder Zwangspunkte, welche bereits in Planungen oder Vorstudien verwendet wurden und möglichst nicht mehr verändert werden sollen. Die Festlegung eines Projektkoordinatensystems ist daher oft ein Kompromiss, der nicht nur rein nach theoretischen, sondern auch nach praxistauglichen Aspekten bewertet werden muss. In diesem Sinn soll der Vergleich der Projektkoordinatensysteme der vorgestellten Tunnelprojekte erfolgen, wobei dennoch wertfrei

auf die Vor- und Nachteile gemäß obigen Vorbemerkungen hingewiesen wird. Gemeinsam ist allen Systemen, dass sie in Form zwangsfreier Netze realisiert sein sollen und innerhalb dieses zwangsfreien Rahmens ein oder mehrere Durchschläge sowohl der Lage nach als auch in der Höhe innerhalb der vorgegebenen Toleranzen gelingen sollen.

### 3.2 Lage

#### 3.2.1 Semmering Basistunnel

Das Koordinatensystem für den Lagebezug im Grundlagennetz des SBT ist stark geprägt vom existierenden Grundlagennetz des in den 1990er Jahren geplanten „alten“ Basistunnels, und den Bestandsaufnahmen in den Bahnhöfen Gloggnitz und Mürzzuschlag. Dieses alte Grundlagennetz ist ein freies ingenieurgeodätisches Netz, welches im System der Österreichischen Landesvermessung mittels Datumpunkten in Gloggnitz und Mürzzuschlag gelagert wurde<sup>1)</sup>. Es ist eines der letzten Triangulationsnetze für Tunnelprojekte, welches jedoch bereits mittels GPS überprüft wurde. Geeignete Pfeiler des alten Netzes wurden aufgrund ihres guten Zustandes auch als Stabilisierung für das neue Grundlagennetz verwendet. Die Bestandsaufnahmen in den

beiden Bahnhöfen beziehen sich auf dieses Netz bzw. auf ähnlich gelagerte Netze, [5]. Basierend auf diesen Aufnahmen wurde die Trassierung bzw. Tunnelplanung für den neuen Basistunnel durch den Semmering durchgeführt.

Die Schaffung des Grundlagennetzes „SBT Lage“ durch die ARGE Vermessung SBT (Kanzleien Rinner bzw. ADP Rinner und Dr. Döllner sowie TU Graz) erfolgte hauptsächlich im Jahr 2013 als freies statisches GNSS-Netz, welches gemäß den Vorgaben der Auftraggeberin ÖBB Infrastruktur AG über Datumpunkte bestandschließend ins System der Landesvermessung transformiert wurde. Die Restklaffen bei der Transformation betragen meist wenige Millimeter. Das Netz umfasst gleichmäßig verteilte Pfeiler im gesamten Projektgebiet sowie verdichtete Bereiche in den Portalen und bei ZA (Abbildung 5). Die erzielte Genauigkeit – berechnet als mittlere quadratische Abweichung der Restklaffungen von identen Punkten zwischen altem und neuem Grundlagennetz – ist besser als 5 mm je Koordinate. Dies ist nicht zuletzt auf den Einsatz modernster und baugleicher Empfänger bzw. Antennen und Beobachtungszeiten von mindestens sechs bis acht Stunden (teils deutlich mehr) zurückzuführen. In den Portalbereichen und bei ausgewählten Pfeilern erfolgten terrestrische Verdichtungsmessungen bzw. die Schaffung von Versicherungspunkten.

1) ARGE Vermessung Semmeringtunnel (1994): Semmering Basistunnel. Geodätische Grundlagen. Unveröffentlichter Technischer Bericht, Vermessung Stoltizka, Maletz, Kollenprat; Wien, Villach, Klagenfurt

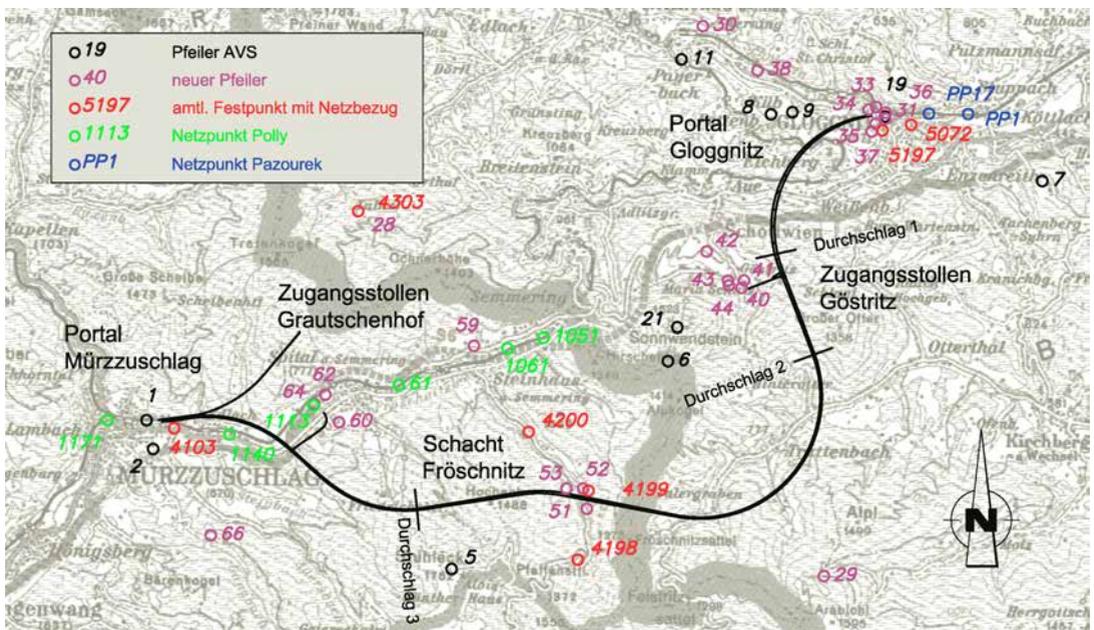


Abb. 5: Netzpunkte Grundlagennetz SBT Lage, aus [5]

