

# Hohlraumerkundung im Tunnelbau

Dipl.-Ing. J. Schmitt, Dr.-Ing. J. Gattermann, Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

## 1 Einleitung

Das Bauen im Untergrund stellt für den Ingenieur immer eine Herausforderung dar. Die „stichpunktartige“ Erkundung liefert nur ansatzweise Grundlagen für die Interpretation der geologischen Verhältnisse in dem ein Tunnelbauwerk aufgefahren wird. Die Erkenntnisse über die tatsächliche geologische Situation ergeben sich im Grunde erst bei der Herstellung des Bauwerkes. Störungs- und Karstzonen, wasserführende Gebirgsabschnitte, Hohlräume und anthropogene Hindernisse (z. B. Bomben, Fundamente) stellen ein großes Gefährdungspotential für den Tunnelbau dar. Insbesondere im maschinellen Tunnelbau kann ein plötzliches Anfahren von geologischen Grenzflächen oder Störungen zu kostenintensiven Schäden an Mensch und Material und in deren Folge zu Vortriebsstillständen führen. Das Szenario reicht vom Wassereinbruch bis hin zum Totalschaden am System. Unentdeckte Hohlräume im näheren Umfeld eines Tunnels können nicht nur den Bauzustand sondern auch den Betriebszustand gefährden. Zum Beispiel sind auf den Hochgeschwindigkeitsstrecken der Deutschen Bahn auch kleinere Hohlräume relevant, da diese großen dynamischen Einwirkungen unterliegen.

Bei der Spritzbetonbauweise behilft man sich durch spezielle Ausbruchsklassen, die für unvorhersehbare Situationen bereits bei der Ausführungsplanung berücksichtigt wurden. Von Vorteil bei der Spritzbetonbauweise ist, dass man die Ortsbrust direkt in Augenschein nehmen und somit schon meistens im Vorfeld auf eine wechselnde Geologie reagieren kann. Im Vergleich dazu hat man bei einer Tunnelbohrmaschine (TBM) nur eingeschränkt eine Reaktionszeit auf eine wechselnde Geologie. Es besteht zwar die Möglichkeit auch von einer TBM aus Erkundungsbohrungen analog dem Verfahren, welches bei der Spritzbetonbauweise angewendet wird, durchzuführen. Allerdings wird dadurch der Bauablauf verzögert, da für die Durchführung der Erkundungsbohrung das Schneidrad der TBM stillstehen muss und sich dadurch ein Vorteil des maschinellen Tunnelbaus negiert.

Durch den wachsenden Marktanteil des maschinellen Tunnelbaus gegenüber der Spritzbetonbauweise besteht daher ein wachsend Bedarf an Vorauserkundungsver-

fahren. Die Anforderungen an das Vorauserkundungsverfahren lassen sich wie folgt definieren:

- das Vorauserkundungssystem muss aus dem Tunnel heraus einsetzbar sein, da Erkundmaßnahmen von der Geländeoberfläche aus insbesondere bei hoher Überlagerung oder großflächiger Überbauung der Tunneltrasse wenig aufschlussreich sind
- keine Einschränkungen des Vortriebs (Stillstandzeiten) während der Messungen
- kontinuierliche Erkundung
- hohe Auflösung des Untergrundes
- große Reichweite (mehrere 10 m)
- zerstörungsfrei
- ebene und räumliche Visualisierung der Ergebnisse vor Ort in Echtzeit
- eindeutige Interpretierbarkeit der Ergebnisse durch Baustellenpersonal
- baustellengerecht, d.h. robust und wartungsarm, leichte Bedienbarkeit
- schneller Ersatz von Komponenten bei Ermüdung, Verschleiß oder Defekt
- kostengünstig

Im Nachfolgenden werden Funktion, Einsatzgrenzen und Referenzen der aktuell verfügbaren Messgeräte (Stand: Januar 2003) zur Vorauserkundung im Tunnelbau erläutert.

## **2 Systeme zur Vorauserkundung im Tunnelbau**

### **2.1 Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM)**

BEAM ist ein Vorauserkundungsverfahren für den Untertagebau und wird von der Gesellschaft GEOHYDRAULIK DATA GdBR seit 1998 entwickelt und vertrieben. BEAM ist sowohl in Locker- als auch in Festgestein einsetzbar und kann gleichzeitig zur hydrologischen und geotechnischen Gebirgsklassifikation und -dokumentation seitens des Bauherrns oder Auftragnehmers genutzt werden.

Derzeit sind vier Varianten des BEAM-Systems für unterschiedliche Aufgaben und Einsatzbereiche verfügbar:

- a) BEAM-TBM für TBM-Vortrieb
- b) BEAM-Drill & Blast für den konventionellen Sprengvortrieb
- c) BEAM-Perimeter für die Umfelderkundung im Tunnel
- d) BEAM-Surface für Kartierungsmaßnahmen von der Oberfläche aus

Darüber hinaus besteht eine weitere Variante, das Verfahren aus Horizontalbohrungen heraus anzuwenden. Die interne Bezeichnung für dieses Verfahren lautet BEAM-HDD (BEAM-Horizontal Directional Drilling) und wurde speziell zur Vorauserkundung in verkarstungsfähigen Gesteinen entwickelt. Zurzeit können hierfür jedoch keine Referenzprojekte angeführt werden.

Alle fünf BEAM-Varianten funktionieren nach demselben geophysikalischen Prinzip, das eine Kombination aus induzierter Polarisation (Frequenzbereichs-IP) und fokussierender Geoelektrik darstellt. Während durch die induzierte Polarisation Kontraste in den elektrischen Eigenschaften des Bodens erkannt werden, dient die Fokussierung des eingeleiteten Stroms zur Erhöhung der Auflösung. Das System ist laut Hersteller besonders geeignet, Kluftezonen, Karststrukturen, wasserführende Schichten und Verwitterungszonen in Festgesteinen zu lokalisieren und darzustellen.

Das Verfahren kann entweder vortriebsbegleitend (BEAM-TBM, BEAM-Drill & Blast, BEAM-HDD) oder vortriebsentkoppelt (BEAM-Perimeter, BEAM-Surface) zur Erkundung eingesetzt werden.

Bei der Variante BEAM-TBM wird bei dem Vortrieb mit einer Tunnelbohrmaschine ein Strom über mehrere isolierte Meißel im Schneidrad (ca. 4 bis 10 Stück je nach TBM-Durchmesser), die die A0-Elektroden bilden in die Ortsbrust induziert (s. Abb. 1). Das Schild selbst sowie das Schneidrad dienen als Steuerelektrode A1, um den fokussierenden Schirmstrom ringförmig anzulegen. A0 und A1 weisen synchron die gleiche Polarität (+/+ bzw. -/-) und Spannung auf, so dass kein Potentialgefälle entstehen kann. Der Gegenpol B soll entsprechend [8] mindestens 200 m vor der TBM in feuchtem Untergrund angeordnet werden. Um den Stromkreis zu schließen, können Anker, Bohrungen oder lange Metallspieße verwendet werden.

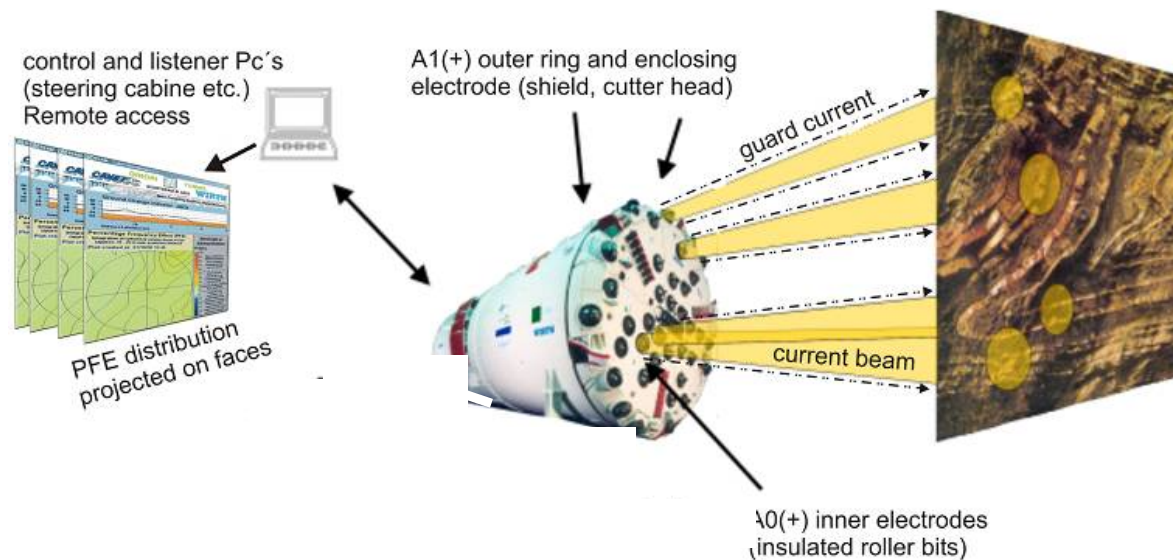


Abb. 1: Prinzip BEAM-TBM nach [7]

Entsprechend der Frequenzbereichs-IP werden über die A0-Elektroden Ströme mit wechselnder Frequenz  $I_0(f)$  induziert. Bei konstant gehaltener Spannung  $U(f)$  werden die frequenzabhängigen Widerstände und der prozentuale Frequenzeffekt PFE über Gl. 1 berechnet:

$$\text{PFE} = 100 \cdot \frac{R(f_1) - R(f_2)}{R(f_1)} \quad [\%] \quad (1)$$

$R(f_1) = U(f_1) / I_0(f_1) \quad [\Omega]$  frequenzabhängiger Widerstand

$$R(f_2) = U(f_2) / I_0(f_2) \quad [\Omega] \quad \text{mit } f_2 > f_1$$

mit  $U(f) = \text{konst. Spannung}$

Der PFE-Wert gibt an, wie groß die elektrische Energie ist, die durch das durchstrahlte Gestein gespeichert werden kann. Wasser und Luft haben einen PFE-Wert von Null. Daher weisen niedrige und negative PFE-Werte auf einen hohen Kluft-Anteil, Karst-Hohlräume oder locker gelagerte Sand- und Kiesschichten hin. Dagegen ist ein hoher PFE-Wert ein Indikator für dicht gelagerte, homogene Gebirgsformationen, wie z.B. ton-, graphit- und erzhaltige Böden.

