

Masterarbeit

Geophysikalische Vorauserkundungsmethoden beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb

Spezifische Anwendung beim Semmering-Basistunnel

Gerhild Lechner

m0835191

03/08/2015

Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Montanuniversität Leoben

A-8700 LEOBEN, Erzherzog-Johann-Strasse 3
Tel.Nr.: +43/(0)3842-402-3401
Fax: +43/(0)3842-402-6602
subsurface@mu-leoben.at



Ehrenwörtliche Erklärung

„Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benutzt und die den Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.“

Gerhild Lechner

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung in dieser Arbeit, wie z.B. TeilnehmerInnen, verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne der Gleichbehandlung für beide Geschlechter.

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern Herrn Prof. Robert Galler und Herrn DI Tobias Schachinger. Herrn Prof. Galler danke ich speziell für die engagierte universitäre Betreuung und Unterstützung bei der Erstellung der Arbeit. Herrn DI Schachinger möchte ich für die gute Zusammenarbeit und die vielen inhaltlichen Anregungen danken. Er hat mich während meiner Zeit bei der ÖBB-Infrastruktur AG hervorragend betreut und ist mir mit Rat und Tat zur Seite gestanden.

Ich bedanke mich an dieser Stelle auch herzlich bei der ÖBB, in deren Auftrag ich diese Arbeit erstellen durfte und die mich mit allen nötigen Mitteln unterstützt hat.

Ein besonderer Dank gilt Frau DI Ingrid Schlögel für ihre Hilfe und fachlichen Beiträge bei der Erstellung der Arbeit, sowie für das Bereitstellen von Literatur.

Allen Interview- und Gesprächspartnern danke ich für die wertvollen und informativen Beiträge, die sie für diese Arbeit geliefert haben.

Bedanken möchte ich mich auch bei all jenen, die mir Literatur, Literaturquellen und sonstige Daten bereitgestellt haben.

Zu guter Letzt möchte ich von ganzen Herzen meiner Familie und meinen Freunden danken. Sie haben durch ihre Geduld, ihr Vertrauen und Verständnis einen wesentlichen Anteil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden verschiedene Messsysteme vorgestellt und analysiert, die für eine vortriebsbegleitende geophysikalische Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb zum Einsatz kommen. Zum theoretischen Verständnis sind im ersten Teil der Arbeit die relevanten Grundlagen der Geophysik aufbereitet. Anschließend folgt eine ausführliche Erläuterung bezüglich der Funktionsweise, des Messlayouts und der Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Verfahren. Ergänzend zur Literaturstudie wurden im Zuge von Interviews und Besprechungen mit erfahrenen Geophysikern, Geologen und Geotechnikern Erfahrungswerte hinsichtlich Funktionalität, machbarer Erkundungsziele, Einsatzgrenzen u.dgl. eingeholt. Für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Messsysteme sind die wichtigsten Erkenntnisse betreffend Einsatzbereich, Montage des Messsystems sowie Durchführung und Auswertung der Messung tabellarisch zusammengefasst.

Das Ziel der Masterarbeit ist, Empfehlungen für ein geeignetes geophysikalisches Vorauserkundungssystem für die Anwendung beim kontinuierlichen Vortrieb des Semmering-Basistunnels - Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben abzugeben. Die Bewertung der Systeme erfolgt in Form einer Nutzwertanalyse.

Eine zusätzliche Fragestellung, die in diese Arbeit kurz behandelt wird, ist die mögliche Kombination der geophysikalischen Vorauserkundungssysteme mit Diskenkraftmessungen. Es wird erörtert, ob eine Korrelation der aufgezeichneten Daten zu einer Verbesserung der Prognoseergebnisse beitragen kann.

Abstract

The task of this master thesis is to present and analyse different measuring systems that are used for geophysical underground investigations throughout the excavation of tunnels by tunnel boring machines. For a theoretical understanding the relevant basic knowledge of geophysics is explained in the first part of the thesis. It is followed by information concerning functionality, measurement configuration as well as advantages and disadvantages of the different systems. In addition to the literature study the expertise of geophysicists, geologists and geotechnical engineers regarding functionality, detection targets and operating limits is gathered. In order to compare the measuring systems the most important information concerning the field of application, the mounting of equipment and the execution and analysis of the measurement are summarised in tabular form.

The aim of the master thesis is to propose an appropriate geophysical exploration system for the Semmering-Basetunnel – section SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben. An efficiency analysis is used for the evaluation.

The possible combination of geophysical exploration systems with disc force measurements is an additional question dealt with in this thesis. It is examined whether a correlation of the recorded data can contribute to an improvement of the prediction results.

Inhaltsverzeichnis

Ehrenwörtliche Erklärung	II
Danksagung.....	III
Kurzfassung.....	IV
Abstract.....	V
Inhaltsverzeichnis	VI
1 Einleitung.....	8
2 Theoretische Grundlagen zu vortriebsbegleitenden, indirekten Erkundungssystemen beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb	9
2.1 Seismik.....	10
2.1.1 Reflexionsseismik.....	18
2.2 Geoelektrik	21
2.2.1 Induzierte Polarisation	22
2.3 Georadar	25
2.4 Magnetik.....	28
2.5 Gravimetrie.....	28
2.6 Bohrlochgeophysik.....	29
2.6.1 Bohrlochseismik.....	29
2.6.2 Bohrlochradar.....	32
3 Vortriebsbegleitende, indirekte Erkundungssysteme beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb	35
3.1 Seismische Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb	35
3.1.1 Seismische Vorauserkundungssysteme	37
3.2 Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb mit Radarmessungen	55
3.3 Geoelektrische Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb	59
3.3.1 Geoelektrische Vorauserkundungssysteme.....	59
3.4 Resümee aus Interviewrecherchen und Besprechungen	65
4 Koppelung der Ergebnisse von Diskenkraftmessungen mit geophysikalischen Erkundungssystemen	71
5 Spezifische Anwendung indirekter Erkundungssysteme beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb des Semmering-Basistunnels	73
5.1 Projektübersicht	73
5.2 Prognostizierte Geologie	74

5.3	Erkundungsziele für die indirekte Vorauserkundung beim kontinuierlichen Vortrieb des Semmering-Basistunnels.....	75
5.3.1	Nutzwertanalyse zur Bewertung der Systeme hinsichtlich ihrer Eignung beim Semmering-Basistunnel.....	76
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	81
7	Literaturverzeichnis	84
8	Abbildungsverzeichnis	90
9	Tabellenverzeichnis	92
10	Abkürzungsverzeichnis	93
	Anhang.....	I

1 Einleitung

Die Planung und Herstellung eines Tunnelbauwerks ist maßgeblich von den geologisch-geotechnischen Verhältnissen abhängig. Eine möglichst genaue Vorfelderkundung des Untergrundes in der Planungsphase ist daher unumgänglich und stellt die Grundlage für die technische und wirtschaftliche Optimierung eines Bauwerks dar. Die Ergebnisse der in der Planungsphase durchgeführten Erkundungskampagne liefern allerdings in komplexen Geologien und bei einer hohen Überlagerung nicht immer die für den sicheren Vortrieb notwendigen Detailinformationen. Störungszonen, Hohlräume oder wasserführende Gebirgsbereiche stellen ein großes Gefährdungspotential beim Auffahren eines Tunnels dar. Die Lage solcher geotechnischer Problemzonen vor der Ortsbrust (OB) sollte daher möglichst genau bekannt sein um rechtzeitig entsprechende Maßnahmen treffen zu können. Vor allem beim kontinuierlichen Vortrieb mit einer Tunnelbohrmaschine kann eine unerwartete Störung zu kosten- und zeitintensiven Auswirkungen auf ein Projekt führen. Nur wenn bautechnisch relevante Gebirgsbereiche frühzeitig erkannt werden, kann das Vortriebskonzept an die geologischen Verhältnisse angepasst und das Risiko einer Vortriebsbehinderung oder eines Vortriebsstillstandes minimiert werden. Eine baubegleitende Vorauserkundung ist daher bei komplexeren Baugrundverhältnissen meist unumgänglich. Ein gängiges Verfahren zur direkten Vorauserkundung des Baugrundes stellen Drehschlagbohrungen dar. Diese ermöglichen allerdings nur eine „stichpunktartige“ Vorauserkundung und sind mit einem relativ hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden. Neben der direkten Untersuchungsmethode besteht die Möglichkeit einer großflächigen, indirekten Vorauserkundung mittels Geophysik. Im Rahmen dieser Arbeit werden die am europäischen Markt erhältlichen baubegleitenden geophysikalischen Vorauserkundungssysteme untersucht und von verschiedenen Blickwinkeln durchleuchtet. Der Fokus liegt auf Messsystemen, die in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine zum Einsatz kommen

2 Theoretische Grundlagen zu vortriebsbegleitenden, indirekten Erkundungssystemen beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb

Geophysikalische Erkundungsmethoden zählen zu den indirekten Untersuchungsmethoden und dienen zur Bestimmung physikalischer Eigenschaften der Erdkruste, des Erdinneren und der Kraftfelder der Erde. Im Gegensatz zu direkten Erkundungsmaßnahmen, bei der die Geologie unmittelbar an Aufschlüssen, Schürfen oder Bohrungen beobachtet wird, werden mit geophysikalischen Methoden nicht zugängliche Bereiche großflächig erfasst und modellhaft beschrieben. Direkte und indirekte Erkundungsmethoden sollten nicht als konkurrierende sondern vielmehr als ergänzende Untersuchungsmethoden verstanden werden.

Geophysikalische Messungen können sowohl an der Erdoberfläche, am Wasser und aus der Luft, als auch in Bohrlöchern oder Untertage durchgeführt werden. Die Voraussetzung für den zielführenden Einsatz geophysikalischer Erkundungsmethoden ist das Vorhandensein eines ausreichend großen Kontrasts der physikalischen Materialparameter. Je nach Verfahren wird zum Beispiel der elektrische Widerstand, die Ausbreitungsgeschwindigkeit seismischer Wellen, die Suszeptibilität oder die Dichte des Gesteins bestimmt. Die verschiedenen Messmethoden sind daher für unterschiedliche Parameter sensitiv und die Eignung eines jeden Verfahrens hängt von den gegebenen Randbedingungen und der speziellen Aufgabenstellung ab. Vor der Wahl einer geeigneten geophysikalischen Messmethode sollte möglichst genau analysiert werden, welche Anomalien in den Messgrößen zu erwarten sind. Darüber hinaus sind die Erkundungsziele für das gegenständliche Untersuchungsgebiet bestmöglich zu definieren. [30]

Die geophysikalischen Messsysteme zur vortriebsbegleitenden Vorauserkundung des Baugrundes im Tunnelbau entwickelten sich aus Technologien der Erdöl- und Erdgasindustrie. Die Verfahren basieren auf den Grundprinzipien der Reflexionsseismik (siehe Kapitel 2.1.1 und Kapitel 2.6.1), der induzierten Polarisation (siehe Kapitel 2.2.1) und der Radarmessung (siehe Kapitel 2.3 und Kapitel 2.6.2). In den nachfolgenden Unterkapiteln wird die Grundtheorie zu diesen Verfahren erläutert. Zur Vollständigkeit werden auch die Magnetik und die Gravimetrie kurz erwähnt.

2.1 Seismik

Seismische Untersuchungsmethoden basieren auf den Prinzipien elastischer Wellenausbreitung. Es erfolgt eine gezielte Anregung seismischer Wellen, die sich im Untergrund mit einer materialspezifischen Geschwindigkeit ausbreiten und an Grenzflächen reflektiert werden. Durch Aufzeichnen der rückgestrahlten Wellen und Messen der Wellenlaufzeiten kann ein Untergrundmodell erstellt werden, das den lithologischen und strukturellen Gebirgsaufbau widerspiegelt. [30]

Seismische Wellen:

Bei seismischen Wellen handelt es sich um elastische Wellen. Die elastischen Eigenschaften des Untergrundes stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Welle.

Grundsätzlich wird zwischen Raumwellen und Oberflächenwellen unterschieden. Je nach Art der Ausbreitung werden die Raumwellen weiter unterteilt in:

- Kompressionswellen und
- Scherwellen.

Kompressionswellen werden auch als Primärwellen bzw. P-Wellen bezeichnet. Die Teilchenbewegung erfolgt longitudinal in Ausbreitungsrichtung und das durchlaufene Medium erfährt sowohl Kompression als auch Dehnung (siehe Abbildung 1, links). Primärwellen sind die schnellste Art seismischer Wellen und sie breiten sich nicht nur im Festgestein sondern auch in Flüssigkeiten und Gasen aus. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der P-Welle (Einheit: m/s) lässt sich aus den elastischen Parametern (K, E, μ , ν) und der Dichte ρ berechnen. [30]

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1 - \nu}{(1 - \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

v_p ... Ausbreitungsgeschwindigkeit der P-Welle
K... Kompressionsmodul
E... Elastizitätsmodul
 μ ... Schubmodul
 ν ... Poissonzahl
 ρ ... Dichte

Scherwellen werden auch Sekundärwellen bzw. S-Wellen genannt. Die Teilchenbewegung erfolgt senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (siehe Abbildung 1, rechts), weshalb die Scherwellen auch als Transversalwellen bezeichnet wird. Die Ausbreitung dieses Wellentyps ist ausschließlich in Medien mit ausreichendem Scherwiderstand, also

nicht in Flüssigkeiten, möglich. Die Geschwindigkeit der Scherwellen v_s ist geringer als jene der P-Wellen. Für stark verfestigte Gesteine mit einer Poissonzahl von $\nu = 0,25$ ergibt sich ein Verhältnis von $\frac{v_p}{v_s} = \sqrt{3}$. Im Lockergestein kann das Verhältnis zwischen v_p und v_s zwischen 3 und 12 variieren [40]. [30]

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{1}{2(1+\nu)}} \quad (2)$$

v_s ... Ausbreitungsgeschwindigkeit der S-Welle
 E... Elastizitätsmodul
 μ ... Schubmodul
 ν ... Poissonzahl
 ρ ... Dichte

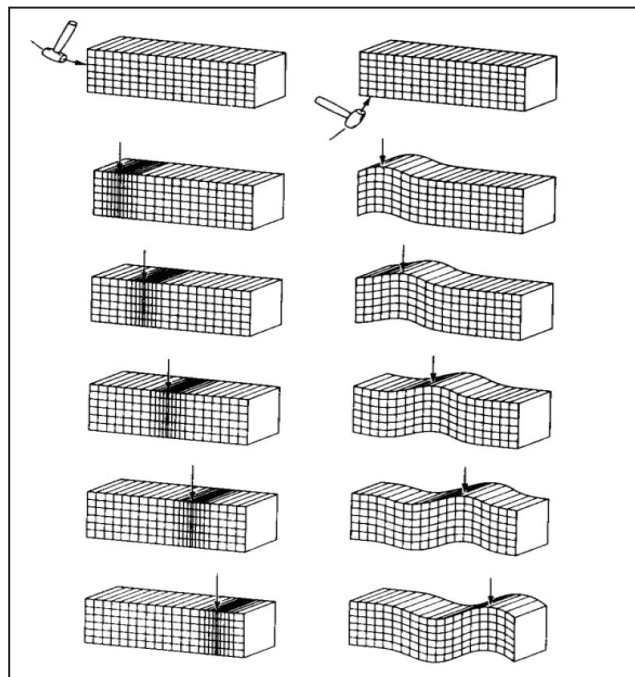


Abbildung 1: Schwingungsformen von P-Wellen (links) und S-Wellen (rechts) (aus [2])

Die seismische Geschwindigkeit im Gebirge wird neben den elastischen Eigenschaften und der Dichte des Gesteins von folgenden Faktoren beeinflusst [39]:

- Porosität
- Gebirgsdruck
- Temperatur
- Entstehungsgeschichte
- Alter des Gesteins (ältere Gesteine sind im allgemeinen stärker verfestigt)

In Tabelle 1 sind beispielhaft die Wellengeschwindigkeiten und die Dichten

unterschiedlicher Gesteine aufgelistet.

Tabelle 1: Wellengeschwindigkeiten und Dichten unterschiedlicher Gesteine (nach [37])

Lithologie	v_p [m/s]	v_s [m/s]	Dichte ρ [g/cm ³]
Oberboden	300-700	100-300	1,7-2,4
Trockener Sand	400-1200	100-500	1,5-1,7
Nasser Sand	1500-2000	400-600	1,9-2,1
Gesättigter Ton	1100-2500	200-800	2,0-2,4
Mergel	2000-3000	750-1500	2,1-2,6
Kalkstein	3500-6000	2000-3300	2,4-2,7
Salz	4500-5500	2500-3100	2,1-2,3
Dolomit	3500-6500	1900-3600	2,5-2,9
Granit	4500-6000	2500-3300	2,5-2,7
Gneis	4400-5200	2700-3200	2,5-2,7
Kohle	2200-2700	1000-1400	1,3-1,8
Wasser	1450-1500	-	1
Eis	3400-3800	1700-1900	0,9

S- und P-Wellen breiten sich in einem homogenen, isotropen Medium unabhängig voneinander aus. In einem inhomogenen Medium sind die beiden Wellentypen allerdings aneinander gekoppelt und sie werden in den jeweils anderen Wellentyp umgewandelt wenn sie auf eine Grenzfläche treffen. [5]

Neben den Raumwellen treten im inhomogenen, anisotropen Medium auch Oberflächenwellen in Erscheinung. Kennzeichen dieser Wellen ist, dass sie sich entlang der Oberfläche eines elastischen Körpers ausbreiten und direkt von der Quelle zum Empfänger laufen. In der Reflexionsseismik stellen Oberflächenwellen einen Störfaktor dar, der das Signal der Nutzwelle überdecken kann. [5]

Es wird unterschieden zwischen den Rayleigh-Wellen und den Love-Wellen. Bei der Rayleigh-Welle werden die Teilchen entlang einer elliptischen Bahn sowohl in vertikale als auch in horizontale Richtung verschoben (siehe Abbildung 2). Die Wellenbewegung ist vergleichbar mit einer Wellenbewegung an der Wasseroberfläche, allerdings bewegen sich die Partikel rückwärtsgerichtet. [56]

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Welle ist etwas geringer als jene der Scherwelle und bei Erdbeben besitzt diese Welle aufgrund der komplexen oberflächennahen Wellenbewegung die größte Zerstörungskraft. [5]

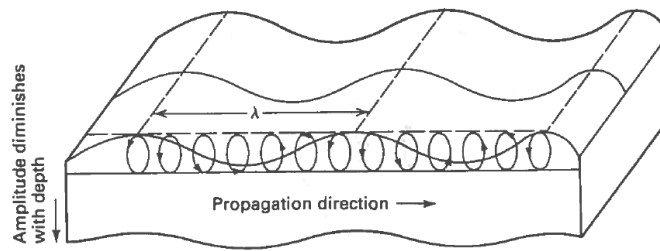


Abbildung 2: Darstellung der Teilchenbewegung einer Rayleigh-Welle (aus [56])

Love-Wellen treten nur in geschichteten Medien in Erscheinung, wenn die Scherwellengeschwindigkeit der oberflächennahen Schicht geringer ist als die der darunterliegenden Schicht. Die Teilchenbewegung erfolgt parallel und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (siehe Abbildung 3). Die Geschwindigkeit der Love-Wellen liegt zwischen der Scherwellengeschwindigkeit der oberflächennahen und der unterlagernden Schicht. [5]

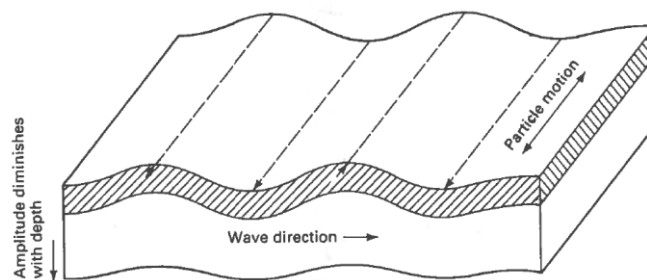


Abbildung 3: Teilchenbewegung Love-Welle (aus [56])

Theoretische Grundlagen zur Wellenausbreitung in der Seismik

Fermatsches Prinzip:

Grundlage der geometrischen Wellenausbreitung ist das Fermatsche Prinzip, welches besagt, dass eine Welle jenen Weg nimmt, für den sie ein Minimum an Zeit benötigt. [40]

Huygensches Prinzip:

Von einer punktförmigen Quelle ausgehend, breitet sich eine seismische Welle in einem homogenen Medium radial aus. Punkte gleicher Phase bilden hierbei die sogenannte Wellenfront. Das 1690 aufgestellte Huygenssche Prinzip besagt, dass jeder Punkt einer Wellenfront selbst Quelle einer sphärischen Elementarwelle wird. Die Elementarwellen schwingen dabei mit derselben Frequenz und Ausbreitungsgeschwindigkeit wie die Primärwelle. Je nach Phasenlage verstärken oder schwächen diese sich gegenseitig, wobei sich gleichphasige Elementarwellen auf der gemeinsamen Umhüllenden überlagern und gegenseitig verstärken. Die Umhüllende stellt eine neue Wellenfront dar (siehe

Abbildung 4). [2]

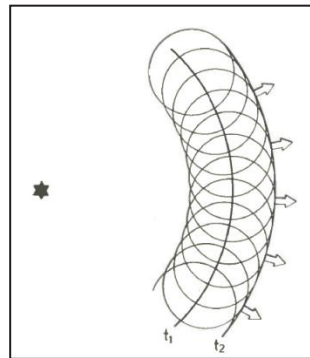


Abbildung 4: Darstellung von Wellenfronten zum Zeitpunkt t_1 und t_2 (aus [2])

Nachfolgendes Beispiel erklärt das Phänomen des Huygenschen Prinzips, wenn eine Welle auf ein Hindernis, eine Kante oder sonstige Diskontinuität trifft (siehe Abbildung 5):

Zum Zeitpunkt $t=t_0$ stößt eine Wellenfront AB auf die horizontale Schicht CD, die bei D endet. Alle sphärischen Wellen, deren Umhüllende die Wellenfront EF bildet, werden zum Zeitpunkt $t=t_0+\Delta t$ zwischen C und D reflektiert. Rechts des Eckpunktes D hat zum selben Zeitpunkt die Wellenfront die Position zwischen G und H erreicht. Zusätzlich existiert die Wellenfront MFPGN, deren Quelle der Punkt D darstellt. Diese Wellenfront ist jene, welche an der Grenzfläche gebeugt wird. Beispielsweise wird am Punkt S_1 sowohl das Signal der reflektierten, als auch der gebeugten Welle registriert. Am Punkt S_2 wird hingegen nur die gebeugte Welle empfangen. [45]

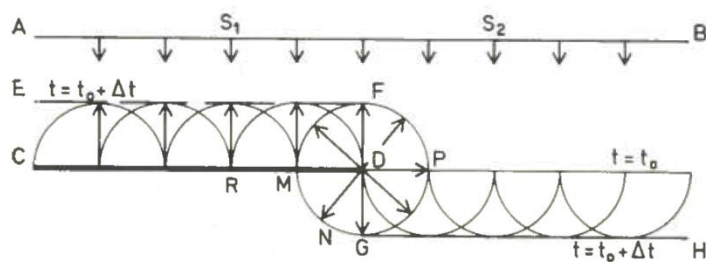


Abbildung 5: Beugung an Schichtkante (aus [45])

Trifft also eine seismische Welle auf eine Grenzfläche zweier Medien, die sich in ihren elastischen Eigenschaften unterscheiden, so kommt es zur Reflexion und Transmission der Welle. Beim Auftreffen einer P-Welle auf eine Grenzfläche entstehen sowohl eine reflektierte und eine transmittierte P-Welle, als auch eine konvertierte reflektierte und transmittierte S-Welle. Diese konvertierten Wellen werden auch als Wechselwellen bezeichnet. [52]

Snelliussches Brechungsgesetz:

Stößt eine Welle auf eine ebene Grenzfläche, so gilt das Gesetz von Snellius, welches die auftretenden Reflexions- und Brechungswinkel beschreibt. Abbildung 6 zeigt die einfallende P-Welle, als auch die reflektierte und gebeugte P- und S-Welle am Übergang zwei unterschiedlicher Medien. Die Einfallswinkel ergeben sich gemäß dem Gesetz von Snellius [45]:

$$\frac{\sin(\theta_1)}{v_{p1}} = \frac{\sin(\theta_2)}{v_{p2}} = \frac{\sin(\theta_3)}{v_{s1}} = \frac{\sin(\theta_4)}{v_{p2}} = \frac{\sin(\theta_5)}{v_{s2}} \quad (3)$$

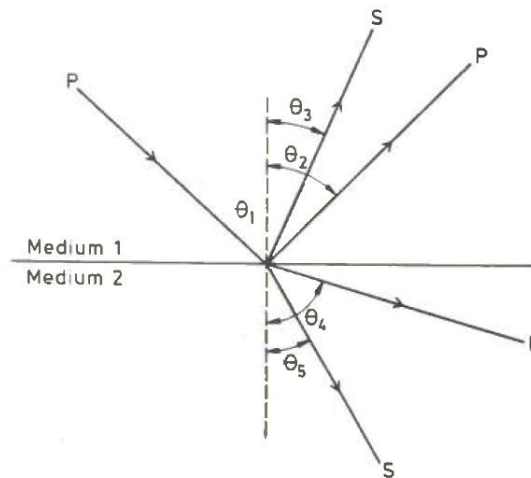


Abbildung 6: Darstellung des Snelliusschen Gesetzes (aus [45])

Stößt eine Welle mit der Geschwindigkeit v_1 auf ein Medium mit der Geschwindigkeit v_2 , wobei $v_1 < v_2$ ist, so ist der Brechungswinkel größer als der Einfallswinkel. Der Strahl wird in diesem Fall vom Lot gebrochen. [2]

Ein Teil der Wellenenergie wird also beim Auftreffen auf eine Schichtgrenze rückgestrahlt (Reflexion) und ein Teil der Energie dringt in die darunterliegende Schicht ein (Transmission). Die Energie, die entweder reflektiert oder transmittiert wird, hängt vom Kontrast der elastischen Parameter ab. [5]

Der Reflexionsfaktor R stellt das Amplitudenverhältnis zwischen der reflektierten und der einfallenden Welle bei senkrechtem Einfall dar. [2]

$$R = \frac{\rho_2 v_2 - \rho_1 v_1}{\rho_1 v_1 + \rho_2 v_2} \quad (4)$$

Der Term $\rho \cdot v$ wird als akustische Impedanz Z bezeichnet. Umso größer der Impedanzkontrast zweier Schichten ist, desto stärker wird die Welle reflektiert und desto wahrscheinlicher ist es, dass die Grenzfläche erkannt wird. [2]

Energieverlust

Beim Durchgang elastischer Wellen durch ein reales Medium gibt es stets Energieverluste, die unter dem Begriff Absorption zusammengefasst werden. Die Absorption ist auf folgende Effekte zurückzuführen [52]:

Sphärische Divergenz:

Die Energie einer sphärischen Wellenfront, die von einer Punktquelle ausgeht, verteilt sich auf einer immer größer werdenden Kugelfläche. Da die Energie konstant bleibt, nimmt mit wachsender Wellenfront die Energiedichte ab. Infolgedessen kommt es zur Amplitudenabnahme der Welle indirekt proportional zum Abstand von der Quelle. Diese rein geometrisch bedingte Amplitudenabnahme wird als sphärische Divergenz bezeichnet.

Intrinsische Dämpfung:

Neben der sphärischen Divergenz gibt es Energieverluste aufgrund der Tatsache, dass sich das Gestein nicht ideal elastisch verhält.

Ein Teil der Energie wird durch Reibung in Wärmeenergie umgewandelt. Wellen mit einer hohen Frequenz werden bei gleicher Entfernung stärker gedämpft, als niederfrequente Wellen.

Streudämpfung:

Beim Durchlaufen von Materialänderungen wird ein Teil der Energie in verschiedene Phasen gestreut. In Abhängigkeit von den Materialeigenschaften führt dieser Effekt ebenfalls zu einem Amplitudenabfall.

Auflösung

Das vertikale Auflösungsvermögen von Laufzeitmessungen ist von der Wellenlänge λ abhängig und liegt zwischen $\lambda/4$ und $\lambda/8$ [5]. Für die Auflösung spielt zusätzlich die Abtastfrequenz eine Rolle. Diese ist die Frequenz, mit der ein kontinuierliches Signal abgetastet wird. Sie steht mit der Nyquist-Frequenz in Verbindung, welche der halben Abtastfrequenz entspricht. Die aufgezeichneten Signale müssen kleinere Frequenzen als die Nyquist-Frequenz besitzen, damit es nicht zu einer Verzerrung des Signals kommt. Im Falle einer Signalverfälschung spricht man vom Alias Effekt. [45]

Die horizontale Auflösung lässt sich mithilfe der Fresnel-Zone bestimmen. Wird der Durchmesser der 1. Fresnel-Zone betrachtet, so liefern alle Punkte einer kreisförmigen Reflexionsfläche mit dem Radius r einen Beitrag zur registrierten Amplitude (siehe Abbildung 7). [52]

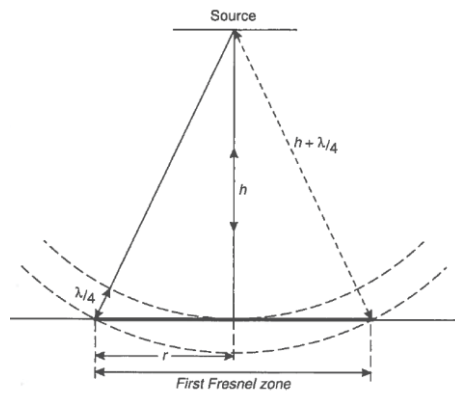


Abbildung 7: Darstellung der 1. Fresnel-Zone (aus [52])

Der Radius r ergibt sich wie folgt [52]:

$$r = \frac{\lambda h}{2} + \frac{\lambda^2}{16} \quad (5)$$

Der zurückgelegte Weg schräg einfallender Wellenstrahlen ist maximal um $\lambda/4$ größer als der Abstand zwischen Quelle und Reflektor. Der Reflektor muss mindestens die Länge der 1. Fresnel-Zone haben um als Reflexion sichtbar zu sein. [52]

Quellanregung

Zur gezielten Anregung einer seismischen Welle kann eine Impuls- oder eine Vibrationsquelle verwendet werden. Mit einer Impulsquelle wird kurzzeitig ein impulsförmiges Signal mit hoher Energie und breitem Frequenzspektrum erzeugt. Vibrationsquellen strahlen hingegen mehrere Sekunden lang ein kontinuierliches Signal mit einer bestimmten Frequenz und niedrigerer Energie in den Untergrund. Eine weitere Differenzierung der Quellen erfolgt nach Art des erzeugten Wellentyps. So können entweder P-Wellen oder S-Wellen generiert werden. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass zwischen sprengstoffgebundenem und sprengstofflosem Anregungsmechanismus zu unterscheiden ist. [32]

Die verwendete seismische Quelle hat Auswirkungen auf folgende Faktoren [32]:

- Energie, die in den Untergrund eingebracht wird: diese wirkt sich auf die maximal erreichbare Erkundungsreichweite aus
- Frequenzspektrum des Quellsignals: dieses wirkt sich auf das Auflösungsvermögen aus → je breitbandiger das Spektrum und je höher die Frequenz, desto höher ist die Auflösung

- die Abstrahlcharakteristik

Einsatzbereich

Die Seismik bietet ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten. In [5] werden folgende Einsatzbereiche aufgelistet:

- *„Erkundung der regionalen und lokalen geologischen Strukturen des Untergrundes*
- *Erkundung von Verwerfungen, Störungen, Kluft- und Auflockerungszonen*
- *Ermittlung von Teufe und Relief der Festgesteinsoberkante unter Lockergesteinsbedeckung*
- *Erkundung von Schichtgrenzen, besonders der Grenzfläche zwischen Aquiferen und grundwasserstauenden Horizonten*
- *Bestimmung des Verlaufs und der Mächtigkeit der Verwitterungszone und von Erosionsrinnen*
- *Abgrenzung lithologisch unterschiedlicher Materialien*
- *Kartierung von Deponieauflagerfläche*
- *Erkundung des Untergrundes unter versiegelten Flächen*
- *Erkundung abbaubedingter Veränderungen des Gebirges*
- *Bestimmung elastischer Parameter wie die Poissonzahl, insbesondere für geotechnische Aufgabenstellungen*
- *Lokalisierung anthropogener Strukturen im Untergrund (Bauwerke, Tanks, Fundamente)*
- *Hohlraumerkundung*
- *Einsatz bei archäologischen Fragestellungen“*

2.1.1 Reflexionsseismik

Die vortriebsbegleitende seismische Vorauserkundung im Tunnelbau basiert auf den Prinzipien der Reflexionsseismik, im Speziellen auf dem Prinzip des Vertical Seismic Profiling (VSP) bzw. Seismic While Drilling (SWD) (siehe Kapitel 2.6.1).

