



Alpenquerende Tunnelprojekte und Herausforderungen an die Ingenieurgeodäsie

Hilmar Ingensand, Zürich

Kurzfassung

Der neue Gotthard-Basistunnel als Teil des AlpTransit-Projektes ist mit 57 km der derzeit längste Eisenbahntunnel, der sich im Bau befindet. Die Fertigstellung ist für 2017 geplant. Dieses Bauwerk hat damit Vorbild- und Pionierfunktion für weitere alpenquerende Tunnel, die zurzeit in Planung sind. Die technischen Herausforderungen bestanden dabei nicht nur in Bauverfahren unter speziell schwierigen geologischen Bedingungen, sondern auch in der Lösung der ingenieurgeodätischen Vermessungsaufgaben. Toleranzen im Dezimeterbereich, die Risiken und Baukosten reduzieren sollen, erforderten ebenso neue Wege in der geodätischen Messtechnik. Insbesondere die hochgenaue Richtungsübertragung in dem 800 m tiefen Vertikalschacht von Sedrun stellte eine spezielle messtechnische Herausforderung dar, da vom Schachtfuss aus der Tunnel nach beiden Seiten mehrere Kilometer vorgetrieben wird. Da sich im Bereich des Tunnels mehrere Staumauern befinden, wurden grossräumige Überwachungskonzepte realisiert, die auch auf andere Tunnelprojekte übertragen werden können.

Schlüsselwörter: Tunnelbau, Absteckung, Monitoring, Inertialmesstechnik, Kreismessungen, GPS-Netze, Präzisionslotung, AlpTransit

Abstract

At the moment the new 57 km Gotthard base-tunnel is the longest railway tunnel of the world, which is under construction. It represents the kernel of the AlpTransit project which will be completed in 2017, approximately. This projects acts as template and pioneer for future alp-crossings. The challenges result not only in construction technologies under risky geological conditions but also in finding solutions for high precision geodetic tasks. Decimeter tolerances at 57 km which had to reduce risks and costs asked for new approaches in geodetic metrology. Especially the high precision direction transfer in a 800 m vertical shaft of the intermediate attack at Sedrun required sophisticated technologies, as this direction transfer gives the direction to both sides at the bottom of the shaft. As there are three concrete dams located above the tunnel large area monitoring concepts had to be established which can conceptually be transferred to other tunneling projects in alpine regions.

Keywords: tunneling, setting out, monitoring, inertial navigation systems, gyroscopic measurements, GPS networks, precision plumbing, AlpTransit

1. Einleitung

Eine Betrachtung der Tunnelbauwerke der letzten Jahrhunderte zeigt, dass nach einer ersten Serie von Eisenbahntunneln im 19. Jahrhundert in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts zahlreiche Strassentunnel folgten. Im 21. Jahrhundert wird wiederum auf die Eisenbahn als leistungsfähiges Verkehrsmittel gesetzt. Die alpenquerenden Bahnprojekte werden heute als so genannte Flachbahnen mit einer an die hohen Geschwindigkeiten angepassten Trassierung realisiert. Dadurch verlängern sich die Tunnelstrecken beträchtlich. Neben dem Bau und den ingenieurgeodätischen Anforderungen an Tunnelprojekte diesen Ausmasses sind die Folgen eines derartiger Eingriffs in die Alpen, die sich immer noch in einem neotektonischen Faltungsprozess befinden, zu berücksichtigen. Die von der Schweizerischen Landestopographie 1997/99 im Vergleich zu 1970 beobachteten Senkungen über dem Gotthard-Strassentunnel erreichten einen Betrag von 12 cm, der für Staumauern, die sich im Be-

reich des AlpTransitprojektes befinden, nicht tolerierbar war. Geologen haben dieses Phänomen inzwischen als Entwässerungsprozess erkannt. Die Korrelation von so genanntem Kluftwasser und zyklischen Senkungen und sogar Hebungen gilt als erwiesen [1].