Zusätzlich zu dem PFE-Wert wird durch das BEAM noch einen Ground Change Indicator (GCI), der kritische Gesteinswechsel im Voraus anzeigen soll, berechnet. Hier-

bei wird im Prinzip der aktuelle durchschnittliche PFE-Wert an der Ortsbrust zu dem 10 m zurückliegenden PFE-Wert ins Verhältnis gesetzt:

$$GCI = 100 \cdot \frac{PFE_0}{PFE_{-10m}} \quad [\%] \quad (2)$$

Ein sehr kleiner GCI weist demnach auf einen ungünstigen Gesteinswechsel im Vorfeld des Tunnels hin. Größere positive Werte zeigen eine Verbesserung der Gebirgsverhältnisse an.

Die Darstellung des PFE- und GCI-Wertes erfolgt in einem Quer- bzw. Längsschnitt der Tunnelachse und kann in der Steuerkabine der TBM (Abb. 2) kontinuierlich beobachtet werden. Dabei wird die graphische Ausgabe während des Vortriebs in einem „refresh“ ca. alle zehn Minuten aktualisiert.

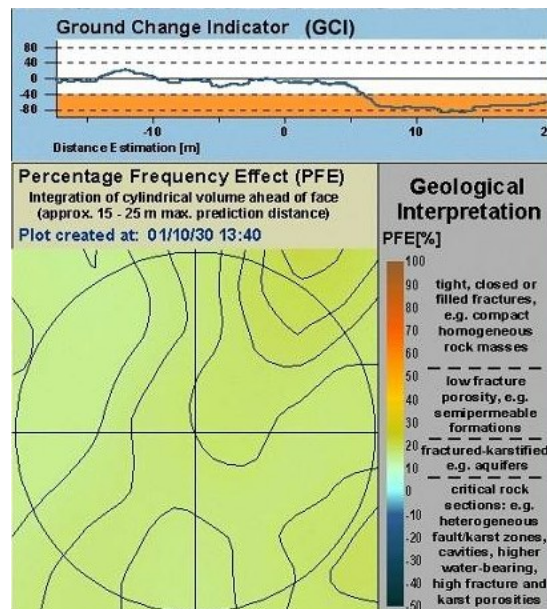


Abb. 2: Visualisierung von PFE und GCI am Beispiel des Ginori-Tunnels nach [9]

Die Reichweite der Vorauserkundung von BEAM-TBM beträgt entsprechend [9] das 2- bis 5-fache des Tunneldurchmessers, d.h. im Durchschnitt 30 m. Grundsätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Auflösung mit zunehmender Entfernung kleiner und die Gefahr von Fehlinterpretationen größer wird. Ebenso wird in [15] darauf hingewiesen, dass Störströme im Tunnel die Messdaten beeinflussen können.

Bei konventionellen Sprengvortrieben kommt das System BEAM-Drill & Blast zur Anwendung, dabei dient die Bewehrung des bereits gesicherten Abschnitts oder

mehrere elektrisch verbundene Anker als A1-Kontakt. Das Bohrgestänge eines Bohrjumbos bildet die A0-Elektrode (Abb. 3). Die Gegenelektrode B befindet sich im rückwärtigen Tunnelbereich.

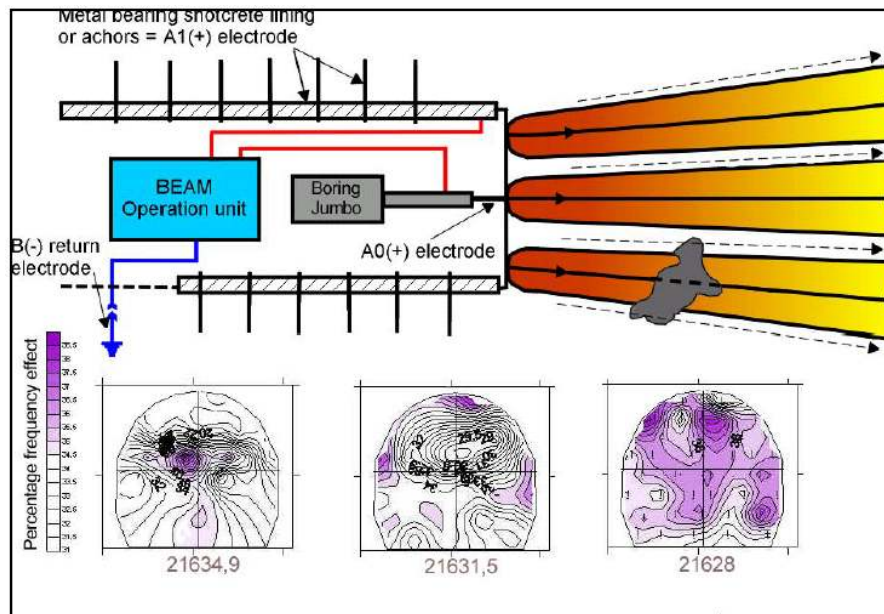


Abb. 3: Prinzip von BEAM-Drill & Blast nach [9]

Gemessen wird während des Bohrens der Sprenglöcher. Anschließend wird für jeden Bohrpunkt ein PFE-Wert berechnet. Bei bekanntem Bohrplan kann dessen Verteilung über die Ortsbrust dargestellt und der GCI abgeleitet werden. Wegen der großen Messintervalle kann bei BEAM-Drill & Blast nicht mehr von einer Visualisierung in Echtzeit gesprochen werden.

Die Reichweite des Systems wird nach [9] auf den 3-fachen Durchmesser der Schirmelektrode (Tunneldurchmesser + Ankerlänge) beziffert.

Das Verfahren wurde bereits angewendet bei Testmessungen im Lötschberg-Basis Tunnel (Schweiz).

Zur BEAM-HDD existieren bisher weder Referenzen noch Veröffentlichungen. Im Prinzip wird aus einer verrohrten horizontalen oder geneigten Bohrung das radiale Umfeld erkundet. Der Radius des aufgeklärten Zylinders wird auf 5 m geschätzt. Innerhalb eines Hüllrohres, das als A1-Elektrode dient, wird eine Art Stahlbürste (A0-Elektrode) eingeführt und während der Messung drehend zurückgezogen.

Das BEAM-Perimeter wird zur Umfelderkundung von bereits fertiggestellten Tunneln eingesetzt. Als A1-Kontakt für den Schirmstrom wird die Bewehrung der Tunnelscha-

le genutzt. Der polarisierende Strom wird in regelmäßigen Abständen mit Handbohrmaschinen (A0-Kontakt) in die Außenhaut eingespeist. Unterstützt werden die Arbeiten durch mobile Hubbühnen. Der Gegenpol B befindet sich in einigen hundert Metern Entfernung vom Messort. Die Erkundungsreichweite wird mit einem Tunneldurchmesser angegeben.

Angewandt wurde dieses Verfahren bereits zur Lokalisierung von Hohlräumen und Karstmorphologien im Umfeld dreier Tunnel bei Ingolstadt.

Das Verfahren BEAM-Surface wurde erstmals bei einer Hochhausgründung in Frankfurt eingesetzt. Dabei wurden die Spundwände der Baugrubenumschließung als A1-Elektrode genutzt. Mit einem Metallspieß (A0-Kontakt) wurde in einem 1 m x 2 m-Raster der Baugrund vermessen. Die Reichweite bei diesen Verfahren beträgt ca. 10 m.

## **2.2 Tunnel Seismic Prediction (TSP 203)**

Das TSP-System wird seit den frühen 1990er Jahren von der Amberg Messtechnik AG (Schweiz) entwickelt und vertrieben. Es ist somit das älteste Vorauserkundungsverfahren dieser Art und verfügt bereits über zahlreiche Referenzen. Die aktuellste Version trägt die Bezeichnung TSP 203.

TSP kann sowohl bei konventionellen als auch bei TBM-Vortrieben in Festgesteinen eingesetzt werden. Für Lockergesteine wurde in Kooperation mit der Herrenknecht AG das SSP-System konzipiert (vgl. Abs. 2.5).

Aus der Auswertung eines künstlich erzeugten seismischen Echos können Rückschlüsse auf Lage und Ausdehnung geologischer Grenzflächen sowie Störungszonen, Karsthohlräume und wasserführende Schichten gezogen werden. Das TSP liefert die Wellengeschwindigkeit P- und S-Wellen sowie die Poissonzahl. Über empirische Beziehungen können gebirgsmechanischen Kennwerte wie z.B. Dichte, statischer und dynamischer E-Modul bestimmt werden.

