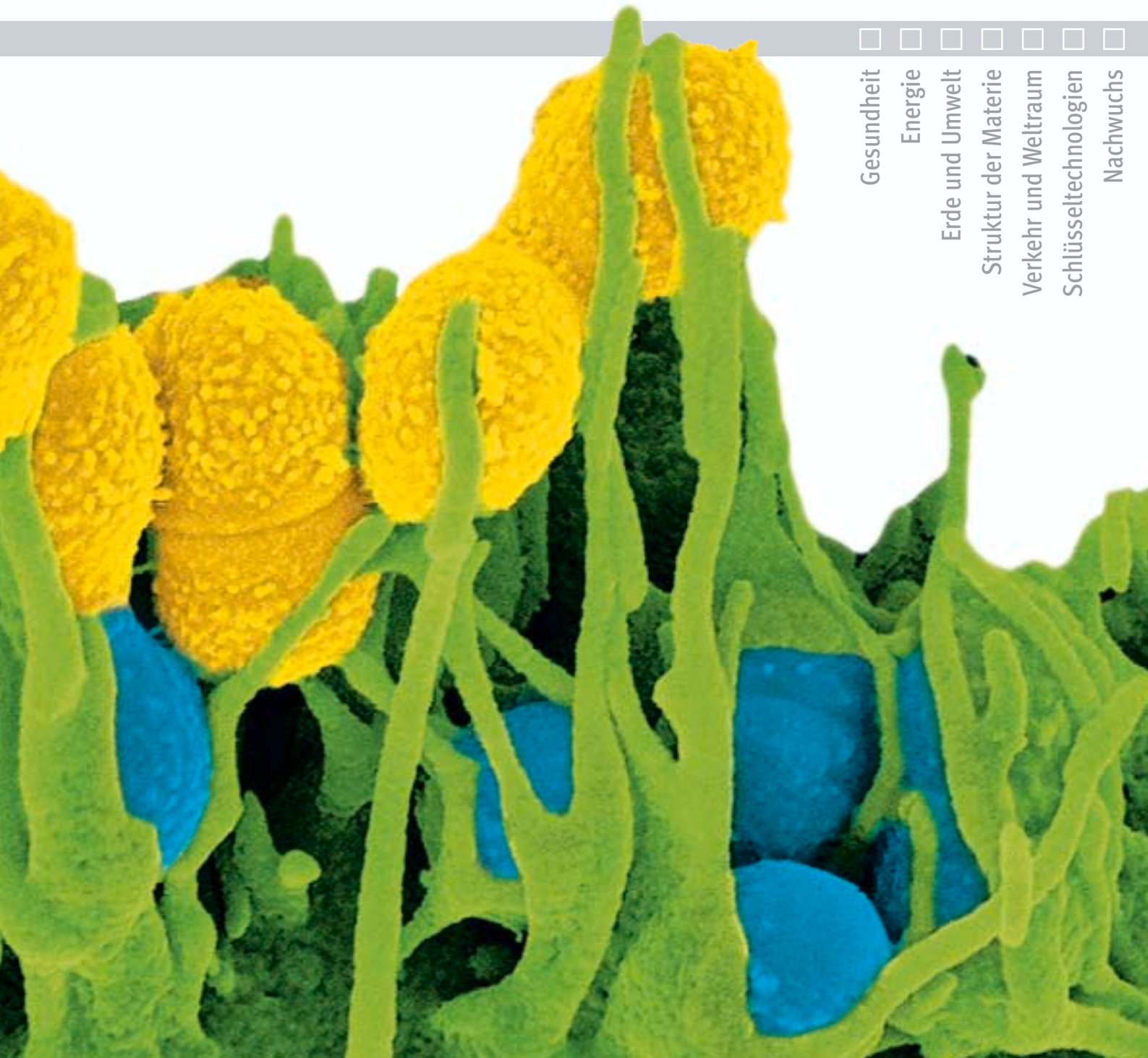


Komplexe Systeme verstehen



- Gesundheit
- Energie
- Erde und Umwelt
- Struktur der Materie
- Verkehr und Weltraum
- Schlüsseltechnologien
- Nachwuchs



