Connaissances résultant du monitoring de longue durée lors de la construction du tunnel de base du Saint-Gothard

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

Objekttyp: **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: **02.06.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-389495

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Connaissances résultant du monitoring de longue durée lors de la construction du tunnel de base du Saint-Gothard

Le tracé du tunnel de base du Saint-Gothard passe à proximité de trois lacs de retenue. Afin de reconnaître à temps des déformations critiques aux alentours des barrages et de pouvoir réagir au besoin immédiatement un important monitoring géodésique a déjà été mis en service quelques années avant le percement. En effet, des rétrécissements de la vallée et des tassements significatifs, cependant non-critiques ont pu être prouvés. L'observation permanente de ces mouvements de surface a permis d'éviter des mesures constructives à hauteur de centaines de millions lors de la construction du tunnel.

Il tracciato della galleria di base del Gottardo passa nelle vicinanze di tre bacini di accumulazione. Per riconoscere tempestivamente le deformazioni critiche nell'ambito dei muri dello sbarramento e intervenire immediatamente in caso di necessità, già anni prima del traforo si è attivato un esteso sistema di monitoraggio geodetico. In realtà è stato possibile dimostrare assestamenti e restringimenti delle valli aventi una portata significativa ma non critica. L'osservazione permanente di questi movimenti della superficie hanno evitato durante la costruzione della galleria ulteriori provvedimenti edili ammontati a importi milionari di tre cifre.

M. Studer, A. Ryf

1. Etat du projet du tunnel du Saint-Gothard

Le début de la construction du tunnel de base du Saint-Gothard (TBG) a eu lieu en 1993 par les premiers travaux de la galerie de sondage de Piora. En 2002 le creusage du tunnelier a démarré et le dernier percement a eu lieu en mars 2011. Depuis, les travaux d'installatiion de la technique ferroviaire sont menés de façon soutenue et dans le tube ouest entre Bodio et Faido des essais d'exploitation sont en cours. La remise de cet ouvrage aux CFF est planifiée pour 2016. L'actualité des informations concernant ce projet centenaire est disponible sur le site web www.alptransit.ch.

Dans le cadre des Cours internationaux de mensuration pour ingénieurs qui ont lieu tous les trois ans à tour de rôle à l'EPF Zürich, la TU de Munich et la TU de Graz des conférences sur les nombreuses mensurations de surveillance lors de l'excavation du tunnel du Saint-Gothard ont déjà eu lieu à plusieures reprises (Ryf et al. 2000, Studer et al. 2004, 2007 & 2014, Stengele et al. 2010).[1]

2. Aperçu des tâches de monitoring

2.1 Situation de départ

Des drainages de montagnes dus au percement de galeries peuvent induire des tassements à la surface. En Suisse de tels tassements à l'échelle du dm ont été démontrés à la galerie de sondage du tunnel du Rawyl et lors de la construction du tunnel routier du Gothard. Le tracé du TBG passe près des trois lacs de retenue de Curnera, Nalps et Santa Maria dans le Bündner Oberland. Des recherches théoriques préalables ont montré que lors de la construction du TBG des tassements superficiels jusqu'à 5 cm pourraient surgir sans mesures visant à diminuer l'apport d'eau de montagne. Dans une recherche complémentaire ont a examiné la sensibilité des barrages de retenue quant à des déformations de sufaces et déterminé les valeurs limites pour plusieures situations de dangers. Des tassemnets irréguliers de surface aux alentours de ces trois barrages pourraient mettre en danger leur aptitude au service.

A l'aide de l'analyse des risques la probabilité d'un évènement dangereux a toutefois été jugée comme minime, mais l'importance des dégâts cependant comme très élevée. Par conséquent plusieures mesures de minimisation des risques ont été mises en place. A part des mesures lors de l'avancement servant à maîtriser les arrivées d'eau l'observation géodésique de la surface des terrains aux alentours des installations de retenue pendant toute l'année a été décidée avant, pendant et après le percement du tunnel.

