

# Erkenntnisse aus dem geodätischen Langzeitmonitoring beim Bau des Gotthard- Basistunnels

Autor(en): **Studer, M. / Ryf, A.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **112 (2014)**

Heft 6

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-389494>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Erkenntnisse aus dem geodätischen Langzeitmonitoring beim Bau des Gotthard-Basistunnels

Das Trasse des Gotthard-Basistunnels verläuft in der Nähe dreier Stauseen. Um kritische Deformationen im Umfeld der Staumauern rechtzeitig erkennen und bei Bedarf sofort reagieren zu können, wurde bereits Jahre vor der Unterquerung ein umfangreiches geodätisches Monitoringsystem in Betrieb genommen. Tatsächlich konnten signifikante, jedoch unkritische Talverengungen und Setzungen nachgewiesen werden. Die permanente Beobachtung dieser Oberflächenbewegungen hat beim Tunnelbau zusätzliche Baumassnahmen in dreistelliger Millionenhöhe verhindert.

M. Studer, A. Ryf

## 1. Projektstand Gotthard-Basistunnel

Der Baubeginn des Gotthard-Basistunnels (GBT) erfolgte im Jahr 1993 mit ersten Arbeiten beim Sondierstollen Piora. Im Jahr 2002 startete der TBM-Vortrieb und der letzte Durchschlag erfolgte im März 2011. Seither wird intensiv am Einbau der Bahntechnik gearbeitet und in der Weströhre zwischen Bodio und Faido läuft bereits der Versuchsbetrieb. Die Übergabe des Tunnelbauwerks an die SBB ist für den Juni 2016 geplant. Aktuelle Informationen zu diesem Jahrhundert-Projekt sind auf der Webseite [www.alptransit.ch](http://www.alptransit.ch) abrufbar.

Im Rahmen der alle drei Jahre abwechselungsweise an den technischen Hochschulen von Zürich, München und Graz stattfindenden Internationalen Ingenieurvermessungskurse wurde über die umfangreichen oberirdischen Überwachungsmessungen beim Bau des Gotthard-Basistunnels bereits mehrfach referiert (Ryf et al. 2000, Studer et al. 2004, 2007 & 2014, Stengele et al. 2010)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Diese Publikationen können auf [www.bsf-swiss-photo.com](http://www.bsf-swiss-photo.com) unter Aktuelles/Publikationen heruntergeladen werden.

## 2. Monitoringaufgaben im Überblick

### 2.1 Ausgangslage

Gebirgsentwässerungen durch Tunnelbauten können zu Setzungen an der Oberfläche führen. In der Schweiz wurden solche Setzungen in dm-Grösse beim Sondierstollen des Rawiltunnels und beim Gotthard Strassentunnel nachgewiesen. Das Trasse des GBT verläuft im Bündner Oberland in der Nähe der drei Stauseen Curnera, Nalps und Santa Maria. Theoretische Untersuchungen im Vorfeld hatten gezeigt, dass mit dem Bau des GBT ohne Massnahmen zur Verringerung der Bergwasserzuflüsse zum Tunnel in dieser Zone Oberflächensetzungen von bis zu 5 cm auftreten könnten. In einer weiteren Untersuchung wurden die Empfindlichkeit der Staumauern auf Oberflächendeformationen überprüft und die Grenzwerte für verschiedene Gefahrensituationen bestimmt. Unregelmässige Oberflächensetzungen im Bereich dieser drei Staumauern könnten deren Gebrauchstauglichkeit gefährden.

In der Risikoanalyse wurde die Eintretenswahrscheinlichkeit eines gefährdenden Ereignisses zwar als sehr klein, das Ausmass eines Schadens aber als sehr hoch eingestuft. Deshalb wurden verschiedene Massnahmen zur Risikominimierung eingeleitet. Neben Massnahmen beim Vortrieb, die der Beherrschung des Wassereintritts beim Tunnelvortrieb dien-

ten, wurde die ganzjährige geodätische Überwachung der Geländeoberfläche im Bereich der Staumauern vor, während und nach der Unterquerung beschlossen.

### 2.2 Zielsetzungen und Anforderungen an die Messsysteme

Das Hauptziel der Überwachungsanlagen war, die Einhaltung der Grenzwerte für Gelände- und Bauwerksdeformationen im Bereich der Staumauern mit automatischen Messanlagen zu überwachen. Bei kritischen Vortriebsständen in der Nähe der Staumauern sollten diese Messungen täglich zur Verfügung stehen.

