**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:** 104 (2006)

**Heft:** 6: Geomatiktage Luzern = Journées de la géomatique Lucerne

**Artikel:** AlpTransit Sedrun : Weltpremiere mit inertialer Messtechnik

**Autor:** Neuhierl, Theresa / Ryf, Adrian / Wunderlich, Thomas

**DOI:** https://doi.org/10.5169/seals-236333

**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:** 09.07.2025

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

# AlpTransit Sedrun: Weltpremiere mit inertialer Messtechnik

Im Zwischenangriff Sedrun des 57 km langen Gotthard-Basistunnels des Projektes AlpTransit erfolgen die Vortriebsarbeiten nach Norden und Süden vom Fuss zweier 800 m tiefer Schächte aus. Die Positions-, Höhen- und Richtungsübertragung von der Kaverne am Schachtkopf hinunter auf das Tunnelniveau wird von den Vermessungsfachleuten mit möglichst unterschiedlichen und unabhängigen Methoden realisiert, um die geforderte Genauigkeit und Zuverlässigkeit zu garantieren. Der vorliegende Bericht beschreibt die Richtungsübertragung mit inertialer Messtechnik, eine Weltpremiere in der Tunnelvermessung.

*Au point d'attaque intermédiaire de Sedrun du tunnel de base du Saint-Gothard, d'une longueur 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, chacun d'une profondeur de 800 m. Le transfert de la planimétrie, de l'altimétrie et de la direction de la caverne creusée en tête des puits jusqu'au niveau inférieur, celui du tunnel, est réalisé par des professionnels de la mensuration qui recourent à des méthodes si possible différentes et indépendantes les unes des autres pour garantir le respect des exigences imposées en matière de précision et de fiabilité. Le rapport décrit le transfert de la direction à l'aide de mesures inertielles, une première mondiale dans le domaine des travaux de topographie pour un tunnel.*

Nell'attacco intermedio di Sedrun della galleria di base del San Gottardo del progetto AlpTransit, lunga 57 km, l'avanzamento in direzione nord e sud avviene dal piede di due pozzi profondi 800 m. Per trasferire la posizione, il dislivello e la direzione dalla caverna alla testa dei pozzi al piede al livello della futura galleria, gli ingegneri di misurazione adoperano dei metodi più differenti ed indipendenti possibili per garantire la precisione e l'affidabilità richiesta. Il rapporto descrive il trasferimento della direzione mediante misurazioni inerziali, una prima mondiale nel campo delle misurazioni in galleria.

*T. Neuhierl, A. Ryf, T. Wunderlich, H. Ingensand*

## 1. Einleitung

Von den Herausforderungen an die Geodäten beim Bau des 57 km langen Gotthard-Basistunnels war schon verschiedentlich die Rede, unter anderem auch in der vorliegenden Fachzeitschrift. Die komplexen Verhältnisse beim Zwischenangriff Sedrun verlangen von den Vermessungsfachleuten innovative Lösungen. Nur so kann das hochgesteckte Ziel, jede Messung und jede Messmethode durch möglichst unabhängige Elemente und Messabläufe zu kontrollieren, erfüllt werden.

Für die Koordinatenübertragung vom Schachtkopf in die unterirdische Multifunktionsstelle drängten sich schon früh die mechanische und die optische Lotung auf. Die hohe Übereinstimmung der Resultate einer jeweils optischen und mechanischen Lotung im Schacht I im Jahre 2002 sowie einer optischen Lotung im Schacht II im Jahre 2004 ergaben präzise Koordinaten am Schachtfuss. Vertikale elektronische Distanzmessungen von unten nach oben lieferten bei dieser Gelegenheit eine zuverlässige Höhenübertragung. Siehe dazu [Schätti, Ryf, 2004].
Für die Richtungsübertragung stand lange Zeit der Präzisionsvermessungskreisel allein im Vordergrund. Messungen mit Vermessungskreiseln sind jedoch von der

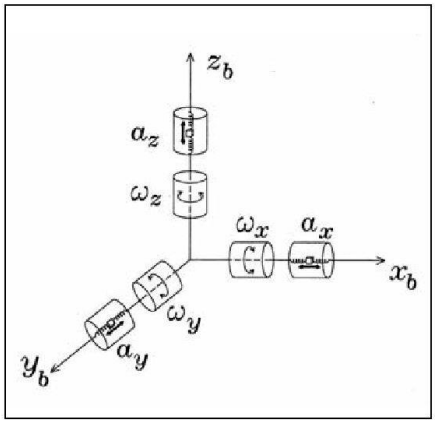


Abb. 1: Prinzip eines inertialen Sensors (Grafik: Karl Foppe).

