
Qualitätssicherung von Lotungen und Kreiselorientierungen am Beispiel der Kontrollvermessung des Semmering-Basistunnels

Christoph MEYER, Johannes FLECKL-ERNST

1 Kurzfassung

Der Semmering-Basistunnel (SBT) ist derzeit eines der größten und bedeutendsten Infrastrukturprojekte der ÖBB Infrastruktur AG. Im Zusammenhang mit den notwendigen Schachtlotungen und den seitens des Bauherrn vorgegebenen sehr engen Genauigkeitstoleranzen ergeben sich entsprechend hohe Anforderungen hinsichtlich Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Kreiselmessungen. Diesen Anforderungen wurde in allen Belangen, beginnend bei der Netzanlage und Stabilisierung, der Bereitstellung spezieller Messeinrichtungen wie auch bei der Sicherstellung der notwendigen Redundanz Rechnung getragen. Besonders herauszustreichen ist die Implementierung eines zweistufigen Kalibrierungsverfahrens, welches zusätzlich zu den obligatorischen Vor- und Nacheichungen im Zuge der Kreiselkampagnen vor Ort eigene Kalibriermessungen im Messlabor der TU Graz vorsieht. Diese Maßnahme gewährleistet neben der kontinuierlichen Überprüfung des Kreisels insbesondere eine hohe Qualität und Zuverlässigkeit der Eichwertbestimmung.

2 Einleitung

Mit einer Länge von 27,3 km ist der Semmering-Basistunnel (SBT) ein bedeutender Teil einer der wichtigsten europäischen Verkehrsachsen, dem sogenannten Baltisch-Adriatischen Korridor. Dieser verläuft von Danzig bis nach Ravenna und verbindet damit den größten polnischen Hafen an der Ostsee mit einem der wichtigsten adriatischen Seehäfen Italiens.

Die derzeit bestehende Bahntrasse über den Semmering gilt als Nadelöhr dieses Korridors. Auf Grund der damals gewählten Trassierungselemente (starke Längsneigungen, kleine Tunnelprofile und enge Kurvenradien) erfüllt dieser Streckenabschnitt naturgemäß nicht mehr die Anforderungen, die an eine moderne Hochleistungsstrecke gestellt werden.

Die Errichtung eines leistungsfähigen Basistunnels für diesen Streckenabschnitt ist somit in Verbindung mit weiteren Modernisierungsmaßnahmen wie der Koralmbahn und dem Bau des neuen Wiener Hauptbahnhofes auch ein wesentlicher Schritt zur Entwicklung der österreichischen Südstrecke. Die Fahrtzeit zwischen Wien und Klagenfurt verringert sich nach Fertigstellung des Semmering-Basistunnels und der Koralmbahn um ca. 70 min.

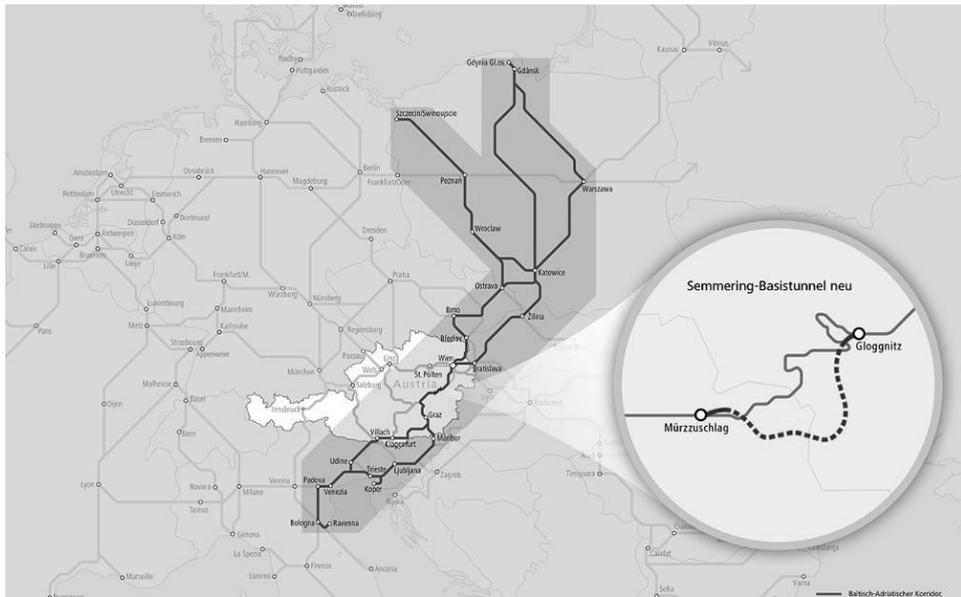


Abb. 1: Baltisch-Adriatischer Korridor (ÖBB Infrastruktur AG)

Im Vortriebskonzept des SBT wurden aus Gründen der Bauleistbarkeit insgesamt 4 Angriffspunkte vorgesehen, wobei 3 Zugänge jeweils über Zwillingschächte erfolgen und der Vortrieb vom Osten aus über ein konventionelles Portal. Der Achsverlauf ist über weite Strecken gekrümmt mit Radien von 3000 Metern. Die Schächte Fröschnitz, Göstritz und Grautschenhof weisen Teufen von 400, 250 bzw. 100 Metern und einen Durchmesser von rund 10 Metern auf. Der Schachtkopf Göstritz liegt zufolge der topographischen Gegebenheiten unterirdisch und wird über einen rund 1100 m langen Zugangsstollen erschlossen.

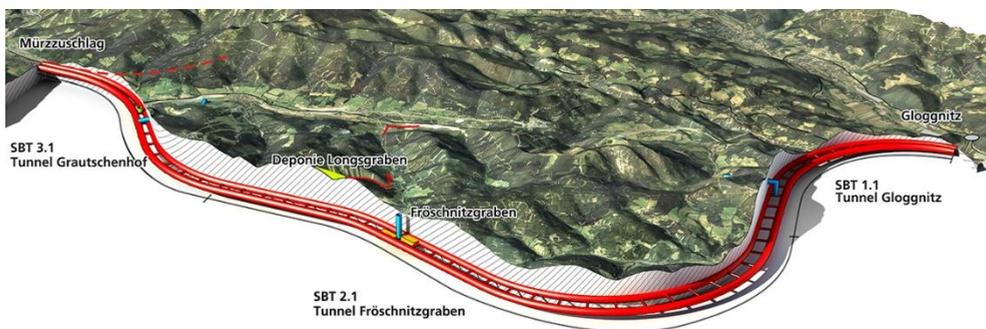


Abb. 2: Projektgliederung des Semmering Basistunnels (ÖBB Infrastruktur AG)

Somit ergaben sich 7 Hauptvortriebsrichtungen und zufolge des zweiröhrigen Ausbaues insgesamt 14 einzelnen Vortriebe. Der Ausbruch erfolgte bis auf den Abschnitt Frörschnitz Ost im klassischen Spreng- bzw. Baggervortrieb. Der beiden Röhren von der Nothaltestelle Frörschnitzgraben Richtung Osten mit einer Gesamtlänge von je 8500 m wurden maschinell mit zwei Vollschnittmaschinen aufgeföhren. Aktuell (Stand Oktober 2022) sind rund 93% der Ausbruchsarbeiten vollendet und mit dem Innenausbau wurde begonnen. Die Bauarbeiten beim SBT laufen seit dem Jahr 2013 und die Inbetriebnahme ist für das Jahr 2030 vorgesehen.

