



Links

[www.alptransit.ch](http://www.alptransit.ch)  
[www.geo.bv.tum.de](http://www.geo.bv.tum.de)

**Tief im Bauch der Schweizer Alpen** treiben die Bergbauingenieure ihren Tunnelbohrer durch das Gestein. Am Tag schaffen sie rund 20 Meter. 2017 soll der längste Tunnel der Welt in Betrieb gehen. Auf der 57 Kilometer langen Strecke rollen dann täglich 300 Züge



# Wo bitte geht's denn hier zum Tunnel?

Wie finden 1 800 Maulwürfe von fünf Stollen in 2 300 Meter Tiefe unter den Bergspitzen des Gotthard-Massivs zueinander? Professor Wunderlich von der TUM hat die Antwort. Und damit ein Stück Pioniergeschichte der Vermessungstechnik geschrieben



Einspurtunnel Ost: In zwei voneinander getrennten Röhren werden die Züge ab 2017 die Alpen durchqueren



Schachtförderanlage Sedrun: Rund 1800 Mineure arbeiten zur Zeit am Tunnelvortrieb



Vortrieb im Einspurtunnel West: Bergbauingenieure bereiten die nächste Sprengung vor



Einspurtunnel West: Der „Wurm“ bewegt sich im Tunnel und installiert das Innengewölbe

