

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: Geodätisches Langzeit-Monitoring von Stauanlagen im Hochgebirge

Autor: Salvini, Dante / Studer, Mario

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-236730>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 08.02.2025

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

Geodätisches Langzeit-Monitoring von Stauanlagen im Hochgebirge

Für die Stauanlagen Curnera, Nalps und Sta. Maria im Vorderrheintal wurden spezielle geodätische Messanlagen eingerichtet, um allfällige, durch den Bau des Basistunnels verursachte Geländedeformationen zu überwachen. Nach mehreren Jahren Erfahrung kann im Wesentlichen gesagt werden, dass die Anlagen ihren Zweck erfüllen, die Talflanken – entgegen den Erwartungen – natürliche zyklische Bewegungen durchleben und der Einfluss des Tunnelbaus an der Erdoberfläche signifikant gemessen werden konnte.

Pour les barrages Curnera, Nalps et Sta. Maria dans la vallée du Rhin antérieur des stations spéciales pour des mesures géodésiques ont été installées afin de surveiller d'éventuelles déformations de terrain provoquées par la construction du tunnel de base. Après plusieurs années d'expérience on peut affirmer pour l'essentiel que ces installations remplissent leur fonction, que les flancs de coteau – contrairement aux attentes – accusent des mouvements cycliques naturelles et que l'influence de la construction du tunnel sur la surface du terrain a pu être mesurée de façon significative.

Per gli impianti collettori Curnera, Nalps e Sta. Maria nella valle del Reno anteriore si sono allestiti speciali impianti geodesici di misurazione per sorvegliare le deformazioni del terreno, provocate dalla costruzione della galleria di base. Dopo diversi anni di esperienza si può fondamentalmente affermare che gli impianti soddisfano lo scopo a cui sono stati destinati, che i fianchi della vallata – contrariamente alle aspettative – sono esposti a oscillazioni cicliche naturali e che si è riusciti a misurare l'influsso sulla superficie terrestre della costruzione della galleria.

D. Salvini, M. Studer

1. Einleitung

1.1 Ausgangslage

Der Vortrieb des Gotthard-Basistunnels macht sich trotz der grossen Gebirgsüberdeckung von bis zu 2500 m auch an der Erdoberfläche bemerkbar. Das Gebirgswasser, welches durch den Tunnel aus dem Untergrund abfließt, verursacht eine Entwässerung des Gebirges. Diese führt zu Setzungen an der Erdoberfläche und damit zu Talaufweitungen oder -schliessungen. Diese Untergrunddynamik wurde bereits während der Planungsphase durch theoretische Analysen erkannt. Dabei wurde aufgezeigt, dass ohne entsprechende Massnahmen beim Tunnelvortrieb, wie z.B. konsequente und rasche Abdichtungen, Oberflächenset-

zungen an den Talsperren von bis zu 5 cm auftreten können (Abb. 1).

Aufgrund dieser prognostizierten Oberflächendeformationen wurden die Ein-

flüsse auf die drei Stauanlagen Curnera, Nalps und Sta. Maria im Bündner Oberland näher untersucht. Deren Einflussgebiet wird durch das Trassee des 57 km langen Gotthard-Basistunnels unterquert. Es wurden entsprechende Risikoanalysen durchgeführt, welche die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadensereignisses als sehr klein, den daraus entstehenden Schaden jedoch als sehr gross einstufen. Deshalb wurden verschiedene Massnahmen zur Risikominimierung angeordnet. Unter anderem wurde beschlossen, die Überwachung der Geländeoberfläche im Bereich der drei Stauanlagen im Hinblick auf die spezifischen Bedürfnisse des Tunnelbaus zu intensivieren. Dazu wurde ein dreistufiges Konzept vorgeschlagen. In diesem Artikel wird auf das Konzept und die Realisierung der Überwachungssysteme der Stufe 3 sowie auf die Erfahrungen nach zehn Jahren Betrieb eingegangen. Die dritte Stufe umfasst Überwachungsmessungen im Auftrag der AlpTransit Gotthard AG zur Beherrschung der Projektrisiken bei der Unterquerung der Stauanlagen.