3 Anforderungen und Vorgaben für die Vermessung

Für die Errichtung des SBT zeichnet sich die ÖBB Infrastruktur AG verantwortlich. Diese tritt gegenüber ihren Auftragnehmern (AN) für Bau- und Dienstleistungen als Auftraggeber (AG) auf. Die Themen der Vermessung werden vom AG durch die interne Bautechnik-Fachabteilung „Vermessung & Geoinformation“ (BT-VG) abgewickelt.

Für die Vermessungsarbeiten wurde beim SBT ein geodätisches Grundlagennetz in Lage-Höhe erstellt. Als Bezugssystem dient das System der österreichischen Landesvermessung, der Bezugsrahmen wurde spannungsfrei im System der österreichischen Landesvermessung gelagert und mit Messpfeilern, Boden- und Bolzenpunkten realisiert (MACHEINR et al., 2017). Zusätzlich stehen Lotabweichungskomponenten für die Kreiselmessungen zur Verfügung.

Für die vertragsgemäße Errichtung des Tunnelbauwerks inkl. der dafür notwendigen Vermessungsarbeiten ist der beauftragte Bauunternehmer (AN Bau) verantwortlich. Für die Umsetzung dieser Vermessungen wird vom AN Bau eine AN Bauvermessung beauftragt. Dieser bekommt an den Portalen und Schächten das Grundlagennetz vom AG übergeben. In den Aufgabenbereich der AN Bauvermessung fallen die Absteckungen, Maschinensteuerungen, Kontrollmessungen und Abnahmen. Die Durchführung der Kontrollmessungen zur Sicherung der Koordinaten und Höhen der untertägigen Vermessungshauptpunkte ist im Bauvertrag geregelt und sieht zum Beispiel geometrische Nivellements, verschränkte Polygonzüge durch die Querschläge und Kreiselmessungen vor. Dazu sind Messgenauigkeiten, Instrumentengenauigkeiten und die zulässigen Durchschlagsfehler klar geregelt.

Der AG beauftragt zusätzlich die Vermessungsleistungen zur Überwachung (geotechnische Messungen) und zur Kontrolle des Vortriebs. Die Kontrollmessungen sehen eine Übermessung der untertägigen Vermessungshauptpunkte vor sowie die Überprüfung der Lagerichtigkeit des Bauwerks durch Profilkontrollen. Die Durchführung der Kontrollmessungen werden als Hauptkontrollen (HKM) bezeichnet und finden periodisch oder ab gewissen Vortriebslängen statt. Für die Durchführung dieser HKM hat der AG in einem Bestbieterverfahren die Bietergemeinschaft Geodata ZT GmbH mit Vermessungsbüro DI Christian Maletz beauftragt.

Abweichend von konventionellen Tunnelvortrieben ergeben sich die zentralen Herausforderungen der Bau- sowie der Kontrollvermessung durch das besondere Vortriebskonzept und die damit erforderliche Lage- und Höhenübertragung über Schächte in den eigentlichen Vortriebsbereich sowie die praktisch ausschließliche Orientierung des untätigen Tunnelnetzes über Kreiselazimute. Für Zwecke der Kontrollvermessung steht ein GYROMAT 5000/Leica TM50 zur Verfügung. Die Kreiselmessungen der AN Bauvermessung erfolgt teilweise mit

einem beigestellten GYOMAT 2000/Leica TCA1800 bzw. durch die Universität der Bundeswehr bzw. die Deutsche Montan Technologie (DMT).

Bis zur Bestimmung der Durchschlagsfehler erfolgen die Kontrollmessungen der AN Bauvermessung und dem AG redundant und unabhängig. Eine laufende Übernahme der vom AG bestimmten Koordinaten durch die AN Bauvermessung ist nicht vorgesehen. Dieses Vorgehen weicht damit von der Kompetenzzuteilung beim Gotthard Basistunnel ab (KRUMMENACHER 2017) wo eine laufende Übernahme der AG Koordinaten vorgegeben war.

Nach erfolgtem Durchschlag und gemeinsamer Bestimmung der Durchschlagsfehler erfolgt ein Netzausgleichung samt Neubestimmung der Vermessungshauptpunkte. Diese werden dann beidseitig für die weiteren Vermessungen verwendet. Darauf aufbauend wird das untertage Netz auf die Vermessungshauptpunkte in der Innenschale und dann auf die Gleisvermarkungspunkte übertragen.

4 Lotung, Netzanlage und Richtungsstabilisierung

4.1 Lage- und Höhenübertragung an den Schächten

Zur Lage- und Höhenübertragung durch die Schächte wurden für die Lotung spezielle Konsolen entworfen, die mittels Grundplatten an den Ecken der einzelnen Transportplattformen platziert werden. Auf diese Art wurden Behinderungen durch diverse Einbauten verhindert und ein Minimalabstand von den Schachtwänden gewährleistet. Die Lotung wie auch die Höhenübertragung erfolgte somit jeweils über 4 Punkte pro Schacht und somit ausreichend kontrolliert. Zur Visualisierung der Lotlinie wurde ein Laserokular verwendet und zur Eliminierung des Justierfehlers die Lotfußpunkte in 4 diametralen Lagen markiert.

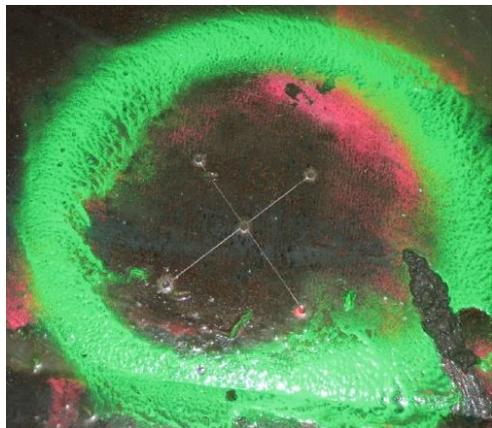


Abb. 3: Mobile Lotkonsolen am Schachtkopf bzw. Markierungen der Schachtfußpunkte (eigene Darstellung)

Die Höhenübertragung sowie die Kontrolle der optischen Lotung erfolgte durch Satzmessungen unter Einbeziehung der Punkte am Schachtkopf sowie der zugehörigen Fußpunkte vom Schachtfuß aus. Somit lässt sich die Lageübertragung auch trigonometrisch durch eine freie Stationierung mit naturgemäß extremen Steilvisuren (Zenitwinkel < 1 gon) bewerkstelligen. Die Ergebnisse dieser Kontrollmessung ergaben trotz der ungünstigen Beobachtungskonfiguration außergewöhnlich gute Übereinstimmungen mit der optischen Lotung und dokumentieren damit die hohe Präzision der eingesetzten Instrumente.