Bedingt durch die Lagerung des freien Netzes im System der Landesvermessung (MGI; Bessel-Ellipsoid, Gauß-Krüger-Abbildung mit Mittelmeridian M34 östlich von Ferro) bzw. die erfolgte Planung in diesem System ergeben sich durch die Höhenreduktion und die Projektionsverzerrung ortsabhängige Maßstäbe ( $-72$  bis  $-105$  ppm bzw.  $+10$  bis  $+30$  ppm für den unmittelbaren Tunnelbereich), welche dazu führen, dass geometrische Angaben aus der Planung (z. B. Längen von Geradenabschnitten, Radien von Bögen) nicht 1:1, sondern eben mit diesen Maßstäben (bzw. deren Kehrwerte) in die Natur übertragen werden. Dies ist für die damit betrauten Ingenieurgeodäten selbstverständlich und in deren Softwarepaketen implementiert, erfordert aber im Kontakt mit Planern nach wie vor gelegentlich Erklärungsbedarf. Als Vorteil des gewählten Koordinatensystems bzw. der Netzlagerung darf ganz klar angeführt werden, dass bestehende Planungsgrundlagen unverändert übernommen werden konnten und nicht erst in ein neues Projektkoordinatensystem transformiert werden mussten.

### 3.2.2 Koralmtunnel

Beim KAT war die Situation für die Festlegung des Koordinatensystems eine andere. Der Tunnel und damit das Projektgebiet liegen in der Steiermark an der westlichen Grenze des Meridianstreifens M34, in Kärnten an der östlichen Grenze des M31. Die Projektionsverzerrungen würden bei der Wahl eines dieser beiden Systeme in jedem Fall groß werden. Zudem war bereits nach den ersten Messkampagnen bekannt, dass es Spannungen in den amtlichen Festpunktkoordinaten zwischen den Talschaften dies- und jenseits der Koralpe gibt (mehrere Dezimeter). Eine (möglichst) zwangsfreie und dennoch bestanschließende Lagerung im Landessystem mit Klaffungen im Zentimeterbereich würde also hier nicht gelingen und zudem aufgrund der Projektionseigenschaften nicht praxistauglich sein. Somit entschied sich die Auftraggeberin ÖBB gemeinsam mit der für die Grundlagenvermessung betrauten ARGE Vermessung Koralmbahn (Kanzleien Rinner bzw. ADP Rinner und Permann sowie TU Graz) zur Festlegung des „Koralmsystems“, [6]: Um die Projektionsverzerrungen möglichst gering zu halten, wurde der Meridian M15 (östl. von Greenwich), welcher in etwa in der Mitte des KAT verläuft, als Mittelmeridian für eine Gauß-Krüger-Abbildung gewählt. Als Bezugsellipsoid wurde analog zum System der Landesvermessung das Bessel-Ellipsoid beibehalten.

Die ARGE Vermessung Koralmbahn erstellte in weiterer Folge ab dem Jahr 2002 ein GPS-Netz auf Basis statischer Beobachtungen, welches ins Koralmssystem transformiert wurde. Die Lagerungspunkte für die Transformation wurden mit der Auftraggeberin aufgrund von Vorgaben festgelegt. Deren Koordinaten wurden durch Umrechnung der M31 bzw. M34 Werte nach M15 erhalten. Damit wurden zwar deren Spannungen nicht beseitigt, die auf diese Lagerungspunkte transformierten Koordinaten der Netzpunkte aus den GPS-Messungen ergeben jedoch den für den Tunnelvortrieb unerlässlichen zwangsfreien Rahmen. Aufgrund der geringen Lateralabstände zum Meridian M15 im Zentrum des Projektgebietes ergeben sich wesentlich geringere Projektionsverzerrungen als beim SBT (max.  $+5$  ppm im Tunnelbereich). Der Maßstab aufgrund der Höhenreduktion tritt jedoch ident auf ( $-51$  bis  $-68$  ppm). Das Netz für den KAT wurde seitdem laufend erweitert und verdichtet, auch Permanentstationen im Nahbereich wurden in das Netz eingebunden. Dies dient der langfristigen Sicherung des Projektrahmens, [6].

Aufgrund der notwendigen Festlegung eines eigenen Koordinatensystems für den KAT ergeben sich für die Planung zusätzliche Arbeiten: Planungsgrundlagen, die üblicherweise in den Meridianstreifensystemen der Landesvermessung vorliegen, müssen an den Schnittstellen ins Koralmssystem übergeführt werden. Eine reine Umrechnung ist aufgrund der Spannungen nicht zielführend, die Transformation muss über einvernehmlich festgelegte Passpunkte kontrolliert erfolgen. Anschließend sind die (CAD-) Datenbestände mit entsprechenden Werkzeugen umzuarbeiten (z. B. AutoCAD Map 3D).

### 3.2.3 Brenner Basistunnel

Beim BBT wurde die Festlegung des einheitlichen Lagebezugssystems (BBT\_TM-WGS84) wie folgt getroffen<sup>2)</sup>: Koordinaten beziehen sich auf das WGS84-Ellipsoid und werden für ebene Berechnungen einer Gauß-Krüger-Abbildung unterworfen. Diese verwendet einen Bezugsmeridian mit östlicher Länge von  $11^{\circ} 31' 42.5775''$  (Greenwich), welcher in der Mitte des Projektgebietes verläuft. Die Idee ist hier also ähnlich wie beim KAT und aufgrund der unterschiedlichen nationalen Referenzsysteme in Österreich und Italien zwingend erforderlich. Zusätzlich erfolgt die Abbildung mit einem Maßstabsfaktor von

2) Sibilla P. (2007): Kartographische Bezugsebene für die Baustellen der BBT SE. Unveröffentlichter Technischer Bericht.