Das Messprinzip beruht auf dem VSP-Verfahren (Vertical Seismic Profiling, Typ C), welches aus der Bohrlochgeophysik stammt, mit dem Ansatz, dass ein Tunnel vergleichbar mit einer überdimensionalen horizontalen Bohrung ist.

Die Abb. 4 zeigt den üblichen TSP-Versuchsaufbau. Entlang einer Tunnelflanke werden in regelmäßigen Abständen bis zu 30 seismische Sprengladungen in Bohrungen

mit Längen von 1,5 m installiert. Dahinter wird beidseits der Tunnelachse jeweils ein 2 m langer 3-Komponenten-Empfänger eingebaut, der die reflektierten S- und P-Wellen registriert. Arbeiten an der Ortsbrust sind nicht erforderlich, jedoch sollte das System unmittelbar dahinter eingesetzt werden, um eine maximale Erkundungsreichweite im Vorfeld zu erzielen.

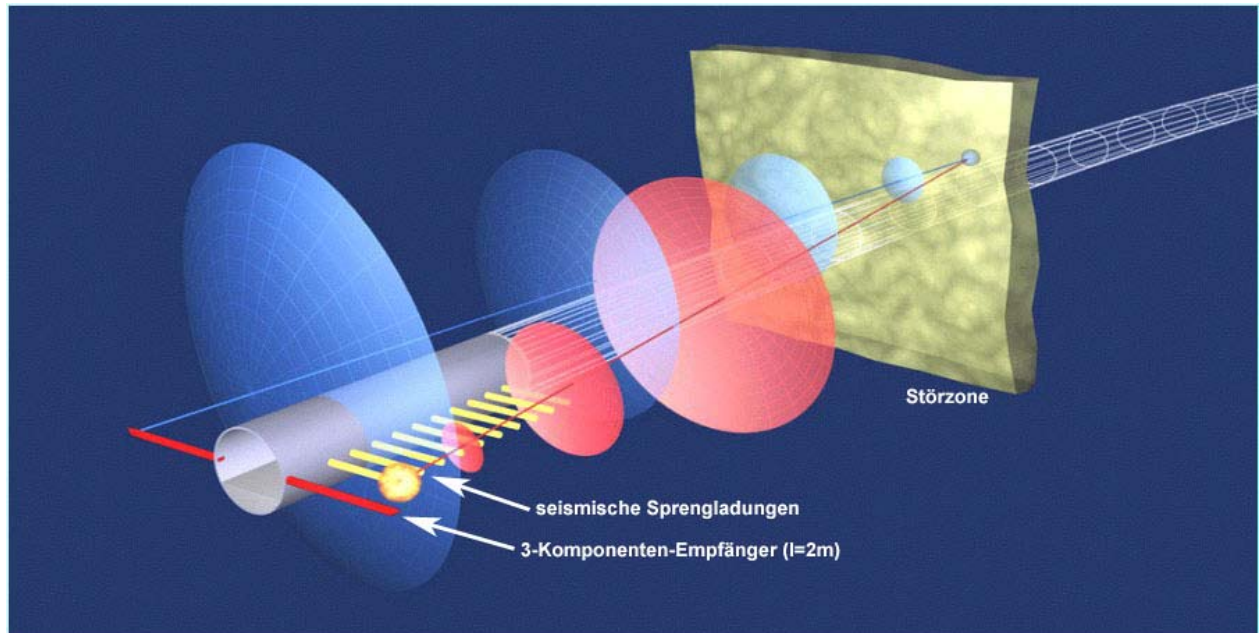


Abb. 4: Versuchsaufbau und Prinzip des TSP-Systems nach [2]

Vor Beginn der Messungen muss die Versuchsgeometrie z. B. die Neigung der Empfänger sorgfältig aufgenommen werden. Die in Abb. 4 dargestellten roten Bereiche bezeichnen Gebiete mit zunehmender Gebirgsfestigkeiten, die blauen Bereiche Gebiete mit abnehmender Gebirgsfestigkeit.

Die Analyse der Messergebnisse kann durch geschultes Baustellenpersonal erfolgen und bis zu 6 Stunden in Anspruch nehmen. Die Vorarbeiten sowie die Datenerfassung selbst, bei dem der Vortrieb eingestellt werden muss, sind nach 2 Stunden abgeschlossen.

Sowohl 2D- als auch 3D-Darstellungen des Tunnelvor- und umfelds ist auch die räumliche Darstellung möglich. In Abb. 5 sind die Ergebnisse eines TSP-Einsatzes beim Bau des Abwassertunnels unter dem Zuckerberg bei Stuttgart ( $l=2.747$  m,  $\varnothing=3,4$  m) dargestellt. Der Tunnel wurde mit einer offenen Schild im Muschelkalk aufgeföhren. Nach ca. 2,1 km traten Karsterscheinungen auf, die einen Überausbruch und ergänzende bergmännische Arbeiten notwendig machten. Das TSP sollte anzei-



gen, in welcher Entfernung mit dem Ende der Karstzone zu rechnen ist sowie Hinweise auf weitere kritische Gebirgsabschnitte geben. Aus den berechneten Verläufen von Körperwellengeschwindigkeit, Dichte und E-Modul ergab sich ein detailliertes Modell der geologischen Verhältnisse. Der Fehler in der Vorhersage des Karstendes betrug bei diesem Projekt 2 m.

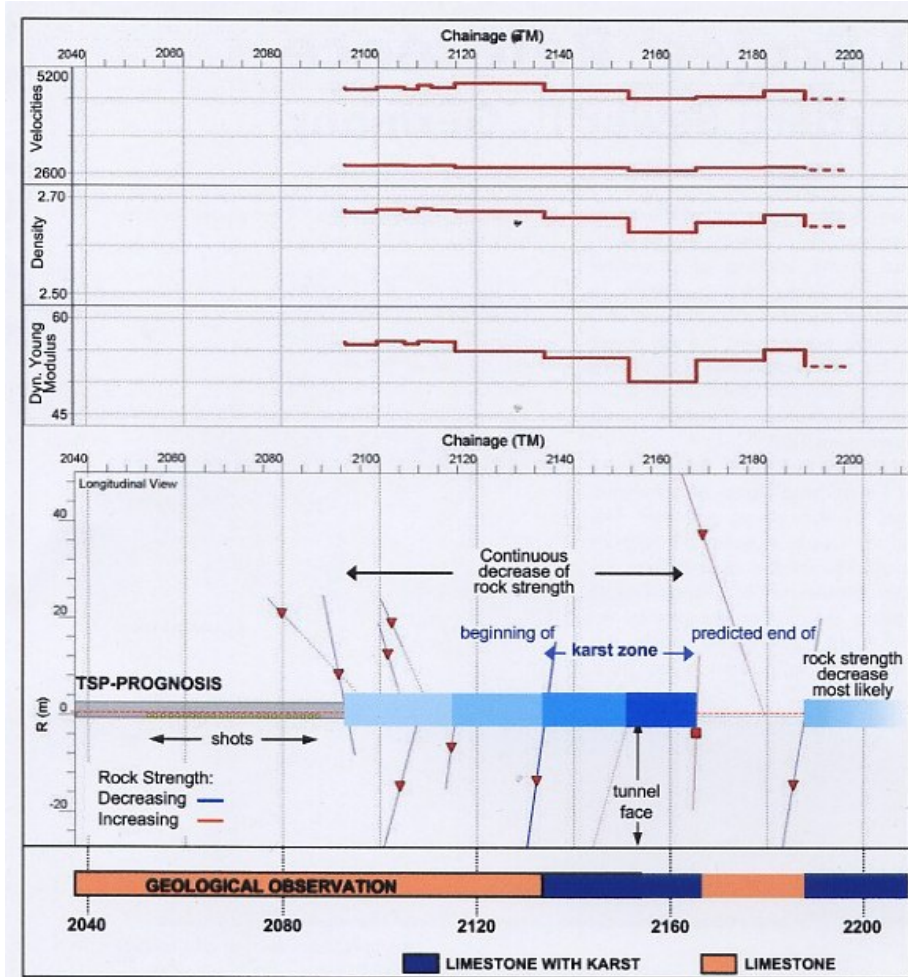


Abb. 5: Ergebnis der TSP-Untersuchung im Zuckerberg-Tunnel nach [2]

Grundsätzlich nimmt der Fehler bei Entfernungsvorhersagen von geologischen Grenzflächen mit der Erkundungsreichweite zu (Tab. 1). Des Weiteren ist er umso größer, je flacher der Einfallswinkel der Störung zur Tunnelachse ist. Steil stehende Formationen können wegen ihres stärkeren Reflexionsverhaltens genauer vorhergesagt werden. Dies sind aber auch die gefährlicheren für den Tunnelbau, da diese plötzlich auftreten. Nach [5] wird empfohlen, alle 150 m bis 200 m Vortriebsstrecke eine neue Messung durchzuführen.

Tab. 1: Fehlergrenzen bei unterschiedlichen Erkundungsreichweiten nach [5]

Erkundungsreichweite [m]	Fehler bei der Vorhersage von Entfernungen von Grenzflächen
0-50	$\pm 5\%$
50-200	$\pm 10\%$
200-1.000	Mindestens $\pm 20\%$

### 2.3 Integrated Seismic Imaging System (ISIS)

ISIS wird seit 1998 am Geo Forschungs Zentrum-Potsdam (GFZ-Potsdam) in Kooperation mit der Amberg Messtechnik AG (Schweiz) entwickelt. Ziel dieser Zusammenarbeit ist es, das TSP-System (vgl. Abs. 2.2) zur Vorauserkundung im Festgestein entscheidend zu verbessern. An der Entwicklung von ISIS-Komponenten sind darüber hinaus das Institut für Geologie, Abteilung Geophysik der Uni Kiel, die Fachrichtung Geophysik der FU Berlin und das Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben in Hannover (GGA) beteiligt. ISIS soll später über die Amberg Messtechnik AG vertrieben werden.