Die durchgreifende Kontrolle bzw. die Dokumentation der erzielten Genauigkeit der Lotung lässt sich anschaulich und einfach durch eine Koordinatentransformation der jeweils mit hoher Nachbarschaftsgenauigkeit bestimmten vier Schachtkopf- bzw. Fußpunkte bewerkstelligen. Die Restklaffen liegen im Bereich einiger weniger Millimeter, wodurch grobe Fehler ausgeschlossen werden können. Zur Einschätzung der Größenordnung der Restklaffen ist die Genauigkeitsspezifikation des eingesetzten Nadirlotes Wild NL (1:200.000 \triangleq 1mm/200m) zu berücksichtigen. Tabelle 1 zeigt das Ergebnis dieser Transformation für den Schacht 2 beim Zwischenangriff Göstritz mit einer Teufe von 250 Metern.

Tabelle 1: Dokumentation der Lotgenauigkeit durch 2D-Koordinatentransformation

P.Nr.	Y	X	dY	dX
21-01-1	-32621.7360	277635.0964		
21-01-2	-32621.7377	277635.0827	<u>0.0035</u>	<u>-.0026</u>
21-02-1	-32624.5703	277634.0275		
21-02-2	-32624.5785	277634.0166	<u>-.0024</u>	<u>-.0012</u>
21-03-1	-32626.2355	277638.3166		
21-03-2	-32626.2407	277638.3068	<u>-.0016</u>	<u>-.0010</u>
21-04-1	-32623.4292	277639.4152		
21-04-2	-32623.4316	277639.4097	<u>0.0006</u>	<u>0.0048</u>

Hinsichtlich der Effizienz des beschriebenen Verfahrens ist festzuhalten, dass neben der umfassenden Kontrolle und der ausreichend hohen Genauigkeit insbesondere durch den geringen Zeitaufwand von ca. 45 Minuten für die Ablotung von vier Punkten eine vernachlässigbare Beeinträchtigung des Baubetriebes gewährleistet ist.



Abb. 4: Schachtkopf Fröschnitz mit 4 Lotkonsolen auf der Transportplattform (eigene Darstellung)

Im Zuge der Auswertung wurden die für den Schachtkopf prädierten Lotabweichungen berücksichtigt und die Lotungen als Koordinatendifferenzen mit entsprechenden Gewichten in die Ausgleichung eingeführt. Der Einfluss der Lotabweichungen beträgt im Fall des Schachtes Fröschnitz (Teufe ~ 400m) ca. 10 mm ist somit jedenfalls zu berücksichtigen.

4.2 UT-Netzanlage und Maßstabskontrolle

Zur Anlage des untertägigen Festpunktfeldes wurden seitens des Auftraggebers paarweise an den Ulmen angeordnete Dübelpunkte im Abstand von rund 100 Metern vorgeschrieben. Daraus ergibt sich für die Kontrollmessung als Konfiguration naheliegenderweise ein möglichst in Achsnähe verlaufender temporärer Polygonzug mit übergreifenden Visuren von rund 350 Metern. Auf die Stabilisierung von Instrumentenstandpunkten im Bereich der Sohle wurde aus praktischen Gründen vollständig verzichtet. Aus dieser Beobachtungsanordnung ergeben sich schlanke Dreiecke, die sich zur Berechnung von Dreieckschlüssen als erste aussagekräftige Kontrolle vor einer Netzberechnung anbieten. Für die beiden Röhren des Bauloses SBT 2.1 Ost mit einer Länge von je 8.5 km liegt bei Auswertung der insgesamt 157 Dreiecke der überwiegende Teil der Dreieckschlüsse unter 0.5 mgon und der entsprechende Mittelwert bei 0.0 mgon. Der Mittelwert der Absolutbeträge ergibt sich mit 0.3 mgon. Diese Werte bestätigen die hohe Qualität der Richtungsbeobachtungen wie auch der Signalisierung und lassen keinen Rückschluss auf relevante Refraktionseinflüsse zu. Signifikante Einflüsse durch Seitenrefraktion (Dreieckschlüsse ~ 3 mgon) finden sich hingegen im Bereich der Schächte bzw. in unmittelbarer Nähe der Portale.

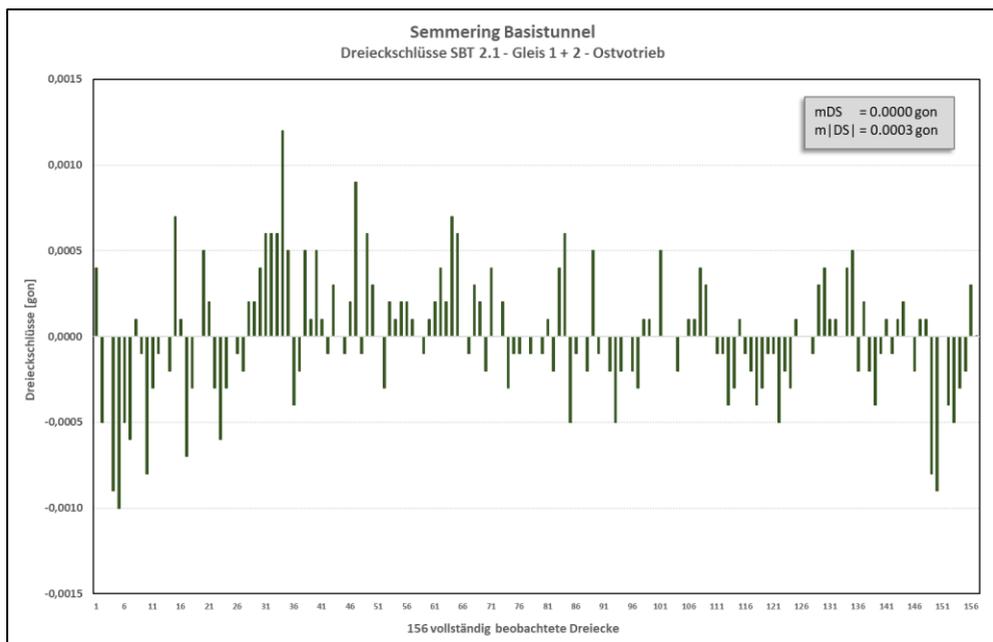


Abb. 5: SBT 2.1 Ost – Dreieckschlüsse aus übergreifender Polygonzugsmessung (eigene Darstellung)

Der Achsverlauf der Semmering-Basistunnels ist über weite Strecken zufolge der Radien von 3000 m relativ stark gekrümmt. Aus diesem Grund beeinflusst ein unkorrigierter Streckenmaßstab den Querfehler in einigen Durchschlagpunkten erheblich und ist demnach zu überprüfen. Zu diesem Zweck wurden bei idealen, d.h. ausgeglichenen Messbedingungen mit den entsprechenden Totalstationen Distanzmessungen am Grundlagentnetz auf den für die Kreiselkalibrierung vorgesehenen Netzseiten ausgeführt. Die Distanzen lagen hierbei zwischen 500 und 4200 Metern. Als Ergebnis der Maßstabsprüfung wurde ein nicht signifikanter Maßstab von $0.6 \text{ ppm} \pm 1.2 \text{ ppm}$ und somit eine vollständige Übereinstimmung der Maßstäbe des Grundlagentnetzes und der Totalstationen festgestellt.

