

Seismische Vorauserkundung im Tunnelbau mit konvertierten Oberflächenwellen

Stefan Lüth, Rüdiger Giese, Peter Otto, Kay Krüger, Sylvio Mielitz, Günter Borm

For a safe construction and operation of underground excavation it is essential to have access to as many data as possible about the soil and/or rock properties around the construction. Before the start of the construction, geological and geophysical investigations are to be performed from the surface above the planned excavation and from boreholes or smaller exploratory tunnels. Seismic measurements play an increasingly important role in geological prediction during tunnel construction. All systems currently in use are based on excitation and recording of seismic body waves and their reflections from structures ahead of the tunnel face which are extracted and used for the detection of heterogeneities. At the GFZ Potsdam, the Integrated Seismic Imaging System (ISIS) has been developed during recent years. The system consists of a pneumatic hammer as seismic source and three-component receivers implemented at the tips of anchor rods typically used for underground construction. The system software processes the measured data and is able to image the results in space together with other geological and geotechnical information. Test measurements in the Piora adit at the Gotthard base tunnel construction site as well as synthetic modelling have shown that surface waves which are excited at the tunnel wall and converted at the tunnel face provide the strongest signal for seismic prediction ahead of the tunnel face. This wave type is called RSSR-reflection. It travels as a surface wave from the source at the tunnel wall to the tunnel face where it converts to an S-wave. This wave is reflected at a heterogeneity ahead of the tunnel, returns to the tunnel face and converts back to a surface wave. The use of this wave type allows for a stable seismic prediction ahead of the tunnel face without much interference with the construction operations since no sources and receivers need to be placed at the tunnel face.

Einleitung

Eine wichtige Voraussetzung für den sicheren Bau und Betrieb von Untertagebauwerken ist eine möglichst genaue Kenntnis der Boden- bzw. Gesteinseigenschaften in der Umgebung des Bauwerks. Deshalb werden z. B. vor der Konstruktion eines Tunnels Erkundungsbohrungen bzw. Stollen abgeteuft und von der Erdoberfläche aus geologische und geophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Diese Untersuchungen liefern jedoch nur ein unvollständiges Bild der geologischen und geotechnischen Bedingungen im Verlauf der geplanten Trasse, da Bohrungen in ihrer Zahl begrenzt sind und von der Erdoberfläche her ausgeführte Untersuchungen eine relativ geringe Auflösung besitzen. Deshalb sind seit einigen Jahren Erkundungssysteme in der Entwicklung, die es ermöglichen, mit Hilfe geophysikalischer Messungen während des Tunnelvortriebs die Lage von geologischen Gefahrenzonen im Vorfeld der Tunnelauffahrung zu bestimmen. Die herkömmlichen Systeme nutzen seismische Verfahren, die auf Grund der großen Reichweite und hohen Auflösung anderen geophysikalischen Verfahren überlegen sind. Sie arbeiten nach folgendem Grundprinzip: Seismische Raumwellen (P- oder S-Wellen) werden entweder nahe der seitlichen Tunnelwand oder an der Tunnelortsbrust angeregt. Diese werden an geologischen Heterogenitäten reflektiert oder rückgestreut und von Empfängern aufgenommen, die um den Tunnel oder direkt an der Ortsbrust platziert werden. Eine räumliche Abbildung der Reflektoren erfolgt durch Reflexionstomographie bzw. Migration.

Seit den frühen 90er Jahren sind weltweit verschiedene tunnelseismische Vorauserkundungssysteme eingesetzt

worden. Für den Tunnelbau in Lockergesteinen wurde das sogenannte *Sonic Softground Probing* (SSP) entwickelt (Kneib et al., 2000). Dieses System nutzt einen hochfrequenten P-Wellen-Vibrator und Beschleunigungsaufnehmer, die beide im Schneidrad einer Tunnelbohrmaschine befestigt sind. Während des Bohrens werden die seismischen Messungen durchgeführt. SSP liefert ein reflexionsseismisches Abbild von P-Wellen-Reflektoren bis maximal 100 m vor der Tunnelortsbrust. Im Festgestein wird neben anderen das *Tunnel Seismic Prediction* (TSP)-System eingesetzt (Dickmann und Sander, 1996). Dieses System nutzt bis zu 30 in Bohrlöchern seitlich in der Tunnelwand platzierte Sprengstoffladungen als Quellen und zwei bis vier Drei-Komponenten-Beschleunigungsaufnehmer in Bohrlöchern. Sprengladungen und Empfänger sind in etwa 20 bis 50 m langen Profilen seitlich an der Tunnelwand angeordnet. Die Auswertung der Messungen besteht in der Identifizierung von Reflexionen von Störzonen vor der Ortsbrust anhand ihrer Laufzeitkurven in den Registrierungen.

Das *Integrierte Seismische Imaging System* ISIS, das am GeoForschungsZentrum Potsdam entwickelt wurde, ist in den vergangenen Jahren vor allem zur tomographischen Erkundung des Tunnelumfeldes genutzt worden. Das Messsystem besteht aus einer nicht-explosiven seismischen Quelle (Impakthammer oder magnetostriktiver Sonar-Vibrator), die seitlich an der Tunnelwand angebracht wird und dort seismische Wellen anregt. Diese werden dann von Geophonen aufgenommen, die in den Spitzen von Gebirgsankern befestigt sind (Abb. 1). Für die tomographische Erkundung des Tunnelumfeldes wurden 10 bis 40 Anker mit Drei-Komponenten-Geophonen auf ausge-

wählten Profilen installiert und entlang dieser Profile dann mit einer Quelle in dichtem Schusspunktabstand angeregt. Die gemessenen Datensätze wurden zur tomographischen Bestimmung von P- und S-Wellen-Geschwindigkeiten verwendet (Giese et al., 2005), eignen sich aber auch grundsätzlich für reflexionsseismische Auswertung (Lüth et al., 2005).