Ebenso wie beim TSP-Verfahren nutzt ISIS seismische Effekte zur Erkundung des Untergrundes. Die Innovation besteht darin, dass Felsanker, die ohnehin zur Ausbruchssicherung erforderlich sind, als seismische Empfänger mitgenutzt werden. So entsteht eine radiale Antennenanordnung zum Tunnel, die ein besseres Abbild des Gebirges ermöglicht (Abb. 6). Im Vergleich hierzu werden bei der TSP-Methode lediglich zwei Empfänger senkrecht zur Tunnelachse in zusätzlichen Bohrungen installiert.

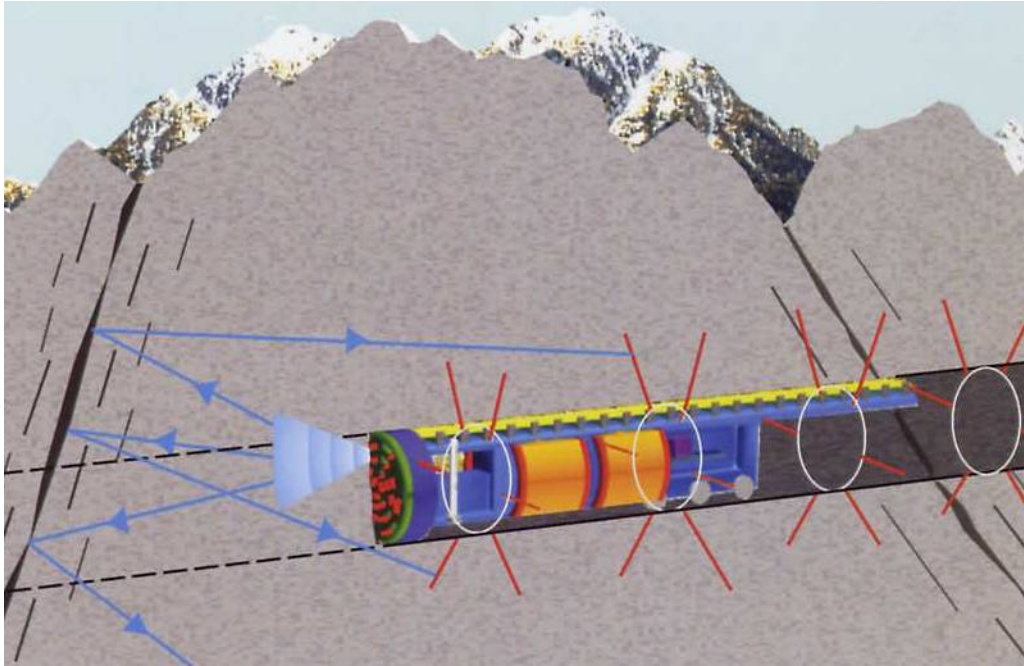


Abb. 6: Radiale Antennenanordnung durch Mitnutzung der Gebirgsanker nach [16]

In die Spitzen der glasfaserverstärkten Gebirgsanker werden Miniatur-Geophone in Form eines orthogonalen Dreibeins eingebaut. Die Anker-Bohrungen können mehrere Meter tief sein und haben einen Mindestdurchmesser von 32 mm. Um eine optimale akustische Anbindung der Empfänger an den Untergrund zu erhalten, werden die Geophon-Anker mit einem 2-Komponenten-Polyesterharz verpress und sind somit verloren. In jüngster Zeit werden daher Geophone entwickelt, die nach Abschluss der Messungen geborgen werden können und vergleichbare Ergebnisse zur vollverklebten Variante liefern.

Nach [4] können die Geophone Signale bis 3 kHz sowie das gesamte seismische Wellenfeld (P-, S- und Oberflächenwellen) registrieren. Auf Grund der rechtwinkligen Anordnung zueinander eignen sie sich besonders zur räumlichen Erfassung von geologischen Störflächen. Weitere Vorteile sind, dass sie automatisch mit Großgeräten und ohne Behinderung des Bauablaufs an jedem beliebigen Punkt der Tunneloberfläche eingebaut werden können. Dies reduziert den Arbeits- und Kostenaufwand deutlich.

Alternativ zur strahlenförmigen Anordnung können die Geophone auch in Richtung des Tunnels nach vorne, d.h. axial eingebaut werden. Somit ergibt sich ein zusätzlicher Blickwinkel für die seismische Tomographie, der zu einer Erhöhung der Auflösung beiträgt.

Neben den seismischen Empfängern ist die Anregungsquelle von entscheidender Bedeutung für das Einsatzspektrum des Integrated Seismic Imaging Systems.

Seismische Sprengungen, wie sie z.B. beim TSP-System verwendet werden, sind ideal, um hochfrequente Energie, d.h. starke Signale, abzustrahlen. Gleichzeitig verfügen sie aber über mehrere gewichtige Nachteile. Neben zahlreichen teuren und zeitaufwendigen Sprengbohrungen dürfen die Arbeiten nur von Personal mit einer Sprengberechtigung ausgeführt werden. Darüber hinaus muss der Vortrieb während der Sprengungen eingestellt werden, wodurch zusätzliche Kosten entstehen. Einige Auftraggeber verbieten daher gänzlich den Einsatz seismischer Sprengungen.

Aus diesen Gründen wurden am GFZ-Potsdam zwei mechanische Impulsquellen mit den folgenden Zielvorgaben entwickelt ([10]):

- Reiner Signalimpuls, kein Doppelschlag o.ä.
- Signale gleicher Energie (exakte Reproduzierbarkeit)
- Handliches, möglichst autarkes und leichtes Gerät
- Freie räumliche Positionierung
- Betriebssicherheit > 50.000 Schläge
- Fernbedienbarkeit

Die Geräte und ihre charakteristischen Eigenschaften sind in Tab. 2 dargestellt.

Tab. 2: Signalquellen des ISIS nach [4]

<b>1. Pneumatischer Hammer (Impulsgenerator)</b>	
Schlaggewicht	5 kg
Impulsdauer	1 ms
Frequenzen	bis zu 2 kHz
Wiederholungsrate	5 s
Maximaler Auslösefehler	≤ 0,1 ms
<b>2. Sweep vibrator (mechanische Schwingungen)</b>	
Frequenzen	10 Hz - 5 kHz
Maximale Kraft	22 kN

Beide Geräte erzeugen Signale hoher Qualität. Die exakte Reproduzierbarkeit der Impulse ist eine notwendige Voraussetzung zur Stapelung der Registrierungen, d.h. zur Unterdrückung der Störsignale (Hintergrundrauschen) durch wiederholte Messungen.

Die Sender können sowohl an einem Minibagger als auch in einer TBM installiert werden, sofern die Betriebsvoraussetzungen gegeben sind (Elektrizität: 24 V / 2 A sowie Druckluft: 50 l/min Ansaugleistung und 8 bar Enddruck).

Analog den Verfahren in der Seismik werden die direkten Wellen mit den transformierten Wellen verglichen. Anhand der Reflexion, Beugung und Streuung der Signale können Aussagen zu Diskontinuitäten im Untergrund, wie z.B. Formationswechsel oder geologischen Störungsflächen, getroffen werden.

Eine erste Interpretation der Daten ist innerhalb von 2 bis 3 h nach Abschluss der Messungen möglich. Die Darstellung der Gebirgsverhältnisse im Umfeld der Tunneltrasse erfolgt in Form eines dreidimensionalen Modells. Dabei werden auch seismische Daten aus dem Erkundungsnahbereich mit geologischen Aufschlüssen verglichen, um die 3D-Abbildung der Reflektoren evtl. zu korrigieren. Ein Beispiel ist in Abb. 7 dargestellt. Dabei wurde ISIS zur Erkundung der Doppelröhren des Gotthard-Basistunnels im Bereich der Multifunktionsstelle Faido eingesetzt. Rote Färbungen deuten einen Wechsel zu härterem Gestein an, blaue hingegen zu weicherer Zonen.

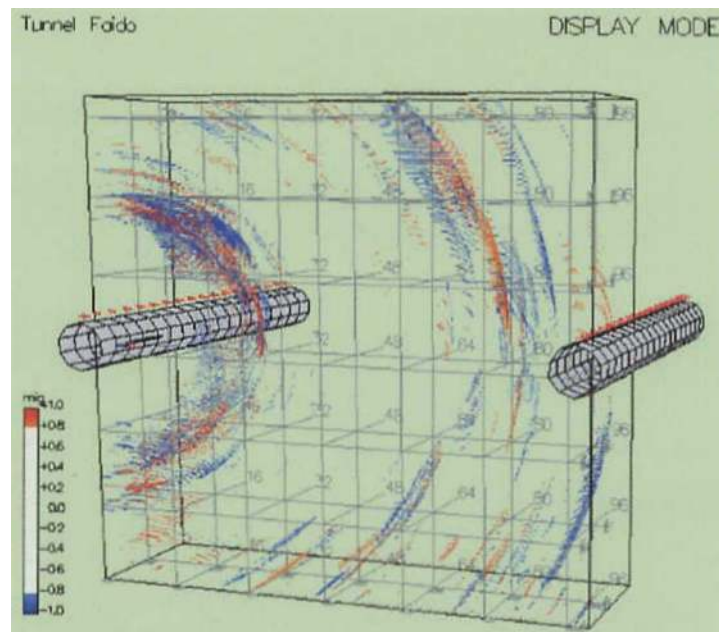


Abb. 7: Bereiche des Gebirgsmodells des Gotthard-Basistunnels (Faido) mit ISIS nach [4]

Nach [3] beträgt die Erkundungsreichweite des ISIS zwischen einigen zehn Metern und hundert Metern. Die Qualität des berechneten Modells ist im hohen Maß abhängig von den Störgeräuschen, die mit aufgezeichnet werden. Das so genannte Rauschen nimmt jedoch mit zunehmender Entfernung von der Tunneloberfläche stark ab.

