

**GEOFORSCHUNGSZENTRUM POTSDAM**  
STIFTUNG DES ÖFFENTLICHEN RECHTS

GeoForschungsZentrum Potsdam

Zweijahresbericht

2000/2001

# Zweijahresbericht

GeoForschungsZentrum  
Potsdam

**2000/2001**

## IMPRESSUM

Herausgeber:  
GeoForschungsZentrum Potsdam (GFZ)  
Stiftung des öffentlichen Rechts  
Telegrafenberg  
14473 Potsdam

Redaktion:  
Dr. Jörn Lauterjung  
Franz Ossing

Layout:  
Otto Grabe (GFZ) & Druckerei Arnold

Druck:  
Druckerei Arnold  
Am Wall 15  
14979 Großbeeren

© GFZ Potsdam 2002

Das GFZ Potsdam ist Mitglied  
der Hermann von Helmholtz-Gemeinschaft  
Deutscher Forschungszentren e.V.

# Seismische Tomographie-Messungen beim Tunnelbau unter Tage in den Schweizer Zentralalpen

Rüdiger Giese, Christian Klose, Peter Otto, Christian Selke und Günter Borm

*Underground seismic investigations have been carried out in the Faido Access Tunnel (ZSF) of the Gotthard Base Tunnel, Switzerland, which is currently under construction. On its length of 2700 m, the ZSF cuts metamorphic rock formations mainly consisting of folded gneisses.*

*Parallel to the excavation works, seismic measurements were carried out every 200 m with the tunnel seismic prediction system ISIS (Integrated Seismic Imaging System) which has been developed by the GeoForschungsZentrum (GFZ). ISIS provides high resolution seismic images via an array of standard anchor rods. These contain 3D-geophones and can routinely be installed during the excavation process. The seismic source is a repetitive pneumatical impact hammer, developed by the GFZ Potsdam as well.*

*During each measurement, seismic energy was recorded from 30 to 60 source points which were distributed at intervals of 1.0 to 1.5 m along the tunnel wall. The shots were recorded with 8 to 10 three-component geophone anchor rods being installed in 2 m deep boreholes at intervals of 9 m.*

*The first arrival times of the compressional and shear waves were used for the tomographic inversions. The two-dimensional velocity models for the seismic wave velocities reveal a disturbed near field reaching 2 to 3m deep into the rock mass. This zone is characterized by strong variations of 3500 to 5800 m/s for compressional wave velocity  $v_p$  and 2000 to 3000 m/s for shear wave velocity  $v_s$ . High velocity zones correspond to quartz inclusions, and low velocities indicate mainly networks of joints. The excavation of the tunnel increases their influence on the velocity field. Beyond the disturbance zone, the variations in seismic velocities are less significantly marked.*

*The most remarkable reflector was a 4 m thick water bearing fault zone which crosses the tunnel nearly perpendicular. Here, the tomographic inversions revealed a significant decrease of  $v_p$  and  $v_s$  a few tenth of meters before reaching this fault zone. The ratio  $v_p/v_s$  increases with the approach to the fault zone due to higher content of pore water in the vicinity of the fault.*

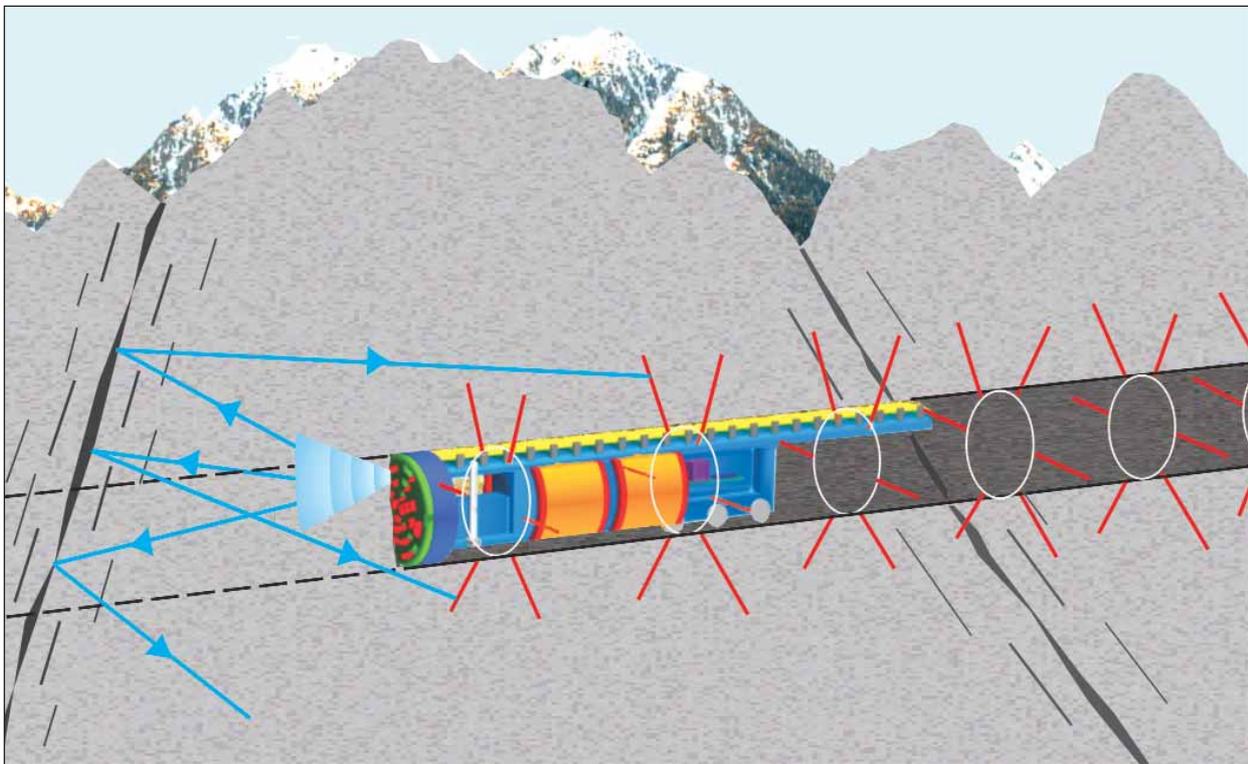
*The analysis of the tomographic inversions along the Faido access tunnel clearly shows the structures of two major fault zones consisting of cataclastic cores surrounded by wide damage zones. This structural feature can be used for the prediction of cataclastic zones ahead of the advancing tunnel face during construction of the Gotthard Base Tunnel.*

