Zeitschrift: Geomatik Schweiz : Geoinformation und Landmanagement = Géomatique Suisse : géoinformation et gestion du territoire = Geomatica Svizzera : geoinformazione e gestione del territorio

Herausgeber: geosuisse : Schweizerischer Verband für Geomatik und Landmanagement

Band: 108 (2010)

Heft: 12: AlpTransit

Artikel: Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel

Autor: Stengele, Roland / Schätti-Stählin, Ivo

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-236722

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Grundlagen- und Hauptkontrollmessung im Gotthard-Basistunnel

R. Stengele, I. Schätti-Stählin

Der vorliegende Bericht fasst die Vermessungsarbeiten des Konsortiums Vermessung Gotthard-Basistunnel im Zeitraum 1995 bis 2010 zusammen. Ausgehend von den vertraglichen Anforderungen werden die geodätischen Grundlagen und die Erstellung der Referenzrahmen NetzGBT_Lage und NetzGBT_Höhe beschrieben. Das Konzept der Tunnelvermessung, die Durchführung und Auswertung der Stollenkontrollen sowie die Vermessung im 800-m-Vertikalschacht Sedrun werden vorgestellt. Auf die Analyse der Beobachtungsdaten und die Beurteilung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit wird eingegangen. Für die vier Hauptdurchschläge im Gotthard-Basistunnel werden die theoretisch zu erwartenden Durchschlagsgenauigkeiten (Durchschlagsprognosen) und die effektiv realisierten Durchschlagsergebnisse gegenübergestellt und im historischen Kontext bewertet.

Le présent rapport résume les travaux de mensuration du Consortium mensuration tunnel de base du Gothard durant les années 1995 à 2010. A partir des exigences contractuelles les bases géodésiques et l'établissement des cadres de référence RéseauGBT_Situation et RéseauGBT_Altitutude sont stipulés. Le concept de la mensuration du tunnel, l'exécution et l'évaluation des contrôles des cavernes ainsi que la mensuration dans le puits vertical de 800 m de profondeur de Sedrun sont présentés. En plus on évoquera l'analyse des données observées et l'appréciation de la précision et de la fiabilité. Pour les quatre percements principaux dans le tunnel de base du Gothard on comparera les précisions de percement théoriquement attendues (prognostics de percement) avec les résultats de percement effectivement réalisés, les deux éléments étant appréciés dans le contexte historique.

Quest'articolo illustra una ricapitolazione delle opere di misurazione, effettuate dal 1995 al 2010 dal Consorzio misurazioni galleria di base del Gottardo. Partendo dai requisiti contrattuali, vengono descritte le basi geodetiche e l'allestimento dei quadri di riferimento NetzGBT in posizione ed in quota. Inoltre, vengono presentati il concetto di misurazione in galleria, l'attuazione e la valutazione dei controlli dei cunicoli e la misurazione nel pozzo verticale di Sedrun a 800 m. Non manca l'analisi dei dati rilevati e la valutazione della precisione e dell'affidabilità. Per la caduta dei quattro diaframmi principali nella galleria di base del Gottardo viene effettuato un confronto tra le precisioni teoriche a priori e i risultati a posteriori ottenuti al momento della caduta dei diaframmi. Il tutto viene pure analizzato nel contesto storico.

1. Aufgaben und Verantwortungen des Konsortiums Vermessung Gotthard-Basistunnel (VI-GBT)

Das Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel

Im Jahr 1995 bewarb sich das Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel (VI-GBT) für die Planung und Durchfüh-rung der geodätischen Arbeiten im NEAT-Los «Gotthard-Basistunnel». Dieses Konsortium bündelt die Kompetenz von vier schweizerischen Ingenieur- und Vermessungsbüros mit total 120 Mitarbeitern:

- Grünenfelder und Partner AG in Domat/Ems
- BSF Swissphoto AG in Regensdorf
- Studio Meier SA in Minusio
- Studio Gisi SA in Lugano

Aufgaben und Verantwortungen

Nachdem sich dieses Konsortium in einem internationalen Bieterwettbewerb durchsetzen konnte, übertrug die AlpTransit Gotthard AG im Jahr 1995 die Verantwortung für folgende Aufgaben:

1. Geodätischen Grundlagen
2. Oberirdisches Grundlagennetz in Lage und Höhe
3. Verdichtung des Grundlagennetzes in fünf Portalbereichen
4. Vermessungskonzept für die Tunnelvermessung
5. Periodische Stollenkontrollen und Hauptkontrollvermessungen als Grundlage für die Vortriebssteuerung in Lage und Höhe
6. Vertikallotung im 800-m-Schacht Sedrun
7. Vermessungstechnische Optimierung der Durchschlagsbereiche
8. Laufende Überwachungsmessungen (Setzungen, Verschiebungen) unter- und übertage
9. Kontrollaufnahmen des ausgeführten Bauwerks: Profile, Bankette, Schächte, flächendeckendes Laserscanning, Feste Fahrbahn und Anlagen Bahntechnik.

Der vorliegende Bericht gibt zusammen mit den weiterführenden Publikationen einen Überblick über die Aufgaben 1 bis 6. Bei einem Projekt mit einem Zeithorizont von 20 Jahren müssen Konzepte und Technologien laufend den neuen Entwicklungen angepasst werden. Dies erfordert Innovationskraft, Prozessorientierung und akribische Know-how-Dokumentation auf allen Ebenen. Projekt- und Qualitätsmanagement sind eine Schlüsselkompetenz und stellen – neben der rein fachtechnischen Anforderung – eine sehr grosse Herausforderung für die verantwortlichen Projektleiter dar.

Genauigkeit und Toleranz

Hauptaufgabe und -verantwortung ist die Steuerung der Vortriebe (TBM- und Sprengvortriebe) mit einer Genauigkeit von 10 cm quer und längs und 5 cm in der Höhe. Wie in der Messtechnik üblich, ist diese Genauigkeitsanforderung als einfache Standardabweichungen (1 σ) im statistischen Sinne definiert. Im Werkvertrag wurde der maximal zulässige Fehler (Toleranz, Worst Case) als 2.5 σ und damit ein Vertrauensintervall von 95% (Lage) bzw. 99% (Höhe) definiert. Der durch die Vermessung bedingte maximal zulässige Quer-/Längsfehler beträgt somit 25 cm und in der Höhe 12.5 cm. In anderen Worten: *«Um die geforderte Genauigkeit auf den > 20 km langen Tunnelabschnitten einhalten zu können, darf auf eine Distanz von 100 m die Quer-/Längsabweichung nur 1 mm und in der Höhe sogar nur 0.5 mm betragen.»*