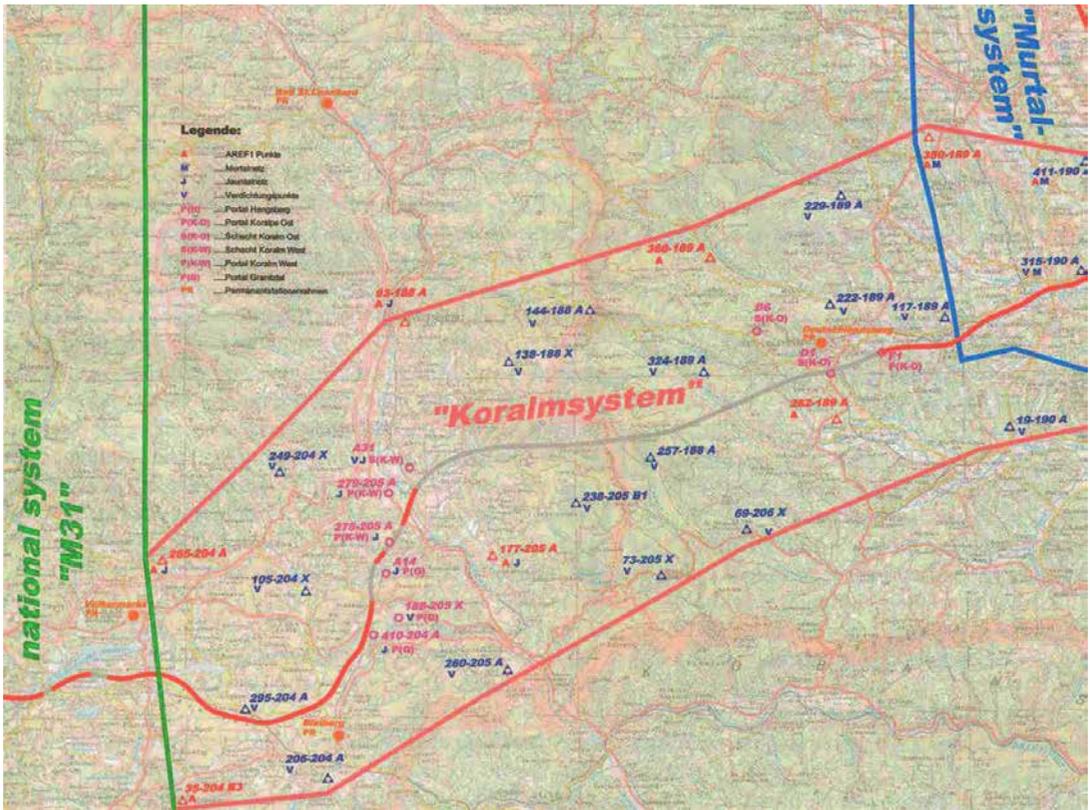


Abb. 6: Netzpunkte Erstmessung Grundlagennetz KAT Lage, aus [6]

+121 ppm und bindet festgelegte Additionskonstanten für den Rechts- bzw. den Hochwert mit ein. Der Zweck der Additionskonstanten ist, keine negativen Rechtswerte ( $y$ -Koordinaten) zu erhalten und die Hochwerte ( $x$ -Koordinaten) im Bereich von 100.000 zu halten. Der Maßstabsfaktor von +121 ppm kompensiert genau die Höhenreduktion von 121 ppm, welche bei einer für das Gebiet relevanten mittleren Projekthöhe von 770 m aufrtritt. Der Maßstab der Höhenreduktion tritt damit fast nicht mehr in Erscheinung, ebenso ist der Projektionsmaßstab durch den Mittelmeridian im Projektgebiet klein (max. 1 ppm). Der derart festgelegte Lagebezug schafft also geringste Differenzen zwischen Planungsebene und Natur.

Die Umsetzung des Lagenetzes durch die ARGE Obex-Pfeifer-Tiweg erfolgte als statisches GNSS Lagenetz mit 16 bzw. 24 Stunden Beobachtungszeit und doppelter unabhängiger Messung (Abbildung 7). Die Auswertung erfolgte an der TU Wien, die Lagegenauigkeit je Koordinate wird mit  $\pm 3$  mm angegeben (Standardabweichung,  $1\sigma$ ).

Die Netzlagerung erfolgte gemäß den Vorgaben der Auftraggeberin BBT-SE<sup>3)</sup>.

Der große Vorteil der geringen Differenzen zwischen Planung und Natur wird wie beim KAT auch beim BBT dadurch geringfügig geschmälert, dass existierende Grundlagen ins Projekt-system transformiert werden müssen und hierfür eine Qualitätssicherung empfehlenswert ist.

### 3.3 Höhe

#### 3.3.1 Semmering Basistunnel

Ähnlich wie bei der Festlegung des Lagesystems erfolgte die Wahl des Höhensystems aufgrund der vorgegebenen Planungsgrundlagen. Die Bahnhöfe Gloggnitz und Mürtzschlag, an denen die Einbindung in den Bestand erfolgt, wurden höhenmäßig an das Gebrauchshöhensystem angeschlossen. Beide Bahnhöfe liegen an einer Linie des Präzisionsnivelements des Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen

3) ARGE Obex-Pfeifer-Tiweg (2002): Ausbau Eisenbahnachse München – Verona. Brenner Basistunnel. Geodätische Grundlagenvermessung. Schlussbericht. Unveröffentlichter Technischer Bericht.



bzw. war es umso wichtiger, ein homogenes Höhennetz zu schaffen. Dieses wurde wie folgt realisiert: Zunächst wurde von der ARGE Obex-Pfeifer-Tiwag ein Präzisionsnivellement von Innsbruck über den Brenner bis nach Brixen gemessen. Gleichzeitig erfolgten seitens des BEV relative gravimetrische Messungen samt Auswertung mit dem Ziel, nach der topographischen Reduktion den mittleren (integralen) Schwerewert entlang der Lotlinie zu bestimmen. Somit konnte die Berechnung von geopotentialen Knoten und orthometrischen Höhen erfolgen, [7]. Diese sind geophysikalisch korrekt, bei Vortriebs- und Kontrollmessungen sind jedoch konsequenter Weise ebenso orthometrische Reduktionen anzubringen. Die Genauigkeit des Nivellements zwischen Innsbruck und Brixen<sup>4)</sup> wird mit  $\pm 10$  mm angegeben, der Höhenunterschied zwischen Innsbruck und dem Brennerpass mit  $\pm 15$  mm.