Wellentypen in der Tunnelseismik

Um die bei tunnelseismischen Messungen registrierten Wellentypen zu verstehen, wurden an der Universität Kiel Modellrechnungen mit Hilfe einer Finite-Differenzen-Methode zur Lösung der Wellengleichung durchgeführt. Für die numerische Simulation wurde ein Modell erstellt, das aus einem Tunnel mit einem Durchmesser von 10 m besteht, der von einem homogenen Festgestein umgeben ist (Bohlen et al., 2006). Vor der Ortsbrust des Tunnels befindet sich eine Störungszone, deren Inneres geringere seismische Geschwindigkeit hat als die Umgebung. Es wurde ein Schuss an der Tunnelwand simuliert, der von einer Reihe von Geophonen entlang eines Profils registriert wurde. An der Schussposition wurde mit einem Ricker-Wavelet mit einer dominanten Frequenz von 500 Hz angeregt. Die Auswertung der Simulationen besteht zunächst in einer Analyse des Wellenfeldes in Abhängigkeit der Zeit nach der Anregung. Zunächst zeigen sich die bei einer Anregung einer Punktquelle typischen P- und S-Wellen. Es wird eine Anregung senkrecht zur Tunnelwand simuliert, daher breiten sich P-Wellen vor allem senkrecht

zur Tunnelwand aus, während S-Wellen sich vor allem parallel zur Tunnelachse ausbreiten. Mit der größten Amplitude lässt sich eine Rayleigh-Welle beobachten, die sich mit etwa 92 % der S-Wellen-Geschwindigkeit entlang der Tunnelwand ausbreitet. Erreicht diese Rayleigh-Welle die Tunnelortsbrust, wird ein großer Teil ihrer Energie in eine S-Welle umgewandelt, die sich von der Ortsbrust ausgehend weiter in Vortriebsrichtung ausbreitet. Ein Teil von ihr wird an der Störungszone vor der Ortsbrust reflektiert und kehrt als S-Welle zur Tunnelortsbrust zurück. Hier wird nun ein Teil der reflektierten S-Welle in eine Rayleigh-Welle zurück konvertiert, die sich dann entlang der Tunnelwand ausbreitet. In den simulierten Seismogrammen zeigt sich der hier beschriebene Typ von Reflexion als deutlicher Einsatz und einer Laufzeitkurve mit negativer Steigung. Die Laufzeit dieses Einsatzes wird mit zunehmendem Schuss-Empfänger-Abstand kleiner. Seinem Laufweg entsprechend wird dieser Wellentyp als RSSR-Reflexion bezeichnet (Abb. 2).

Messungen im Piora-Sondierstollen des Gotthard-Basistunnels

Als wichtiger Bestandteil des künftigen Europäischen Hochgeschwindigkeits-Schienennetzes wird der Gotthard-Basistunnel gebaut. Er wird mit seiner Fertigstellung voraussichtlich im Jahr 2015 eine Länge von 57 km erreichen und damit der längste Verkehrstunnel der Welt sein. Seine Trasse schneidet zahlreiche geologische Schwächezonen, die für den Bau des Tunnels besonders kritisch sind: das Tavetscher