2. Grundlagennetz in Lage: NetzGBT_Lage

Das oberirdische Grundlagennetz besteht aus 28 Hauptvermessungspunkten, die – verteilt über die Portale – auf geologisch stabilem Fels dauerhaft vermarkt wurden und erstmals 1995 mit GPS nach dem damaligen Stand der Technik gemessen und ausgewertet wurde. Zur Steigerung von Genauigkeit und Zuverlässigkeit wurde im weiteren Umfeld der fünf Portale zusätzlich jeweils ein Punkt der Landesvermessung LV95 eingebunden. Eine Helmerttransformation des hochgenauen, freien GPS-Netzes auf Anschlusspunkte im Bereich der Hauptportale in Erstfeld und Bodio minimierte die Lagedifferenzen zu den bestehenden Vermessungswerken (amtliche Vermessung, SBB-Stammgleise), ohne dass sich die hohe innere Genauigkeit des GPS-Grundlagennetzes verschlechterte. Auf Grund der Ausgleichung aller Messungen wurde die Genauigkeit des «NetzGBT_Lage» mit 1 $\sigma_{y,x}$ < 7 mm bzw. 1 σ_{Lage} < 10 mm geschätzt. Die Relativgenauigkeit zwischen zwei beliebigen Punkten ist in jedem Fall < 10^{-6}.

Im Bereich der 5 Portale erfolgten 3D-Verdichtungsmessungen durch Präzisionstachymetrie. Damit wurde die Relativgenauigkeit innerhalb der Portalnetze verbessert, geeignete Referenzstrecken für die spätere Kreiselkalibrierung etabliert und die Grundlagen zur optimalen Übertragung von Massstab und Orientierung des Grundlagennetzes nach untertage geschaffen. Durch Rückversicherungen für alle Punkte der Grundlagen- und Portalnetze konnten lokale Verschiebungen über die 20 Jahre Projektdauer überwacht werden

Im Sommer 2005 – also zehn Jahre nach der Etablierung des Grundlagennetzes und ein Jahr vor dem 1. Hauptdurchschlag in Bodio-Faido – fand eine komplette Wiederholungsmessung des GPS-Grundlagennetzes statt. Dabei wurden in Zusammenarbeit zwischen dem VI-GBT und der ETH Zürich das gesamte Netz «in einem Guss» mit 28 GPS-Empfängern gemessen und ausgewertet. Die Lagedifferenzen zwischen den Messungen 1995 und 2005 lagen – bis auf einen Punkt – alle innerhalb des 95%-Vertrauensintervalls.

Ebenfalls im Sommer 2005 erfolgte eine Überprüfung der Orientierung jeweils einer Seite der Portalnetze durch astrogeodätische Messungen des Schweizerischen Konsortiums Schwere (SKS) in Zusammenarbeit mit der ETH Zürich und dem Institut für Erdmessung der Universität Hannover. Ein direkter Vergleich zwischen den astronomisch gemessenen und in die Projektionsebene reduzierten Azimuten mit den Azimuten des NetzGBT_Lage ergab eine Orientierungsdifferenz von ~ 1 mgon zwischen Erstfeld und Bodio. Die Orientierungsdifferenzen zwischen den «benachbarten» Portalen waren < 0.3 mgon. Ausserdem wurden astrogedätisch gemessene Lotrichtungen mit denjenigen des Geoidmodells CHGeo98 verglichen (Abb. 1). Auf Grund dieser Ergebnisse konnte man davon ausgehen, dass die Eichung/Kalibrierung/Re-

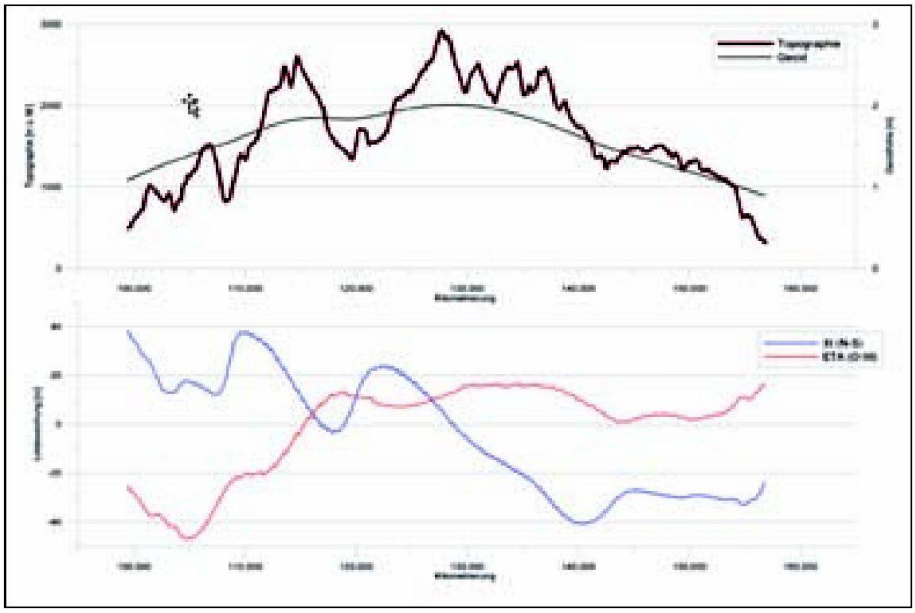


Abb. 1: Topographie, Geoid und Lotabweichungskomponenten auf der GBT-Tunnelachse.

duktion der geographischen Kreiselazimute ohne systematischen Fehler erfolgen konnte.

3. Höhen-Grundlagennetz: NetzGBT_Höhe

Bereits in der Offertphase war dem VI-GBT klar, dass ein vollständiges Präzisionsnivellement über mehrere Alpenpässe als direkte Verbindung aller fünf Portale aus wirtschaftlichen Gründen nicht in Frage kommen kann. Genauso klar war aber auch, dass sich das bestehende Landesnivellement aus mehreren Gründen nicht als Höhenbezugssystem für die Absteckung des GBT eignete: «Gebrauchshöhen», keine potenzialtheoretisch streng reduzierten Höhen, keine Gesamtausgleichung der Nivellementsschleifen, keine Berücksichtigung rezenter Krustenbewegungen, bekannte Inkonsistenzen (zwischen Amsteg-Sedrun, 8-cm-Höhensprung im Tessin).