### 3.4 Schwerefeld

Neben den Einflüssen des Erdschwerefeldes auf die Höhe in Form unterschiedlicher wegabhängiger Reduktionen (Abschnitt 3.3) sind dessen Auswirkungen auch für Lagekoordinaten relevant, vor allem, wenn bei untertägigen Messungen Kreiselazimute zum Einsatz kommen. Der Einsatz von Vermessungskreiseln ist bei allen drei Projekten unumgänglich, zum einen wegen der großen Vortriebslängen insbesondere bei KAT und BBT, aber auch zur Richtungsübertragung über die ZT und Schächte des SBT und KAT. Ohne Kreiselmessung und / oder zusätzlichen Verfahren, z. B. [8], könnte nach einer Schachtabteufung überhaupt keine zuverlässige Vortriebsrichtung angegeben werden.

Kreiselmessungen beziehen sich jedoch auf die natürliche Lotlinie, während in der Rechenebene ein Bezug zur Ellipsoidnormalen herrscht. Zur entsprechenden Reduktion sind Lotabweichungen erforderlich, welche als Störgrößen des Erdschwerefeldes für das Projektgebiet ermittelt werden müssen. Diese können für Voruntersuchungen rechnerisch durch Prädiktion auf Basis von Schwerefeldmodellen bestimmt werden. Für die Anwendung bei Vortriebs- und Kontrollmessungen empfiehlt sich jedoch eine lokal bestangepasste Berechnung, welche sich beispielsweise auf mittels Zenitkammer gemessenen Lotabweichungen stützt. Liegt ein derart bestimmtes Modell einmal vor, können für ober- und untertägige Netzpunkte die gewünschten

4) BEV (2002): Präzisionsnivellement Brenner – Neustift. Schlussbericht. Unveröffentlichter Technischer Bericht.

Lotabweichungen mit einer Genauigkeit von besser als  $1''$  präzisiert werden.

Diese Vorgehensweise wurde beim SBT und KAT seitens der für die Grundlagenvermessungen zuständigen ARGEs gewählt. Beim BBT wird ähnlich vorgegangen. Hinsichtlich der Lotabweichungsbestimmung gibt es also keine wesentlichen Unterschiede, die Wichtigkeit des Themas wurde bei allen drei Projekten frühzeitig erkannt. Die Größenordnung bzw. Variabilität der Lotabweichungen kann anhand von Abbildung 8 exemplarisch für den SBT abgeschätzt werden: Die Topographie ist als Längenschnitt in schwarz dargestellt, die Tunnelachse von Gloggnitz nach Mürzzuschlag ansteigend in grau. Die präziierten Lotabweichungen  $\eta$  (Ost-West-Komponente) sind in rot eingetragen (dünn: Oberflächenwerte, dick: Werte auf Trassenniveau; die Nord-Süd-Komponente  $\xi$  ist bei der Reduktion der Azimute bei annähernd horizontalen Visuren nicht erforderlich). Die Skalierung für die Höhe ist Meter, die Lotabweichungen sind zur gemeinsamen Darstellung mit der Höhe mit dem Faktor 100 multipliziert (1000 m entsprechen somit  $10''$ ).

Der Einfluss auf gemessene Azimute beträgt zwischen  $-0.8$  und  $3.3$  mgon, was jedenfalls deutlich über der Messgenauigkeit eines Vermessungskreisels liegt.

## 4. Vortriebskonzepte und prognostizierte Durchschlagsfehler

### 4.1 Vorbemerkungen

Es wird an dieser Stelle dezidiert darauf hingewiesen, dass im Zuge von Prognoserechnungen nur die Auswirkungen von zufälligen Messunsicherheiten auf die Ergebnisse in den Durchschlagspunkten erfasst werden können. Etwaige systematische Effekte wie Seitenrefraktion, [10], Effekte des Vermessungskreisels, [11], etc., welche die Durchschlagsfehler in der Realität vergrößern können, können durch eine Prognoserechnung nicht erfasst werden und sind durch sorgfältige Messverfahren bzw. die Auswahl der Umgebungsbedingungen weitestgehend zu minimieren (z. B. Anlage des Polygons bei Hauptkontrollmessungen in der Tunnelmitte, Ausschalten punktueller Wärmequellen wie Aggregate etc., gleichmäßige Belüftung, Vorsicht bei Querschlägen, usw.). Gerade die Auswirkungen der Seitenrefraktion können im ungünstigsten Fall erhebliche Genauigkeitseinbußen im Vergleich zu den Werten einer Prognoserechnung nach sich ziehen. Die Kenntnis des realen Temperaturfeldes inkl. Gradienten

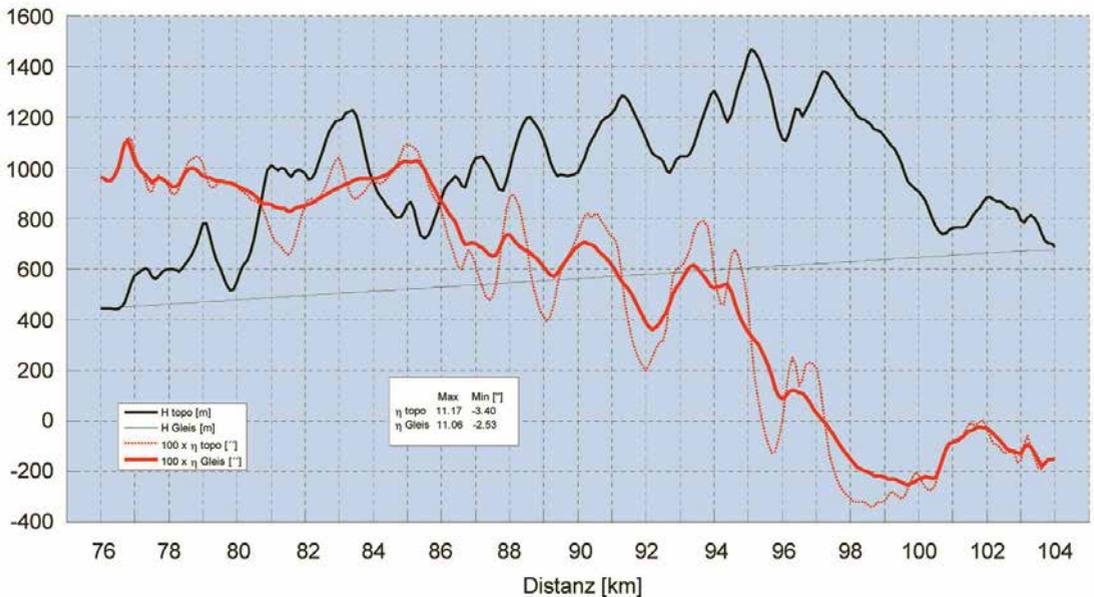


Abb. 8: Topographie, Tunnelachse und präzidierte Lotabweichungen  $\eta$  für den SBT, aus [5]

in einem Tunnel ist jedoch praktischerweise kaum gegeben bzw. messtechnisch realisierbar, sodass für die Abschätzung der Durchschlagsfehler fast ausschließlich die Ergebnisse einer Prognoserechnung basierend auf zufälligen Messabweichungen herangezogen werden.