Seit März 2000 werden im Zugangsstollen Faido (ZSF) des Gotthard-Basis-Tunnels (GBT) in den Schweizer Zentralalpen seismische Messungen unter Tage mit dem am GFZ Potsdam entwickelten Integrierten Seismischen Imaging System (ISIS) durchgeführt. Der Gotthard-Basis-Tunnel ist z.Zt. im Bau und wird mit zwei 57 km langen, parallelen Röhren und einer Gebirgsüberlagerung von z.T. über 2000 m der längste und tiefste Eisenbahntunnel der Erde sein.

Ziel der Messungen ist die Untersuchung der seismischen Gebirgseigenschaften im jeweiligen Vortriebsbereich des GBT. Von besonderer Bedeutung sind die Detektion und Charakterisierung von Störungszonen, die für den Tunnelbau gefährlich sind. Gleichzeitig sollen die Hardware- und Softwarekomponenten des neuen tunnelseismischen Erkundungssystems auf ihre Einsetzbarkeit im Untertagebau getestet werden.

## Integriertes seismisches Imaging System ISIS

Mit ISIS soll das bestehende Schweizer System *Tunnel Seismic Prediction (TSP)* für die seismische Vorauserkundung beim Tunnelbau im Festgestein verbessert werden. Die neue, zum Patent angemeldete Idee besteht darin, die Tunnel-Ankerung zu verwenden, um damit ein Array von seismischen Empfängern antennenartig (Abb. 1) so zu installieren, dass ein hochauflösendes seismisches Abbild des Gebirges online während der Auffahrung möglich wird (Borm et al., 1999, 2001). Felsanker sind Sicherungs-Elemente zur Erhöhung der Stabilität der Tunnelwand durch Verstärkung des Zusammenhalts (Kohäsion) des Gesteins. Diese Anker werden in bis zu mehreren Meter tiefen Bohrlöchern verklebt und können radial nach außen oder in Richtung des Vortriebes gesetzt werden.



**Abb. 1:** Prinzip einer Tunnelbohrmaschine (TBM) mit integriertem seismischen Vorauserkundungssystem (ISIS)  
Principle of a tunnel boring machine (TBM) with integrated seismic imaging system (ISIS)

Revolutionierend ist das ISIS-Konzept in seiner technisch einfach durchzuführenden Installation vor Ort, die keinen zusätzlichen Aufwand an Arbeit und Kosten bei der Einbringung erfordert. Gleichzeitig führt sie zu einer Risikoverminderung beim Tunnelvortrieb. Als Empfänger dienen miniaturisierte Geophone, die in die Spitzen der Gebirgsanker in Form eines orthogonalen Dreibeins implementiert werden. Gegenüber den bei TSP bisher verwendeten Messaufnehmern haben sie folgende Vorteile:

- 3D-Registrierung der einfallenden seismischen Wellen zur Abbildung der Raumstellungen geologischer Störungsflächen
- geringere Außendurchmesser und höhere Robustheit der elektromagnetischen Sensoren
- automatische Einbringbarkeit mit Großgeräten ohne Behinderung des Baubetriebs
- Einbaumöglichkeit der Meßaufnehmer überall auf der Tunnelwand

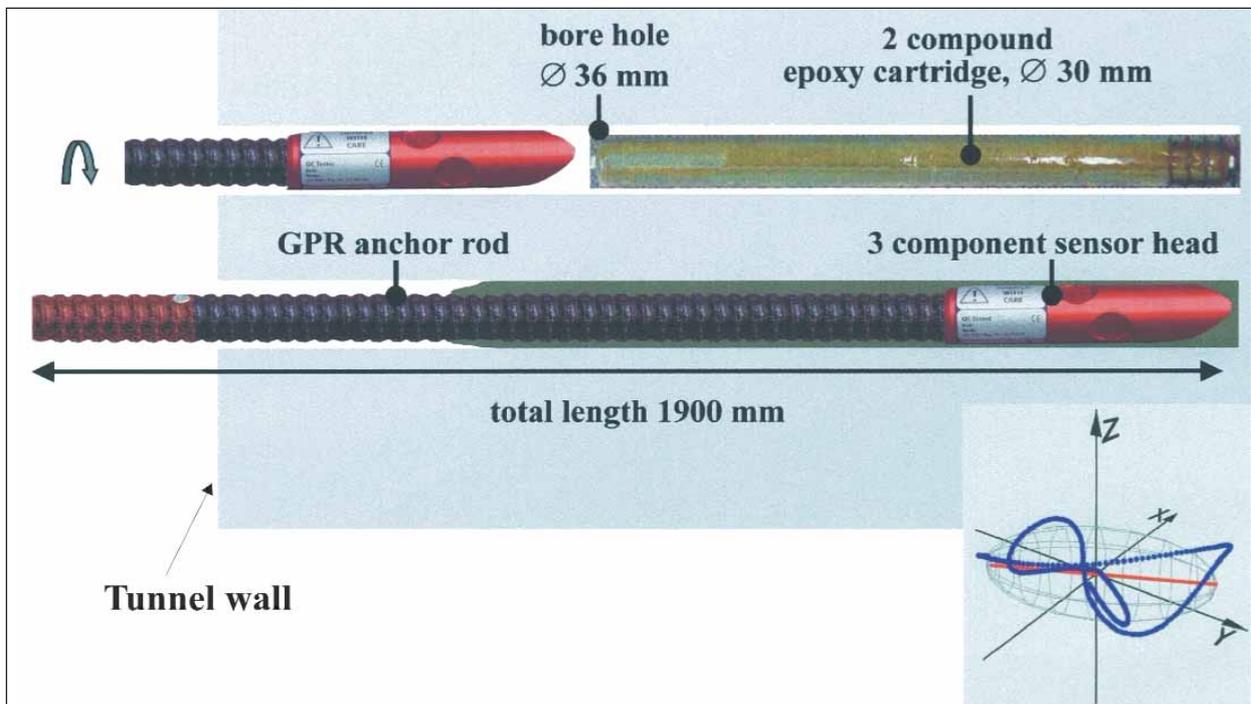
Das Registriersystem zeichnet die Signale bis 4 kHz in 3 Kanälen pro Anker dezentral direkt am Messort auf, wodurch die beim Baubetrieb sonst immer hinderlichen Datenübertragungsleitungen reduziert werden. Das System ist auch unter schwierigsten Umgebungsbedingungen des Tunnelvortriebs mit den hohen mechanis-