Während Dehnungen und Stauchungen der Talquerschnitte mit einer Toleranz im Zentimeterbereich (siehe Tabelle 1) von den elastischen Betonbauwerken ertragen werden können, sind vor allem Scherungen für diese Bauwerke gefährlich und erfordern neben dem geodätisch-geometrischen Monitoring auch geotechnische Überwachungsmessungen.

Als Konsequenz dieser Beobachtungen müssen die bestehenden Stauanlagen permanent mit einer Sensitivität im Millimeterbereich beobachtet werden.

2. Die geodätischen Herausforderungen

Mit diesen extrem langen und tiefen Tunneln für Hochgeschwindigkeitsbahnen ergaben sich

| Erwartete Oberflächenbewegungen (Abschätzung) | Zulässige Verformung auf Kronenhöhe („Elastische Grenze“) | Toleranzen für die Vermessung |
|---|---|-------------------------------|
| Talverbreiterung < 50 mm | 10 mm | 4 mm |
| Talverengung < 25 mm | 50 mm | 4 mm |

Tabelle 1: Toleranzen für die zulässige Verformung von Staumauern

auch für die Vermessung Herausforderungen, die nur mit eigens entwickelten Messmethoden gelöst werden konnten. Als Durchschlagstoleranz wurden im AlpTransitprojekt von dem Bauherrn in der Lage 25 cm und in der Höhe 12,5 cm auf 57 Km vorgegeben. Daraus leiten sich Standardabweichungen von 10 cm für die Lage bzw. 5 cm für die Höhe ab, die in einem entsprechenden Lage- und Höhenbezugsrahmen abgestützt werden müssen.

2.1 Lage- und Höhenetze

Für den Gotthard-Basistunnel wurde ein neues Lagefixpunktnetz mit 31 Hauptpunkten und Portalbereichspunkten erstellt und 1995 mit GPS neu bestimmt und im Jahr 2005 erneut überprüft [2]. Dieses Netz weist eine innere Genauigkeit von 5 mm auf. Als Höhenfixpunktfeld wurde das bestehende amtliche Höhensystem LV02 als unzureichend angesehen, da bisher weder orthometrische Korrekturen, die im Tunnelbereich bis zu 1 dm betragen können, noch die Hebungen der Alpen von ca. 1 mm pro Jahr berücksichtigt wurden. Ein neues Nivellement wäre jedoch zu aufwendig gewesen. Für das Höhenfestpunktfeld im Bereich des Projektes wurden die folgenden Maßnahmen beschlossen: Die vorhandenen Nivellementdaten wurden durch strenge orthometrische Reduktion der Höhen unter Berücksichtigung von tektonischen Bewegungen neu aufbereitet. Zusätzlich wurde die Nord-Süd-Verbindung sowohl durch Nivellementmessungen über den Gotthardpass, als auch mittels eines Nivellements durch den Gotthard-Straßentunnel neu gemessen.

| Messgrößen | Standardabweichungen |
|------------------------------|----------------------|
| Richtungen | 0.3 mgon |
| Kreiselazimute | 1.5 mgon |
| Distanzen | (0.5 mm + 1 ppm) |
| Zentrierung | 0.3 mm |
| GPS-Koordinaten | 10 mm |
| Lotung in Vertikal-schächten | 3.0 mm/100 m |

Tabelle 2: Standardabweichungen der a-priori Berechnungen

Basierend auf den vorgenannten Grundlagenetzen wurde mit den nachfolgenden a-priori Standardabweichungen (siehe Tabelle 2) eine Präanalyse durchgeführt, um den Nachweis für die geforderten Durchschlagstoleranzen zu erbringen.

2.2 Richtungsübertragungen in einem 800m Vertikalschacht

Während die Koordinaten- und Höhenübertragung nach anfänglichen Schwierigkeiten durch Nebelbildung mit optischen Methoden und einer Kontrollmessung mit den aus dem Markscheidewesen bekannten Mehrgewichtsdrahtlotungen gelöst werden konnte, gab es zunächst keine Methode, um die richtungsbestimmenden Kreiselmessungen durch eine andere unabhängige Methode zu überprüfen. Auch nach dem Bau eines zweiten Schachts war eine Richtungsübertragung durch Doppellotung wenig erfolgversprechend. Aufgrund der Genauigkeitsforderungen musste man davon ausgehen, dass es keine Alternative zu Kreiselmessungen gab. Aber auch die Kreiselmessungen sind bei den hohen Genauigkeitsforderungen $\sigma < 1.5$ mgon nicht ganz unproblematisch. Die genauigkeits- und zuverlässigkeitsbestimmenden Faktoren der Kreiselmessung in alpinen Regionen können in die zwei Hauptbereiche mit äußeren und inneren Faktoren eingeteilt werden (siehe Tabelle 3).