Neben der Deformationsanalyse in der Umgebung der Staumauern interessierten auch die Form des «Setzungstrichters» sowie der zeitliche Verlauf seiner Ausbreitung in Vortriebsrichtung und quer dazu. Diese Informationen waren wichtig, um abzuschätzen, ob der Set-

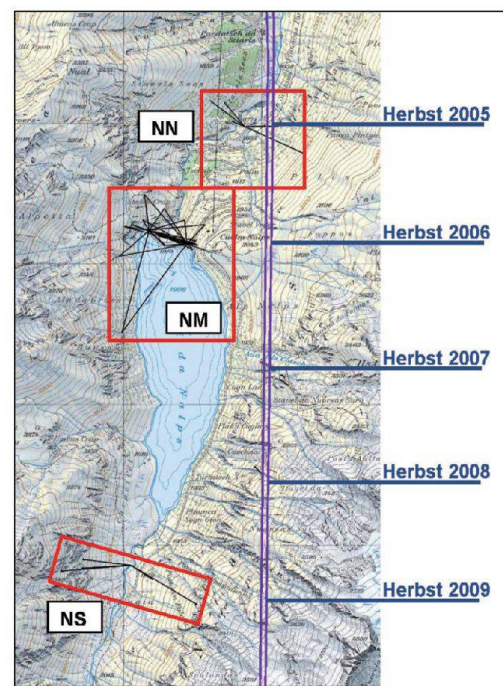


Abb. 1: Übersicht der drei Tachymeter-Messquerschnitte im Val Nalps sowie der Vortriebsstände im GBT jeweils im Herbst 2005 bis Herbst 2009.  
Fig. 1: Aperçu des trois coupes de tachymètre au Val Nalps ainsi que les états d'avancement du GBT chaque fois en automne de 2005 à 2009.



zungstrichter unterhalb der einzelnen Staumauern im konvexen oder konkaven Bereich lag, was über die Entwicklung und den Betrag einer Talverengung bzw. -verbreiterung entscheidet.

Mittels statischer Simulationsrechnungen untersuchten Staumauerexperten die Empfindlichkeiten der Talsperren bezüglich des Öffnens oder Schliessens des Talquerschnitts. Es zeigte sich, dass eine solche Bewegung bei der empfindlichsten Mauer bis zu 10 mm (Öffnung) ohne Folgen für die Staumauer erreichen durfte, denn bis zu diesem Wert bleibt auch im schlechtesten Fall das linear plastische Verhalten der Talsperre erhalten. Auf diesem Wert aufbauend wurde die Detektierfähigkeit des tachymetrischen Überwachungssystems für Talflankenbewegungen auf 4 mm festgelegt. Mit Nivellementmessungen bestimmte Höhenänderungen mussten ab 2.5 mm und mit GPS bestimmte Deformationen ab 10 mm signifikant nachgewiesen werden. Während in den Talquerschnitten im Bereich der Stauanlagen relative Bewegungen genügten, sollten die Nivellementmessungen grossräumig an mehrere Fixpunktgruppen angeschlossen und auch die GPS-Messungen ausserhalb der prognostizierten Setzungsmulde referenziert werden, um absolute Angaben über die Setzungsmulden zu erhalten.

Für den Bauherrn war von Anfang an klar, dass nur mit Messungen höchster Genauigkeit, höchster Zuverlässigkeit und lückenloser Kontinuität derart kleine Bewegungen nachzuweisen sind. Ausserdem mussten natürliche Oberflächenbewegungen (meist Jahresgänge zyklischer Art, die durch den Wasserhaushalt nahe an der Erdoberfläche verursacht werden) eindeutig von den vom Tunnelvortrieb verursachten Bewegungen getrennt werden. Dies erforderte kontinuierliche Messreihen, die mehrere Jahre vor Beginn der Vortriebsarbeiten begannen, um das «Normalverhalten» zu erfassen und somit die gesamte Messanlage zu kalibrieren. Die Kontinuität der Messreihen setzte eine hohe Betriebssicherheit und Winter-tauglichkeit der Messanlagen im Hochgebirge voraus.