Im Zuge der Erneuerung des Landesnivellements für den Aufbau des neuen Höhenbezugsrahmens LHN95 arbeitete das Bundesamt für Landestopographie/swisstopo aber ohnehin bereits an der Beseitigung dieser Schwächen. Im geographischen Einzugsgebiet der NEAT wurden deshalb die LHN95-Arbeiten in enger Zusammenarbeit zwischen swisstopo und VI-GBT beschleunigt. Alle im Laufe der letzten Jahrzehnte gemessenen Landenivellemente wurden digital erfasst, gravimetrisch reduziert und unter Berücksichtigung eines kinematischen Ansatzes für die Alpenhebung streng ausgeglichen. Durch dieses Vorgehen beschränkten sich die aufwändigen Präzisionsnivellemente im Feld auf ca. 30 km Anschlussnivellemente von den Portalen zum Landesnivellements. Ein ausgezeichneter Synergieeffekt durch Gleichschaltung der Interessen der Landesvermessung mit denjenigen des Projektes Gotthard-Basistunnel!

Mit der Definition des Höhenbezugsrahmens im GBT (NetzGBT_Höhe) war gleichzeitig klar, dass der Einfluss des Schwerefeldes bei allen untertägigen Messungen in Form von orthometrischen Korrekturen

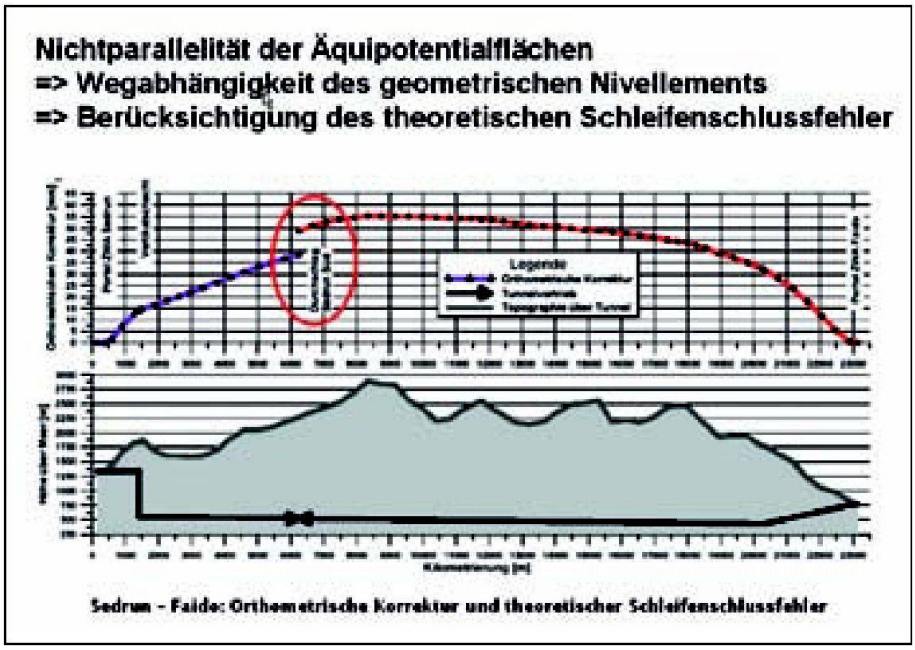


Abb. 2: Modellbasierte Orthometrische Korrekturen und Schleifenschlussfehler des Nivellements.

zu berücksichtigen war. Die orthometrischen Korrekturen und die sich theoretisch ergebenden Schleifenschlussfehler (Nicht-Parallelität der Äquipotenzialflächen → Wegabhängigkeit des Nivellements) wurden für jeden Tunnelabschnitt entlang der Tunnelachse und im 800-m-Vertikalschacht Sedrun mit Hilfe des Massen-, Dichte- und Schweremodells durch swisstopo berechnet (Abb. 2). Die verschiedenen modellbasierten Korrekturen im Höhensystem summierten sich in einzelnen Tunnelabschnitten auf Beträge > 10 cm. Sie überstiegen damit deutlich die geforderte Höhengenauigkeit und sogar die Genauigkeit, mit der Höhenunterschiede nivelliert werden können. Alleine das Modell der Alpenhebung (vertikale Geschwindigkeiten = 1.3 mm/y im Tessin, 0.8 mm/y in Sedrun) bewirkt für den Tunnelabschnitt Faido–Sedrun in einem Zeitraum von 15 Jahren einen differentiellen Höhenunterschied von 7 mm und somit > 10% der erforderlichen Höhengenauigkeit.

Für die praktische Umsetzung auf der Baustelle waren die verschiedenen Höhenkorrekturen (orthometrische Korrektur, Alpenhebung extrapoliert auf den Durchschlagszeitpunkt, Lagerungsdefekte) natürlich nicht geeignet. Aus diesem Grund wurde für jeden Tunnelvortrieb eine lineare Gesamtkorrektur berechnet, die der VI-GBT bei der Auswertung der untertägigen Höhenmessungen berücksichtigte. Alle anderen Projektbeteiligten blieben somit von dieser Problematik der Höhenkorrektur verschont.

Das von swisstopo verwendete – nicht hypothesenfreie – Schweremodell wurde im Sommer 1995 in den bis dahin aufgefahrenen Stollen in Bodio und Sedrun durch Gravimetermessungen der ETH Lausanne überprüft. Dabei ergaben sich Differenzen zwischen modellbasierten und gemessenen Schweren von < 3 mGal im Abschnitt Bodio mit einer (theoretischen) Auswirkung auf den Durchschlagsfehler < 1 mm. Vor allem die sehr gute Übereinstimmung im Vertikalschacht Sedrun wurde zum damaligen Zeitpunkt sehr positiv zur Kenntnis genommen.

Vor dem komplexen Hintergrund der Höhenproblematik an der Nahtstelle von geophysikalischen und geometrischen Messgrössen im geographisch-topographisch anspruchsvollsten Gebiet Europas, sind die ausgezeichneten Durchschlagsergebnisse in der Höhe äusserst bemer-

kenswert und ein echter Leistungsausweis für alle, die an der Konzeption und Realisierung des Höhenbezugsrahmens NetzGBT_Höhe beteiligt waren.

4. Grundlagennetz untertage: Tunnelvermessung

Die Arbeiten an den Bezugsrahmen NetzGBT_Lage und NetzGBT_Höhe bildeten die Grundlage für das untertägige Tunnelnetz und damit für die Absteckung der Tunnelachse und Steuerung der Spreng- und TBM-Vortriebe.

