

AlpTransit Saint-Gothard Les exigences imposées aux travaux topographiques sur le tronçon de Sedrun

■ Adrian RYF - Theresa NEUHIERL - Ivo SCHÄTTI (Version française : Olivier REIS)

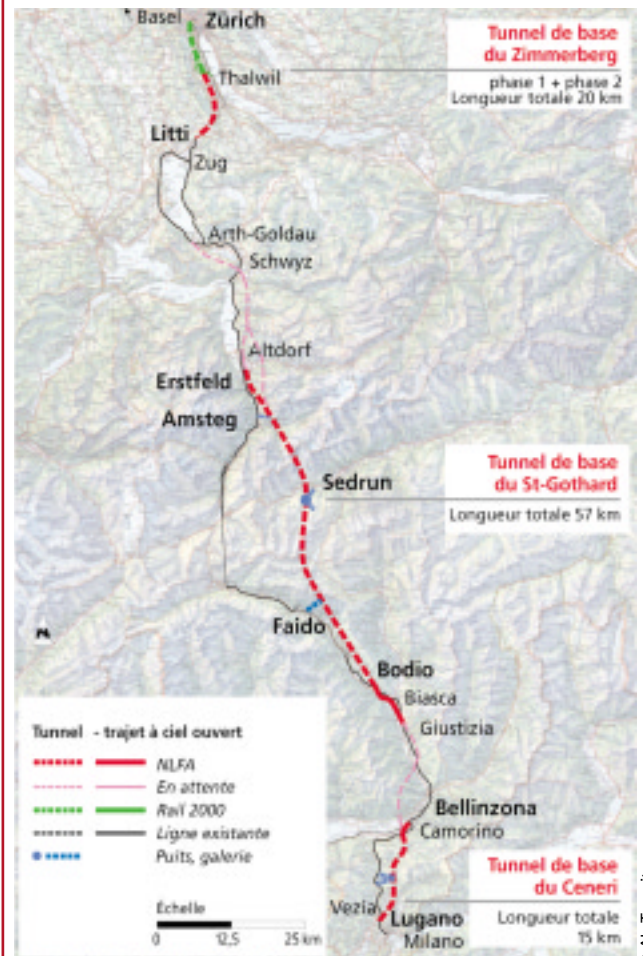


Les descentes de points effectuées dans les puits ont montré qu'il était possible d'atteindre la valeur de 24 mm délivrée par la préanalyse. Le transfert des altitudes par l'intermédiaire de mesures électroniques des distances effectuées verticalement ne pose aucun problème. La fiabilité du transfert de la direction a pu être fortement accrue grâce au recours à deux méthodes de mesure différentes, les azimuts gyroscopiques et la technique inertielle. L'implantation du tunnel sur environ 2 km, vers le nord comme vers le sud, peut donc prendre appui sur cette base. A cette distance, de nouvelles mesures gyroscopiques seront nécessaires, dans chacune des deux directions de percement. Si le tronçon de Sedrun du tunnel du Saint-Gothard innove en matière de techniques de génie civil mises en œuvre, il ouvre également de nouvelles perspectives au domaine de la géodésie. La descente de points au plomb optique sur une profondeur de 800 m et les mesures inertielles de haute précision dévolues au transfert de la direction constituent des premières mondiales. Et l'excellente collaboration entre le consortium en charge des travaux topographiques, les ingénieurs géomètres d'AlpTransit et les Hautes écoles a permis à tous les intervenants d'acquérir une expérience exceptionnelle.

Le projet AlpTransit Saint-Gothard

source : www.alptransit.ch

Le projet AlpTransit Gotthard va donner naissance à une ligne de plaine à travers les Alpes, résolument tournée vers l'avenir. Le tunnel de base du Saint-Gothard – qui, avec une longueur de 57 km, sera le plus long tunnel au monde – constituera la pièce maîtresse de cette nouvelle liaison ferroviaire. Cette œuvre de pionnier du XXI^e siècle apportera une amélioration notable des possibilités de circulation et de transport au cœur de l'Europe.



La nouvelle ligne ferroviaire à travers les Alpes (NLFA) du Saint-Gothard.

Au point d'attaque intermédiaire de Sedrun du tunnel de base du Saint-Gothard, long de 57 km et partie intégrante du projet AlpTransit, le percement s'effectue vers le nord et vers le sud à partir du fond de deux puits d'une profondeur de 800 m chacun. Le transfert de la planimétrie, de l'altimétrie et de la direction de la caverne creusée en tête de puits jusqu'au niveau inférieur, celui du tunnel, est réalisé par des topographes qui recourent pour cela à des méthodes si possibles différentes et indépendantes les unes des autres de façon à garantir le respect des exigences imposées en matière de précision et de fiabilité.