Bei der Reflexionsseismik erfolgt eine gezielte Anregung elastischer Wellen, die an geologischen Schichtgrenzen reflektiert und mithilfe von Geophonen registriert werden. Voraussetzung für die Detektion der Grenzen ist ein ausreichend großer Impedanzkontrast zwischen den angrenzenden Lithologien (vgl. Kapitel 2.1). Hauptsächlich werden bei der Reflexionsseismik Longitudinalwellen, sprich P-Wellen, angeregt und analysiert, nur in Spezialfällen kommen Scherwellen, sprich S-Wellen, zum Einsatz. Je nach Anordnung der Geophone wird zwischen 2-D- und 3-D-Seismik

unterschieden. In der 2-D Seismik erfolgt die Geophonauslage entlang einer Linie, in der 3-D-Seismik werden die Empfänger in einem Raster angeordnet. [18]

Bei der Anregung seismischer Wellen bzw. während der Wellenausbreitung entstehen Störwellen (Noise) im Untergrund, die das Nutzsignal überdecken (vgl. Kapitel 2.1). Störwellentypen sind beispielsweise die Oberflächenwellen oder die direkten Wellen. [18]

In Abbildung 8 ist der Strahlenverlauf der reflektierten Wellen dargestellt. Der Reflektor erscheint im Laufzeitdiagramm als Hyperbelast. Die direkte Welle wird durch die lineare Linie dargestellt. [2]

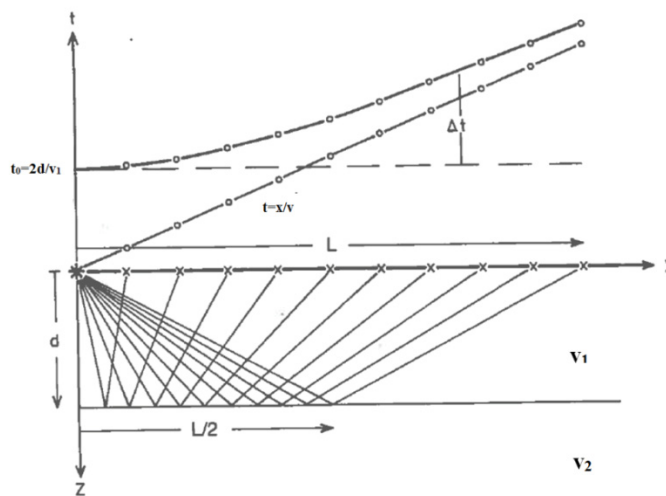


Abbildung 8: Reflexion seismischer Wellen; Strahlenverlauf (unten); Laufzeitkurve (oben) (nach [2])

Die Laufzeit t der reflektierten Welle im Abstand x von der Quelle wird in einer homogenen Schicht und einer ebenen Grenzfläche wie folgt berechnet [2]:

$$\left(\frac{v_1 t}{2}\right)^2 = \left(\frac{x}{2}\right)^2 + d^2 \quad (6)$$

$$t = \frac{2}{v_1} \sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2} \quad (7)$$

- v_1 ... Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle in der hangenden Schicht
- t ... Zeit
- x ... Weg
- d ... Mächtigkeit der hangenden Schicht

Im Anschluss an die Messung müssen die Rohdaten beim sogenannten Processing rechenstechnisch überarbeitet werden um ein sinnvolles geologisches Abbild zu erhalten.

Es kommt das Prinzip der Mehrfachüberdeckung zur Anwendung. Jeder Reflexionspunkt wird mehrfach unter verschiedenen Winkeln getroffen. Die Einsätze des gleichen Reflexionselements werden nach Beseitigung der Laufzeitunterschiede im Zuge der sogenannten Stapelung bzw. Stacking zu einer seismischen Spur zusammengefasst. Eine seismische Spur ist somit die Aufzeichnung der registrierten Signale während eines bestimmten Zeitabschnittes. Die ankommende seismische Energie wird in Form von Amplitudenschwankungen aufgezeichnet (siehe Abbildung 9). [39], [2]

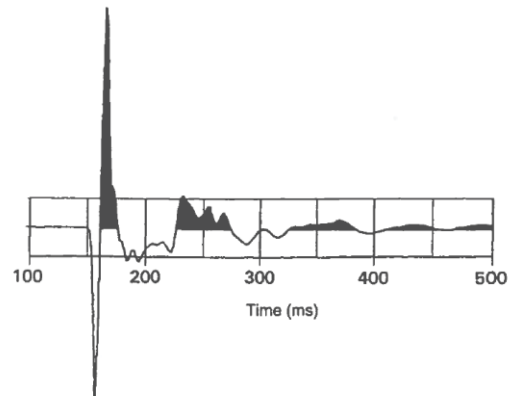


Abbildung 9: Schematische Darstellung einer seismischen Spur (aus [52])

2.2 Geoelektrik

Die Geoelektrik nutzt die Messung von elektrischer Spannung und Stromstärke um Kenntnisse über den Aufbau des Gebirges zu erhalten.

Es gibt zahlreiche unterschiedliche geoelektrische Messverfahren, wobei eine Unterscheidung bezüglich des elektrischen Feldes getroffen werden kann. Bei elektrischen Verfahren wird Gleichstrom oder Wechselstrom mit Frequenzen bis 50 Hz genutzt um die elektrische Potentialdifferenz zu messen. Bei elektromagnetischen Verfahren werden durch Anregung zeitabhängig periodischer oder impulsartiger Signale elektrische oder magnetische Felder gemessen. Die Energiezufuhr erfolgt bei den Verfahren entweder galvanisch durch geerdete Elektroden oder induktiv durch zeitlich variable Magnetfelder. [3]

Gemäß dem Ohmschen Gesetz verhält sich der elektrische Strom I indirekt proportional zum elektrischen Widerstand R . Das Verhältnis zwischen der elektrischen Spannung U zur Stromstärke I ergibt den elektrischen Widerstand R (Einheit: Ω).

$$R = \frac{U}{I} \quad (8)$$

Die Leitfähigkeit σ (Einheit: $(\Omega\text{m})^{-1}$ oder Siemens s) beschreibt das Verhältnis zwischen der Stromdichte j und der elektrischen Feldstärke E .

$$\sigma = \frac{j}{E} \quad (9)$$

Der Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit ist der spezifische Widerstand ρ (Einheit: Ωm). Er ist materialabhängig und definiert als der Widerstand, den ein Material von 1 m Länge und einem Querschnitt von 1 m^2 dem elektrischen Strom entgegensetzt.

In Tabelle 2 sind beispielhaft verschiedene Lithologien mit zugehörigem spezifischem Widerstand aufgelistet.

Tabelle 2: Spezifischer Widerstand unterschiedlicher Materialien (nach [2] und [52])

Material	Spezifischer Widerstand [Ωm]
kristalline Gesteine	$1 \cdot 10^3 - 1 \cdot 10^6$
Sandsteine	$1 \cdot 10^2 - 1 \cdot 10^4$
Tone	$1 - 1 \cdot 10^2$
Granite	$3 \cdot 10^2 - 3 \cdot 10^6$
Eisen	$1 \cdot 10^{-1} - 1,5 \cdot 10^{-1}$

In der Geoelektrik gibt es unterschiedliche Messverfahren. Beim Verfahren der Gleichstromgeoelektrik wird über zwei geerdete Stromelektroden Gleichstrom oder niederfrequenter Wechselstrom in den Untergrund eingeleitet. Es baut sich ein Potentialfeld auf, das von der Leitfähigkeit der Gesteine abhängig ist. Über zwei Spannungselektroden wird die Potentialdifferenz gemessen. Es gibt in der Gleichstromgeoelektrik unterschiedliche Elektrodenkonfigurationen, wie z.B. die Anordnung nach Wenner, Schlumberger, Dipol-Dipol,... [3]

Die induzierte Polarisation (IP) ist eine geoelektrische Untersuchungsmethode, bei der die Frequenzabhängigkeit des spezifischen elektrischen Widerstandes der Gesteine berücksichtigt wird [3]. Vortriebsbegleitende geoelektrische Vorauserkundungsmethoden im Tunnelbau beruhen auf dem Prinzip der IP-Messung. Nähere Erläuterungen folgen im Kapitel 2.2.1.

2.2.1 Induzierte Polarisation

Die IP-Messung basiert auf elektrochemischen Vorgängen, die durch Unterschiede in der elektrolytischen und elektrischen Leitfähigkeit von Gesteinen als auch durch unterschiedliche Beweglichkeit der Ionen im Porenraum hervorgerufen werden. Wird Strom in ein polarisierbares Medium eingeleitet, so bewirkt dieser eine elektrische Polarisation. Der genaue physikalische Hintergrund für den sogenannten IP-Effekt ist nach wie vor nicht vollständig geklärt. Zwei Mechanismen sind allerdings bekannt [52]:

- Elektrodenpolarisation:

Wird eine Metallelektrode in eine ionische Lösung gegeben, so kommt es zur Ladungstrennung und somit zum Aufbau eines elektrischen Potentials zwischen Elektrode und Lösung. Wird nun Spannung angelegt, so wird das ionische Gleichgewicht gestört und der Potentialunterschied zwischen Elektrode und Lösung verändert sich. Bei Abschalten der Spannung wird der Zustand des Ungleichgewichts wieder ausgeglichen indem die Ionen zurückströmen. [52]

Es wird nun ein leitfähiges Korn betrachtet, das eine ionische Strömung blockiert (siehe Abbildung 10). In dem Korn bildet sich eine elektrische Ladung aus und es wird polarisiert. Der Potentialunterschied reicht über das Korn hinweg. Wird nun der Strom abgeschaltet, so strömen die Ionen zurück um den Potentialunterschied auszugleichen. [52]

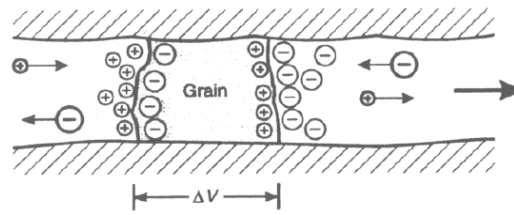


Abbildung 10: Darstellung elektrochemischer Prozesse bei der Elektrodenpolarisation (aus [52])

- Elektrolytische Polarisation/ Membranpolarisation

Viele Gesteine, wie z.B. Ton, besitzen eine negative Oberflächenladung. Es kommt zur Ansammlung von positiven Ionen des Porenwassers an der Grenzfläche. Falls die Porenräume sehr eng sind, werden die größeren negativen Ionen blockiert und es kommt zum Aufbau einer Potentialdifferenz (siehe Abbildung 11, oben). Auch die Ansammlung negativ geladener Tonpartikel an den Porenwänden resultiert in einer Polarisation. Positiv geladene Ionen werden von den Tonpartikeln angezogen. Die Kationen können sich bei angelegter Spannung zwischen den Porenwänden hin- und her bewegen, negativ geladenen Ionen werden allerdings blockiert (siehe Abbildung 11, unten). Ein Abbau der angelegten Spannung resultiert in beiden Fällen in einem Abbau der Potentialdifferenz. [52]

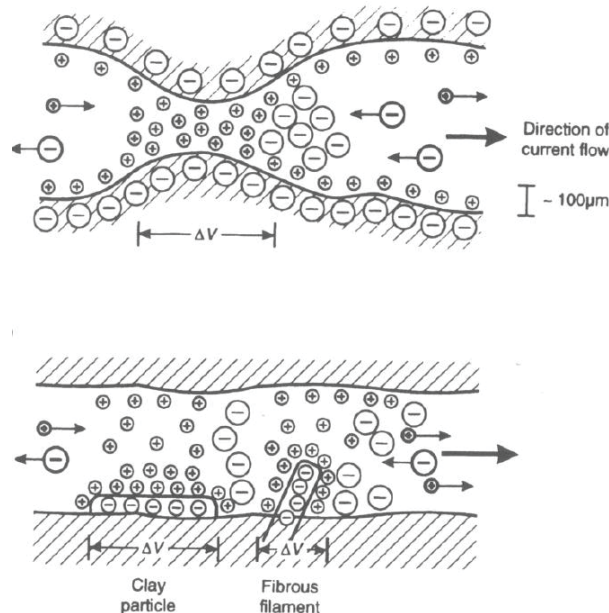


Abbildung 11: Darstellung elektrochemischer Prozesse bei der Membranpolarisation (aus [52])

Wird nun Strom in den Untergrund eingespeist, so wird an der Messelektrode eine zeit- und spannungsabhängige Anstiegskurve gemessen bevor der Maximalwert der Spannung erreicht wird. Beim Ausschalten des Einspeisestroms ergibt sich eine typische

Abklingkurve. Der Strom- und Spannungsverlauf ist beispielhaft in Abbildung 12 dargestellt. Das Medium verhält sich ähnlich wie ein Kondensator und speichert Energie. In der Abbildung ist auch ersichtlich, dass die elektrische Leitfähigkeit polarisierbarer Medien frequenzabhängig ist. Bei hohen Frequenzen ist der Widerstand geringer als bei tiefen Frequenzen. Grund dafür ist, dass bei niedrigen Frequenzen mehr Zeit ist um auf veränderte Gleichgewichtszustände zu reagieren und Polarisationserscheinungen auszubilden. [3]

Unterschiede in den Charakteristiken der Abklingkurve und im Frequenzverhalten beruhen auf unterschiedlichen Fähigkeiten des Materials Energie zu speichern. Als Resultat der Messung können Aussagen zur stofflichen Zusammensetzung und zum strukturellen Gebirgsaufbau getroffen werden. [3]

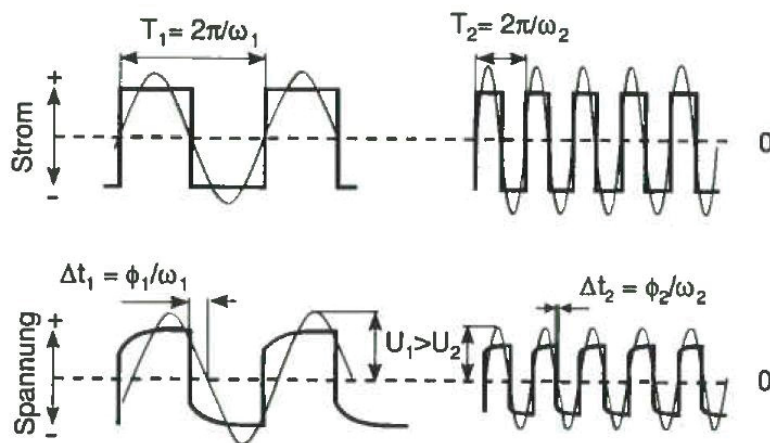


Abbildung 12: Strom- und Spannungsverlauf in polarisiertem Untergrund bei der Frequenzbereichsmessung (aus [3])

Es gibt 4 Methoden zur Messung des IP-Effekts: das Zeitbereichsverfahren, das Frequenzbereichsverfahren, das Phasenbereichsverfahren und die spektrale induzierte Polarisation.

Einsatzbereich:

In [48] werden folgende Anwendungsmöglichkeiten der IP-Messung angeführt:

- „Lokalisierung und Abgrenzung verdeckter Altablagerungen; vorwiegend aufgrund metallischer Inhaltsstoffe erscheint der IP-Effekt dort lateral variabler und meist deutlich stärker als im ungestörten Umfeld
- Abgrenzung bindiger (tonig/schluffige) gegen rollige (sandig/kiesige) Bereiche
- Nachweis von Störungszonen mit kluftgebundener Mineralisation
- Lithologische Gliederung von Festgesteinskomplexen“

2.3 Georadar

Das Georadar-Verfahren (Bodenradar, Ground Penetration Radar, GPR) ist ein elektromagnetisches Impuls-Reflexionsverfahren zur zerstörungsfreien Charakterisierung des Untergrundes. [4]

Funktionsweise

An der Senderantenne werden kurze Impulse elektromagnetischer Wellen erzeugt, die aus gekoppelten elektrischen und magnetischen Feldern bestehen. Die Frequenz liegt ca. zwischen 10 und 1600 MHz und die Wellen breiten sich in Untergrund mit gesteinspezifischer Geschwindigkeit aus. An Diskontinuitäten werden sie reflektiert, gestreut und gebeugt und zur Empfänger-Antenne rückgestrahlt. [4]

Der erfolgreiche Einsatz dieser Messtechnologie setzt einen Kontrast in der Leitfähigkeit bzw. in der Dielektrizität (Polarisierbarkeit) voraus. Die Dielektrizitätszahl ϵ_r ist definiert als das Verhältnis zwischen der Dielektrizitätskonstante des Materials ϵ und der Dielektrizitätskonstante von Vakuum ϵ_0 .

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (8)$$

In Tabelle 3 sind die Dielektrizitätszahlen unterschiedlicher Materialien aufgelistet.

Tabelle 3: Dielektrizitätszahlen unterschiedlicher Materialien (aus [52])

Material	Dielektrizitätszahl ϵ_r [-]
Granit	5-8
Kalk	7-9
Sand (trocken)	3-6
Sand (nass)	25-30
Ton (trocken)	3
Ton (nass)	8-15
Wasser	81
Luft	1

Die Laufzeit sowie die Amplitude und die Phase des reflektierten Signals werden von der Empfängerantenne in Echtzeit registriert und als „Spur“ im sogenannten Radargramm aufgezeichnet. Normalerweise werden abhängig vom verwendeten System bis zu 32 Scans pro Sekunde datiert. Verwenden Sender und Empfänger die gleiche Antenne, so wird das Radargerät als „monochromatisches Radar“ bezeichnet. Bei einem bistatischen Radargerät sind Sender und Empfänger räumlich voneinander getrennt. [52]

Zur Interpretation der Ergebnisse müssen die Georadar-Messungen mit einem direkten Aufschlussverfahren in Form einer Bohrung ergänzt werden. Somit werden Informationen

zur Leitfähigkeit des Materials gewonnen. [38]

Bei bekannter Fortpflanzungsgeschwindigkeit kann die Wegstrecke zum Reflektor und somit die Tiefenlage der Diskontinuität ermittelt werden [4].

Wellenausbreitung bei Georadar-Messungen

Bei einer Radarmessung entstehen an der Grenzfläche Luft und Boden zwei direkte Wellen. Die Luftwelle breitet sich mit Vakuum-Lichtgeschwindigkeit an der Oberfläche aus und ist mit ca. $3 \cdot 10^8$ m/s die schnellste Welle. Knapp unter der Oberfläche breitet sich die Bodenwelle aus, die Aufschluss über die Ausbreitungsgeschwindigkeit in der oberen Schicht liefert. Zusätzlich gibt es gleich wie in der Seismik die reflektierte Welle. (siehe Abbildung 13) [4]

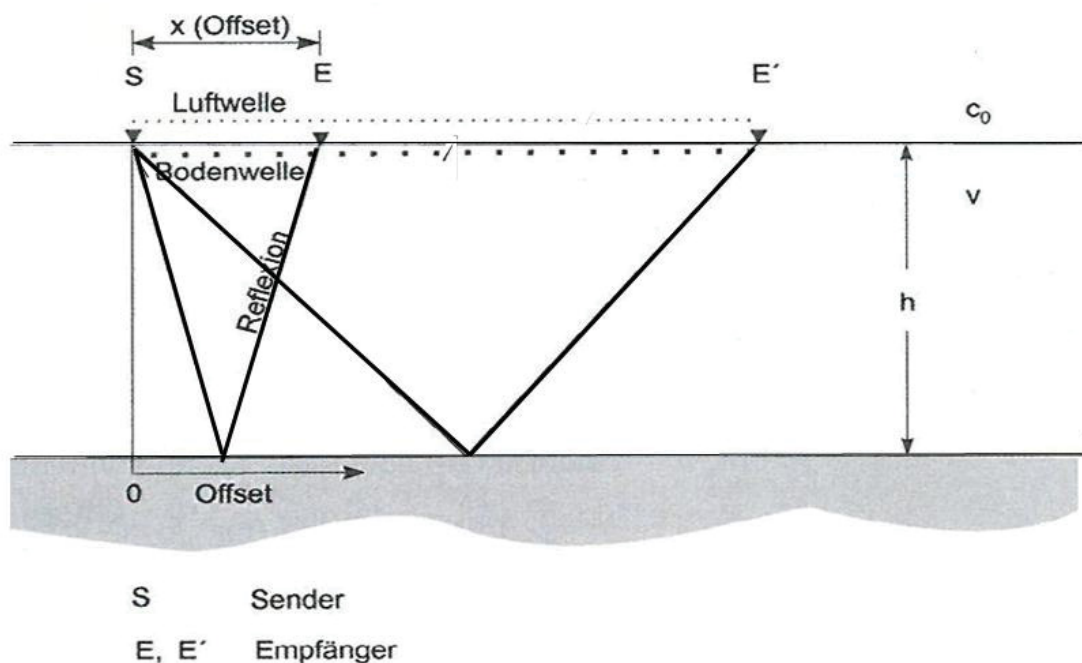


Abbildung 13: Wellentypen bei Georadar-Messung (nach [4])

Energieverlust

Gleich wie bei einer seismischen Welle gibt es bei elektromagnetischen Wellen eine Energie- bzw. Amplitudenabnahme aufgrund Streuung, Reibung und Geometrie der Welle. Die Dämpfung der Wellen ist im Untergrund meist sehr hoch und es werden nur ca. 10% der abgestrahlten Energie an die Oberfläche rückgestrahlt. Umso höher die Leitfähigkeit eines Materials ist, desto stärker wird die Signalamplitude gedämpft. Vor allem niedrigohmige Baugründe, wie zum Beispiel tonige Böden, reduzieren die Eindringtiefe rasch. Die Dämpfung ist direkt proportional zur Frequenz, das heißt je höher

die Frequenz der Welle ist, desto stärker wird das Signal gedämpft und desto geringer ist die Eindringtiefe. Bei Anregung mit niedrigen Frequenzen wird eine größere Eindringtiefe erzielt, aber gleichzeitig das Auflösungsvermögen reduziert. [4]

Einsatzbereich

In [4] werden folgende Einsatzbereiche angeführt:

- *„Ortung von Rohrleitungen, Kabeln und anthropogenen Einlagerungen (z.B. Fässer, Fundamente etc.)*
- *Hohlraumnachweis*
- *Untersuchung von Sedimenten- und Bodenstrukturen, Abgrenzung von Anomalien und Homogenbereiche*
- *Nachweis von Störungen, Klüften und Rissen im Festgestein*
- *Auffinden von Tonlinsen, Eiskeilen, Torfvorkommen etc.*
- *Ermittlung der Lage der Grundwasseroberfläche in Kies, Sand und Sandstein*
Abbildung der Aquiferbasis (bei geringer Leitfähigkeit des Grundwassers)
- *Prüfung des Zustandes von Deponieabdichtungssystemen*
- *Strukturerkundung (zur Anlage von Untertagedeponien) im Salzbergbau“*

Bodenradarmessungen werden vor allem bei hochohmigem Untergrund mit geringem Ton- und Wassergehalt erfolgreich eingesetzt. Die Messung liefert beispielsweise in trockenen Sanden oder im Festgestein gute Ergebnisse. Liegt oberflächennah gut leitendes Material vor, wie z.B. feuchte Tone und Schluffe, salzhaltiges Wasser oder eisenhaltige Schlacke, so versagt die Messmethode. Sowohl Wasser mit einer Dielektrizitätszahl von 81, als auch Tone, die –OH-Gruppen (Hydroxygruppen) eingelagert haben, sind sehr leitfähig wodurch das Signal stark gedämpft wird. [52]

2.4 Magnetik

Das Prinzip der Magnetik beruht auf der Vermessung des natürlichen Magnetfeldes der Erde. Aufgrund ihres Eisengehaltes stellen verschiedene Gesteine, künstlich hergestellte Körper oder Einlagerungen (z.B. Rohrleitungen, Schrott, Fundamente,..) Anomalien dar, die das Magnetfeld beeinflussen. Mithilfe der angewandten Magnetik können solche Anomaliefelder erfasst werden und Aussagen zu deren Ursachen getroffen werden.

Einsatzbereich

Laut [30] sind die häufigsten Anwendungsmöglichkeiten der Magnetik:

- *„Auffinden und Abgrenzen von verdeckten Altablagerungen mit magnetisch wirksamen Inhaltsstoffen*
- *Lithologische Gliederung des Untergrundes in Gebiete mit kristallinen (magmatischen und metamorphen) Gesteinen*
- *Nachweis von Störungszonen besonders in Gebieten mit kristallinem Untergrund“*

2.5 Gravimetrie

Die Gravimetrie beruht auf der Vermessung des lokalen Schwerfeldes der Erde. Die Bestimmung des Potentialfeldes dient zur Lokalisierung von Strukturen im Untergrund, die eine Dichteinhomogenität bewirken.

Einsatzbereich

Zu den Einsatzbereichen zählen laut [33]:

- *„Strukturerkundung und lithologische Gliederung des Untergrundes insbesondere in Gebieten mit Lockersedimenten*
- *Nachweis von Störungszonen besonders in Gebieten mit kristallinem Untergrund*
- *Nachweis von Hohlräumen*
- *Bestimmung der Mächtigkeit und/oder Dichte von Deponiekörpern“*

2.6 Bohrlochgeophysik

Bohrlochgeophysikalische Messungen ermöglichen eine Ermittlung geologisch und geotechnisch relevanter Parameter im bohrlochumgebenden Gestein. Der entscheidende Vorteil gegenüber geophysikalischen Untersuchungsmethoden, die von der Geländeoberfläche durchgeführt werden, ist, dass die Erkundung näher am zu untersuchenden Gebirgsbereich durchgeführt wird.

Die Bohrlochgeophysik hat ihren Ursprung in der Erdöl- und Erdgasindustrie. Bohrungen werden hier bis in große Tiefen abgeteuft und aufgrund der begrenzten Erkundungsreichweite der Oberflächengeophysik stellt die Bohrlochgeophysik ein unverzichtbares Werkzeug dar. Sie dient zum Kenntnissgewinn bezüglich Lage des Reservoirs, Gebirgsdruck, struktureller und geologischer Beschaffenheit des Gebirges etc. Heute ist die Bohrlochgeophysik auch ein wichtiger Bestandteil der Baugrunderkundung im Ingenieurbau. Das Abteufen von Bohrungen stellt ein gängiges Aufschlussverfahren zur Erkundung des Untergrundes dar. Durch die Überwachung des Bohrprozesses, Analyse des Bohrgutes und Dokumentation der Bohrdaten mittels Bohrdatenschreiber werden wichtige Informationen zu den Untergrundverhältnissen gewonnen. Ergänzende geophysikalische Messungen im Bohrloch liefern Erkenntnisse, die über die Ergebnisse des direkten Aufschlusses hinausgehen. [59]

In den folgenden Unterkapiteln werden sowohl die Bohrlochseismik als auch das Bohrlochradar vorgestellt. Beide Verfahren spielen eine wichtige Rolle für die vortriebsbegleitende geophysikalische Vorauserkundung im Tunnelbau.

2.6.1 Bohrlochseismik

Die Bohrlochseismik ist ein Spezialgebiet der seismischen Erkundung und liefert Detailinformationen zur Ergänzung der Oberflächenseismik.

Die wichtigsten Anwendungsmöglichkeiten sind laut [19]:

- die Abbildung steil stehender Strukturen, Klüfte und Störungen;
- die Erkundung des Untergrundes mit höherer Auflösung als mit Oberflächenseismik;
- das Auffinden von natürlichen Hindernissen, wie Hohlräume oder Findlinge und
- die Ermittlung bautechnisch relevanter Parameter (Wellengeschwindigkeiten, Schermodul, Kompressionsmodul).

VSP - Vertical Seismic Profiling

Sämtliche reflexionsseismische Verfahren zur vortriebsbegleitenden Vorauserkundung im Tunnelbau basieren auf dem Prinzip des Vertical Seismic Profiling (VSP). Das Verfahren VSP wurde ursprünglich für die Kohlenwasserstoff-Exploration entwickelt und dient zur seismischen Erkundung des Untergrundes seitlich und unterhalb von Bohrlöchern. Der Vorteil der Messung im Vergleich zur seismischen Erkundung von der Geländeoberfläche aus ist, dass sich die Signalaufnehmer näher am Zielobjekt befinden und daher die Absorption, Dämpfung und Streuung der Wellen geringer ist. Außerdem werden nicht nur Reflektoren, die oberhalb des Signalaufnehmers verlaufen, registriert, sondern es ist auch eine Vorausschau und Prognose von Impedanzkontrasten im tiefer liegenden Gebirge möglich. [46]

Das Messprinzip des Vertical Seismic Profiling beruht darauf, dass sich die seismische Quelle an der Erdoberfläche befindet und der Empfänger in regelmäßigen Abständen im Bohrloch versetzt wird (siehe Abbildung 14). [46]

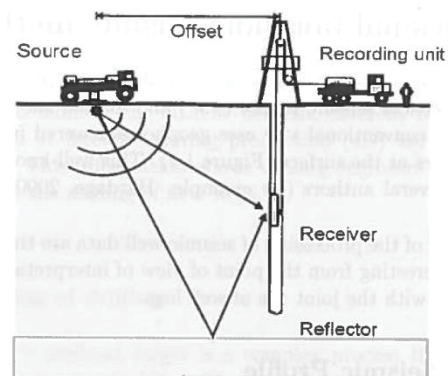


Abbildung 14: Messprinzip VSP (aus [46])

Je nachdem in welcher Entfernung zum Bohrloch sich die seismische Quelle befindet, wird zwischen folgenden Messmodulen unterschieden [19]:

- Zero Offset VSP (siehe Abbildung 15, links): Quelle befindet sich in unmittelbarer Nähe zum Bohrloch, Signalaufnehmer wird im Bohrloch versetzt
- Offset VSP (siehe Abbildung 15, rechts): Quelle befindet sich in größerem Abstand zur Bohrung, Signalaufnehmer wird im Bohrloch versetzt
- Walk Away VSP (siehe Abbildung 15, mittig): Quelle wandert von der Bohrung weg, Signalaufnehmer bleibt an fixer Position im Bohrloch
- Reverse Multi Offset VSP: Quelle befindet sich im Bohrloch, Aufnehmer registrieren die Signale an der Erdoberfläche

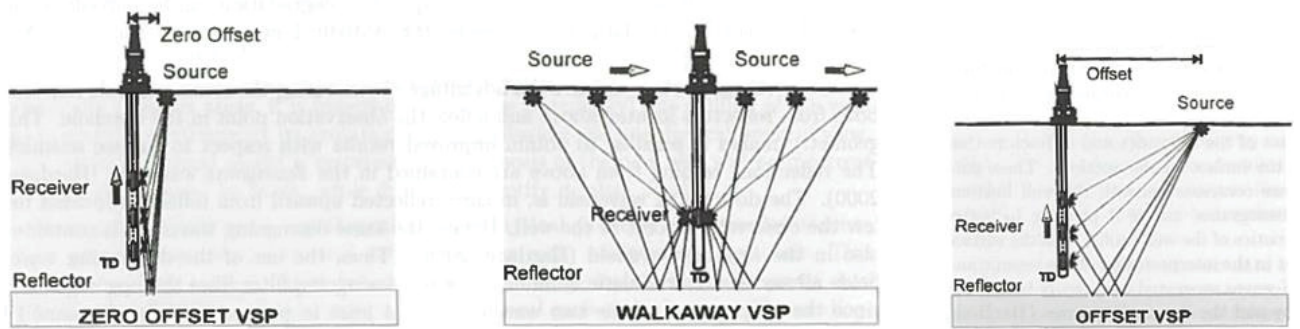


Abbildung 15: Verschiedene Messanordnungen des VSP [46]

Mit VSP-Messungen wird aufgrund des geringeren Wellenweges eine höhere Auflösung erreicht als mit seismischen Messungen an der Oberfläche. Es werden Wellen, die sowohl oberhalb als auch unterhalb des Geophons reflektiert werden, aufgezeichnet. In der Oberflächenseismik können hingegen Wellen, die sich nach unten hin ausbreiten nicht erfasst werden. [22]

Der Nachteil der VSP-Methode ist, dass sie mit einer Bohrunterbrechung und infolgedessen mit einem hohen Zeit- und Kostenaufwand verbunden ist. Das Bohrgestänge muss für die Messdurchführung aus dem Bohrloch entfernt werden, wobei hier neben dem Bohrstillstand die Gefahr eines Bohrlocheinsturzes besteht. Aus diesen Gründen wurde ein seismisches Erkundungssystem entwickelt, bei dem der Bohrkopf selbst als seismische Quelle dient und die seismischen Signale während des Bohrvorganges mit Oberflächengeophonen empfangen werden. Diese Methode wird Seismic While Drilling (SWD) genannt. [22]

SWD - Seismic While Drilling

Beim SWD-Verfahren wird der rotierende Bohrkopf als kontinuierliche Quelle seismischer Energie genutzt. Die Kraft, die auf die Formation wirkt, resultiert aus dem Eigengewicht des Bohrkopfes und des Bohrgestänges. Über die Rollen des Bohrmeißels wird eine vorwiegend axiale Kraft auf das Gebirge ausgeübt, was zum Scher- bzw. Kompressionsbruch des Gebirges führt. Es werden hauptsächlich Kompressionswellen erzeugt, die sich vertikal entlang des Bohrlochs fortpflanzen. Nur ein geringer Anteil der Wellen breitet sich normal zum Bohrloch aus. Zusätzlich zu Kompressionswellen werden vertikal polarisierte Scherwellen generiert, die sich in horizontale Richtung normal zum Bohrloch ausbreiten. Die Wellen breiten sich nicht nur im Bohrloch umgebenden Gebirge, sondern auch im Bohrgestänge aus. Die Vibrationen des Bohrstrangs werden mit einem Beschleunigungsaufnahme gemessen, der am oberen Ende des Bohrstrangs positioniert wird. Die registrierten Vibrationen werden anschließend mit den an den Geophonen

aufgezeichneten Signalen korreliert. [22], [1]

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass weder der Bohrbetrieb während der Messdurchführung unterbrochen wird, noch das Bohrgestänge entfernt werden muss. Bei der Messung gibt es laut [1] allerdings folgende Einschränkungen:

- Nur Rollenmeißel erzeugen ein für die seismische Messung geeignetes Quellsignal, da der Bruchvorgang vorwiegend durch die Kompressionskraft gesteuert wird. Beim Ausbruch mit diamantbestückten Bohrkernen erfolgt der Ausbruch durch Scher- oder Mahlvorgänge und daher ist das Signal zu schwach um die Oberfläche zu erreichen.
- Die Messmethode funktioniert nicht in stark geneigten oder horizontalen Bohrlöchern, da sich die P-Wellen in Richtung Bohrlochachse ausbreiten und daher nie die Receiver an der Geländeoberfläche erreichen würden.
- Das Quellsignal wird beeinflusst vom Gewicht am Bohrkopf und der Umdrehungszahl.