Zur Bedeutung der Portalnetze

Sowohl in der Literatur als auch in der praktischen Arbeit auf der Baustelle wird sehr viel Wert gelegt auf Genauigkeitsmaximierung und Zuverlässigkeitssteigerung im Bereich der Grundlagennetze und der Tunnelnetze. Die Nahtstelle zwischen oberirdischer und untertägiger Vermessung im Bereich der Portale wird – sowohl in Theorie als auch in Praxis – allzu oft vernachlässigt. Dabei kann das Genauigkeitspotenzial nur dann optimal ausgeschöpft werden, wenn Massstab und Orientierung des Grundlagennetzes ohne signifikanten Genauigkeitsverlust über die Portalbereiche nach untertage übertragen werden kann. Diese Problematik wird sehr häufig unterschätzt und ungünstige Randbedingungen im Portalbereich sind eher Regel als Ausnahme: Schwierige topographische Verhältnisse, wechselnde Baustelleninstallationen, Lüftungseinrichtungen, Baustellenverkehr, lokale Deformationen, eingeschränkte Visuren und enge Kurvenradien in den Zugangsstollen erschweren diese Aufgabe erheblich.

Die spezielle Refraktionsproblematik auf Grund des grossen Temperaturgefälles beim Portal wird durch zusätzliche Messungen über temporäre Hilfspunkte im unmittelbaren Portalbereich (wenige Meter ausserhalb und innerhalb) entschärft. Die Ausgangslage für die Tunnelvermessung im Anfangsbereich der Tunnelstrecke ist wie folgt: Koordinatengenauigkeit: 1 σ (y, x, H) < 10 mm, Azimutgenauigkeit: 1 σ (Azimut) < 0.5 mgon. Damit wäre die zulässige Querablage von 10 cm bei einer (theoretischen) Visurlänge von 11.4 km erreicht.

Vermessungskonzept untertage

Zur Anordnung und Eignung von Polygonnetzen untertage sind unzählige Ansätze und Konzepte bekannt. Alle zielen darauf ab, die ungünstige Fehlerfortpflanzung in langgestreckten Polygonzügen und einseitig wirkende systematische Effekte auf Grund der gefährlichen Horizontalrefraktion zu minimieren. Eine allseits anerkannte Lehrmeinung – also die «optimale» Lösung – gibt es allerdings nicht. Der VI-GBT hat sich 1995 für folgendes Vermessungskonzept (Abb. 3) entschieden und an diesem über 15 Jahre konsequent und weitgehend kompromisslos festgehalten.

- Paralleler Präzisionspolygonzug in beiden Einspurtunneln mit Verbindungsmessungen zwischen jedem 3. bis 4. Polygonpunkt.
- Platzierung der Polygonpunkte streng in der Tunnelmitte im Abstand von 400 bis 450 m.
- Übergreifende Visuren, also Messung zu den jeweils zwei nächsten Polygonpunkten in beiden Richtungen, Zielweiten bis max. 900 m.
- Kreiselstützung des Polygonzuges nach 5 bis 7 Polygonpunkten (2 bis 3 km). Mehrfachbestimmung von gegenseitigen Kreiselazimuten auf denselben Polygonseiten in verschiedenen Kampagnen.
- Höhenübertragung durch Präzisionsnivellement (hin/rück), Kontrolle durch trigonometrisches Nivellement des Polygonzuges.
- In Kurvenbereichen: Verschiebung der Polygonpunkte um max. 1 m nach aussen, Reduktion des Punktabstandes bis 300 m, Einhaltung von > 1.5 m Visurabstand von der Tunnelwand, Verzicht auf übergreifende Visuren.
- Wechselnder Einsatz von Personal und Instrumentarium (insbesondere Kreiselinstrumente), um systematische Effekte zu minimieren.

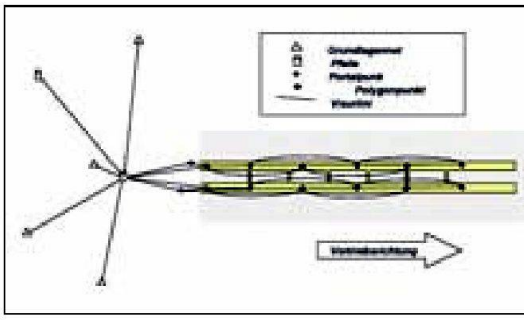


Abb. 3: Vermessungskonzept untertage.

Präanalyse

Durch eine Netzsimulation (Präanalyse) wurde a priori verifiziert, dass mit diesem Vermessungskonzept die geforderten Genauigkeiten in Lage und Höhe eingehalten werden konnten. Die wichtigsten Parameter des stochastischen Modells wurden wie folgt festgelegt:

• Richtungsmessungen	3 cc
• Distanzmessungen	0.5 mm + 1 ppm
• Kreiselazimute (Einzelmessungen)	15 cc
• Zentrierung	0.5 mm
• Nivellierte Höhenunterschiede	1.0 mm/km
• Koordinatenübertragung im 800-m-Schacht Sedrun	24 mm *(«3 mm je 100 m»)*

Es ist äusserst angebracht, bei Simulationsrechnungen eher konservative Annahmen zu treffen, die den suboptimalen Messbedingungen untertage gerecht werden.

Umfang der Stollenkontrollen

Sobald vom Bauunternehmer zwei (max. drei) neue Polygonpunkte in der betonierten Sohle vermarkt wurden – also nach maximal 1300 m Vortriebsleistung – wurden die Koordinaten im Zuge einer Kleinen Stollenkontrolle durch den VI-GBT neu eingemessen. Dabei wurde mindestens an die letzten drei bestehenden Polygonpunkte angeschlossen und es ergab sich somit eine Polygonzugmessung über 2 bis 2.5 km. Nach jeweils 3 km Vor-

Abb. 4: Nadirlot am Schachtkopf.

triebsleistung erfolgte eine Grosse Stollenkontrolle mit einer Polygonzugsmessung über 8 bis 10 Polygonpunkte, also 3.5 bis 4.5 km Länge.
In jedem Vortrieb wurde nach Erreichen von ~ 50% der gesamten Vortriebslänge eine zusätzliche «Halbzeitkontrolle» eingeschaltet. Zusätzlich erfolgte eine Gesamtkontrolle ~ 1.5 km vor Erreichen der Losgrenze. Halbzeit- und Gesamtkontrolle umfassten Messungen im Portalnetz und das gesamte Vortriebsnetz untertage.
Dieses Szenario stellte sicher, dass auf jedem Polygonpunkt Beobachtungen von mindestens 4 Stollenkontrollen zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten vorliegen. Im Zuge der Grossen Stollenkontrollen erfolgte in der Regel eine unabhängige Azimutkontrolle durch den Präzisionsvermessungskreisel Gyromat-2000. Bei jedem Einsatz wurde das gegenseitige Azimut von 2 bis 3 Polygonseiten untertage gemessen. Um eine möglichst unabhängige Kontrolle der Kreiselmessungen zu gewährleisten, kamen drei verschiedene Gyromaten zum wechselseitigen Einsatz: DMT Essen, Universität der Bundeswehr München und ETH Zürich. Aus demselben Grund erfolgte die Messung streng getrennt von der Datenanaylse und Auswertung.
Vermessungsarbeiten untertage finden stets unter erschwerten Bedingungen statt. Neben permanentem Zeitdruck sind ungünstige Randbedingungen (Sicht, Licht, Lärm, Temperatur, Feuchtigkeit, Lüftung, Verkehr…) sowie logistische oder sicherheitsbedingte Einschränkungen die Regel. Für die Kleinen Stollenkontrollen stand ein Zeitfenster von 12 h zur Verfügung. Grosse Stollenkontrollen wurden in aller Regel in die vortriebsfreie Zeit (Weihnachten/Neujahr, Ostern, Sommerferien) gelegt.