chen Beanspruchungen durch Drehbohren sowie bei Staub und Nässe zuverlässig einsetzbar.

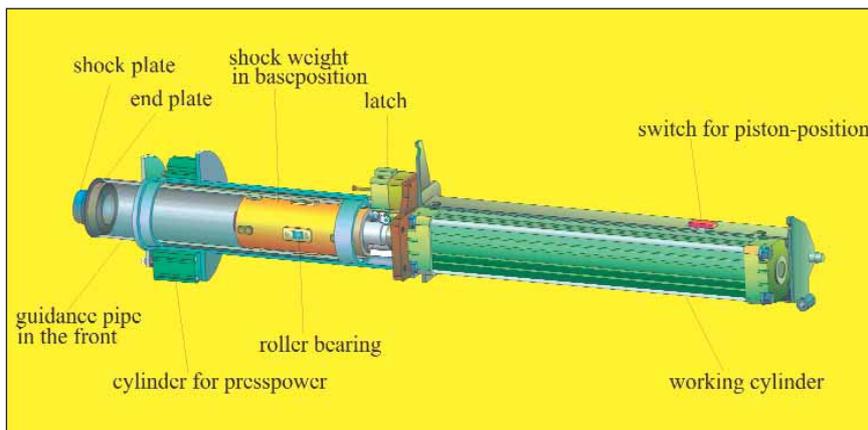
Für die 3D-Visualisierung der Messgeometrie und der Messdaten wurden am GFZ Potsdam eigene Computer-Programme entwickelt. Als seismische Quellen kommen pneumatische Impulsgeber oder magnetostruktive Vibratoren zum Einsatz. Zusammen mit diesen Signalquellen, die ebenfalls am GeoForschungsZentrum entwickelt werden und an eine Tunnelbohrmaschine montiert werden können, existiert eine Komplettlösung für das neue *Integrated Seismic Imaging System (ISIS)*.

### Sensorstäbe und seismischer Schlaghammer

Abb. 2 zeigt schematisch das Einbringen eines Gebirgsankers mit einem integrierten Dreikomponenten-Geophonkopf in ein mit Klebepatronen gefülltes Bohrloch. Durch Drehen des Ankerstabes beim Einbringen wird der Kleber vermischt, der nach wenigen Minuten ausgehärtet ist und eine sehr gute Ankopplung der Geophone an das Gestein bewirkt. Nach dem Setzen des Ankers kann die Orientierung des Geophonkopfes aus den Bohrdaten und an Hand einer Richtungsmarkierung am bohrlochseitigen Stabende ermittelt werden. Über einen Stecker am Stabende findet die Datenübertragung zum Aufzeichnungsgerät statt. Die Stablänge der im Zugangstollen Faïdo verwendeten Geophon-Ankerstangen betrug 2 m.



**Abb. 2 :** Setzen eines Messankers mit seismischem 3-Komponenten Sensorkopf. Der Anker wird schnelldrehend in das mit Klebpatronen gefüllte Bohrloch getrieben. Diese werden dabei vermischt und verkleben den Messanker kraft- und formschlüssig mit dem Gebirge. Das Hodogramm in der rechten Ecke zeigt die Partikelbewegung eines ankommenden seismischen Signals und den resultierenden Wellenfeldvektor in einem gegebenen Zeitintervall.  
*Setting of the measuring anchor rod equipped with a 3 component seismic sensor head. The anchor is driven into the borehole with high revolution by which the epoxy glue is mixed and fixes the measuring anchor tightly to the rock mass. The hodograph in the lower right corner illustrates the particle motion of the incoming seismic signals and the resulting wave field vector in a given time window.*



**Abb. 3:** Aufbau des pneumatischen Impuls-Hammers für das ISIS-System  
*Design of the pneumatical impact hammer for the ISIS-System*

Abb. 3 zeigt die pneumatische seismische Quelle von ISIS (Otto, P. und Borm, G., 2000). Dieser Impakthammer ist in allen Raumrichtungen einsetzbar und zeichnet sich durch kurze Schlagintervalle im Bereich weniger Sekunden bei hoher Reproduzierbarkeit der erzeugten Signale aus. Dies ermöglicht viele Schläge an einem Messpunkt und die nachfolgende Stapelung der Signale zur Verringerung des Rauschanteils in den Registrierungen. Im Vergleich zu Sprengungen in Bohrlöchern entspricht die Schlagenergie des Hammers ungefähr 15 g TNT. Die dynamische Kraft beträgt ca. 5 kN. In Entwicklung ist z.Zt. eine tragbare magnetostruktive Vibroseisquelle (Borm, G. und Otto, P, 2001) für ISIS, die über ein Frequenzband von 200 Hz bis

2 kHz eine dynamische Kraft bis zu 10 kN erzeugt.