4.3 Spezielle Maßnahmen zur Qualitätssicherung der Kreismessungen

Grundlegende Vorgangsweise bei der Kreiselkalibrierung

Die nachfolgend verwendete Terminologie im Zusammenhang mit der Kalibrierung eines Vermessungskreisels am entsprechenden Grundlagentnetz entspricht nicht der eigentlichen Definition der Begriffe und ist der Tradition und dem diesbezüglichen langjährigen Sprachgebrauch geschuldet. Aus diesem Grund werden hier auch Begriffe wie Eichung bzw. Eichwert verwendet, obwohl es sich natürlich um eine Kalibrierung handelt.

Im Grundlagentnetz des Semmering-Basistunnels wurden im östlichen bzw. westlichen Netzteil insgesamt 9 Eichpunkte mit Messhütten und Eichseiten zwischen 500m und 4400m vorgesehen. Die räumliche Trennung der Eichlinien war notwendig da der Semmering häufig eine Wetterscheide bildet und daher Richtungsmessungen über größere Distanzen in zumindest einem Netzteil mitunter wetterbedingt nicht möglich sind.

Das Ergebnis der Kreiselkalibrierung im Zuge einer Hauptkontrolle und der daraus resultierende Eichwert ist insofern von übergeordneter Bedeutung, da alle Azimute einer Messkampagne mit diesem Wert berechnet werden und ein unzureichend genau bestimmter Eichwert alle Azimute dieser Kampagne systematisch beeinflusst.

Daher wurde bereits in der Konzeptphase eine entsprechend aufwendige Vorgangsweise festgelegt um die Qualität der Kalibrierung sicherzustellen. Im Einzelnen sind dies folgende Maßnahmen:

- Messung auf jeweils 4–5 Netzpunkten mit mind. 5 Messungen pro Standpunkt
- Gegenseitige, zeitnahe Beobachtung der einzelnen Eichlinien
- Einbeziehung von mind. 2 Fernzielen pro Station
- Kombination von langen und „kurzen“ Seiten auf mind. 2 Standpunkten
- je 20-25 Eichmessungen vor und nach der untertägigen Messung

Von besonderer Bedeutung zur Überprüfung der ATR-Kalibrierung ist hierbei die Kombination von langen, d.h. manuell beobachteten Seiten und vergleichsweise kurzen Visuren bei denen analog zu den Azimutmessungen unter Tage die entsprechenden Richtungsbeobachtungen ausschließlich mittels automatischer Zielerfassung durchgeführt werden.

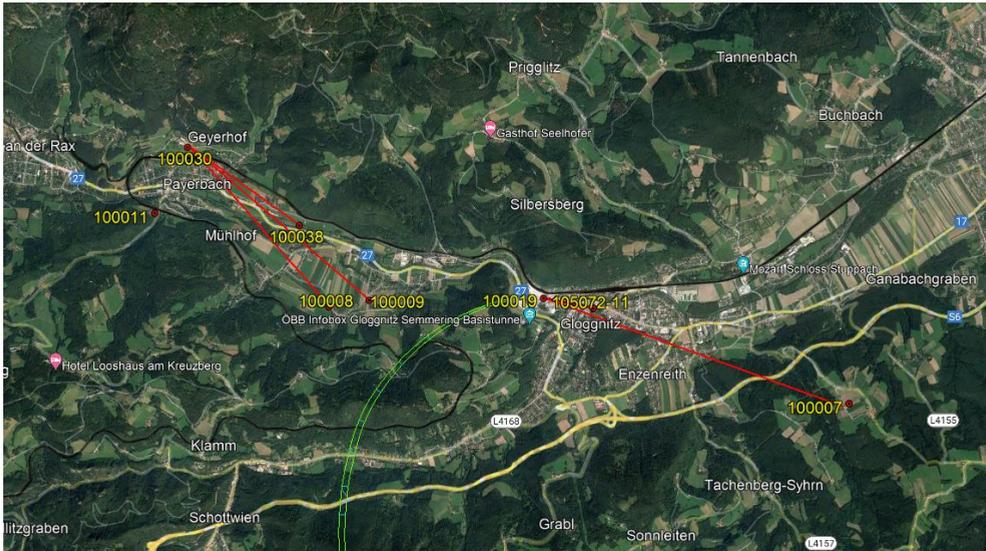


Abb. 6: Eichseiten im Netzteil Niederösterreich (eigene Darstellung, Hintergrund maps.google.com)

Das Ergebnis einer derartigen Kalibrierung führt bei rund 50 Einzelmessungen typischerweise zu Eichwerten mit mittleren Fehlern von 0.1 mgon und Standardabweichungen von ca. 0.5 – 1.0 mgon. Die Streuung der einzelnen Eichwerte eine Kampagne beträgt rund $\pm 1.5 - 1.8$ mgon. Auffällig in diesem Zusammenhang ist die über viele Jahre beobachtete Verteilung der Residuen einer derartigen Eichwertbestimmung, die im Gegensatz zu trigonometrischen Messungen am ehesten einer Gleichverteilung zu folgen scheint. Das Ergebnis einer dreiteiligen Eichmessung (November 2018) ist in Tabelle 2 gelistet.

Für die Beurteilung der Ergebnisse sind u.a. auch für zeitlich begrenzte Intervalle systematisch wirkende Effekte (Eichwertänderungen) in Betracht zu ziehen, die zu einer entsprechenden Verfälschung der ausgewiesenen Fehler führen.

Tabelle 2: Ergebnis einer typischen Eichkampagne (Vor- und Nacheichung)

Messepoche:	6-NOV-2018 - 8-NOV-2018	RP-Gruppe:	SBT-GN-V06
EK[20181106_0847]=	-0.0064 +/- 0.0001 gon (mo= 0.0005 / n= 25) dTm= 17.7/ 2.5 °C		
EK[20181107_1429]=	-0.0064 +/- 0.0002 gon (mo= 0.0007 / n= 15) dTm= 15.6/ 4.3 °C		
EK[20181108_0849]=	-0.0065 +/- 0.0001 gon (mo= 0.0003 / n= 5) dTm= 16.4/ 0.6 °C		
EK[Gesamtmittel] =	-0.0064 +/- 0.0001 gon (mo= 0.0005 / n= 45) dTm= 16.8/ 5.6 °C		