Situation initiale et exigences imposées

Le percement du tunnel de base du Saint-Gothard, long de 57 km et partie intégrante du projet AlpTransit, s'effectue simultanément depuis cinq sites différents. Le maître d'œuvre a fixé l'écart maximal admissible en chacune des différentes jonctions prévues à 25 cm en direction et en distance et à 12,5 cm en altitude. Les topographes considèrent ces valeurs comme des tolérances au sens géodésique et en déduisent les précisions requises en planimétrie (10 cm) et en altimétrie (5 cm). Formulé de façon concrète, cela signifie que toutes les jonctions sont à réaliser à une précision dimensionnelle équivalant à la taille d'un poing.

A Sedrun, le percement du tunnel s'effectue à partir du fond de deux puits d'une profondeur de 800 m chacun, surmontés d'une caverne en tête de puits et reliés à la vallée du Rhin antérieur par une galerie d'un kilomètre de longueur (figure 1). Les exigences à respecter pour la mesure du tunnel, déjà fortes, sont encore accrues par la complexité du système des puits. L'objectif assigné est de transférer la pla-

nimétrie, la direction et l'altimétrie au fond des puits avec une précision et une fiabilité aussi élevées que possible.

Le consortium VI-GBT (groupement d'ingénieurs géomètres pour le tunnel de base du Saint-Gothard), mandaté par la société AlpTransit Gotthard SA et dirigé par le bureau d'ingénieurs Grünenfelder basé à Domat/Ems, s'est vu confier la responsabilité de la conception et de l'exécution de l'ensemble des travaux topographiques nécessaires dans le cadre de l'implantation principale du tunnel de base du Saint-Gothard. Les tâches d'une certaine complexité ont fait l'objet d'une étroite collaboration entre le consortium VI-GBT, l'EPF (Ecole Polytechnique Fédérale) de Zurich depuis peu, l'université technique (TU) de Munich.

Méthodes de mesure indépendantes

L'objectif prioritaire poursuivi pour tous les travaux topographiques réalisés dans le cadre d'AlpTransit est le recours à des méthodes de mesure de précision différentes, aussi indépendantes les unes des autres qu'il est possible, afin de parvenir à une modélisation optimale des sources d'erreur et surtout, de façon à éliminer toutes les erreurs systématiques. Cette démarche s'applique également au tronçon de Sedrun. Si les méthodes de descente de point par voie optique et mécanique se sont imposées d'emblée pour le transfert de la planimétrie dans les puits, la recherche d'une méthode indépendante permettant de contrôler les azimuts gyroscopiques utilisés pour le transfert de la direction a été bien plus longue. La technique de mesure inertielle, employée pour la première fois au monde dans le cadre de travaux de précision en topométrie souterraine, a finalement permis de mener ce contrôle à bien.