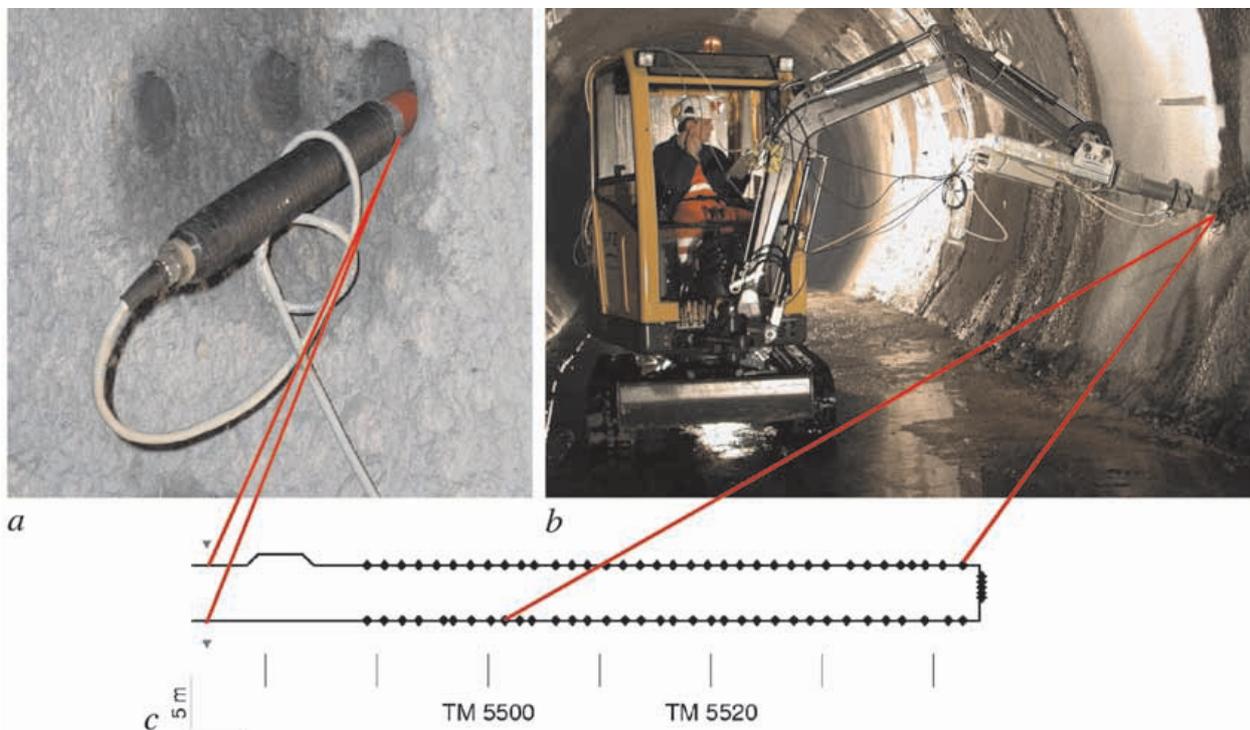


Abb. 1: (a) In der Tunnelwand befestigter Gebirgsanker mit Geophonkabel, (b) Kleinbagger mit Schlaghammer, (c) Verteilung der Geophon- und Schlagpunkte im Piora-Sondierstollen (von oben). Die Lage der Drei-Komponenten-Geophone wird durch graue invertierte Dreiecke angezeigt, die Hammerschlagpunkte durch schwarze Rauten. (Fotos: S. Mielitz, GFZ)

(a) Anchor fixed in the tunnel wall with geophone cable, (b) small excavator with pneumatic hammer, (c) distribution of geophone and impact locations (top view). Three-component geophones are indicated by grey inverted triangles, impact locations by black diamonds.

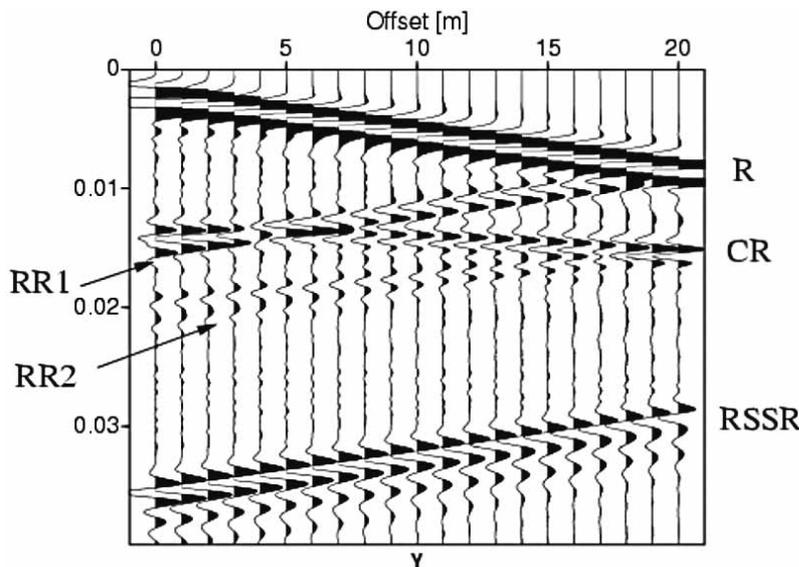


Abb. 2: Seismogramme der numerischen Simulation eines tunnelseismischen Experiments. Es ist die Komponente senkrecht zur Tunnelwand dargestellt. Deutlich zu erkennen sind folgende Phasen: R – direkte Rayleigh-Welle, CR – einmal um den Tunnel zirkulierende Rayleigh-Welle, RR1 – Ortsbrustreflexion der direkten Rayleigh-Welle, RR2 – Ortsbrustreflexion der zirkulierenden Rayleigh-Welle, RSSR – Konvertierte und an einer Störungszone vor der Ortsbrust reflektierte S-Welle.

Seismograms of a numerical simulation of tunnel seismic measurements. The component perpendicular to the tunnel wall is shown. The following phases can be identified: R – direct Rayleigh wave, CR – Rayleigh wave which circulated once around the tunnel, RR1 – tunnel face reflection of the Rayleigh wave, RR2 – tunnel face reflection of the circulating Rayleigh wave, RSSR – converted and reflected S-wave from a fault zone ahead of the tunnel face.