Weiter sehen als der Tunnel reicht

Beim Tunnelbau im Gotthard-Massiv wird ein neues Verfahren der seismischen Vorauserkundung eingesetzt

Ein Beitrag aus dem GeoForschungsZentrum in Potsdam

Wie ein Gebirge geologisch und geotechnisch beschaffen ist: Dies zu prognostizieren und während des Baus kontinuierlich zu erkunden, ist für Tunnelbauer extrem wichtig. Das gilt auch für das derzeit ehrgeizigste Tunnelprojekt in den Alpen – den neuen Gotthard-Basistunnel. Im Jahr 2015 soll der mit 57 Kilometern längste Eisenbahntunnel der Welt fertig sein. Mit am Bau beteiligt sind Forscher des GeoForschungsZentrums Potsdam. Sie testen im Gotthard Massiv ein revolutionäres Verfahren für seismische Messungen.

Ein pneumatischer Impuls-Hammer wird mit Hilfe eines Kleinbaggers in die Tunnelwand eingesetzt.

Entwurf, Ausschreibung, Bauweise und Sicherheit beim Bau eines Tunnels hängen entscheidend von dem vorhergesagten Gebirgsmodell ab. Schon vor Baubeginn müssen umfangreiche Informationen gesammelt werden, um die optimale Trassenführung zu finden. Aber auch während des Vortriebs kann man das Gebirgsmodell ständig verbessern, denn mit dem Ausbruch der Gesteine werden permanent neue geologische und geotechnische Informationen verfügbar. So lassen sich die Gebirgsenschaften der jeweils nächsten Ausbruchsabschnitte immer realistischer vorhersagen. Heute vertrauen Ingenieure dabei vor allem auf seismische Messungen, die ihnen beispielsweise dabei helfen, geologische Störungszonen zu entdecken, die für den Tunnelbau kritisch sind.



Fortsetzung Seite 31

Ingenieurkunst im Tunnelbau

- 1851** Auf Sardinien wird eine auf Schienen geführte **Tunnelbohrmaschine** eingesetzt.
- 1854** In England kommt die erste tragbare **Gesteinsbohrmaschine** mit Dampfantrieb zum Einsatz.
- 1866** In den USA wird eine **Schlagbohrmaschine** mit Druckluftantrieb entwickelt.
- 1868** Die Sprengung mit **Nitroglycerin** revolutioniert den Tunnelbau.
- 1870** In England wird die erste echte **Vollschnittmaschine** eingesetzt. Bei diesem Verfahren wird der Tunnelquerschnitt im Ganzen und nicht in einer Abfolge von Teilausbrüchen herausgesprengt beziehungsweise herausgeschnitten.
- 1872-82** Im Gotthard-Bahntunnel wird erstmals mit **Dynamit** gesprengt.
- ab 1930** Ausbruchsicherung durch **Stahlbögen mit Verzugsblechen**. Hierbei handelt es sich um den Einsatz von Ringen aus Stahl oder parabolförmigen Gewölbebögen, hinter die Stahlschienen gegen das Gebirge gelegt werden. Dadurch wird das Gebirge gestützt und das Herausfallen von Gestein verhindert.
- nach 1945** Ausbruchsicherung durch **Anker**
- ab 1965** **Ausbruchversiegelung** mit Spritzbeton, indem eine vollflächig angebrachte, stahlbewehrte dünne Betonschale wie eine gespannte Haut unter das Gebirge gelegt wird und dessen Kräfte „in Schach“ hält.
- 2000** Erste Testmessungen mit ISIS im Gotthard-Basistunnel