Für die Messungen im Zugangstollen Faïdo wurde der Hammer an das Messfahrzeug MobiLab des GFZ Potsdam montiert (Abb. 4a). Abb. 4b zeigt in einer Nahaufnahme den ausgefahrenen Hammer beim Schlagen auf die Felswand. An jedem Messpunkt wurden 10 bis 15 Schläge ausgeführt. Die seismischen Signale wurden von 8 bis 10 Sensorstäben simultan aufgezeichnet. Der Messpunktabstand betrug 1,0 bis 1,5 m, und die Entfernung zwischen den Sensorstäben war 9 m. Ein auf der jeweils gegenüberliegenden Tunnelseite gesetzter Sensorstab ermöglichte die Registrierung des um den Tunnel geführten Wellenfeldes.



**Abb. 4:** ISIS-Testmessungen im Zugangsstollen Faido des Gotthard-Basistunnels. **a)** Blick auf das GFZ-MobiLab, **b)** der Impact-Hammer im Einsatz an der Tunnelwand. (Fotos: R. Giese, GFZ)  
 ISIS test measurements in the Faido Access Tunnel of the Gotthard Base Tunnel. **a)** view of the GFZ-MobiLab, **b)** impact hammer in operation at the tunnel wall.

Die Gesamtlänge der Messauslagen im ZSF betrug 661 m (Tab. 1). Dazu wurden 77 Sensorstäbe gesetzt, von denen 72 mit jeweils 3 Geophonkomponenten voll einsatzfähig waren; nur 5 Stäbe gingen durch das Testen verschiedener Design-Varianten des Geophonkopfes verloren. Die Anzahl der registrierten Schläge konnte

schrittweise von 200 auf über 800 erhöht werden. Die Anzahl der Messpunkte erhöhte sich von 13 auf 59 innerhalb einer Messreihe. Insgesamt liegen jetzt von 310 Messpunkten seismische Aufzeichnungen vor, die eine Analyse von ca. 1700 laufenden Metern des Tunnels erlauben.

Period	Extension of seismic lines	Number of rods	Number of impacts	Number of source points	Vp of first arrivals	Vs of first arrivals
28.03.-30.03.00	SM 86 –SM 137	5 (2)	40	5	5300 m/s	2800m/s
18.07.-20.07.00	SM 765-SM 830	8(6)	202	13	5700 m/s	3100m/s
26.09.-28.09.00	SM 881-SM 963	8(8)	411	34	5300 m/s	2900 m/s
07.11.-09.11.00	SM 1130 –SM 1215	8(8)	498	38	5600 m/s	3100 m/s
05.12.-07.12.00	SM 1314 –SM 1379	8(8)	536	43	5900 m/s	3400 m/s
30.01.-01.02.01	SM 1582 – SM 1663	10(10)	540	38	5900 m/s	3400 m/s
13.03.-14.03.01	SM 1858 – SM 1942	10(10)	360	27	5800 m/s	3400 m/s
30.04.-2.05.01	SM 2128 – SM 2203	10(10)	852	59	5500 m/s	3200 m/s
12.06.-14.06.01	SM 2360 - SM 2433	10(10)	579	53	5000 m/s	2700 m/s
<b>TOTAL</b>	<b>661 m</b>	<b>77(72)</b>	<b>4018</b>	<b>310</b>		

( ) number of intact anchor rods after setting

**Tab. 1:** Bisherige seismische Messungen im Zugangsstollen Faido (2000 - 2001)  
 Informations on the seismic measurements in the Faido-access tunnel (years 2000/2001)