#### 4.2 Semmering Basistunnel

Der Vortrieb des SBT erfolgt neben einem klassischen Portalvortrieb ausgehend vom PB Gloggnitz auch von den drei ZA Göstritz, Fröschnitz und Grautschenhof, [9]. In Göstritz wird ein mehr als 1 km langer Zugangstunnel errichtet, an dessen Ende zwei ca. 200 m tiefe Vertikalschächte bis zum Trassenniveau führen. Der ZA Fröschnitz besteht aus zwei ca. 400 m tiefen Vertikalschächten. In Grautschenhof ist ein bis zum Trassenniveau leicht fallender ca. 1 km langer Zugangstunnel geplant, der nach den neuesten Planungen jedoch wie beim ZA Fröschnitz durch zwei Vertikalschächte direkt zur Trasse ersetzt werden soll. Die PB (vom PB Mürzzuschlag ist kein bergmännischer Vortrieb geplant) und ZA sind in Abbildung 9 eingetragen.

Folglich ergeben sich die Vortriebslängen gemäß Tabelle 2. Sämtliche Vortriebe mit Ausnahme des Abschnittes Fröschnitz – D2 werden konventionell mittels zyklischem Vortrieb (NÖT) aufgeföhren; der genannte Abschnitt wird mittels Tunnelvortriebsmaschine (TVM) errichtet.

Auf Basis dieses Vortriebskonzeptes und der trassierten Gleisgeometrie wurde im Jahr 2012

eine Prognoserechnung erstellt, welche die Querfehler am Ende der jeweiligen Vortriebsteile bzw. die Durchschlagsfehler in den Punkten D1 bis D4 ausweist. Die Zusammenfassung dieser Ergebnisse wurde in [9] publiziert. Die Präzisionsannahmen für die dabei verwendeten Messgrößen liegen für Totalstationsmessungen bei  $s_R = s_Z = 0.3 \text{ mgon}$ ,  $s_D = 1 \text{ mm} + 2 \text{ ppm}$ , Azimutmessungen (gegenseitig) wurden mit  $s_A = 1.0 \text{ mgon}$  angenommen. Die Anzahl bzw. die Längsabstände der Kreisellazimute wurden in [9] variiert, um verschiedene Varianten zu untersuchen. In weiterer Folge werden nur jene Ergebnisse angeführt, bei denen der Längsabstand der Azimute innerhalb einer Tunnelröhre 2 km nicht überschreitet, Kreiselmessungen in beiden Röhren durchgeführt sowie Querschläge für Verbindungsmessungen alle 1.4 bis 1.8 km genutzt werden (Variante V1). Die Abstände der Richtungsstützung durch Azimute von ca. 2 km entsprechen dem etablierten Standard, vgl. [12]. Für die Präzision der Ausgangspunkte im jeweiligen Grundlagennetz wurden  $\pm 10 \text{ mm}$  eingeföhrt (Punktlagefehler nach Helmert).

Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Messpräzisionen ergeben sich für den SBT die in Abbildung 9 dargestellten Durchschlagsfehler (relative Fehlerellipsen,  $1 \sigma$ ).

Die Querfehler an den jeweiligen Vortriebsenden ( $1 \sigma$  im Sinne einer Standardabweichung, also  $+/-$ ) sind in Tabelle 2 zusammengefasst (Längs- und Höhenfehler werden hier nicht weiter

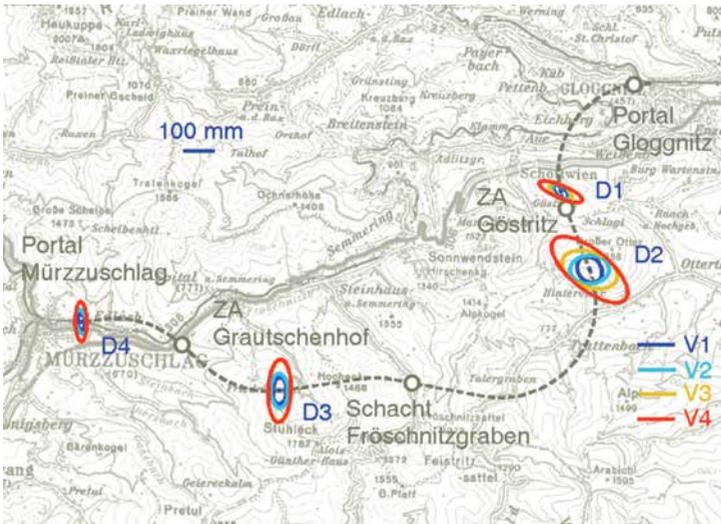


Abb. 9: Durchschlagsfehler beim SBT, aus [9]

betrachtet). V1 bis V4 stellen die in [9] miteinander verglichenen Varianten dar, welche sich hinsichtlich der Azimutanzahl unterscheiden. Maßgeblich für die weiteren Vergleiche in diesem Artikel bzw. für Tabelle 2 ist die in Abbildung 9 blau dargestellte Variante V1 (Azimute alle 2 km in beiden Röhren).