2.6.2 Bohrlochradar

Bohrlochradarmessungen wurden ursprünglich für den Salzbergbau entwickelt und finden seit geraumer Zeit auch Anwendung in der Ingenieur-, Umwelt- und Hydrogeologie. [8]

Funktionsweise

Analog zur Bodenradarmessung (siehe Kapitel 2.3) werden über die Senderantenne kurze elektromagnetische Impulse abgestrahlt. An Grenzflächen, an denen sich die dielektrischen Eigenschaften von jenen des umliegenden Gesteins unterscheiden, werden die elektromagnetischen Wellen zum Teil reflektiert und von der Empfängerantenne registriert. Bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle kann mit der gemessenen Wellenlaufzeit und Amplitude auf die Teufenlage einer Diskontinuität geschlossen werden. [53]

In der Bohrloch-Radartechnologie wird zwischen drei Messmethoden unterschieden. Es gibt die Reflexionsmessung, die Crosshole-Messung und die tomographische Messung. Bei der Reflexionsmessung befinden sich Sender und Empfänger im gleichen Bohrloch und die Sonden werden kontinuierlich oder schrittweise im Bohrloch versetzt (siehe Abbildung 16). [54]

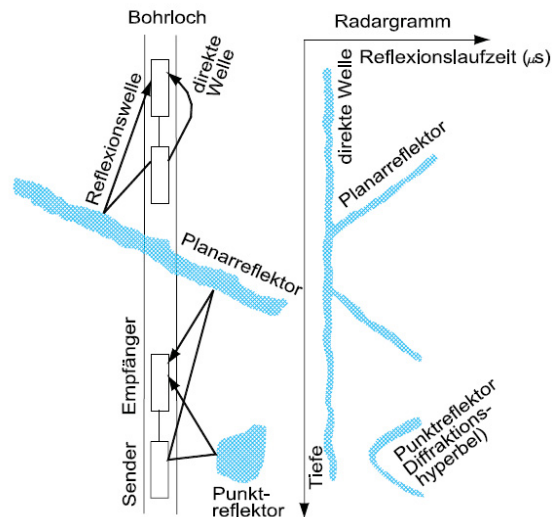


Abbildung 16: Prinzip der Bohrlochradar-Reflexionsmessung inkl. Ergebnisdarstellung im Radargramm (aus [54])

Sowohl bei der Crosshole- als auch bei der tomographischen Messung befinden sich Sender und Empfänger getrennt in zwei Bohrlöchern. Die Messungen liefern Informationen zu den Gebirgsverhältnissen zwischen den Bohrungen. [54]

Bei der Crosshole-Anordnung (siehe Abbildung 17) werden Sender und Empfänger auf gleicher Höhe gegenüber angeordnet und nach jeder Messung in konstanten Abständen schrittweise oder kontinuierlich versetzt. Falls ein Bohrloch tiefer ist als das andere, so kann die Messung mit geneigten Strahlen weitergeführt werden. Als Ergebnis erhält man qualitativ die Tiefe und die Erstreckung einer Diskontinuität, allerdings kann die exakte Lage und Größe nicht ermittelt werden. [54]

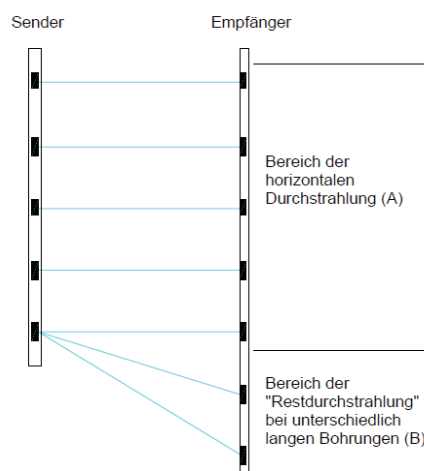


Abbildung 17: Prinzip der Crosshole-Messung (aus [54])

Bei der tomografischen Messung wird entweder der Sender oder der Empfänger in einer Tiefenlage fixiert während mit der anderen Antenne die Messung in entsprechenden

Abständen durchgeführt wird (siehe rote Markierung in Abbildung 18). Sind diese Messungen beendet, so wird die bislang fixe Antenne zum nächsten Messpunkt versetzt und die Prozedur beginnt von vorne. Bei der tomographischen Bohrlochvermessung liefert der große Datensatz Informationen zur Tiefe, Lage und Größe des anomalen Gebirgsbereichs. [54]

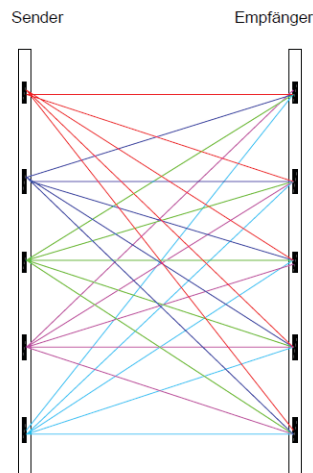


Abbildung 18: Prinzip der tomographischen Messung (aus [53])

Die Bohrlochradarmessung zeichnet ein hohes Auflösungsvermögen aus. Die maximal erreichbare Erkundungsreichweite ist maßgebend abhängig von den dielektrischen Eigenschaften des untersuchten Gebirges. Ein steigender Tongehalt oder die Zunahme der Leitfähigkeit des Bergwassers resultieren beispielsweise in einer Reduktion der Erkundungsreichweite. In [54] sind folgende Richtwerte für die Reichweite angegeben:

- *„< wenige Meter in tonigen und schluffigen Gesteinen (Verfahren ist in dieser Geologie nicht geeignet)*
- *10 m - 40 m in normal geklüfteten Gesteinen*
- *40 m – 150 m in massiven Gesteinen*
- *bis zu 300 m und mehr unter speziellen Bedingungen (z.B. reines Steinsalz, ungestörter Kalkstein oder Granit, Eis)“*

Bei einer Crosshole- und tomographischen Messung ist die maximale Reichweite höher. Selbst in bindigen, gut leitfähigen Gesteinen ist hier eine aussagekräftige Messung bis zu einer Bohrlochentfernung von 20 m möglich. [54]

3 Vortriebsbegleitende, indirekte Erkundungssysteme beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb

Vortriebsbegleitende geophysikalische Erkundungssysteme ermöglichen eine Detektion von Störungzonen und anderer geotechnisch relevanter Strukturen vor der Ortsbrust. Im Unterschied zu einer Vorauserkundungsbohrung, bei der das Gebirge „stichpunktartig“ untersucht wird, liefern geophysikalische Erkundungen ein räumliches Abbild der geologisch-geotechnischen Verhältnisse.

In den nachfolgenden Kapiteln werden die am europäischen Markt erhältlichen geophysikalischen Vorauserkundungssysteme vorgestellt, sowie deren Vor- und Nachteile aufgezeigt. Ein Teil der Recherche erfolgte in Form einer Literaturstudie. Zusätzlich wurden im Zuge von Gesprächen und Interviews mit erfahrenen Geophysikern, Geologen und Geotechnikern wichtige Informationen und Erfahrungswerte zu den indirekten Erkundungssystemen im maschinellen Tunnelbau eingeholt. Im Anhang 12 bis Anhang 19 sind für die unterschiedlichen Systeme tabellarisch die wichtigsten Informationen hinsichtlich Einsatzbereich, Montage des Messsystems, Durchführung und Auswertung der Messung angeführt. Es wird zwischen Aussagen von Anbietern und von Anwendern differenziert.

3.1 Seismische Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb

Die zeitgerechte, seismische Detektion natürlicher und künstlicher Diskontinuitäten im Vorfeld der Ortsbrust soll zur Risikominimierung beim Auffahren eines Tunnels beitragen. An Schichtgrenzen oder Diskontinuitäten im Gebirge werden seismische Wellen reflektiert und an den Geophonen aufgezeichnet, die in ausreichendem Abstand zur Ortsbrust in Bohrlöchern positioniert sind.

Die seismischen Erkundungsmethoden im Tunnelbau sind Weiterentwicklungen von Technologien, die in der Erdöl- und Erdgasbranche zum Einsatz kommen und basieren auf dem Prinzip des VSP bzw. SWD (siehe Kapitel 2.6.1).

Grundsätzlich ist mithilfe der Reflexionsseismik eine Vorauserkundung mit einer Reichweite von bis zu 150 m vor die Ortsbrust möglich. Die Reflektoren werden mit einer Lagegenauigkeit von ± 10 m detektiert. Die seismischen Erkundungssysteme tragen sowohl zur Prognose vortriebsrelevanter Einzelstörungen als auch großräumig aufgelockerter Gebirgsbereiche bei. Die Interpretation der aufgezeichneten Reflektoren

ermöglicht außerdem Aussagen hinsichtlich Lithologiewechsel, Zerlegungsgrad des Gebirges und Karsthohlräume. Die Detektion von Bergwasser ist nur eingeschränkt möglich. [49]

Voraussetzung für die deutliche Abbildung seismischer Reflektoren ist das Vorhandensein entsprechend großer Impedanzkontraste im Gebirge. Eine steilstehende Störung mit stumpfwinkliger Orientierung zur Tunnelachse stellt beispielsweise eine markante Grenze zum umliegenden kompakten Gebirge dar. Ein deutlicher seismischer Reflektor kann aufgezeichnet werden. Liegt aber ein wechselhaftes Gebirge mit graduierendem Verlauf von gestörten und ungestörten Gebirgsbereichen vor, so fehlen ausreichend große akustische Impedanzkontraste. Die einzelnen Bereiche können daher nur schwer oder gar nicht abgegrenzt werden. In einer anderen Geologie kann wiederum der Fall auftreten, dass viele Reflektoren detektiert werden, diese aber nicht von bautechnischer Relevanz sind. Eine Überinterpretation der Reflektoren kann zu einer falschen geologischen Prognose führen. [10], [49]

Ein weiterer limitierender Faktor bei der seismischen Vorauserkundung ist die Lage des Reflektors im Bezug zur Tunnelachse. Flach einfallende und schleichend zur Tunnelachse streichende Störungszonen sind für die seismische Vorauserkundungsmethode sehr ungünstig und schwierig zu erkennen. Schräg zur Tunnelachse orientierte Störungen werden grundsätzlich seitlich der Achse abgebildet und müssen bis zum Schnittpunkt mit der Tunnelachse extrapoliert werden. Diese Extrapolation ist mit einer Prognoseunsicherheit verbunden, die minimiert werden kann indem die seismische Vorauserkundung kontinuierlich erfolgt und der Reflektor „verfolgt“ wird. [6]

Die Seismik stellt grundsätzlich nur ein Hilfsmittel zur begleitenden geologisch-geotechnischen Baugrunduntersuchung dar. Eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse ist erst durch eine Kombination mit anderen Erkundungsmethoden, wie z.B. Vorausbohrungen möglich. Die geologische Prognose sollte vor Ort in Zusammenarbeit mit den Geologen und Geotechnikern erfolgen. Im günstigsten Fall kann bei eindeutigen Hinweisen der Seismik auf ein standfestes Gebirge die Vorauserkundungsbohrung entfallen. Liefert die Geophysik Indizien auf eine Anomalie, so ist eine detaillierte Erkundung in Form von Drehschlag- oder Kernbohrungen erforderlich. [49]

Es gibt unterschiedliche Anbieter seismischer Vorauserkundungssysteme im Tunnelbau, deren Produkte sich in der Anordnung der Messgeräte, Art der seismischen Anregung, im Processing und der Auswertung unterscheiden. Das Augenmerk dieser Arbeit liegt auf kommerziell erhältlichen geophysikalischen Vorauserkundungssystemen, die in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine eingesetzt werden können.

3.1.1 Seismische Vorauserkundungssysteme

3.1.1.1 TSWD – Tunnel Seismic While Drilling

Das System Tunnel Seismic While Drilling (TSWD) wurde in Kooperation zwischen der TU Wien und dem Unternehmen Pöyry entwickelt und wird von Pöyry vertrieben.

Erstmals kam TSWD im Jahr 2008 im Pilotstollen Hieflau zum Einsatz. Weitere Referenzprojekte sind das Kraftwerk Reißeck, das Kraftwerk Bärenwerk und der Druckstollen Prutz. Aktuell wird das System TSWD zur seismischen Vorauserkundung im Koralmtunnel eingesetzt. [29]

Funktionsweise und Messlayout:

Tunnel Seismic While Drilling ist eine vortriebsbegleitende Erkundungsmethode, die ausschließlich beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb eingesetzt werden kann. Kennzeichen des Systems ist, dass die Tunnelbohrmaschine selbst als seismische Quelle verwendet wird und die Anregung der Wellen kontinuierlich durch den Schneidprozess an der Ortsbrust erfolgt (siehe Abbildung 19). [6]

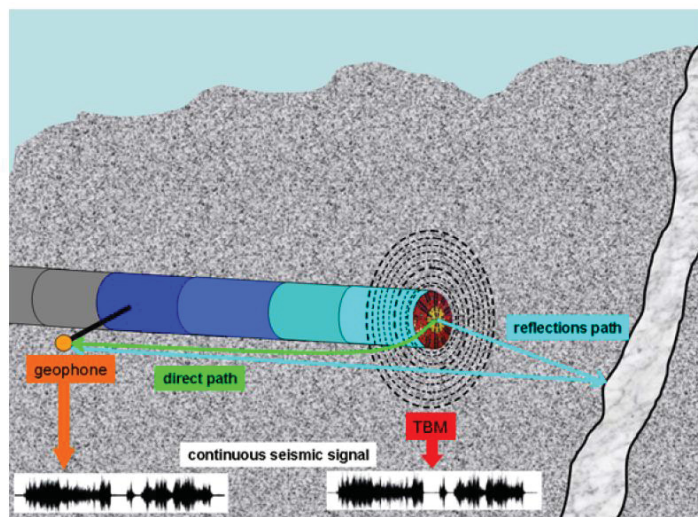


Abbildung 19: Schematische Darstellung des Systems TSWD; Bohrkopf als seismische Quelle (aus [43])

Für die Aufzeichnung der direkten und reflektierten Wellen gibt es zwei bis drei Messquerschnitte im Abstand von 100 m bis 600 m zur Ortsbrust. Je Messquerschnitt werden zwei gegenüberliegende Bohrlöcher an der Position 08:00 und 16:00 Uhr mit einem Durchmesser von 2“ hergestellt. Sie sind zwischen 5 m und 10 m tief und werden mit 3-Komponenten-Geophonen bestückt (siehe Abbildung 20). Die Tiefe der Bohrungen

ergibt sich aus der Notwendigkeit die Geophone hinter der aufgelockerten Zone des hohlraumumgebenden Gebirges zu positionieren. Die Störsignale können so besser von Nutzsignalen separiert werden. Die maximale Frequenz, die bei den Geophonen ankommt, liegt bei ca. 250 Hz. Für die Auswertung der Seismik ist eine Korrelation des Empfangssignals mit dem Pilotsignal erforderlich. Das Pilotsignal wird mit zwei Beschleunigungsaufnehmern gemessen, die sich ca. 3 m hinter dem Bohrkopf am nicht-rotierenden Bauteil des Hauptlagers befinden. Die optimale Position eines Beschleunigungsaufnehmers ist dort, wo die Vibration rasch abklingt und die Störsignale möglichst gering sind. Die Samplingrate beträgt 1000 Samples/Sekunde und es werden daher Signale bis 500 Hz korrekt aufgezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass höherfrequente Signale von Eigenvibrationen der Tunnelbohrmaschine selbst stammen. Da die Messung und Auswertung vor Ort von einem Geophysiker durchgeführt werden, kann das exakte Messlayout und das Datenprocessing individuell an den Tunnel und die prognostizierte Geologie angepasst werden. [6], [29]

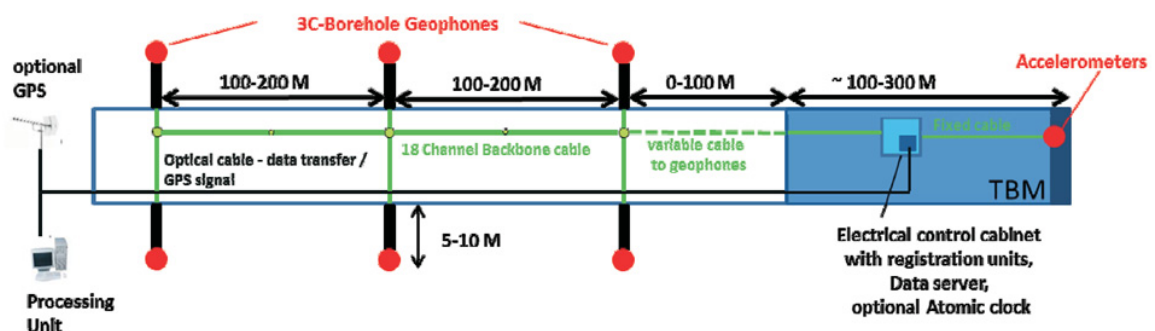


Abbildung 20: Schematisches Messlayout TSWD (aus [29])

Alle Aufnehmer sind miteinander verkabelt um die Daten in der Steuerkabine aufzuzeichnen. Zur zeitlichen Abstimmung der Registriergeräte wird je nach Tunnellänge das GPS-Signal mittels eines Glasfaserkabels in den Tunnel transferiert oder es wird eine Atomuhr im Tunnel implementiert. Aufgrund der kontinuierlichen Messung wird eine große Datenmenge generiert, die eine Herausforderung für den Datentransfer und die Logistik darstellt. Um die Daten online zur Verfügung zu stellen ist eine Breitband-Datenleitung von ca. 400 kBits/s notwendig [17].

Die seismischen Daten werden täglich vom Geophysiker auf der Baustelle ausgewertet. Das Pilotsignal wird dabei mit den Geophonsignalen korreliert und die Daten werden einem Processing unterzogen. Die Auswertung und Interpretation der geophysikalischen Ergebnisse erfolgt zusammen mit den Geologen und Geotechnikern vor Ort auf der Baustelle. Es erfolgt täglich eine Klassifikation des Gebirges bezüglich Vortriebsrelevanz mit einer Reichweite von 150 m. [49]

Ergebnisdarstellung:

Die Ergebnisse der einzelnen Messquerschnitte werden getrennt für die linken und die rechten Geophone in Form einer seismischen Sektion (siehe Abbildung 21, oben) und eines sogenannten Tunnelbandes (siehe Abbildung 21, mittig) dargestellt. Für die Kategorisierung wird eine Ampelklassifikation verwendet (siehe Abbildung 21, unten). Grün bedeutet, dass es sich um einen ungestörten Gebirgsbereich handelt, gelb steht für mäßig bis stark zerlegte Gebirgsbereiche und rot signalisiert ausgeprägte Störungsbereiche. [49]

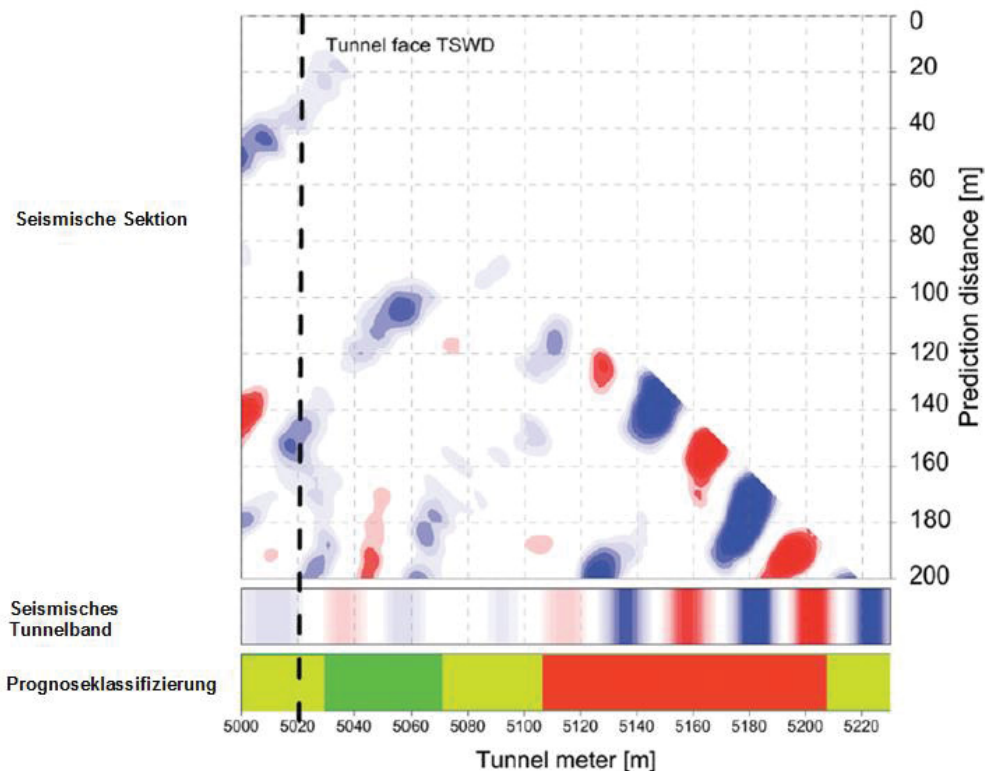


Abbildung 21: Exemplarisches Prognoseergebnis einer TSWD-Messung (aus [49])

Zumeist wird nur die axiale Komponente (parallel zur Tunnelachse) der Geophone für die Prognose ausgewertet und als Ergebnis dargestellt. Sie liefert die verlässlichsten Ergebnisse hinsichtlich steilstehender Störungen im Vortriebsbereich. [49]

Die Auswertung der beiden anderen Geophonkomponenten erfolgt bei der bisherigen Anwendung erst im Nachgang.

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit anderen seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das TSWD-System kann nur in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine eingesetzt werden. [6]
- Die Messung erfolgt kontinuierlich und nutzt die abbaubedingten Vibrationen der TBM. Eine Quellsignalanregung in Form einer Sprengung oder mit einem Impakthammer entfällt somit und der bautechnische Aufwand beschränkt sich auf das Abteufen der Geophon-Bohrlöcher. [49]
- Bei einer seismischen Vorauserkundung werden Reflektoren, die normal zur Tunnelachse orientiert sind, direkt auf der Tunnelachse abgebildet. Hingegen müssen Störungen, die schräg zur Tunnelachse verlaufen, bis zum Schnittpunkt mit der Tunnelachse extrapoliert werden. Diese Extrapolation ist mit einer Prognoseunsicherheit verbunden. Beim Messsystem TSWD wird diese reduziert, da die Messung kontinuierlich erfolgt und der Reflektor dadurch sozusagen „verfolgt“ werden kann. [6]
- Da die Messung kontinuierlich erfolgt werden große Datenmengen generiert. Falls es zum Ausfall einer seismischen Spur kommt, ist dies aufgrund der großen Datenmenge von geringer Relevanz und beeinflusst die Qualität der Auswertung kaum. Der Nachteil der großen Datenmenge ist, dass die Datenübertragung und Datenspeicherung eine Herausforderung darstellen.
- Das TSWD-System lässt sich gut auf der Baustelle implementieren, da der bautechnische Aufwand gering ist und eine Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker erfolgt. [49]
- Die Prognosesicherheit liegt laut [49] zwischen 65% und 80%.
- Die seismische Quellenanregung erfolgt passiv über den Bohrkopf. Durch den Schneidprozess wird eine ausreichend hohe seismische Energie eingebracht und ein für die Messung ausreichend großes Frequenzspektrum abgedeckt [6]. Die maximale Frequenz, die bei den Geophonen ankommt, liegt bei 250 Hz [17]. Dennoch ist das Frequenzspektrum geringer als bei sprengseismischen Messungen.
- Nur die axiale Komponente der Geophone (parallel zur Tunnelachse) wird bis jetzt zeitgerecht für die tägliche Prognose ausgewertet [49]. Es wird daher keine 3-D-Abbildung der Reflektoren sondern nur eine 1-D-Auswertung zur Verfügung gestellt. Somit sind keine Aussagen zur Orientierung der Störungszonen möglich.
- Das Pilotsignal wird 3 m hinter dem Bohrkopf aufgezeichnet und die Transferfunktion vom Bohrkopf zum Beschleunigungsaufnehmer kann nur näherungsweise bestimmt

werden. Idealerweise sollte die Aufzeichnung unmittelbar am Herd der seismischen Quelle, sprich am Bohrkopf, erfolgen. [28]

3.1.1.2 TSP – Tunnel Seismic Prediction

Das System Tunnel Seismic Prediction (TSP) wird vom Unternehmen Amberg Technologies entwickelt und vertrieben. Der Entwicklungsbeginn war in den frühen 1990er Jahren und das System wird heute weltweit eingesetzt.

Referenzprojekte in Europa sind beispielsweise der Zuckerbergtunnel (D) und der Gotthard-Basistunnel (CH) [9], [51]. Die aktuelle Version ist „TSP 303 Plus“.

Funktionsweise und Messlayout:

Das TSP-Messkonzept basiert auf der Aussendung seismischer Wellen durch kleine Sprengladungen und der Detektion der Laufzeiten mit 3-Komponenten-Aufnehmern. Das System kann sowohl im maschinellen als auch im konventionellen Tunnelbau im Festgestein eingesetzt werden. [55]

Das Messlayout (siehe Abbildung 22 und Abbildung 23) ist ca. 50 m lang. Vier Geophone werden in ca. 2 m tiefen Bohrlöchern mit einem Durchmesser von 50 mm platziert und kraftschlüssig ins Gebirge eingebunden. Im Abstand von etwa 15 m zum vorderen Geophonen-Messquerschnitt werden am Ulm ca. 24 Schussbohrlöcher hergestellt. Sie haben zueinander einen Abstand von 1,5 m und eine Tiefe von 1,5 m. Der Durchmesser beträgt zwischen 32 und 45 mm und sie sind von der Horizontalen ausgehend mit einem Winkel von 10° bis 20° leicht nach unten geneigt. Um zu verhindern, dass ein Bohrloch kollabiert, wird eine PVC-Schutzverrohrung empfohlen. [24]

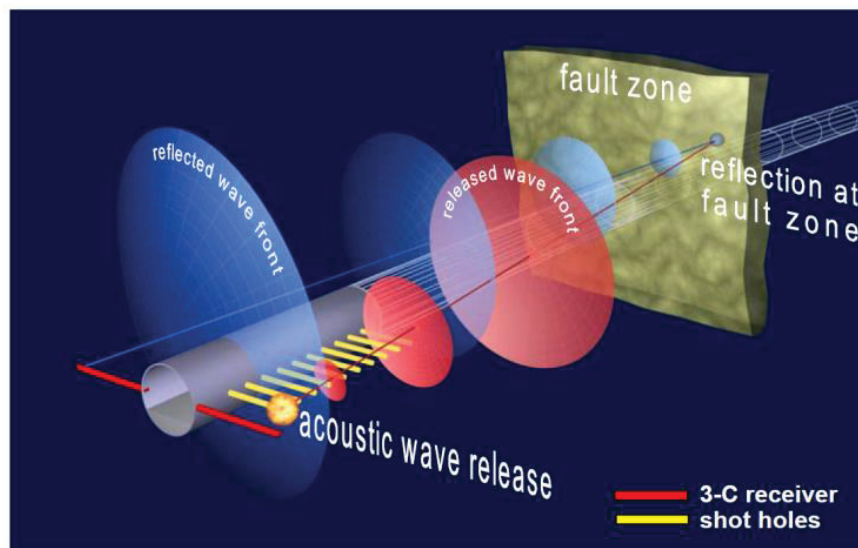


Abbildung 22: Schematisches Messlayout einer TSP-Messung (aus [9])

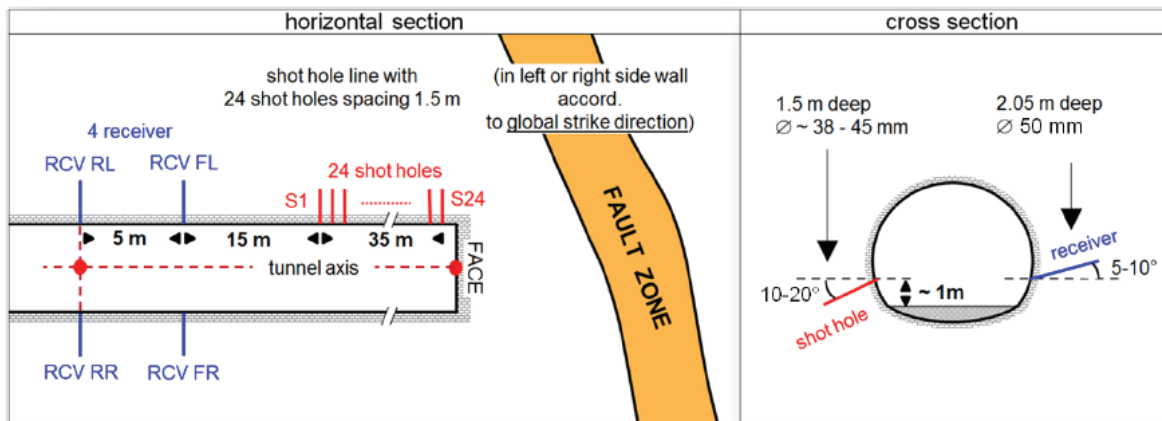


Abbildung 23: Schematisches Messlayout einer TSP-Messung im Horizontal- und Querschnitt (aus [24])

Je Schuss wird eine Sprengstoffladung von 20-100 g benötigt. Erfolgt der Ausbau des Tunnels mit Tübbingem so ist grundsätzlich keine Beschädigung von diesen durch die Sprengungen zu erwarten. Es können aber Verschiebungen von maximal 3 mm auftreten [12]. Die Messung dauert unter normalen Bedingungen zwischen 45 und 90 min. [24]

Die Auswertung der Seismik ist automationsgestützt und kann von einem geschulten Baustellenpersonal durchgeführt werden. Durch das Aufbereiten der Kompressions- und Scherwellen können unter Annahme der Dichte über empirische Beziehungen verschiedene geomechanische Parameter des Gebirges, wie die Poissonzahl und der E-Modul, gewonnen werden. Direkte Wellen, Oberflächenwellen und Wellen, die sich in der aufgelockerten, hohlraumnahen Zone ausbreiten, müssen vorher eliminiert werden.

Ergebnisdarstellung:

Als Ergebnis werden die Reflektoren bzw. die prognostizierten Störungszonen in 2- und 3-dimensionaler Ansicht bezogen auf die Tunnelachse dargestellt. Die Erkundungsreichweite beträgt bis zu 150 m. [24]

Die Veränderungen der Wellengeschwindigkeiten, der Poissonzahl, der Dichte und des dynamischen E-Moduls werden in Form von Treppenfunktionen dargestellt (siehe Abbildung 24, oben). Das Tunnelband wird im Längenschnitt (siehe Abbildung 24, mittig) und im Horizontalschnitt (siehe Abbildung 24, unten) dargestellt und zeigt die Lage der Reflektoren.