### 3. Realisierung des Überwachungssystems

Der Aufbau des Messsystems begann im Jahr 2000 durch ein Vermessungskonsortium, bestehend aus BSF Swissphoto/Grünenfelder und Partner (Geodäsie) und Amberg Technologies (Geotechnik), und die ganze Messanlage wurde bis im Herbst 2001 vollständig in Betrieb genommen. Aufgrund der unterschiedlichen Aufgabenstellungen und Randbedingungen (u.a. ganzjährige Resultatlieferungen im Tagesrhythmus, grossräumige Höhenüberwachungen etc.) war von Anfang an klar, dass bei dieser Messaufgabe sowohl automatische als auch manuelle Messsysteme zum Einsatz kommen mussten. Diese Kombination stellte sich in den vergangenen Jahren als ideale Lösung im Spannungsfeld einer maximalen Sicherheit und eines optimalen Mitteleinsatzes heraus.

Für detailliertere Informationen zu den automatischen Tachymeter- und GPS-Anlagen sowie für die Beschreibung des umfangreichen, grossräumigen Nivellementnetzes verweisen wir auf die erwähnten

Beiträge der Int. Ingenieurvermessungskurse.

### 4. Messresultate per März 2014

#### 4.1 Tachymetrie

Abb. 1 zeigt die drei Messquerschnitte Nalps Nord (NN), Nalps Mauer (NM) und Nalps Süd (NS) sowie den Verlauf des GBT als Doppellinie (2 Tunnelröhren). Die Messquerschnitte liegen auf einer Meereshöhe zwischen 1700 (NN) und 2100 m ü.M. (NS) und der GBT hat eine maximale Scheitelhöhe von 550 m ü.M. Zwischen dem drainierenden Tunnel und der Geländeoberfläche liegen somit ca. 1500 m kompakter Gotthard-Fels.

Abb. 2 zeigt die relativen Bewegungen quer zur Talrichtung in jedem Messquerschnitt zwischen den beiden höchstgelegenen Punkten auf beiden Talseiten. Bei allen drei Querschnitten wurde eine signifikante Talverengung gemessen. Interessanterweise ist die maximale Talverengung bei NN und NS per Ende 2013 mit ca. 7 cm praktisch identisch und der dazwischen liegende Querschnitt NM zeigt

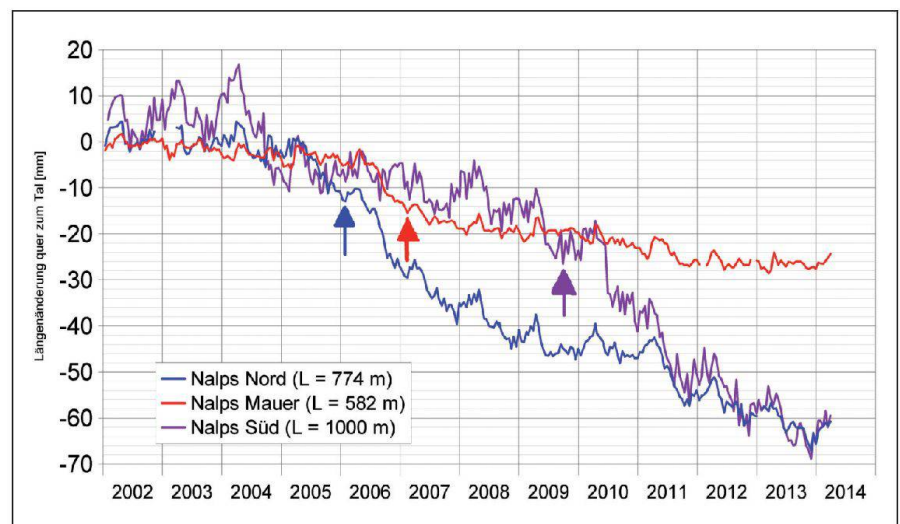


Abb. 2: Talflankenbewegungen in Querrichtung auf dem jeweils obersten Messniveau. «L» stellt die Horizontalabstände zwischen den beiden Punkten dar. Die Pfeile zeigen den Zeitpunkt der Unterquerung des jeweiligen Messquerschnitts.

Fig. 2: Mouvements des flancs de vallée en direction perpendiculaire sur chaque fois le point le plus élevé. «L» représente les distances horizontales entre les deux points. Les flèches indiquent le moment du passage sous chaque profil en travers.