Die bisherigen Erfahrungen mit ISIS beschränken sich auf Einsätze in den Schweizer Alpen, d.h. kristalline Festgesteine, die optimale Einsatzbedingungen für die Seismik darstellen. Eine Erprobung des Systems im Dauereinsatz auf einer Tunnelbaustelle wurde bis jetzt noch nicht durchgeführt.

## 2.4 True Reflection Tomography (TRT)

Das TRT-System wurde in den späten neunziger Jahren von der Firma NSA Engineering (USA) entwickelt und erstmals 1999 im Tunnelbau eingesetzt. Es handelt sich um ein reflexionsseismisches Verfahren, dass beispielsweise Grenzflächen zwischen Locker- und Festgesteinen sowie zerklüftete, verwitterte und verkars-tete Gebirgsformationen orten kann. Zur räumlichen Darstellung der Messdaten wird es mit dem Software-Paket RockVision3D kombiniert. Ein ergänzendes Programm

zur Erstellung von numerischen Modellen (SMC-3D: Seismic Modelling Calibration-3D), die seismisch kalibriert werden können, ist derzeit in der Entwicklung. In Europa wird TRT über Cementation Skanska vertrieben.

Ein typischer Versuchsaufbau des TRT-Verfahrens ist in Abb. 8 dargestellt. Die seismische Energie wird an der Ortsbrust über Hammerschläge oder Sprengladungen eingebracht. Eine Besonderheit der TRT liegt darin, dass auch „natürliche“ Schallquellen im Tunnelbau, wie z.B. die Schneidradumdrehungen einer TBM oder Bohrungen, für das Tomogramm genutzt werden können. Die seismischen Empfänger werden bis zu 35 m vor der Ortsbrust an der Mantelfläche des Tunnels in ca. 15 cm tiefen Bohrungen installiert. Darüber hinaus wird in einem Abstand von 20 m zur Ortsbrust beidseitig eine Bohrung abgeteuft ( $\varnothing=45$  mm;  $l=3$  m), in denen weitere Geophone montiert werden.

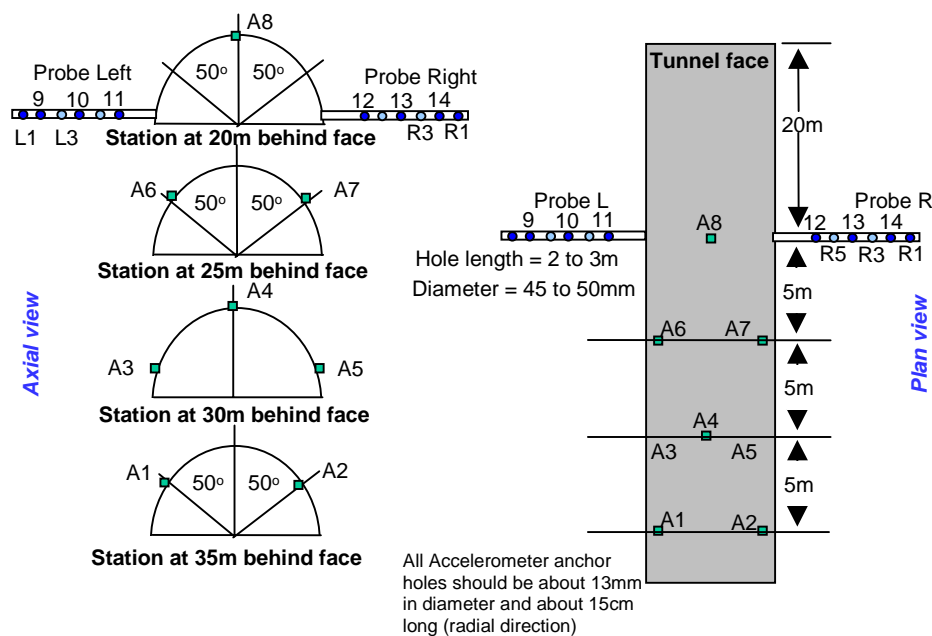


Abb. 8: Versuchsanordnung der TRT nach [11]

Entsprechend [13] wird ca. 4 h für die Datenerfassung und bis zu 20 h für die Auswertung benötigt. Aus diesem Grund spricht NSA von „near-real-time-imaging“. Die Erkundungsreichweite der TRT beträgt 60 m bis 100 m im Vorfeld und 30 m im Umfeld der Tunneltrasse. In Abb. 9 ist das Beispiel eines Tunnels ( $l=600$  m,  $\varnothing=12$  m) in karstgefährdetem Terrain gegeben. Das Tomogramm zeigte eine Kluftzone in 70 m Entfernung zur Ortsbrust an, die später im Vortrieb bestätigt werden konnte. Charakteristisch sind die negativen Reflexionskoeffizienten in diesem Bereich.

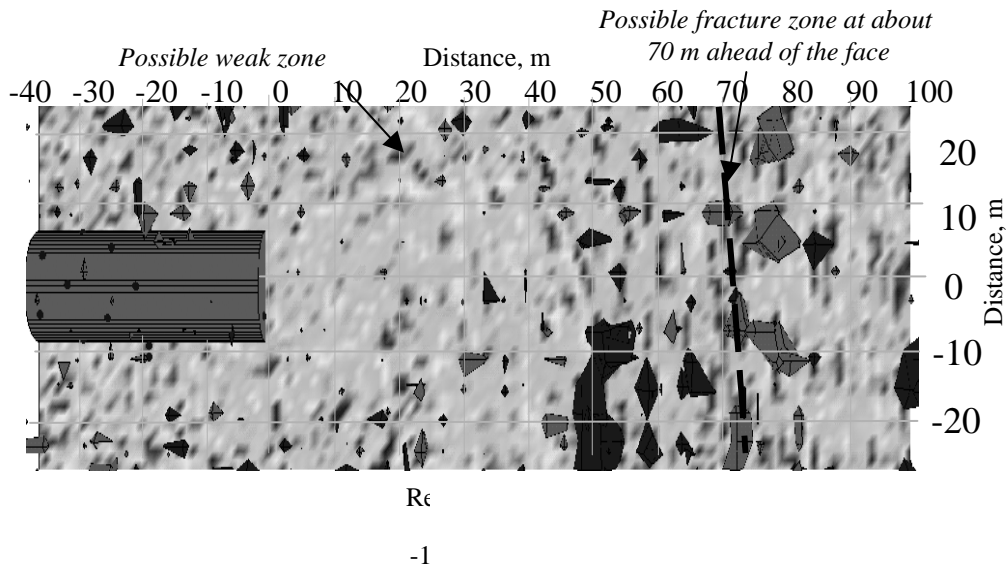


Abb. 9: TRT-Ergebnis nach [11]

Seismische Reflexionsuntersuchungen nutzen Kontraste in der akustischen Impedanz, wie sie an Grenzflächen im Untergrund auftreten. Der Reflexionskoeffizient am Übergang von Schicht 1 zu Schicht 2 errechnet sich nach Gl. (3):

$$R = \frac{\rho_2 \cdot v_2 - \rho_1 \cdot v_1}{\rho_2 \cdot v_2 + \rho_1 \cdot v_1} \quad (3)$$

mit:  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>], Dichte  
 $v$  [m/s], Geschwindigkeit

Je größer der Unterschied in der akustischen Impedanz zweier Materialien ist, desto größer ist der Reflexionskoeffizient und desto leichter kann das seismische Echo registriert werden.

Die Abb. 10 zeigt, wie seismische Reflexionen genutzt werden, um ein dreidimensionales Bild des Untergrundes zu erhalten. Nach [11] bilden jeweils Sender und Empfänger die Brennpunkte einer Ellipse, deren Bahn die mögliche Lage eines Reflektors angibt. Durch Anordnung ausreichend vieler Sender und Empfänger im Raum wird die Position der Grenzfläche auf den Bereich eingeschränkt, in dem sich mehrere Ellipsen überschneiden.