5. Vermessung im 800-m-Vertikalschacht Sedrun

Im Zwischenangriff Sedrun erfolgten die Vortriebsarbeiten nach Norden und Süden vom Fuss eines 800 m tiefen Schachtes aus. Die Positionsübertragung von der Kaverne am Schachtkopf hinunter auf das Tunnelniveau wurde im Jahr 2002 mit zwei unterschiedlichen Methoden, einmal optisch und einmal mechanisch realisiert. Mit dem Bau des zweiten Schachtes im Jahr 2004 ergab sich die Möglichkeit, 39 m südlich des ersten Schachts eine zusätzliche optische Lotung durchzuführen. Im Januar 2007, knapp ein Jahr vor dem Durchschlag Amsteg–Sedrun, wurde eine weitere optische Kontrolllotung durchgeführt. Somit lagen für die Punktübertragung drei optische und eine mechanische Lotungsmessung vor.

Abb. 5: Positionierung der Stative am Schachtfuss.

Optische Lotung

Die optische Lotung von oben nach unten erfolgte mit einem Leica-Nadirlot (Auflösung 1:200 000 = 0.5 mm auf 100 m), Abb. 4 und 5. Zur Steigerung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit wurden drei Lotkorridore gemessen, wobei sich die Anordnung nach den vorhandenen Schachtinstallationen richtete. Auf den am Schachtfuss mit Näherungskoordinaten abgesteckten Lotpunkten dienten Prismen mit zentrischen Leuchtdioden als

Abb. 6: Umlenkrolle mit Lotdraht.

Abb. 7: Lote mit 192 kg Gewicht.

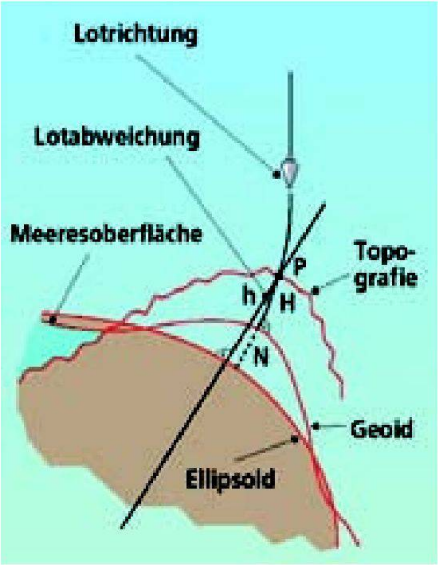


Abb. 8: Lotrichtung und Lotkrümmung.

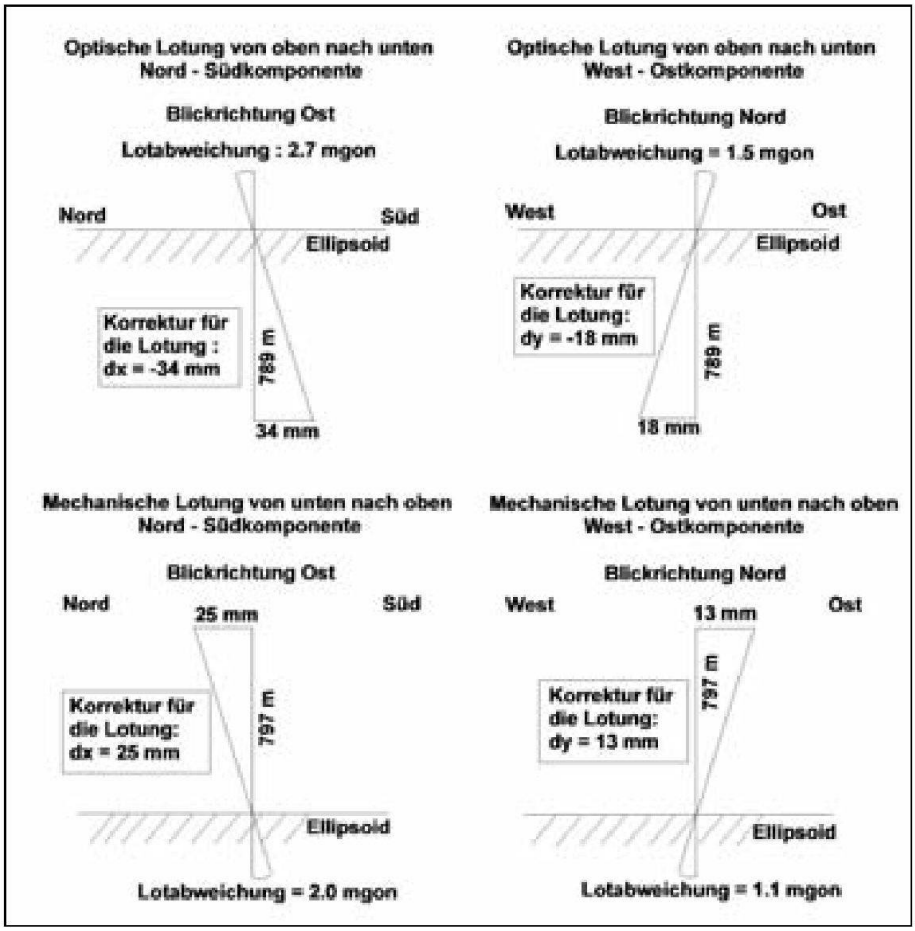


Abb. 9: Lotkrümmungs-Korrektur der Koordinatenübertragung im Vertikalschacht.

Zielmarken. Die exakte Feinpositionierung auf den Stativen erfolgte mit Kreuzschlitten (Zweiachs-Verschiebetischen).