1.2 Auftrag

Die breit gefasste Aufgabenstellung für die Überwachungsstufe 3 beinhaltet die grossräumige Überwachung des Geländes im unmittelbaren Bereich der Talsperren. Im Konkreten geht es um die Erfassung des natürlichen Zustands des Ge-

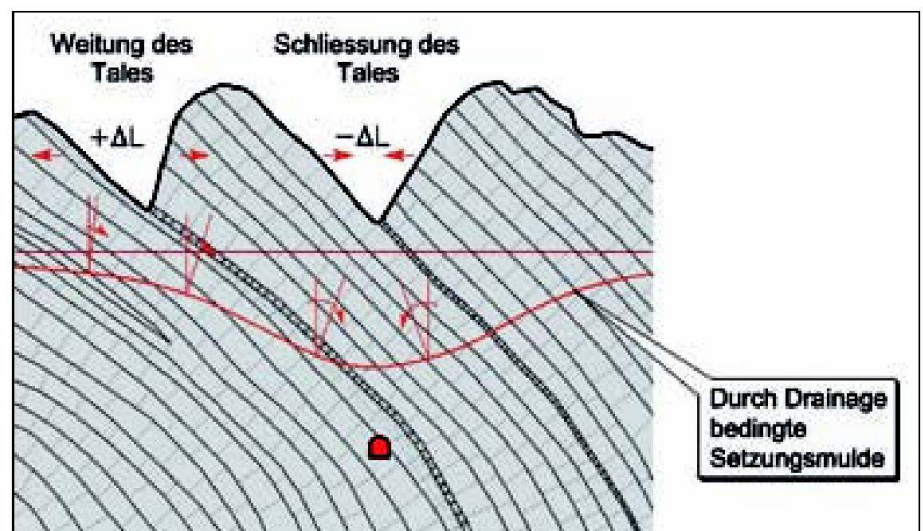


Abb. 1: Schematische Darstellung der Gebirgsentwässerung.

länden bzw. des Gebirges an geologisch repräsentativen Stellen vor einer allfälligen Beeinflussung durch den Tunnelbau. Des Weiteren sollen das Normalverhalten des Geländes erfasst und die Messsysteme entsprechend kalibriert werden. Bei der dritten und wohl wichtigsten Aufgabe geht es um die sofortige Erfassung ungewöhnlicher Oberflächenbewegungen während des Tunnelbaus, welche die Sicherheit der Talsperren gefährden könnten.

Bei der Umsetzung eines solchen Überwachungssystems mussten einerseits die Anforderungen des Auftraggebers bezüglich Genauigkeit (Talflankenbewegungen ± 4 mm, nivellitisch gemessene Höhenänderungen 2.5 mm/km) und Verfügbarkeit der Resultate berücksichtigt werden. Andererseits durften die Herausforderungen der Installation und des ganzjährigen Betriebs der Messanlagen im Hochgebirge bei widrigsten Bedingungen nicht unterschätzt werden.

2. Realisierung

2.1 Konzept

Das vom Auftragnehmer offerierte Messkonzept sah ein mehrstufiges Überwachungssystem vor, welches die jeweiligen Stärken bzw. Vorteile verschiedener geodätischer Messtechniken optimal nutzt: Die Stauanlagen und deren unmittelbare Umgebung werden mit automatisch betriebenen Tachymetersystemen überwacht. Mit autonomen GPS-Messstationen werden, ebenfalls ganzjährig, punktuelle Informationen über allfällige Geländebewegungen erfasst. Mittels Präzisionsnivellements, welche entlang von Strassen oder durch Stollen führen, werden die räumliche Ausdehnung und die Tiefe von grossräumigen Setzungsmulden mit hoher Genauigkeit bestimmt. Falls das Nivellement weit genug über die Setzungsmulde hinausreicht, lassen sich daraus auch absolute Höhenbewegungen ableiten.