Kenntnis der lokalen Lotabweichung, bzw. der Lotabweichungsdifferenz im Schacht von Sedrun abhängig. Eine unabhängige Kontrollmethode war Gegenstand einer Vorstudie zur Risikominimierung, wobei eine Richtungsübertragung mit polarisiertem Licht ebenso geprüft wurde wie Doppellotungen im Hauptschacht und später in zwei Schächten. Der Schacht II wurde jedoch nach baulichen Gesichtspunkten errichtet, und geodätische Bedürfnisse mussten zurückstehen. Die Doppellotung in einem einzigen Schacht mit 8 m Durchmesser erfüllte die Forderungen einer Richtungsübertragung mit einer Genauigkeit von 1.5 mgon eindeutig nicht und es zeigte sich schnell, dass die Distanz der beiden Schächte von lediglich 38 m ebenso wenig für eine Richtungsangabe in der Schachtfusskaverne genügte. Zu den Abklärungen gehörten auch Präanalysen mit aufwändigen 3D-Schachtnetzen, die gleichzeitig der Positions- und Richtungsübertragung hätten dienen können. Die ungünstige Varianzfortpflanzung zeigte, dass sich der enorme bauliche Aufwand zur Einrichtung solcher Netze nie lohnen würde. Als einzige unabhängige Alternative zur Kreiselmessung wurde die Richtungsübertragung mittels inertialer Messtechnik weiterverfolgt.
Zwei in Zusammenarbeit der Technischen Universität (TU) München und der ETH Zürich im Schacht Sedrun durchgeführte Messkampagnen bestätigten das grosse Potenzial dieser Methode.

Abb. 2: Autokollimationsokular von Leica.

## 2. Messtechnik

### 2.1 Inertiale Messtechnik

Mit einem Inertialmesssystem (Inertial Measurement Unit, IMU) können Translationen und Rotationen in und um jeweils drei Achsrichtungen erfasst werden. Die dazu notwendigen Sensoren sind je drei senkrecht zueinander montierte Beschleunigungsmesser und drei Kreisel (Abb. 1). Aus den Aufzeichnungen der Beschleunigungsmesser kann nach dem zweiten Newtonschen Axiom auf die Bewegung geschlossen werden. Durch zweifache Integration wird aus den Beschleunigungswerten der zurückgelegte Weg berechnet. Anhand der drei orthogonalen Kreisel, koaxial zu den Beschleunigungsmessern angeordnet, kann die Ausrichtung im Raum und damit der Betrag der Beschleunigungen bestimmt und korrigiert werden. Dies erfolgt in zeitlich kurzen Abschnitten. Ist die Abtastfrequenz entsprechend hoch, so handelt es sich um infinitesimal kleine Koordinatenunterschiede, die aufsummiert werden können. Daraus ergibt sich die von der IMU zurückgelegte Trajektorie.

Durch äussere und innere Störungen entstehen Sensordriften. Sie äussern sich durch ein Hin- und Herwandern des Ausgabesignals um seine Sollkennlinie. Sie sind temperaturabhängig und können sich mit jedem Einschaltvorgang ändern. Diese Driften können nur schwer rechnerisch berücksichtigt werden, da sie keiner Systematik unterliegen. Eine Möglichkeit der Modellierung ist aber das so genannte Zero Velocity Update (ZUPT). Dabei wird das Driftverhalten der Sensoren in der Ruhelage, d.h. bei Geschwindigkeit = Null und bei Drehrate = Null erfasst. In Sedrun wurde eine möglichst kurze Fahrzeit der Schachtförderanlage zur besseren Modellierung dieser Driften angestrebt. Kann für eine Koordinatenübertragung mit einer IMU über 800 m eine Genauigkeit von ca. 0.5 m erwartet werden, ist für die in Sedrun durchgeführten Messungen vor allem die Genauigkeit der Rotation um die z-Achse $\omega_z$ von Interesse, da der Schacht senkrecht angeordnet ist. Bei Laserkreiseln ist mit Driften von 0.002°/Stunde zu rechnen, ihre Auflösung liegt bei 1", also etwa 0.3 mgon.