Mechanische Lotung

Auch die mechanische Lotung wurde über drei Korridore geführt. Die Installation der Winden, der Umlenkrollen und das Einfahren der 800 m langen Lotdrähte erforderte einen ganzen Arbeitstag (Abb. 6 und 7). Die Installation endete mit dem Auflegen der 390 kg schweren Gewichtsscheiben für jeden Lotdraht. Nach einer Ruhephase der Lote von 12 h konnten die Messungen am folgenden Morgen aufgenommen werden. Von zwei Stationen aus wurden mit je einem Theodolit jeweils 10 Umkehrpunkte der drei pendelnden Lote in beiden Fernrohrlagen gemessen. Die zweite Messreihe erfolgte nach einer Reduktion der Gewichte auf ~ 192 kg, die dritte wiederum mit Volllast von 390 kg.

Modell für die Lotabweichungskorrekturen

Die Lotabweichung geht bei der Punktübertragung direkt in die Genauigkeit der Koordinaten ein und muss zwingend berücksichtigt werden. Die Lotlinie ist zudem gekrümmt, die Korrekturwerte an Schachtfuss und -kopf unterscheiden sich (Abb. 8 und 9). Die Bestimmung der Lotabweichungen erfolgte mit einer Genauigkeit von 0.3 mgon mit dem Programm CHGeo98. Lotabweichungen und Lotkrümmung verursachen Korrekturwerte für die Koordinatenübertragung bis zu 34 mm.

Ergebnisse der Lotungsmessungen

Der unmittelbare Vergleich aller Lotungsmessungen ergab einen Streubereich von < 20 mm. Die innere Genauigkeit einer Lotungs-Kampagne ergab sich aus der Kongruenz der beiden Dreiecke, welche die drei Lotkorridore am Schachtkopf und am Schachtfuss bilden. Für die Gesamtausgleichung wurde die mechanische Lotung mit einer Genauigkeit 1 $\sigma_{\Delta y \Delta x}$ = 5 mm und die optischen Lotungen mit 1 $\sigma_{\Delta y \Delta x}$ = 10 mm eingeführt. Die Lotverfahren erreichten somit eine weitaus bessere Genauigkeit als a priori angenommen. Erwähnenswert auch hier, dass die modellbasierten Lotabweichungs-/Lotkrümmungskorrekturen die reine Genauigkeit der Lotungsmessung um das Mehrfache übersteigen.

Die Genauigkeit der Höhenübertragung über den 800-m-Vertikalschacht beträgt 1 $\sigma_{\Delta H}$ = 3 mm.

Durch die Vertikallotungen in den beiden Schächten ergab sich ein Azimut für eine 39 m lange Basis, das lediglich um 0.2 mgon vom Kreiselazimut (als Mittel aus mehreren Kampagnen) abweicht.

6. Ausgleichung der Tunnelnetze und Durchschlagsprognosen

Genauigkeit der Beobachtungen

Alle Ausgleichungen der Tunnelnetze erfolgten in Lage und Höhe als Vermittelnde Ausgleichung mit dem Programm LTOP

Vortrieb	Länge [km]	Anz. Beob.	Unbekannte	Fehler-quotient
Bodio–Faido	19.8	7535 2364	2149 821	0.80 0.53
Amsteg–Sedrun	17.3	9499 4379	2820 1170	0.92 1.10
Erstfeld–Amsteg	10.1	2846 1350	742 284	1.19 1.17
Sedrun–Faido	23.4	7205 2478	1991 799	0.80 0.62

Tab. 1: Beobachtungsgenauigkeiten und Fehlerquotienten a posteriori vs. a priori.

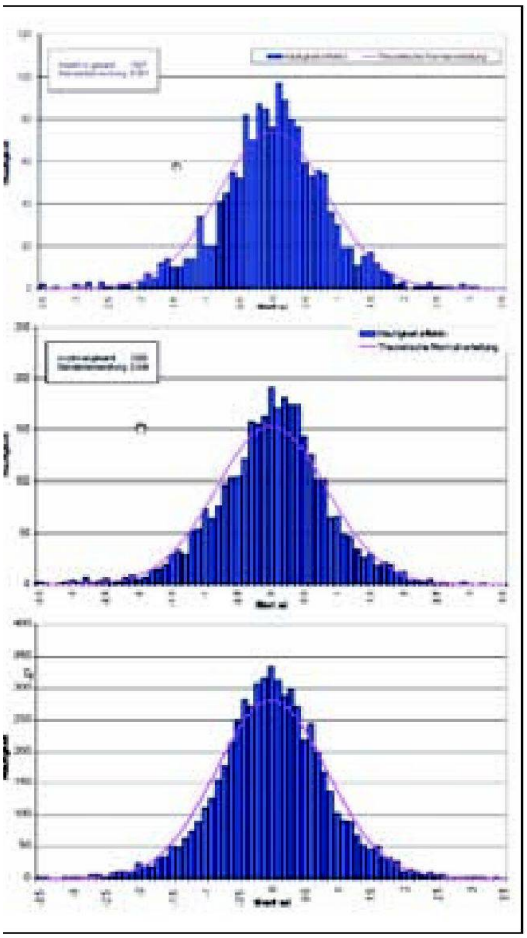


Abb. 10: Normierte Verbesserungen an den Beobachtungen in den Vortrieben Sedrun (oben), Faido (mitte) und Bodio (unten).

von swisstopo. Nach der Rohdatenaufbereitung (Satzmittel, Meteo-Reduktion etc.) wurde die Qualität der Beobachtungen in jeder Stollenkontrolle im Zuge einer Freien Ausgleichung bewertet.

Es zeigte sich, dass die Häufigkeitsverteilungen der normierten Verbesserungen an den Beobachtungen in allen Vortrieben der theoretischen Normalverteilung sehr nahe kommen (Abb. 10).

Auch der generelle Vergleich der Varianzen «a posteriori vs. a priori» über alle Beobachtungen (Globaltest nach Baarda) bestätigte, dass die Wahl des stochastischen Modells richtig und angemessen erfolgte (Tab. 1).

Als Mittel über alle Stollenkontrollen in allen Abschnitten ergaben sich für die wichtigsten Varianzkomponenten folgende Beobachtungsgenauigkeiten **a posteriori:**

- 12 406 Richtungsmessungen 2.7 cc
- 2 809 Kreiselazimute (Einzelmessungen, nicht gemittelt) 10.8 cc
- 11 600 Distanzmessungen 1.6 mm/km

Berechnung der Koordinaten

Die Koordinatenberechnung erfolgte jeweils durch eine Gesamtausgleichung, wobei jeweils alle Messungen aller relevanten Stollenkontrollen in einem Guss ausgeglichen wurden. Messungen in Deformationszonen wurden bei dieser Gesamtausgleichung vorgängig eliminiert. Eine minimale Verschlechterung der inneren Genauigkeit in Folge kleiner, nicht signifikanter Deformationen zwischen den Epochen wurde bewusst zu Gunsten einer hohen Redundanz in Kauf genommen.