Bei den äußeren Faktoren hat im Wesentlichen die O-W-Lotabweichungskomponente bzw. deren Differenz zwischen dem Ort der Referenzmessung, dem Schachtkopf und dem Schachtfuß einen systematischen Einfluss:

$$C_{\text{Lotabweichung}} = \eta \cdot \tan(\phi) + (\xi \sin \alpha_M - \eta \cos \alpha_M) \operatorname{ctg} z$$

η = Ost-West-Lotabweichungskomponente

ϕ = Breite (Sedrun $\phi = 46.4^\circ$)

Die Lotabweichungsdifferenz beträgt 0,1 mgon zwischen Referenzmessung und Schachtkopf, bzw. 0,5 mgon zwischen Schachtkopf und Schachtfuß. Es kann dabei eine Genauigkeit der Lotabweichungskomponenten von $\sigma = 0,3$ mgon angenommen werden, die unterirdisch nur durch Modelle und punktuelle Schweremessungen im Schacht ermittelt wurde. Bei den systematischen instrumentellen Fehlereinflüssen ist vor

| Äußere Faktoren | Innere, instrumentelle Faktoren |
|---|--|
| Netzgenauigkeit | Genauigkeit des Theodoliten und damit der Richtungsmessung |
| Kenntnis der Lotabweichung (Ost-Westkomponente) | Genauigkeit des Kreisels |
| Meridiankonvergenz | Zeitliche Stabilität der Referenzmessung |
| Richtungsreduktion | Temperaturkorrektur für das Gesamtsystem Kreisel und Theodolit |
| Refraktion | Zentrierung |

Table 3: Innere und äußere Faktoren von Kreiselmessungen

allem der Temperatureinfluss der Kreisel-Theodolit-Kombination zu erwähnen, der durch jährliche Kalibrierung und eine möglichst geringe Temperaturdifferenz zwischen Referenzmessung im Fixpunktfeld und der untertägigen Azimutbestimmung reduziert werden kann.

2.3 Inertialsystemmessungen als unabhängige Kontrolle

In Zusammenarbeit mit dem Geodätischen Institut der TU München wurde 2006 eine Richtungsübertragung mit einem modifizierten Honeywell Inertialsystem der Firma IMAR in München gezeigt [3], dass die Rotationskomponente während der Schachtfahrt mit gleicher Genauigkeit wie mit nordsuchenden Kreiseln ermittelt werden kann. Nach diesen ermutigenden Versuchen wurden in zwei Kampagnen mit mehreren Auf- und Abfahrten Richtungsübertragungen

über den 800 m Vertikalschacht durchgeführt. Bei dieser Messanordnung wurde mittels mehrfacher Autokollimation die Richtung des Tunnelnetzes im Zugangstollen auf das Inertialsystem übertragen (siehe Abbildung 1). Anschließend wurde zur Reduzierung der zeitlichen Driften das Inertialsystem möglichst schnell vom Schachtkopf zur Sohle mit ca. 18 m/sec gefahren, da durch äußere und innere Störungen zeitlich abhängige Sensordriften entstehen. Diese Driften können nur schwer rechnerisch berücksichtigt werden, da sie keiner Systematik unterliegen. Bei Laserkreiseln ist mit Driften von $0.002^\circ/\text{Stunde}$ zu rechnen. Eine Möglichkeit der Modellierung der Driften ist das so genannte Zero Velocity Update (ZUPT). Dabei wird das Driftverhalten der Sensoren in der Ruhelage, d.h. bei Geschwindigkeit = Null und bei Drehrate = Null erfasst. Für die im Zwischenangriff Sedrun durchgeführten Messun-