2.2 Buts et exigeances des systèmes de mesure

Le but principal des installations de surveillance consistait à surveiller par des dispositifs de mesures automatiques le respect des valeurs limites des déformations du terrain et des ouvrages à proximité des barrages. Lors d'avances de percement critques à proximité des barrages ces mesures devaient être disponibles journellement.

En plus de l'analyse des déformations dans le voisinage des barrages l'intérêt était aussi de connaître la forme du «cône de tassement» ains que l'évolution dans le temps de sa propagation en direction de l'avancement du percement et perpendiculairement. Ces informations étaient importantes afin d'évaluer si le cône de tassement en aval des différents barrages se situait dans la sphère convexe ou concave ce qui détermine l'évolution

[1] Ces publications peuvent être téléchargées sous www.bsf.swissphoto.com: Actualités/Publications.

et l'ampleur d'un rétrécissement respectivement d'un élargissement de la vallée. A l'aide de calculs statiques de simulations des experts en matière de barrrages examinent la sensibilité des barrages au point de vue ouverture ou fermeture du profil en travers de la vallée. Il s'est avéré qu'un tel mouvement pouvait atteindre auprès du barrage le plus sensible jusqu'à 10mm (ouverture) sans conséquence pour celui-ci car jusqu'à l'atteinte de cette valeur le comportement plastique linéaire du barrage reste intact même dans le plus mauvais des cas. En se basant sur cette valeur la capacité de détection du système tachymétrique de surveillance a été fixé à 4mm. Les valeurs de changement altimétrique déterminées par des mesures de nivellemnt devaient être prouvées de manière significative dès 2,5 mm et celles des déformations mesurées par GPS à partir de 10 mm. Alors que pour les coupes transversales de la vallée des mouvements relatifs à proximité des barrages pouvaient suffir les mesures de nivellement devaient être raccordées dans un plus grand périmètre à plusieurs groupes de points fixes et les mesures GPS faites à l'extérieur de la cuvette de tassement pronostiquée devaient également être référencées afin d'obtenir des valeurs absolues sur les cuvettes de tassement.

Pour le maître de l'ouvrage il était clair dès le début qu'il n'était possible de prouver de si petits mouvements qu'avec des mesures de plus haute précision, de plus grande fiabilité et de continuité sans faille. En plus il fallait pouvoir distinguer clairement les mouvements naturels de surface (le plus souvent d'allure cyclique provoquée par le régime des eaux proches de la surface) des mouvements dus à l'avance du percement. Cela impliqua des séries de mesures continues mises en oeuvre quelques années avant le début des travaux de creusage afin de saisir le «comportement normal» et de pouvoir calibrer l'ensemble du dispositif de mesure. La continuité des séries de mesures en haute montagne exigea une fiabilité de fonctionnement élevée et une résistance aux conditions hivernales des installationsde mesure.

3. Mise en place du systéme de surveillance

Le montage du système de mesure commença en 2000 par un consortium composé de BSF Swissphoto/Grünenfelder et Partenaires ainsi que Amberg Technologies (Geotechnik); l'ensemble de l'installation de mesure a été mis en service de façon complète en automne 2001. Du fait des différentes exigeances et des conditions cadres (entre autres livraison de résultats durant toute l'année au rhytme journalier, surveillance altimétrique dans un large périmètre, etc.) il était évident dès le début que pour cette tâche il fallait utiliser aussi bien des systéme de mesure automatiques que manuels. Cette combinaison s'est révélée ces dernières années être la solution idéale dans le contexte d'une fiabilité maximale et d'un emploi optimal des moyens.

Pour de plus amples informations sur les installations tachymétriques et GPS ainsi que la déscription de l'important réseau de nivellement de grande étendue nous nous référons aux articles idoines des Cours de mensurations d'ingénieur internationaux.

4. Resultats des mesures à fin mars 2014

4.1 Tachymétrie

L'image 1 montre les trois coupes de mesures tranversales Nalps Nord (NN), Nalps Mauer (NM) et Nalps Sud (NS) ainsi que le tracé du GBT présenté en double ligne (2 tubes). Les coupes de mesures se situent entre 1700 et 2100 m d'altitude (NS); le point culminant du GBT se situe à 550 m d'altitude. Entre le tunnel faisant effet de drainage et la surface du terrain il y a donc 1500 m de roc compact du Gothard.