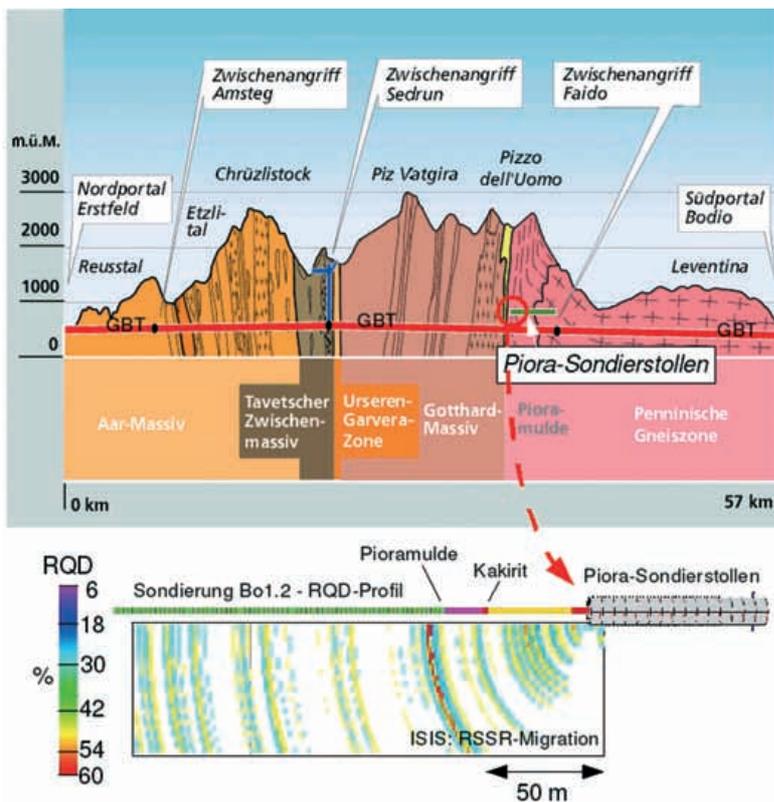
CR – Rayleigh wave which circulated once around the tunnel, RR1 – tunnel face reflection of the Rayleigh wave, RR2 – tunnel face reflection of the circulating Rayleigh wave, RSSR – converted and reflected S-wave from a fault zone ahead of the tunnel face.

Zwischenmassiv, die Urseren-Garvera-Zone, sowie die Pioramulde (Abb. 3). Die Pioramulde liegt im Übergang vom Gotthardmassiv im Norden und der südlich angrenzenden Penninischen Gneiszone. Sie besteht aus sedimentären Ablagerungen mit darin enthaltenem Dolomit. Dieser ist in Folge einer metamorphen Überprägung während der alpinen Gebirgsfaltung teilweise zuckerkörnig ausgebildet. Um die Pioramulde im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der Tunnelbaustelle zu untersuchen, wurde vom AlpTran-

sit Konsortium ein Sondierstollen gebohrt, der wenige Meter vor der Pioramulde endet. Von der Ortsbrust des Stollens wurden Sondierbohrungen in die Pioramulde abgeteuft, um die mechanischen Eigenschaften der Gesteine der Pioramulde zu untersuchen (Schneider, 1997).

An der Ortsbrust dieses Sondierstollens wurden im März 2005 durch das GFZ Potsdam in Zusammenarbeit mit der Amberg Messtechnik AG seismische Messungen durch-

Abb. 3: Geologisches Längsprofil entlang des Gotthard-Basistunnels (GBT, Quelle: <http://www.alptransit.ch>) (oben), migrierte seismische Sektion der konvertierten und reflektierten Oberflächenwellen mit Ergebnissen der Sondierung Bo1.2 (unten). Entlang der Sondierung Bo1.2 ist schematisiert der RQD-Wert (Rock Quality Designation) dargestellt, der ein Maß für den Zustand des bei der Sondierung geförderten Kerns darstellt (aus Schneider, 1997). Hohe Werte deuten auf festen, ungeklüfteten Fels hin, niedrige Werte auf stärker geklüfteten Fels. Folgende Einheiten lassen sich den Farben zuordnen (beginnend an der Ortsbrust): rot: Betonzapfen zur Stabilisierung der Ortsbrust; pink: kakirisierte Störungszone; grün: Pioramulde.



Geological section along the Gotthard base tunnel (GBT, source: <http://www.alptransit.ch>) (top), migrated seismic section of the converted and reflected surface waves with RQD (rock quality designation) values of exploratory well 1.2. The RQD value is a measure for the stability of the rock delivered by investigation of the cores of the well (Schneider, 1997). High values indicate stable unfaulted rocks, low values indicate strongly faulted rocks. The following units can be identified according to the colours (starting from the tunnel face): red: concrete cone stabilising the tunnel face; pink: cataclastic fault zone; green: Piora basin.

Geological section along the Gotthard base tunnel (GBT, source: <http://www.alptransit.ch>) (top), migrated seismic section of the converted and reflected surface waves with RQD (rock quality designation) values of exploratory well 1.2. The RQD value is a measure for the stability of the rock delivered by investigation of the cores of the well (Schneider, 1997). High values indicate stable unfaulted rocks, low values indicate strongly faulted rocks. The following units can be identified according to the colours (starting from the tunnel face): red: concrete cone stabilising the tunnel face; magenta: cataclastic fault zone; green: Piora basin.

geführt, um die Anwendbarkeit der konvertierten und reflektierten Oberflächenwellen zur Detektion einer Störungszone zu untersuchen. Die Messanordnung bestand aus folgenden Komponenten: zwei Drei-Komponenten-Geophone in den Spitzen von Gebirgsankern, die ca. 60 m hinter der Ortsbrust seitlich in die Tunnelwand gesetzt wurden, sowie 76 Schlagpunkte, an denen der GFZ-Impakthammer eingesetzt wurde (vgl. Abb. 1). Von den 76 Schlagpunkten sind 36 in einem Profil an der in Vortriebsrichtung linken Tunnelwand angeordnet. Der mittlere Punktabstand beträgt 1,5 bis 1,6 m. Fünf Punkte sind an der Ortsbrust, und 35 an der in Vortriebsrichtung rechten Tunnelwand. An jedem Schlagpunkt wurden 16 Schläge angeregt und vertikal gestapelt. Die Verteilung von seismischen Empfängern und Hammerschlagpunkten sowie die unbearbeiteten seismischen Daten sind in Abb. 4 dargestellt. Die unbearbeiteten Daten werden von der direkten P- und der direkten Rayleigh-Welle beherrscht. Eine Rayleigh-Wellen-Reflexion ist innerhalb der Schlagpunktlinie zwischen Punkt 1 und 10 zu erkennen.