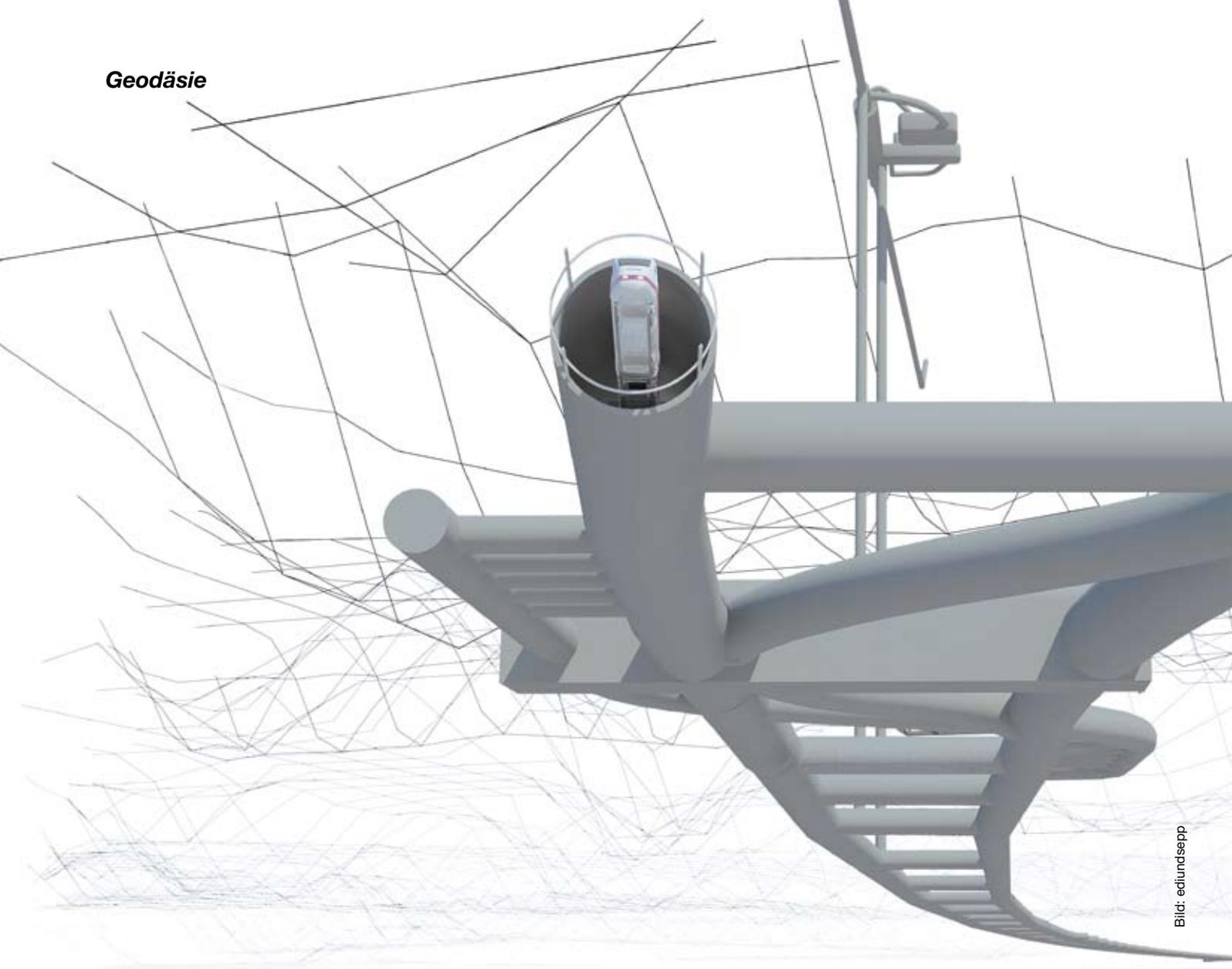


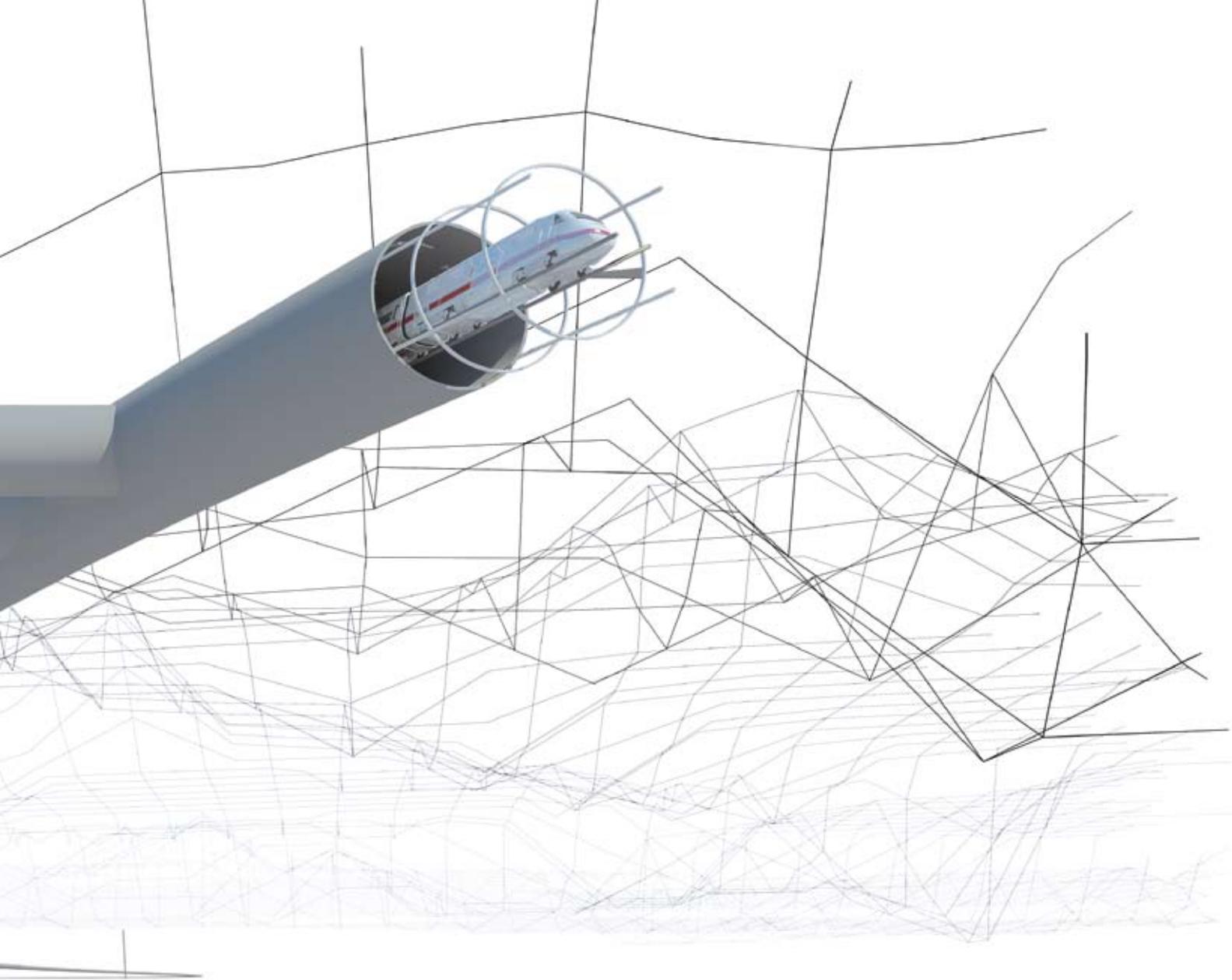
Bild: edlundsapp

**Die Planungs- und Bauzeit des Tunnels** erstreckt sich auf über 25 Jahre. Immer wieder haben sich in der Vergangenheit die Sicherheitsstandards geändert. Knapp zwölf Milliarden Franken dürfte das Gesamtprojekt Gotthard- und Ceneri-Basistunnel letztendlich kosten