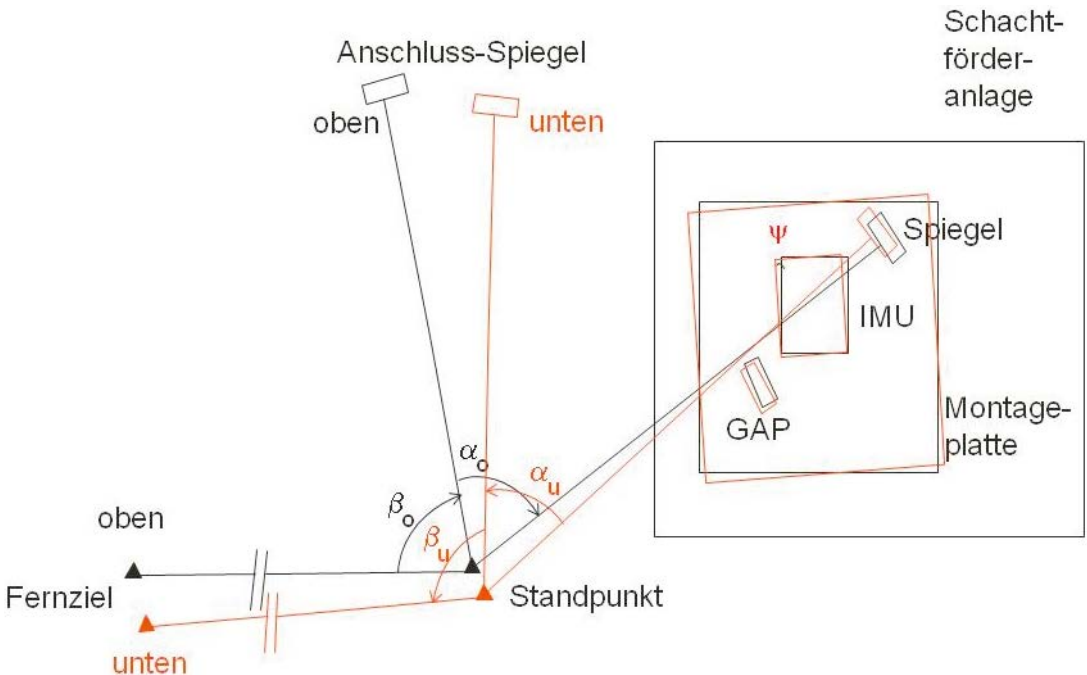


Abb. 1: Prinzip der Richtungsübertragung mittels Autokollimation und Inertialsystem [3]

gen war vor allem die Genauigkeit der Rotation um die z-Achse ω_z von Interesse. Die Messungen der anderen Kreisel und der Beschleunigungssensoren können eliminiert werden.

Das Azimut (Richtungswinkel) ergibt sich in dieser Messanordnung zu:

$$a_u = t_0 + \beta_0 + \alpha_0 + \psi - (\beta_u + \alpha_u)$$

Diese Messungen wurden mehrmals wiederholt und in einer zweiten Kampagne mit einem verbesserten Aufbau durchgeführt. Die Gesamtdifferenz zwischen Kreismessungen und Inertialsystem betrug nach beiden Kampagnen 2,2 mgon. Weitere Untersuchungen an der ETH Zürich zeigten ein Verbesserungspotential durch eine ausschließliche Modellierung der ω_z -Komponente [4].

3. Monitoring der Stauanlagen im Bereich des Basistunnels

Da sich im Bereich des Basistunnels auf der Höhe von Sedrun die Staumauern Curnera, Nalps und Santa Maria befinden, wobei die Staumauer Nalps nahezu über der Tunnelachse liegt, wurde ein grossflächiges Monitoring vorgesehen. Die permanenten Messungen im Bereich