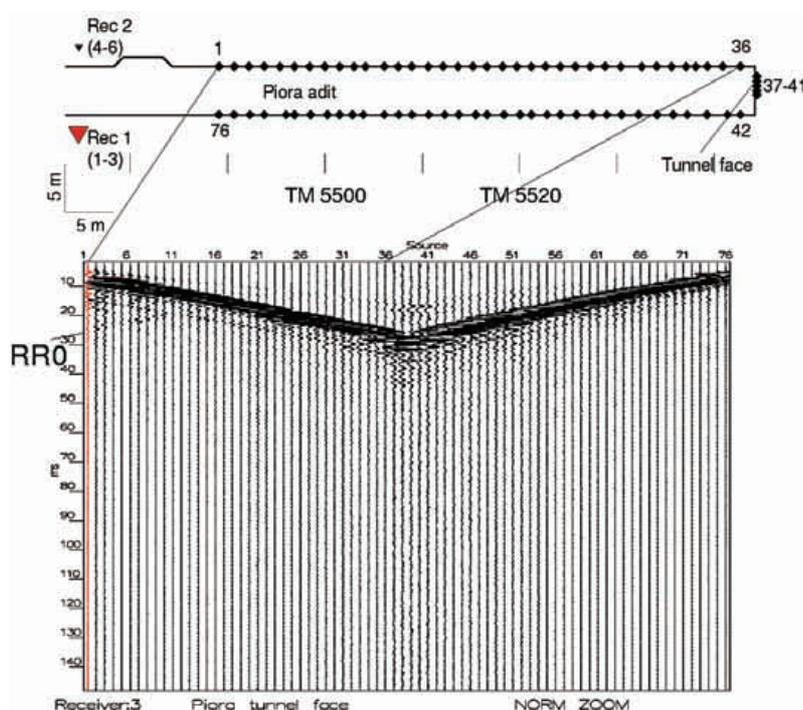


Abb. 4: Messgeometrie des seismischen Experiments an der Ortsbrust des Piora-Sondierstollens (oben) und Rohdaten der Messungen (unten). Die Messdaten zeigen die dritte Komponente (senkrecht zur Tunnelwand) von Empfänger 1 (rotes invertiertes Dreieck). Die Signale von 76 Schlagpunkten (schwarze Rauten) wurden aufgezeichnet. Die Punkte 1 bis 36 liegen an der in Vortriebsrichtung linken Tunnelwand, Punkte 37 bis 41 an der Ortsbrust und Punkte 42 bis 76 an der in Vortriebsrichtung rechten Tunnelwand. RR0: Rayleigh-Wellen-Reflexion von einer Diskontinuität bei Schlagpunkt 16.

Source and receiver point distribution of the seismic experiment in the Piora adit (top) and raw data of the measurements (bottom). The data show the component perpendicular to the tunnel wall of receiver 1 (red inverted triangle). The signals of 76 impact points (black diamonds) were recorded. The points 1 – 36 are on the left tunnel wall (looking towards the tunnel face), the points 37 – 41 are on the tunnel face, and the points 42 – 76 are on the right tunnel wall. RR0: Rayleigh wave reflection of a discontinuity near impact point 16.

Die Datenbearbeitung unterdrückt die großen Amplituden der direkten P-, S- und Rayleigh-Wellen, verbessert das Verhältnis von Nutz- und Störsignalen und verstärkt Amplituden von Einsätzen mit größerer Laufzeit, um Verluste durch Dämpfung und sphärische Divergenz auszugleichen. Dazu werden folgende Prozesse durchgeführt: Median-Filterung, Bandpass-Filterung und zeitproportionale Skalierung der Amplituden. Das Ergebnis dieser Bearbeitung für die tunnelwandnormale Komponente des Empfängers 1 ist in Abb. 5 dargestellt. Die direkten P-, S- und Rayleigh-Wellen sind weitgehend unterdrückt. Reflektierte Rayleigh-Wellen von Diskontinuitäten entlang der Schlagpunktlinie und von der Ortsbrust des Sondierstollens sind zu erkennen. Nach den Einsätzen der Reflexionen von der Tunnelbrust treffen mit einer Verzögerung von etwa 20 ms dazu parallele Einsätze ein, die von RSSR-Reflexionen vor der Ortsbrust herrühren.