Als Festpunkte wurden ausschliesslich die Punkte der Portalnetze eingeführt, wodurch sich für alle Polygonpunkte untertage die aus statistischer Sicht wahrscheinlichste Lösung ergab. Als Nachteil erwies sich die Tatsache, dass laufende Verschwenkungen und Koordinatenänderungen zu erheblichen Umtrieben auf der Baustelle und zu Unstetigkeiten im Steuerleitsystem der Tunnelbohrmaschinen führten. Aus diesem Grund wurde ein spezielles Verfahren zur «Glättung» der Korrekturwerte entwickelt, mit dem Koordinatenänderungen auf max. 2 cm begrenzt werden konnten.

Die Dokumentation und Resultatmeldung erfolgte stufengerecht. Dem Bauunternehmer wurden Kurzberichte mit den jeweils aktuell gültigen Koordinaten für die Polygonpunkte geliefert. Messung und Auswertung der Grossen Stollenkontrollen wurde in Technischen Berichten dokumentiert, die an ATG Geomatik und an externe Experten zu Begutachtung gingen.

Beurteilung der Genauigkeit untertage und Durchschlagsprognose

Auf Grund der vorliegenden Gesamtausgleichungen der Vortriebsnetze konnte die Genauigkeit von Lage und Höhe der Polygonpunkte abgeschätzt werden. Auf Grund der ungünstigen Fehlerfortpflanzung ergab sich dabei das für Tunnelnetze typische Anwachsen der Fehlerellipse mit zunehmender Vortriebslänge.

Der zu erwartende, theoretische Durchschlagsfehler berechnete sich als relative Fehlerellipse zwischen den beiden zum Durchschlagspunkt am nächsten gelegenen Polygonpunkten beider Vortriebe (Abb. 11). Unmittelbar vor den Durchschlägen wurden für die vier Hauptdurchschläge im Gotthard-Basistunnel folgende Prognosen formuliert: *«Die Wahrscheinlichkeit beträgt 95%, dass der Durchschlagsfehler maximal folgende Werte annimmt.»* (Tab. 2.)

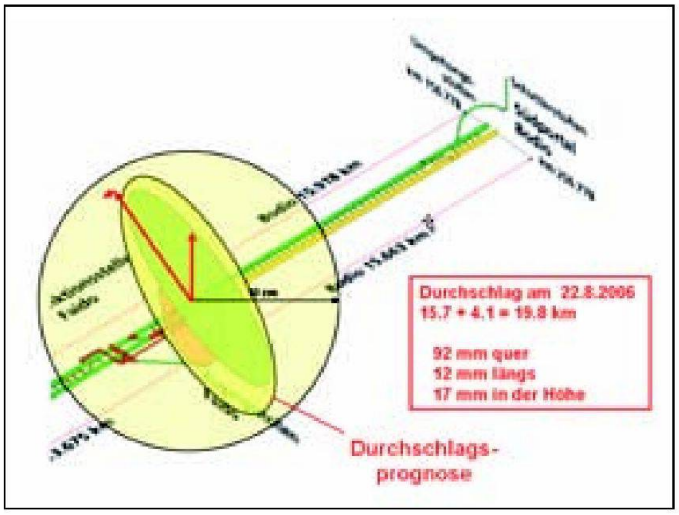


Abb. 11: Durchschlagsprognose und Durchschlagsfehler im 1. Hauptdurchschlag Bodio–Faido.

Abb. 12: Bohrkopf der Tunnelbohrmaschine im Moment des Durchschlags.

7. Durchschlagsergebnisse im Gotthard-Basistunnel

Durchschlagsereignisse sind im Tunnelbau in vielerlei Hinsicht grosse Ereignisse. Am Tag des Durchschlags zeigt sich, ob die gesamte konzeptionelle, theoretische und praktische Arbeit des Vermessungsteams über mehrere Jahre erfolgreich war oder nicht. Obwohl alle Anstrengungen darauf ausgerichtet sind, mit den genauesten Sensoren, den besten geodätischen Grundlagen und den zuverlässigsten Mess- und Auswertekonzepten das optimale Ergebnis zu realisieren, bleiben solange Restrisiken und -zweifel vorhanden, bis der letzte Meter durchbrochen ist (Abb. 12). Im Gotthard-Basistunnel wurden die folgenden Durchschlagsgenauigkeiten realisiert (Tab. 3).

Je nach beruflichem Hintergrund und Sichtweise, werden diese Durchschlagsergebnisse sehr unterschiedlich bewertet:

- Aus der *bautechnischen* Sicht des Projektingenieurs: «Die Durchschlagsfehler können beim Einbau des Innengewölbes kompensiert werden. Kostspielige Profilkorrekturen sind nicht nötig.»
- Aus der *fahrdynamischen* Sicht des Trassierers: «Die Durchschlagsfehler können durch eine minimale Gleisverziehung ausgeglichen werden.»
- Aus der Sicht des nüchternen *Statistikers:* «Die Ergebnisse entsprechen

Vortrieb	Länge [km]	quer [cm]	längs [cm]	hoch [cm]
Bodio–Faido	19.8	< 22	< 8	< 6
Amsteg–Sedrun	17.3	< 22	< 10	< 6
Erstfeld–Amsteg	10.1	< 15	< 9	< 5
Sedrun–Faido	23.4	< 27	< 13	< 7

Tab. 2: Durchschlagsprognose a priori (95%-Konfidenzniveau) in den vier Hauptdurchschlägen.

Datum	Vortrieb	Längen inkl. Zugangsstollen und Schächte [km]		quer [mm]	längs [mm]	hoch [mm]
22.08.2006	Faido Bodio	4.1 15.7	19.8	92	12	17
14.10.2007	Amsteg Sedrun	13.3 4.0	17.3	137	21	3
16.06.2009	Erstfeld Amsteg	7.8 2.3	10.1	14	33	5
15.10.2010	Sedrun Faido	15.0 8.4	23.4	81	136	11
Ausnutzung der max. Toleranz (im Mittel)				32%	20%	7%

Tab. 3: Durchschlagsergebnisse in den vier Hauptdurchschlägen des Gotthard-Basistunnels.