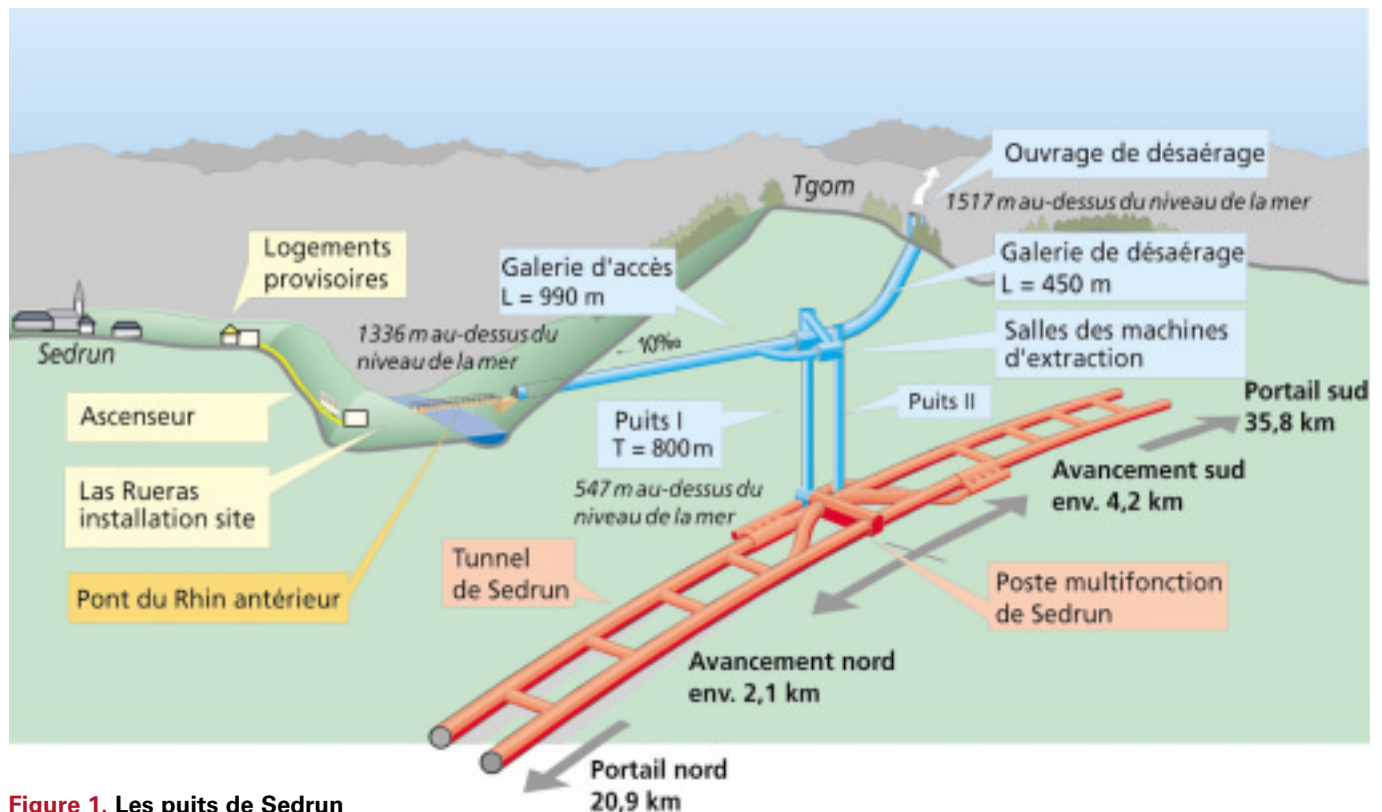


Figure 1. Les puits de Sedrun

Transfert de la planimétrie et de l'altimétrie

■ Descentes de points au plomb optique dans les puits I et II

La descente de points au plomb optique dans un puits d'une profondeur de 800 m exige des conditions de visibilité parfaites dont on ne dispose pas dans le cas normal. C'est pourquoi, plusieurs heures avant l'exécution de cette opération, la ventilation a été réglée de telle manière qu'un "courant d'air descendant" se forme dans le puits, autrement dit, que l'air soit aspiré au fond du puits et ramené vers la surface par le circuit de ventilation ; ainsi, l'air frais entrant dans le puits par sa tête dissipe tout brouillard éventuel et permettait de disposer d'une parfaite visibilité de la tête au fond du puits. Une descente de points au plomb optique a pu être réalisée dans chacun des deux puits : au printemps 2002 dans le puits I et en janvier 2004 dans le puits II.

Une lunette nadirale Leica (résolution : 1:200 000) montée sur trépied a été utilisée pour les descentes de points au plomb optique, lesquelles se sont effectuées selon trois couloirs afin d'accroître la précision et la fiabilité du processus (figure 2). Des prismes équipés de diodes lumineuses centrées ont servi de cibles, mises en place sur les points implantés au fond du puits au moyen de coordonnées approchées. Les écarts ont à chaque fois été observés dans quatre positions et les corrections ont été transmises par radio à l'opérateur se trouvant au fond du puits. La position des trépieds utilisés au fond comme en tête de puits a été mesurée depuis trois stations en intégrant les points fixes au processus.



Figure 2. Lunette nadirale montée sur trépied



Figure 4. Descente de point par voie mécanique

■ Transfert de l'altitude

Il a été possible, pour chacune des deux descentes de points au plomb optique, de procéder au transfert de l'altitude en mesurant la distance verticale du fond du puits vers sa tête au distancemètre électronique. Un dispositif spécial a permis de viser un réflecteur monté sous le trépied implanté en tête de puits (figure 3). Les deux différences d'altitude mesurées ne diffèrent que de quelques millimètres.