2.2 Bau und Sensoren

Für die geodätischen Sensoren und das Zubehör der automatischen Messanlagen

konnten handelsübliche Geräte eingesetzt werden. Auch bei den elektrischen und elektronischen Vorrichtungen konnten meist Standardkomponenten genutzt werden. Die grosse Herausforderung bei der Installation der Messanlage war die Wahl der richtigen Materialien, Befestigungen und Datenkommunikationslösungen. Diese waren für jeden Standort zu optimieren, um den Bedingungen entsprechend eine ganzjährig funktionstüchtige Anlage zu realisieren. Das raue Gebirgsklima stellt harte Anforderungen an sämtliche Installationen: weder tiefe Temperaturen, starke Winde und grosse Schneemengen, noch elektrostatische Entladungen durch Gewitter dürfen die Funktionstüchtigkeit der Messanlage nicht länger als einen Tag unterbrechen. Die Querschnittsüberwachung wurde mit je zwei Tachymetern auf den Stauauerkronen und bei den drei Vorfeldquerschnitten (Abb. 2) mit je einem Tachymeter entweder im Talfuss oder an der Talflanke realisiert. Zusammen mit einem zusätzlich installierten Tachymeter als Verbindung zwischen einem Mauer- und einem Vorfeldquerschnitt sind seit dem Jahr 2000 zehn Tachymeter in Betrieb. Die Überwachung der Einzelhöhenpunkte erfolgt mit zehn Zweifrequenz-GPS-Empfängern. Bei der Wahl der GPS-Standorte mussten neben der Berücksichtigung der

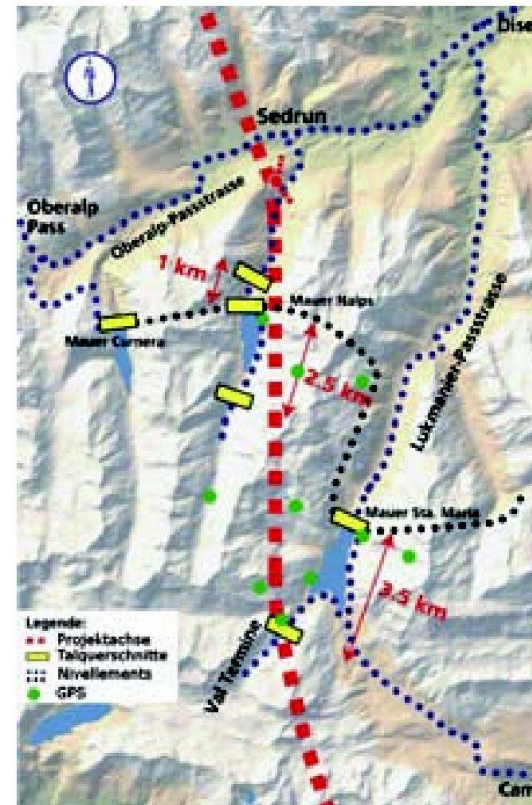


Abb. 2: Überwachungsperimeter und Messmethoden.

geologischen Gegebenheiten auch mögliche Naturgefahren (z.B. Lawinen) beachtet werden. Die einzelnen GPS-Messanlagen verfügen über eine unabhängige Stromversorgung (Solar) und Datenkommunikation (GSM-Netz). Im Vorfeld



Abb. 3: Impressionen der Montagearbeiten.



Abb. 4: Nivellementmessung beim Ritomsee.



Abb. 6: GPS-Anlage oberhalb des GBT-Trassees bei Mauer Nalps.

der Mauern Nalps und Sta. Maria wurden ausserdem durch den ARGE-Partner Amberg Technologies sechs Mehrfachextensometer installiert und in den automatischen Messprozess integriert. Diese Extensometer sollen allfällige Felsbewegungen unmittelbar bei den Staumauern registrieren.

Die Organisation der Prozesse und des lückenlosen Datenflusses sowie die Programmierung bzw. Automatisierung der Auswertungen bis hin zur Resultatabgabe benötigten ein hohes technisches und fachliches Know-how. Nach einigen baulichen Verbesserungen aufgrund erster Wintererfahrungen erreichen die Messanlagen heute eine fast hundertprozentige Verfügbarkeit während des ganzen Jahres.

2.3 Betrieb der Messanlagen

Die automatisch betriebenen Tachymetersysteme erfassen jeweils nachts im Stundenrhythmus die umliegenden Überwachungspunkte. Zeitgleich mit den geodätischen Messungen werden die meteorologischen Daten erfasst, welche für die Berechnung der genauen dreidimensionalen Koordinaten der Punkte notwendig sind. Die nächtlich erfassten Messdaten werden von den Steuerrechnern vor Ort jeweils morgens aufbereitet und per Email in das Rechenzentrum nach Regensdorf übertragen, wo diese in einem automatischen Prozess ausgewertet

werden. Vor der Resultatabgabe kontrolliert ein Ingenieur jeweils die neuesten Grafiken, damit in den Abgaberesultaten keine offensichtlichen Messfehler enthalten sind. Trotz ausgereifter Auswertalgorithmen und Filtermethoden kann man nicht ausschliessen, dass einzelne Messfehler die Auswertungen verfälschen würden.