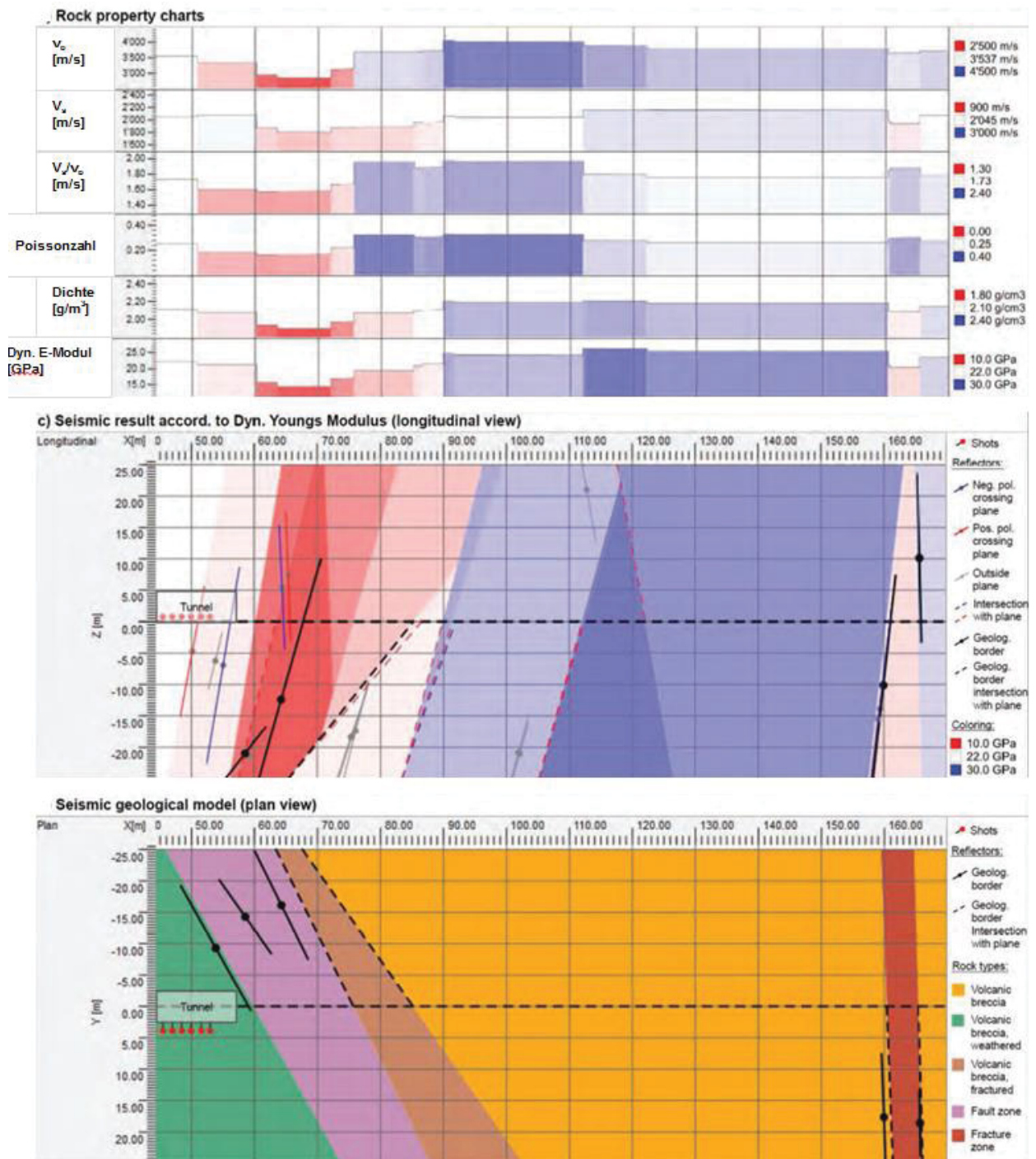


Abbildung 24: Exemplarisches Prognoseergebnis einer TSP-Messung (aus [12])

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit anderen seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das TSP-System kann im konventionellen und im maschinellen Tunnelbau eingesetzt werden. [55]
- Ergänzend zur 3-D-Abbildung der Reflektoren erfolgen unter Annahme der Dichte Angaben zur Wellengeschwindigkeit, Poissonzahl, dynamischen E-Modul und Schermodul. [12]

Die Ausbreitung seismischer Wellen ist ein dynamischer Prozess, daher sind die mechanischen Gebirgsparameter ebenfalls dynamische Kennwerte. Es gibt keinen generellen Zusammenhang zwischen den dynamischen und statischen Gebirgsparametern und daher wurden empirische Zusammenhänge entwickelt. [12]

- Es werden sowohl P- als auch S-Wellen standardmäßig ausgewertet. [9]
- Die Anregung der seismischen Welle erfolgt in Form einer Sprengung und es wird ein Frequenzspektrum zw. 10 und 5000 Hz abgedeckt [9]. Das Frequenzspektrum ist somit breiter als vergleichsweise beim System TSWD.
- Die Messung erfolgt ca. alle 80 bis 100 m um sicherzustellen, dass es einen Überlappungsbereich gibt. Im Allgemeinen werden ca. 24 seismische Spuren aufgezeichnet. [24]

Die Datendichte ist somit nicht so hoch wie bei einer kontinuierlichen Vorauserkundung. Ein Ausfall einer oder mehrerer Spuren wirkt sich möglicherweise in der Auswertung aus.

- Das System wird als geschlossenes System verkauft und die automationsgestützte Auswertung erfolgt in der Regel von Ingenieuren auf der Baustelle [9]. Ein speziell ausgebildeter Geophysiker befindet sich daher nicht vor Ort auf der Baustelle.
- Es sind sowohl Geophon-Bohrlöcher als auch Schussbohrlöcher herzustellen [12]. Der bautechnische Aufwand ist bei dieser Messung somit größer als beispielsweise beim TSWD-Verfahren.

3.1.1.3 ISIS – Integrated Seismic Imaging System

Das Messsystem ISIS wurde seit 1998 am GeoForschungsZentrum-Potsdam (GFZ-Potsdam) in Kooperation mit dem Unternehmen Herrenknecht AG entwickelt und wird von Herrenknecht AG vertrieben.

Das System war zu Testzwecken beispielsweise beim Vortrieb des Bleißberg-Tunnels (D) und des Glendoe-Hydro-Scheme (UK) im Einsatz. Das Messsystem wird zur Vorauserkundung im Jerusalem Railway Tunnel in Tel Aviv und beim Neelum Jhelum Hydropower Project (PK) verwendet. [23]

Funktionsweise und Messlayout:

Die seismische Anregung des Untergrundes erfolgt beim System ISIS mit zwei pneumatisch betriebenen Schlaghämmern an den Ulmen. Durch die Impulsanregung werden P-Wellen, S-Wellen und Oberflächenwellen generiert, wobei beim Messsystem ISIS vor allem die Rayleigh-Welle und die Scherwellen von Interesse sind. In Abbildung 25 sind die Strahlenwege der für dieses Verfahren relevanten Wellen dargestellt. Die Rayleigh-Welle breitet sich entlang der Tunnelwand aus und wird bei Eintreffen an der Ortsbrust in eine S-Welle transformiert. Diese breitet sich im Gebirge hinter der Ortsbrust aus, wird an einer Diskontinuität reflektiert und läuft zurück zur Ortsbrust. Dort wird sie wieder in eine Rayleigh-Welle konvertiert, die sich entlang der Tunnelwand ausbreitet. Die 3-Komponenten-Geophone, die an den Spitzen von Messankern befestigt sind, registrieren die Laufzeit dieser sogenannten RSSR-Welle. [36]

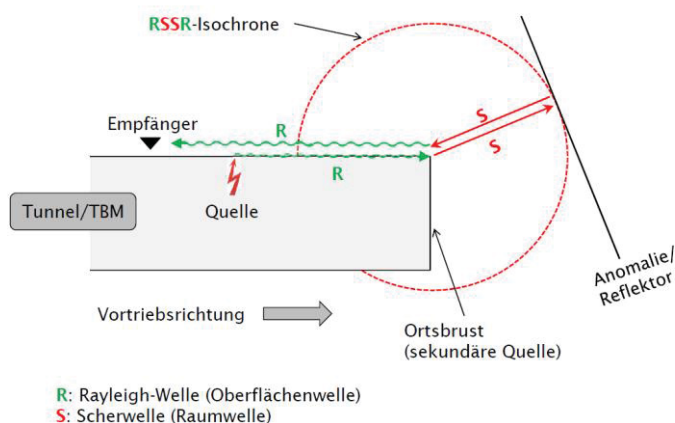


Abbildung 25: Schematische Darstellung einer RSSR-Reflexion (aus [14])

Die seismische Anregung mit einem Impakthammer zeichnet sich durch kurze Schlagintervalle von ca. 1 ms und einer hohen Reproduzierbarkeit aus. Aufgrund der Reproduzierbarkeit der Impulse ist die Stapelung der registrierten Signale mehrerer Messungen an derselben Quellposition möglich. Störsignale können dadurch besser

unterdrückt und die Nutzsignale herausgefiltert werden. Die mechanische Anregungsquelle hat gegenüber einer Anregung mit einer Sprengladung den Vorteil, dass für die Messung keine Sprengbohrlöcher hergestellt werden müssen und kein Sprengstoff benötigt wird. Es werden dadurch sowohl Kosten als auch Zeit eingespart. [55]

Für die Durchführung der Messmethode ISIS werden beim Vortrieb mit einer Hartgesteins-TBM die pneumatischen Schlaghämmer an den Grippern montiert (siehe Abbildung 26). Bei einer Schildmaschine werden die Hämmer auf einer Anbaukonsole im Schild der TBM installiert sodass die Zugänglichkeit zum anstehenden Gebirge gewährleistet ist (siehe Abbildung 27). [23]

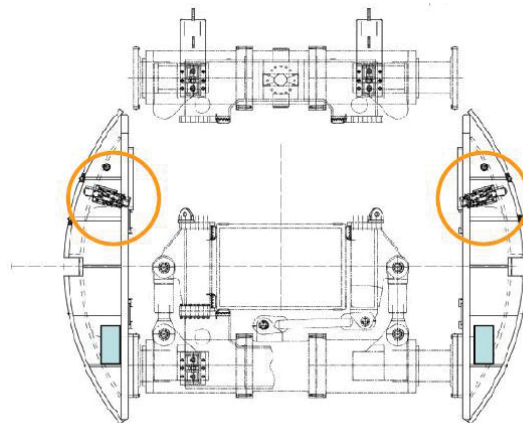


Abbildung 26: Hartgesteins-TBM: Gripper mit integriertem Impakthammer (aus [14])



Abbildung 27: Schild-TBM: Einsatz eines Impakthammers (gelb markiert) mittels Anbaukonsole (aus [23])

Je nach Hublänge werden die Schlaghämmer etwa alle 2 m gegen die Tunnelwand gepresst und je Messzyklus werden ca. 5 Schläge ausgelöst. Während der Messung darf sich das Schneidrad nicht drehen. Die Messdurchführung erfolgt daher bei einer Schild-

TBM während des Tübbing-Einbaus und bei einer Hartgesteins-TBM kurz nach dem Umsetzen der Gripper. Für jede Messung wird eine Zeitdauer von ca. 2 bis 5 min benötigt und es entsteht keine zusätzliche Vortriebsverzögerung. [23]

Für die Aufzeichnung der Wellen werden 3-Komponenten-Geophone verwendet, die an den Spitzen von wiederverwendbaren Gebirgsankern montiert sind. Die Länge der Messanker ist bei einer Grippermaschine 1 m und bei einer Schildmaschine aufgrund der Tübbingdicke 2 m. Vor Einbringung des Messankers wird ein Aluminiumrohr im Bohrloch positioniert und mit einem 2-Komponentenkleber im Gebirge verankert. Der Messanker wird anschließend in diesem Rohr, das im Gebirge verbleibt, verklemmt. Im Allgemeinen werden zwischen 4 und 8 Messanker beidseitig im Kämpferbereich des Tunnels (10:00 Uhr und 02:00 Uhr) eingebracht. Die Distanz zwischen den Messquerschnitten beträgt zwischen 10 m und 15 m. Erfolgt die vortriebsbegleitende Vorauserkundung mit dem System ISIS auf einer Schild-TBM, so werden die Bohrlöcher für die Positionierung der Messanker durch die Verpresslöcher der Tübbingsegmente gebohrt. [23]

Die Datenaufzeichnung funktioniert autonom mit einem batteriebetriebenen Datenlogger, der direkt am Ende des Messankers befestigt wird. Die Daten werden via Internet zur Rechneinheit gesendet. [23]

Das Ergebnis der Messung ist dann ein räumliches Abbild von RSSR-Reflektoren. [35]

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit anderen seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das ISIS-Verfahren wird in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine eingesetzt. [23]
- Die Messung erfolgt kontinuierlich durch die Schläge eines Impakthammers und es müssen im Gegensatz zur sprengseismischen Anregung keine Bohrlöcher hergestellt werden. Es werden somit Kosten als auch Zeit gespart. [54]
- Bei der Anregung an der Tunnelwand werden Oberflächenwellen mit größerer Energie als Raumwellen generiert. Daher kann bei diesem System mit einem hohen Verhältnis von Nutz- zu Störsignalenergie und somit sehr stabilen Messergebnissen gerechnet werden. [35]
- Es ist eine 3D-Registrierung der einfallenden seismischen Wellen möglich. Dadurch werden die geologischen Störungsflächen räumlich abgebildet. [21]
- Das Registriergerät zeichnet Signale mit einer Frequenz bis zu 4 kHz auf [21]. Das Frequenzspektrum ist somit breiter als vergleichsweise beim System TSWD.

3.1.1.4 TRUST – True Reflection Underground Seismic Technique

Das Unternehmen Deutsche Montan Technologie GmbH & Co. KG (DMT) bietet ein mehrstufiges Erkundungskonzept an, bei dem die seismische Vorfelderkundung des Tunnels mit dem System TRUST erfolgt. Die Erkundungsmethode wurde ursprünglich für den Kohlebergbau entwickelt [34]. Das System kam beispielsweise im Gotthard-Basistunnel zur Erkundung der Piora-Mulde zum Einsatz.

Funktionsweise und Messlayout:

Das System kann sowohl im maschinellen als auch im konventionellen Tunnelbau eingesetzt werden. Das Messlayout wird individuell an den jeweiligen Tunnel und die jeweilige Geologie angepasst. Die Messung wird aus sogenannten Lauschbohrungen durchgeführt, die ca. alle 50 m radial ins Gebirge gebohrt werden. Die Bohrungen sind ca. 2 m tief, haben in der Regel einen Durchmesser von 42 mm und dienen zur Positionierung der 3-Komponenten-Geophone. Gegebenenfalls können die Radialbohrungen mit tunnelachsparellen Bohrungen aus Nischen ergänzt werden. Die Anregung der seismischen Wellen erfolgt während der Wartungsschicht aktiv mit Sprengstoff, Schlaghammer oder speziell von DMT entwickelten Hochfrequenzquellen [42]. Für die Quellerzeugung werden Bohrlöcher im Abstand von 5 m zueinander hergestellt. In Abbildung 28 ist beispielhaft ein Messlayout dargestellt bei dem drei Lauschbohrungen je Messquerschnitt hergestellt werden. [13]

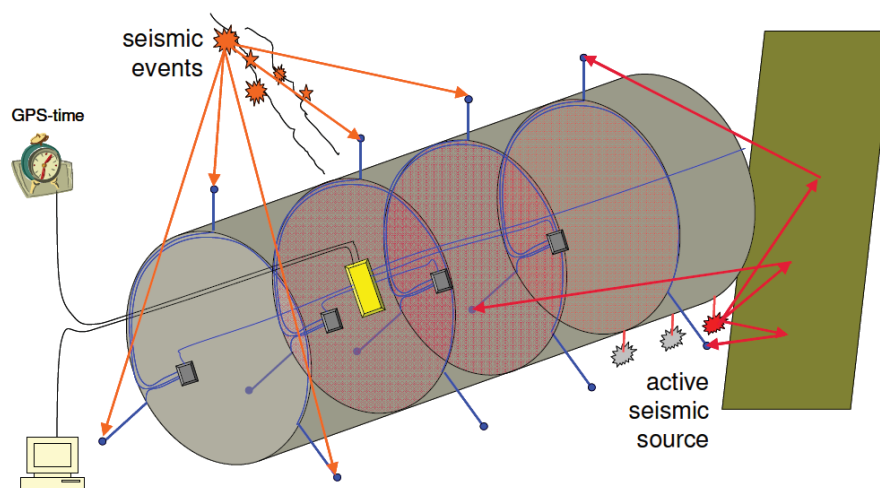


Abbildung 28: Schematische Darstellung des Messlayouts TRUST (aus [13])

Die Daten werden zur weiteren Aufbereitung zum PC außerhalb des Tunnels weitergeleitet. Die Messauswertung kann von Ingenieurgeologen und Geotechnikern vorgenommen werden, diese sollten aber zum Teil von einem Geophysiker unterstützt werden. Innerhalb weniger Stunden nach der Messdurchführung kann festgestellt werden,

ob das Signalbild auf Auffälligkeiten im Vortriebsbereich hinweist. Eine detaillierte Auswertung der seismischen Daten liegt nach einer Zeitdauer von ca. 24 Stunden vor. [13]

Ergänzend ist zu erwähnen, dass das Unternehmen DMT grundsätzlich zur Vorfelduntersuchung des Tunnels ein dreistufiges Erkundungskonzept vorsieht [42]:

- Stufe I: Erkennen

Die Erkundung des Tunnelvorfeldes erfolgt mithilfe des reflexionsseismischen Verfahrens TRUST. Für die Festlegung der Messkonfiguration werden das geologische und das geotechnische Baugrundmodell benötigt. Liefert die Auswertung der Seismik Hinweise auf Diskontinuitäten oder Anomalien im Baugrund, so erfolgt in der nächsten Stufe eine detailliertere Erkundung.

- Stufe II: Differenzieren

Die Detailerkundung des Untergrundes sieht das Abteufen von Vorausbohrungen und geophysikalische Bohrlochmessungen, z.B. mit einem Bohrlochgeoradar, vor.

- Stufe III: Quantifizieren

Befindet sich die Anomalie nicht in ausreichendem Abstand zum Tunnel, so werden weitere Messungen mit einem sogenannten Bohrloch-Shuttle durchgeführt. Im Zuge dieser geophysikalischen Messungen werden unter anderem die Dichte und die Gammastrahlung gemessen, der Bohrlochverlauf festgestellt und Bohrlochscans durchgeführt.

Ergebnisdarstellung:

In Abbildung 29 ist ein typisches Ergebnis einer seismischen Messung mit dem System TRUST dargestellt. Das Tunnelband wird in unterschiedliche farbliche Bereiche gegliedert und weist auf intakte (grün markiert), gestörte (gelb markiert) und stärker gestörte (orange markiert) Gebirgsbereiche hin.

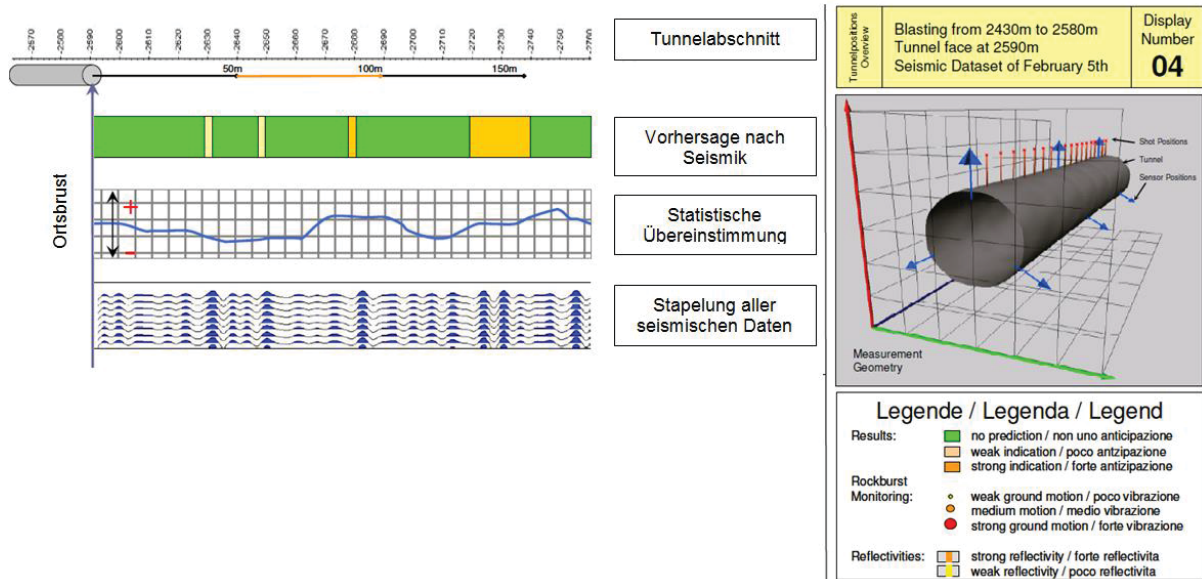


Abbildung 29: Exemplarisches Prognoseergebnis einer seismischen Vorauserkundung mit dem System TRUST (aus [13])

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit anderen seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das System kann im maschinellen und im konventionellen Tunnelbau eingesetzt werden. [42]
- Die Anregung der seismischen Welle erfolgt in Form einer Sprengung oder mit Hochfrequenzquellen [13], [42]. Somit wird ein breiteres Frequenzspektrum abgedeckt als vergleichsweise mit dem TSWD-Verfahren.
- Es werden sowohl P- als auch S-Wellen ausgewertet. [13]
- Die seismische Messung wird ca. zwei Mal pro Woche durchgeführt [13]. Die Datendichte ist somit nicht so hoch wie bei einer kontinuierlichen Vorauserkundung. Ein Ausfall einer oder mehrere Spuren wirkt sich möglicherweise in der Auswertung aus.
- Die Messauswertung kann von Ingenieurgeologen und Geotechnikern vorgenommen werden [13]. Ein speziell ausgebildeter Geophysiker befindet sich daher nicht ständig vor Ort auf der Baustelle.
- Es sind sowohl Geophon-Bohrlöcher als auch Schussbohrlöcher herzustellen [13]. Der bautechnische Aufwand ist bei dieser Messung somit größer als beispielsweise beim TSWD-Verfahren.

3.1.1.5 SSP – Sonic Softground Probing

Das schneidradintegrierte Reflexionsverfahren Sonic Softground Probing (SSP) wurde von der Amberg Messtechnik AG entwickelt und war erstmals 1997 beim Bau der „4. Röhre Elbtunnel“ im Einsatz. [55]

Im Rahmen des Forschungsprojektes AUTOSEIS wurden von 2006 bis 2009 verschiedene Hardware- und Softwarekomponenten verbessert. Heute wird die Erkundungsmethode von Herrenknecht AG in Verbindung mit den von ihnen produzierten Mixschildmaschinen vertrieben. Ein Referenzprojekt ist beispielsweise der City-Tunnel Leipzig (D). [20]

Funktionsweise und Messlayout:

Das System Sonic Softground Probing wurde zur vortriebsbegleitenden Erkundung des Tunnelvorfeldes im maschinellen Tunnelbau mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust in Lockergesteinsböden konzipiert. Die Erkundungsreichweite beträgt maximal 40 m. Die Sende- und Empfangsantennen sind im Schneidrad integriert (siehe Abbildung 30 und Abbildung 31) und ermöglichen ein kontinuierliches Monitoring während laufendem Vortrieb. Die Stützflüssigkeit (Bentonit) dient als Übertragungsmedium des speziell codierten, akustischen Quellsignals in den Baugrund. Die Frequenz des Sendesignals liegt zwischen 600 und 2400 Hz und die Schallenergie wird in Form von P-Wellen in den Untergrund übertragen. Mindestens zwei akustische Empfänger, die sich in gewissem Abstand zum Sender und auf unterschiedlichen Radien des Schneidrades befinden, zeichnen die reflektierten Wellen auf. [20]

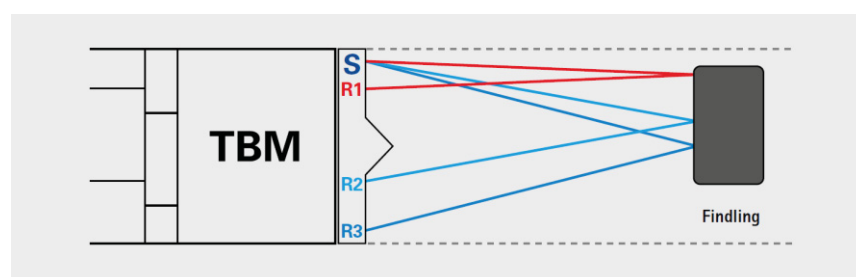


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips SSP (S=Sender; R1, R2 und R3=Empfänger) (aus [25])

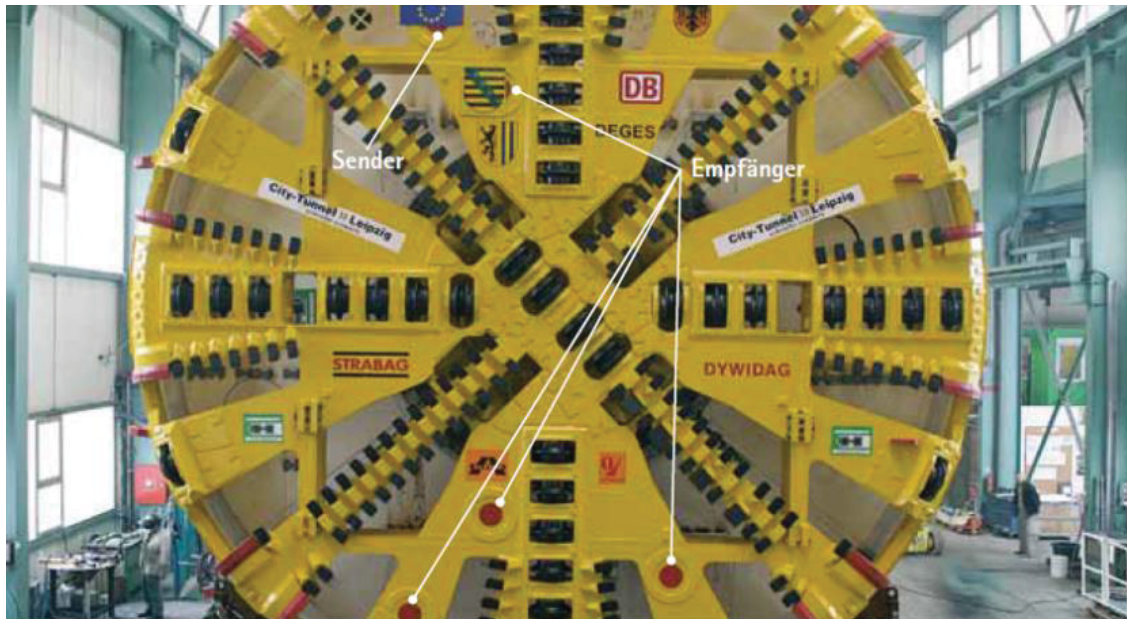


Abbildung 31: Sender und Empfänger im Schneidrad integriert (aus [25])

Die Daten werden an einen Analog/Digitalwandler weitergeleitet und an ein PC-System im Nachläuferbereich übertragen. Die Auflösung der Messergebnisse variiert und nimmt mit zunehmender Erkundungsreichweite ab. Die Auswertung und Datenvisualisierung erfolgt automatisch vor Ort und dauert etwa drei bis fünf Stunden. Die Ergebnisse der Messung werden auf einem Monitor visualisiert und stehen dem Baustellenpersonal zur Interpretation zur Verfügung. Eine Verifikation der seismischen Ergebnisse erfolgt durch eine Korrelation mit den Maschinendaten und dem Abraum. [20]

Ergebnisdarstellung:

Das Ergebnis der Messung ist ein 3-D-Abbild der aufgezeichneten Reflexionselemente, die in einem quaderförmigen Bereich mit den Abmessungen 10 m x 10 m x 40 m auftreten [20]. Die orange und grün markierten Reflexionselemente repräsentieren eine hohe positive bzw. negative Amplitude.

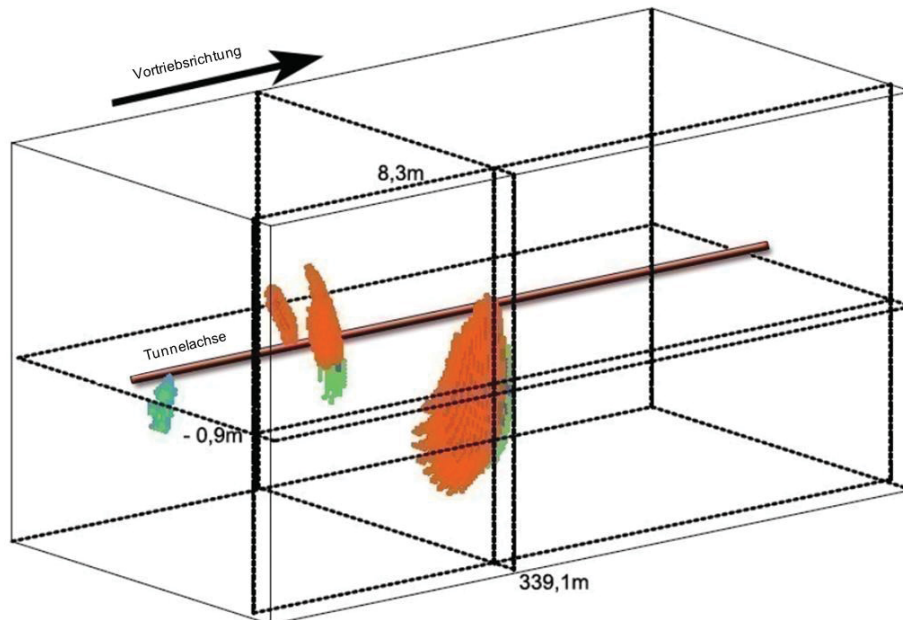


Abbildung 32: Exemplarisches Prognoseergebnis einer SSP-Messung (aus [20])

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit anderen seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das Messsystem ist speziell für Lockergesteinsböden konzipiert. [20]
- Da sowohl die Sende- als auch die Empfangsantennen im Schneirad integriert sind [20], müssen im Gegensatz zu anderen seismischen Vorauserkundungssystemen keine Bohrlöcher für die Messung hergestellt werden.
- Das Erregersignal wird mit einer Frequenz zwischen 600 – 2400 Hz abgestrahlt. [20]
- Die Auswertung erfolgt vollautomatisiert [20]. Ein speziell ausgebildeter Geophysiker befindet sich daher nicht vor Ort auf der Baustelle.
- Das Ergebnis ist eine räumliche Abbildung der Reflexionselemente. [20]

3.2 Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb mit Radarmessungen

Im Tunnelbau stellen hohlräumnahe Karststrukturen ein großes Gefahrenpotential dar und das Erkennen von offenen oder verfüllten Hohlräumen ist zur Gefahrenabschätzung und Risikominimierung während der Bau- und Betriebsphase von entscheidender Bedeutung. Die Bohrlochradartechnologie hat sich als geeignete Methode zur räumlichen Detektion von Verkarstungszonen erwiesen, da sich luft- oder fluidgefüllte Hohlräume maßgeblich in ihren dielektrischen Eigenschaften vom umliegenden kompakten Gestein unterscheiden.[53]

Die Erkundungstechnologie der Bo-Ra-Tec GmbH war erstmals beim Katzenbergtunnel (D) in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine im Einsatz. [53]

Funktionsweise und Messlayout:

Die Messmethode kann sowohl im konventionellen als auch im maschinellen Tunnelvortrieb eingesetzt werden. Das Funktionsprinzip ist analog zum im Kapitel 2.6.2 beschriebenen Bohrlochradar. Je nach Messmodus (Reflexions-, Crosshole- oder tomografischen Modus) sind mindestens eine und optional drei Vorausb Bohrungen notwendig (siehe Abbildung 33). Die Bohrungen müssen entweder offen oder mit PVC verrohrt sein. Die Antennen werden mit Schubstangen in die horizontalen Bohrungen eingefahren und es ist keine spezielle Ankoppelung der Sonden an die Bohrlochwand erforderlich. Gering mineralisierte Wässer in den Bohrungen haben grundsätzlich keinen Einfluss auf die Messung. [34]

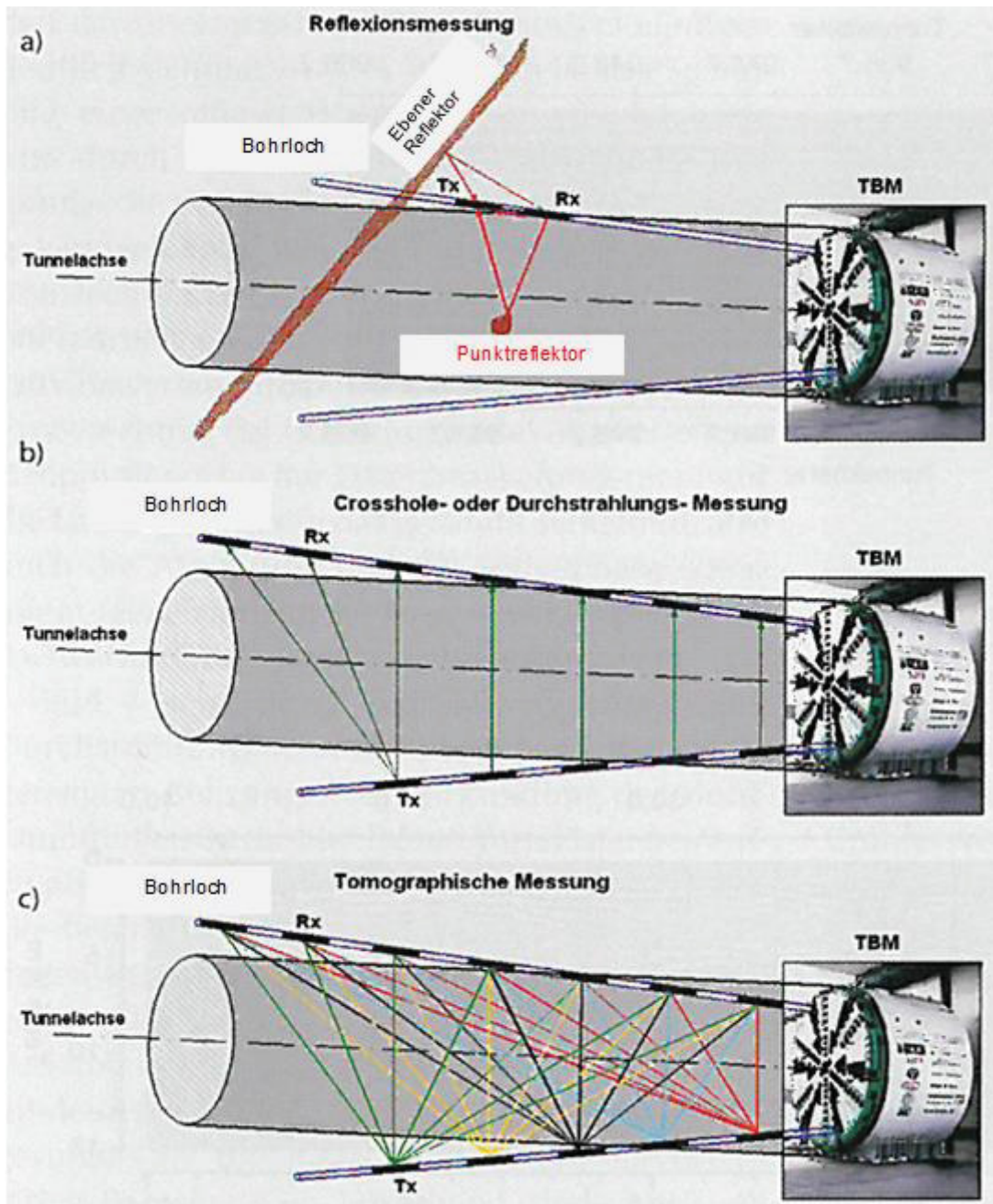


Abbildung 33: Mögliche Messanordnungen bei der Bohrlochradarmessung; a) Reflexionsmessung, b) Crosshole-Messung, c) Tomographische Messung (aus [54])

Ergebnisdarstellung:

In Abbildung 34 ist das Ergebnis einer Bohrlochradar-Reflexionsmessung dargestellt. Links ist das bearbeitete Radargramm zu sehen. In der mittigen Abbildung sind die relevanten Reflektoren farblich markiert und der rechten Abbildung sind zusätzlich Angaben zu den Einfallswinkeln der Reflektoren zu entnehmen.