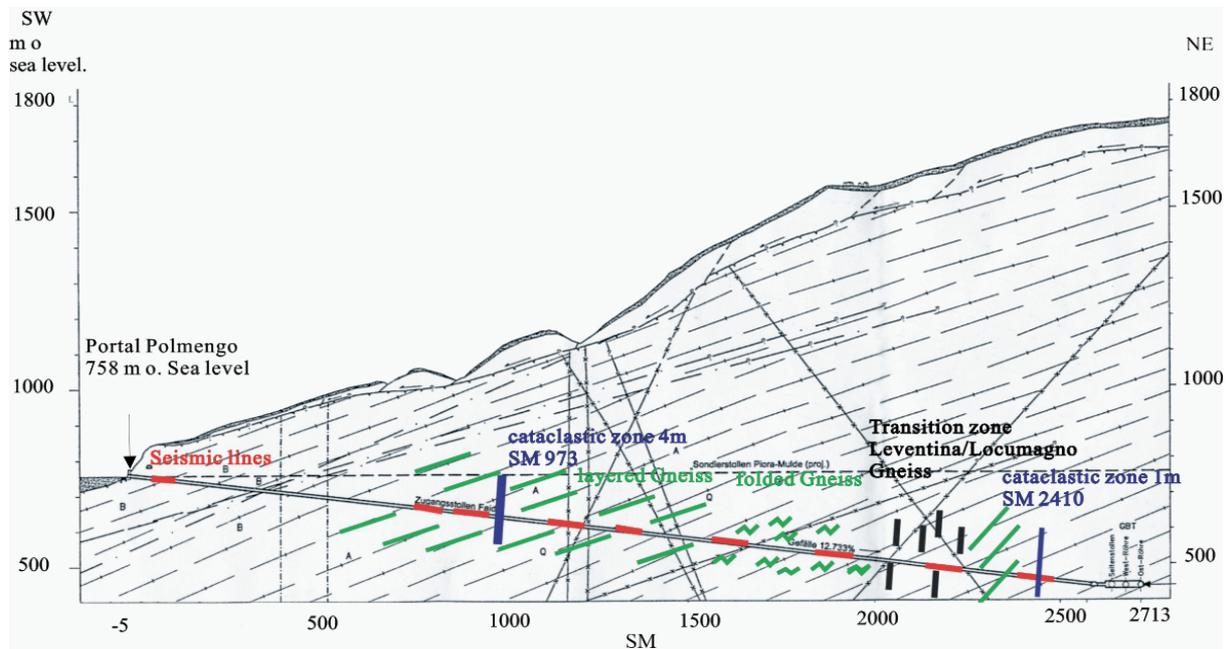
### Geologie und Bautechnik

Der 2651 m lange Zugangstollen Faido (ZSF) des Gotthard-Basistunnels liegt im Leventina-Gneiskomplex der Penninischen Gneiszone. Abb. 5 zeigt das geologische Längsprofil des ZSF, der mit einem Gefälle von 12,7 % konventionell, d.h. durch Bohren und Sprengen, vorgetrieben wird. In seinem tiefsten Bauabschnitt hat er eine Gebirgsüberlagerung von 1300 m.

Die Leventina-Gneise sind Streifengneise mit granitischer Zusammensetzung (51% Feldspat, 34% Quarz, 14% Glimmer und 1% Akzessorien). Die verschiedenen strukturellen Gneisvarietäten werden in quarzreiche, muskowitzreiche, biotitreiche, serizitreiche und granatführende Gneise untergliedert. Texturell findet man lagige, laminierte, augige, flasrige, porphyrische,

schiefrige und gefälte Leventina-Gneise. Während der mehrfachen metamorphen Überprägungen bildeten sich Biotit-, Amphibolit- und Quarzlinnen und Quarzbänder. Neben den metamorphen Überprägungsphasen wurde das Gestein auch tektonisch stark beansprucht. Dadurch entstanden verschiedene Störungszonen: Kataklastite, Mylonite und Kluftscharen unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausprägung.

Die lithologischen und tektonischen Strukturelemente beeinflussen die Ausbreitung seismischer Wellen in den Leventina-Gneisen erheblich. Die geophysikalische Auswertung und deren geologische Interpretation bei einer seismischen Vorauserkundung von bautechnisch relevanten Störungszonen stellen eine große Herausforderung dar. Im ZSF waren zwei kataklastische Störzonen bei Stollenmeter (SM) 973 und 2410 von



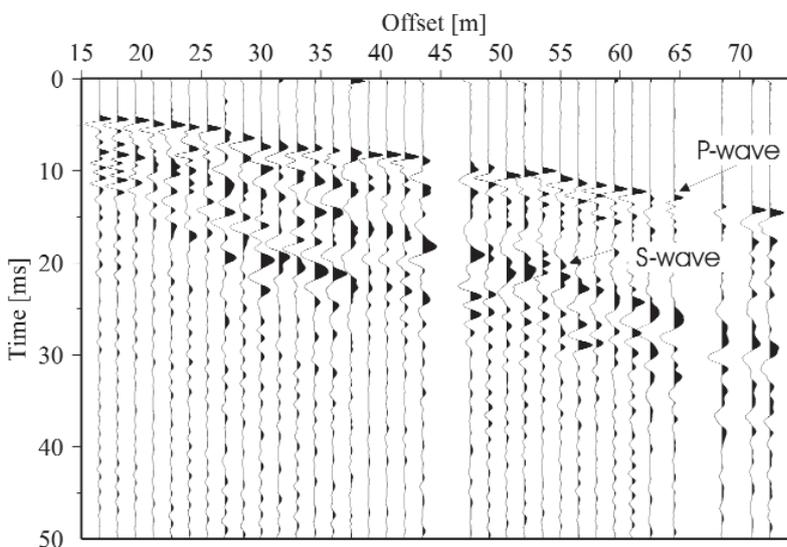
**Abb. 5:** Geologisch-geotechnisches Profil des Zugangsstollens Faido. Rote Balken symbolisieren die Positionen der seismischen Messungen, und violette Balken markieren die kataklastischen Zonen bei SM 973 und SM 2410. Geological-geotechnical profile of the Faido Access Tunnel. Red bars symbolize the positions of the seismic measurements, and purple bars mark the position of cataclastic zones at SM 973 and SM 2410.

besonderem Interesse (vgl. Abb. 8): ein 4 m mächtiger Kataklastit, der einen Stahlbetonausbau notwendig machte, und eine 1 m breite Störzone, die durch einen Spritzbetonausbau mit erhöhter Ankerdichte gesichert werden konnte.

### Seismische Messungen und Tunneltomographie

Zur Charakterisierung der kataklastischen Störzonen in den Leventina-Gneisen werden seismische Tomographien aus dem Tunnelnahbereich genutzt. Als Eingabe dienen die Laufzeiten der direkten seismischen Wellen. In Abb. 6 sind die ersten 50 ms der aufgezeichneten Seismogramme einer Horizontalkomponente aus dem

Messabschnitt von SM 890 bis SM 955 dargestellt. Die direkten P-Wellen treten als Ersteinsatz im Zeitbereich zwischen 4 ms und 14 ms bei einem Offset von 16 m bzw. 72 m auf. Die Einsätze der direkten S-Wellen folgen in einem Zeitbereich von ca. 6 ms bis 26 ms. Aufgrund eines hohen Geschwindigkeitsgradienten im Tunnelnahbereich dringen die direkten Wellen bis zu 10 m in das Gestein ein, bevor sie zu den Empfängern gelangen. Die Tomographien bilden die Gebirgsstrukturen des tunnelnahen Bereichs gut ab. Da dieser für geologische Aufnahmen direkt zugänglich ist, können direkte Vergleiche zwischen Geologie und Seismik durchgeführt werden. Auch ist die Beobachtung von Trends im Geschwindigkeitsfeld um den Tunnel herum möglich.