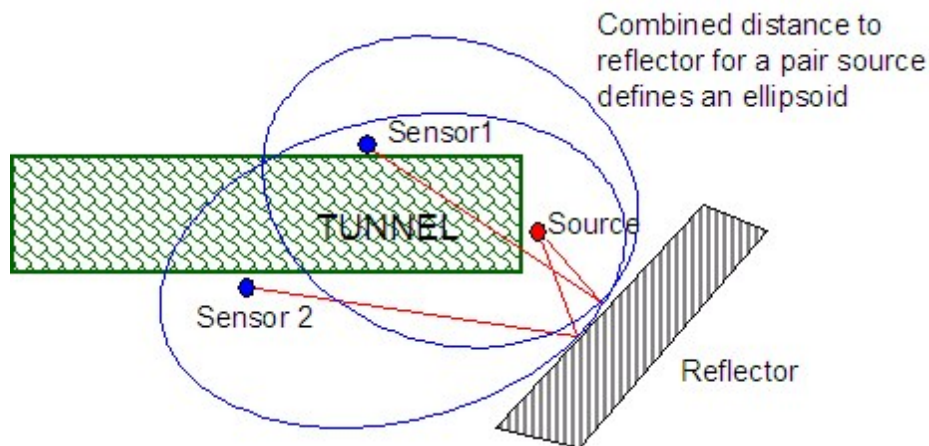


Abb. 10: Prinzip der Reflexionsseismik zur 3D-Darstellung des Untergrundes nach [11]

Bei dem TRT-Verfahren wird ein quaderförmiges Gittermodell des untersuchten Tunnelumfelds aufgestellt, um Lage und Ausdehnung reflektierender Körper zu berechnen. Im so genannten Startmodell wird jedem Gitterpunkt ein Reflexionskoeffizient zugeordnet, der anhand begleitender geologischer Untersuchungen oder aus der Erfahrung abgeschätzt wird. Hiernach wird die Ausbreitung seismischer Wellen zwischen jeder möglichen Kombination aus Sender, Knotenpunkt und Empfänger simuliert. Nach einem Vergleich von berechneten und gemessenen Laufzeiten und Amplituden, werden gegebenenfalls die Reflexionskoeffizienten einzelner Knoten korrigiert und weitere Simulationen durchgeführt. Erst bei einer hinreichend genauen Anpassung an die Messergebnisse wird die Iteration abgebrochen.

Diese Vorgehensweise zur Auswertung von reflektierten S- und P-Wellen ist in der Seismik weit verbreitet und wird auch als iterative Vorwärtsmodellierung (Inversionsverfahren) bezeichnet. In Abb. 11 ist das Prinzip der Vorwärtsmodellierung dargestellt.

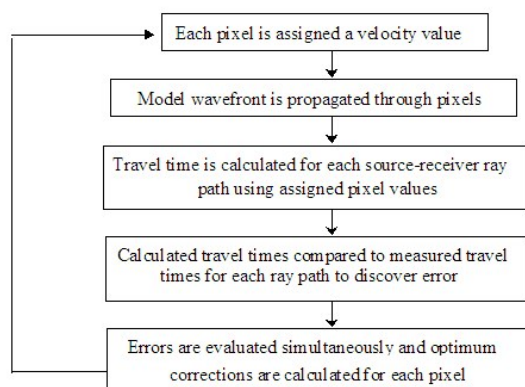
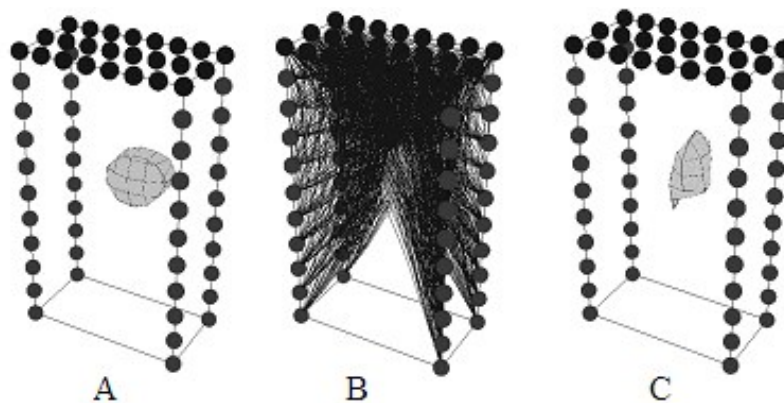


Abb. 11 : Prinzip der Vorwärtsmodellierung nach [11]: A) Startmodell; B) Simulation; C) modifiziertes Modell

Da sich durch diese Methode ein räumliches Bild von Anomalien im Untergrund erzeugen lässt, spricht man in diesem Zusammenhang auch von Reflexions-Tomographie /Holographie.

Einige allgemeine Regeln zur Anwendung des TRT-Verfahrens können aus theoretischen Überlegungen und empirischen Beobachtungen abgeleitet werden:

- 1) Die Auflösung wird bestimmt durch den Gitterabstand im Model, die kürzeste, noch registrierte Wellenlänge und den Abstand zum Empfänger. Im Allgemeinen liegt sie im Nahbereich bei etwa 1m und nimmt mit der Entfernung deutlich ab. Ebenso kann sie nur maximal ein Viertel der kürzesten Wellenlänge betragen.
- 2) Je nach Ausrichtung der Beschleunigungsaufnehmer, kann der Erkundungsschwerpunkt auf das Vorfeld oder aber auf das seitliche Umfeld gelegt werden.

- 3) Eine exakte Positionierung von Sender und Empfänger ist entscheidend für die Genauigkeit des Verfahrens.

## 2.5 Sonic Softground Probing (SSP)

Das SSP-System ist ein Vorauserkundungsverfahren für den maschinellen Tunnelbau im Lockergestein. Es wird von der Herrenknecht AG in Verbindung mit den ebenso von der Herrenknecht AG produzierten Mix-, Slurry- und Erddruckschilden vertrieben und weiterentwickelt. Initiiert wurde die Entwicklung durch die Partner der ARGE „4. Röhre Elbtunnel“, bei der dieses System erstmals 1997 in einer sehr heterogenen Geologie (Kies, Sand, Schluff, Ton, Torf und Schlick) zum Einsatz kam.

Die Aufgaben des SSP sind nach [6] im Einzelnen:

- Orten und Lagebestimmung von Diskontinuitäten mit unregelmäßiger Oberfläche (z.B. Findlinge) in maximal 50 m Entfernung zur Ortsbrust
- Lokalisieren von planaren Diskontinuitäten (z.B. Übergänge zu anderen Lockergesteinsschichten, Verwerfungszonen)
- Ausgabe eines 3D-Bodenmodells in Echtzeit
- Klassifizierung der Festigkeit und Homogenität des durchfahrenen Lockergesteins

In Abb. 12 sind die Komponenten und das Funktionsprinzip des Sonic Softground Probing dargestellt. Ebenso wie bei den Systemen TSP, ISIS und TRT handelt es sich hierbei um ein reflexionsseismisches Verfahren.

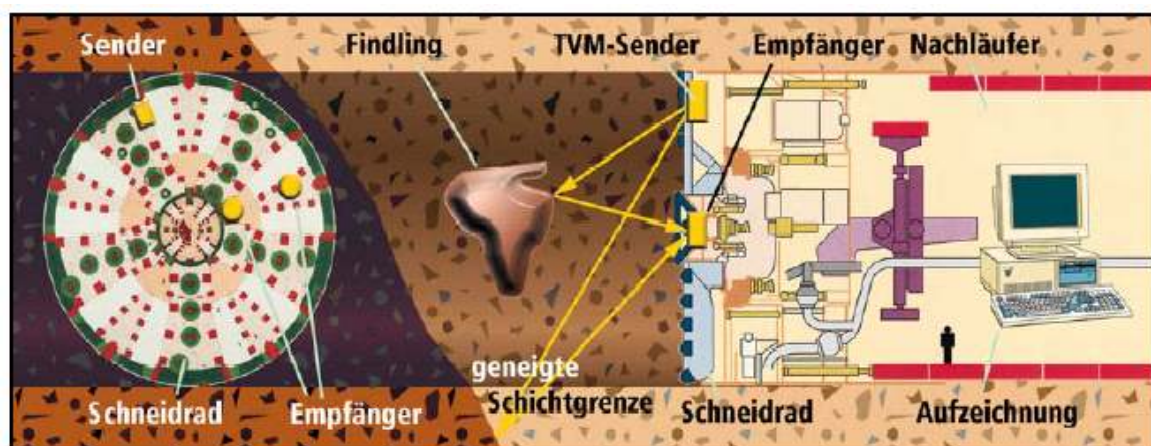


Abb. 12: Komponenten und Funktionsprinzip des SSP-Systems aus [1]

Beim SSP wird das frequenzcodierte akustische Signal durch einen Sender (Inertialvibrator) im Schneidrad in das Stützmedium und von dort in den Untergrund eingeleitet. Die reflektierten seismischen Wellen werden von den Empfängern im Schneidrad registriert und digitalisiert. Von dort aus werden die Messdaten über Schleifringe an der Rotationsachse des Bohrkopfes zum Schaltschrank im Nachläufer übertragen. Hier findet die Weiterverarbeitung der Daten bis hin zur Berechnung eines dreidimensionalen Bodenmodells statt. Im Einzelnen lässt sich die Datenverarbeitung entsprechend [12] in die folgenden fünf Kategorien einteilen:

1. **Rauschunterdrückung:** Die Nutzsignale werden vom Hintergrundrauschen, das z.B. durch die Schneidradumdrehungen oder andere Aggregate der TBM verursacht wird, getrennt (Verbesserung des „Signal-Noise-Verhältnisses“). Dies geschieht u.a. durch einen Entspikungsfiler, der kurzzeitige amplitudenstarke Empfangssignale (spikes) entfernt. Durch eine Kreuzkorrelation zwischen Sende- und Empfangssignal werden die größten Energieübertragungen und damit die stärksten Reflektoren bestimmt (vgl. Abb. 13).