### 2.2 Autokollimation

Zur Richtungsankopplung der IMU an das Netz im Schachtkopf und der Schachtsohle wurde das aus der industriellen Messtechnik bekannte Verfahren der Autokollimation verwendet. Die Autokollimation, wie auch die Kollimation, ist ein optisches Messverfahren im strengparallelen Strahlengang. Werden die Zielstrahlen eines auf unendlich fokussierten Theodolitfernrohrs mit beleuchtetem Fadenkreuz durch einen im Strahlengang stehenden Spiegel in sich selbst reflektiert, wird von Autokollimation gesprochen. Hierzu wird ein so genanntes Autokollimationsokular aufgesetzt (Abb. 2), bei dem das Fadenkreuz von hinten durch eine Lichtquelle beleuchtet wird. Zielt man damit auf einen Autokollimationsspiegel, so kann das «echte» Fadenkreuz durch Drehen der Feintriebe des Theodolits mit seinem Spiegelbild koinzidiert werden. Wenn die beiden Fadenkreuze zur Deckung gebracht sind, steht der Autokollimationsspiegel senkrecht zur Zielachse und die beiden Zielstrahlen zum und vom Autokollimationsspiegel sind kollinear. Dieses Messverfahren ist sehr genau, da eine Winkeländerung $\delta$ die doppelte Messgrösse von $2\delta$ bewirkt. Wegen der Parallelität der Zielstrahlen und der Rechtwinkligkeit ist die Autokollimation frei von Zentrierungsabweichungen.

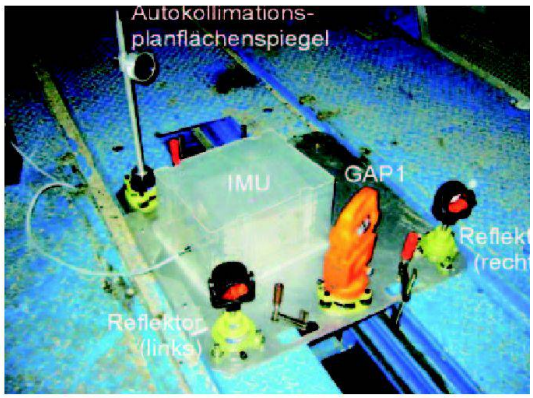


Abb. 3: Montageplatte mit IMU in der Schachtförderanlage.

## 3. Messanordnung in Sedrun

Die doppelstöckige Schachtförderanlage im Schacht I in Sedrun spielte die zentrale Rolle bei den Messungen. Auf einer im unteren Stockwerk der Anlage am Boden zwischen den Gleisen festgeschraubten Montageplatte waren die IMU, ein Planflächenspiegel, ein Autokollimationsprisma GAP1 der Firma Wild Heerbrugg und zwei Reflektoren befestigt (Abb. 3). Je ein unmittelbar vor dem Tor der Förderanlage unten und oben platzierter Theodolit diente der Richtungsabnahme vom Spiegel und vom GAP1 mittels Autokollimation und den Anschlussmessungen zu Fernzielen des Tunnelnetzes. Die Standpunkte der beiden Theodolite wurden vor den Messungen gegenüber dem Tunnelnetz bestimmt und nach den Messungen überprüft. Zusätzlich erfolgte auch eine Einmessung der Montageplatte über die beiden Reflektoren.

Die Einrichtung der beiden Standpunkte gestaltete sich nicht einfach, da die Platzverhältnisse vor der Förderanlage beschränkt sind und der Boden nur teilweise betoniert und damit stabil genug für eine sichere Instrumentenaufstellung ist. Um oben und unten die rasche Autokollimation auf die Spiegel auf der Montageplatte sicherzustellen, müssen die Geometrien der Strahlengänge vom Theodolit zum Spiegel oben und unten möglichst parallel, bzw. die Standpunkte und Höhendifferenzen relativ zur Montageplatte oben und unten praktisch identisch sein.