L'image 2 montre les mouvements relatifs perpendiculaires à la vallée pour chaque coupe de mesure entre les deux points les plus élevés de chaque versant. Aux trois coupes transversales on a mesuré un rétrécissemnt significatif de la vallée. Il est intéressant de constater un rétrécissement maximal NN et NS de 7 cm en fin 2013 quasi identique alors que la coupe intermédiaire NM n'accuse qu'un rétrécissement maximal de 2,5 cm. Les trois coupes transversales montrent aux endroits du passage du GBT déjà un rétrécissement de la vallée de 1,5 à 2,5 cm ce qui signifie que les mouvements dus au drainage ont précédé l'avance du percement. La paire de points en NN montre que les mouvements de terrain en surface peuvent encore perdurer plusieurs années après le passage des travaux de percement puisque la vallée n'a jamais été aussi étroite qu'en fin 2013 bien que ceux-ci ont eu lieu au début 2006. Entre 2009 et 2011 une stabilisation du mouvement semblait être intervenue; toutefois pendant ces trois deernières années la vallée s'est à nouveau rétrécie de 1,5 cm.

4.2 GPS

L'image 3 montre de façon exemplaire les changements de situation de 2 stations GPS dus au percement du tunnel. Au début «Nalps Mauer» s'est déplacé de 2 cm en direction nord mais au milieu 2007 un retournement a eu lieu et depuis le point se déplace continuellement en direction sud. Au début 2014 le point se trouvait

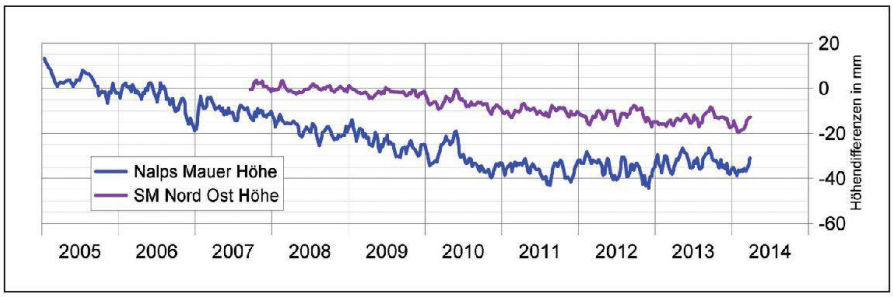

Fig. 4: Changements d'altitude de deux stations GPS singulières.
Abb. 4: Höhenänderungen von zwei ausgewählten GPS-Stationen.

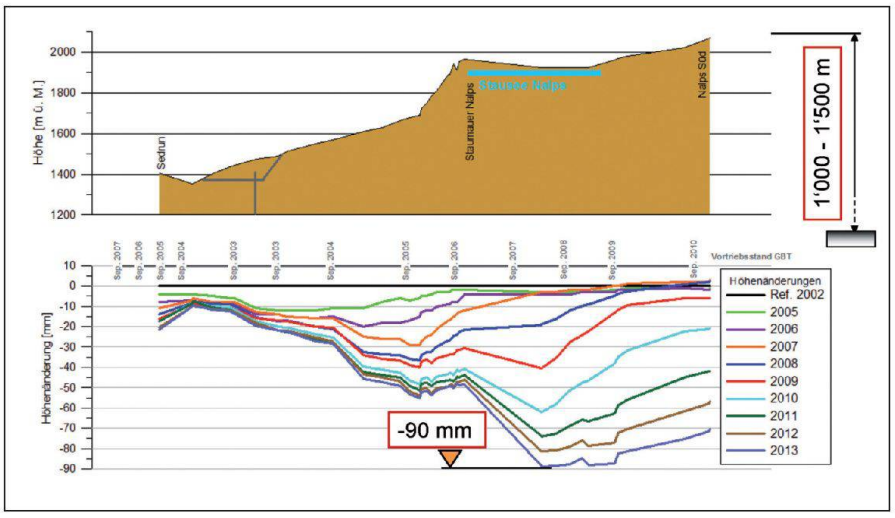

Fig. 5: Profil en long des tassements de terrain au Val Naps, 2004–2013.
Abb. 5: Längenprofil der Geländesetzungen im Val Nalps, 2004–2013.