der Staumauern wurden so konzipiert, dass die Messinstrumente auf der Staumauer installiert wurden. Diese Standpunkte bewegen sich aber ihrerseits aufgrund von Wasserstandshöhe und geologischen und baubedingten Deformationen. Durch eine Einzelpunkteinschaltung bzw. freie Stationierung wurde der Standpunkt der Tachymeter jeweils neu bestimmt und anschließend die gesuchten Veränderungen der Talquerschnitte aus den Netzmessungen abgeleitet. Bei den Messungen war vor allem die Modellierung der meteorologischen Einflüsse eine Herausforderung. Da in der Nähe der Staumauer mit großen Temperaturgradienten zu rechnen war, hat sich die Methode der integralen Korrektur bewährt, bei der die meteorologisch bedingten Distanzänderungen der als unveränderlich zu bezeichnenden Strecken auf die anderen zu beobachtenden Distanzen übertragen werden. Eine Analyse der Daten hat gezeigt [5], dass Tagesmessungen aufgrund der inhomogenen meteorologischen Einflüsse für die gestellte Aufgabe nahezu unbrauchbar waren und inzwischen nur noch die Nachtmessungen ausgewertet werden.

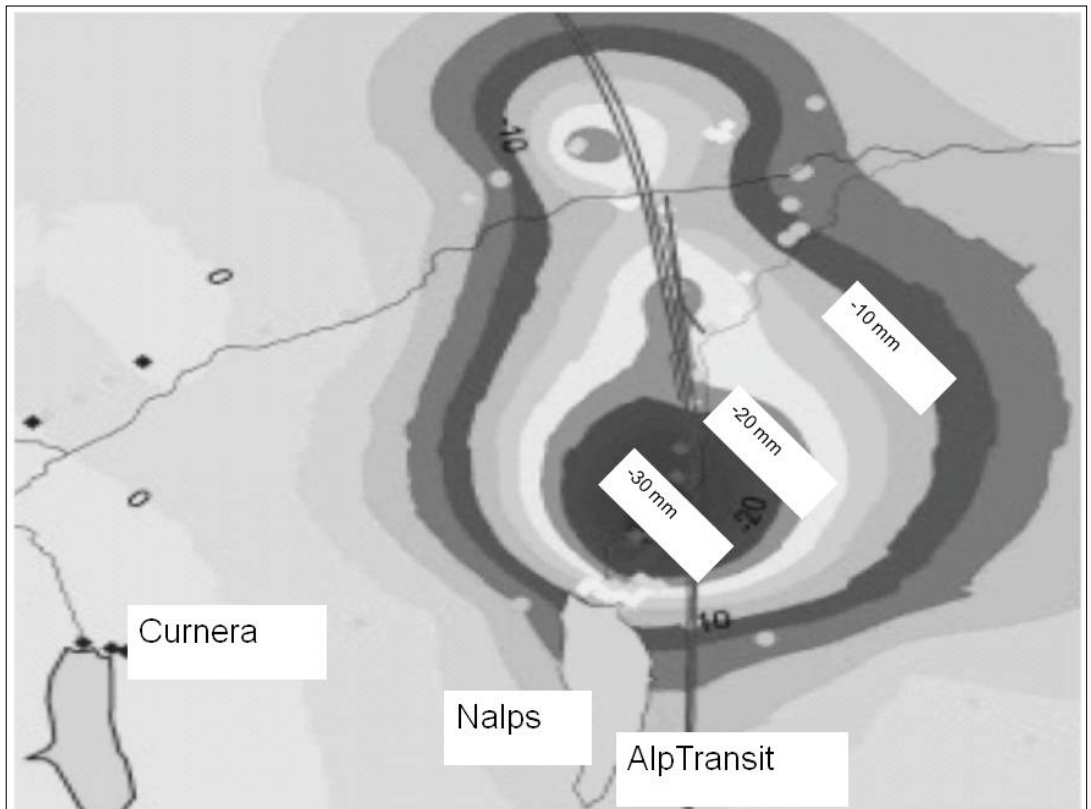


Abb. 2: Senkungen im Bereich der Staumauern Nalps und Curnera [5]

Während der Unterquerung der Staumauer Nalps wurden – wie erwartet – Senkungen festgestellt, die durch eine Abdichtung des Tunnels in vertretbaren Rahmen gehalten werden konnten (siehe Abbildung 2).