Empirische Überprüfung der internen Temperaturkompensation

Kreiselmessungen werden konstruktionsbedingt in hohem Maße von der Umgebungstemperatur beeinflusst und erfordern daher eine entsprechend umfassende Kalibrierung des Kreisels unter Laborbedingungen. Diese Kalibrierung wird routinemäßig im Rahmen der Produktion bzw. bei Reparatur- oder Servicearbeiten in der Klimakammer des Herstellers DMT durchgeführt und als Korrekturfunktion in der Firmware des GYROMAT hinterlegt. Bedingt durch Alterungsprozesse und der daraus resultierenden Änderung von Materialeigenschaften ist im Laufe der Zeit mit einer eingeschränkten Gültigkeit dieser Korrekturfunktion und in der Folge mit systematischen Verfälschungen der Messergebnisse zu rechnen. Als einfachste Maßnahme zur Verhinderung einer negativen Beeinflussung durch eine nur noch unzureichend genaue Korrekturfunktion wurde seitens des Auftraggebers ÖBB daher die Vorgabe festgeschrieben Eichmessungen und die zugehörigen Bestimmungen der Azimute möglichst unter ähnlichen Temperaturverhältnissen ($\pm 5^\circ\text{C}$) durchzuführen. Als zusätzliche Maßnahme zur Beurteilung der internen Temperaturkompensation der Kreiselmessungen wurde unter Ausnützung der natürlichen Temperaturvariation innerhalb eines Tages im Februar 2019 ($dT \sim 20^\circ\text{C}$) automatisierte Eichmessungen im Grundlagennetz im Intervall von ca. 12 Minuten über einen Zeitraum von ca. 24 Stunden durchgeführt. Der Temperaturverlauf ($2^\circ\text{C} - 21^\circ\text{C}$) im Beobachtungszeitraum entspricht hierbei im Wesentlichen realen Bedingungen bei Eich- bzw. Azimutmessungen und ergab für die Abhängigkeit Azimut versus Temperatur einen Korrelationskoeffizienten von 0,06. Eine grob fehlerhafte Temperaturkompensation kann somit ausgeschlossen werden.

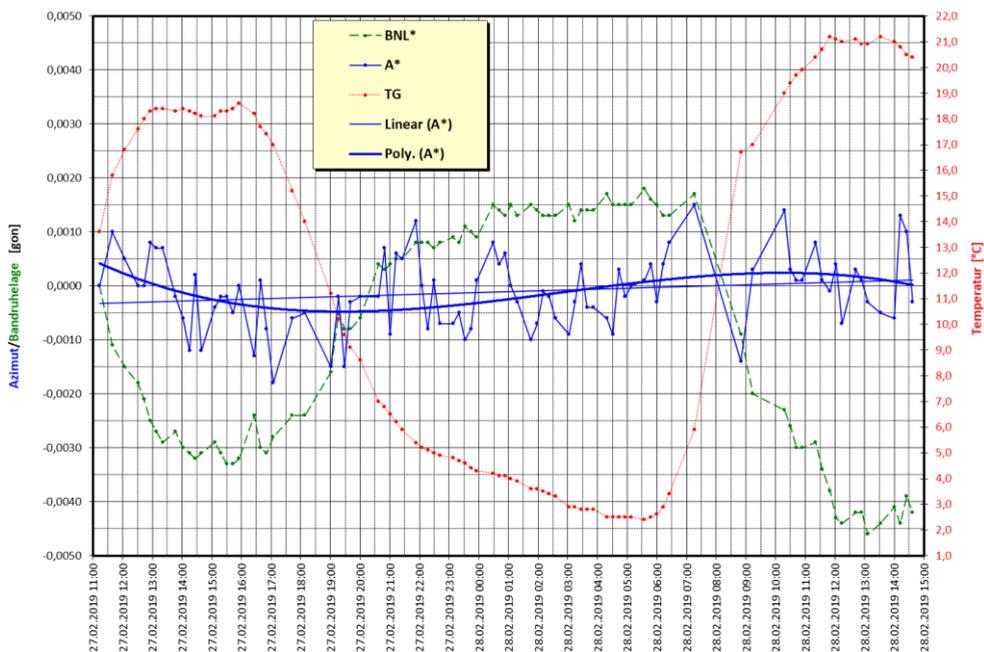


Abb. 7: Ergebnis einer 24 Stundenmessung unter Ausnützung der natürlichen Temperaturvariation (eigene Darstellung)

Übergeordnete Kalibrierung unter Laborbedingungen

Als zusätzliche Kontrolle der Eichwertbestimmung wurden zu den obligatorischen Eichmessungen vor bzw. nach den untertägigen Messungen Eichmessungen im Messlabor der Technischen Universität Graz vorgesehen. Diese Kalibrierungen werden jeweils unmittelbar vor bzw. nach den entsprechenden Messeinsätzen unter der laborspezifischen Temperatur von 20°C ausgeführt um derart die Stabilität bzw. gegebenenfalls auch die signifikante Änderung des Eichwertes im Verlauf einer Kontrollmessung zu dokumentieren. Eine weitere Motivation dieser Kalibrierung unter Laborbedingungen war zudem die Dokumentation des Langzeitverlaufes des Eichwertes unter optimalen Messbedingungen.

Die beiden Eichstrecken wurden mit Längen von 33,6 m unter Ausnutzung der Labordimensionen angelegt und mittels Stahlbolzen und Miniprismen in den Betonaußenwänden des Institutsgebäudes stabilisiert. Analog zu den Eichmessungen im Grundlagennetz werden auch diese Beobachtungen exzentrisch und vollständig automatisiert ausgeführt. Die aus jeweils 20-30 Eichmessungen abgeleiteten Standardabweichungen dieser Messreihen liegen im Bereich von 0,4 – 0,6 mgon und somit deutlich unter der Herstellerspezifikation.



Abb. 8: Kreiselkalibrierung im Messlabor der Technischen Universität Graz (eigene Darstellung)

Überprüfung der Bandruhelage

Die Bestimmung der Bandruhelage (Mittellage der freien Schwingung der Messzelle) ist ein essentieller Teil des automatisierten Messvorganges des GYROMAT und in hohem Maße temperaturabhängig. Zur Überprüfung dieser Korrelation (Bandruhelage/Temperatur) und insbesondere der Linearität des Zusammenhanges wird für jede Messkampagne eine entsprechende Auswertung durchgeführt.