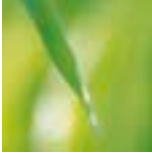
GFZ

120 Jahre Tunnelbau der Gotthardbahn

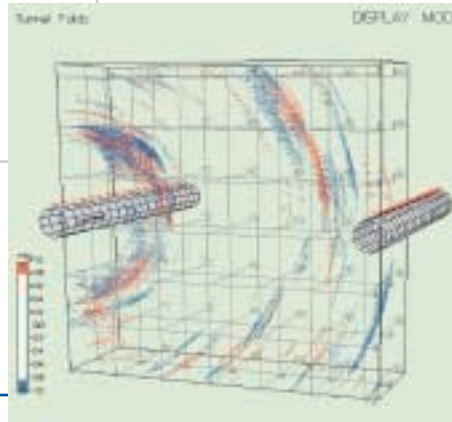
- 1850** Erste Bemühungen des Kantons Uri in der Zentralschweiz um eine alpenquerende Eisenbahn via Luzern und Gotthard
- 1863** Gründung der Gotthardvereinigung aus 15 Kantonen
- 1869** Staatsvertrag zu Bau und Betrieb der Gotthardbahn zwischen der Schweiz und Italien,
1871 Beitritt Deutschlands zum Gotthardvertrag
- 1872** Tunnelbau-Ausschreibung und Baubeginn auf der Nord- und der Südseite
- 1880** Durchschlag des Tunnels am 29. Februar, Gesamtlänge 15 Kilometer,
größte Höhe: 1.162 Meter über dem Meeresboden, maximale Steigung 2,5 Prozent
- 1882** Beginn des Betriebs Immensee-Chiasso der Gotthardbahn
- 1920** Elektrifizierung der Gotthardstrecke
- 1962 bis 1986** Planung und Prüfung verschiedener Trassenvarianten für einen neuen Basistunnel durch den Gotthard
- 1988** Entscheidung für das Neue Eisenbahn Alpentransversalen (NEAT) Konzept mit den Hochgeschwindigkeitstunnelstrecken Gotthard-Ceneri und Lötschberg Basis
- 1993** Erste Sprengung für den Sondierstollen Piora
- 1996** Baubeginn des Gotthard-Basistunnels auf der Alpennordseite mit dem Zugangsstollen und dem ersten Vertikalschacht im Teilabschnitt Sedrun
- 1997** Sondierbohrungen in der Piora-Mulde zur Erkundung der unterirdischen Wasserführung
- 1999** Baubeginn auf der Alpennordseite mit der ersten Sprengung in Sedrun,
2000 Baubeginn auf der Alpensüdseite mit der ersten Sprengung in Bodio
- 2001/02** Seismische Untertagemessungen des GFZ Potsdam im Faido-Zugangstollen und im Piora-Sondierstollen



Geologisches Nord-Süd-Übersichtprofil der Neubautrasse des Gotthard-Basistunnels. Mit 57 Kilometern Länge und teilweise mehr als 2.000 Metern Gebirgsüberlagerung ist er das weltweit größte Untertagebauwerk.



Beispiel für eine reflexionsseismische Abbildung des Gebirges zwischen den Doppelröhren des Gotthard-Basistunnels im Bereich der Multifunktionsstelle Faido. Rote Farbgebung bedeutet Änderungen zu härterem Gestein, während blau die Wechsel zu weicheren Zonen anzeigt.



In der Knautschzone bauen

Auf solche kritischen Zonen zu stoßen, ist gerade in den Alpen nichts Ungewöhnliches. Sie sind nämlich kein homogenes Gebirge, sondern eine komplizierte Knautschzone mit zahllosen Falten und Brüchen. Gesteine unterschiedlicher Festigkeit wechseln häufig. Wissenschaftler und Ingenieure sind mit starken Gebirgsspannungen, mit Klüftung und drohenden Wassereinbrüchen konfrontiert. Eine echte Herausforderung für den Tunnelbau und für das neue seismische Verfahren ISIS, das Wissenschaftler des GeoForschungsZentrums Potsdam entwickelt haben.