Je ein Anschluss-Autokollimationsspiegel (Abb. 4) oben und unten diente der Kontrolle der Autokollimationsmessungen. Diese Anordnung wurde gewählt, um ein Umfokussieren während der Richtungsübernahme vom Inertialsystem zu vermeiden, da die Fernziele in Distanzen zwischen 110 m und 360 m liegen und bei den eingesetzten Tachymeterfernrohren die Unendlich-Einstellung erst bei ca. 350 m eintritt.

Die Richtungsübertragung erfolgte ähnlich wie bei einem Polygonzug, wobei einer der «Polygonwinkel» mit inertialer Messtechnik und die weiteren Winkel jeweils durch eine Richtung mit Autokollimation und ein Fernziel bestimmt wurden (Abb. 4). Am Schachtkopf (Index o in der Abbildung) wurde die Richtung zunächst vom Fernziel auf den Anschluss-Spiegel übertragen. Von dort wurde der Brechungswinkel mit Hilfe der Autokollimation zur Montageplatte in der Förderanlage gemessen. Anschliessend fuhr die Förderanlage zusammen mit der Montageplatte an den Schachtfuss. Unten (Index u in der Abbildung) wurde die Richtung analog wieder abgenommen und auf das Fernziel übertragen. Die Messung der Richtungsänderung während der Fahrt geschah mit der IMU. Nach der Rückfahrt der Schachtförderanlage zum Schachtkopf wurde eine komplette Messfahrt, bestehend aus Hin- und Rückweg, mit einer weiteren Autokollimation abgeschlossen.

Durch die Ab- und Auffahrt entsteht eine «Zwei-Lagen-Messung», welche die Minimierung systematischer und zeitproportionaler Fehler erlaubt. Fehlereinflüsse, welche durch die umgekehrte Bewegungsrichtung entgegengesetzt wirken, heben sich wegen ihres unterschiedlichen Vorzeichens aufgrund der Integration der Fehlereinflüsse über die Zeit auf.

## 4. Instrumente

Die Messungen wurden mit einem Inertialmesssystem der Firma iMAR durchgeführt, das dem Lehrstuhl für Geodäsie und dem Institut für Astronomische und Physikalische Geodäsie der TU München gehört. Das System besteht aus drei Beschleunigungsmessern vom Typ QA2000 von Honeywell und drei Ringlasern vom Typ GG1320 ebenfalls von Honeywell. Eine interne Recheneinheit startet die Beschleunigungsmesser und Kreisel und speichert die Messdaten auf einer Flashdisk mit einer Speicherkapazität von drei GByte.

Bei den Ringlasern handelt es sich um optische Kreisel, die keine rotierenden Bauteile besitzen, sondern den so genannten Sagnac-Effekt nutzen. Dabei durchläuft ein Laserstrahl einen Glasblock in zwei gegenläufigen Richtungen und wird mit mehreren Spiegeln innerhalb des Glasblocks gehalten. Die Umlaufzeit ist im unbewegten Zustand für beide Richtungen gleich. Rotiert der Lichtleiter, muss der gegen die Rotationsrichtung laufende Laserstrahl einen weiteren Weg zurücklegen, wohingegen sich der Weg für den Laserstrahl in Rotationsrichtung verkürzt. Die beiden Laserstrahlen werden nach ihrem Umlauf überlagert. Aus dem Interferenzmuster kann auf die Drehrate geschlossen werden. Der Honeywell-Ringlaser gehört zurzeit zu den genauesten Laserkreiseln.

Die Einmessung der Standpunkte für die Autokollimation gegenüber dem Tunnelnetz erfolgte mit Tachymetern des Typs Leica TCA1100 unter Verwendung der automatischen Zielerkennung ATR. Für die Autokollimation kamen Theodolite des Typs Leica T3000, bzw. TC2002 zum Einsatz. Deren Feintriebe erlauben eine wesentlich präzisere manuelle Anzielung als moderne, für den vorwiegend automatischen Messmodus gebaute Instrumente mit Rutschkupplungen. Die Fernziele wurden mit Prismen ausgestattet, die durch Dioden beleuchtet waren, damit sie im dunklen Tunnel angezielt werden konnten.