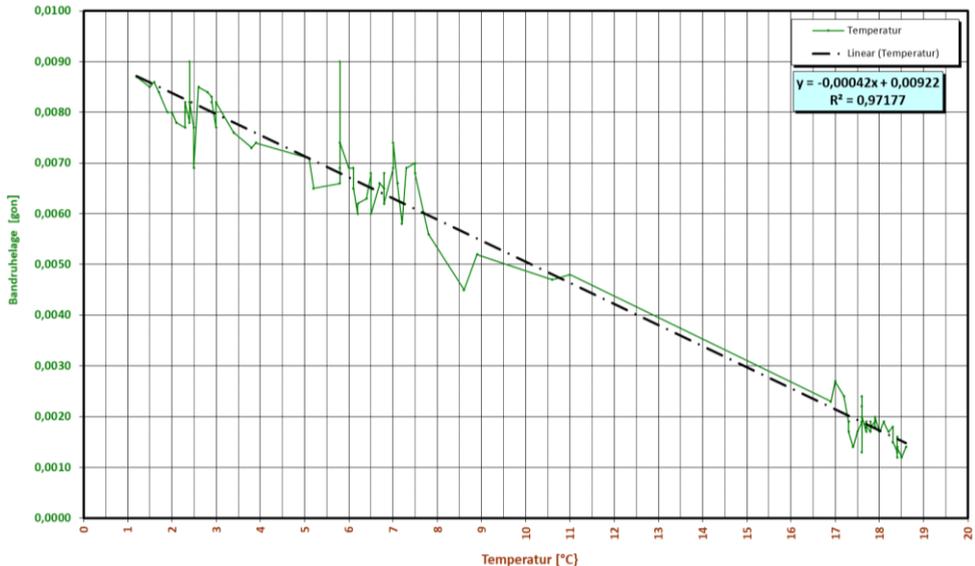


Abb. 9: Korrelation zwischen Temperatur und Bandruhelage (eigene Darstellung)

Die Änderung der Bandruhelage für den GYROMAT 5000 (S.Nr. 5206) beträgt rund -0.4 mgon pro °C. Der Korrelationskoeffizient ergibt sich im Normalfall mit nahezu 1. Abweichungen von diesen Werten deuten auf Störung bzw. Fehlfunktion des Kreisels hin.

Vollständige Automatisierung des Messvorganges

Auf Grundlage der Erfahrungen der letzten 25 Jahre mit Kreismessungen bei zahlreichen nationalen und internationalen Projekten wurde zur zeitlichen Optimierung des Messablaufes sowie zur Gewährleistung höchstmöglicher Genauigkeit und Effizienz der grundsätzlich bereits automatisierte zentrale Messvorgang (Bestimmung der Nordablage) in einen vollständig automatisierten Mess- und Auswerteprozess integriert. Eine derartiger Messvorgang umfasst neben der Lernphase die mit der Richtungsübertragung kombinierte Exzentermessung sowie die üblichen Wiederholungsmessungen.

Die Kreismessungen wie auch die zugehörigen trigonometrischen Beobachtungen werden unter ständiger Qualitätskontrolle programmgesteuert über einen feldtauglichen PC durchgeführt. GYROMAT und Totalstation werden hierbei seriell mit einem Steuerrechner verbunden und abgesehen von der unumgänglichen Lernphase für die Richtungs- bzw. Exzentermessung ohne jegliche Interaktion durch den Beobachter vom Computer gesteuert.

Die Datenerfassung, Sicherung und Plausibilitätsprüfung ist ein wesentlicher Bestandteil der speziell entwickelten Steuersoftware und ermöglicht die unmittelbare Adaptierung des Messablaufes im Falle von Störungen der Messung bzw. Überschreitungen der Genauigkeitstoleranzen. Insbesondere wird zur Vermeidung fehlerhafter Richtungsreduktionen der Kompensatorindexfehler vor jeder Messung überprüft und gegebenenfalls durch Messung in diametralen Lagen automatisch aktualisiert.



Abb. 10: GYROMAT 5000 mit vollständig automatisierten und überwachten Messablauf (eigene Darstellung)

Weitere Kontrollen betreffen die Genauigkeit der Richtungsübertragung durch eine unmittelbar durchgeführte Satzausgleichung, die Übereinstimmung der Wiederholungsmessungen (Rohazimute) auf einem Standpunkt sowie Temperaturdriften, Batteriespannungen und die Stehachsenneigung.

Abstimmung mit der AN Bauvermessung

Die Kreismessungen sind im konkreten Fall des Semmering-Basistunnels das zentrale und wichtigste Element der Vortriebs- und Kontrollvermessung. Zur Gewährleistung bestmöglicher Ergebnisse und höchstmöglicher Zuverlässigkeit wurde deshalb im Einvernehmen mit dem Auftraggeber ÖBB eine detaillierte Abstimmung und Planung der Messungen mit der AN Bauvermessung durchgeführt. Zielsetzung hierbei war durch möglichst einfache und pragmatische Maßnahmen signifikante Differenzen in der Orientierungsübertragung unmittelbar zu erkennen und umgehend darauf zu reagieren. Zu diesem Zweck wurde im Wesentlichen folgende Vorgangsweise festgelegt:

- Größtmögliche Unabhängigkeit der Azimutbestimmung durch Verwendung unterschiedlicher Instrumente für AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung
- Sicherstellung der Qualität des Eichwertes durch konsequente Einhaltung des Messkonzeptes für die Kalibrierung vor und nach der untertägigen Messung
- Übergeordnete Kalibrierung vor und nach jeder Messkampagne im Labor
- Festlegung und Stabilisierung von je einer gemeinsam verwendeten Kreisseite pro Vortriebskilometer und Röhre

- Exzentrische und gegenseitige Messung der Azimute nahe der Achse mit mindestens je 3 Messungen
- Beobachtung von je 2-3 Azimuten pro Röhre und Messkampagne mit jeweils Wiederholung der letzten Kreiseite der vorangegangenen Kampagne

Auf diese Art wird sichergestellt, dass AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung ihre Kreiselmessungen auf identen Netzseiten durchführen und somit ein direkter Vergleich der ursprünglich bestimmten Azimute ermöglicht wird. Unter Einbeziehung der obligatorischen Wiederholungsmessungen werden somit die meisten Kreiseiten vier Mal zu unterschiedlichen Zeitpunkten mit 2 unterschiedlichen Instrumenten beobachtet und können vergleichsweise einfach bezüglich ihrer Übereinstimmung beurteilt werden. Insbesondere sind Unstimmigkeiten der Eichwerte an Hand der Azimutdifferenzen zwischen AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung unmittelbar erkennbar. Überraschungen hinsichtlich signifikanter Koordinatendifferenzen als Ergebnis der nachfolgenden Netzberechnungen sind damit praktisch ausgeschlossen. Tabelle 3 zeigt beispielhaft die Gegenüberstellung von 6 Azimuten der AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung der Messkampagne vom Oktober 2020 am Baulos SBT 2.1 mit unterschiedlichen Instrumenten (GYROMAT 5000 bzw. 2000) und Eichwertbestimmungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

Tabelle 3: Azimutvergleich SBT 2.1 – Ostvortrieb vom Oktober 2020

Datum	Gleis	von TM	nach TM	Az (K.-Verm.)	Az (AN-Verm.)	Az-Diff.
2020 10 28	1	2480	2840	103,8614	103,8613	0,0001
2020 10 28	1	3477	3801	83,3560	83,3565	-0,0005
2020 10 28	1	4428	4750	63,4473	63,4474	-0,0001
2020 10 28	2	2762	3151	97,4232	97,4228	0,0004
2020 10 28	2	3481	3799	82,8956	82,8960	-0,0004
2020 10 28	2	4382	4724	63,4704	63,4713	-0,0009

Ein wesentlicher Grund für die angestrebte hohe Redundanz der Kreiselorientierungen liegt natürlich auch in der grundsätzlich zweifelhaften Stabilität untertägiger Netzpunkte. Bewegungen sind weder im zyklischen noch im kontinuierlichen Vortrieb auszuschließen und würden bei kombinierter Berechnung mehrerer Messkampagnen die Ergebnisse entsprechend beeinträchtigen.