**L**autes Dröhnen schmerzt in den Ohren. Der Staub von zermalmtem Gestein liegt in der feuchten Luft. Eine gigantische, fast 400 Meter lange Tunnelbohrmaschine frisst sich durch Granit und Gneis. Knapp 20 Meter pro Tag schaffen die Bauingenieure mit dem Tunnel-Tatzelwurm. Sie bauen den Gotthard-Basistunnel zwischen Erstfeld im Kanton Uri und Bodio im Kanton Tessin. 57 Kilometer ist er lang. Voraussichtlich Ende 2017 wird der längste Eisenbahntunnel der Welt in Betrieb gehen. Nie zuvor wurde eine so lange Verkehrsverbindung in den Tiefen eines Gebirges angelegt. Bis zu 2 300 Meter türmt sich das Gestein über den rund 1 800 Mineuren auf, die sich zurzeit an fünf Baustellen gleichzeitig durch das Massiv kämpfen.

### **57 Kilometer Länge – 25 Zentimeter Abweichung**

Eine besondere Schwierigkeit ist es dabei für die Vortriebsmannschaften, dass sie sich exakt an den dafür vorgesehenen Durchbruchstellen tief im Bauch der Alpen treffen – und nicht aneinander vorbeibohren. Nur rund 25 Zentimeter darf die Querabweichung betragen, die sich bei den Durchschlagsstellen maximal ergeben soll. Diese ehrgeizige Vorgabe stellt die Messtechnik vor große Herausforderungen. Denn in dem Berg funktioniert kein satellitengestütztes Global Positioning System (GPS), so wie es heute jeder Autofahrer nutzt. Die Führung der Tunnelvortriebsmaschinen wird an den Tunnelportalen begonnen und mit Hilfe von Laserstrahlen und modernsten Vermessungsinstrumenten in den Bauch



**Auf der rund 57 Kilometer langen Strecke** verändert sich oftmals das Gestein, durch das sich die Tunnelbohrmaschine wühlt. Doch trotz der unterschiedlichen geologischen Bedingungen darf die Querabweichung von der Bohrrichtung am Ende nur 25 Zentimeter betragen