Die GPS-Messstationen werden direkt aus dem Rechenzentrum gesteuert. Diese erfassen die Satellitensignale wöchentlich jeweils nachts von Freitag bis Montag. Die Übertragung der Daten ins Rechenzentrum geschieht ebenfalls automatisch, während die Auswertung manuell durchgeführt wird.

Die Messbarkeit des Nivellements ist auf die schneefreie Zeit beschränkt (i.d.R. Mai bis Oktober). Zwei Messequipen messen in den Monaten August und September nach den Qualitätsstandards des eidgenössischen Landesnivellements (Rück-Vor-Vor-Rück) ein Nivellementnetz ent-

lang von Strassen, Wegen und Stollen, dessen Länge annähernd 100 km beträgt (Abb. 4).

2.4 Auswertung der Messungen

Normalerweise werden Deformationsmessungen auf Punkte abgestützt, von denen man annimmt, dass sie keinen Bewegungen unterliegen, also fest sind. Da im vorliegenden Fall mit weiträumigen Geländebewegungen zu rechnen ist, muss das Auswertungskonzept angepasst werden; d.h. die Lagerungspunkte werden gleichzeitig als Beobachtungspunkte betrachtet. Die geodätische Statistik bietet hierfür das Ausgleichsverfahren mittels einer sogenannten stochastischen Lagerung an.

Aufgrund der räumlichen Punktanordnung im Überwachungsgebiet lassen sich Punktepaare bilden, welche die relativen Bewegungen quer und längs zum Tal sowie in der Höhe innerhalb eines bestimmten Zeitraumes beschreiben. Die

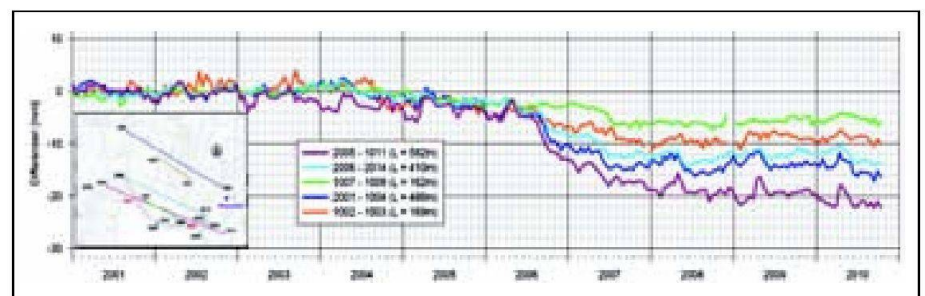


Abb. 5: Grafische Darstellung der Talschliessung bei der Staumauer Nalps.

Informationen werden in Form einer halbvollen Matrix numerisch zusammengefasst und dem Auftraggeber zur Verfügung gestellt. Zur besseren Les- und Interpretierbarkeit werden die Resultate auch graphisch als Zeit/Weg-Diagramme dargestellt (Abb. 5).

Die GPS-Messungen werden mit der Standard-GPS-Auswertesoftware des Herstellers ausgewertet und anschliessend mit einem erweiterten meteorologischen Korrekturmodell verbessert. Dies ist nötig, um bei den meteorologisch beeinflussten GPS-Messungen höchste Genauigkeiten zu erreichen. Das jährliche Nivellement wird jeweils nach Abschluss der Messkampagne mit einer Gesamtausgleichung ausgewertet. Die Resultate werden ebenfalls in numerischer und graphischer Form aufbereitet.

3. Resultate

Die ersten Betriebsjahre der Messanlage erfassten den Zustand der Geländeoberfläche, als der Vortrieb des Gotthardbasistunnels noch mehrere Kilometer vom Überwachungsgebiet entfernt war. Während dieser Zeit konnten das Normalverhalten des Geländes erfasst und das Instrumentarium sowie die Auswertung kalibriert werden. Dabei wurden unerwartete Talöffnungen von Anfang Sommer bis Ende Winter und rasche Tal-schliessungen im Frühsommer beobachtet. Diese Bewegungen zeigen einen zyklischen Zusammenhang mit der Jahreszeit und somit mit dem Grundwasserspiegel. Diese saisonalen, reversiblen Bewegungen wurden in allen Talquerschnitten gemessen, jedoch mit unterschiedlicher Ausprägung. Die maximalen zyklischen Bewegungen betragen bis zu 16 mm zwischen Punkten auf gegenüberliegenden Talflanken. Ähnliche saisonale Schwankungen wurden bei den GPS-Messstationen beobachtet.