■ Descente de point dans le puits I par des moyens mécaniques

Une descente de point par voie mécanique a été entreprise par la société DBE Gorleben très peu de temps après la première descente au plomb optique réalisée au printemps 2002. Cette entreprise possède une solide expérience acquise dans le domaine de l'exploitation minière. La descente de point par voie mécanique a également été effectuée selon trois couloirs. L'installation des treuils, des poulies et la descente des fils ont nécessité près d'une journée de travail, les poids pesant près de 390 kg par fil ayant ensuite été mis en place en fin de journée. Les mesures ont eu lieu le lendemain, après avoir laissé reposer les fils durant environ 12 heures. Deux théodolites mis en place sur deux stations différentes ont



Figure 3. Réflecteur monté sous le trépied

- ■ ■ servi à mesurer chacun 10 points de rebroussement dans les deux positions de la lunette, pour chacun des trois poids en oscillation (figure 4). Une deuxième série de mesures a été effectuée après une réduction des poids, ramenés à environ 192 kg, la troisième série s'effectuant à nouveau avec des poids de 390 kg. Des influences systématiques telles que des courants d'air, le suintement de l'eau et la courbure du fil font dévier ce dernier de sa position théorique. Le recours à des poids différents permet de minimiser ces erreurs.

■ Exploitation et résultats

Lors de la descente d'un point, la déviation de la verticale exerce une influence directe sur la précision des coordonnées et doit donc impérativement être prise en compte. La direction de la verticale étant incurvée, les valeurs de correction à appliquer en tête de puits et au fond ne sont pas les mêmes. Le modèle de géoïde de 1998 (Marti, swisstopo) est utilisé pour déterminer les composantes de la déviation de la verticale, valeurs dont la précision est de l'ordre de 0,3 mgon. La figure 5 présente les composantes de la déviation de la verticale aux points concernés ainsi que les corrections qui en découlent. Les descentes de points (optiques et mécaniques) se fondant toutes sur un même modèle de géoïde, les deux méthodes ne sont pas totalement indépendantes, puisque d'éventuelles erreurs systématiques commises dans ce modèle restent indétectables.

Le calcul de la précision interne de la descente de points au plomb optique a d'abord été entrepris. Les deux triangles définis en tête de puits et au fond par les points descendus ont donc été comparés entre eux. Pour chacun des deux puits, la précision interne s'est établie à 4 mm. A cela s'ajoute l'incertitude inhérente à la déviation de la verticale estimée à 0,3 mgon, soit environ 4 mm sur 800 m. Ainsi, la précision de la descente de point au plomb optique peut être estimée à environ 6 mm.

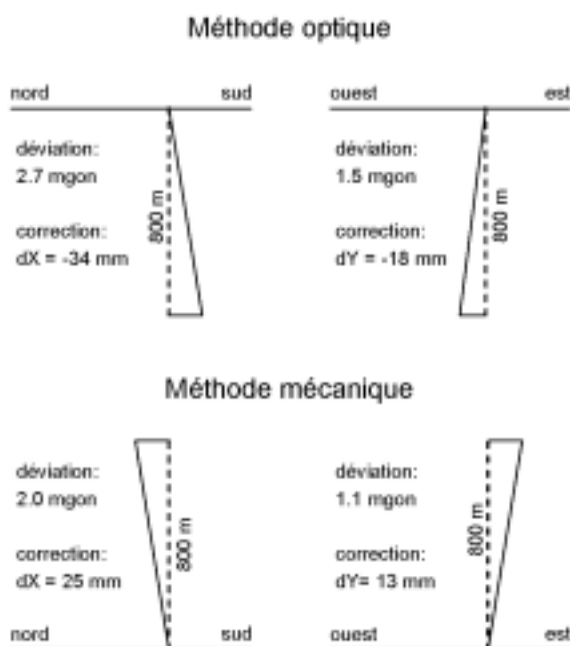


Figure 5. Déviation de la verticale

Dans le cas de la descente de point par voie mécanique, les trois séries de mesures réalisées (1 : poids total ; 2 : poids réduit de moitié ; 3 : poids total) ont permis de procéder à deux exploitations dont deux déterminations de la position théorique ont résulté. Les écarts maximaux entre ces deux exploitations s'établissent à 10,2 mm pour l'un des lieux d'observation et à 1,5 mm pour l'autre. L'évaluation de la précision s'appuie ici aussi sur la comparaison directe entre les deux triangles, l'un au niveau de la tête du puits et l'autre au fond du puits et tient par ailleurs compte de la précision des composantes de la déviation de la verticale. Au final, il en résulte une précision de 5 mm pour la descente de point par voie mécanique.