Plausibilitätskontrollen bei Eichmessungen

Für die Eichmessungen sind hier insbesondere der Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Beobachtungsstationen bzw. die Differenz der Vor- bzw. Nacheichung von Bedeutung. Hier zeigt sich, dass mitunter die einzelnen Standpunktmittel innerhalb eines Tages auch bei gleichbleibenden äußeren Bedingungen Differenzen aufweisen, die allein aus den empirisch ermittelten zugehörigen Standardabweichungen nicht erklärbar sind. Selbiges gilt auch mitunter für den Vergleich der Eichwerte aus Vor- und Nacheichung. Für die Ursache dieser

Differenzen gibt es auch seitens des Herstellers keine plausiblen Erklärungen. Naheliegender sind transportbedingte Einflüsse auf den Instrumentenaufbau, d.h. auf die sensible Verbindung des GYROMAT mit der Totalstation, die offensichtlich zeitlich begrenzte systematische Effekte bewirken.

Plausibilitätskontrollen bei Azimutmessungen

Für die eigentlichen Azimutmessungen unter Tage sind neben der Streuung auf einem Standpunkt insbesondere die Differenzen aus Hin- und Rückmessung von Bedeutung. Die Differenzen dieser Standpunktmittel, die üblicherweise aus drei Einzelmessungen gebildet werden, dienen neben der durchgreifenden Kontrolle auch der Dokumentation bzw. Elimination eventuell vorhandener Refraktionseinflüsse. Im Zusammenhang mit einer gegebenenfalls wirksamen Seitenrefraktion ist festzuhalten, dass bei der Auswertung mehrerer hundert Azimute auf zahlreichen Projekten in den letzten 25 Jahren die Differenzen aus Hin- und Rückmessung durchschnittlich bei 0.5 mgon lagen und sich somit aus der spezifischen Genauigkeit des GYROMAT 2000 bzw. 5000 erklären lassen.

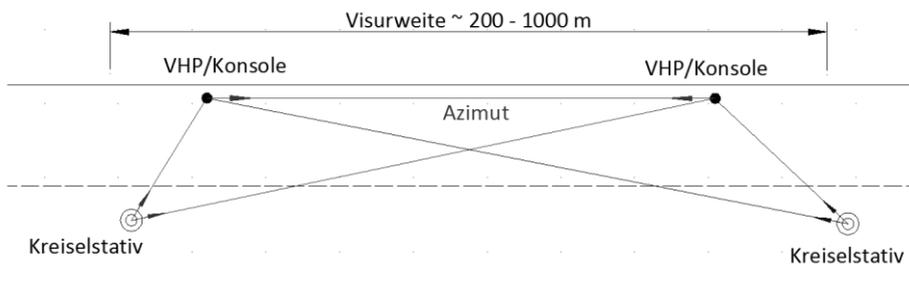


Abb. 11: Exzentrische Azimutübertragung in Achsnähe (eigene Darstellung)

Differenzen > 1 mgon bilden hierbei die Ausnahme. Zuzufolge dieser Größenordnung lässt sich ableiten, dass unter Standardmessbedingungen und bei Einhaltung der langjährig bewährten, exzentrischen und achsnahen Beobachtungskonfiguration (Abbildung 11) Refraktionseinflüsse mit einem modernen Vermessungskreisler nicht signifikant nachgewiesen werden können. Abbildung 12 zeigt die Differenzen aus Hin- und Rückmessung von insgesamt 111 im Zeitraum Juni 2017 – September 2022 auf allen Baulosen des Semmering-Basistunnels. gemessenen Azimuten. Der Mittelwert ergibt sich mit 0.0 mgon, die mittlere Differenz (Mittelwert der Absolutbeträge) mit 0.5 mgon.

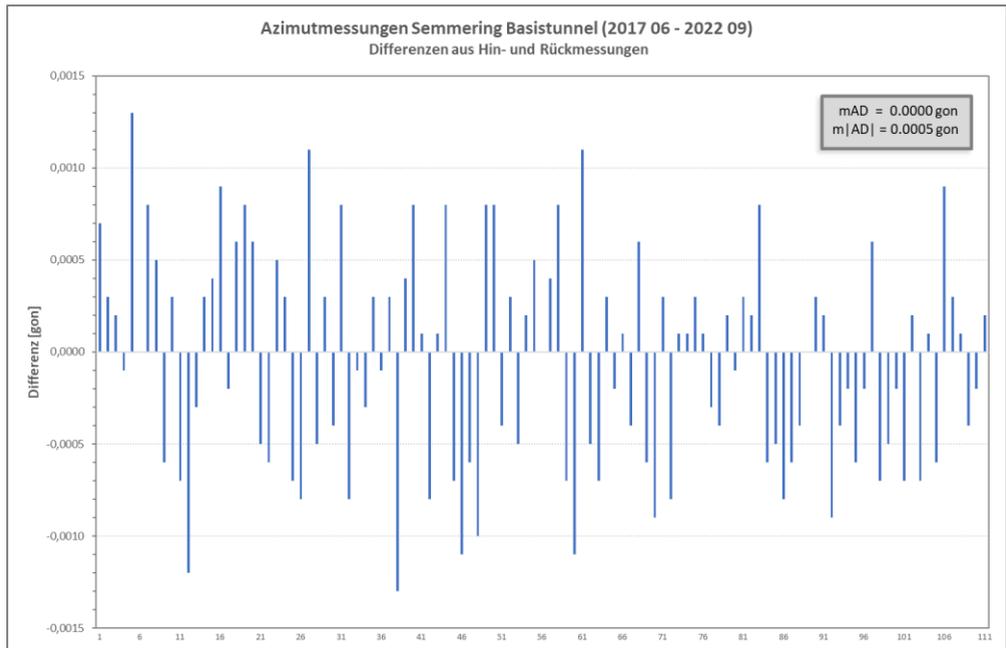


Abb. 12: Azimutdifferenzen (SBT 2017-2022) aus Hin- und Rückmessung (eigene Darstellung)

5 Ergebnisse des ersten Durchschlags

Im Mai bzw. Oktober 2022 erfolgte der erste Durchschlag für die beiden Röhren zwischen den Baulosen SBT 1.1 (Tunnel Gloggnitz) und SBT 2.1 (Tunnel Fröschnitz). Die gesamte Vortriebsstrecke umfasst hierbei neben der eigentlichen Streckenröhre mit rund 10 km (8.5 km TBM-Vortrieb bzw. 1.5 km bergmännischer Vortrieb) den Zugangstunnel Göstritz (1100 m) sowie die beiden Schächte Göstritz (240 m) und Fröschnitz (400 m).