Patente Idee für einen Empfänger ...

Hinter ISIS, der Abkürzung für Integriertes Seismisches Imaging System, verbirgt sich ein einzigartiges Abbildungsverfahren für die Untertagesseismik: einfach anzuwenden, kaum zusätzlichen Aufwand erfordernd und den laufenden Baubetrieb nicht störend. Die Potsdamer Forscher haben es zusammen mit einem Schweizer Industriepartner entwickelt. Der Clou der zum Patent angemeldeten Idee besteht darin, die ohnehin für den Bau notwendige Tunnel-Ankerung für seismische Messungen zu verwenden. Die miniaturisierten Empfänger des Systems, die Geophone, stecken in den Spitzen der Anker, die als Sicherungen in den Tunnel eingebaut werden, um den Zusammenhalt des Gesteins und damit die Stabilität des Tunnels zu stärken. Diese Anker werden in bis zu mehrere Meter tiefen Bohrlöchern verklebt, strahlenförmig vom Tunnel ausgehend oder in Richtung des Tunnels nach vorn gerichtet.

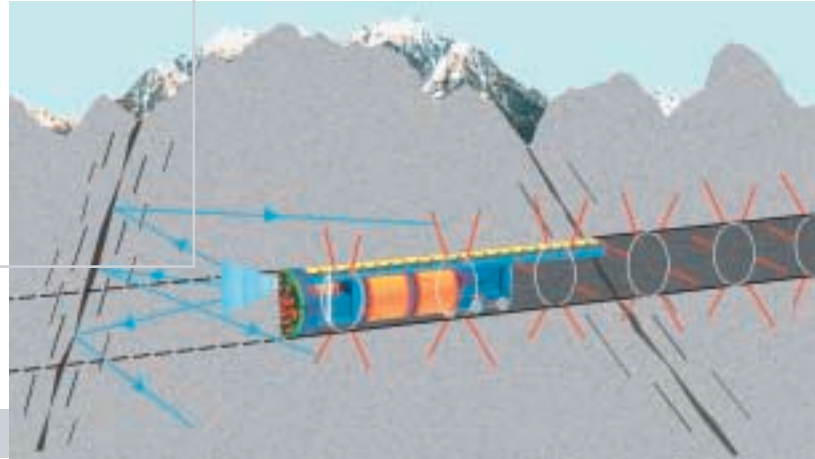
Ein Berg wird durchschallt

Bei der seismischen Durchschallungs-Tomographie werden – vergleichbar mit der medizinischen Ultraschalltomographie – Wellen von verschiedenen Seiten durch das Untersuchungsobjekt geschickt und an anderen Stellen wieder aufgefangen. Durch die physikalischen Eigenschaften des Gesteins werden die sich ausbreitenden Wellen gedämpft, reflektiert und gebeugt. Aus der Analyse der registrierten seismischen Signale können wichtige geometrische und physikalische Parameter des Gesteins ermittelt werden.

Ein einfaches und sehr robustes Verfahren ist die Laufzeit-Tomographie, bei der die Ankunftszeiten der seismischen Wellen analysiert werden. Je nach den elastischen Eigenschaften des Gebirges breiten sich die Erschütterungswellen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten aus. Treffen sie im Gebirge auf Diskontinuitäten wie Formationswechsel oder geologische Störungsflächen, wird die Energie teils reflektiert, teils gebeugt.