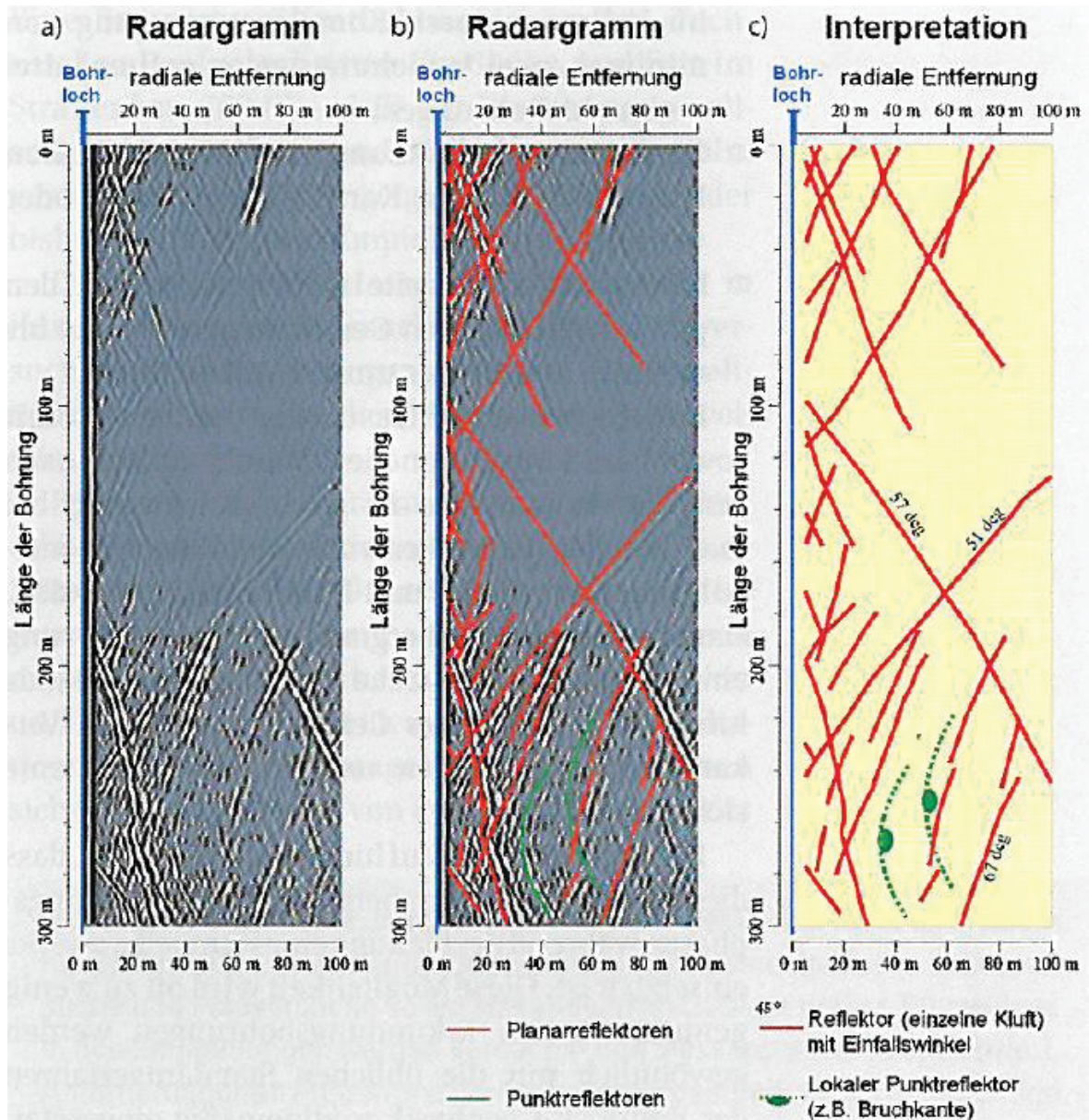


Abbildung 34: Exemplarisches Prognoseergebnis einer Bohrlochradar-Reflexionsmessung
a) Bearbeitetes Radargramm, b) Bearbeitetes Radargramm mit markierten Reflektoren, c)
Analysiertes Kluftsystem mit Angaben zum Einfallswinkel der Einzelklüfte (aus [53])

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Messmethode kann sowohl im maschinellen als auch im konventionellen Tunnelvortrieb eingesetzt werden. [34]
- Die Bohrlochradar-Technologie zeichnet ein hohes Auflösungsvermögen aus (besser als mit Seismik). [53]
- Die Messdurchführung und Auswertung erfolgt von einem Geophysiker. [53]
- Der Nachteil dieser Messung ist, dass eine große Anzahl an Vorausbohrung hergestellt werden muss und sie daher mit einem großen zeitlichen und finanziellen Aufwand verbunden ist. [47]
- Es sind Sonden in das Bohrloch einzuführen. Dies setzt voraus, dass das Bohrloch standfest ist und einen ausreichend großen Durchmesser besitzt. Weiters muss der Zutritt zur Ortsbrust gewährleistet sein.
- Die Erkundungsreichweite ist je nach vorhandener Geologie auf mehrere Dekameter beschränkt. Der Anteil an bindigen Sedimenten und das Auftreten gut leitfähiger Wässer sind von maßgebender Bedeutung für die Erkundungsreichweite (vgl. Kapitel 2.3). [53]
- Das Verfahren ist in tonigen oder schluffigen Gesteinen nicht geeignet (vgl. Kapitel 2.3). [55]

3.3 Geoelektrische Vorauserkundung beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb

Die vortriebsbegleitende geoelektrische Vorauserkundung basiert auf dem Prinzip der induzierten Polarisation. Im nachfolgenden Kapitel wird das Verfahren Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM) vorgestellt.

3.3.1 Geoelektrische Vorauserkundungssysteme

3.3.1.1 BEAM Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring

Die Messmethode Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM) wurde von Dr. Armin Kaus et al. entwickelt und patentiert. [27]

Es gibt zwei am Markt erhältliche Systeme:

- Das System BEAM von Kaus & Boening (Geo Exploration Technologie) und
- das System BEAM G4 von Kopp (QuMon GmbH).

Funktionsweise

Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM) ist eine zerstörungsfreie Vorauserkundungsmethode, die nach dem Prinzip der induzierten Polarisation und der fokussierten Geoelektrik funktioniert. Das System kann sowohl in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine als auch für die Vorauserkundung im zyklischen Vortrieb eingesetzt werden. Bei dem Erkundungsverfahren wird Strom mit zwei verschiedenen Frequenzen, typischerweise 20 Hz und 200 Hz, über den Bohrkopf und das Schild in das Gebirge eingeleitet. Durch die induzierte Polarisation werden Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften des Untergrundes erkannt und kontinuierlich Aussagen zu den geologischen Verhältnissen im Vortriebsbereich getroffen. Die Erkundungsreichweite entspricht zirka dem 3-fachen des Tunneldurchmessers. [44], [55]

Beim BEAM-Messsystem wird in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine unterschieden zwischen dem BEAM-Integral, bei dem das gesamte Schneidrad als Messstrom-Elektrode A0 dient, und dem BEAM-Scan, bei dem einzelne Abbauwerkzeuge (z.B. Disken) als Messstrom-Elektroden A0 verwendet werden. Die Schirm-Elektrode A1 wird entweder durch das Schild der TBM oder die Bewehrung der Außenschale inkl. Anker dargestellt. Die punktförmige Einleitung des Schirmstroms erzwingt die Fokussierung des Messstroms (siehe Abbildung 35). Die Rückstrom-Elektrode B wird in

großer Distanz zur Ortsbrust (ca. 200 m) entweder innerhalb oder außerhalb des Tunnels angeordnet (siehe Abbildung 35). [27]

Die Ergebnisse der BEAM-Messung liefern als Maß für die Polarisierbarkeit den prozentualen Frequenzeffekt PFE (Percentage Frequency Effect) und den frequenzabhängigen Widerstand R. Die Parameter berechnen sich wie folgt [27]:

$$R(f_1) = k * (U(f_1)/I_0(f_1)) \quad (9)$$

$$R(f_2) = k * (U(f_2)/I_0(f_2)) \quad (10)$$

, wobei $f_1 < f_2$ und

k=konstanter Faktor (näheren Informationen zu diesem Faktor gehen aus den zur Verfügung stehenden Publikationen nicht hervor).

$$PFE = 100 * \frac{R(f_1) - R(f_2)}{R(f_1)} \quad (11)$$

Der PFE-Wert ist ein petrophysikalischer Parameter und ein Maß für die Fähigkeit eines Materials elektrische Energie zu speichern. Da Luft und Wasser einen PFE-Wert von Null besitzen, weist ein niedriger Wert auf stark kluftige Gebirgsbereiche, auf Hohlräume oder lockergelagerte Sand- und Kiesschichten hin. [55]

Durch den gemessenen Widerstand erhält man Information zur Lithologie sowie zur Poren- und Hohlraumfüllung. Eine Reduktion des Widerstandes weist auf eine wasserführende Zone im Vortriebsbereich hin. Die Leitfähigkeit von Boden bzw. von Lockergestein ist grundsätzlich größer als von Festgestein. Sie steigt mit zunehmendem Tongehalt und nimmt bei zunehmend gröber-körnigem Material ab. [44]

Bautechnisch relevante Bereiche werden durch typische PFE-Werte und Widerstände charakterisiert und die Ergebnisse der Messung werden automatisch in Echtzeit am Display in der Steuerkabine dargestellt. Für die Messung und Auswertung ist nur im Bedarfsfall Personal nötig. [27]

BEAM (Geo Exploration Technologies)

Das Messsystem BEAM der Geo Exploration Technologies wird seit 2000 weltweit eingesetzt. Referenzprojekte des BEAM-Verfahrens sind beispielsweise der Prising Tunnel (I), der Túnel de la Cabrera (E) und der Ginori Tunnel (I). [27]

Basierend auf Erfahrung bei unterschiedlichen Tunnelprojekten wurden bei diesem System die PFE-Werte und die Widerstandswerte miteinander korreliert und eine Klassifikation für Hartgesteine und Lockergesteine vorgenommen. Zusätzlich zum PFE-Wert und dem frequenzabhängigen Widerstand wird der Ground Change Indicator (GCI) berechnet, der darauf hinweist, ob sich das Gebirge im Vorfeld des Tunnels verbessert oder verschlechtert. Beim BEAM-Integral stellt das komplette Schneidrad die Messstrom-Elektrode dar. Das Ergebnis liefert eine 1-dimensionale Information des Untergrundes und Hinweise auf geotechnisch relevante Hindernisse, Hohlräume oder wasserführende Störungszonen. Beim BEAM-Scan werden hingegen einzelne Abbauwerkzeuge als Messstrom-Elektroden verwendet. Die vertikale und horizontale Auflösung ist bei dieser Methode besser und die Messergebnisse liefern 2- bzw. 3-dimensionale Informationen der Gebirgsverhältnisse im Vortriebsbereich. [27]

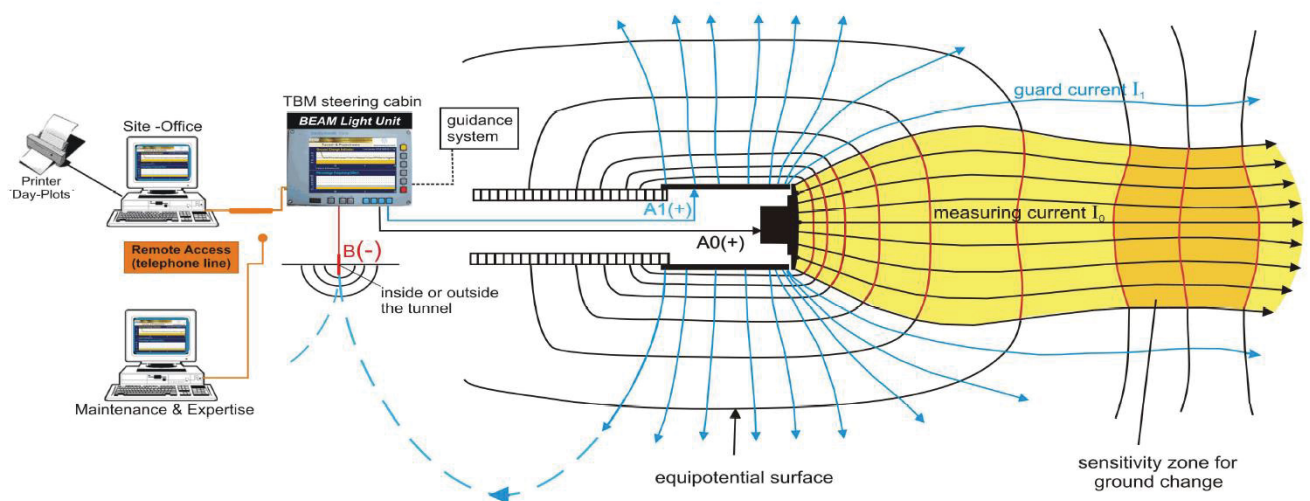


Abbildung 35: Messprinzip BEAM (aus [27])

Die Schirmelektrode A1 (+) und die Messstrom-Elektrode A0 (+) weisen die gleiche Polarität und gleiche Spannung auf. Es kann somit keinen Potentialunterschied zwischen den Elektroden geben. Über die A0-Elektrode wird Strom mit definierten Frequenzen in den Bereich vor der Ortsbrust eingespeist. Die Strominduktion an der Schirmelektrode dient zur Fokussierung der Messströme auf den Bereich vor der Ortsbrust. [55]

BEAM G4 (QuMon GmbH)

Das System der QuMon GmbH wird seit 2000 vertrieben. Referenzprojekte sind beispielsweise JinPing II Tunnel (China), der Túnel de Cabrera (E) und der Gotthard-Basistunnel (CH) [58]. Die aktuelle Version ist BEAM G4, wobei noch im Jahr 2015 die neue Version BEAM G5 erscheinen wird.

Beim BEAM G4 Integral werden 4 Elektroden zur geoelektrischen Vorauserkundung benötigt. Die Elektroden A0 und A1 befinden sich an den nicht rotierenden Bauteilen der TBM und zwei Erdungselektroden sind am hinteren Teil der TBM montiert (siehe Abbildung 36 und Abbildung 37). [31]

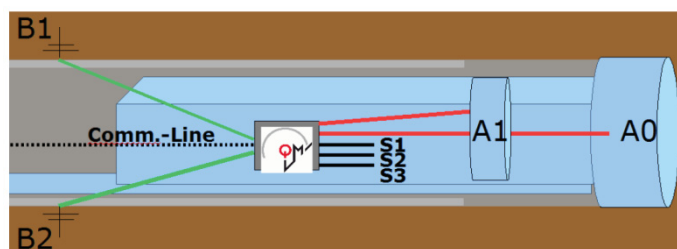


Abbildung 36: BEAM G4 Integral – Grippermaschine (aus [31])

Mit BEAM G4 Scan erhält man eine höhere laterale Auflösung. Allerdings werden mehr Kabelanschlussbereiche benötigt, die zum Teil mit elektrischen Isolatoren von der Tunnelbohrmaschine abgeschirmt werden müssen. Die rotierenden TBM-Bauteile werden mit einer Drehdurchführung verbunden. Ein Inkrementalgeber liefert Informationen zum Bohrkopfwinkel. Ein kritischer Faktor beim BEAM G4 ist, dass eine sichere Verdrahtung und eine Beständigkeit der Isolatoren gegeben sein müssen. [31]

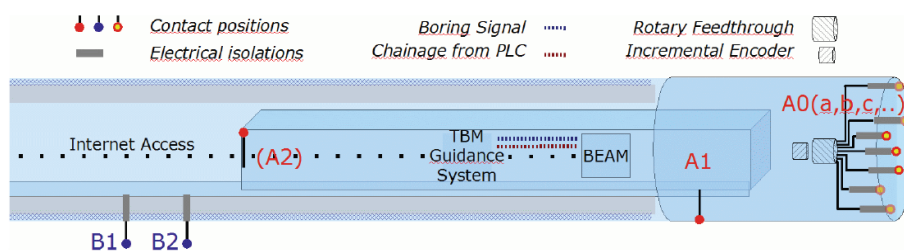


Abbildung 37: BEAM G4 Scan – Schildmaschine (aus [31])

Ergebnisdarstellung:

Die Abbildung 38 zeigt als Beispiel das Ergebnis einer BEAM-Messung der Firma Geo Exploration Technologies. Es werden Veränderungen des PFE-Werts, als auch des Widerstands graphisch dargestellt. Zusätzlich erfolgt eine Prognose der Geologie und der Hydrogeologie im Vortriebsbereich.

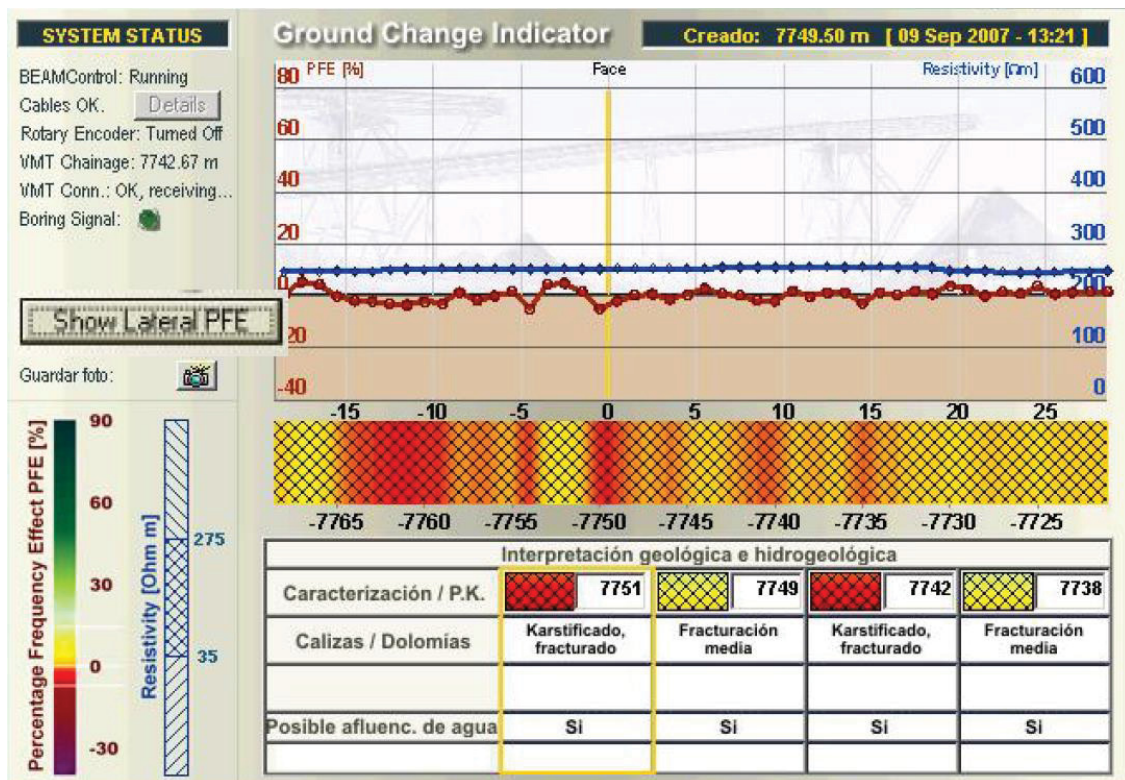


Abbildung 38: Exemplarisches Prognoseergebnis der BEAM-Messung (aus [27])

Fakten sowie Vor- und Nachteile generell und im Vergleich mit seismischen Vorauserkundungssystemen:

- Das BEAM-Verfahren kann sowohl in Verbindung mit einer Tunnelbohrmaschine als auch für die Vorauserkundung im zyklischen Vortrieb eingesetzt werden. [27]
- Die Anwendung des Systems ist sowohl im Fest- als auch im Lockergestein möglich. [27]
- Die Erkundungsreichweite entspricht ca. dem dreifachen des Tunneldurchmessers [27]. Sie ist daher im Vergleich zur seismischen Vorauserkundung deutlich geringer.
- BEAM-Scan liefert 3-dimensionale Informationen der Gebirgsverhältnisse. [27]
- Die Messung und Auswertung erfolgt vollautomatisiert. [31], [27]

Ein speziell ausgebildeter Geophysiker befindet sich daher nicht vor Ort auf der Baustelle.

- Die Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips wird von verschiedenen Fachexperten angezweifelt. Laut [44] sind noch gewisse Phänomene bei der Prospektion mit Geoelektrik ungeklärt. Beispielsweise werden Annahmen bezüglich des fokussierten Stromfeldes, der detektierten Reichweite und der Auflösung bei der Messung getroffen. Es ist auch noch unbekannt wodurch eine negative Polarisation verursacht wird.

Eine fachliche Stellungnahme von Prof. Dr. Andreas Weller der Abteilung Petrophysik des Instituts für Geophysik der TU Clausthal lautet wie folgt:

„Aus Sicht des Verfassers der Stellungnahme erfüllt das Verfahren BEAM nicht die Voraussetzungen, um als anerkannte Methode für eine Tunnelvorauserkundung eingesetzt zu werden. Das Messprinzip ist unter Fachleuten umstritten. Der schlüssige Beweis, dass das Verfahren unter praktischen Bedingungen so funktioniert, wie in den zahlreichen plakativen Beschreibungen ausgeführt, steht aus.“ [16]

3.4 Resümee aus Interviewrecherchen und Besprechungen

Im Zuge der Masterarbeit erfolgte ein Teil der Recherche durch Interviews und Besprechungen mit Geophysikern, Geologen und Geotechnikern, die bereits Erfahrungen mit vortriebsbegleitenden geophysikalischen Erkundungssystemen im Tunnelbau gesammelt haben. Das Ziel dieser Gespräche war in Erfahrung zu bringen, wie sich die kommerziellen Erkundungssysteme bei bisherigen Projekten bewährt haben und welche Verbesserungsvorschläge oder neuen Ideen es für eine erfolgreiche Anwendung der geophysikalischen Technologien im Tunnelbau gibt.

Interviews

In den Leitfadeninterviews wurde auf konkrete Referenzprojekte eingegangen und die Interviewpartner haben ihre persönliche, subjektive Sichtweise zum jeweiligen geophysikalischen Vorauserkundungssystem kundgetan. Um unbefangen über ihre Erfahrungen sprechen zu können wurden die Aussagen der Interviewpartner in Form von anonymisierten Gedächtnisprotokollen festgehalten. Diese sind im Anhang der Masterarbeit nachzulesen (siehe Anhang 1 bis Anhang 6). In Summe standen sechs Interviewpartner zur Verfügung, wobei drei Personen zum System TSWD der Firma Pöry, zwei Personen zum System TSP der Firma Amberg Technologies und eine Person zum System BEAM der Firma Geo Exploration Technologies Auskunft gaben. Nachfolgend werden die wichtigsten relevanten Aussagen der Interviewpartner dargestellt.

1. Interview mit Anwender des Systems TSWD

04.03.2015 von 09:45 bis 10:45 Uhr (siehe Anhang 1)

Der Interviewpartner spricht von seiner Erfahrung mit dem System TSWD bei der Vorauserkundung in tektonisch beanspruchtem Kristallin, in dem vorwiegend Gneise, Amphibole und Marmor angetroffen wurden. Die Überlagerung variierte ca. zwischen 120 m und 1200 m. Erkundungsziele stellten Störungszonen mit einer Mindestmächtigkeit von 10 m und Bergwasser dar. Die Vorauserkundung erfolgte stufenweise. Die seismischen Messungen lieferten im kristallinen Gebirge erste Hinweise auf eine Verschlechterung oder Verbesserung des Gebirgsverbands. Eine geologische Interpretation war allerdings nur durch eine Kombination der Seismik mit den Drehschlagbohrungen und den Ergebnissen von Bohrdatenschreibern möglich. Zum Teil konnten bis zu einem Drittel der Drehschlagbohrungen eingespart werden, ab einer

Überlagerung von ca. 700 m verhielt sich das Gebirge aber druckhaft und die TSWD-Messungen mussten beinahe lückenlos mit Drehschlagbohrungen ergänzt werden. Das Messsystem beschreibt der Interviewpartner grundsätzlich als sehr robust und baustellene geeignet. Kurzzeitige Probleme bei der Signalaufzeichnung resultierten im gegenständlichen Projekt aus einem sehr geringen Abstand zwischen den Tunnelröhren, in denen der Vortrieb parallel auf gleicher Höhe erfolgte. Die Störsignale waren aufgrund der Arbeiten in der zweiten Röhre sehr hoch und haben das Nutzsignal überdeckt. Der Interviewpartner weist auf Verbesserungspotential und Weiterentwicklungsbedarf des Messsystems hin. Des Weiteren zeigt er folgende Limitierungen der Seismik auf:

- Auf Basis der seismischen Messung alleine ist keine geologische Interpretation möglich.
- Aussagen zur bautechnischen Relevanz eines Reflektors sind nicht möglich. Die Seismik erkennt Impedanzkontraste und liefert ausschließlich Indizien, ob sich das Gebirge im Vortriebsbereich verschlechtert oder verbessert. Ob der Reflektor beispielsweise aus einer 30 cm oder 30 m mächtigen Störung resultiert, ist nicht erkennbar.
- Fließende Gebirgsübergänge sind mittels einer seismischen Vorauserkundung kaum erkennbar.
- Flach einfallende und schleiend zur Tunnelachse orientierte Störungen sind sowohl mit der Seismik als auch mit Vorausbohrungen schwierig zu erkunden.
- Bergwasserführende Zonen sind schwierig zu detektieren.
- Die räumliche Orientierung einer Störung ist kaum erkennbar.

2. Interview mit Anwender des Systems TSWD

04.03.2015 von 11:00 bis 11:30 Uhr (siehe Anhang 2)

Der Interviewpartner hat Erfahrungen mit dem Messsystem TSWD beim Vortrieb in tektonisch beanspruchtem Kristallin (v.a. Gneise, Amphibole und Marmor) mit einer Überlagerung von etwa 120 m bis 1700 m gesammelt. Der Interviewpartner weist darauf hin, dass auf Basis der seismischen Ergebnisse im gegenständlichen Projekt keine geotechnischen Entscheidungen getroffen oder technische Maßnahmen eingeleitet wurden. Die bautechnische Relevanz einer Störung ließ sich aus den seismischen Aufzeichnungen nicht erkennen. Bei Hinweisen auf eine Störung wurde eine Drehschlagbohrung angeordnet um genauere Informationen zu erhalten.

Störungen mit schleiender Orientierung wurden mittels seismischer Vorauserkundung zum Teil nicht oder erst sehr spät erfasst. Allerdings ist das frühzeitige Erkennen einer

Störung von maßgebender Bedeutung um rechtzeitig technische Maßnahmen einleiten zu können.

3. Interview mit Anbieter des Systems TSWD

04.03.2015 von 14:00 bis 15:00 (siehe Anhang 3)

Der Interviewpartner spricht von seinen Erfahrungen mit dem Messsystem TSDW in tektonisch beanspruchtem Kristallin (v.a. Gneise, Amphibole und Marmor). Die Überlagerung variierte ca. zwischen 120 m und 1200 m. Erkundungsziel war das Erkennen von Impedanzkontrasten, die auf Störungszonen hinweisen. Im gegenständlichen Projekt wurden laut Interviewpartner alle Impedanzkontraste erkannt und auch fließende Gebirgsübergänge spiegelten sich in den Reflexionssignalen wider. Theoretisch kann die Orientierung einer Störung im Bezug zur Tunnelachse festgestellt werden, allerdings reichte die Zeit auf der Baustelle für eine detaillierte Auswertung nicht aus. Der Interviewpartner schlägt folgende Ideen zur Verbesserung der Ergebnisse des Systems TSWD vor:

- Durch die Positionierung eines zusätzlichen Geophons im First- oder Sohlbereich könnte die Orientierung des Reflektors einfacher und rascher festgestellt werden.
- Beim Abteufen der Vorauserkundungsbohrungen könnte in Form sogenannter Uphole-Messungen die Wellengeschwindigkeit zwischen dem Bohrlochtiefsten und dem Bohrlochmund gemessen werden. Diese würde Informationen zum Gebirge im Vortriebsbereich liefern und detailliertere Aussagen zum Gebirge im Vortriebsbereich ermöglichen.

4. Interview mit Anwender des Systems TSP

12.03.2015 von 17:00 bis 18:00 Uhr (siehe Anhang 4)

Der Interviewpartner spricht von seinen Erfahrungen mit dem Messsystem TSP in kompakten Gneisen und Graniten mit einer Überlagerung bis zu 2000 m. Das Gestein hatte zum Teil Druckfestigkeiten von über 300 MPa. Eines der Erkundungsziele war daher einen Wechsel in der Gebirgsfestigkeit zu prognostizieren um den Verschleiß der Maschinenteile abschätzen zu können. Des Weiteren sollten Störungszonen und Bergwasservorkommen im Vortriebsbereich detektiert werden. Die Messung und Auswertung wurde im gegenständlichen Projekt von Ingenieuren auf der Baustelle durchgeführt. Laut Interviewpartner lieferte das Messsystem in der angetroffenen Geologie keine zufriedenstellenden bzw. zielführenden Ergebnisse. Grundsätzlich vertritt er aber die Meinung, dass das Messprinzip bei vernünftiger Messdurchführung und Auswertung funktionieren kann. Den Vorteil der vortriebsbegleitenden seismischen

Erkundung erkennt der Interviewpartner darin, dass das Gebirge großflächig und nicht nur punktuell erkundet wird. In der Regel sind trotzdem Drehschlagbohrungen für die geologische Prognose zu bevorzugen, da die Erkundungsergebnisse besser und genauer sind.

5. Interview mit Anwender des Systems TSP

23.03.2015 von 16:00 bis 17:00 Uhr (siehe Anhang 5)

Der Interviewpartner hat Erfahrungen mit dem Messsystem TSP bei zwei verschiedenen Bauabschnitten gesammelt. Der Vortrieb erfolgte hauptsächlich im Gneis und die Überlagerung betrug zwischen 800 und 2400 m. Für die Durchführung und Auswertung der Messungen waren Geophysiker der Firma Amberg Technologies verantwortlich. Der Einsatz des seismischen Messsystems hatte im gegenständlichen Projekt zum Ziel bautechnisch relevante Störungen und Bergwasser zu erkennen. Da es aber keine ausreichend starken Kontraste in den Steifigkeiten gab und die Störungen hauptsächlich subhorizontal einfielen, lieferte die Seismik keine aussagekräftigen Ergebnisse. Die Messungen wurden aus diesem Grund frühzeitig gestoppt und durch Vorausböhrungen ersetzt. Der Interviewpartner weist aber explizit darauf hin, dass das Messsystem von Amberg Technologies inzwischen weiterentwickelt wurde und nun räumliche Strukturen und schleifende Störungen scheinbar besser abgebildet werden können. Die Messapparatur beschreibt er generell als handlich.

6. Interview mit Anwender des Systems BEAM

05.03.2015 von 12:15 bis 14:30 Uhr (siehe Anhang 6)

Der Interviewpartner berichtet über seine Erfahrungen mit dem System BEAM der Geo Exploration Technologies. Das Erkundungssystem kam beim Vortrieb im Granit zum Einsatz. Die Überlagerung betrug bis zu 2000 m und das Gebirge wurde von mehreren Störungszonen durchörtert. Die Erwartungen, dass die Geoelektrik Kenntnisse zu den Gebirgsverhältnissen vor der Ortsbrust liefern würde, wurden im gegenständlichen Projekt nicht erfüllt. Die prognostizierte Geologie stimmt zumeist nicht mit der angetroffenen Geologie überein.

Besprechungen

Ergänzend zu den Interviews erfolgte im Rahmen verschiedener Besprechungen mit Geophysikern ein genereller Informationsaustausch zu geophysikalischen Vorauserkundungsmethoden im Tunnelbau. Der Gesprächsinhalt wurde in Form von Besprechungsprotokollen festgehalten. Diese wurden mit den am Gespräch beteiligten

Personen abgestimmt und der Masterarbeit im Anhang beigefügt (siehe Anhang 7 bis Anhang 11). Von relevanten Besprechungen werden der wichtigste Gesprächsinhalt und die subjektive Meinung der Gesprächspartner nachfolgend zusammengefasst wiedergegeben.

Besprechung mit Em.O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.phil. Ewald Brückl (TU Wien) und DI Ingrid Kreutzer (TU Wien)

19.02.2015 von 14:00 bis 16:30 Uhr (siehe Anhang 9)

Die Qualifikation des Geophysikers spielt eine große Rolle für die Ergebnisse der geophysikalischen Messungen. Die Auswertung und insbesondere die Interpretation sind zum Teil subjektiv. Der Kenntnisgewinn aus geophysikalischen Erkundungsmethoden ist also nicht nur abhängig vom Messsystem und der angetroffenen Geologie, sondern auch von der menschlichen Komponente. Voraussetzung für eine gute Vorauserkundung ist ein funktionierendes Messsystem in Kombination mit einem erfahrenen Geophysiker, der es versteht die Daten gut aufzubereiten und ein sinnvolles Processing durchführt.