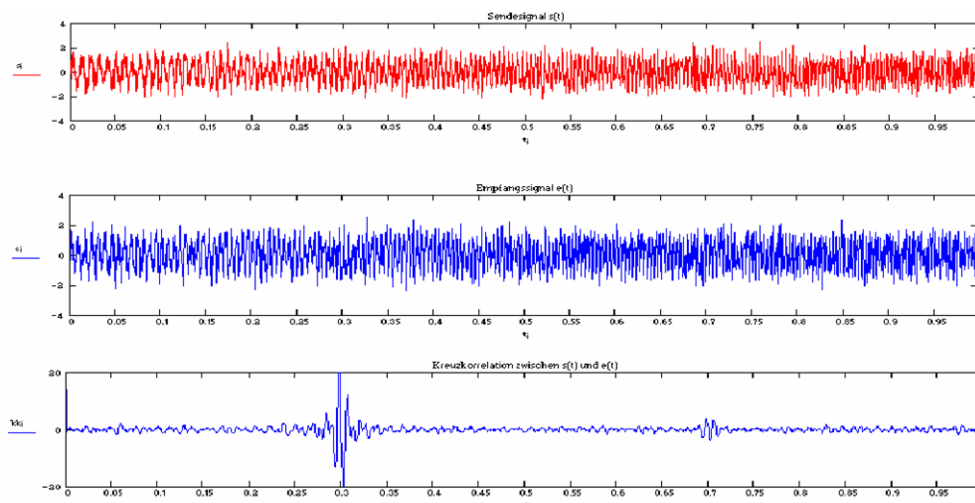


Abb. 13: Kreuzkorrelation von Sende- und Empfangssignal aus [1]

2. **Energieausgleich:** Der Energieverlust seismischer Wellen durch Absorption (Dämpfung) und sphärischer Divergenz (Amplitudenabnahme, Auseinandergelien) muss berücksichtigt werden. Da die Amplituden mit zunehmender Eindringtiefe abnehmen und höherfrequente Wellen eine stärkere Dämpfung erfahren als niederfrequente, werden später registrierte Wellen in der Auswertung stärker gewichtet.

3. **Wellenfeldtrennung:** Die direkten Wellen werden von den reflektierten Wellen getrennt. Dies geschieht für unterschiedliche Abschnitte, in die der untersuchte Raum vor der Ortsbrust unterteilt wird.
4. **Geschwindigkeitsberechnung:** Aus den Messdaten werden die Geschwindigkeiten der seismischen Wellen im Untergrund iterativ berechnet (Abb. 14). Bei variierteter Position des Empfängers muss sich die Lage des Reflektors im Raum als unverändert darstellen. Für alle seismischen Spuren eines reflektierenden Punktes müssen gleiche Reflexionen bestimmt werden.

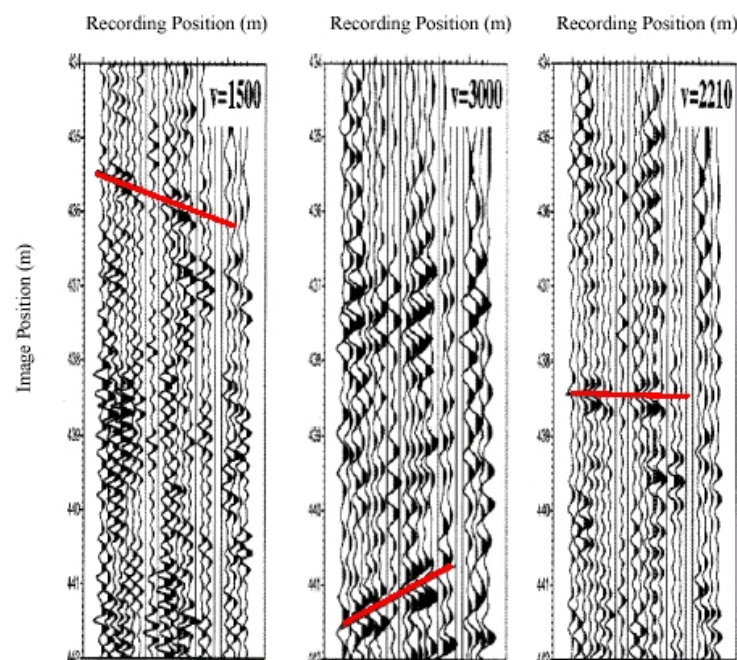


Abb. 14: Geschwindigkeitsberechnung aus [1]

5. **3D-Strukturmodell (Migration):** Durch Kombination der zweidimensionalen Entfernungsbilder wird die Lage der Reflektoren in einem quaderförmigen Bereich ( $b/h/l = 20\text{ m}/20\text{ m}/40\text{ m}$ ) vor der TBM berechnet und dargestellt. Der Quader kann aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet und virtuell durchfahren werden. In Abb. 15 ist ein Beispiel für das Strukturmodell dargestellt. Grüne und rote Farben markieren hohe Reflexionseigenschaften, die auf härtere Materialien hinweisen. In dem dargestellten Fall handelt es sich um eine diagonal durch den Körper verlaufende Geschiebemergellinse.

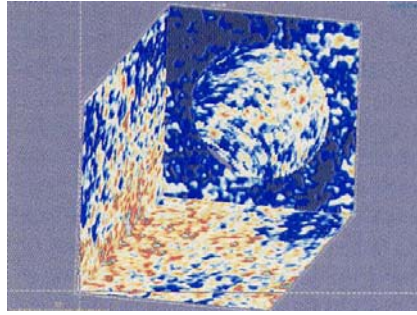


Abb. 15: SSP-Ergebniskubus (20 m x 20 m x 40 m) nach [6]

Das SSP ist ein System, welches in dem Schneidrad von Mix-, Slurry- und Erddruckschilden integriert ist. Es ist somit nur in Lockergesteinen (Kies, Sand, Ton etc.) bis hin zu leichtem Fels (Mergel, Sandstein etc.) einsetzbar. Des Weiteren muss der Maschinendurchmesser mindestens 5 m betragen. Andernfalls würde der Abstand zwischen Sender und Empfänger zu gering ausfallen, um ein dreidimensionales Bild des Untergrundes berechnen zu können. Der erkundete Bereich vor der Ortsbrust hat in etwa die Abmessungen Breite/ Höhe/ Länge =  $D+2$  m/  $D+2$  m/ 40 m ( $D$  = Tunneldurchmesser).

Eine genaue Benennung der anstehenden Hindernisse ist bei Vortriebsbeginn noch nicht möglich. Beim erstmaligen Antreffen von Anomalien werden Erfahrungswerte gesammelt, die später zur Interpretation gleichartiger Detektionen genutzt werden können. Insofern findet erst beim Vortrieb eine Kalibrierung des SSP-Systems statt. Ergänzend kann auf Erfahrungen und Datenbanken anderer Baustellen in ähnlicher Geologie mit gleichem Maschinentyp zurückgegriffen werden. Im Allgemeinen werden die Messergebnisse des SSP noch mit anderen Vortriebsparametern abgeglichen, wie beispielsweise dem Drehmoment und dem Bohrfortschritt.

Nach [6] sind bisher Erkundungsreichweiten von über 40 m möglich, wobei die Auflösung im Nahbereich unter einem Meter liegen kann. Die seismischen Empfänger sind zudem so installiert, dass sie hauptsächlich axial, d.h. in Vortriebsrichtung des Tunnels, sondieren. Die Auflösung zur Seite (lateral) ist somit deutlich geringer.

In der Tab. 3 sind die erforderlichen Eigenschaften des Reflektors angegeben, die eine Ortung durch das SSP-System möglich machen. Die Tab. 4 gibt einen Überblick über bereits detektierte und theoretisch detektierbare Anomalien durch das SSP.

Tab. 3: Erforderliche Reflektoreigenschaften zur Ortung durch SSP aus [1]

Reflektoreigenschaft	Größenordnung
Impedanzkontrast	>20%
Objektgröße	>0,5 m
Lage des Reflektors	Möglichst in der Tunneltrasse
Orientierung des Reflektors	Vorzugsweise parallel zur Ortsbrust
Entfernung des Reflektors	≤40 m

Tab. 4: Detektierte und detektierbare Anomalien mittels SSP aus [1]

	detektiert	detektierbar
HDI Dichtblöcke	ja	ja
Senkkästen	ja	ja
Kieslinsen	ja	ja
Vertikale Schichtgrenzen	nein	ja
Horizontale Schichtgrenzen	nein	nein
Findlinge	nein	ja
Hohlräume	nein	ja

### 3 Zusammenfassung und Bewertung der Verfahren

In der Tab. 5 sind die wichtigsten Merkmale der fünf Tunnelbauspezifischen Systeme zusammengefasst.

Mit Ausnahme von BEAM nutzen alle Systeme das Prinzip der Reflexionsseismik, um ein dreidimensionales Baugrundmodell des Tunnelumfeldes zu erstellen und geotechnisch relevante Anomalien zu orten. BEAM ist eine Kombination aus induzierter Polarisation und fokussierender Geoelektrik, mit der entsprechende Aussagen getroffen werden können.

Für eine gute Auflösung von Störungsflächen sind in der Seismik immer große Auslagen von Sendern und Empfängern erforderlich. So können reflektierende Objekte aus vielen verschiedenen Blickwinkeln durchschallt werden, wodurch die Rekonstruktion eines dreidimensionalen Abbildes aus den Messdaten erleichtert wird (Prinzip der Holographie). Im Tunnel ist dies nur möglich, wenn Sender und Empfänger

auch in radialen oder axialen Bohrungen installiert werden. Optimal sind sehr tiefe und lagegenaue Bohrungen (100 m und mehr), wodurch aber jede Wirtschaftlichkeit der Vorauserkundung verloren gehen würde. Bei den Systemen TSP, ISIS und TRT sind Bohrungen von ca. 3 m üblich, wobei Lageabweichungen von bis zu 20 cm toleriert werden.