Für die Berechnung aussagekräftiger Tomogramme ist eine große Zahl seismischer Sende- und Empfangsstationen nötig. Die von ISIS verwendeten Drei-Komponenten-Geophone ermöglichen die vollständige Erfassung der verschieden schnellen Kompressions- und Scherungswellen, die zusammen eine gute Charakterisierung der physikalischen Gesteinsparameter erlauben. Kompressionswellen schwingen mit hoher Intensität im Gestein, ähnlich wie Schallwellen in der Luft. Dabei stauchen und ziehen sie das Gestein in Ausbreitungsrichtung wie eine Ziehharmonika. Scherwellen dagegen schwingen quer zur Ausbreitungsrichtung und verzerren damit das Gestein in seitlicher Richtung. Das Verhältnis der beiden Wellengeschwindigkeiten zueinander liefert aussagekräftige Informationen, um beim Tunnelvortrieb störungsfreie Gebirgsbereiche von Problemzonen zu unterscheiden. ■

Miniaturisierte Geophone (rot) stecken in den Spitzen der Gebirgsanker, die ohnehin als Sicherungselemente im Tunnel eingebaut werden. Dutzende dieser Geophone registrieren gleichzeitig die Echos derselben Schallquelle. So entsteht ein dreidimensionales Abbild des umgebenden Gesteins, in dem sich Störungszone durch abnehmende Geschwindigkeit der Schallwellen abzeichnen.



GFZ

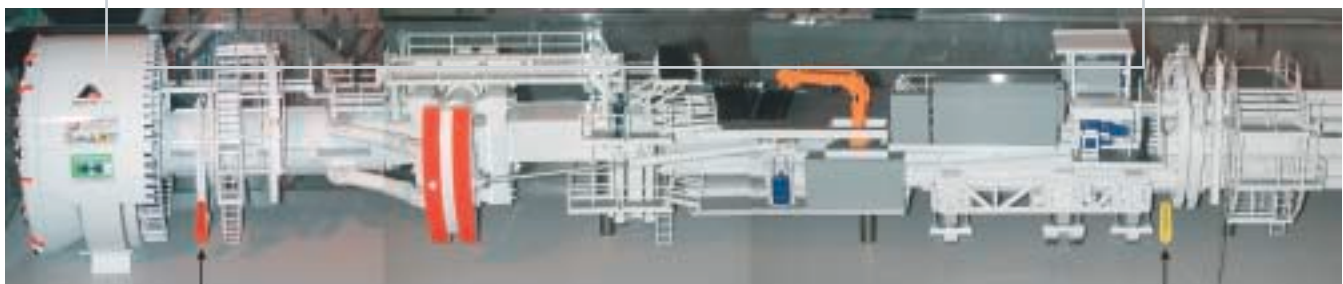
... und einen Sender

Die „Musik“ für diese hochempfindlichen Empfänger erzeugen pneumatische Impulsgeber, die direkt an den Baumaschinen befestigt werden können. Sie erzeugen die Schallwellen, die durch das Gestein gejagt werden und es erkunden. Montiert werden sie zum Beispiel an einen kleinen Bagger oder an eine Tunnelbohrmaschine, sind also schnell positionierbar. Die pneumatischen Hämmer werden gegen die Felswand vorgespannt und elektronisch angesteuert. Ihre Impulse können in Sekundenabständen getaktet werden. Dies ermöglicht den Forschern, die aufgezeichneten Signale übereinander zu stapeln und auf diese Weise Hintergrundrauschen stark zu verringern.

Hightech-Kommunikation mit einem Berg

Die eigens für ISIS entwickelte Software erzeugt aus den Echos, die die Geophone auffangen, also aus den direkt gelaufenen oder gebeugten Wellen, ein dreidimensionales Abbild des Gebirgsinneren. Anomalien beziehungsweise Geschwindigkeitskontraste werden dabei mit den bautechnisch wichtigen geologischen Eigenschaften korreliert. Eine erste Auswertung können die Forscher unmittelbar vor Ort vornehmen, um den Tunnelbauingenieuren eine vorläufige Prognose der zu erwartenden Geologie für den weiteren Vortrieb des Tunnels zu geben.

Tunnelbohrmaschine mit seismischem Erkundungssystem zur Durchschallung der Tunnelwände. Der maximal mögliche Abstand zwischen Sender und Empfänger liegt bei 40 Metern.