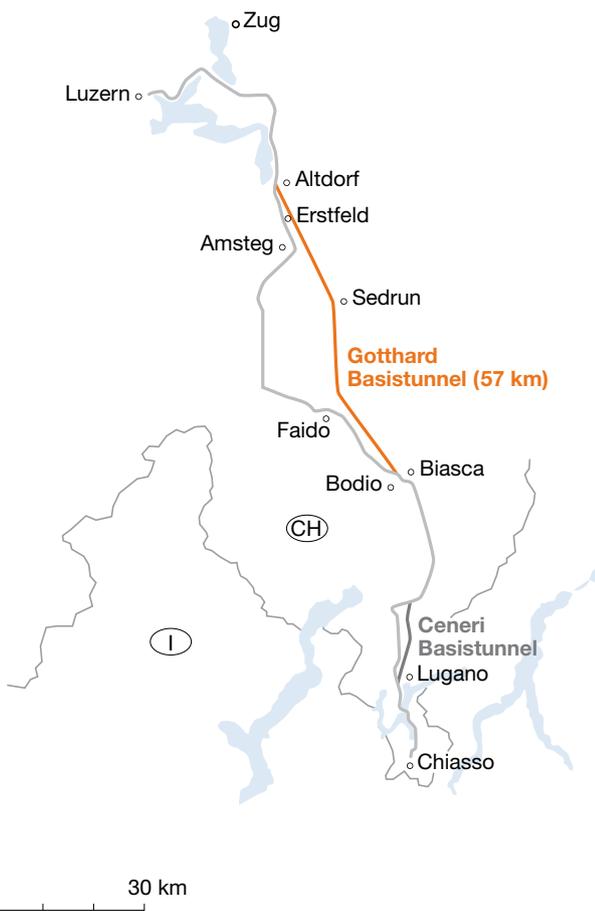
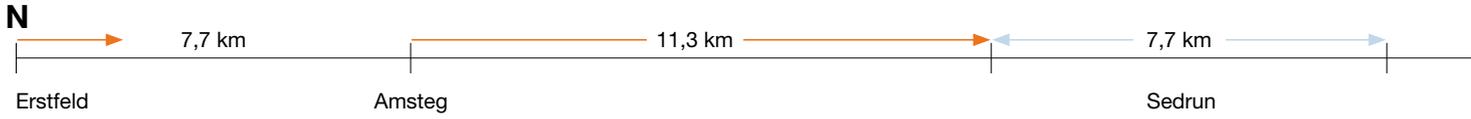
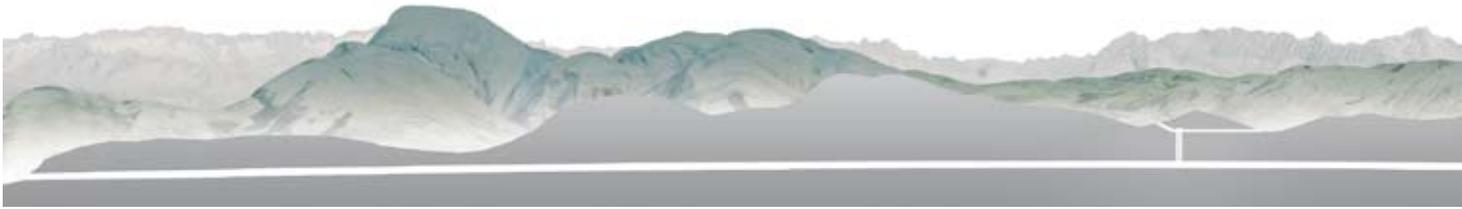
der Alpen übertragen. Doch das ist nur die halbe Miete. An der genauen Absteckung des Tunnels ist nämlich auch ein Team um Professor Thomas Wunderlich vom Lehrstuhl für Geodäsie der Technischen Universität München beteiligt. Die Geodäten haben speziell für den Gotthard-Basistunnel eine weltweit einmalige Messtechnik entwickelt. Mit ihrer neuen Vermessungsmethode haben sie die Anschlagrichtung auf der Sohle des Sedruner Zwischenangriffs verifiziert. Dieser Zwischenangriff ist ein senkrecht gebohrter Versorgungstunnel, den die Bohrmannschaften vom Dach der Alpen in den Berg getrieben haben, um von seiner Sohle aus den eigentlichen Verkehrstunnel anzulegen. Von diesem 800 Meter tiefen Schachtfuß aus wollten die Münchner

Wissenschaftler sicherstellen, dass die Vortriebsmannschaften exakt in der geplanten Richtung zu den gegenläufigen Tunnelvortrieben im Norden und Süden des Gebirgsmassivs fräsen und sprengen.

„Der Gotthard-Tunnel wird nämlich nicht von einem Ende des Gebirgsmassivs zum anderen durchstoßen“, erklärt Thomas Wunderlich in seinem Büro an der TUM in der Arcisstraße. An den Wänden in Wunderlichs Arbeitszimmer stapeln sich Bücher über das Vermessungswesen, aber auch über den Brücken- und den Tunnelbau. Dazwischen liegen Magazine über das Gotthard-Projekt.

„Die gesamte Strecke des neuen Gotthard-Tunnels ist in vier Abschnitte aufgeteilt“, erläutert Wunderlich. Eine Mannschaft bohrt von Süden in den Fels, die zweite ▶

# Geodäsie



von Norden und weitere sechs arbeiten sich von drei Zwischenangriffen aus jeweils nach beiden Seiten durch das Massiv. Für den zentralen Abschnitt haben die Ingenieure den gigantischen Schacht nahe dem 1 700 Einwohner zählenden Alpendorf Sedrun angelegt. Durch diesen Schacht läuft der gesamte Transport zum und vom unterirdischen System.