Tab. 5: Übersicht zu den Vorauserkundungsverfahren im Tunnelbau

<b>Tunnelbau-spezifische Systeme</b>					
	<b>BEAM-TBM</b>	<b>TSP</b>	<b>ISIS</b>	<b>TRT</b>	<b>SSP</b>
<b>Hersteller / Institut</b>	Geohydraulik Data	Amberg Messtechnik (AMT)	Geo Forschungs Zentrum Potsdam (GFZ)	NSA Engineering	Herrenknecht AG
<b>Entwicklungsbeginn</b>	1998	Frühe 1990er Jahre	1998	1999	1997
<b>Geophysikalisches Prinzip</b>	Induzierte Polarisation und fokussierende Geoelektrik	Reflexionsseismik	Reflexionsseismik	Reflexionsseismik	Reflexionsseismik
<b>Einsatzgebiet (Geologie)</b>	Locker- und Festgestein	Festgestein	Festgestein	Festgestein	Lockergestein
<b>Position des Signalgebers</b>	Ortsbrust	Tunnelflanken	Tunnelflanken	Ortsbrust	Ortsbrust
<b>Position des Empfängers</b>	Ortsbrust	Tunnelflanken	Tunnelflanken	Tunnelflanken	Ortsbrust
<b>Reichweite im Vorfeld</b>	$2 - 5 \varnothing_{\text{Tunnel}}$ (ca. 30 m)	150 – 200 m	200 m im Kristallin	60 – 100 m	40 m
<b>Messdauer / Down-time</b>	Kontinuierliche Messung	Bis zu 2 h	ca. 2 h	ca. 4 h	Kontinuierliche Messung
<b>Auswertung</b>	Echtzeit	Bis zu 6 h	2 – 3 h	Bis zu 20 h	Echtzeit
<b>TBM-kompatibel</b>	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
<b>Messung / Auswertung durch</b>	Baustellenpersonal	Baustellenpersonal	Baustellenpersonal	Baustellenpersonal	Baustellenpersonal
<b>Referenzen</b>	Ginori-Tunnel	Vereina-Tunnel, Zuckerberg-Tunnel	Piora-Mulde	Unterwald-Tunnel	4. Röhre Elbtunnel, Pannerdensch Kanaal-Tunnel



Bei dem SSP-System handelt es sich um ein schneidradintegriertes Verfahren, das eigens für maschinelle Vortriebe im Lockergestein entwickelt wurde. Der Einsatz von TSP, ISIS und TRT ist auf Festgesteine begrenzt. Sie kommen sowohl bei konventioneller Bauweise als auch im Schildvortrieb von den Tunnelflanken aus zur Anwendung, die zu diesem Zweck auf den letzten 50 m vor der Ortsbrust noch zugänglich sein müssen. Das BEAM-System ist unabhängig von der Vortriebsart sowohl für Locker- als auch für Festgesteine geeignet und bietet somit das größte Einsatzspektrum. Mit Ausnahme von ISIS, welches sich noch in der Erprobungsphase befindet, verfügen alle Systeme bereits über Referenzen bei größeren Tunnelbauwerken.

Ein gewichtiger Nachteil der seismischen Verfahren mit Ausnahme des SSP ist, dass während der Messungen alle anderen Arbeiten für ca. 2 h bis 4 h ruhen müssen, um die Störsignale deutlich zu reduzieren. Auch sind seismische Sprengungen aus Bohrungen heraus kosten- und zeitintensive Anregungsquellen, so dass derzeit mechanisch arbeitende Alternativen entwickelt werden (ISIS).

Im Unterschied zu den kontinuierlich messenden, schneidradintegrierten Systemen BEAM-TBM und SSP, werden TSP, ISIS und TRT nur im Bedarfsfall eingesetzt. Je nach Reichweite ist nur alle 60 bis 150 m Vortriebsstrecke eine Messung notwendig.

Die Auswertung der Messdaten erfolgt bei den schneidradintegrierten Verfahren nahezu in Echtzeit, während dies bei der Seismik im Durchschnitt 6 h in Anspruch nehmen kann. Ausgeglichen wird dies jedoch durch die wesentlich größeren Erkundungsreichweiten der Geoakustik von bis zu 150 m gegenüber ca. 30 m bei der BEAM-TBM. Im Regelfall soll die Auswertung und Interpretation der Messdaten durch geschultes Baustellenpersonal möglich sein. Insbesondere in risikoreicher Geologie empfiehlt sich eine zusätzliche Beratung und Überwachung durch die Hersteller.

Grundsätzlich gilt, dass keines der beschriebenen Verfahren eine absolute Sicherheit für den Tunnelbauer vor Havarien bietet. Insbesondere die Auflösung, d.h. der minimale Abstand zweier Körper, bei dem beide gerade noch einzeln zu identifizieren sind, nimmt mit der Entfernung zu den Messapparaturen rapide ab. Dies ist insofern unproblematisch, als dass kleine Hohlräume nur in unmittelbarer Nähe zum Tunnel bautechnisch relevant sind, während aus der Ferne lediglich größere Höhlen die Statik gefährden können.

Belastbare Interpretationen der Messdaten sind oft erst dann möglich, wenn andere Informationsquellen hinzugezogen werden. Zum einen können dies Erkundungsbohrungen und Sondierungen von der Geländeoberfläche aus oder aus dem Tunnel heraus sein. Zum anderen findet vortriebsbegleitend eine Kalibrierung der Systeme statt, d.h. die aufgestellten Baugrundmodelle werden mit der später angetroffenen Geologie verglichen und gegebenenfalls modifiziert. Ebenso können die Erfahrungen aus vergleichbaren Projekten berücksichtigt werden.

Die Tatsache, dass auf andere Erkundungsmaßnahmen nicht vollständig verzichtet werden kann und die Systempreise oft im sechsstelligen Bereich liegen, haben die geophysikalische Vorauserkundung im Tunnelbau noch nicht alltäglich werden lassen. Wegen des großen Gefährdungspotentials von z.B. verkarstetem Gebirge wird aber weiterhin an der Optimierung der Methoden gearbeitet. Darüber hinaus könnten die Verfahren für folgende Zwecke eingesetzt werden:

- Verzicht auf Überdimensionierung der Tunnelschale, wenn relevante felsmechanische Parameter im Voraus bekannt sind
- Dokumentation der Ausbruchsklassen, um eventuelle Nachtragsforderungen der Auftragnehmer zu beurteilen
- Grundwasserschonendes Bauen

## 4 Literatur

- [1] Adam, N.: Anwendung erweiterter Methoden der Baugrunderkundung zur Minimierung von Fehlerquellen bei Schildvortrieben. Diplomarbeit an der Fachhochschule Nordostniedersachsen Suderburg, 2002 (unveröffentlicht)
- [2] Informationsbroschüre der Amberg Messtechnik AG, Regensdorf, 2002
- [3] Borm, G.; Giese, R.: Weiter sehen als der Tunnel reicht. Beitrag im HGF-Jahresheft 2003, 2002
- [4] Borm, G.; Giese, R.; Klose, C.; Mielitz, S.; Otto, P.; Bohlen, Th.: ISIS – Integrated Seismic Imaging System for the geological prediction ahead of underground construction. Extended Abstract für die EAGE 65th Conference & Exhibition – Stavanger, Norway, 2.-5. Juni 2003, 2003
- [5] Dickmann, T.; Sander, B.: Drivage-Concurrent Tunnel Seismic Prediction (TSP). Felsbau 14 (1996) Nr. 6
- [6] Dickmann, T.: Tunnelbaubegleitende Vorauserkundung im Lockergestein. Felsbau 16 (1998) Nr. 4
- [7] Geohydraulik Data: Looking forward with BEAM. Informationsbroschüre, 2002
- [8] Geohydraulik Data: BEAM On Board - Maßnahmen zur Installation des BEAM-Vorauserkundungssystems sowie Anforderungen an TBM-Hersteller und Baustelle. Informationsbroschüre, 2002
- [9] Geohydraulik Data im Internet: [www.geohydraulikdata.de](http://www.geohydraulikdata.de). Zuletzt aktualisiert 01/2003
- [10] GeoForschungsZentrum-Potsdam im Internet: [www.gfz-potsdam.de](http://www.gfz-potsdam.de). Zuletzt aktualisiert 06/2002
- [11] Hanson, D.; Haramy, K.; Neil, D.: Seismic Tomography Applied to Site Characterization. Geo-Denver 2000 Conference, Denver (CO), 2000
- [12] Herrenknecht, M.: Hightech im maschinellen Tunnelvortrieb. Messen in der Geotechnik, Schriftenreihe am IGB der TU Braunschweig, 2000
- [13] Neil, D.; Descour, J.: 3D forward vision for Mt. Fuji's tunnels. Tunnels & Tunneling, 05/2002

- [14] Neil, D.; Descour, J.; Nishioka, K.; Shirasagi, S.; Yamamoto, T.: Imaging Ground Conditions ahead of the Tunnel Face Using True Reflective Tomography "TRT". AITES-ITA Downunder 2002 Congress, Sydney, Australia, 2002
- [15] Pöttler, R.; Schneider, V.; Rehfeld, E.; Quick, H.: Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen. Felsbau 20 (2002) Nr.3
- [16] Stroink, L.: Geotechnologien. Informationsbroschüre zum Forschungs- und Entwicklungsprogramm Geotechnologien, Potsdam, 2002

Autoren:

Dipl.-Ing. J. Schmitt  
Akad. Oberrat Dr.-Ing. J. Gattermann  
Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik  
Technische Universität Braunschweig  
Gaußstraße 2  
38106 Braunschweig  
Tel.: (0531) 391-2730  
E-Mail: igb@tu-bs.de