7,5 cm plus au sud qu'au début des mesures. Ce point étant situé à proximité immédiate du barrage on a pu démontrer que tout le mur pendant ces derniers sept ans a subi un déplacement de près de 10 cm. Dans la composante est-ouest il est apparu depuis 2008 un mouvement continuel en direction de l'axe du tunnel d'entre-temps 3 cm.

Le point «SM Nord Est» situé à 2,2 km de l'axe du GBT accuse de plus petits mouvements en raison de son plus grand éloignement de l'axe. Actuellement le point se trouve 2,5 cm plus au sud et 2,5 cm plus à l'ouest qu'au début des mesures c'est-à-dire que ce point s'est également déplacé en direction de l'axe du tunnel. Il est intéressant de constater que ce mouvement est-ouest est pratiquement du même ordre qu'à l'endroit du point «Nalps Mauer» qui se situe seulement 400 m à l'ouest de l'axe du GBT.

La fig. 4 montre les variations d'altitude de ces deux points au courant des derniers neuf ans. On constate une stabilisation chez «Nalps Mauer» depuis 2010 bien que qu'un déplacement de situation relatif de 6 cm en direction sud ait encore eu lieu pendant cette période.

4.3 Nivellement

L'image 5 montre les tassements de terrain au Val Naps pendant ces neuf derniers ans en forme de profil en long. Avec ce procédé de mesure il est clairement visible que les tassements ont déjà pu être prouvés de façon significative avant la traversée du percement à proprement parler et que d'autre part ces tassements peuvent encore se produire pendant plusieurs années aprés l'achèvement de la construction brute du tunnel. On voit ainsi combien il est difficile de pronostiquer des tassements locaux dans le contexte d'un recouvrement de 1500 m de rocher et de hétérogénités géologiques locales et au vu du fait que le plus grand tassement absolu a été mesuré à raison de –9 cm à environ 1 km au sud du mur Nalps bien que le recouvrement dans la partie nord du Val Naps soit baucoup plus petit (cf. haut de la fig. 5) et que l'axe du GBT se situe à cet endroit directement sous le fond de la vallée.

5. Enseignements du maître de l'ouvrage

«Nous avons la volonté de réaliser le projet Alptransit Gothard à la qualité requise, le plus vite possible et au coût minimal», tel est le but que très tôt s'etait fixé AlpTransit Gotthard AG. Qualité, délais et coûts étaient et sont la priorité affichée pour chaque phase de projet et pour chaque partie du projet d'ensemble. Afin d'atteindre ces buts il faut un management rigoureux des risques dont les débuts remontent à l'origine du projet. Les responsables du maître de l'ouvrage étaient dès le début conscients que les risques ne résident pas seulement dans l'exécution du percement mais aussi à la surface du terrain aux endroits des barrages. Que le creusage d'un tunnel soit accompagné d'un drainage aux alentours du rocher et de tassements à la surface du terrain a été constaté lors d'autres projets de tunnels en Suisse. Heureusement les experts et représentants de la Confédération, à ce sujet initialement encore sceptiques se sont laissés persuader qu'il y avait lieu, dans un tunnel d'une pareille profondeur de surveiller les environs des barrages déjà quelques années avant l'approche des travaux d'excavation et aussi pendant toute la durée des travaux par une installation de monitoring de grande envergure.