Mit einem an der Kirchhoff-Migration orientierten Abbildungsverfahren (z. B. Schleicher et al., 1993) lassen sich die in den Seismogrammen erkennbaren RSSR-Reflexionen im Raum abbilden. Wir nennen dieses Verfahren RSSR-Migration. Hierfür werden im dreidimensionalen Raum Flächen gleicher Laufzeit (sog. Isochronen) für RSSR-Reflexionen berechnet und die in den Seismogrammen enthaltenen Amplituden auf diese Isochronen verteilt. Das Ergebnis ist dann ein räumliches Abbild von RSSR-Reflektoren. Bei einer stationären Tunnelbrust verbleibt eine hohe räumliche Unschärfe, da die ortsfeste Tunnelortsbrust als sekundäre Quelle betrachtet wird. Bei einem aktiven Tunnelvortrieb hingegen überlagern sich RSSR-Reflexionen von verschiedenen Ortsbrustpositionen konstruktiv, so dass eine bessere räumliche Auflösung von Reflektoren möglich ist (Abb. 6). In Abb. 7 sind die seismischen Daten mit den RSSR-Reflexionen und das Ergebnis der RSSR-Migration gegenübergestellt. Für die Migration wurden die von Empfänger 1 aufgezeichneten Schüsse 42 bis 76 (Abb. 4) berücksichtigt. Etwa 45 m vor der Ortsbrust liegt ein Reflektor, der mit dem Einsatz der Phase RSSR1 korreliert, etwa 20 m weiter in Vortriebsrichtung liegt ein weiterer Reflektor, der mit der Phase RSSR2 korreliert.

Im Rahmen der Vorerkundung der Piora-mulde durch das AlpTransit-Konsortium wurden von der Ortsbrust des Piora-Sondierstollens Erkundungsbohrungen abgeteuft und das dabei angetroffene Gestein charakterisiert. Folgende Einheiten wurden dabei angetroffen: ein 8 m mächtiger Betonzapfen, mit dem der Son-

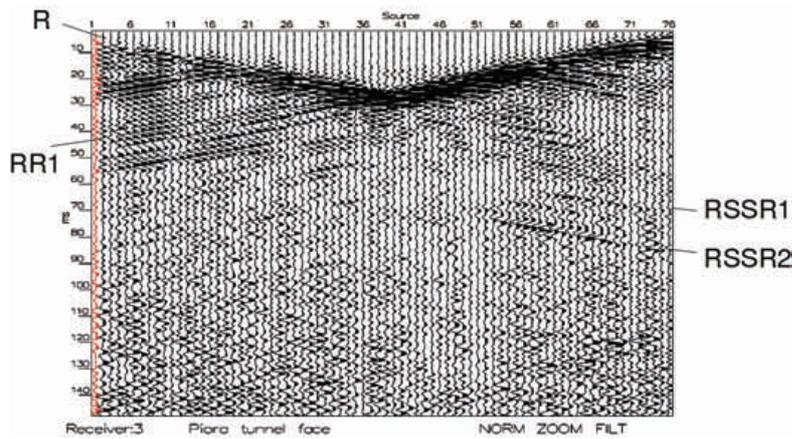
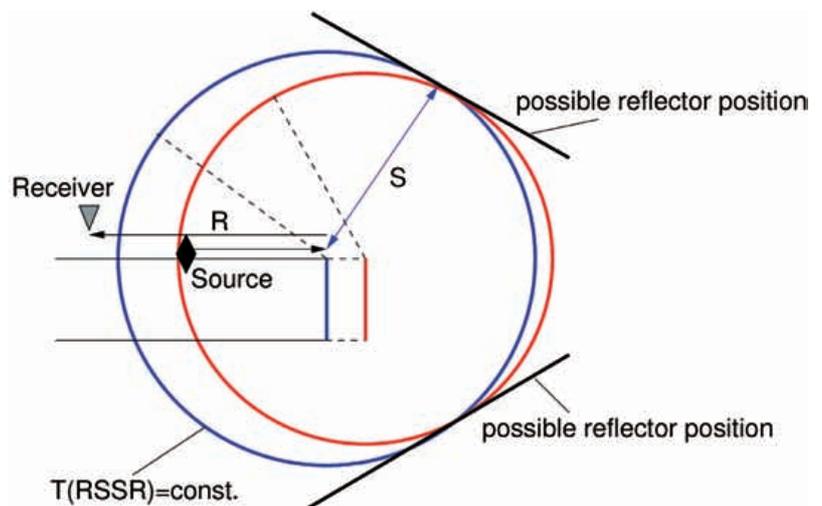


Abb. 5: Daten nach Bearbeitung (Empfänger 1, tunnelwandnormale Komponente). R: Direkte Rayleigh-Welle, RR1: Rayleigh-Reflexion der Tunnelortsbrust, RSSR1: RSSR-Reflexion von Kakirit-Lage, RSSR2: RSSR-Reflexion vom Übergang der Kakirit-Lage zur Piora-Mulde.
Seismic data after processing (receiver 1, perpendicular to the tunnel wall). R: direct Rayleigh wave, RR1: Rayleigh wave reflection from the tunnel face, RSSR1: RSSR reflection of cataclastic layer, RSSR2: RSSR reflection from the transition of the cataclastic layer to the Piora basin.

dierstollen verfüllt wurde, Lucomagno-Gneise, eine ca. 16 m mächtige kakiritische Störzone, sowie die Piora-Mulde, die durch einen Wechsel von sehr instabilem zuckerartigem Dolomit und festeren karbonatisch-sulfatischen Gesteinen geprägt ist (Schneider, 1997). Die Einheiten sind in Abb. 3 zusammen mit der RSSR-Migration der Aufzeichnungen von Empfänger 1 dargestellt. Erhöhte Reflexionsamplituden zeigen sowohl den Übergang vom Lucomagno-Gneis zum Kakirit als auch vom Kakirit zur Pioramulde.