La compensation globale du réseau intègre les résultats des descentes de points (par voie optique et mécanique) et les combine aux mesures de rattachement effectuées au niveau de la tête et du fond du puits. Les distances mesurées au distancemètre électronique (depuis le fond du puits vers sa tête) lors de la descente de point au plomb optique servent au transfert des altitudes tandis que les azimuts gyroscopiques mesurés lors d'une autre campagne de mesure servent au transfert de l'orientation.

Une analyse des différentes descentes de points au sein de la compensation globale met les excellents résultats suivants en lumière : les variantes de la compensation ne prenant en compte que la descente optique ou que la descente par voie mécanique effectuée dans le puits I, conduisent à des différences de coordonnées d'à peine 2 mm suivant les axes Y et X au fond du puits [Schätti 2004].

Transfert de la direction

Les puits I et II ne sont distants que de 38 m. Les deux descentes de points effectuées permettraient de déterminer un azimut avec une précision de l'ordre de 20 mgon, valeur toutefois insuffisante pour le transfert de la direction puisqu'une précision de 1,5 mgon est exigée.

■ Gyroscope

La définition de la direction de percement au fond des puits de Sedrun s'effectue au moyen d'azimuts gyroscopiques, lesquels sont mesurés à l'aide du Gyromat 2000 de l'EPF Zurich. A l'intérieur du gyroscope, une masse suspendue est en rotation à grande vitesse. Le mouvement de précession de la Terre conduit cette masse à osciller autour de la direction du nord géographique, autrement dit, parallèlement à l'axe de rotation de la Terre. La précision du gyroscope dépend pour une large part de la température ambiante. Les écarts entre la température à laquelle a été mesuré l'azimut de référence dans le réseau du portail et celles à laquelle s'effectuent les mesures réalisées ultérieurement au sein du réseau du tunnel peuvent être très conséquents. C'est pourquoi il est impératif de procéder à des étalonnages réguliers de l'instrument dans la chambre d'essai en température dont dispose l'EPF Zurich. Dans le tunnel, la précision et la fiabilité peuvent être accrues par l'exécution de mesures répétées. D'éventuels écarts systématiques ne peuvent toutefois pas être éliminés



Figure 7. Mesures d'autocollimation au fonds du puits

de la sorte. Ainsi, un modèle de masse de bonne qualité est en particulier requis afin de permettre l'estimation de valeurs aussi réalistes que possible des composantes de la déviation de la verticale pour toutes les stations de mesure. Ici aussi, le modèle de swisstopo est mis à contribution. La précision exigée pour les azimuts gyroscopiques est de 1,5 mgon. Le recours à des mesures répétées a permis d'atteindre une valeur d'environ 1,3 mgon.

■ Mesures inertielles

Dans l'état actuel de la technique, la méthode de mesure inertielle représente la seule possibilité réaliste de contrôle indépendant des azimuts gyroscopiques. Une collaboration étroite entre l'université technique (TU) de Munich et l'EPF Zurich a permis d'utiliser pour la toute première fois un système inertielle de la TU Munich dans le cadre d'un transfert de direction de haute précision. Cet instrument de la société iMAR intègre trois couples accéléromètre – gyroscope, perpendiculaires deux à deux, l'accéléromètre et le gyroscope formant chaque couple étant coaxiaux. Au terme d'une phase d'initialisation de quelques minutes, réalisée en position de repos et durant laquelle l'orientation de départ est déterminée, les translations et les rotations de l'unité sont enregist-



Figure 6. Unité de mesures inertielles

- ■ ■ trées et intégrées lors de ses déplacements. De la sorte, l'angle de rotation entre deux positions peut être mesuré avec une très grande précision.

A Sedrun, l'unité de mesure a été placée sur une plaque métallique, solidaire du transporteur à bande du puits, qui a alors fait plusieurs allers et retours à grande vitesse (16 m/s) entre le fond et la tête du puits (figure 6). Au niveau supérieur et au niveau inférieur, un tachéomètre a été mis en station face au puits afin de mesurer la direction de miroirs montés sur la plaque métallique pour la transférer dans le réseau géodésique du tunnel. La mesure des miroirs s'est effectuée par autocollimation, c'est-à-dire que le réticule du tachéomètre a été mis en coïncidence avec son image réfléchi par le miroir (figure 7). La précision a ainsi pu être accrue d'un facteur deux par rapport à des mesures de direction normales. La procédure d'autocollimation a été exécutée à chacun des arrêts du transporteur à bande en tête de puits et au fond.