### Traditionelle Methoden stoßen an Grenzen

„Unsere Aufgabe war es, zu bestätigen, dass sich die Ingenieure der Multifunktionsstelle Sedrun von der Kaverne aus in die exakte Richtung zu den anderen Baustellen vorarbeiten“, erklärt Thomas Wunderlich. An seinem Schreibtisch zeigt er dazu eine Karte mit einem geologischen Querschnitt durch das Alpenmassiv. Zu erkennen sind steile Berge, die sich aus den unterschiedlichsten Gesteinen zusammensetzen, von hartem Granit bis zum weichen Dolomit-Marmor. Am unteren Ende des Profils verläuft der geplante Verkehrstunnel, der aus zwei Röhren besteht. Senkrecht dazu, etwa in der Mitte der Skizze, stößt der Versorgungsschacht Sedrun auf die Neue Europäische Alpentransversale (NEAT).

Sofort nach seiner Fertigstellung wurde durch den Schacht Sedrun von Vermessungsexperten eine Koordinatenübertragung mit optischen und mechanischen Messmethoden durchgeführt.

Ziel war es, für die Vortriebsrichtungen der Zwischenangriffe präzise und kontrollierte Ausgangspunkte am

Grafiken: edlundsepp

**Die Bauabläufe bei einem Tunnelbau** unterliegen wegen der extremen räumlichen Zwänge einer hochkomplizierten Logistik. Der Schacht von Sedrun ist eine Art Hauptschlagader für den Baubetrieb unter Tage – von hier aus werden Mensch und Maschine versorgt.



Foto: Thomas Schäfer



14,2 km



Faido

15,9 km

→ Vortrieb mit Tunnelbohrmaschine  
 ← Sprengung

S

Schachtfuß zu erhalten. Doch für die Orientierung unter Tage stand nur eine bewährte Methode zur Verfügung: die Azimutbestimmung mit nordsuchenden Kreiselinstrumenten. Das System funktioniert ähnlich wie bei einem Spielkreisel, den man um seine senkrechte Achse rotieren lässt. Die Drehrichtung ist aber in der Geodäsie nicht senkrecht, sondern horizontal. Durch die Rotation der Erde um sich selbst, erfährt nun die vororientierte Drehachse des horizontalen Kreisels eine Schwingung, die um die Nordrichtung pendelt. Diese Oszillation kann elektronisch gemessen werden, ihre Mittellage zeigt genau nach Norden.

Doch kein Geodät gibt sich mit nur einer Messung zufrieden. Denn das Erdschwerefeld ist nicht homogen. Das heißt: Nicht überall ist die Erdanziehung gleich stark. Dazu kommt, dass durch die Luftschichtung im Tunnel überall Fehlereinflüsse auf die Messung lauern. Eine Überschreitung des vorgegebenen Durchschlagsfehlers der neuen Alpentransversale aufgrund eines unerkannten Fehlereinflusses im Sedruner Tunnel hätte aber unabsehbare finanzielle Konsequenzen gehabt. So wollten die Verantwortlichen im Jahr 2004 die Messergebnisse noch einmal mit einer vollkommen unabhängigen Methode bestätigt wissen. Sie wandten sich an den Lehrstuhl für Geodäsie der TUM. Wunderlichs wissenschaftliche Mitarbeiterin, Theresa Neuhierl, sollte in ihrer Doktorarbeit eine solche unabhängige Methode entwickeln und in der Praxis am Tunnel testen.

Eine besondere Rolle bei Neuhierls Doktorarbeit spielt der Aufzug im Sedruner Schacht, dessen Bewegung durch vier Führungsseile stabilisiert wird. Während der Fahrt durch den 800 Meter langen Schlund verdreht sich dieser Lift dennoch ganz leicht. Er ist also an der Sohle nicht mehr genauso ausgerichtet, wie am oberen Ende. Über diesen Lift sollte die neue Einmessung der Schachtsohle stattfinden.

### Der Kniff mit dem Fahrstuhl

„Für unsere neuen Messungen haben wir das so genannte Inertialmesssystem verwendet“, erklärt Thomas Wunderlich. Dieses Messsystem (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) kombiniert drei senkrecht zueinander montierte Ringlaser und drei dazugehörige Beschleunigungsmesser. In einem ruhenden Ringlaser laufen zwei Laserstrahlen in entgegengesetzte Richtungen. Auf ihrer Kreisbahn gebändigt werden die Laserstrahlen durch Spiegel. Ihre Umlaufzeiten sind exakt gleich. Wird das Gehäuse jedoch einer Drehung unterworfen, so stellt sich eine messbare Differenz ein, weil dann unterschiedliche Wege durchlaufen werden. Aus diesem sogenannten Sagnac-Effekt kann man die Drehrate ermitteln. Mit drei orthogonal montierten Ringlasern werden so die Verdrehungen gegenüber einem festen Koordinatenrahmen gemessen. Dazu liefern die parallel zu den Achsen der Ringlaser ausgerichteten Beschleunigungsmesser die Verschiebung des Systems in den drei >