Abb. 6: Prinzip der RSSR-Migration für zwei verschiedene Positionen der Tunnelortsbrust. Die seismische Quelle (schwarze Raute) und der Empfänger (invertiertes Dreieck) können an einer festen Position operieren und liegen mit der Tunnelachse in einer Ebene. Für die erste Ortsbrustposition (blaue Linie) sind die Strahlwege einer RSSR-Reflexion skizziert: Schwarze Pfeile zeigen Rayleigh-Wellen, blaue Pfeile zeigen S-Wellen. Die Isochrone einer RSSR-Reflexion wird durch einen Kreis um die Kante der Ortsbrust auf der Seite von Quelle und Empfänger repräsentiert. Es besteht eine starke räumliche Mehrdeutigkeit in der Lokalisierung des Reflektors. Wird die Messung nach einem gewissen Vortrieb wiederholt (rote Linie), wird die Mehrdeutigkeit bereits deutlich reduziert. Eine weitere Verbesserung in der Lokalisierung des Reflektors kann durch die Anordnung von Schlagpunkten und Empfängern um den Tunnel herum erreicht werden.

Principle of the RSSR migration assuming two different tunnel face positions. The seismic source (black diamond) and the receiver (inverted triangle) can operate at a fixed location. The ray paths for an RSSR reflection are shown for the first tunnel face position (blue line): Black arrows indicate Rayleigh waves, blue arrows indicate S waves. The isochrone of a RSSR reflection is represented by a circle around the edge of the tunnel face on the side of the source-receiver profile. There is a strong spatial ambiguity for the location of the reflector. If the measurements are repeated after the tunnel has been drilled further (red line) the spatial ambiguity can be resolved. Furthermore, if sources and receivers are distributed at all azimuths around the tunnel axis the reflector can be located still more exactly.



Zusammenfassung und Ausblick

Das am GFZ Potsdam entwickelte Integrierte Seismische Imaging System ISIS besteht aus Hardware-Komponenten sowie der Software, die zur Vorerkundung im Tunnelbau erforderlich sind. Dazu zählen seismische Quellen, die wiederholbare und hochfrequente Signale anregen und Empfängersysteme, die zusammen mit im Tunnelbau üblichen Gebirgsankern verwendet werden können. Die Software leistet die zur Interpretation der gemessenen Daten notwendige Bearbeitung und Visualisierung und Aufzeichnung weiterer geologischer und geotechnischer Daten. Bei Messeinsätzen unter Verwendung dieses Systems wie auch bei der Auswertung der synthetischen Modellierung seismischer Wellen in der Tunnelseismik hat sich gezeigt, dass an der Tunnelwand entlang laufende Oberflächenwellen mit der größten Energie

angeregt werden. Modellierungen zeigten auch, dass diese sich grundsätzlich dazu eignen, Reflektoren vor der Ortsbrust eines Tunnels zu erkennen. Die Reflexionen stammen von an der Ortsbrust zu S-Wellen konvertierten Oberflächenwellen, die nach der Reflexion zur Ortsbrust zurückkehren und dort wieder zu Oberflächenwellen konvertieren (RSSR-Reflexionen). Messungen des GFZ Potsdam an der Ortsbrust des Piora-Sondierstollens an der Baustelle Gotthard-Basistunnels zeigten in den Messdaten Einsätze, die mit dem Auftreten von RSSR-Reflexio-