Auffällig ist, dass in den Durchschlägen D1 und D2 aufgrund der bogenförmigen Geometrie die großen Halbachsen der Fehlerellipsen nicht mehr weitestgehend orthogonal auf die Tunnelachse stehen und somit die Richtungspräzision nicht mehr alleine ausschlaggebend für den erreichbaren Querfehler ist (insbesondere bei den Varianten ohne enorme Kreiselstützung, vgl. [9]). Neben der Anzahl der Kreiselmessungen beeinflusst auch die Distanzmessung den Durchschlag. Somit ist die Wahrung des ober-tägigen Netzmaßstabes untertage von großer

Nr.	von	nach	L [km]	Anm.	q [mm]
1	Gloggnitz	D1	4.7		20
2	Göstritz O	D1	1.6	1 km ZT	10
3	Göstritz W	D2	3.1	1 km ZT	24
4	Frörschnitz O	D2	8.7		30
5	Frörschnitz W	D3	4.3		34
6	Grautsch. O	D3	3.6		26
7	Grautsch. W	D4	3.3		27

L Vortriebslänge, inkl. ZT  
 ZT Zugangstunnel  
 q Querfehler, 1σ  
 O, W Ost, West

Tab. 2: Vortriebe beim SBT (Variante V1)

Bedeutung (Kalibrierung der eingesetzten Instrumente, Reduktionen, etc.). Bei der Betrachtung der durchaus ambitionierten Werte in Tabelle 2 ist zu beachten, dass es sich zum einen um Größen handelt, welche lediglich mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von  $P=68\%$  eintreten. Für eine Sicherheitswahrscheinlichkeit von beispielsweise  $P=99.7\%$  wären diese Größen mit dem Faktor 3 zu multiplizieren (die Irrtumswahrscheinlichkeit, mit welcher dann noch größere (Quer-) Abweichungen eintreten würden, wäre dann lediglich bei 0.3%). Zum anderen sind diese Werte nur durch einen großen Messaufwand

(Kreiselazimute) zu erreichen. Die mangels Modellierbarkeit nicht berücksichtigten systematischen (Rest-) Einflüsse wurden bereits erwähnt.

### 4.3 Koralmtunnel

Der KAT (Abbildung 10) zwischen Ostportal und Leibenfeld (Baulos KAT1) wurde in konventioneller Bauweise (zyklischer Vortrieb) errichtet und ist bereits durchgeschlagen. Das anschließende Baulos KAT2 (bis zum Durchschlag KAT1 und bis zum Durchschlagspunkt D1) wird in beiden Röhren hauptsächlich mittels TVM aufgeföhren. Vom Westportal bzw. dem ZA Mitterpichling trifft das Baulos KAT3 auf den Durchschlagspunkt D1, und zwar zunächst nur in der Südröhre. Dieser Vortrieb besteht im Anfangsteil aus dem bereits existierenden Erkundungstunnel, wobei vermessungstechnisch eine Positionsstützung durch Ablotung über den Schacht Paierdorf besteht. Erst ab Paierdorf verläuft der Vortrieb und somit das Vortriebspolygon ohne Positionsstützung.



Abb. 10: Durchschlagsfehler beim KAT

Der Vorteil der Positionsstützung durch Ablotung wird zum Teil dadurch aufgehoben, dass lediglich die Südröhre alleine bis zum Durchschlag aufgeföhren wird. Die Errichtung der Nordröhre erfolgt erst nach Ende des Vortriebes in der Südröhre KAT3. Die Vortriebslängen und die mit denselben Vorgaben wie beim SBT berechneten prognostizierten Querfehler am Ende der Vortriebspolygone sind in Tabelle 3 enthalten (Stand: 2014).

Nr.	von	nach	L [km]	q [mm]
1	P-Ost	Leibensfeld	3.5	errichtet
2	Leibensfeld	D1	18.9	82
3	Paierdorf	D1	6.8	46
4	P-West	Paierdorf	3.7	errichtet

L Vortriebslänge  
q Querfehler,  $1\sigma$

Tab. 3: Vortriebe beim KAT

#### 4.4 Brenner Basistunnel

Die Situation beim BBT (Abbildung 11) ist etwas komplexer als bei den beiden Tunnels entlang der Südbahn. Hier wird zunächst ein EKS errichtet, welcher von den Portalen Silleschlucht, Wolf und Mauls vorgetrieben wird. Dieser einröhriige Tunnel unterhalb der später aufzuföhrenden Hauptröhren (HR) wird konventionell errichtet. Die dabei erzielbaren Querfehler unter Einsatz von Kreiselazimuten alle 2 km sind in Tabelle 4 aufgelistet. Im günstigsten Fall steht somit nach dem Durchschlag im EKS eine durchgehende Hilfsröhre für das Aufföhren der HR zur Verfügung (Variante BBT-HR-EKS-d, Abbildung 12). Der Zusammenschluss für Messungen kann über später befahrbare Rampen für Wartungs- und Notfallzwecke erfolgen. Allerdings war zum Zeitpunkt der Untersuchungen (2013) noch nicht geklärt, ob der EKS tatsächlich durchgehend errichtet wird. Möglicherweise entsteht zw. km 30 und km 35 eine Lücke (Punkte U1 bzw. U2, Abbildung 4; Variante BBT-HR-EKS-u, Abbildung

12). Dies erspart zwar Baukosten, ergibt aber für die Vortriebs- und Kontrollmessungen in den Hauptröhren eine Verschlechterung der Ausgangssituation: Im EKS kann kein abgeschlossenes durchgehendes Polygon gemessen werden, sondern lediglich eines mit zwei fliegenden Enden. Somit ergeben sich für den Vortrieb der HR jeweils zwei erzielbare Querfehler (Tabelle 5),  $q_1$  im Fall eines unterbrochenen EKS,  $q_2$  im durchgehenden Fall. Die zugehörigen relativen Fehlerellipsen in den Durchschlagpunkten sind in Abbildung 11 gelb (EKS durchgehend) bzw. grün (EKS unterbrochen) dargestellt. Im Durchschlagspunkt D2, welcher unmittelbar vom nicht durchgehenden EKS betroffen ist, fällt der Vergleich eindrucksvoll zugunsten der durchgehenden Variante aus.