Wenn dieser Zugang für die Arbeiten der Vermessungsexperten einen Tag lang exklusiv gesperrt werden soll, muss dies schon Monate vorher bis ins Detail geplant werden – denn die anderen Arbeiten tief unter der Erde dürfen darunter nicht leiden





Foto: © AlpTransit Gotthard AG

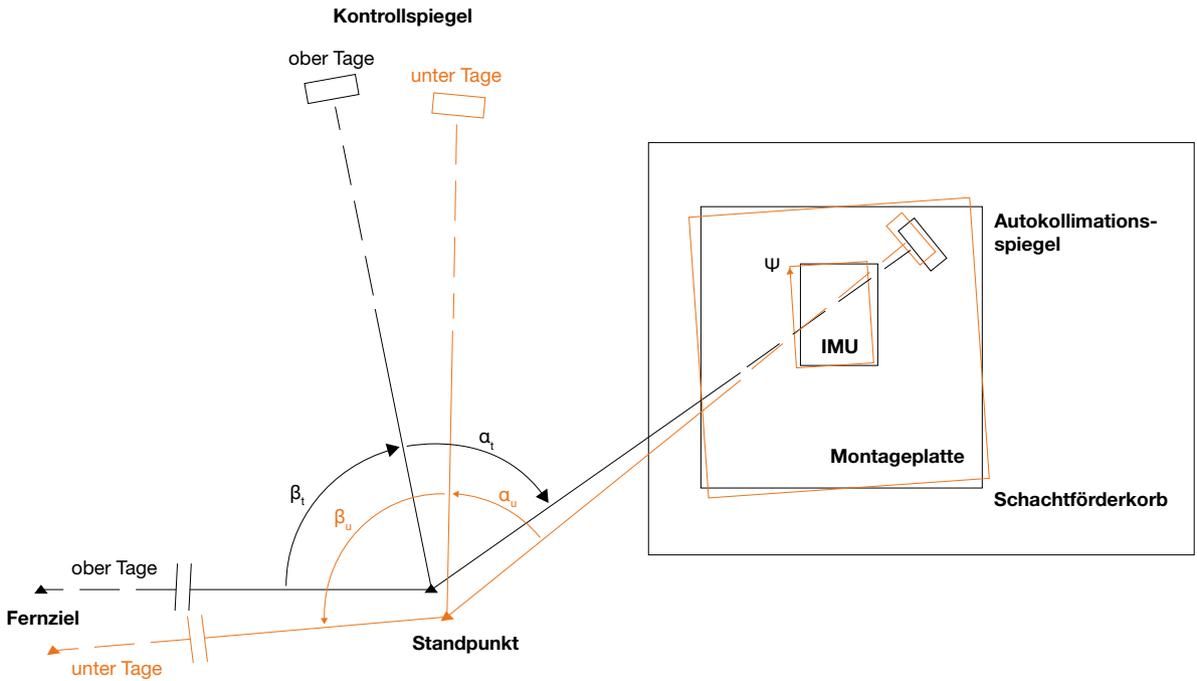
Am oberen Ende des Versorgungstunnels Sedrun lagern die Materialien und warten auf ihren Einsatz unter Tage. Hier werden auch die Bohrgeräte für den Transport in 800 Meter Tiefe vorbereitet. Der Aufzug bringt Mensch und Material mit 16 Meter pro Sekunde abwärts

Der Gotthard-Basistunnel in Zahlen	
Baubeginn	1993
Gesamtlänge des Gotthard- Basistunnels	57 km
Tiefe des Schachtfußes Sedrun	800 Meter
Maximale Querabweichung der Durchbruchstellen	25 cm
Länge mit allen Quer- und Verbindungsstollen insgesamt	153,5 km
Transportleistung	80 Mio. t Güter pro Jahr
Einspurige Tunnelröhren	2
Querstollen	ca. 180
Von aussen zugängliche und klimatisierte Multifunktionsstellen	2
Gesamtverantwortlich	AlpTransit Gotthard AG
Mutmaßliche Gesamtkosten (ohne Ceneri-Basistunnel)	5,15 Milliarden Euro
Reisezeit Strecke Zürich-Mailand	2:40 h
Kabel für Stromversorgung und Datenübertragung	2 800 km
Schienen	228 km
Betonschwellen für den schotterlosen Oberbau	190 000
Züge pro Tag zwischen Zürich oder Basel und Chiasso-Mailand oder Luino-Busto Arsizio/Novara	ca. 300
Fertigstellung	vorauss. Ende 2017