Zusammenfassung

Das Projekt Gotthard-Basistunnel hat bisher alle Ingenieurdisziplinen herausgefordert, innovative Technologien zu entwickeln. Nicht nur im Baubereich, wo insbesondere in der Kakiritzone von Sedrun mit deformierbaren Spannbögen Neuland beschritten wurde oder auch die Entwicklung des so genannten Raise Boring Verfahrens, sondern auch im Bereich der Vermessung mussten neben bewährten Technologien auch neue unkonventionelle Wege gegangen werden. So entstand ein großräumiges permanentes Monitoring-System mit Tachymetern und GPS-Einzelpunkten [6]. Der Einsatz eines Inertialsystems zeigte die Möglichkeiten dieser Technologie in Ingenieurprojekten. Auch wenn die Hauptaufgaben der Vermessung weitgehend gelöst sind, so stellen sich nun neue Herausforderungen bei der Absteckung des Hochgeschwindigkeitsschiennetzes in einem derartig langen Tunnel. Ebenso zeichnen sich neue Technologien zur großräumigen Deformationsbestimmung wie Radarinterferometrie ab.

Viele dieser neuen Technologien können nun auch auf andere alpenquerende Projekte übertragen werden. Die geplanten Projekte, wie Brenner Basistunnel und Mt. Cenis werden auch in den nächsten Jahrzehnten eine Herausforderung für alle Ingenieurdisziplinen bleiben.

Literaturverzeichnis

- [1] Zangerl, C.; Evans, K.F.; Eberhardt, E.; Loew, S. Consolidation settlements above deep tunnels in fractured crystalline rock: Part 1—Investigations above the Gotthard highway tunnel, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Volume 45, Issue 8, December 2008, Pages 1195-1210.
- [2] Ryf, A.; Haag, R.; Schätti, I. AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingeniergeodätische Aspekte; XIII. Kurs für Ingenieurvermessung, München 2000. Herausgeber: Schnädelbach, Schilcher, Wittwer Verlag, Stuttgart.
- [3] Neuhierl, T.; Ryf, A.; Wunderlich, T.; Ingensand, H. AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik, *Geomatik Schweiz*, 6/2006.
- [4] Szabo, G. Inertialmesstechnische Richtungsübertragung in einem Vertikalschacht mit der Hilfe von Laserkreis-Zeitreihenanalyse, *Int. Kurs für Ingenieurvermessung an der TU Graz*, April 2007.
- [5] Studer, M.; Bräker, F. Kombiniertes Einsatz von automatischen und manuellen Messmethoden bei einem Langzeitmonitoring, *Int. Kurs für Ingenieurvermessung an der TU Graz*, April 2007.
- [6] Ingensand, H. Mit Geodäsie 1000 Meter unter dem Gotthard hindurch, *Akademie der Geowissenschaften zu Hannover, Veröffentlichungen Heft 24*, S. 33-39, Hannover 2004:

Anschrift des Autors

Prof. Dr.-Ing. Hilmar Ingensand, Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie, ETH Zürich, HIL D 43.3, Wolfgang-Pauli-Strasse 15, CH-8093 Zürich.
E-Mail: ingensand@geod.baug.ethz.ch

Vortragender

Prof. Dr. Hilmar Ingensand

1975 Dipl. Ing. Geodäsie, Universität Bonn

1984 Dr.-Ing. Universität Bonn

bis 1993 Leiter der Abteilung Grundlagen und Applikationen der Leica AG, Heerbrugg

seit 1993 Ordentlicher Professor für Geodätische Messtechnik und Ingenieurgeodäsie an der ETH Zürich

Forschungsschwerpunkte:

Geodetic Monitoring Systems; High Precision Laser Scanning, Range Imaging, Hydrostatic Systems (HLS/PSI), Monitoring Tasks and Navigation of Construction Machine in the AlpTransit Project (57 km tunnel), Machine Guidance and Indoor Positioning

Inhaber von 3 Patenten im Bereich GPS-Theodolite, GPS-EDM-Kombination und Range Imaging.

Auszeichnungen:

Honorary Guest Professor of the University of Wuhan and the Three Gorges University Yichang, China 