Nr.	von	nach	L [km]	Anm.	q [mm]
1	Sill	D1E	16.9	Portal	71
2	Wolf	D1E	11.0	4.0 km ZT	39
3	Wolf	D2E	14.0	4.0 km ZT	74
4	Mauls	D2E	14.7	1.8 km ZT	78

L Vortriebslänge, inkl. ZT  
ZT Zugangstunnel  
q Querfehler,  $1\sigma$

Tab. 4: Vortriebe beim BBT (EKS)

Nr.	von	nach	L [km]	$q_1$ [mm]	$q_2$ [mm]
1	Ampass	D3	2.0	13	13
2	Ahrental	D3	7.4	21	21
3	Ahrental	E1	6.3	18	18
4	Ahrental	D1	12.4	21	19
5	Wolf	D1	13.3	19	18
6	Wolf	D2	9.7	30	22
7	Mauls	D2	19.7	60	23
8	Mauls	E2	7.5	29	26

L Vortriebslänge, inkl. ZT  
 $q_1, q_2$  Querfehler,  $1\sigma$ , bei unterbrochenem bzw. durchgehendem EKS

Tab. 5: Vortriebe beim BBT (Hauptröhren)

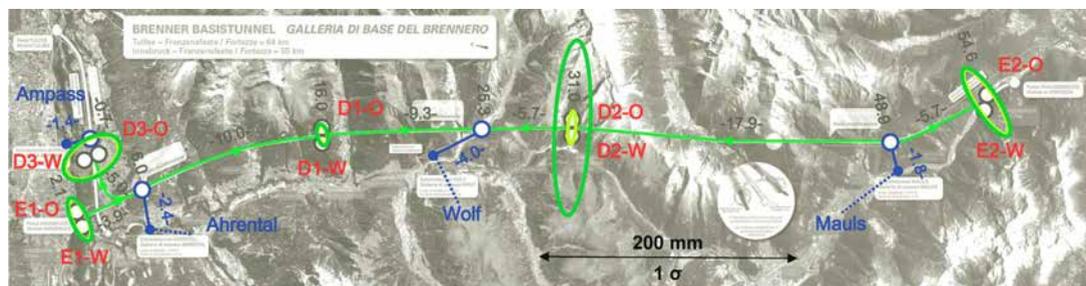


Abb. 11: Durchschlagsfehler beim BBT für die HR, aus [4]

Angemerkt werden darf, dass im Falle eines durchgehenden EKS ohne signifikante Verschlechterung sogar auf Azimutmessungen in den HR verzichtet werden könnte, [4]. Ausgenommen davon sind lediglich die relativ kurzen Vortriebe zu den freien Enden E1 und E2. Das durchgehende Polygon im EKS (mit Kreiselmessungen) stützt also die Netze in den HR stärker als zusätzliche aufwändige Kreiselmessungen in den HR selbst. Die Verbindungsmöglichkeiten untereinander müssen jedoch tatsächlich gegeben sein, was im Baubetrieb oft erst erkämpft werden muss.

Mittlerweile (Stand: 06/2015) wurde die Variante eines unterbrochenen EKS seitens des Bauherren verworfen – aus ingenieurgeodätischer Sicht ein deutlicher Gewinn für das gesamte Projekt.

#### 4.5 Gegenüberstellung

Einen Vergleich der unter denselben Genauigkeitsannahmen berechneten Querfehler am Ende der jeweiligen Vortriebspolygone in Abhängigkeit von der Länge des Vortriebes zeigt Abbildung 12. Die Querfehler entsprechen einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von  $P=99.7\%$ . Betragsmäßig größere Querfehler, sowohl mit positivem als auch mit negativem Vorzeichen, sind also lediglich mit einer Wahrscheinlichkeit von 0.3% zu erwarten.

Folgende Aspekte sind auffällig: Beim SBT variiert aufgrund der komplexen Geometrie der Querfehler stark, es ist vor allem bei Vortriebslängen knapp unter 5.0 km eine große Bandbreite sichtbar. Die Gründe hierfür wurden bereits erläutert (Querkomponenten bei verdrehten (relativen) Fehlerellipsen).

Beim KAT ergeben sich aufgrund des einen verbleibenden relevanten Durchschlagspunk-

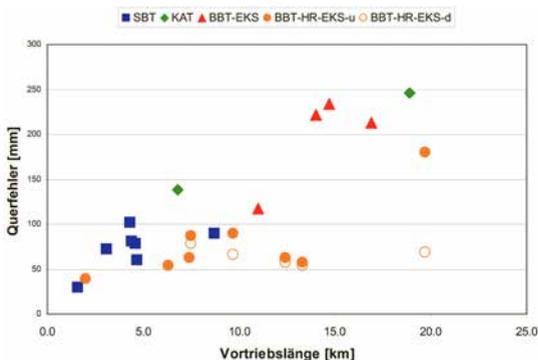


Abb. 12: Querfehler vs. Vortriebslängen bei SBT, KAT und BBT ( $P=99.7\%$ )

tes nur zwei Datenpunkte für die Vortriebsenden. Aufgrund des nur einröhrigen Verlaufs bei KAT3 ergibt sich bei einer Vortriebslänge von ca. 6.8 km ein größerer Querfehler als bei zwei-röhrigen Bauwerken.

Beim BBT ist zunächst der EKS zu betrachten. Das Vortriebspolygon in nur einer Röhre ist naturgemäß gegenüber einem zwei-röhrigen Vortrieb im Nachteil. Betrachtet man die HR, welche sich in jedem Fall auf den EKS stützen (in Summe also drei Polygone), ergibt sich ein geringerer Querfehler als bei den zwei-röhrigen Tunnels. Selbst bei in diesem Bereich unterbrochenem EKS (ca. 20 km) ist ein Vorteil erkennbar. Wirklich eindrucksvoll ist jedoch die Variante mit durchgehendem EKS: hier liegt der Querfehler bei 20 km Vortriebslänge in einem Bereich, der ohne Positionsstützung bereits bei knapp über 5 km erreicht werden würde. Dies ist ausschließlich auf das vollständig durchgemessene und ausgeglichene Polygon im EKS zurückzuführen.