Achsenrichtungen während der Fahrt des Aufzugs. Diese Daten werden später für Korrekturen benötigt. Das Inertialmesssystem ist nicht größer als eine Autobatterie. Zusammen mit Kollegen um Prof. Hilmar Ingensand, dem Leiter der Geodätischen Messtechnik und Ingenieurgeodäsie der ETH Zürich, montierten die Münchner Geodäten die IMU in dem Aufzug. Der Lift fährt mit bis zu 16 Metern pro Sekunde und bewältigt so die Strecke zwischen Sohle und Schachtkopf in rund zwei Minuten. Das fest mit dem Schachtkorb verbundene System erlaubt den Vermessungsexperten die Verdrehung, die dieser zwischen den Haltepunkten erfährt, exakt zu bestimmen. Dazu ist das hohe Tempo des Aufzugs von großem Vorteil, da sich Fehlereinflüsse umso geringer auswirken, je kürzer die Fahrzeit ist. Das Drehratensignal jenes Ringlasers, der nahezu horizontal im Aufzug liegt, liefert den Rohwert der Plattformverdrehung durch den Sedruner Schacht. Dieser Wert wird anschließend durch die Signale der restlichen Sensoren korrigiert.

**Der Tunnelschacht im Fadenkreuz**

Eine besondere Herausforderung für Theresa Neuhiel war die exakte Erfassung der Ausrichtung der IMU am Kopf des Schachts. Die Münchner Geodätin musste ihr Messsystem an das obertägige Tunnelnetz anschließen. Dieses ist zuvor durch hochpräzise geodätische GPS-Messungen bestimmt worden. Anschließend ▷



### Prinzipskizze zur Richtungsübertragung durch den Schacht von Sedrun

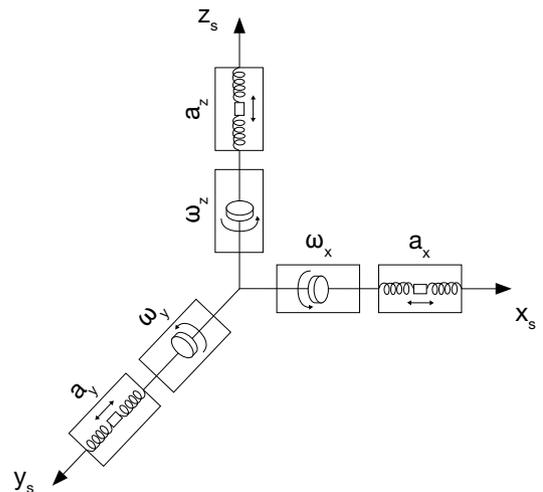
Ober Tage wird von einem Standpunkt vor der Schachtförderanlage die Nordrichtung mit Hilfe paralleler Visuren von einem Fernziel über einen Kontrollspiegel auf eine Montageplatte mit weiteren Spiegeln und der inertialen Messeinheit (IMU) im Schachtförderkorb übertragen (schwarz). Während der Schachtfahrt nach Unter Tage wird von der IMU die Verdrehung  $\psi$  gemessen. Unter Tage werden die Richtungsänderungen auf ein Fernziel übertragen (orange). Damit erhält das Koordinatensystem unter Tage seine Nordrichtung.

### Funktionsweise einer IMU

Ein Inertiales Messsystem (engl.: Inertial Measurement Unit, IMU) besteht aus drei Beschleunigungsmessern und drei Kreiseln, die jeweils parallel und paarweise senkrecht zueinander angeordnet sind.

Newton fand bereits heraus, dass die wirkende Kraft proportional zur Beschleunigung ist. Aus der Beschleunigungsmessung ergibt sich demzufolge das Maß der Bewegung (zurückgelegter Weg). Die Kreisel liefern die Richtungsänderung für die Bewegung. Diese kleinen Wegstrecken und Richtungsänderungen werden in sehr kurzen Zeitabständen gemessen und berechnet. Aufsummiert ergibt sich die Spur der Bewegung in Form von Koordinaten. Im Schacht von Sedrun speicherte die IMU jeweils 100 Werte pro Sekunde.