Datum	Vortrieb	Länge [km]	quer [cm]	längs [cm]	hoch [cm]
28.02.1880	Gotthard-Bahntunnel	15.0	33	710	7
24.05.1905	Simplontunnel	19.8	20	< 200	9
31.03.1911	Lötschbergtunnel	14.6	26	41	10
01.12.1990	Eurotunnel	37.9	36	7	6
28.04.2005	Lötschberg-Basistunnel	34.6			
	Mitholz-Ferden	20.9	13	10	0
	Gotthard-Basistunnel	**57.0**			
22.08.2006	Faido–Bodio	19.8	9	1	2
14.10.2007	Amsteg–Sedrun	17.3	14	2	0
16.06.2009	Erstfeld–Amsteg	10.1	1	3	0
15.10.2010	Sedrun–Faido	23.4	8	14	1

Tab. 4: Durchschlagsergebnisse der grossen Alpendurchstiche und im Eurotunnel.

ziemlich genau den jeweiligen Erwartungswerten.»

- Aus der Sicht der *Versicherung:* «Die Restrisiken waren unter Kontrolle. Es liegen keine Haftpflicht-Schäden vor.»
- Aus der Sicht des *Baujuristen:* «Ein offensichtlicher Vermessungsfehler liegt nicht vor. Aber wurde auch formal wirklich alles richtig und mit der bei einem Jahrhundertprojekt gebotenen Sorgfaltspflicht erledigt?»
- Aus der Sicht des *technologiegläubigen Ignoranten:* «Wo lag das Problem? Das ist doch heutzutage mit GPS und Laser kein Problem mehr, oder?»
- Aus der Sicht des *Geodäten:* «Offensichtlich sind unsere Modelle gar nicht so schlecht. Das Resultat bestätigt unsere Arbeit der letzten Jahre.»
- ...und aus der Sicht der *verantwortlichen Vermesser:* «Wir haben weniger als 1/3 der maximal zulässigen Toleranzen in Anspruch genommen. Wir wussten immer, dass wir mit genauen und zuverlässigen Konzepten und unserem ausgereiften Qualitätsmanagement auf Kurs sind. Trotzdem sind wir erleichtert und zufrieden, dass der Worst Case nicht eingetreten ist.»

Die im Gotthard-Basistunnel realisierten Durchschlagsergebnisse können im historischen Kontext bewertet werden (Tab. 4).

Dank

Vermessung ist Teamwork! Das Konsortium Vermessung Gotthard-Basistunnel arbeitete in den vergangenen 15 Jahren sehr eng mit verschiedensten Organsiationen und Firmen zusammen (Abb. 13). Alle diese Partner haben einen Beitrag zu den guten Ergebnissen im Gotthard-Basistunnel geleistet. Unser Dank gilt insbesondere den Projektleitern F. Ebneter und A. Ryf bei der AlpTransit Gotthard AG sowie dem Experten Prof. em. A. Carosio für die vertrauensvolle und zielorientierte Zusammenarbeit.

Literatur:

Über die Vermessung im Gotthard-Basistunnel ist eine grosse Anzahl von Publikationen entstanden. Weitere Publikationen können auf www.bsf-swissphoto.com heruntergeladen werden.

Carosio A., Reis O. (1996): Geodetic Methods and Mathematical Methods for the Establishment of New Trans-Alpine Transportation Routes, Bericht IGP No. 206, ETH Zürich.

Carosio A. (2010): Die Vermessung des längsten Eisenbahntunnels der Welt. Die Sicht des Experten des Bauherrn. Geomatik Schweiz, Ausgabe Dez. 2010.

Ebneter F. (2004): AlpTransit Gotthard: Aufgaben und Organisation der Vermessung. XIV. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.

Gesellschaft für Ingenieurskunst (1996): Historische Alpendurchstiche in der Schweiz: Gotthard – Simplon – Lötschberg.

Haag R., Stengele R. (1997): The Gotthard-Basetunnel. Surveying of a 57 km long Underground Project in the Swiss Alps. FIG-Symposium «Surveying of Large Bridge and Tunnel Projects», Kopenhagen.

Abb. 13: Partner und Netzwerk des VI-GBT.

Kobold F. (1982): Vor hundert Jahren: Die Absteckung des Gotthard-Basistunnels. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 3/1982.

Kobold F. (1981): Tunnelabsteckungen im Gotthardgebiet von Koppe bis zur Gegenwart. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe E, Heft Nr. 20.

Korittke N. (1997): Zur Anwendung hochpräziser Kreiselmessungen im Bergbau und Tunnelbau. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig, Nr. 14.

Riesen H.-U., Schweizer B., Schlatter A., Wiget A. (2005): Tunnelvermessung des BLS-AlpTransit Lötschberg-Basistunnels. Geomatik Schweiz 11/2005.

Schätti I., Ryf A. (2004): Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. XVI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.

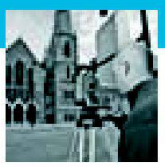
Schätti I., Ryf A. (2007): AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Grundlagenvermessung, letzte Kontrollen vor dem ersten Durchschlag. XV. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Stengele R. (2007): Erster Hauptdurchschlag im Gotthard-Basistunnel: Tunnelvermessung in Theorie und Praxis. XV. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Stengele R., Ryf A., Schätti I., Studer M., Salvini D. (2010): Vermessung im Gotthard-Basistunnel: Vortriebsvermessung, Laserscanning, Langzeit-Monitoring. XVI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Zanini M., Stengele R., Plazibat M. (1993): Kreiselazimute in Tunnelnetzen unter Einfluss des Erdschwerefeldes, Berichte des Instituts für Geodäsie und Photogrammetrie der ETH Zürich, Nr. 214.

Roland Stengele
BSF Swissphoto AG
Ivo Schätti-Stählin
Studio Meier SA
Dorfstrasse 53
Postfach
CH-8105 Regensdorf-Watt
roland.stengele@bsf-swissphoto.com



Station spatial Trimble® VX

La station totale avec vidéo et Scanner 3D

La nouvelle station spatiale Trimble VX combine une station totale optique, un Scanner 3D et une station vidéo en un système unique révolutionnaire. Les points mesurés sont représentés directement dans la fenêtre vidéo. Vous effectuez et contrôlez ainsi vos mesures sur une image réelle du terrain.

De plus, l'intégration du Scanner 3D dans la station totale la plus aboutie (Trimble S6) vous ouvre de nouvelles portes dans le marché du Scanning.

Découvrez la nouvelle station spatiale Trimble VX, appelez-nous!

Les innovations

- Scanner 3D intégré dans une station totale optique
- Des images numériques stockées avec les points mesurés
- Représentation directe des objets mesurés dans la fenêtre vidéo
- Nouveaux domaines d'applications

allnav

allnav ag Succursale CH Romande
Ch. de la Charrière 3 *Tel. 024 550 22 15*
CH-1891 Vérossaz *Fax 024 550 22 16*
romandie@allnav.com *www.allnav.com*

Hauptsitz Deutschschweiz: 5504 Othmarsingen
Geschäftsstelle in Deutschland: D-71522 Backnang

Trimble.