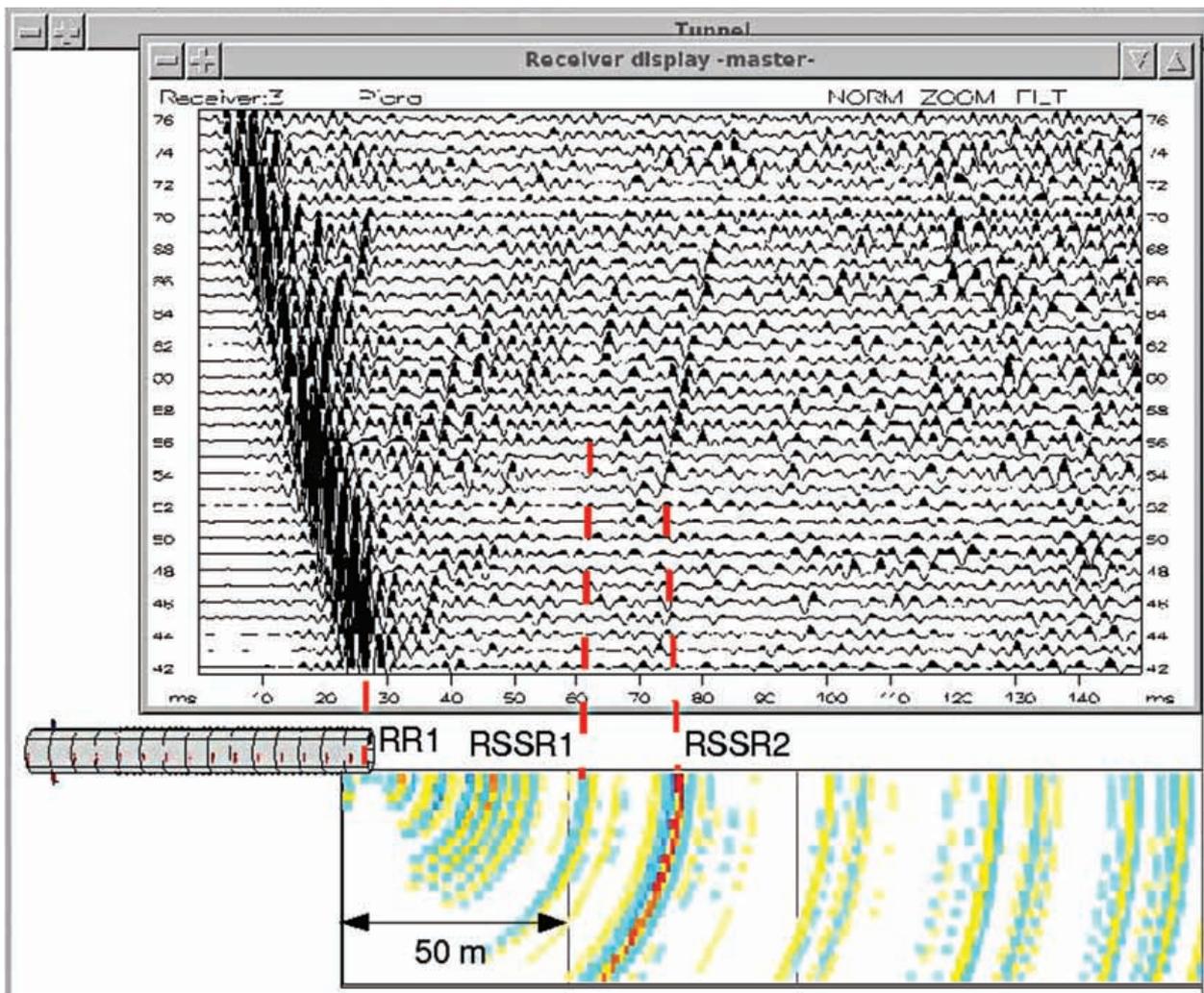


Abb. 7: Datenbeispiel der tunnelwandnormalen Komponente eines Empfängers (oben) und migrierte Sektion der gezeigten Daten (unten). RR1: Reflektierte Oberflächenwelle von der Tunnelortsbrust, RSSR1: Konvertierte und reflektierte Oberflächenwelle vom Beginn der Kakirit-Schicht, RSSR2: Konvertierte und reflektierte Oberflächenwelle von der Pioramulde.

Data example of the component perpendicular to the tunnel wall of receiver 1 (top) and migrated section of the data (bottom). RR1: reflected surface wave from the tunnel face, RSSR1: converted and reflected surface wave from the cataclastic layer, RSSR2: converted and reflected surface wave from the Piora basin.

nen erklärt werden können. Es konnten RSSR-Reflexionen vom Beginn einer kakiritisierten Schicht sowie von deren Übergang zur Pioramulde nachgewiesen werden. Ein für die Überprüfung der Praxistauglichkeit des Systems notwendiger Schritt ist nun die Anwendung bei einem aktiven Tunnelvortrieb. Die bisher durchgeführten synthetischen Modellierungen wie auch die Testmessungen im Piora-Sondierstollen lassen erwarten, dass ein entsprechender Einsatz eine wesentliche Unterstützung bei der Detektion von Heterogenitäten vor dem Tunnel bedeutet. Da das System hinter der Ortsbrust seitlich an der Tunnelwand installiert wird, stört es nicht den Vortrieb an der Ortsbrust und kann unabhängig von der Vortriebsart genutzt werden. Da bei der Anregung an der Tunnelwand Oberflächenwellen mit größerer Energie angeregt werden als Raumwellen, kann bei diesem System grundsätzlich mit einem hohen Verhältnis von Nutz- zu Störsignalenergie und somit sehr stabilen Messergebnissen gerechnet werden.

Literatur:

- Bohlen, T., Lorang, U., Rabbel, W., Müller, C., Giese, R., Lüth, S., 2006. Seismic prediction ahead of tunnel construction using Rayleigh to body wave conversion at the head face. Manuscript in preparation.
- Dickmann, T., and Sander, B., 1996. Drivage concurrent tunnel seismic prediction. Felsbau 14, 406-411.
- Giese, R., Klose, C., and Borm, G., 2005. In-Situ seismic investigations of fault zones in the Leventina Gneiss Complex of the Swiss Central Alps: Geological Society Special Publication 240, 15-24.
- Kneib, G., Kassel, A., and Lorenz, K., 2000. Automated seismic prediction ahead of the tunnel boring machine. First Break, 295-302.
- Lüth, S., Buske, S., Giese, R., Goertz, A., 2005. Fresnel volume migration of multicomponent data. Geophysics 70(6), 121-129.
- Schleicher, J., Tygel, M., and Hubral, P., 1993. 3-D true-amplitude finite-offset migration. Geophysics 67, 1112-1126.
- Schneider, T.R., 1997. Gotthard-Basistunnel: Neue geologische Erkenntnisse im Bereich des Tavetscher Zwischenmassivs und der Piora-Mulde. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Dokumentation D 0143.