Besprechung mit Dr. rer. nat. Bodo Lehmann (DMT GmbH & Co.KG)

26.02.2015 von 08:00 bis 09:00 Uhr (siehe Anhang 10)

Die Geophysik stellt nur ein Hilfsmittel für die Vorauserkundung im Tunnelbau dar. Nur in Kombination mit zusätzlichen geophysikalischen Untersuchungen oder anderen Erkundungsmethoden, wie z.B. Vorausbohrungen, sind Aussagen zu den geologisch / geotechnischen Verhältnissen im Vortriebsbereich möglich. Da sich während des Vortriebs möglicherweise die Geologie ändert, sollte im Idealfall die geophysikalische Erkundungsmethode an die jeweiligen geologischen Verhältnisse angepasst werden bzw. ein anderes Untersuchungssystem gewählt werden. Hinsichtlich einer zielführenden Vorauserkundung wäre es wünschenswert, dass bei Tunnelprojekten nicht ein bestimmtes System oder Arbeitsgerät ausgeschrieben, sondern eine geowissenschaftliche Arbeitsgruppe zusammengestellt wird. Diese soll das Projekt während des Vortriebs betreuen und vor Ort das Vorauserkundungskonzept an die gegebenen geologischen und strukturellen Verhältnisse anpassen.

Bei Systemen, bei denen die Auswertung automatisch mit einer „Blackbox“ erfolgt (z.B. TSP), werden die Messung und Auswertung nicht individuell an die geologischen Verhältnisse angepasst. Das Ergebnis der Messung ist möglicherweise nicht so gut als wenn ein Geophysiker / Geologe / Geotechniker die Auswertung und Interpretation durchführt und begleitet. Es stellt sich die Frage, warum sich solche Systeme trotzdem verkaufen lassen: In der Regel trägt der Bauherr das Baugrundrisiko. Sollten während des

Vortriebs geologisch / geotechnische Komplikationen auftreten, so kann sich der Bauherr rechtfertigen und vorweisen, dass eine geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz war.

Herr Lehmann bezweifelt, dass das geophysikalische Erkundungssystem von Herrenknecht im Vergleich zu aufwändigeren Messmethoden zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Es gibt nur einen Sender und 2 Empfänger und daher ist die Datenmenge sehr gering. Das Unternehmen erwartet möglicherweise durch die Implementierung eines geophysikalischen Erkundungssystems auf der Tunnelbohrmaschine einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Maschinenherstellern. Grundsätzlich ist Hr. Lehmann nicht vom System TSWD überzeugt, da die Quellenregung der seismischen Wellen kontinuierlich durch den Bohrkopf erfolgt und daher die Identifizierung von geologisch bedingten Reflexionssignalen schwierig ist.

Besprechung mit Univ.-Prof. Dipl.-Geophys. Dr.rer.nat. Florian Bleibinhaus (Montanuniversität Leoben)

23.03.2015 von 10:15 bis 11:30 Uhr (siehe Anhang 11)

Hr. Bleibinhaus ist der Meinung, dass es bislang keine ausgereifte geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau gibt und dass hier definitiv weiterer Forschungsbedarf besteht. Testkonfigurationen in Testtunnels könnten die Entwicklung der geophysikalischen Messsysteme im Tunnelbau voranbringen. Die Seismik ist die wichtigste geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau, auch wenn keines der geophysikalischen Verfahren als etabliert angesehen werden kann.

Beim System TSWD ist die Aufzeichnung des Quellsignals aufgrund der Eigenvibration der Tunnelbohrmaschine mit einer gewissen Problematik verbunden und es ist nicht klar, an welcher Position das Quellsignal am besten registriert werden soll. Zurzeit wird das Erregersignal mittels Beschleunigungsaufnehmer möglichst nah am Schneidrad aufgezeichnet und näherungsweise wie eine Punktquelle behandelt. Zudem wird bei der Messung nur ein geringer Frequenzbereich abgedeckt.

Neben der Seismik besteht vielleicht die Möglichkeit mithilfe eines Georadars das Vorfeld der Ortsbrust zu erkunden. Hier sollte untersucht werden, ob die Positionierung der Antennen durch das Mannloch möglich ist und wie die Reflexionen von der Tunnelbohrmaschine abgeschirmt werden können.

4 Koppelung der Ergebnisse von Diskenkraftmessungen mit geophysikalischen Erkundungssystemen

Im Rahmen der Masterarbeit wird die Frage behandelt, ob ein Verbesserungspotential der geophysikalischen Vorauserkundungssysteme durch eine Kombination mit Diskenkraftmessergebnissen besteht. Die Relevanz des Themas ergibt sich aus der Tatsache, dass sich das Diskenkraft-Monitoring System im maschinellen Tunnelbau zu etablieren scheint.

Disken stellen das wichtigste Abbauwerkzeug von Tunnelbohrmaschinen im Festgestein dar. Bislang wurde angenommen, dass auf eine 17“-Standarddiske eine maximale Last von 250 kN wirkt. Verschiedene Untersuchungen haben nun aber gezeigt, dass die tatsächliche Belastung um ein Vielfaches größer sein kann und von mehreren Faktoren, wie z.B. der Position der Diske am Schneidrad, abhängig ist. Die Kraftmessung der individuellen Disken ermöglicht ein besseres Verständnis der Krafteinwirkung und des Verschleißes der Schneidwerkzeuge sowie eine optimierte Auslegung der Disken und des Bohrkopfes. Zusätzlich kann durch das Monitoring der Diskenkräfte der Lösemechanismus und die Penetration der Tunnelbohrmaschine besser analysiert werden. [15]

Bei der Diskenkraftmessung werden die Signale in Echtzeit aufgezeichnet und die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in Form eines Zeit-Kraft-Diagramms. [15]

Nun gilt es zu klären, ob das Diskenkraft-Monitoring einen Mehrwert für die baubegleitende geophysikalische Vorauserkundung liefern kann. Die Fragestellung wurde im Zuge der Besprechungen mit Geophysikern zu geophysikalischen Vorauserkundungssystemen behandelt. Das Resultat der Nachforschungen ist, dass die Diskenkraftmessung höchstwahrscheinlich nur beim geophysikalischen Vorauserkundungssystem TSDW zur Verbesserung der Ergebnisse beitragen kann (siehe Anhang 9, Anhang 10 und Anhang 11). Bei allen anderen Systemen kann das Diskenkraft-Monitoring zur Verifizierung der prognostizierten Geologie herangezogen werden, es verbessert aber nicht die Qualität der geophysikalischen Erkundungsergebnisse.

Beim System TSWD erfolgt die seismische Quellanregung passiv durch den Schneidvorgang der Disken. Das Pilotsignal wird ca. 3 m hinter dem Bohrkopf am nicht-rotierenden Bauteil des Hauptlagers registriert und es werden Signale bis zu einer Frequenz von 500 Hz aufgezeichnet (vgl. Kapitel 3.1.1.1). Die Transferfunktion der Vibrationen von den Disken zum Beschleunigungsaufnehmer kann bislang nicht genau

bestimmt werden. Idealerweise sollte das Pilotsignal möglichst nah am Erregerzentrum, sprich direkt am Schneidrad, aufgezeichnet werden. Der technischen Machbarkeit sind hier allerdings Grenzen gesetzt und die Positionierung des Beschleunigungsaufnehmers direkt am Schneidrad ist nicht möglich. [28]

Bei der Diskenkraftmessung befinden sich die Sensoren im Auflagerbereich der Diske und somit unmittelbar am Herd der seismischen Quelle. Es ist daher durchaus davon auszugehen, dass durch eine Korrelation der Messdaten das Pilotsignal exakter bestimmt werden könnte (siehe Anhang 9).

Die Samplingrate des Beschleunigungsaufnehmers beim Systems TSWD beträgt 1000 Samples (siehe Anhang 9). Bei der Diskenkraftmessung werden die Signale bislang mit einer Frequenz von 100 Hz in Real-Time aufgezeichnet [15]. Für eine Korrelation der Messdaten wird daher eine Frequenzerhöhung der Diskenkraftmessung empfohlen. Die Samplingrate sollte mind. 500 Hz entsprechen.

5 Spezifische Anwendung indirekter Erkundungssysteme beim kontinuierlichen Tunnelvortrieb des Semmering-Basistunnels

5.1 Projektübersicht

Das Projekt Semmering-Basistunnel (SBT) als Teil des baltisch-adriatischen Korridors enthält als Kernstück einen 27,3 km langen zweiröhrigen Eisenbahntunnel. Der Tunnel bildet die Verbindung zwischen Gloggnitz im Osten und Mürzzuschlag im Westen. Die Tunneltrasse wurde für die Bauausführung in drei Baulose untergliedert, von denen das geografisch mittlere Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben eine Länge von 12,9 km besitzt (siehe Abbildung 39). Der Vortrieb des Tunnels erfolgt hier kontinuierlich mit einer Schildmaschine entlang eines Streckenabschnittes von 8,6 km in östliche Richtung. Der nominale Bohrdurchmesser der Tunnelbohrmaschine beträgt 10,10 m. [26]

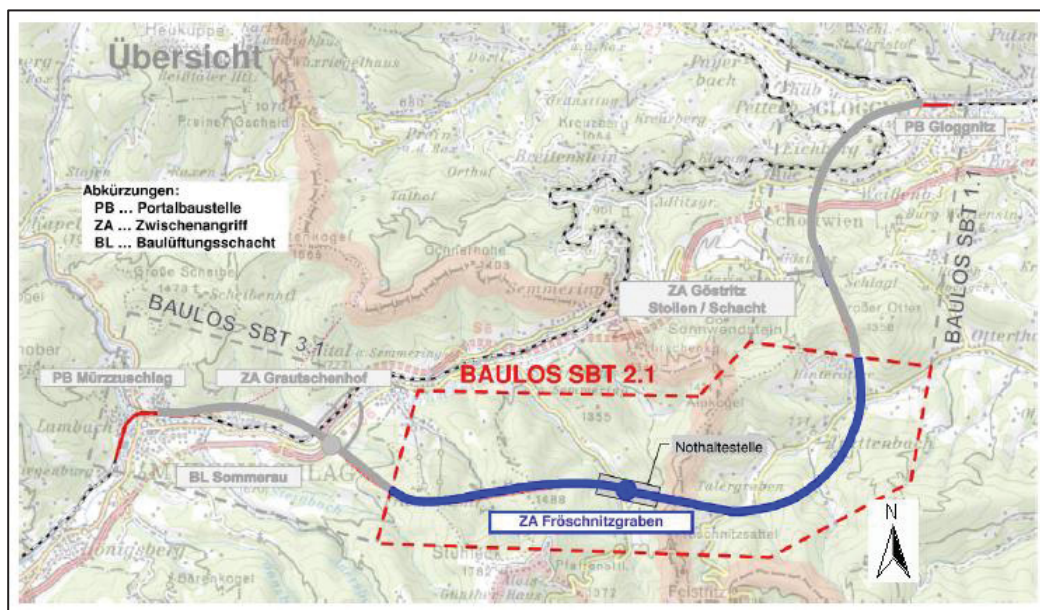


Abbildung 39: Übersichtslageplan Baulos SBT2.1 - Tunnel Fröschnitzgraben (aus [26])

5.2 Prognostizierte Geologie

Der geologische Aufbau im Baulosbereich SBT2.1 gliedert sich in zwei großtektonische Einheiten [26]:

- Wechsel-Einheit
- Semmering-Einheit

Sowohl die Semmering- als auch die Wechsel-Einheit sind dem unterostalpinen Deckenstockwerk zuzuordnen. Die Wechsel-Einheit stellt dabei die tektonisch tiefere Einheit dar, der im Zuge der alpidischen Gebirgsbildungsphasen die Semmering-Einheit entlang einer Deckengrenze aufgeschoben wurde. Die Einheiten sind einem intensiven Decken- und Faltenbau unterworfen, der sich in vorwiegend duktilen Strukturen, wie z.B. Verfaltungen oder duktilen Scher- und Überschiebungsbahnen, widerspiegelt. Zusätzlich wird das Gebirge von jüngeren sprödetektonischen Störungszonen durchschlagen, die zu teils bedeutenden Verstellungen führen. Diese Störungszonen sind durch das Auftreten stark zerlegter Gesteine und kataklastischer Störungsgesteine charakterisiert. [26]

Im Bereich des kontinuierlich aufzufahrenden Tunnelabschnittes werden ausschließlich Gesteine des Wechselkristallins prognostiziert. Das Wechselkristallin ist aus Gesteinen des „Wechselgneis“-Komplexes aufgebaut, denen eine Hülle aus „Wechselschiefern“ auflagert. Im Hangenden werden sie konkordant von einer Decksedimentsequenz des Permomesozoikums begrenzt. [26]

Der Großteil des kontinuierlichen Vortriebs erfolgt im „Wechselgneis“-Komplex, in dem (Para)Gneise, v.a. Albitgneise, durchörtert werden. Nur im östlichen Vortriebsabschnitt werden Gesteine des Wechselschiefers, v.a. Albitphyllit und Albitschiefer, angetroffen. Charakteristisch ist das Auftreten von Serizit-Chlorit-Quarz-Schiefern bis –Phylliten, die infolge tektonischer Überprägung meist stark geschert und anisotrop vorliegen. Es werden generell sehr heterogene, anisotrope Gebirgsverhältnisse mit einer starken Wechselhaftigkeit prognostiziert. Die Störungszonen fallen größtenteils flach in schieferungsparallele Richtung ein und sind normal bis schleifend zur Tunnelachse orientiert. Sie können eine Mächtigkeit bis ca. 20 m aufweisen. Bergwasser stellt aufgrund der geringen prognostizierten Zutrittsmenge eine untergeordnete Rolle dar. Die Überlagerung variiert zwischen 415 m und 715 m. [26]

5.3 Erkundungsziele für die indirekte Vorauserkundung beim kontinuierlichen Vortrieb des Semmering-Basistunnels

Grundsätzlich kann der Erkundungsbereich beim kontinuierlichen Vortrieb des Semmering-Basistunnels - Bauloses SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben auf den Gebirgsbereich vor der Ortsbrust beschränkt werden. Die Vorauserkundung soll frühzeitig auf Vortriebsabschnitte hinweisen, in denen besondere Baumaßnahmen (z.B. Zusatz- oder Sondermaßnahmen) erforderlich sind.

Das Vorauserkundungskonzept sieht systematische Drehschlagbohrungen mit Bohrlängen von bis zu 80 m vor. Wird eine erweiterte bzw. detaillierte Erkundung als erforderlich erachtet, so sind zusätzliche Drehschlagbohrungen bzw. Kernbohrungen durchzuführen. Die Detailerkundung umfasst des Weiteren geophysikalische Bohrlochmessungen und gegebenenfalls hydraulische Bohrlochversuche.

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob eine Kombination der Vorausbohrungen mit einem geophysikalischen Vorauserkundungssystem zielführend ist und welches System am besten für die vom Bauherrn geforderten Erkundungsziele geeignet erscheint.

Vom Bauherrn definierte Erkundungsziele für die geophysikalische Vorauserkundung sind:

- frühzeitige Identifikation (mind. 30 m vor der OB) sämtlicher bautechnisch relevanter Störungs- und Schwächezonen in ihrer Lage und Orientierung zur Tunnelachse
- Erkundungsreichweite: mind. 100 m
- Lagegenauigkeit der prognostizierten Diskontinuitäten: mind. 10 m

Sonstige Vorgaben des Bauherrn für die geophysikalische Vorauserkundung sind:

- der Vortrieb darf durch die Messung nicht eingeschränkt oder verzögert werden
- ein Geophysiker muss vor Ort auf der Baustelle sein und die Messung und Auswertung betreuen
- eine Zusammenarbeit zwischen Geophysiker Geologen und Geotechniker ist erforderlich um eine bestmögliche geologische Prognose zu gewährleisten
- es sollen bis zu einem Drittel der Vorauserkundungsbohrungen eingespart werden
- die Vorauserkundung soll in der vorauseilenden Tunnelröhre erfolgen → falls erforderlich muss das System von der einen in die andere Röhre umgebaut werden
- das System muss baustellengerecht, robust und wartungsarm sein

- schneller Ersatz von Gerätekomponenten bei Defekt, Ermüdung oder Verschleiß muss gewährleistet sein

5.3.1 Nutzwertanalyse zur Bewertung der Systeme hinsichtlich ihrer Eignung beim Semmering-Basistunnel

Die in Kapitel 3 beschriebenen geophysikalischen Vorauserkundungssysteme werden im Hinblick auf ihre Eignung beim kontinuierlichen Vortrieb des Semmering-Basistunnels in Form einer Nutzwertanalyse bewertet (siehe Tabelle 4). Es werden maßgebende Kriterien definiert und im Hinblick auf ihre Relevanz für das gegenständliche Projekt mit unterschiedlicher Gewichtung bewertet. Den Kriterien „Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips“, „Detektion bautechnisch relevanter Störungen“ und „Prognosesicherheit“ wird eine besondere Wichtigkeit beigemessen. Werden die Anforderungen nicht erfüllt, so resultiert dies in einem Ausschluss des Systems (gekennzeichnet mit einem Rufzeichen „!“).

In Tabelle 4 ist das Ergebnis der Nutzwertanalyse dargestellt. Nachfolgend werden zur besseren Nachvollziehbarkeit die Bewertungskriterien erläutert. Zum Teil wird bereits Bezug auf die Ergebnisse der Tabelle 4 genommen.

- Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips:

Grundvoraussetzung für die Implementierung eines geophysikalischen Vorauserkundungssystems beim Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben ist die eindeutige Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips. Ist diese nicht gegeben, so führt dies zum Ausschluss des Systems.

- Detektion bautechnisch relevanter Störungen
- Prognosesicherheit (Erkundungsreichweite, Lagegenauigkeit):

Es müssen die vom Bauherrn geforderten Erkundungsziele erreicht werden. Sämtliche Störungen von bautechnischer Relevanz sind mit einer Lagegenauigkeit von mind. 10 m zu detektieren. Die geforderte Mindestreichweite beträgt 100 m.

Die beiden geoelektrischen Erkundungssysteme und das SSP-System erfüllen diese Ausschlusskriterien nicht. Das Produkt SSP ist für den Lockergesteinsvortrieb konzipiert und daher in der vorliegenden Geologie ungeeignet. Das BEAM-Verfahren ist weder für die Detektion der erwarteten Störungszonen geeignet, noch wird die geforderte Erkundungsreichweite erzielt. Auch für die reflexionsseismische Vorauserkundung stellt das Gebirge im gegenständlichen Tunnelabschnitt keine idealen Voraussetzungen dar. Der Baugrund wird sehr heterogen und anisotrop beschrieben und die Störungen fallen

zum Teil flach ein und/oder sind schleifend zur Tunnelachse orientiert. Die Systeme TSWD, TSP, ISIS und TRUST sind daher nur bedingt für die Detektion der Störungzonen geeignet.

- Personeller Aufwand:

Es wird vom Bauherrn gefordert, dass das für die Messung und Auswertung zuständige Personal vor Ort auf der Baustelle ist. Der personelle Aufwand von 2 Personen sollte allerdings nicht überschritten werden.

- Fachpersonal (Geophysiker) zwingend vor Ort erforderlich:

Es wird als positiv bewertet, wenn die geophysikalische Messung und Auswertung nicht zwingend von einem Geophysiker, sondern auch von geschultem Baustellenpersonal betreut werden kann.

- Bautechnischer Aufwand für die Messung:

Der bautechnische Aufwand bezieht sich auf sämtliche Bohrungen, die für die Positionierung der Messapparatur und gegebenenfalls des Sprengstoffes notwendig sind. Beim Bohrlochradar ist mindestens eine, optimaler Weise drei Vorausbohrungen herzustellen. Der bautechnische Aufwand ist daher bei dieser Messung am größten.

- Einfluss auf Bauzeit:

Es ist von wesentlicher Bedeutung, ob durch die geophysikalische Vorauserkundung eine Bauzeitverzögerung verursacht wird. Eine Verzögerung des Tunnelvortriebs ist mit erheblichen Kosten verbunden und muss weitestgehend vermieden werden. Die Messdurchführung der BEAM-Systeme und der seismischen Erkundungsverfahren erfolgt entweder kontinuierlich oder in der Wartungsschicht. Nur die Bohrlochradarmessung hat mit großer Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf die Bauzeit, da Vorausbohrungen abgeteuft werden müssen. Die Herstellung der Bohrung dauert oft länger als die Wartungsschicht, was zu einer zusätzlichen Standzeit der Tunnelbohrmaschine führt.

- Datensicherung

Bei manchen Systemen erfolgt die Datenaufzeichnung kontinuierlich, bei anderen je nach Vortriebsleistung in bestimmten Zeitabschnitten. Aufgrund der großen Datenmenge, die bei kontinuierlichen Messverfahren generiert wird, wirkt sich ein Signalausfall nicht so stark auf die Auswertung aus, als bei einer diskontinuierlichen Messung. Es werden daher Systeme mit kontinuierlicher Datenaufzeichnung bevorzugt.

- Auswertung:

Grundsätzlich wird eine möglichst individuelle Auswertung gegenüber einer automatisierten bevorzugt. Eine individuelle Auswertung kann an die gegebenen geologischen Verhältnisse bzw. sonstige Randbedingungen angepasst werden.

- Prognoseergebnis (für unmittelbare Prognose):

Es ist von entscheidender Bedeutung, ob die Ergebnisse für die unmittelbare Prognose nach der Messung 3-dimensional oder nur 1-dimensional dargestellt werden. Systeme, die 3-dimensionale Ergebnisse liefern, werden bevorzugt.

- Informationsverfügbarkeit:

Das letzte Bewertungskriterium stellt die Informationsverfügbarkeit in Form von Veröffentlichungen dar. Es wird hier zwischen bereitgestellter Information vom Hersteller und vom Anwender differenziert.

Tabelle 4: Nutzwertanalyse für geeignetes geophysikalisches Vorauserkundungssystem beim Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben

BEWERTUNGSKRITERIEN	VORTRIEBSBEGLEITENDE GEOPHYSIKALISCHE ERKUNDUNGSSYSTEME							
	TSWD	TSP	ISIS	SSP	TRUST	Bohrlochradar	BEAM (QuMon GmbH)	BEAM (Geo Exploration Technologies)
Nachvollziehbarkeit des geoph. Grundprinzips	+	+	+	+	+	+	!	!
Detektion bautechnisch relevanter Störungen	+ -	+ -	+ -	!	+ -	+ -	!	!
Prognosesicherheit	+	+	+	!	+	+	!	!
Personeller Aufwand	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
Fachpersonal (Geophysiker) vor Ort erforderlich	0	1	1	1	1	0	1	1
Bautechnischer Aufwand für die Messung	0	-1	0	1	-1	-2	1	1
Einfluss auf Bauzeit	1	1	1	1	1	-1	1	1
Auswertung	2	0	-2	-2	2	2	-2	-2
Datensicherung	2	0	2	2	0	0	2	2
Darstellung der Ergebnisse	0	2	0	2	0	2	2	2
Informationsverfügbarkeit	2	2	0	-2	2	-2	-2	-2
SUMME	7	5	1	!	4	!	!	!

Legende:

 Beste Bewertung	k.A. keine Angabe
 Schlechteste Bewertung	MQ Messquerschnitt
 Ausschluss des Systems	

Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips	
ja	nein
+	!

Detektion bautechnisch relevanter Störungen		
geeignet	bedingt geeignet	nicht geeignet
+	+ -	!

Prognosesicherheit					
Erkundungsreichweite			Lagegenauigkeit		
>100m	<100m	k.A.	<=10m	>10m	k.A.
+	!	!	+	!	!

Personeller Aufwand			
0 Personen	1-2 Personen	>2 Personen	k.A.
-1	0	-1	-1

Fachpersonal (Geophysiker) vor Ort erforderlich		
ja	nein	k.A.
0	1	0

Bautechnischer Aufwand für die Messung			
keine Bohrungen	Bohrungen für Geophon-MQ	Bohrungen für Geophon-MQ und Sprengung	Vorausbohrungen
gering	mittel	hoch	sehr hoch
1	0	-1	-2

Einfluss auf Bauzeit	
nein	ja
1	-1

Auswertung			
individuell	halbautomatisiert	vollautomatisiert	k.A.
2	0	-2	-2

Datensicherung		
kontinuierlich	diskontinuierlich	k.A.
2	0	0

Darstellung der Ergebnisse (für unmittelbarer Prognose)		
3-dimensional	1-dimensional	k.A.
2	0	0

Informationsverfügbarkeit					
Hersteller			Anwender		
gering	mittel	hoch	gering	mittel	hoch
<=2 Publikationen	3-5 Publikationen	>5 Publikationen	<=2 Publikationen	3-5 Publikationen	>5 Publikationen
-2	0	2	-2	0	2

Die Nutzwertanalyse zeigt, dass für die Anwendung beim Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben ausschließlich reflexionsseismische Vorauserkundungssysteme geeignet sind. Das System TSWD der Firma Pöyry erzielt für die vom Bauherrn definierten Anforderungen mit sieben Punkten die beste Bewertung. Das TSP-Verfahren der Amberg Technologies AG erreicht fünf Punkte, das System TRUST der DMT vier Punkte und ISIS von Herrenknecht AG einen Punkt. Das System SSP sowie die geoelektrischen Vorauserkundungssysteme BEAM und das Bohrlochradar werden für die Vorauserkundung im gegenständlichen Tunnelbauprojekt als ungeeignet betrachtet.

Wie bereits erwähnt, stellt das Gebirge im vorliegenden Projektgebiet aber auch für seismische Erkundungssysteme keine idealen Voraussetzungen dar. Es werden Störungen prognostiziert, die großteils flach und/oder mit schleiender Orientierung zur Tunnelachse einfallen. In verschiedenen Publikationen wird immer wieder darauf hingewiesen, dass eben solche Störungen mittels seismischer Erkundungsmethoden sehr schwierig zu detektieren sind. Weiters wird das Gebirge als sehr heterogen beschrieben und es ist durch eine starke Wechselhaftigkeit charakterisiert. Eine Einsparung der Vorauserkundungsbohrungen durch eine Kombination mit einem geophysikalischen Erkundungssystem scheint daher nicht möglich zu sein. Dennoch ist zu erwarten, dass die Geophysik großflächig wertvolle Informationen zum Gebirge hinsichtlich Lithologiewechsel und Zerlegungsgrad des Gebirges liefern und in Kombination mit Drehschlagbohrungen zur Identifikation und räumlichen Charakterisierung von Störungszonen beitragen kann.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Masterarbeit wurde ein Überblick über die verschiedenen am europäischen Markt erhältlichen geophysikalischen Systeme zur vortriebsbegleitenden Erkundung des Baugrundes gegeben.

Ein Großteil der Erkundungssysteme basiert auf dem Prinzip der Reflexionsseismik. Es werden seismische Wellen angeregt, die an Schichtgrenzen oder Diskontinuitäten reflektiert werden. Die Auswertung der an den Geophonen aufgezeichneten Wellenlaufzeiten liefert Informationen zu den geologischen Baugrundverhältnissen. So können mit einer Reichweite von bis zu 150 m und einer Lagegenauigkeit von ca. 10 m sowohl Einzelstörungen, als auch großflächige Störungszonen, Lithologiewechsel und Hohlräume detektiert werden. Voraussetzung für ein aussagekräftiges Ergebnis ist, dass der Einfallswinkel der Diskontinuität im Bezug zur Tunnelachse groß genug ist (mind. 20° bis 30°) und dass ein ausreichend großer Impedanzkontrast vorliegt. Die reflexionsseismischen Messsysteme unterscheiden sich in der Art der seismischen Anregung, in der Anordnung der Messgeräte, im Processing und der Auswertung. Die Verfahren TSWD, TSP, ISIS und TRUST sind ausschließlich für die Anwendung im Festgestein konzipiert. Beim TSWD-System erfolgt die seismische Quellenregung „passiv“ durch den Schneidprozess an der Ortsbrust und die Signale werden kontinuierlich während des Tunnelvortriebs aufgezeichnet. Im Gegensatz dazu nutzen TSP, TRUST und ISIS externe Signalgeber. Die seismischen Wellen werden hier durch gezielte Sprengungen bzw. durch den Einsatz eines hydraulischen Impakthammers generiert. Der Vorteil dieser sog. „aktiven“ Quellen ist, dass ein breiteres Frequenzspektrum abgedeckt wird. Allerdings muss zur Minimierung der Störsignale der Vortrieb während der Messdurchführung eingestellt werden bzw. die Messung muss während der Wartungsschicht erfolgen. Der bautechnische Aufwand ist für sprengseismische Messungen höher als für Systeme, bei denen das Quellsignal durch einen Impakthammer oder den Schneidprozess selbst erzeugt wird.

Beim SSP-System handelt es sich um ein schneidradintegriertes Reflexionsverfahren, das für die Vorauserkundung im Lockergestein entwickelt wurde. Die Erkundungsreichweite ist auf max. 40 m beschränkt. Die Messung läuft kontinuierlich während des Vortriebs und die Auswertung wird automatisch durchgeführt.

BEAM ist ein geoelektrisches Vorauserkundungssystem, das sowohl im Locker- als auch im Festgestein eingesetzt werden kann. Der frequenzabhängige Widerstand erlaubt mit einer Erkundungsreichweite, die dem dreifachen des Tunneldurchmessers entspricht,

Rückschlüsse auf Störungszonen, Hohlräume usw. im Vorfeld der Ortsbrust. Die Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips des Systems BEAM wird allerdings von verschiedenen Fachexperten angezweifelt.

Die Vorauserkundung in Form von Bohrlochradarmessungen zeichnet ein hohes Auflösungsvermögen aus. Der bautechnische und zeitliche Aufwand der Messungen ist allerdings sehr hoch.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Erkundungssysteme wurden im Rahmen dieser Arbeit die wichtigsten Erkenntnisse bezüglich Einsatzbereich, Montage des Messsystems sowie Durchführung und Auswertung der Messung in tabellarischer Form dargestellt (siehe Anhang 12 bis 19). Die vom Hersteller und vom Anwender bereitgestellten Informationen sind getrennt aufgelistet.

Grundsätzlich sollten vor der Auswahl einer geophysikalischen Erkundungsmethode und eines bestimmten Messsystems individuell für jedes Tunnelprojekt im Vorfeld die Erkundungsziele und Anforderungen definiert werden. Die Eignung eines jeden Verfahrens hängt nicht nur von den geologischen Verhältnissen, sondern auch von der speziellen Aufgabenstellung sowie den Erwartungen an das System ab. Es sollte klar sein, dass die Geophysik nur ein Hilfsmittel zur begleitenden geologisch-geotechnischen Baugrunduntersuchung darstellt. Eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse ist erst durch die Kombination mit anderen Erkundungsmethoden, wie z.B. Vorausböhrungen, möglich. Für einen maximalen Informationsgewinn wird eine enge Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker empfohlen.

In der Arbeit erfolgte eine Analyse hinsichtlich der Eignung eines geophysikalischen Vorauserkundungssystems beim Vortrieb des Semmering-Basistunnels – Baulos SBT2.1 – Tunnel Frörschnitzgraben. Das Resultat der Untersuchungen zeigt, dass für die Erkundung des vorliegenden Baugrunds unter den gegebenen Randbedingungen ausschließlich der Einsatz reflexionsseismischer Verfahren sinnvoll ist. Im Speziellen scheint das System TSWD am besten für die vom Bauherrn definierten Anforderungen geeignet zu sein. Ein Geophysiker betreut bei diesem Verfahren die Messung und Auswertung vor Ort auf der Baustelle und aufgrund des geringen bautechnischen Aufwands ist das System gut in den Bauablauf integrierbar. Ein Vorteil der kontinuierlichen Datenaufzeichnung beim TSWD-Verfahren ist, dass die Prognosesicherheit erhöht wird und ein Ausfall der Signalaufzeichnung kaum Auswirkungen auf die Qualität des Ergebnisses hat. Allerdings gibt es aufgrund des heterogenen, stark tektonisch beanspruchten Gebirges Einschränkungen bezüglich der geforderten Erkundungsziele. Die prognostizierten Störungen fallen größtenteils flach

und/oder mit schleifender Orientierung zur Tunnelachse ein. Die Recherche hat ergeben, dass ebensolche Diskontinuitäten mithilfe der Seismik schwierig zu detektieren sind. Eine baubegleitende geophysikalische Vorauserkundung, die den seitens des Bauherrn definierten Anforderungen weitestgehend entspricht, gestaltet sich daher beim Vortrieb des SBT schwierig. Dennoch ist zu erwarten, dass die Geophysik großflächig Informationen zu den Gebirgsverhältnissen liefert und in Kombination mit Drehschlagbohrungen zur Identifikation von Störungszonen beitragen kann. Das Ziel bis zu einem Drittel der Vorauserkundungsbohrungen einzusparen, kann allerdings aus heutiger Sicht nicht erreicht werden.