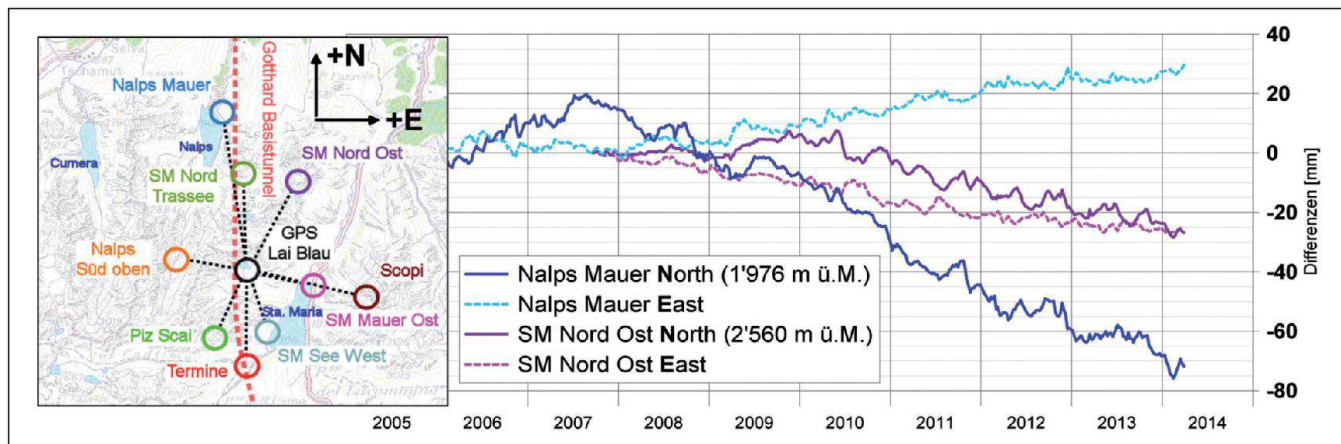


Abb. 3: Lageveränderungen in Nord und Ost von zwei ausgewählten GPS-Stationen.  
 Fig. 3: Changements de situation en nord et est de 2 stations GPS singulières.

nur eine maximale Talverengung von 2.5 cm. Alle drei Querschnitte zeigten bei deren Unterquerung durch den GBT bereits eine Talverengung von 1.5 bis 2.5 cm, d.h. die Talbewegungen durch die Drainage liefen dem Tunnelvortrieb zeitlich voraus. Das Punktpaar in NN zeigt, dass die Oberflächenbewegungen noch mehrere Jahre nach deren Unterquerung anhalten können, da das Tal an dieser Stelle noch nie so eng war wie Ende 2013, obwohl die Unterquerung bereits Anfang 2006 stattfand. In den Jahren 2009 bis 2011 schien eine Stabilisierung der Bewegungen eingetreten zu sein, doch in den letzten 3 Jahren hat sich das Tal an dieser Stelle um weitere 1.5 cm verengt.

#### 4.2 GPS

Abb. 3 zeigt exemplarisch die Lageveränderungen von 2 GPS-Stationen durch den Tunnelvortrieb. «Nalps Mauer» wanderte zu Beginn 2 cm nach Norden, wo es Mitte 2007 zu einem Wendepunkt kam und der Punkt seither kontinuierlich Richtung Süden wanderte. Anfang 2014 lag der Punkt 7.5 cm südlicher als zu Messbeginn. Da dieser Punkt unmittelbar neben der Staumauer liegt, konnte gezeigt werden, dass die gesamte Mauer und deren unmittelbare Umgebung in den vergangenen sieben Jahren eine Bewegung von knapp 10 cm aufwies. In der Ost-Westkomponente zeigte sich seit 2008 eine kontinuierliche Bewegung in Richtung der Tunnelachse von mittlerweile 3 cm.

Der 2.2 km östlich der GBT-Achse gelegene Punkt «SM Nord Ost» zeigt aufgrund der grösseren Entfernung zur Achse kleinere Bewegungen. Aktuell liegt der Punkt 2.5 cm südlicher und 2.5 cm westlicher als zu Messbeginn, d.h. auch dieser Punkt hat sich in Richtung der Tunnelachse verschoben. Interessanterweise ist diese Ost-West-Bewegung praktisch gleich gross wie beim Punkt «Nalps Mauer», der nur 400 m westlich der GBT-Achse liegt.

Abb. 4 zeigt die Höhenänderungen dieser beiden Punkte im Verlauf der vergangenen neun Jahre. Dabei zeigt sich bei «Nalps Mauer» seit Mitte 2010 eine Stabilisierung, obwohl im gleichen Zeitraum lagemässig noch eine Relativverschiebung von 6 cm nach Süden stattgefunden hat.