Die Messwerte werden im IMU-eigenen Koordinatensystem erfasst, jedoch mit Bezug zu einem ruhenden Inertialsystem, das an den Sternen orientiert ist. Es unterliegt also der Erdrotation und der Erdschwerebeschleunigung, die von der Position auf der Erde abhängig sind. Diese Einflüsse werden durch verschiedene Koordinatenumformungen berücksichtigt. Vorhandene Messungenauigkeiten werden durch rechnerische Stützung minimiert.  
Dr. Theresa Neuhierl





Fotos: Adrian Ryf (links), © AlpTransit Gotthard AG (rechts)

Am Schachtkopf Sedrun messen die Münchner Geodäten die Position des Aufzuges ein. Sobald der Aufzug am unteren Ende des Tunnels angekommen ist, hat er sich verdreht (links). Im Rangierbahnhof in der Kaverne findet der gesamte Materialumschlag statt (rechts)

musste die Geodätin alle Daten, die die Orientierung des Stollens am oberen Ende beschreiben, bis an die Sohle des Schachts übertragen. Damit war es ihr möglich, die während des Transports aufgetretenen Verdrehungen am Fuß des Schachts mit den Koordinaten des oberen Endes abzugleichen. Erschwert wurden die Messungen durch die engen Verhältnisse in dem Stollen und die relativ kurze Distanz zum Schacht.

„Aufgrund der beengten Verhältnisse musste man bei der Datenübertragung von einem Ende des Tunnels zum anderen auf optische Methoden der Industrievermessung zurückgreifen“, erläutert Wunderlich und ergänzt: „Wenn man für feinste Richtungsmessungen kein Ziel in großer Entfernung zur Verfügung hat, so simuliert man ein solches durch Autokollimation.“ Dazu wird am Zielobjekt ein Spiegel angebracht. Durch eine spezielle Einrichtung am Messinstrument kann bei unendlich fokussiertem Fernrohr erreicht werden, dass dessen projiziertes Fadenkreuz in sich selbst reflektiert wird. Wenn sich das eigentliche Fadenkreuz und sein vom Planspiegel zurückgeworfenes Bild exakt decken, was Geodäten als Koinzidieren bezeichnen, dann steht die Zielachse des Fernrohres genau senkrecht auf der Fläche des Reflektors. Durch die feste Verbindung von Spiegel, IMU und Schachtkorb kann so die Ausrichtung eingemessen und am anderen Endpunkt des Schachts abgenommen werden.

Dass die Einmessung des Versorgungstunnels erfolgreich verlief, erfuhren die Geodäten am 17. Oktober

2007. An diesem Tag wurde der 17 Kilometer lange Abschnitt Sedrun-Amsteg des Gotthard-Basistunnels mit nur 15 Zentimeter Querabweichung durchgeschlagen. An diesem Tag feierte man auch in München und Zürich, denn die geodätische Kooperation von Forschern der TUM und der ETH Zürich hat einen entscheidenden Teil zu diesem Erfolg beigetragen.

### Üben am Olympiaturm: Der Brenner wartet!

Dass die neue Messmethode letztendlich so hervorragend funktionierte, hatte sie nicht zuletzt der akribischen Vorbereitung in München zu verdanken. Man war für alle Eventualitäten gerüstet. Denn bevor die Münchner Geodäten in die Schweiz fuhren, konnten sie ihre Messungen durch ausgiebige Tests im Betriebsaufzug des Olympiaturms vorbereiten.

„Mit unseren Ergebnissen aus der Kombination von Inertialen Messsystem und Autokollimation konnten wir sehr genau und unabhängig von der zuvor angewandten Messmethode die Orientierung des Sedruner Tunnels überprüfen“, erklärt Professor Thomas Wunderlich. „Jetzt wollen wir das System optimieren, um es als generelles Prüfinstrument für ähnliche Bauprojekte zu etablieren“, sagt er. Dabei hat der Geodät schon eine konkrete Vorstellung, wo die Münchner Messmethode in den Alpen wieder zum Einsatz kommen könnte. „Der Brenner-Basistunnel wartet: Mit drei Zwischenangriffen über tiefe Schächte!“ sagt er. Und lacht dabei.

Thorsten Naeser