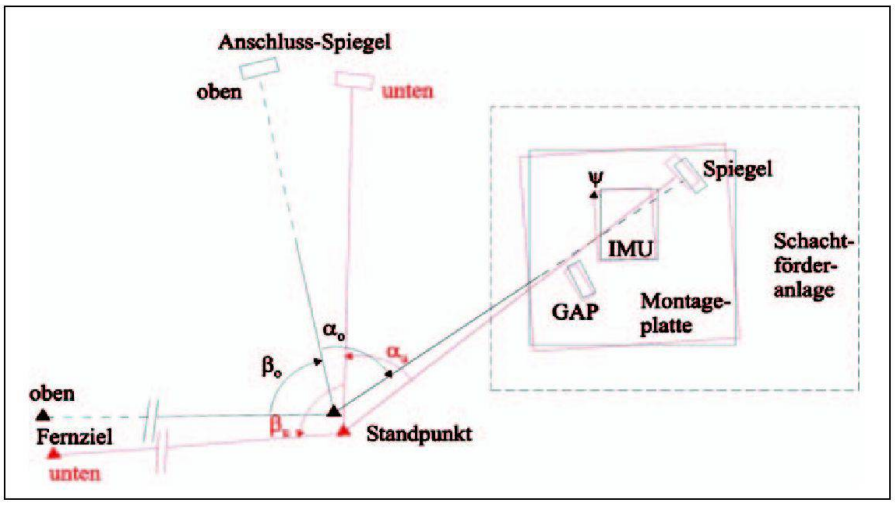


Abb. 4: Schematischer Ablauf der Messungen.

## 5. Messkampagnen

Den Messungen in Sedrun gingen verschiedene Tests im Messlabor und im Lift des Olympiaturms in München voraus. Die Messfahrten von jeweils 40 s Dauer im 180 m hohen Lift ergaben eine Genauigkeit der IMU von ca. 1 mgon und bestätigten damit die Machbarkeit einer präzisen Richtungsübertragung. Eine unabhängige Überprüfung der Richtung am oberen Ende des Liftes scheiterte jedoch wegen der auf den Turm wirkenden Windlasten.

Am 5. April 2004 konnte eine erste Messkampagne in Sedrun durchgeführt werden. Dank der Osterpause bei den Vortriebsarbeiten stand die Schachtförderanlage während eines Tages praktisch ausschliesslich für die Messarbeiten zur Verfügung. Gleichzeitige Personentransporte erlaubten jedoch nur Fahrten mit einer Geschwindigkeit von 12 m/s. Durch das Ein- und Aussteigen der Personen entstanden ausserdem Verzögerungen im «Fahrplan» sowie ein kurzer Zwischenhalt

Abb. 5: Theodolit-Standpunkt in der Schachtfusskaverne.

der Fahrt bevor die Förderanlage definitiv in die für die Autokollimation notwendige Position eingerastet werden konnte. Steuerungsbedingt konnte die Schachtförderanlage nicht direkt in die untere Position eingerastet werden, daher war am Schachtfuss eine Korrekturfahrt notwendig. Im von der Bauleitung zugeteilten Zeitfenster konnten fünf Messfahrten durchgeführt werden. Die guten Resultate und das bei den Arbeiten erkannte Optimierungspotenzial führten bald zur Planung einer weiteren Messkampagne.

Am 9. Januar 2005, kurz vor der Wiederaufnahme der Vortriebsarbeiten nach der Jahresendpause, stellte die örtliche Bauleitung die Schachtförderanlage für eine zweite Messkampagne zur Verfügung. Die Installation der Instrumente konnte dank der Skizzen von der ersten Messung beschleunigt werden und das Instrumentarium und das Zubehör waren optimiert worden. Die Messequipe wurde nahezu verdoppelt, so dass oben und unten je drei Personen zur Verfügung standen. Personentransporte erübrigten sich dadurch und die Schachtförderanlage konnte im Güterbetrieb mit einer Geschwindigkeit von 16 m/s betrieben werden. Die schnelleren Fahrten und das Wegfallen der Einstiegzeiten verkürzten die Messfahrten und verkleinerten die Drift der IMU. Wegen anfänglicher technischer Schwierigkeiten mit der Messausrüstung und einem längeren Ausfall der Schachtförderanlage, während dem die IMU zu stark driftete, standen bei dieser Messkampagne lediglich drei einwandfreie Messfahrten zur Verfügung.