Mit der Annäherung des Vortriebs von Norden (TA Sedrun) und von Süden (TA Faido) wurden auf der Geländeoberfläche irreversible Bewegungen detektiert, welche eindeutig in kausalem Zusammenhang mit dem Bau des Gotthardbasis-

tunnels standen. Dabei handelt es sich um Setzungen und gleichzeitige Talschliessungen (siehe Abb. 5). Je nach Standort liegen diese Bewegungen im Millimeter- bis Zentimeterbereich. Wegen der relativ geringen Grösse und Gleichmässigkeit der Bewegungen im Bereich der Stau-mauern sind bisher weder eine theoretische Gefährdung noch irgendwelche Schäden an den Stauanlagen festgestellt worden.

Auch das Verhalten der GPS-Punkte ist deutlich durch den Vortrieb beeinflusst. So bewegen sich alle Messstationen lagemässig in Richtung der Tunnelachse, ausserdem wurden Setzungen im Zentimeterbereich detektiert.

4. Erkenntnisse und Fazit

Die gesamte Messanlage ist nun seit zehn Jahren in Betrieb und liefert täglich zuverlässige und genaue Resultate. In dieser Zeit wurden wertvolle Erkenntnisse gesammelt, welche auch ausserhalb des geodätischen Umfelds Interesse geweckt haben:

- In den Gebirgstälern treten aufgrund des sich ändernden Gebirgswasserspiegels jahreszeitlich wiederkehrende Talöffnungen und -schliessungen im Bereich von Zentimetern auf. Dieses Phänomen war selbst den Geologen bisher nicht bekannt.
- Mit Nivellements kann eine Setzungsmulde «absolut» überwacht werden. Die Netzausdehnung muss jedoch gross genug gewählt werden, damit die Festpunkte ausserhalb des Setzungsgebiets liegen. Des Weiteren hat sich bewährt, dass seit mehreren Jahren dieselben Strecken nivelliert werden. Damit können Langzeitbewegungen viel zuverlässiger und meist weit unterhalb der Signifikanzschwelle gemäss der theoretischen Messgenauigkeit interpretiert werden.
- Autonome GPS-Messanlagen können auch im Hochgebirge zuverlässig betrieben werden. Sie erfüllen bei sorgfältiger Auswertung und Trendanalyse höchste Genauigkeitsanforderungen im Millimeterbereich.

- Die Kombination von manuellen und automatischen Messsystemen hat sich in verschiedener Hinsicht als ideale Lösung im Spannungsfeld einer maximalen Sicherheit und eines kostengünstigen Geldmitteleinsatzes gezeigt.
- Um nicht kompensierbare (z.B. temperaturbedingte) Messfehler auszuschliessen bzw. zu minimieren, sind spezielle Massnahmen zu ergreifen (z.B. Beschränkung auf Nachtmessungen, periodische Tachymeterkalibrierungen beim Hersteller etc.).
- Die Kombination von manuellen mit automatischen Datenfluss- und Auswerteprozessen bringt zwei Vorteile: Automatische Prozesse sind zeiteffizient und vermeiden menschliche Flüchtigkeitsfehler; der Vermessungsspezialist überprüft dank seines Know-hows die Plausibilität der Resultate, bevor diese an den Auftraggeber abgegeben werden.
- Grossräumige Gebiete sind mit einer genügend langen Vorlaufzeit zu überwachen, um den von Baumassnahmen unbeeinflussten Zustand zu erfassen und um die Messsysteme zu kalibrieren.
- Regelmässige Berichterstattungen und Besprechungen mit dem Auftraggeber gewähren ein beidseitig gleiches Verständnis der Messanlagen und ihrer Einschränkungen (z.B. infolge kurzfristiger Witterungsbedingungen). Dies gilt ebenso für die Interpretation der daraus resultierenden Tabellen und Grafiken.

Dante Salvini
 Mario Studer
 BSF Swissphoto AG
 Dorfstrasse 53
 CH-8105 Regensdorf-Watt
 dante.salvini@bsf-swissphoto.com
 mario.studer@bsf-swissphoto.com