GEOPHON

IMPAKTHAMMER



Extra gebohrt: Der Piora-Sondierstollen



In den Gesteinsmassiven entlang des Gotthard-Tunnels rechnen Wissenschaftler und Techniker mit zahlreichen sehr gefährlichen Störzonen. Vor Urzeiten war hier einmal ein sehr flaches Meer, Tetis. Verschiebungen in der Erdkruste und die Kollision von Kontinenten haben zum Aufbruch des Meeresbodens geführt. Die einzelnen Platten wurden verformt und teilweise übereinander verschoben. Manche Schichten des ehemaligen Meeresbodens stehen jetzt fast senkrecht. Lockeres Sediment des einstigen Urmeeres ist zwischen dem Gestein eingebackten, Wasser versickert schnell und sammelt sich in der Tiefe. Davon betroffen ist beispielsweise die Piora-Mulde, durch die die Trasse des Gotthard-Tunnels geführt werden soll.

Vorsorglich wurden hier nicht nur vertikale Probebohrungen gemacht. Zusätzlich haben die Tunnelbauer einen fünfeinhalb Kilometer langen, horizontalen Sondierstollen gebohrt. Er liegt etwa 300 Meter oberhalb der Trasse des Gotthard-Basistunnels und verläuft an seiner tiefsten Stelle unter fast 1.800 Metern Gestein.

Lithologische und tektonische Strukturelemente beeinflussen die Ausbreitung seismischer Wellen in den umgebenden Gesteinszonen ganz erheblich. Deshalb nutzt man seismische Tomographien aus der Nähe des Tunnels zur Charakterisierung der bautechnisch relevanten geologischen Störungszonen. Als Datengrundlage dienen dabei die Laufzeiten der direkten und der gebeugten seismischen Wellen. Da der Tunnel für geologische Untersuchungen direkt zugänglich ist, können unmittelbare Vergleiche zwischen der Geologie und der Seismik zur Überprüfung der Messungen durchgeführt werden.

Die Verteilung der Wellengeschwindigkeiten und deren Verhältnis zueinander bilden gute Indikatoren für die Heterogenität des Gesteins. Anhand der geologischen Kartierungen im Tunnel können die Zonen niedrigerer Geschwindigkeiten als geologische Störungszonen identifiziert werden. In solchen Störzonen müssen die Ingenieure mit ungewollten Mehrausbrüchen und erhöhtem Wasserzufluss rechnen. Gleichbleibende oder zunehmende Geschwindigkeiten im Tunnelnahbereich schließen dagegen das Auftreten von instabilen Bereichen in Vortriebsrichtung für die nächste Arbeitsschicht mit großer Wahrscheinlichkeit aus. ■

ISIS ermöglicht die Vorhersage der mechanischen und hydrologischen Eigenschaften des Gebirges im Vorfeld der Tunnelauffahrung. Die Methode liefert – vorausseilend vor dem Tunnelvortrieb – eine Abbildung des Gebirges im Bereich von einigen zehn bis hundert Metern. Die Abbildungs-Qualität der seismischen Reflexionen wird zwar von den mitregistrierten Störgeräuschen stark beeinflusst. Jedoch nimmt dieses so genannte Rauschen mit zunehmender Entfernung von der Tunneloberfläche schnell ab.

Neues aus dem Erdinneren

Die Bauzeit des Gotthard-Basistunnels beträgt über zehn Jahre, so dass baubegleitend ein sehr umfangreiches, langfristiges Messprogramm erforderlich ist. Gleichzeitig bieten die Vortriebsarbeiten für die Geoforschung einen einzigartigen Zugang zur kristallinen Erdkruste und somit ein ideales Tiefenlabor für Untersuchungen der geologischen Strukturen, Spannungen, Verformungen und Festigkeiten der Gesteine in ihrem natürlichen Verband. ■

Prof. Dr. rer.nat. Günter Borm

Direktor des Aufgabenbereichs „Geomechanik und Geotechnologie“

Dr. rer.nat. Rüdiger Giese

GeoForschungsZentrum Potsdam