## 6. Resultate

Die Auswertung der Inertialmessungen erfolgte mit der Software KingsPad™, entwickelt am Department of Geomatics Engineering an der Universität Calgary. Für die Beschreibung der notwendigen Rechenschritte sei auf [Neuhierl, 2005] verwiesen.

Die für die Anschlussmessungen an das Tunnelnetz verwendeten Koordinaten beruhen auf Kreiselazimuten, die mit Präzisionsvermessungskreiseln vom Typ GYROMAT 2000 bestimmt wurden. Der Vergleich der Resultate der Inertialmessungen mit den Koordinaten des Tunnelnetzes ergibt damit einen direkten Vergleich der beiden Methoden zur Richtungsübertragung.

Die beiden Inertialmesskampagnen können etwa gleich gewichtet werden. Bei der ersten konnten zwar mehr Messfahrten verwendet werden, die aber langsamer waren, bei der zweiten wurden dafür andere Bedingungen verbessert. Bei der ersten Kampagne resultierte eine Richtungsdifferenz von +0.7 mgon, bei der zweiten eine von +3.7 mgon. Der gewichtete Mittelwert aus beiden Richtungsübertragungen ergibt eine Abweichung von +2.2 mgon vom Tunnelnetz.

Die Genauigkeitsbetrachtungen unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit der IMU, der Zentriergenauigkeiten sowie der Genauigkeit der Autokollimation und der Anschlussmessungen ergeben eine Genauigkeit der Richtungsübertragung von 1.5 mgon. Die Genauigkeit des Messverfahrens liegt somit in einer ähnlichen Grössenordnung wie die des GYROMAT 2000. Die Differenz von +2.2 mgon ist nicht signifikant, ein Korrekturwert kann aus der Inertialmessung für das Tunnelnetz nicht abgeleitet werden.

Als unabhängiges Verfahren zur Zuverlässigkeitssteigerung hat sich die Inertialmessung eindeutig bewährt. Damit steht ein unabhängiger Vergleichswert für die Kreiselazimute mit vergleichbarem Genauigkeitsbudget zur Verfügung. Die inertiale Messtechnik wurde im Projekt AlpTransit weltweit erstmals für eine hoch präzise Richtungsübertragung eingesetzt und hat ihre Feuertaufe mit Bravour bestanden.

### Dank

Für die ausgezeichnete Zusammenarbeit und die gute Unterstützung sei an dieser Stelle der AlpTransit Gotthard AG, der örtlichen Bauleitung, dem Konsortium TRANSCO und den Firmen SIEMAG und Grünenfelder und Partner gedankt.

*Literatur:*

Neuhierl, T. [2005]: Eine neue Methode zur Richtungsübertragung durch Koppelung von Inertialmesstechnik und Autokollimation. Dissertation, TU München.

Ryf, A.; Neuhierl, T.; Schätti, I. [2005]: AlpTransit Saint-Gothard: Les exigences imposées aux travaux topographiques sur le tronçon de Sedrun. XYZ, éditée par l'Association Française de Topographie, no. 105, 2005.

Wunderlich, T.; Neuhierl, T. [2005]: Erfahrungen mit einem hochwertigen Inertialmesssystem im ingenieurgeodätischen Einsatz. In: Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2005. Günter Chesi, Thomas Weinold (Hrsg.), Wichmann Verlag, Heidelberg.

Schätti, I.; Ryf, A. [2004]: Hochpräzise Lotung im Schacht Sedrun des Gotthard-Basistunnels. Geomatik Schweiz, 7/2004.

Dr.-Ing. Theresa Neuhierl
Prof. Dr. Thomas Wunderlich
Technische Universität München
Lehrstuhl für Geodäsie
Arcisstrasse 21
DE-80290 München
tneuhierl@web.de
th.wunderlich@bv.tum.de

Adrian Ryf
Prof. Dr. Hilmar Ingensand
ETH Zürich
Institut für Geodäsie und Photogrammetrie
Wolfgang-Pauli-Strasse 15
CH-8093 Zürich
ryf@geod.baug.ethz.ch
ingensand@geod.baug.ethz.ch