Der Durchschlagsfehler ergab sich für beide Röhren mit je 20 mm quer und längs sowie 30 mm hinsichtlich der Höhe weit unter den Fehlergrenzen des Auftraggebers und bestätigt offensichtlich die Sinnhaftigkeit des Vermessungskonzeptes und insbesondere die Zweckmäßigkeit der hohen Redundanz der Orientierungsübertragung. Der vergleichsweise große Höhenfehler wurde maßgeblich (als Folge der Charakteristik der Lattenteilung der verwendeten Nivellierlatte) durch eine mangelhafte Maßstabkorrektur verursacht. Hervorzuheben ist in diesem Zusammenhang auch die sehr gute Übereinstimmung der Streckenmaßstäbe der verwendeten Totalstationen, die im vorliegenden Fall zufolge der stark gekrümmten Achse auch den Querfehler im Durchschlagpunkt erheblich beeinflussen.

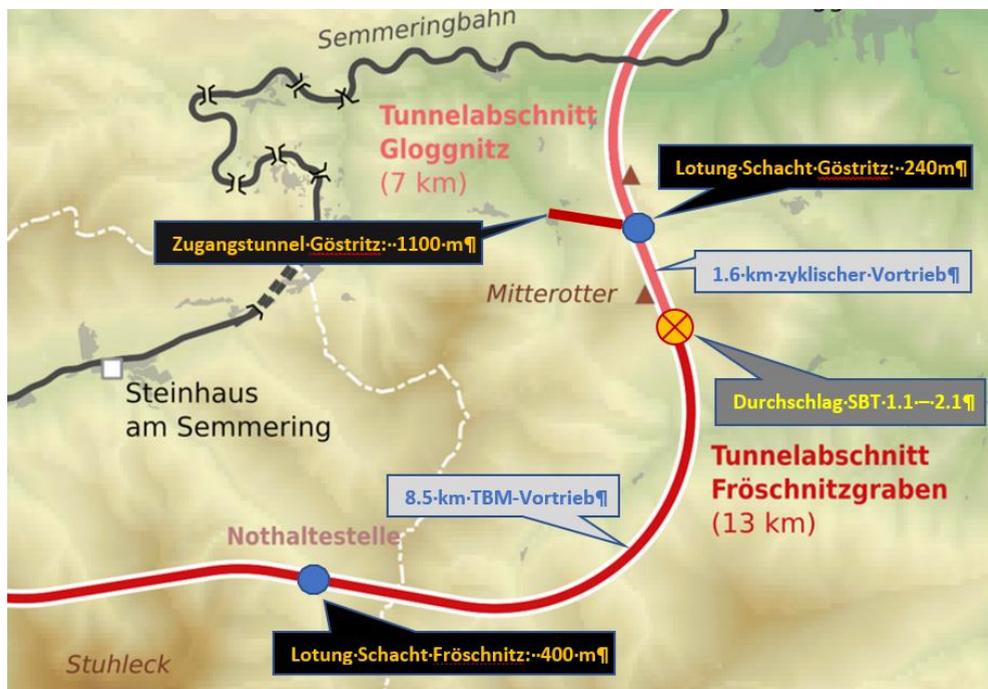


Abb. 13: 1. Durchschlag zwischen den Baulosen SBT 1.1 – 2.1 (eigene Darstellung)

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist letztlich auch der kontinuierlich durchgeführte Koordinatenvergleich zwischen AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung. Die Lagendifferenzen bewegen sich über die gesamte Vortriebsstrecke jeweils im Bereich von ± 15

mm wodurch zu keinem Zeitpunkt eine Anpassung der verwendeten Koordinaten notwendig wurde. Abbildung 14 zeigt die Differenzen der achsbezogenen Koordinaten (längs bzw. quer) zwischen AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung für den 8.5 km langen TBM-Vortrieb des Bauloses SBT 2.1 von der Nothaltestelle bzw. dem Schacht Fröschnitz bis zum Durchschlagpunkt SBT 1.1. – 2.1.

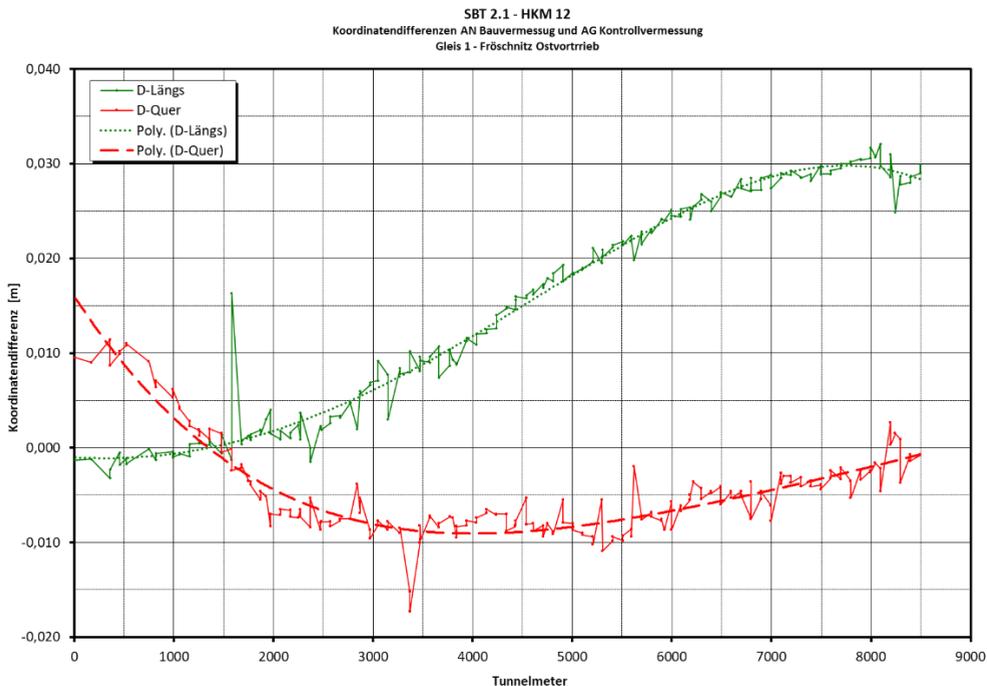


Abb. 14: Baulos SBT 2.1 Ost - Koordinatendifferenzen zwischen AN Bauvermessung und AG Kontrollvermessung (eigene Darstellung)

Literaturverzeichnis

MACHEINER, K., DÖLLER, H., JACHS, W., KÜHTREIBER, N., EDER, A., KISTENICH, M., FLECKL-ERNST, J. (2017), Das dynamische Grundlagennetz für den Semmering-Basistunnel: Herausforderungen seit der Netzerstellung, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, Wichmann Verlag

KRUMMENACHER, S., SCHÄTTI, I. (2017), Weshalb sind die „besten“ Koordinaten nicht immer die „richtigen“?, Beiträge zum 18. Internationalen Ingenieurvermessungskurs Graz, Wichmann Verlag