#### 4.3 Nivellement

Abb. 5 zeigt die Geländesetzungen im Val Nalps in den vergangenen neun Jahren in Form eines Längensprofils. Auch mit diesem Messverfahren ist klar erkennbar, dass Setzungen bereits vor der eigentlichen Tunnelunterquerung signifikant nachgewiesen wurden und andererseits diese Setzungen noch mehrere Jahre nach der Fertigstellung des Tunnelrohbaus andauern können. Wie schwierig eine lokale Setzungsprognose durch die grosse Felsüberlagerung von mehr als 1500 m und lokale geologische Heterogenitäten ist, zeigt die Tatsache, dass die grösste Ab-

solutsetzung mit -9 cm ca. 1 km südlich der Mauer Nalps gemessen wird, obwohl die Felsüberdeckung im nördlichen Val Nalps viel kleiner ist (siehe Abb. 5) und die GBT-Achse hier direkt unter der Talsohle liegt.

## 5. Erkenntnisse des Bauherrn

«Wir wollen das Projekt AlpTransit Gotthard in der vereinbarten Qualität, möglichst rasch und zu minimalen Kosten realisieren», hat sich die AlpTransit Gotthard AG schon früh als Ziel gesetzt. Qualität, Termine und Kosten standen und stehen in jeder Projektphase und bei jedem Teil des Gesamtprojektes im Vordergrund. Zur Erreichung dieser Ziele gehört ein rigoroses Risikomanagement, dessen Anfänge bis zum Beginn des Projektes zurückreichen. Das Bewusstsein, dass Risiken nicht nur beim Vortrieb tief im Berg, sondern auch an der Erdoberfläche im Bereich von Talsperren existieren, war bei den Verantwortlichen des Bauherrn früh vorhanden. Dass beim Tunnelbau der umliegende Fels drainiert wird und dies Setzungen an der Erdoberfläche zur Folge haben kann, hatten bereits andere Tunnelprojekte in der Schweiz gezeigt. Glücklicherweise liessen sich die am Anfang noch zweifelnden Experten und Behörden überzeugen, dass auch bei einem so tief liegenden Tunnel die Umgebung der Talsperren schon mehrere Jahre bevor sich der Tunnelvortrieb



annäherte und auch während des ganzen Tunnelbaus mit grossräumigen Monitoring-Anlagen zu überwachen sei.

Die Vortriebe von Sedrun Richtung Süden näherten sich den Talsperren drei Jahre vor denjenigen von Faido. Vorauserkundungen zur Lokalisierung wasserführender Störzonen und entsprechende Injektionsmassnahmen im Tunnel standen im Vordergrund, um den Wasserzufluss zu begrenzen. Die Verzögerung der Bauzeit durch diese Massnahmen betrug ein halbes Jahr. Der Zusammenhang zwischen den Wasserzuflüssen im Tunnel und den an der Erdoberfläche gemessenen Setzungen war offensichtlich. Zunehmende Kenntnisse dieser Zusammenhänge und des geologischen Befundes ermöglichten es, ein zunehmend präziseres Rechenmodell (dreidimensionales Finite-Elemente-Modell) des Spannungs-Dehnungsverhaltens des Felsmassivs zu berechnen. In den Vortrieben von Faido Richtung Norden standen die Injektionsmassnahmen nicht mehr im Vordergrund und verzögerten den Vortrieb damit nicht mehr. Für die Talsperre Santa Maria, die in dieser Projektphase bei den Betrachtungen von höherer Bedeutung war, wurden drei Risikostufen definiert. Statt der Massnahmen auf Tunnelniveau wurden die Resultate des Monitorings an der Erdoberfläche permanent sorgfältig beobachtet und das Rechenmodell regelmässig nachgeführt, um bei Bedarf bauliche Massnahmen direkt an der Talsperre umsetzen zu können. Dieses geänderte Konzept erwies sich als optimale Wahl.

Dank dem Einsatz der Experten und der engen Zusammenarbeit mit den Kraftwerksbetreibern konnte auf einer grossen Länge des Tunnels auf Abdichtungsinjektionen verzichtet werden. Bei strikter Befolgung der früheren Konzepte und ohne die grossräumigen Monitoring-Anlagen an der Erdoberfläche wären enorme Bauzeitverlängerungen und Mehrkosten im dreistelligen Millionenbereich entstanden. Im Nachhinein sind alle Beteiligten überzeugt, dass sich die grosse Investition in die Überwachung und in deren Begleitung durch die Experten in jedem Fall mehrfach gelohnt hat.