**Abb. 6:** Seismogramme einer Horizontalkomponente aus dem Messabschnitt SM 890 – SM 955, Pfeile markieren die Ersteinsätze der P- und S-Wellen im Offsetbereich von 16 m bis 72 m. Seismic data of a horizontal component from the onsets between SM 890 – SM 955, the first breaks of P- and S-waves in the offset range between 16 m and 72 m are marked by arrows.

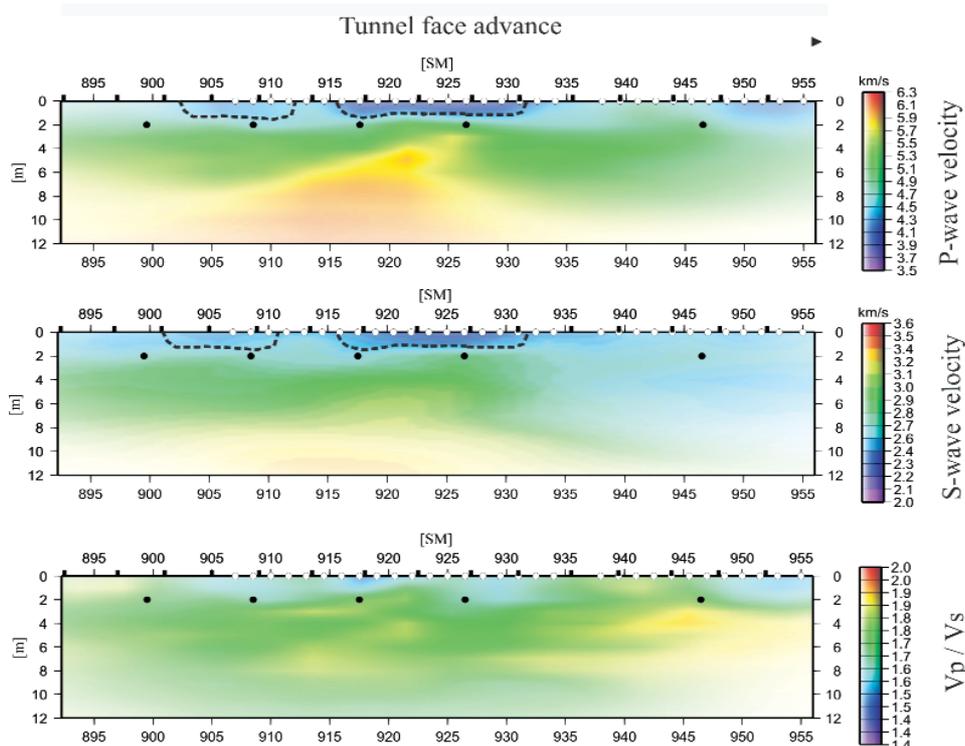
Abb. 7a zeigt das tomographische Modell für  $v_p$  längs der in Vortriebsrichtung linken Tunnelwand des ZFS. Der Kernbereich der Auslage reicht von SM 890 bis SM 955. Offene Kreise markieren die Quellpunkte an der Tunnelwand, und schwarze Punkte geben die Position der Geophone in 2 m Tiefe des Gesteins an. Die schwarzen Rechtecke an der Tunnelwand symbolisieren die Abschlaglängen beim Sprengvortrieb. Die Wellengeschwindigkeiten  $v_p$  sind mit einem Farbsättigungswert kodiert, so dass Modellzonen mit geringerer Strahlenüberdeckung undeutlicher erscheinen als Zonen mit höherer Strahlenüberdeckung. Die ersten 2 bis 3 m nahe der Tunneloberfläche bilden die Auflockerungszone. Hier fallen die  $v_p$ -Werte von 5800 m/sec (Fernfeld) auf unter 3500 m/s (Ausbruchsrund) ab. Die lateralen Variationen sind nahe der Tunnelwand am größten und nehmen mit wachsendem Abstand von ihr ab.

Anhand der geologischen Kartierungen längs des Tunnels können die Niedriggeschwindigkeitszonen zwischen SM 900 und SM 910 sowie zwischen SM 916 und SM 937 mit den hier kreuzenden Störungszonen identifiziert werden. Im tunnelnahen Bereich sind diese Zonen durch die Sprengungen und Spannungsumlagerungen aufgeweitet. Die hohen Geschwindigkeitswerte zwischen SM 940 und SM 947 werden durch Quarzlinzen, die an der Tunnelwand austreichen, bewirkt. Ab ca. SM 920 nimmt  $v_p$  in 3 bis 8 m Stoßtiefe (i.e. radialer Abstand von der Ausbruchswand) zu

kataklastischen Störzone hin ab, die bei SM 973 den Tunnel quert. Das tomographische Modell in Abb. 7b liefert auch für die Scherwellen eine gute Übereinstimmung bei der Verteilung von Niedrig- und Hochgeschwindigkeitszonen im Nahfeld. Im Fernfeld nimmt  $v_s$  mit Annäherung an die kataklastische Störzone ab. Der Vergleich der Farbwerte zeigt jedoch eine stärkere Abnahme von  $v_s$  als  $v_p$ .