On peut se représenter le dispositif de mesure retenu comme un cheminement polygonal rattaché au niveau de la tête et du fond du puits au réseau du tunnel. Chaque angle du polygone est déterminé pour partie par autocollimation, par moitié au niveau supérieur et au niveau inférieur, l'angle de rotation entre la tête et le fond du puits étant fourni par le système inertiel (figure 8).

Deux séries de mesures comportant chacune cinq allers et retours ont pu être effectuées en avril 2004 et en janvier 2005 à des périodes en lesquelles le chantier était à l'arrêt.

■ Exploitation et résultats

L'exploitation des mesures inertielles est complexe et s'effectue en plusieurs étapes. Elle est décrite en détail dans [Neuhierl 2005]. Les deux séries de mesures ont fait l'objet d'exploitations séparées. La moyenne des trajets de mesure et la combinaison avec les mesures par autocollimation ont mis en lumière, pour les deux campagnes de mesure, un écart en direction entre la tête et le fond du puits. La précision interne de cette méthode de transfert de la direction, calculée à partir de tous les trajets de mesure, s'établit à 1,5 mgon.

La comparaison avec le réseau du tunnel reposant sur les mesures gyroscopiques fait apparaître un écart de +0,7 mgon

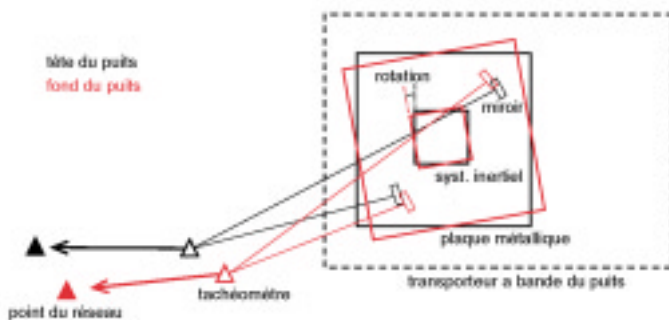


Figure 8. Principe des mesures inertielles

pour la première série de mesures et de +3,7 mgon pour la deuxième série, soit une valeur moyenne de +2,2 mgon. Il résulte des tests statistiques qu'aucune valeur de correction ne peut en être déduite pour les mesures gyroscopiques. Cependant, les mesures inertielles ont indéniablement rempli la mission qui leur était assignée : servir de méthode de contrôle indépendante et accroître le niveau de fiabilité. La technique de mesure inertielle présente en outre la particularité d'être moins soumise à l'influence de la déviation de la verticale que la technique de mesure gyroscopique. Enfin, la précision de la méthode, estimée à environ 1,5 mgon, est du même ordre de grandeur que celle fournie par le gyroscope (1,3 mgon). ●

Références bibliographiques

RYF, A.; NEUHIERL, T., SCHÄTTI, I. [2005]: Implanter AlpTransit: Les puits de Sedrun. Revue TRACÉS, 19/05.

NEUHIERL, T. [2005] : Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation. Thèse de doctorat, TU Munich.

SCHÄTTI, I.; RYF, A. [2004] : Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. Géomatique Suisse, 7/2004.

Contacts

Adrian RYF, ing. dipl. EPF Zurich
Institut de géodésie et de photogrammétrie
ETH Hönggerberg, CH – 8093 Zurich
adrian.ryf@geod.baug.ethz.ch

Theresa NEUHIERL, ing. dipl. TU Munich
Lehrstuhl für Geodäsie, Technische Universität München
Arcisstrasse 21, D – 80290 München

Ivo SCHÄTTI, ingl. dipl. EPF Zurich
Grünenfelder und Partner AG
Denter Tumas 6, CH – 7013 Domat/Ems

ABSTRACT

AlpTransit Gotthard is creating a flat rail link for future travel through the Alps. At the heart of the new transalpine rail route is the world's longest tunnel – the 57 km long Gotthard Base Tunnel. In Sedrun in the middle of the Alps the construction site is accessed through two 800 m deep shafts, representing a big challenge for all parties involved in the realization of this project.

The transfer of the position in the shafts was done optically as well as mechanically. For the first time in the world, inertial measurements were used to control the gyroscopic measurements for the transfer of the orientation. With the application of modern methods and instruments the required breakthrough results can be guaranteed.