Aufgrund der unterschiedlichen Rahmenbedingungen sind die Daten in Abbildung 12 natürlich nicht geeignet, unkritisch eine Gesetzmäßigkeit hinsichtlich eines zu erwartenden Querfehlers in Abhängigkeit von der Vortriebslänge abzuleiten. Schließt man jedoch die Haupt-röhren des BBT in jenen Bereichen, die von einem durchgängigen EKS profitieren, aus der Berechnung aus, würde man bei Schätzung einer ausgleichenden Geraden die Parameter  $11\text{ mm} + 13\text{ mm} / \text{km}$  erhalten. Diese Werte sind bewusst mit Vorsicht zu genießen, stehen aber in guter Übereinstimmung zur im Tunnelbau verbreiteten Faustregel, wonach sich je km Vortriebslänge der Querfehler um 1 cm vergrößert. Allerdings muss betont werden, dass sich diese 13 mm je km (zuzüglich eines Offsets aufgrund der Unsicherheiten im Grundlagennetz) hier bereits auf ein Sicherheitsniveau von 99.7% beziehen – ein durchaus positiv überraschendes Ergebnis. Dies ist vor allem auf den großen Messaufwand (Azimute mindestens alle 2 km in jeder Röhre, verschränkte Polygone, etc.) zurückzuführen. Kann dieser Aufwand realisiert werden, ist die Faustregel auch bei langen Tunnels einhaltbar. Abweichungen vom genannten äußerst einfachen Modell bei z. B. komplexer Geometrie liegen auf der Hand (siehe SBT). Somit kann diese Faustregel niemals eingehende Untersuchungen für anspruchsvolle Projekte ersetzen.

## 5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

### 5.1 Grundlagenvermessung und Prognoserechnungen

Die vergleichende Untersuchung der geodätischen Grundlagen für die drei großen Tunnelprojekte in Österreich ergibt je Projekt teils unterschiedliche Herangehensweisen für die ingenieurgeodätische Vermessung. Dies resultiert aus den verschiedenen Anforderungen und Rahmenbedingungen, welche Auftraggeber, Planer, etc. vorgeben. Gemeinsam ist allen drei Projekten das unbedingt erforderliche zwangsfreie Grundlagennetz in Lage und Höhe, welches je nach Vorgaben unterschiedlich gelagert wird. Die Vor- und Nachteile der jeweiligen Lagerung wurden erläutert, die bei ausgedehnten Ingenieurprojekten erforderliche Berücksichtigung von Störgrößen des Erdschwerefeldes ist ebenfalls überall erfolgt.

Hinsichtlich der bei allen Projekten durchgeführten Prognoserechnung für die erzielbaren Durchschlagsgenauigkeiten kann die im Tunnelbau weit verbreitete Faustregel für den Querfehler („1 cm je km“, meist ohne Angabe einer Sicherheitswahrscheinlichkeit seitens der Tunnelplanung bzw. -ausführung) nur für weitgehend geradlinige Tunnelbauwerke angewendet werden. Bei zweiröhriigen Tunnels mit der Möglichkeit, über Querschläge die Vortriebsnetze beider Röhren miteinander zu verbinden, und unter Einsatz von Kreismessungen mindestens alle 2 km umfasst diese Faustregel mit den genannten Einschränkungen sogar einen großen Sicherheitsbereich ( $P = 99.7\%$ ).

Bei komplexer Tunnelgeometrie versagt die Faustregel aufgrund der Verdrehung der großen Halbachsen der (relativen) Fehlerellipse(n) nach Bögen oder Bogenfolgen. Hier würde der vereinfachte Ansatz Abweichungen von bis zu 50% bei gleichen Vortriebslängen erzeugen. Eine strenge Prognoserechnung ist daher unumgänglich. Die Nichtberücksichtigung eventueller systematischer (Rest-) Effekte wurde bereits mehrfach erwähnt.

### 5.2 Weiterführende Untersuchungen

In Bezug auf die prognostizierten Durchschlagsfehler bei den genannten Tunnelbauwerken wäre eine Gegenüberstellung mit den tatsächlich erreichten Werten nach den erfolgten Durchschlägen zielführend, um die Prognoserechnungen entsprechend zu verifizieren. Natürlich muss zuvor die jeweilige Prognose mit den realen Parametern erneut berechnet werden.

Dies würde einen Rückschluss auf die realen Messbedingungen inklusive der Summe nicht modellierbarer bzw. berücksichtigter Resteffekte zulassen. Für die ingenieurgeodätische Praxis würden diese Informationen äußerst wertvoll sein, um für künftige Projekte stärker abgesicherte Erfahrungswerte zu haben.

#### Dank

Herrn DI Johannes Fleckl-Ernst (ÖBB Infrastruktur AG) und Herrn DI Gregor Windischer (BBT SE) wird für die ausgezeichnete Zusammenarbeit während der beauftragten Arbeiten sowie für die Bereitstellung aktueller Projektdaten und Abbildungen gedankt.

#### 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 Tunnelling 4/2011, No. 5, S. 544-552
- [3] *Fleckl-Ernst, J. (2010):* Geodätische Herausforderungen beim Projekt „Koralmtunnel“. In: Felsbau 5/2010, S. 315-321
- [4] *Macheiner K., Windischer G. (2013):* Simulationsrechnung für den Durchschlag beim Brenner Basistunnel. In: VD V 2/2013, S. 96-100
- [5] *Macheiner K., Döller H., Jachs W., Kienast G., Kühtreiber N., Eder A., Fleckl-Ernst J. (2013):* SBTn basic surveying for tunnelling. In: Geomechanics and Tunnelling 6/2013, S. 713-724
- [6] *Eder A., Kienast G., Rinner H. (2008):* Basic Surveying of the Koralmtunnel. In: Geomechanics and Tunnelling 4/2008, S. 294-299
- [7] *Hofmann-Wellenhopf B., Moritz H. (2006):* Physical Geodesy. 2nd Edition. Springer, Wien
- [8] *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
- [9] *Macheiner K., Fleckl-Ernst J. (2013):* Durchschlagsprognose für das ÖBB Infrastrukturprojekt „Semmering Basistunnel neu“. In: Vermessung & Geoinformation 1/2013, S. 3-10
- [10] *Hennes M. (1998):* Zum Einfluss inhomogener Brechungsindexfelder auf die Verschwenkung offener Polygonzüge am Beispiel des Tunnelvortriebs. Bericht Nr. 65, Schriftenreihe des IGP, ETH Zürich
- [11] *Grillmayer E. (2003):* Untersuchungen systematischer Fehlereinflüsse bei Messungen mit dem Kreisel DMT Gyromat 2000. Shaker, Aachen
- [12] *Stengele R., Schättli-Stählin I. (2010):* Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel. In: Geomatik Schweiz 12/2011, S. 548-557

#### Anschrift des Autors

Dr. Klaus Makeiner, ADP Rinner ZT GmbH, Münzgrabenstraße 4/1, 8010 Graz.  
E-Mail: klaus.macheiner@adp-rinner.at