Die Resultate der Monitoring-Anlagen, insbesondere die periodisch nachgeführten Grafiken, werden durch den Bauherrn und die von ihm beauftragten Experten noch heute regelmässig und intensiv analysiert, um bei aussergewöhnlichen Ergebnissen entsprechend reagieren zu können.

## 6. Erkenntnisse des Vermessers

Komplexe, grossräumige Monitoringsysteme mit einer Vielzahl von Messsystemen unter klimatisch anspruchsvollen Bedingungen können bei keinem Hersteller «ab Stange» gekauft werden. Für die Planung, Realisierung wie auch den Betrieb dieses Systems in den letzten 14 Jahren waren eine Vielzahl von Spezialisten wie Geologen, Lawinenspezialisten, Baufachleute, Schreiner, Helikopterunternehmen, Vermessungsingenieure, Systemhersteller, Kommunikations- und Elektrotechniker, Softwareentwickler, Staumauerbetreiber etc. interdisziplinär tätig.

Durch eine ausreichend lange Vorlaufzeit der Messungen von einigen Jahren vor der Beeinflussung des Geländes durch den Tunnelbau konnte das jahreszeitliche Normalverhalten des Geländes/Bauwerks erfasst werden. Dank dieser Voraussicht des Auftraggebers und Bereitschaft zur Übernahme von zusätzlichen Kosten durch einen etwas längeren Betrieb konnte dieses Normalverhalten bei der Interpretation der Deformationen infolge von Baumassnahmen berücksichtigt werden. Die bei diesem Projekt eingesetzten Monitoring-Sensoren waren sehr zuverlässig. Durch eine präventive, jährliche Wartung sämtlicher Tachymeter beim Hersteller konnte beispielsweise erreicht werden, dass kein einziger Sensor in der Betriebszeit von 14 Jahren ersetzt werden musste und die Ausfälle während dem Betrieb praktisch ausschliesslich durch Blitzeinschläge verursacht wurden. Nichtsdestotrotz braucht jedes automatische Messsystem eine periodische vor-Ort-Betreuung (Präventive Wartungsarbeiten, Kommunikations- oder Softwareprobleme, Blitzeinschläge,...), d.h. der Systembetrei-

ber sollte trotz zuverlässigen Systemkomponenten das Überwachungsgebiet innert nützlicher Frist erreichen können, um Wartungen durchzuführen.

Ein seit Projektbeginn regelmässiger und sehr konstruktiver Austausch zwischen dem Auftraggeber AlpTransit Gotthard AG, den ausführenden Unternehmungen und den Datenbenutzern/-interpreten hat sehr viel zur Akzeptanz des Systems und dem gutem Gelingen beigetragen. Wir bedanken uns an dieser Stelle bei allen Beteiligten!

### Literatur:

Ryf A., Haag R., Schättli I. (2000): AlpTransit Gotthard-Basistunnel: Aktueller Projektstand, ingenieurgeodätische Aspekte. 13. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München.

Stengele R, Ryf A., Schättli I., Studer M., Salvini D. (2010): Vermessung im Gotthard-Basistunnel: Vortriebsvermessung, Laserscanning und Langzeit-Monitoring. 16. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, München.

Studer M., Bräker F. (2007): Kombiniertes Einsatz von automatischen und manuellen Messmethoden bei einem Langzeitmonitoring. 15. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Graz.

Studer M., Bräker F., Rutishauser M., Schättli I., Stengele R. (2004): Geodätisches Monitoring im Hochgebirge. 14. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.

Studer M., Ryf A., Löw S., Lützenkirchen V., Jesel Th. (2014): Erkenntnisse aus einem Langzeitmonitoring an der Geländeoberfläche beim Bau des Gotthard-Basistunnels. 17. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung, Zürich.

Mario Studer  
Leiter Ingenieurvermessung  
BSF Swissphoto  
Dorfstrasse 53  
CH-8105 Regensdorf-Watt  
mario.studer@bsf-swissphoto.com

Adrian Ryf  
Leiter Geomatik  
AlpTransit Gotthard AG  
Zentralstrasse 5  
CH-6003 Luzern  
adrian.ryf@alptransit.ch