Ein Verbesserungspotential der geophysikalischen Vorauserkundungssysteme durch eine Korrelation mit Diskenkraftmessergebnissen scheint ausschließlich beim System TSWD zu bestehen. Die Sensoren zur Kraftmessung befinden sich hier unmittelbar am Herd der seismischen Quelle und durch eine entsprechende Koppelung der Messdaten könnte das seismische Pilotsignal exakter bestimmt werden. Um der Frage der möglichen Korrelation zwischen Ergebnissen von Diskenkraftmessungen und dem System TSWD tiefergehend nachgehen zu können, wird empfohlen dieses Thema im Rahmen künftiger Forschungsprojekte weiterzuverfolgen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] AMINZADEH, F.; DASGUPTA, S.N.: Geophysics for petroleum engineers, Elsevier, Amsterdam/ Boston, 2013.
- [2] BERECKHEMER, K.: Grundlagen der Geophysik, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1990.
- [3] BERKTOLD, A; et al.: Geoelektrik, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 65-363.
- [4] BLINDOW, N.; RICHTER, T.; PETZOLD, H.: Bodenradar, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 369-403.
- [5] BRÜCKL, E.; et al.: Seismik, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 405-446.
- [6] BRÜCKL, E.; et al.: Exploration Ahead of a Tunnel Face by TSWD – Tunnel Seismic While Drilling, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 5, S. 460-465.
- [7] BRÜCKL, E.; et al.: Continuous exploration ahead of the tunnel face by TSWD- Tunnel Seismic While Drilling, Proceedings of 23rd SAGEEP - EEGS' Annual Meeting Keystone, Colorado, 2010, S. 353-360.
- [8] CORIN, L.: Bohrlochradar – Grundlagen und Anwendung im Festgestein, In: Felsbau 13, Nr. 5, 1995, S. 285-290.
- [9] DICKMANN, T.: Seismic Prediction While Tunnelling in Hard Rock, Proceedings of Annual Meeting of the German Geophysical Society, Colloquium, Graz, 2005.
- [10] DICKMANN, T.; PITTARD, F.: An engineering view of seismic prediction during tunneling, Proceedings of 12th ISRM International Congress on Rock Mechanics, Beijing, October 18-21, 2011.
- [11] DICKMANN, T.: Predicting rock conditions ahead of the face, Proceedings of

TunnelTalk, Sept. 2012.

- [12] DICKMANN, T.: 3D Tunnel Seismic Prediction: A next generation tool to characterize rock mass conditions ahead of the tunnel face, In: Journal of Rock Mechanics & Tunnelling Technology 20 (1), 2014, S. 35-47.
- [13] DOMBROWSKI, B; et al.: Combination of rockburst monitoring and seismic exploration ahead of the tunnel face: A new seismic concept for risk reduction, Proceedings of the World Tunnel Congress, Budapest, 2009, S. 60.
- [14] EDELMANN, T.: Vorauserkundung im Tunnelbau, <http://sfb837.sd.rub.de/downloads/Workshop30.9.13MUL-HK-TLB-SFB/130930-11%20Edelmann%20-%20Vorauserkundung.pdf>, (10.03.2015).
- [15] ENTACHER, M.: Measurement and interpretation of disc cutting forces in mechanized tunneling, A contribution to the understanding of rock failure mechanisms and the advancement of TBM performance prediction, Montanuniversität Leoben, 2013.
- [16] Fachliche Stellungnahme zum BEAM-Verfahren von Prof. Dr. rer. nat. habil. Andreas Weller der Abteilung Petrophysik des Instituts für Geophysik der TU Clausthal.
- [17] FREUDENTHALER, A.; et al.: Looking ahead of the face with TSWD, In: Tunnelling Journal, Feb/March 2013, S. 43-45.
- [18] GAERTNER, H; WITKA, T.: Reflexionsseismik, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 600-662.
- [19] GELBKE, C.: Bohrlochseismik, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 679-707.
- [20] GEHRING, M.; KASSEL, A.; LORENZ, K.: Vortriebsbegleitende Vorauserkundung: Mixschild mit Weitblick, In: Tunnel 3 (2010), S. 14-29.
- [21] GIESE, R., et al.: Seismische Tomographie-Messungen beim Tunnelbau unter Tage in den Schweizer Zentralalpen, In: Zweijahresbericht GeoForschungsZentrum Potsdam 2000/2001, GFZ Potsdam, Potsdam, 2002, S. 113-122.

- [22] HARDAGE, B.A.: Vertical Seismic Profiling, Part A: Principles, In: Helbig K. & Treitel S. (Hrsg.): Handbook of Geophysical Exploration, Section I: Seismic Exploration, Volume 14a, Elsevier, Amsterdam, 2000.
- [23] HEIM, A.: Einrichtungen zur Vorauserkundung und vorauseilenden Gebirgsbehandlung auf einer TBM, In: Geomechanik und Tunnelbau 5 (2012), S. 57-65.
- [24] Informationsbroschüre der Amberg Technologies AG: Tunnel Seismic Prediction TSP 303 Plus, See ahead – build safer, Regensburg, 2014.
- [25] Informationsbroschüre der Herrenknecht AG: Herrenknecht SSP: Unsichtbares sichtbar machen – Durch seismische Vorauserkundung.
- [26] Interne Unterlagen: Baugeologisch – geotechnischer Bericht_SBT2.1, November 2014.
- [27] KAUS, A.; BOENING, W.: BEAM - Ahead Monitoring for TBM-Drives, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 5, S. 442-449.
- [28] KREUTZER, I; et al.: The use of a Tunnel Boring Maschine (TBM) as a seismic source, EGU 2014, Vol. 16, Wien, 2014.
- [29] KREUTZER, I; et al.: TSWD – State of the art and current developments, Proceedings of SAGEEP 2014, Boston, 2014.
- [30] KNÖDEL, K.; et al.: Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997.
- [31] KOPP, T.: Beam G4 ground monitoring and real-time prediction while TBM-tunnelling for Jinping hydropower project east stage/ China, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2009, Budapest, 2009.
- [32] KRUMMEL, H.: Seismische Quellen, In: KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H.; LANGE, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 447-484.
- [33] LINDNER, H.; CASTEN, U.: Gravimetrie, In: KNÖDEL, K.; KRUMMEL, H.; LANGE, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten,

Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 37-64.

- [34] LEHMANN, B.; DOMBROWSKI, B.: Risikominimierung bei Tunneltrassen durch eine hochauflösende geophysikalische Erkundung, In: Tagungshandbuch des 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TAE Esslingen, 2006, S. 489-493.
- [35] LÜTH, S.; et al.: Seismische Vorauserkundung im Tunnelbau mit konvertierten Oberflächenwellen, In: Zweijahresbericht GeoForschungsZentrum Potsdam 2004/2005, GFZ Potsdam, Potsdam, 2006, S. 97-102.
- [36] LÜTH, S.; GIESE, R.; RECHLIN, A.: A seismic exploration system around and ahead of tunnel excavation – OnSITE, Proceedings of World Tunnel Congress, Vol. 1, India, 22-24 Sept. 2008, S. 119-125.
- [37] MARI, J.L.; et al.: Geophysics of reservoir and civil engineering, Éditions Technip, Paris, 1998.
- [38] MEIER, E.; et al.: Georadar-der zerstörungsfreie Blick in den Untergrund: Beispiele aus dem Naturschutzgebiet Zigermoos, Unterägeri/ZG und der Deponie Riet, Winterthur/ZH; Bulletin für angewandte Geologie, Vol. 7, Nr. 1, Brügi, 2002, S. 31-44.
- [39] MEISSNER, R; STEGENA L.: Praxis der seismischen Feldmessung und Auswertung: Studienheft zur Angewandten Geophysik 1, Gebrüder Bornträger, Berlin/ Stuttgart, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1977.
- [40] MILITZER, H.; et al.: Angewandte Geophysik im Ingenieur- und Bergbau, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 1978.
- [41] MILITZER, H.; WEBER, F.: Angewandte Geophysik, Band 3: Seismik, Springer Verlag, Wien/ New York, Akademie-Verlag, Berlin, 1987.
- [42] MISIEK, R.; LEHMANN, B.; BREITENBAVH; J.: Seismische Vorfelderkundung zur Optimierung der untertägigen Strecken- bzw. Tunnelauffahrung, In: Glückauf 144 (2008), Nr. 6, S. 280-284.
- [43] MOONEY, M.A; WALTER, B.; FRENZEL, C.: Real-Time Tunnel Boring Maschine Monitoring: A State of the Art Review, Proceedings of North American Tunneling, 2012.
- [44] MOONEY, M.A.; KARAOULIS, M.; REVIS, A.: Investigation of Geoelectric-While-

Tunneling Methods through Numerical Modeling, Proceedings of World Tunnel Congress, Geneva, 2013.

- [45] PARASNIS, D.S.: Principles of applied geophysics, 4. Auflage, Chapman & Hall, London/ New York, 1986.
- [46] POLETTO, F.; MIRANDA, F.: Seismic While Drilling, Fundamentals of Drill-Bit Seismic for Exploration, In: Helbig K. & Treitel S. (Hrsg.): Handbook of Geophysical Exploration Seismic Exploration, Vol. 35; Elsevier, Amsterdam et al., 2004.
- [47] PÖTTLER, R.; et al.: Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen, In: Felsbau 20 (2002), Nr. 3, S. 10-21.
- [48] RADIC, T.: Induzierte Polarisation In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 166-206.
- [49] RADINGER, A; et al.: Konsequente Vorauserkundung mittels Bohrungen und TSWD am Beispiel des Koralmtunnels, In: Geomechanik und Tunnelbau 7 (2014), S. 540-549.
- [50] RECTOR, J.W.; HARDAGE B.A.: Radiation pattern and seismic wave generated by a working roller-cone drill bit, In: Geophysics, Vol. 57, Nr. 10, 1992, S. 1319-1333.
- [51] REHBOCK-SANDER, M.; WIELAND, G; JESEL, T.: Vorauserkundungsmaßnahmen bei den TBM-Vortrieben der Südlose des Gotthard-Basistunnels-Erfahrungen und Folgerungen für andere Projekte, In: Geomechanik und Tunnelbau 7 (2014), S. 551-564.
- [52] REYNOLDS, J.M.: An Introduction to Applied and Environmental Geophysics, Wiley, Chichester et al., 2007.
- [53] RICHTER, T.: Geophysikalische Vorauserkundung von Störungszonen und Verkarstungen durch Einsatz der Bohrloch-Radar-Technologie, In: Geotechnik 31, Nr. 2, 2008, S. 150-154.
- [54] RICHTER, T.; PIPPIG, U.: Einsatz der Bohrloch-Radartechnologie zur Strukturvorfelderkundung, <http://www.boratec.net/27.pdf>, (10.02.2015).
- [55] SCHMITT, J.; GATTERMANN, J.; STAHLMANN, J.: Hohlraumerkundung im

Tunnelbau, Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft Nr. 44 (2004), S. 173-200.

[56] SHERIFF; R.E.: Geophysical Methods, Prentice Hall, New Jersey, 1989.

[57] URL: http://www.geodt.com/deu/d/seismische_Anisotropie, (05.02.2015).

[58] URL: http://www.qumon.de/pdf/BEAM1-5_Project-References.pdf, (13.03.2015).

[59] ZSCHERPE, G.; STEINBRECHER, D.: Bohrlochgeophysik, In: Knödel, K.; Krummel, H.; Lange, G. (Hrsg): Handbuch zur Erkundung des Untergrundes von Deponien und Altlasten, Band 3: Geophysik, 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg, 1997, S. 789-895.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schwingungsformen von P-Wellen (links) und S-Wellen (rechts) (aus [2])..	11
Abbildung 2: Darstellung der Teilchenbewegung einer Rayleigh-Welle (aus [56])	13
Abbildung 3: Teilchenbewegung Love-Welle (aus [56])	13
Abbildung 4: Darstellung von Wellenfronten zum Zeitpunkt t_1 und t_2 (aus [2])	14
Abbildung 5: Beugung an Schichtkante (aus [45])	14
Abbildung 6: Darstellung des Snelliusschen Gesetzes (aus [45])	15
Abbildung 7: Darstellung der 1. Fresnel-Zone (aus [52])	17
Abbildung 8: Reflexion seismischer Wellen; Strahlenverlauf (unten); Laufzeitkurve (oben) (nach [2])	19
Abbildung 9: Schematische Darstellung einer seismischen Spur (aus [52])	20
Abbildung 10: Darstellung elektrochemischer Prozesse bei der Elektrodenpolarisation (aus [52])	23
Abbildung 11: Darstellung elektrochemischer Prozesse bei der Membranpolarisation (aus [52])	23
Abbildung 12: Strom- und Spannungsverlauf in polarisiertem Untergrund bei der Frequenzbereichsmessung (aus [3])	24
Abbildung 13: Wellentypen bei Georadar-Messung (nach [4])	26
Abbildung 14: Messprinzip VSP (aus [46])	30
Abbildung 15: Verschiedene Messanordnungen des VSP [46]	31
Abbildung 16: Prinzip der Bohrlochradar-Reflexionsmessung inkl. Ergebnisdarstellung im Radargramm (aus [54])	33
Abbildung 17: Prinzip der Crosshole-Messung (aus [54])	33
Abbildung 18: Prinzip der tomographischen Messung (aus [53])	34
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Systems TSWD; Bohrkopf als seismische Quelle (aus [43])	37
Abbildung 20: Schematisches Messlayout TSWD (aus [29])	38
Abbildung 21: Exemplarisches Prognoseergebnis einer TSWD-Messung (aus [49])	39
Abbildung 22: Schematisches Messlayout einer TSP-Messung (aus [9])	42
Abbildung 23: Schematisches Messlayout einer TSP-Messung im Horizontal- und Querschnitt (aus [24])	43
Abbildung 24: Exemplarisches Prognoseergebnis einer TSP-Messung (aus [12])	44
Abbildung 25: Schematische Darstellung einer RSSR-Reflexion (aus [14])	46
Abbildung 26: Hartgesteins-TBM: Gripper mit integriertem Impakthammer (aus [14])	47

Abbildung 27: Schild-TBM: Einsatz eines Impakthammers (gelb markiert) mittels Anbaukonsole (aus [23]).....	47
Abbildung 28: Schematische Darstellung des Messlayouts TRUST (aus [13])	49
Abbildung 29: Exemplarisches Prognoseergebnis einer seismischen Vorauserkundung mit dem System TRUST (aus [13])	51
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips SSP (S=Sender; R1, R2 und R3=Empfänger) (aus [25]).....	52
Abbildung 31: Sender und Empfänger im Schneidrad integriert (aus [25])	53
Abbildung 32: Exemplarisches Prognoseergebnis einer SSP-Messung (aus [20])	54
Abbildung 33: Mögliche Messanordnungen bei der Bohrlochradarmessung; a) Reflexionsmessung, b) Crosshole-Messung, c) Tomographische Messung (aus [54]).....	56
Abbildung 34: Exemplarisches Prognoseergebnis einer Bohrlochradar-Reflexionsmessung a) Bearbeitetes Radargramm, b) Bearbeitetes Radargramm mit markierten Reflektoren, c) Analysiertes Kluftsystem mit Angaben zum Einfallswinkel der Einzelklüfte (aus [53])	57
Abbildung 35: Messprinzip BEAM (aus [27])	61
Abbildung 36: BEAM G4 Integral – Grippermaschine (aus [31]).....	62
Abbildung 37: BEAM G4 Scan – Schildmaschine (aus [31]).....	62
Abbildung 38: Exemplarisches Prognoseergebnis der BEAM-Messung (aus [27]).....	63
Abbildung 39: Übersichtslageplan Baulos SBT2.1 - Tunnel Fröschnitzgraben (aus [26]).	73

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wellengeschwindigkeiten und Dichten	12
Tabelle 2: Spezifischer Widerstand unterschiedlicher Materialien (nach [2] und [52])	21
Tabelle 3: Dielektrizitätszahlen unterschiedlicher Materialien (aus [52])	25
Tabelle 4: Nutzwertanalyse für geeignetes geophysikalisches Vorauserkundungssystem beim Baulos SBT2.1 – Tunnel Fröschnitzgraben	79

10 Abkürzungsverzeichnis

BEAM	Bore-Tunnelling Monitoring	Electrical	Ahead
GPR	Ground Penetration Radar		
IP	Induzierte Polarisation		
ISIS	Integrated Seismic Imaging System		
OB	Ortsbrust		
SBT	Semmering-Basistunnel		
SSP	Sonic Softground Probing		
SWD	Seismic While Drilling		
TBM	Tunnelbohrmaschine		
TRUST	True Reflection Technique	Underground	Seismic
TSP	Tunnel Seismic Prediction		
TSWD	Tunnel Seismic While Drilling		
VSP	Vertical Seismic Profiling		

Anhang 1: Gedächtnisprotokoll TSWD1

Interviewpartner: Dienstleister des AG und Anwender des Systems TSWD

04.03.2015, 09:45-10:45 Uhr

1. **Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?**
2. *Reflexionsseismik, TSWD (Tunnel Seismic While Drilling, Pöyry)*
3. **Welche Erkundungsziele hatte der Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode?**
Vorauserkundungsziele waren die Detektion von Störungszonen mit einer Mindestmächtigkeit von 10 m und das Erkennen von Bergwasser.
Das Erkundungsziel sollte in einer Entfernung von 30 bis 100 m vor der Ortsbrust erfasst werden. Wird eine Störung in geringerem Abstand als 10 m vor der Ortsbrust detektiert, so können keine technischen Maßnahmen mehr getroffen werden.
Das Messsystem wurde außerdem aus wissenschaftlichen Gründen auf der Baustelle implementiert.
4. **In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?**
Der Vortrieb erfolgte im tektonisch beanspruchten Kristallin (v.a. Gneis, Amphibolit und Marmor). Die Überlagerung variierte etwa zwischen 120 m und 1200 m.
5. **Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**
 - **Über welche Zeitdauer war die geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz?**
Das Erkundungssystem TSWD war während der gesamten Vortriebsdauer im Einsatz.
 - **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**
Es gab eine 5 km lange Teststrecke. Hier wurden die Ergebnisse der Drehschlagbohrungen mit den Ergebnissen der geophysikalischen Vorauserkundung verglichen und korreliert. Es wurde darauf geachtet, dass den Geophysikern erst nach Fertigstellung und Abgabe der seismischen Auswertung die Ergebnisse der Drehschlagbohrung zur Verfügung gestellt wurden um ein Abgleichen der Ergebnisse zu verhindern.
Da die Ergebnisse gut korrelierten und nach der Teststrecke zu erwarten war, dass bis zu einem Drittel der Drehschlagbohrungen eingespart werden kann, wurden die Messungen fortgesetzt.
 - **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**
Ja.
6. **Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**
Reflexionsseismik
Welche maximale Reichweite wird erzielt?
100-150 m
- **Welche Lagegenauigkeit wird erzielt?**
+/-10 m

7. Montage des Messsystems

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**
*Zwei Beschleunigungsaufnehmer werden für die Pilotsignalerfassung auf schmalen Platten am Lagergehäuse montiert. Der Platzbedarf ist sehr gering.
Im Nachläuferbereich wird ein Steuerkasten benötigt.*
- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrgeräte, Hebebühnen,... benötigt?**
Auf einem Bagger ist ein Hilti-Bohrgerät montiert, mit dem die 6 m tiefen Bohrungen für die Geophone hergestellt werden. Es wird keine zusätzliches Arbeitsgerät benötigt.
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Montage verbunden?**
1 Tag-1 Woche
- **Wie hoch ist die Verfügbarkeit des Systems? Wodurch wird sie limitiert?**
*Es gibt so gut wie keine Ausfälle und das System ist sehr robust. Es kann höchstens vorkommen, dass ein Bohrloch nicht standfest ist oder verklaust. Wenn ein Geophon nicht bündig mit dem Gebirge verbunden ist, wird das Signal abgeschwächt.
Läuft der Vortrieb mehr oder weniger parallel in beiden Tunnelröhren und besitzen diese Röhren einen geringen Abstand zueinander, so wird die Signalaufzeichnung zum Teil gestört.*

8. Durchführung der Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**
Die Messung erfolgt immer in der vorseilenden Röhre. Der Baubetrieb wird durch die Messung nicht gestört.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Messung verbunden?**
*1 Geophysiker im Dekadenbetrieb
1 Messtechniker im Wochenbetrieb*
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**
Die Messung läuft kontinuierlich.
- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**
Nein.
- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**
Nein.
- **Sind für die Messung zusätzliche bauliche Maßnahme wie z.B. Bohrungen notwendig? Falls ja, welchen Durchmesser haben die Bohrungen?**
Es werden 4 Bohrlöcher für die Geophone benötigt.

9. Auswertung der Messung

- **Wie erfolgt die Auswertung?**
- *Es werden seismische Wellen gestapelt.*
- **Welche Parameter liefert die Auswertung?**
- *Die Auswertung liefert Reflexionen aufgrund von Impedanzkontrasten.*
- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**
- *Für die Auswertung ist ein Geophysiker notwendig.*
- **Gibt es Grenzen bei der Auswertung?**
- *Der Seismik lässt Impedanzkontraste erkennen und liefert erste Indizien, ob mit einer Verschlechterung oder Verbesserung des Gebirges im Vortriebsbereich zu rechnen ist. Allerdings ist nicht erkennbar, ob der Reflektor von einer 30 cm oder eine 30 m mächtigen Störung verursacht wurde. Die Stärke der Amplitude liefert also keinen Hinweis auf die bautechnische Relevanz der Diskontinuität.*
- *Die Orientierung einer Störung ist kaum erkennbar und eine geologische Interpretation basierend auf den seismischen Daten alleine ist nicht möglich.*
- *Fließende Übergänge sind kaum zu erkennen und flach einfallende Störungen sind für die Vorauserkundung, sowohl mit Seismik, als auch mit Vorausb Bohrungen, problematisch.*
- *Bergwasserführende Bereiche werden nicht erkannt. Es können lediglich stark zerlegte Bereiche oder Klüfte mit möglichen Wasserzutritten in Verbindung gebracht werden.*
- *Ab einer Überlagerung von ca. 700 m wurde im gegenständlichen Projekt druckhaftes Gebirge angetroffen und es gab tiefreichende Überbeanspruchungen. Störungen, die bei geringer Überlagerung kein bautechnisches Problem dargestellt haben, erwiesen sich hier zum Teil als problematisch. Die seismische Erkundung wurde daher in diesem Bereich beinahe lückenlos mit Drehschlagbohrungen ergänzt. Im besten Fall konnten unter diesen Bedingungen die Bohrungen für ca. 10-30 m von 100 m entfallen.*
- **Welche Zeitdauer wird für die Auswertung in Anspruch genommen?**
- *1h-1½ Tag (Auswertung in axiale Richtung (parallel zur Tunnelachse))*
- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**
- *Ja.*
- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**
- *Die Vorauserkundung erfolgt stufenweise. Die Geophysik liefert erste Indizien dafür, ob mit einer Verbesserung oder Verschlechterung des Gebirges (Störungen) zu rechnen ist. Allerdings ist mit der seismischen Vorauserkundung alleine keine geologische Interpretation möglich. Erst durch eine Kombination der seismischen Ergebnisse mit Drehschlagbohrungen und Ergebnissen der Bohrdatenschreiber erhält man relativ gute Informationen zu den geologischen Verhältnissen im Vortriebsbereich.*
- *Die Aussagekraft gliedert sich ca. wie folgt: 30 % Geophysik, 70 % Vorausb Bohrungen.*

10. Akzeptanz auf der Baustelle im gegenständlichen Projekt (Implementierung)

- **Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker?**
- *Der Geophysiker präsentiert seine Ergebnisse in der sog. „Geotechnischen Viertelstunde“. Es wird daraufhin besprochen, ob ergänzende Vorausb Bohrungen notwendig sind oder nicht.*

Grundsätzlich war im gegenständlichen Projekt für die Geophysik Akzeptanz von allen Seiten da.

11. Wie zufrieden waren Sie mit dem Messsystem?

Die Handhabung war sehr einfach und das System sollte auf jeden Fall weiterentwickelt werden.

12. Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt? Ja, warum? Nein, warum?

Ja, mithilfe der geophysikalischen Vorauserkundung konnte bei geringer Überlagerung ca. ein Drittel der Drehschlagbohrungen eingespart werden. Bei schlechten geologisch / geotechnischen Verhältnisse und druckhaftem Gebirge wurde die seismische Erkundung meist mit Drehschlagbohrungen ergänzt. Man wollte somit sicher gehen, dass Störungen frühzeitig erkannt werden um entsprechende Maßnahme setzen zu können.

13. Würden Sie mit dem jetzigen Wissens- und Erfahrungsstand beim Projekt nochmals dieselbe geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen? Würden Sie eine andere geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen oder gänzlich darauf verzichten?

Grundsätzlich ist ein Geologe für jedes Hilfsmittel offen, daher sollten auch vortriebsbegleitende geophysikalische Untersuchungen im Vorauserkundungskonzept enthalten sein.

14. Welche Erkenntnisse könnten mit der gegenständlichen geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Gebirge des Semmering-Basistunnels gewonnen werden?

Der Vortrieb erfolgt im Wechselkristallin. Es wird hauptsächlich Albitgneis und Albitschiefer angetroffen. Charakteristisch ist das Auftreten von Serizit-Chlorit-Quarz-Schiefern bis –Phylliten, die infolge tektonischer Überprägung meist stark geschert und anisotrop vorliegen.

Die Firstüberlagerung variiert zwischen 200 und 800 m. Das Gebirge ist generell sehr heterogen und anisotrop und zeigt eine starke Wechselhaftigkeit. Ein Gebirgsartenwechsel ist durchschnittlich alle 10 bis 30 m zu erwarten, wobei keine klaren Grenzen zwischen den Gebirgsarten sondern fließende Übergänge erwartet werden. Die Störungen fallen normal bis schleifend zur Tunnelachse ein und der Einfallswinkel ist flach bis mittelsteil.

Die Geologie muss hier im Detail untersucht werden. Da aber die Überlagerungen nicht so hoch sind und auch keine hohen Wasserzutritte erwartet werden, kann das System TSWD auf jeden Fall funktionieren. Man muss sich allerdings über die Grenzen der Seismik im Klaren sein (schleifende Störungen, Abstand zwischen den Röhren,...).

Sonstiges:

Die Erkundungsmethoden werden immer in der vorauseilenden Röhre eingesetzt. Möglicherweise muss also das Messsystem von der einen Röhre in die andere umgebaut werden und in der Ausschreibung sollte hierfür eine Pauschale vorsehen werden.

Anhang 2: Gedächtnisprotokoll TSWD2

Interviewpartner: Dienstleister des AG und Anwender des Systems TSWD

04.03.215, 11:00-11:30 Uhr

- 1. Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?**

Reflexionsseismik, TSWD (Tunnel Seismic While Drilling, Pöyry)

- 2. In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?**

Der Vortrieb erfolgte in tektonisch beanspruchtem Kristallin (v.a. Gneis, Amphibolit und Marmor) mit einer Überlagerung von 120 m bis 1200 m.

- 3. Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**

Es gab eine 5 km lange Teststrecke. Die geophysikalische Erkundung wurde hier lückenlos mit Drehschlagbohrungen ergänzt. Die Strecke diente zur Bewertung der Funktionalität des geophysikalischen Erkundungssystems und außerdem zur Kalibrierung. Es hat sich gezeigt, dass bis zu einem Drittel der Drehschlagbohrungen eingespart werden können. Somit wurde entschieden das System weiterhin einzusetzen.

- **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**

Ja.

- 4. Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**

Reflexionsseismik

Welche maximale Reichweite wird erzielt?

100-150 m

- 5. Montage des Messsystems**

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**

Die Beschleunigungsaufnehmer für die Pilotsignalerfassung sind ca. 3 m hinter dem Bohrkopf montiert. Für die Positionierung der Geophone gibt es 2 Messquerschnitte (jeweils auf ca. 08:00 und 16:00 Uhr).

- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrgeräte, Hebebühnen,... benötigt?**

Es sind Bohrlöcher für die Geophone herzustellen. Es wird kein zusätzliches Bohrgerät benötigt.

6. Durchführung der Messung

- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**
Die Messung läuft kontinuierlich.
Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?
Nein.
- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**
Nein.
- **Sind für die Messung zusätzliche bauliche Maßnahme wie z.B. Bohrungen notwendig? Falls ja, welchen Durchmesser haben die Bohrungen?**
Es sind 4 Bohrlöcher für die Geophone abzuteufen

7. Auswertung der Messung

- **Gibt es Grenzen bei der Auswertung?**
 - *Der Geophysiker kann eine Veränderung in den geologisch / geotechnischen Gebirgsverhältnissen vorhersagen, aber nicht inwiefern diese Veränderung von bautechnischer Relevanz ist.*
 - *Störungen, die seitlich der Achse abgebildet werden, müssen bis zum Schnittpunkt mit der Tunnelachse extrapoliert werden. Diese Extrapolation ist mit einer gewissen Prognoseunsicherheit verbunden.*
 - *Störungen mit schleifender Orientierung zur Tunnelachse sind schwierig zu erfassen und werden zum Teil erst sehr spät detektiert.*
- **Welche Zeitdauer wird für die Auswertung in Anspruch genommen?**
1h-½ Tag
- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**
Ja.
- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**
Der Geophysiker vergleicht im Nachgang die seismische Auswertung mit den Maschinendaten und analysiert, ob, bzw. warum er eine Störung nicht erkannt hat.
- **Erfolgt bereits bei der Interpretation eine Zusammenarbeit mit den Geologen und Geotechnikern?**
Der Geophysiker hat in erster Linie Kontakt zum Geologen. Wenn der Geophysiker aufgrund der seismischen Auswertung eine Störung im Vortriebsbereich vermutet, so wird eine Drehschlagbohrung angeordnet. Der Geologe erstellt seine geologische Prognose basierend auf den Ergebnissen der Drehschlagbohrung und der Seismik. Die geologische Prognose dient als Grundlage für die geotechnische Prognose. Auf Basis der seismischen Auswertung alleine werden keine geotechnischen Entscheidungen getroffen.

Sonstiges:

Zeichnet sich in den seismischen Reflexionen eine Störung im Vortriebsbereich ab, so ist die wichtigste Frage, ob die Maschine ohne Probleme durchkommt oder ob technische Maßnahmen, wie z.B. eine Profilaufweitung, getroffen werden müssen. Natürlich muss eine Störungszone frühzeitig erkannt werden um solche Maßnahmen einleiten zu können. Eine Profilaufweitung beispielsweise dauert ca. eine Woche und für die Montage der zusätzlichen äußeren Meißelspur muss Personal in den ungesicherten Bereich vor den Bohrkopf geschickt

werden. Ist das Gebirge aber nicht mehr standfest, so sind die Vorkehrungen für entsprechende Sondermaßnahmen aus sicherheitstechnischen Gründen nicht mehr möglich.

Anhang 3: Gedächtnisprotokoll TSWD3

Interviewpartner: Dienstleister des AG und Anbieter des Systems TSWD

04.03.215, 14:00-15:00 Uhr

- 1. Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?**

Reflexionsseismik, TSWD (Tunnel Seismic While Drilling, Pöyry)

- 2. Welche Erkundungsziele hatte der Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode?**

Erkundungsziel war das Erkennen von Impedanzkontrasten, die Hinweise auf Störungszonen liefern.

- 3. In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?**

Der Vortrieb erfolgte im tektonisch beanspruchten Kristallin (v.a. Gneis, Amphibolit und Marmor). Die Überlagerung betrug zwischen 120 m und 1200 m.

- 4. Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**

Es gab eine 5 km lange Teststrecke um herauszufinden, ob durch die Ergebnisse der vortriebsbegleitenden geophysikalischen Erkundung Drehschlagbohrungen entfallen können. Eine Teststrecke ist nicht zwingend notwendig, da das System nicht kalibriert werden muss.

- **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**

Ja.

- 5. Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**

Reflexionsseismik

Welche maximale Reichweite wird erzielt?

100 m

- **Welche Lagegenauigkeit wird erzielt?**

+5 m

- 6. Montage des Messsystems**

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**

Zwei Beschleunigungsaufnehmer werden für die Pilotsignalerfassung am Lagergehäuse montiert. Der Platzbedarf ist sehr gering.

Zusätzlich wird ein Steuerkasten mit der Größe von ca. 1,0 m x 1,5 m x 0,5 m am Nachläufer benötigt. Darin befindet sich unter anderem eine Atomuhr für die Korrelation der verschiedenen

Laufzeiten. Um sicherzustellen, dass die Uhr bei einem Stromausfall nicht ausfällt, ist sie mit einer Batterie verbunden.

Des Weiteren werden Kabel verlegt, um die Aufnehmer miteinander zu verbinden.

- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrergeräte, Hebebühnen,... benötigt?**

Im gegenständlichen Projekt waren die Bohrungen für die Geophone ca. 6 m tief und hatten einen Durchmesser von 67 mm. Die Perlkies-Hinterfüllung der durchbohrten Tübbinge wurde vermörtelt um zu verhindern, dass das Bohrloch verklaust.

Der Abstand zwischen den beiden Messquerschnitten betrug 200 m. Aufgrund einer Signalverschlechterung wurde der Abstand auf 100 m verkürzt. Die Signalverschlechterung resultierte aus den schlechten Gebirgsverhältnissen und dem geringen Abstand von ca. 50-60 m zwischen den Tunnelröhren, in denen der Vortrieb auf paralleler Höhe verlief.

- **Mit welcher Vorlaufzeit von Beauftragung bis Messbeginn ist bei der Implementierung der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode auf der Baustelle zu rechnen?**

<3 Monate

Die Vorlaufzeit ist abhängig davon, ob das Personal und die Gerätschaften verfügbar sind und wo sich das Projektgebiet befindet.

- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Montage verbunden?**

1 Tag-1 Woche

- **Wie hoch ist die Verfügbarkeit des Systems? Wodurch wird sie limitiert?**

Es gibt so gut wie keine Ausfälle und das System ist sehr robust. Beim gegenständlichen Projekt wurden nur 3 Geophone verloren, wobei hier die Standfestigkeit des Gebirges von maßgebender Bedeutung ist.

7. Durchführung der Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**

Die Messung erfolgt immer in der vorauseilenden Bohrung. Es kann daher vorkommen, dass das Messsystem von der einen in die andere Röhre umgebaut werden muss.

Die Messung stört den Baubetrieb so gut wie gar nicht.

- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Messung verbunden?**

1 Geophysiker im Dekadenbetrieb

1 Messtechniker im Wochenbetrieb oder gegebenenfalls im Dekadenbetrieb

- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**

Die Messungen laufen kontinuierlich.

- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**

Nein.

- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**

Nein.

- **Sind die der Messung zusätzliche bauliche Maßnahme wie z.B. Bohrungen notwendig? Falls ja, welchen Durchmesser haben die Bohrungen?**

Es werden 4 Bohrlöcher für die Geophone benötigt.