L'avancement des percements depuis Sedrun en direction sud s'est approché des barrages trois ans avant celui depuis Faido. Des reconnaissances préliminaires en vue de localiser des zones aquifères dérangeantes et des mesures d'injections adéquates étaient au centre de l'intérêt afin de limiter les amenées d'eau. Le ralentissement du temps de construction en résultant était de six mois. La corrélation entre les apports d'eau dans le tunnel et les tassements mesurés en surface était évidente. La connaissance croissante de ces corrélations et du constat géologique a permis de déterminer un modèle de calcul toujours plus précis (modèle des éléments finis tridimensionnels) autorisant à calculer le comportement de tensioncontrainte d'un massif rocheux. Dans les avancements de Faido en direction nord les mesures d'injection n'étaient plus prioritaires et de ce fait ne ralentissaient plus les travaux de percement. Pour le barrage de Santa Maria dont les considérations dans cette phase des travaux étaient d'intérêt supérieur trois échelons de risques ont été définis. Au lieu des mesures au niveau du tunnel les résultats du monitoring à la surface du terrain ont été observés continuellement avec soin et le modèle de calcul actualisé afin de pouvoir, au besoin directement prendre des me-

sures constructives aux barrages. Ce concept modifié s'est révélé être le choix optimal.
Grâce à l'assistance d'experts et à la collaboration étroite avec les exploitants des forces motrices on a pu renoncer sur un long tronçon du tunnel à des injections d'étanchéification. Si on avait suivi strictement les concepts initiaux et sans les vastes dispositifs de monitoring en surface d'énormes retards et coûts supplémentaires de centaines de millions en auraient résulté. Après coup tous les acteurs se sont persuadés que les gros investissements en surveillance et son accompagnement par les experts se sont avérés hautement payants dans tous les cas.
Les résultats des installations de monitoring, notamment les graphiques mis périodiquement à jour font encore aujourd'hui l'objet d'analyses régulières et intenses du maître de l'ouvrage et des experts mandatés afin de pouvoir réagir de façon appropriée lors d'évènements extraordinaires.

6. Enseignements du géomètre

Des systémes de monitoring complexes de grande envergure comportant une multitude de systémes de mesure et soumis à des conditions climatiques exigeantes ne peuvent être acquis auprès d'aucun fournisseur. Pour la planification, la réalisation ainsi que pour l'exploitation de ce système pendant les 14 ans écoulés une grand nombre de spécialistes tels que géologues, experts en avalanches, professionnels de la construction, menuisiers, entreprises d'héliportage, ingénieurs-géodésiens, fabricants de systèmes, techniciens en communication et électriciens, concepteurs de logiciels, exploitants de barrages,etc. étaient à l'œuvre de façon interdisciplinaire.
Par un temps d'anticipation suffisant des mesures de plusieurs années avant l'influation sur le terrain par le percement du tunnel on a pu saisir le comportement saisonnier normal du terrain et des ouvrages. Grâce à cette prévoyance du mandant et à sa disposition de supporter des coûts supplémentaires dus à une exploitation un peu plus longue il a été possible de tenir compte de ce comportement normal lors de l'intreprétation des déformations consécutives à des mesures de construction.
Les capteurs de monitoring utilisés pour ce projet etaient très fiables. Par un entretien annuel préventif de tous les tachymètres auprès du constructeur on a par exemple pu atteindre qu'aucun capteur n'a dû être remplacé pendant les 14 ans et que des interruptions d'exploitation étaient pratiquement exclusivement dues à la foudre. Néanmoins, chaque système de mesure automatique nécessite un contrôle périodique sur place (travaux d'entretien préventifs, problèmes de communication ou de logiciels, tombée de la foudre), c'est-à-dire que l'exploitant du système, afin d'entreprendre des travaux d'entretien devrait pouvoir atteindre en temps utile le périmètre de surveillance malgré des composants de systéme très fiables.
Un échange, dès le début régulier et très constructif entre le mandant AlpTransit Gotthard AG et les entreprises mandataires et les usagers/interprètes des données a beaucoup contribué à l'acceptance du système et la bonne réussite. A cet endroit nous remercions tous les acteurs.

Mario Studer
Responsable mensuration d'ingénieur
BSF Swissphoto
Dorfstrasse 53
CH-8005 Regensdorf-Watt
mario.studer@bsf-swissphoto.com

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