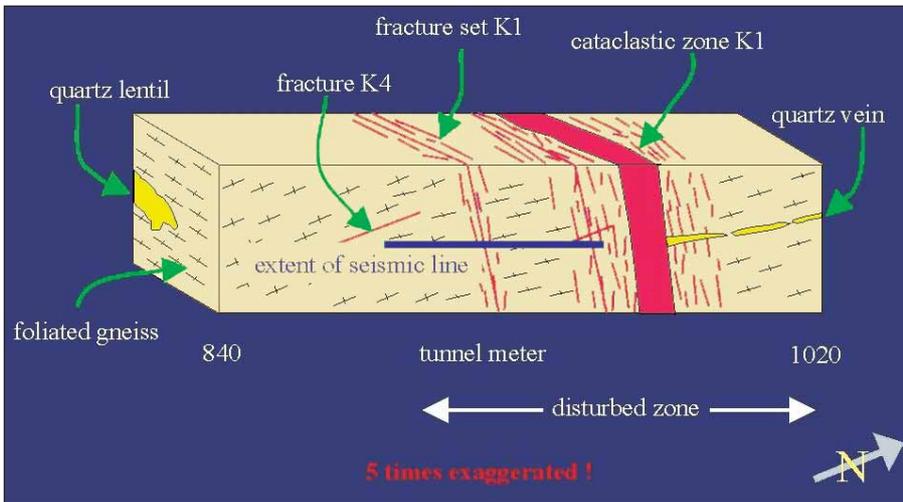
Abb. 7c zeigt die Tomographie des Verhältnisses  $v_p/v_s$ . Während ab ca. SM 935 ein erhöhter Wert von 1,9 beobachtet wird, nimmt dieses Verhältnis in den ersten 2 bis 3 m der Auflockerungszone niedrigere Werte zwischen 1,5 und 1,6 an. Das Verhältnis  $v_p/v_s$  korreliert mit der Querkontraktionszahl des Gesteins und ist ein guter Indikator für dessen Kompressibilität und damit Auflockerung.

Abb. 8 zeigt das aus geologischen Kartierungen erstellte Modell der Störungszone bei SM 973. Wenige Meter vor der kataklastischen Zone kommt es zu einer Erhöhung der Klüftigkeit, die zu einer Verringerung von  $v_p$  und  $v_s$  führt. Die Klüfte vor der kataklastischen Störung sind wasserführend. Das Wasser wirkt sich auf  $v_p$  und  $v_s$  unterschiedlich aus, da Kompressionswellen auf Porenwasser sensibler reagieren als Scherungswellen. Eine Erhöhung des Porenwasseranteils führt zu einer Vergrößerung des Verhältnisses  $v_p/v_s$ .



**Abb. 7:** Tomographische Inversion von (a) Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$ , (b) Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und (c) Verhältniss  $v_p/v_s$  in Richtung auf die kataklastische Störzone bei SM 973. Quell- und Empfängerpunkte sind mit Kreisen und schwarzen Punkten markiert, und schwarze Balken markieren die Abschlaglängen beim Sprengvortrieb.

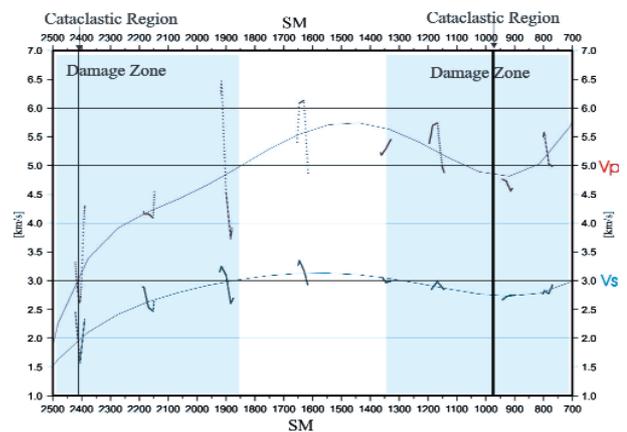
Tomographic Inversion of (a) compressional wave velocity  $v_p$ , (b) shear wave velocity  $v_s$  and (c) ratio  $v_p/v_s$  in the fore-front of the cataclastic zone at SM 973. Source and receiver points are symbolized by hollow and solid circles, and solid bars mark tunnel advances per round.



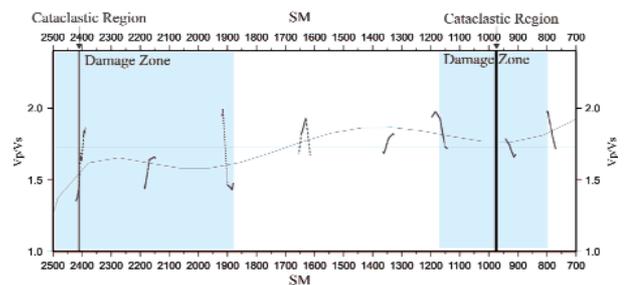
**Abb. 8:** Geologisches Modell der kataklastischen Zone bei SM 973 mit umgebendem Störungsbereich und Klufscharen  
*Geological model of the cataclastic region at SM 973 with disturbance zone and fracture sets*

Die beobachteten Eigenschaften der kataklastischen Störungszone bei SM 973 stimmen gut mit Modellen von Störungszonen im Bereich der spröde deformierbaren Oberkruste überein (z.B. Holliger K., 1996). Die Störungszone setzt sich aus einem stark lokalisierten Kernbereich und einer umgebenden, weiter ausgedehnten Störzone zusammen. In der Kernzone ist das Gestein durch Scherung zerstört. Der an die Kernzone angrenzende gestörte Bereich kann Klüfte unterschiedlicher Mächtigkeit und Ausprägung enthalten. Im Vergleich zum ungestörten Gestein führen diese Strukturen zu einer Erhöhung der Porosität und Permeabilität. Ein weiterer gestörter Bereich deutet auf mehrmalige tektonische Beanspruchung und Deformationen hin.

Laufzeit-tomographien von 8 Messungen im Bereich von SM 765 bis SM 2433 wurden berechnet, um großräumige Trends zu erkennen, die Rückschlüsse auf die Struktur und Mächtigkeit der Störzonen zulassen. Abb. 9 zeigt die Werte von  $v_p$  und  $v_s$  in 3 m Entfernung von der Tunnelwand. Markiert sind die kataklastischen Zonen bei SM 973 und SM 2410. Bemerkenswert ist die sehr hohe Variabilität der Geschwindigkeit innerhalb der Messungen. Niedrigere Geschwindigkeiten treten vor allem in Zonen mit hoher Kluftdichte auf. Die großen Geschwindigkeitsstreuungen in der Messung bei SM 1900 rühren von einer mit vielen Biotitlinsen durchsetzten Falte her. Trotz der großen Variabilität in den einzelnen Messungen lassen sich weiträumige Trends deutlich erkennen. Ein Bereich niedrigerer Geschwindigkeiten befindet sich um die kataklastische Zone bei SM 973. Von SM 1200 bis SM 1700 kommt es zu einer Zunahme der mittleren Geschwindigkeiten. Ab SM 1900 nehmen die Geschwindigkeiten wieder stetig ab und erreichen in der kataklastischen Kernzone bei SM 2410 erneut ein Minimum. Diese räumlichen Trends in der Geschwindigkeitsverteilung charakterisieren das Bild der Verwerfungen, die aus kataklastischen Kernzonen und angrenzenden gestörten Bereichen bestehen.



**Abb. 9:** Seismische Wellengeschwindigkeit  $v_p$  und  $v_s$  der tomographischen Modelle des Zugangsstollen Faido in 3 m Abstand von der Tunnelwand. Die kataklastischen Zonen bei SM 973 und SM 2410 sind umgeben von weiten Zonen mit geringeren  $v_p$  und  $v_s$ , die die gestörten Bereiche des Leventina-Gneisses charakterisieren.  
*Seismic velocities  $v_p$  and  $v_s$  of the tomographic inversions in 3 m distance from the tunnel wall of the Faido access tunnel. The cataclastic zones at SM 973 and SM 2410 are surrounded by wider zones of decreasing wave velocities which mark the disturbance zones in the Leventina-Gneiss.*



**Abb. 10:**  $v_p/v_s$ -Verhältnisse im Zugangsstollen Faido in 3 m Entfernung von der Tunnelwand. Niedrigere Werte kennzeichnen Bereiche verminderter Stabilität im Bereiche der kataklastischen Zonen.  
 *$v_p/v_s$  ratios in the Faido access tunnel in 3 m distance from the tunnel wall. A decrease of the values indicates regions of lower stability located around the cataclastic zones.*

Die aus den Daten von Abb. 9 ermittelten  $v_p/v_s$  - Verhältnisse sind in der Abb. 10 dargestellt. Steigt das Geschwindigkeitsverhältnis, sinkt die Kompressibilität des Gesteins und umgekehrt. Im Bereich der kataklastischen Störung bei SM 973 liegt ein Minimum des  $v_p/v_s$ -Verhältnisses. Von SM 1900 bis SM 2410 nimmt dieses Verhältnis monoton ab. Die kataklastischen Kernzonen und die angrenzenden gestörten Bereiche sind Orte erhöhter Komprimierbarkeit und geringerer mechanischer Stabilität.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die seismischen Messungen bei den Vortriebsarbeiten im Zugangsstollen Faïdo des Gotthard-Basistunnels haben bewiesen, dass ein zuverlässiger Einsatz der Hardware-Komponenten von ISIS unter Baustellenbedingungen möglich ist. Die Anzahl der gleichzeitigen Messpunkte konnte dank des Einsatzes des GFZ-Messfahrzeugs MobiLab als Träger für die mechanische Quelle und durch eine auf den Sprengvortrieb speziell angepasste Messlogistik ständig gesteigert werden.

Eine wesentliche Erhöhung der Anzahl der Schläge sowie der Anregungspunkte können durch eine Verbesserung der Halterung des seismischen Hammers erzielt werden. Zu diesem Zweck soll der Hammer künftig an einen Kleinbagger montiert werden. Erste Versuche mit dieser Kombination wurden am GFZ Potsdam erfolgreich durchgeführt. Mit Hilfe des Kleinbaggers läßt sich die Quelle wesentlich besser und schneller positionieren, so dass die Quellpunkte in unterschiedlichen Höhen und auf der Tunnelsohle gesetzt werden können. Die Quell- und Empfänger-Arrays sind auf diese Weise sogar optimierbar.

Die seismischen Messungen im Tunnel haben gezeigt, dass eine Früherkennung der kataklastischen Störzonen im Leventina-Gneis über die Abnahme der seismischen Geschwindigkeiten möglich ist. Die Ausdehnung des gestörten Bereiches ist erheblich größer als die der kataklastischen Kernzone. Gleichbleibende oder zunehmende Geschwindigkeiten im Tunnelnahbereich schließen dagegen das Auftreten von kataklastischen Zonen in Vortriebsrichtung für die nächsten 100 bis 200 m mit großer Wahrscheinlichkeit aus. Diese Information ist für den Tunnelbauer wesentlich.

Die im ZSF gemessenen seismischen Daten werden auch zur Erstellung realistischer Modelle von Kataklastezonen genutzt. Die Modellierung soll den Einfluss des komplexen Tunnelnahfeldes auf das reflektierte Wellenfeld zeigen und die Reichweite der Reflexionsseismik bei unterschiedlichem Heterogenitätsgrad des Gebirges ermitteln.

### Literatur

- Borm, G., Giese, R., Otto, P., Dickmann, Th., Amberg, F., 2001. *Integrated Seismic Imaging System for geological prediction ahead in underground construction*. Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC), June 11.-13., San Diego USA.
- Borm, G., Giese R., Schmidt-Hattenberger, C., Bribach, J. 1999. *Verankerungseinrichtung mit seismischem Sensor (Anchoring system with seismic sensor)*. German Patent Appl. 198 52 455.2; European Patent Appl. 99120626.9-2316; Japanese Patent Appl. HEI 11-322268.
- Borm, G. und Otto, P. (2001): *Vorrichtung zur Erzeugung mechanischer Schwingungen in einem festen Material*. Deutsche Patentanmeldung 101 41 518.4
- Holliger, K. 1996. *Fault scaling and 1/f noise scaling of seismic velocity fluctuations in the upper crystalline crust*. Geology. v. 24. no. 12, p. 1103-1106.
- Otto, P. und Borm, G. (2000): *Pneumatischer Impulsgenerator für Untertagesseismik*; Deutsche Patentanmeldung: 199 44 032.8