8. Auswertung der Messung

- **Wie erfolgt die Auswertung?**

Bei der Auswertung wird pro Meter eine seismische Spur gestapelt. Die direkte Welle liefert die Wellengeschwindigkeit zwischen der Quelle und dem Empfänger. Die Wellengeschwindigkeit im Gebirge vor der Ortsbrust ist unbekannt.

Für die Auswertung ist die Kenntnis der Wellengeschwindigkeit im Gebirge nicht notwendig.

- **Welche Parameter liefert die Auswertung?**

Reflexionen aufgrund von Impedanzkontrasten

- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**

Die Auswertung muss von einem Geophysiker durchgeführt werden.

- **Gibt es Grenzen bei der Auswertung?**

Der Geophysiker erkennt Impedanzkontraste, aber nicht um welches Material es sich handelt. Theoretisch kann die Orientierung des Reflektors im Bezug zur Tunnelachse festgestellt werden, allerdings reicht die Zeit auf der Baustelle für diese Auswertung nicht aus. Mit einem zusätzlichen Geophon in der Kalotte (12:00 Uhr) oder im Sohlbereich (18:00 Uhr) wäre es einfacher die Orientierung des Reflektors festzustellen.

Die Wellengeschwindigkeit im Gebirge vor der Ortsbrust ist nicht bekannt, sie würde aber Informationen zum Material liefern. Es gibt bereits die Idee sogenannte „Up-hole-Messungen“ in den Vorausbohrungen durchzuführen. Mithilfe dieser Messungen könnte die Wellengeschwindigkeit zwischen dem Bohrloch tiefsten und dem Bohrlochende festgestellt werden.

Bei der geologischen Prognose ist zu bedenken, dass die geologischen Verhältnisse in der einen Röhre nicht immer auf die zweite Röhre zutreffen müssen.

- **Ist die Auswertung automatisiert?**

Nein.

- **Welche Zeitdauer wird für die Auswertung in Anspruch genommen?**

1h-½ Tag (Auswertung in axiale Richtung)

- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**

Ja.

- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**

Im Bedarfsfall erfolgt eine Besprechung mit dem Geologen.

9. Wie zufrieden waren Sie mit dem Messsystem?

Sehr zufrieden.

10. Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt? Ja, warum? Nein, warum?

Das System funktioniert und es werden alle Impedanzkontraste erkannt. Auch fließende Übergänge spiegeln sich in den seismischen Signalen wider. Aufgrund der kontinuierlichen Aufzeichnungen wird die Prognoseunsicherheit reduziert.

11. Würden Sie mit dem jetzigen Wissens- und Erfahrungsstand beim Projekt nochmals dieselbe geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen? Würden Sie eine andere geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen oder gänzlich darauf verzichten?

Ja, da das System TSWD tatsächlich funktioniert.

Anhang 4: Gedächtnisprotokoll TSP1

Interviewpartner: AN und Anwender des Systems TSP

12.03.215, 17:00-18:00 Uhr

1. **Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?**

Reflexionsseismik, TSP (Tunnel Seismic Prediction; Amberg Technologies)

2. **Welche Erkundungsziele hatte der Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode?**

Es wurden zum Teil sehr harte Gneise und Granite mit einer Druckfestigkeit >300 MPa angetroffen. Daher war ein wichtiges Erkundungsziel den Wechsel in der Gebirgsfestigkeit bzw. in der Härte des Gesteins festzustellen um den Verschleiß der Maschinenteile abschätzen zu können. Natürlich wollte man mithilfe der Seismik auch Störungen im Voraus prognostizieren. Ein weiteres Erkundungsziel war die frühzeitige Detektion von Bergwasser im Vortriebsbereich, da stark gespanntes Wasser mit Drücken von bis zu 100 bar prognostiziert wurde.

3. **In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?**

Der Vortrieb erfolgte in sehr kompakten Gneisen und Graniten mit einer Überlagerung von bis zu 2000 m. Während des Vortriebs wurde kein Bergwasser angetroffen.

4. **Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Über welche Zeitdauer war die geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz?**
Das Erkundungssystem war über eine Zeitdauer von ca. 2 Jahren im Einsatz.
- **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**
Es ist mir nicht bekannt, ob es eine Teststrecke gab.
- **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**
Ja.

5. **Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**
Reflexionsseismik
- **Welche Reichweite wird erzielt?**
100-150 m
Es wurden ca. alle 100 m seismische Messungen durchgeführt.

6. **Montage des Messsystems**

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**
Die Messung erfolgt unabhängig von der Tunnelbohrmaschine.

Die gesamten Bohrlöcher wurden im gegenständlichen Projekt von der Vortriebsmannschaft mithilfe der Ankerbohrlafette hergestellt. Das Personal, das für die Durchführung der seismischen Messung verantwortlich ist, positioniert die Empfangsantennen und ladet die Schussbohrlöcher mit Sprengstoff. Es ist anzumerken, dass die Ausrüstung relativ schwer und sperrig ist.

- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrgeräte, Hebebühnen,... benötigt?**
Es sind Schussbohrlöcher und Bohrlöcher für die Geophone herzustellen. Ein zusätzliches Gerät wird nicht benötigt.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Montage verbunden?**
2-3 Personen
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Montage verbunden?**
Für die Herstellung der Bohrlöcher werden je Bohrloch ca. 2-3 min benötigt. Die Montage der Geophone und das Laden der Bohrlöcher dauern ca. 15 min.
- **Wie hoch ist die Verfügbarkeit des Systems? Wodurch wird sie limitiert?**
*Wenn das Bohrloch nicht sauber gebohrt oder standfest ist, so kann es Probleme bei der Positionierung der Empfangsantennen geben. Ist die Antenne nicht bündig mit dem Gebirge verbunden, so spiegelt sich dies in der Signalaufzeichnung wider.
Das Messsystem ist störanfällig und nur bedingt für den Einsatz im Tunnel geeignet. Das Schraubgewinde der Empfangsantennen ist relativ anfällig und geht regelmäßig kaputt.*

7. Durchführung der Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**
Durch die Sprengung werden seismische Wellen generiert, die an Grenzflächen reflektiert und an den Geophonen aufgezeichnet werden.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Messung verbunden?**
2-3 Personen
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**
<2 h
- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**
Ja.
- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**
Nein, ansonsten wäre die Messung mit einem sehr hohen Kostenaufwand verbunden.
- **Sind für die Messung zusätzliche bauliche Maßnahme wie z.B. Bohrungen notwendig? Falls ja, welchen Durchmesser haben die Bohrungen?**
Es sind Bohrlöcher mit einem Durchmesser $\leq 3''$ herzustellen.

8. Auswertung der Messung

- **Wie erfolgt die Auswertung?**
Die Auswertung wurde im gegenständlichen Projekt von Ingenieuren im technischen Büro durchgeführt. Die Auswertung ist automationsgestützt und man folgt sozusagen einem „Kochrezept“. Es werden Parameter vorgeschlagen zwischen denen man wählen kann und die das Endergebnis beeinflussen.
- **Welche Parameter liefert die Auswertung?**

Wellengeschwindigkeiten und weitere geomechanisch relevante Parameter

- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**

Die Auswertung kann von Geophysikern oder auch von Ingenieuren durchgeführt werden. Amberg Technologies bietet 2- bis 3-tägige Schulungen zu ihrem Messsystem an. Allerdings fehlen einem Ingenieur die Erfahrung und das geschulte Auge eines Geophysikers.

- **Ist die Auswertung automatisiert?**

Die Auswertung ist halbautomatisiert. Die Grundparameter, die zu Beginn eingestellt werden, bleiben immer gleich. Bei der Auswertung wird einem Leitfaden gefolgt und es sind verschiedene Werte zu wählen und Einstellungen vorzunehmen.

- **Welche Zeitdauer wird für die Auswertung in Anspruch genommen?**

<1h

- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**

Ja

- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**

Das Abteufen einer Drehschlagbohrung dauert im Regelfall länger als die Wartungsschicht. Im gegenständlichen Projekt wurden daher Drehschlagbohrungen nur dann durchgeführt, wenn bergstechnisch relevante Störungszonen im Vorfeld der Ortsbrust prognostiziert waren. Die Vorauserkundung erfolgte also größtenteils nur mit Seismik.

Man hat sich nie 100 %ig auf die Seismik verlassen und es wurden aufgrund der seismischen Prognose keine Sonder- oder Zusatzmaßnahmen getroffen.

9. Akzeptanz auf der Baustelle im gegenständlichen Projekt (Implementierung)

- **Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker?**

Im gegenständlichen Projekt führten Ingenieure der Baufirma die Messung und Auswertung durch und übermittelten die Ergebnisse dem Bauherrn, der sie wiederum an den Geologen weiterleitete. Es waren keine Geophysiker vor Ort und es gab keine direkte Zusammenarbeit zwischen den Geologen und den Ingenieuren, die für die Messung und Auswertung der Seismik zuständig waren.

10. Wie zufrieden waren Sie mit dem Messsystem?

Die Erfahrungen im gegenständlichen Projekt waren eher schlecht. Möglicherweise funktioniert aber eine vortriebsbegleitende seismische Vorauserkundung in anderen Geologien besser.

Grundsätzlich bin ich der Meinung, dass das Verfahren funktionieren kann, wenn die Messung und Auswertung vorsichtig und vernünftig durchgeführt werden. Es ist auch anzunehmen, dass das Messsystem TSP inzwischen verbessert wurde.

11. Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt? Ja, warum? Nein, warum?

Die Zielsetzungen wurden nicht erreicht. Man hatte kein großes Vertrauen in die Messungen und die Baufirma hat die seismische Vorauserkundung eher aus finanziellen Gründen zur Deckung der Overhead-Kosten durchgeführt.

12. Würden Sie mit dem jetzigen Wissens- und Erfahrungsstand beim Projekt nochmals dieselbe geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen? Würden Sie eine andere geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen oder gänzlich darauf verzichten?

Der Vorteil der seismischen Vorauserkundung ist, dass der Bereich hinter der OB großflächig und nicht nur punktuell erkundet wird. Drehschlagbohrungen sind aber in der Regel zu bevorzugen, da die Erkundungsergebnisse genauer und besser sind. Wird Wasser erwartet, so sollten die Bohrungen im Schutz eines Preventers abgeteuft werden.

13. Mit welchem finanziellen Aufwand ist ca. die gegenständliche geophysikalische Vorauserkundungsmethode verbunden (€/Laufmeter)?

- *Geräte-Anschaffungskosten*
- *Es müssen immer wieder neue Antennen gekauft werden, da sie kaputt gehen.*
- *Personalkosten*
- *Kosten, falls der Vortrieb durch die Messung verhindert wird*

Sonstiges:

Der zeitliche Aufwand für die Messung an sich ist nicht sehr hoch, allerdings kann die Ein- und Ausfahrt in den Tunnel je nach Tunnellänge und Vortriebsmeter sehr lange dauern. Die Durchführung der seismischen Messungen wurde daher im gegenständlichen Projekt nach einer gewissen Zeitdauer den Schichtingenieuren übertragen. Die Messungen wurden von ihnen aber zum Teil schlampig durchgeführt. Dies spiegelte sich in den Ergebnissen der Seismik wider.

Anhang 5: Gedächtnisprotokoll TSP2

Interviewpartner: Dienstleister des AG und Anwender des Systems TSP

23.03.2015, 16:00-17:00 Uhr

- 1. Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?**

Reflexionsseismik, TSP (Tunnel Seismic Prediction; Amberg Technologies)

- 2. Welche Erkundungsziele hatte der Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode?**

Erkundungsziel war das Erkennen bautechnisch relevanter Störungen und Bergwasser im Vortriebsbereich. Die vortriebsbegleitende geophysikalische Vorauserkundungsmethode war bei zwei unterschiedlichen Bauabschnitten im Einsatz.

Im 1. Bauabschnitt waren keine Störungen von hoher bautechnischer Relevanz prognostiziert. Aufgrund der geringen Überlagerung und guten Prognosesicherheit waren zusätzlich zur geophysikalischen Vorauserkundung keine systematischen Erkundungsbohrungen angedacht. Nur bei einem Hinweis der Seismik auf Störungszonen sollte eine Detailerkundung in Form von Schlagbohrungen erfolgen.

Im 2. Bauabschnitt wurde eine komplexere Geologie prognostiziert und daher war eine kontinuierliche, lückenlose Vorauserkundung mittels Seismik und Drehschlagbohrungen geplant.

- 3. In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?**

Im 1. Bauabschnitt erfolgte der Vortrieb in Gneisen mit subhorizontaler Schieferung und subvertikal verlaufenden Klüften bei einer Überlagerung von ca. 800 m bis 2200 m.

Im 2. Bauabschnitt wurde im Süden ebenfalls Gneis angetroffen. Im Norden erwartete man eine mächtige Störungszone aus zuckerförmigem Dolomit und daran angrenzend hochmetamorphe Gesteine des Zentralmassivs. Die Gneise waren im Süden sehr flach gelagert und gingen in nördliche Richtung in eine steilere Lagerung über. Das Streichen der Gneise des Zentralmassivs war ca. West-Ost orientiert. Die Überlagerung war bis zu 2400 m hoch.

- 4. Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode**

- **Über welche Zeitdauer war die geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz?**

Im 1. Bauabschnitt wurden in Summe 12 seismische Messungen in zwei unabhängigen Messabschnitten innerhalb von 18 Monaten durchgeführt. Im 2. Bauabschnitt wurden 10 seismische Messungen durchgeführt.

- **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**

Im 1. Bauabschnitt gab es eine Teststrecke, die zum Ziel hatte das Messsystem zu kalibrieren. Möglicherweise gab es auch im 2. Bauabschnitt eine solche Teststrecke, dies ist mir allerdings nicht bekannt.

- **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**

Nein. Im 1. Bauabschnitt wurden nur wenige Störungzonen angetroffen, die großteils schieferungsparallel in subhorizontale Richtung einfielen. Da es keinen starken Wechsel in der Steifigkeit des Gebirges gab, war der Impedanzkontrast für ein aussagekräftiges Ergebnis der seismischen Messung zu gering. Aufgrund großer Probleme mit Profilüberbrüchen wurden die seismischen Messungen durch Vorausböhrungen und Radialbohrungen ersetzt. Möglicherweise gab es auch politisch motivierte Gründe für die vorzeitige Beendigung der reflexionsseismischen Messungen.

Auch im 2. Bauabschnitt wurden die seismischen Messungen frühzeitig beendet.

5. Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**

Seismik

- **Welche Reichweite wird erzielt?**

100-150 m

6. Montage des Messsystems

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**

Die Messung erfolgt unabhängig von der Tunnelbohrmaschine. Im gegenständigen Projekt wurden die Bohrlöcher von der Vortriebsmannschaft mit einem Handbohrgerät hergestellt. Die Geophysiker, die die seismischen Messungen durchführt haben, sind mit der Messausrüstung in den Tunnel eingefahren und haben diese entsprechend positioniert. Die Geräte sind relativ handlich.

7. Durchführung der Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**

Die Messung wurde von Geophysikern des Unternehmens Amberg Technologies durchgeführt.

- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**

Die Montage und die Messung dauerten ca. 1-2 h. Hinzu kommt der Zeitaufwand für die Ein- und Ausfahrt des Personals in den Tunnel.

- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**

Ja.

- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**

Nein.

8. Auswertung der Messung

- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**

Die Auswertung wurde im gegenständlichen Projekt von Geophysikern des Unternehmens Amberg Technologies durchgeführt.

- **Erfolgt bereits bei der Interpretation eine Zusammenarbeit mit den Geologen und Geotechnikern?**

Im gegenständlichen Projekt erhielten die Geologen die Ergebnisse der Seismik von Amberg Technologies. Die geologische Interpretation basierte auf den Ergebnissen der Drehschlagbohrungen in Kombination mit den Ergebnissen der Seismik.

- **Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt? Ja, warum? Nein, warum?**

Aufgrund physikalischer Einschränkungen wurden mit dem damaligen 2-D-Messsystem die Zielsetzungen nicht erreicht. Wird eine Störung bzw. eine Diskontinuität im Vorfeld der Ortsbrust prognostiziert, so muss festgestellt werden, ob sie von bautechnischer Relevanz ist oder nicht. Diese Aussage konnte im gegenständlichen Projekt mit der Seismik nicht erfolgen. Das Erkennen von Wasser ist mit seismischen Erkundungsmethoden möglich, aber sehr schwierig.

- 9. Würden Sie mit dem jetzigen Wissens- und Erfahrungsstand beim Projekt nochmals dieselbe geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen? Würden Sie eine andere geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen oder gänzlich darauf verzichten?**

Mit der neuen Generation des TSP lassen sich scheinbar räumlichen Strukturen besser abbilden und es sollen auch schleifende Störungen erkennbar sein.

- 10. Welche Erkenntnisse könnten mit der gegenständlichen geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Gebirge des Semmering-Basistunnels gewonnen werden?**

Der Vortrieb erfolgt im Wechselkristallin. Es wird hauptsächlich Albitgneis und Albitschiefer angetroffen. Charakteristisch ist das Auftreten von Serizit-Chlorit-Quarz-Schiefern bis –Phylliten, die infolge tektonischer Überprägung meist stark geschert und anisotrop vorliegen.

Die Firstüberlagerung variiert zwischen 200 und 800 m. Das Gebirge ist generell sehr heterogen und anisotrop und zeigt eine starke Wechselhaftigkeit. Ein Gebirgsartenwechsel ist durchschnittlich alle 10 bis 30 m zu erwarten, wobei keine klaren Grenzen zwischen den Gebirgsarten sondern fließende Übergänge erwartet werden. Die Störungen fallen normal bis schleifend zur Tunnelachse ein und der Einfallswinkel ist flach bis mittelsteil.

Es ist abzuklären, ob die Wechselhaftigkeit des Gebirges mit einem ausreichend großen Kontraste in der Steifigkeit verbunden ist. Ist dies der Fall, so kann der Einsatz einer seismischen Vorauserkundung durchaus sinnvoll sein.

Anhang 6: Gedächtnisprotokoll BEAM / Seismik

Interviewpartner: AG und Anwender des Systems BEAM und Sprengseismik

05.03.215, 12:15-14:30 Uhr

1. Mit welcher geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau haben Sie bereits Erfahrungen gesammelt?

- *Sprengseismische Vorauserkundung (ARGE zwischen DMT und Pöyry)*
- *Geoelektrische Vorauserkundung, BEAM (Bore-Tunnelling Electrical Monitoring; Geo Exploration Technologies)*
- *Bohrlochgeophysik (Akustik-Logs, Georadar, Kamera-Befahrung)*

2. Welche Erkundungsziele hatte der Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode?

Es gab keine klar definierten Untersuchungsziele, aber man erhoffte sich durch den Einsatz der geophysikalischen Vorauserkundungsmethoden einen zusätzlichen Kenntnisgewinn über die geologisch / geotechnischen Verhältnisse im Vortriebsbereich. Zudem gab es die Erwartungen, dass mithilfe der Geophysik große Störungszonen erkannt werden.

3. In welcher Geologie bzw. unter welchen geotechnischen Bedingungen (Überlagerung, Störungszonen, wasserführende Bereiche, homogenes / heterogenes Gebirge, (Karst)hohlräume, ...) wurde die geophysikalische Vorauserkundungsmethode angewendet?

Der Vortrieb erfolgte im Granit, der von einigen Störungszonen durchörtert war. Die Überlagerung betrug ca. bis zu 2000 m.

4. Zeitdauer des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode

- **Auf welcher Tunnellänge war die geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz?**

Die geophysikalische Erkundungsmethoden waren entlang einer 10,5 km langen Tunnelstrecke im Einsatz.

- **Gab es eine Teststrecke und anhand welcher Daten wurden die geophysikalischen Ergebnisse evaluiert?**

Es gab eine Teststrecke von ca. 1 km. Allerdings wurden anhand dieser Teststrecke nicht der Nutzen und die Funktionalität der geophysikalischen Erkundungssysteme in Frage gestellt oder die Ergebnisse evaluiert. Es war nicht angedacht, dass sich die Vorauserkundungssysteme entlang der Teststrecke bewähren müssen, sondern die Teststrecke stellte lediglich eine Lernstrecke für die Erkundungssysteme dar. Entlang dieser konnten die Messanordnungen verändert oder sonstige Maßnahmen getroffen werden um die Ergebnisse zu verbessern.

- **War die geophysikalische Vorauserkundungsmethode während der ursprünglich in der Ausschreibung vorgesehenen Zeitdauer im Einsatz?**

Ja.

5. Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode GEOELEKTRIK

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**
Geoelektrik
Welche maximale Reichweite wird erzielt?
Die Erkundungsreichweite entspricht dem 3-fachen des Tunneldurchmessers.
- **Gibt es Publikationen über Referenzprojekte?**
Abgesehen vom internen Bericht und der Informationsbroschüre sind mir keine Publikationen bekannt.

6. Montage des Messsystems

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**
Die Montage auf der TBM ist relativ einfach und es besteht kaum Platzbedarf.
- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrgeräte, Hebebühnen,... benötigt?**
Nein.
- **Wie hoch ist die Verfügbarkeit des Systems? Wodurch wird sie limitiert?**
Es gab immer wieder Ausfälle des Messsystems aufgrund verschiedener Systemfehler und defekter Kabelverbindungen.

7. Durchführung der Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**
Die Messung ist vollautomatisiert.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Messung verbunden?**
Es ist kein Personal notwendig.
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**
Die Messung läuft kontinuierlich.
- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**
Nein.
- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**
Nein.
- **Sind für die Messung zusätzliche bauliche Maßnahme wie z.B. Bohrungen notwendig? Falls ja, welchen Durchmesser haben die Bohrungen?**
Nein.

8. Auswertung der Messung

- **Wie erfolgt die Auswertung?**
Die Auswertung ist vollautomatisiert.
- **Welche Parameter liefert die Auswertung?**
PFE-Wert
Widerstand
Kombination PFE/R
Indikator für Grad der Zerlegung

- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**
Die Auswertung erfolgt automatisch, es wird kein Personal benötigt.
- **Ist die Auswertung automatisiert?**
Ja.
- **Welche Zeitdauer wird für die Auswertung in Anspruch genommen?**
Die Auswertung erfolgt automatisch.
- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**
Ja.
- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**
Die Ergebnisse wurden nicht für eine weiterführende Interpretation verwendet, da sie meist falsch waren und dem Messsystem kein großes Vertrauen entgegengebracht wurde.
- **Erfolgt bereits bei der Interpretation eine Zusammenarbeit mit den Geologen und Geotechnikern?**
Der Geologe hat sich die Ergebnisse am Monitor angesehen und konnte sie für seine geologische Interpretation heranziehen.

9. Akzeptanz auf der Baustelle im gegenständlichen Projekt (Implementierung)

- **Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker?**
Die geoelektrische Vorauserkundung ist sozusagen „mitgelaufen“, allerdings hatte man kein großes Vertrauen in die Ergebnisse. Es war kein Geophysiker vor Ort und die Auswertung erfolgte automatisch. Der Geologe konnte die Ergebnisse gegebenenfalls für seine geologische Interpretation verwendet.

10. Wie zufrieden waren Sie mit dem Messsystem?

Nicht zufrieden.

Die prognostizierte Geologie hat nur selten der tatsächlich angetroffenen Geologie entsprochen. Es wurde allerdings im Nachhinein nicht analysiert, wie hoch die Trefferquote mit der geophysikalischen Vorauserkundung tatsächlich war.

11. Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt?

Ja, warum? Nein, warum?

Nein.

Die Erwartung, dass die geoelektrische Vorauserkundung nützliche Informationen zu den Gebirgsverhältnissen liefern würde, wurde nicht erfüllt.

12. Generelles zum Funktionsprinzip der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode SEISMIK

- **Auf welchem Grundprinzip basiert die geophysikalische Vorauserkundungsmethode?**
Reflexionsseismik
- Welche maximale Reichweite wird erzielt?**
100-150 m

13. Montage des seismischen Messsystems

- **Wird das Messsystem auf der Tunnelbohrmaschine montiert? Falls ja, wie genau erfolgt die Montage, was wird montiert, wo wird das Messsystem positioniert und welcher Platzbedarf besteht? Falls nein, wo und wie wird das Messsystem montiert?**
Es ist keine Montage auf der Tunnelbohrmaschine erforderlich. Die Sprengbohrlöcher und die Bohrlöcher für die Positionierung der Geophone werden im Nachläuferbereich hergestellt.
- **Sind bauliche Maßnahmen im Tunnel erforderlich (z.B. Bohrlöcher (mit Schutzverrohrung), ...)? Werden zusätzliche Bohrgeräte, Hebebühnen,... benötigt?**
Im gegenständlichen Projekt wurden für jede Messung 4 Messquerschnitte mit jeweils 3 Geophonen (positioniert auf 8:00, 12:00 und 16:00 Uhr) hergestellt. Der Abstand zwischen den Messquerschnitten betrug ca. 50 m. Des Weiteren mussten Sprengbohrlöcher hergestellt werden. Für diese Arbeiten wurde kein zusätzliches Bohrgerät benötigt.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Montage verbunden?**
Das Baustellenpersonal ist für die Montage verantwortlich.
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Montage verbunden?**
2h-1/2Tag
- **Wie hoch ist die Verfügbarkeit des Systems? Wodurch wird sie limitiert?**
Für eine gute Signalregistrierung müssen die Geophone bündig mit dem Gebirge verbunden sein oder das Bohrloch muss wassergefüllt sein. Ist dies nicht der Fall, so ist das Signal schlecht oder es fällt gänzlich aus.

14. Durchführung der seismischen Messung

- **Wie erfolgt die Messung?**
Durch die Sprengung werden seismische Wellen generiert, die an Impedanzkontrasten reflektiert und an den Geophonen registriert werden.
- **Mit welchem personellen Aufwand ist die Messung verbunden?**
Das Baustellenpersonal führt die Messungen durch.
- **Mit welchem zeitlichen Aufwand ist die Messung verbunden?**
2h-1/2 Tag (Montage + Messung)
- **Erfolgt die Messung in der Wartungsschicht?**
Ja
- **Ist die Messung mit einem Stillstand oder einer Vortriebsunterbrechung verbunden? Falls ja, wie lange?**
Nein, die Messung behindert den Vortrieb nicht.

15. Auswertung der seismischen Messung

- **Wie erfolgt die Auswertung?**
Im gegenständlichen Projekt wurden die Daten nicht vor Ort, sondern in den Büros der DMT und Pöyry ausgewertet.
- **Welche Parameter liefert die Auswertung?**
*Zuverlässigkeit der Reflexion
Reflexionsbilder
Interpretation der Reflexionen mit Ampelsystem (rot-grün-gelb)*
- **Wird für die Auswertung ein Geophysiker zwingend benötigt oder könnte diese auch durch einen Geologen und / oder Geotechniker erfolgen? Welche Aufgabe hat er und welche Erfahrung ist erforderlich?**

Die Auswertung muss ein Geophysiker durchführen.

- **Erfolgt die Auswertung auf der Baustelle?**

Nein.

- **Ist für die Interpretation eine weitere Informationsquelle erforderlich (Maschinendaten, Erkundungsbohrungen, ...)?**

Die Geophysiker hatten im gegenständlichen Projekt höchstwahrscheinlich die Ergebnisse der Drehschlagbohrungen zur Verfügung.

- **Erfolgt bereits bei der Interpretation eine Zusammenarbeit mit den Geologen und Geotechnikern?**

Der Geologe auf der Baustelle konnte die seismische Auswertung für die geologische Prognose verwenden.

16. Akzeptanz auf der Baustelle im gegenständlichen Projekt (Implementierung)

- **Wie gestaltet sich die Zusammenarbeit zwischen Geophysiker, Geologen und Geotechniker?**

Die seismische Vorauserkundung ist sozusagen „mitgelaufen“, allerdings hatte man kein Vertrauen in die Ergebnisse. Wurde die Geologie mittels Seismik falsch prognostiziert, so diskutierten der Geologe und der Geophysiker darüber, wie das System bzw. die Messkonfiguration verbessert werden könne. Ansonsten gab es keine direkte Zusammenarbeit, da die Geophysiker auch nur im Bedarfsfall vor Ort waren.

17. Wie zufrieden waren Sie mit dem seismischen Messsystem?

Nicht zufrieden.

Sowohl orthogonal, als auch schleifend zur Tunnelachse orientierte Störungen wurden mit der seismische Vorauserkundungsmethode großteils nicht erkannt. Zwischen dem kompakten Granit und den Störungszonen lagen starke Impedanzkontraste vor und dennoch lieferte die Seismik keine zufriedenstellenden Ergebnisse.

18. Wurde die Zielsetzung des Einsatzes der geophysikalischen Vorauserkundungsmethode erfüllt? Ja, warum? Nein, warum?

Nein.

Die Erwartung, dass die seismische Vorauserkundung einen zusätzlichen Kenntnisgewinn zu den geologischen Verhältnissen liefern würde, wurde nicht erfüllt.

19. Würden Sie mit dem jetzigen Wissens- und Erfahrungsstand beim Projekt nochmals dieselbe geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen? Würden Sie eine andere geophysikalische Vorauserkundungsmethode wählen oder gänzlich darauf verzichten?

Grundsätzlich kann auf geophysikalische vortriebsbegleitende Messungen verzichtet werden, da eine Vorauserkundung mit überlappenden Drehschlagbohrungen aussagekräftige Ergebnisse liefert. Wenn eine Drehschlagbohrung auf Wasser oder Störungszonen im Vortriebsbereich hinweist, so sollten zusätzliche Drehschlagbohrungen angeordnet werden. Falls eine Detailerkundung erforderlich ist, so kann eine Kernbohrung abgeteuft werden.

Ergänzend zu den Vorauserkundungen können bohrlochgeophysikalische Untersuchungen vorgenommen werden, wie dies auch im gegenständlichen Projekt der Fall war (Akustik-Log, Bohrlochradar, Kamera-Befahrung). Mit einem Akustik-Log können im bohrlochumgebenden Gebirge Klüfte und deren Orientierung identifiziert werden. Außerdem kann durch eine Korrelation mit einem Akustik-Log der

gezogene Kern orientiert werden. Kamera-Befahrungen funktionieren am besten in gekernten Bohrung, da hier die Ausbruchswand glatt ist. Sie dienen unter anderem dazu einen Abschnitt im Bohrloch auszuwählen, an dem weitere Untersuchungen vorgenommen werden sollen (z.B. Dilatometerversuche). Es besteht allerdings immer die Gefahr, dass die Kamera im Bohrloch verloren geht.

Da der Kostenfaktor vortriebsbegleitender geophysikalischer Erkundungsmethoden sehr gering ist, spielt es keine große Rolle, ob sie zum Einsatz kommen oder nicht.

Möglicherweise haben sich die Systeme inzwischen verbessert, daher werden vermutlich bei kommenden Projekten oder Bauabschnitten wieder ein seismisches und ein geoelektrisches Vorauserkundungssystem ausgeschrieben. Allerdings wird man höchstwahrscheinlich eine Teststrecke vorsehen um die Funktionalität und die Messergebnisse evaluieren zu können. Sollten die Messungen keinen Mehrwert bringen, so sollen sie frühzeitig abgebrochen werden.

20. Welche Erkenntnisse könnten mit der gegenständlichen geophysikalischen Vorauserkundungsmethode im Gebirge des Semmering-Basistunnels gewonnen werden?

Der Vortrieb erfolgt im Wechselkristallin. Es wird hauptsächlich Albitgneis und Albitschiefer angetroffen. Charakteristisch ist das Auftreten von Serizit-Chlorit-Quarz-Schiefern bis –Phylliten, die infolge tektonischer Überprägung meist stark geschert und anisotrop vorliegen.

Die Firstüberlagerung variiert zwischen 200 und 800 m. Das Gebirge ist generell sehr heterogen und anisotrop und zeigt eine starke Wechselhaftigkeit. Ein Gebirgsartenwechsel ist durchschnittlich alle 10 bis 30 m zu erwarten, wobei keine klaren Grenzen zwischen den Gebirgsarten sondern fließende Übergänge erwartet werden. Die Störungen fallen normal bis schleifend zur Tunnelachse ein und der Einfallswinkel ist flach bis mittelsteil.

Meine bisherigen Erfahrungen mit vortriebsbegleitender geophysikalischer Vorauserkundung waren negativ, die Ergebnisse waren meist falsch und große Störungszonen wurden nicht erkannt. Möglicherweise haben sich die Systeme aber inzwischen verbessert bzw. es gibt auch neue Entwicklungen wie z.B. TSWD.

21. Mit welchem finanziellen Aufwand ist ca. die gegenständliche geophysikalische Vorauserkundungsmethode verbunden (€/Laufmeter)?

Die Geräteanschaffung für die geoelektrische Vorauserkundung beläuft sich auf ca. 20.000 € bis 30.000 €.

Auch die seismische Vorauserkundung ist nur mit einem geringen Kostenaufwand verbunden.

Anhang 7: Besprechungsprotokoll

Ort: Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Leoben
Datum: 26.01.2015
Beginn - Ende: 10:00 - 11:45 Uhr

Teilnehmer (ohne Titel): Hr. Galler Robert
Fr. Kreuzer Ingrid
Fr. Lechner Gerhild

Thema: Diplomarbeit "Geophysikalische Vorauserkundung auf der Tunnelbohr - maschine" von Frau Lechner Gerhild

Ziel der Besprechung war ein Informationsaustausch über geophysikalische Vorauserkundungsmethoden im Tunnelbau, da Frau Lechner eine Diplomarbeit zu diesem Thema verfassen wird.

Im Zuge der Diplomarbeit sollen die verschiedenen geophysikalischen Vorauserkundungssysteme, die derzeit Anwendung finden bzw. an welchen momentan geforscht wird, vorgestellt und diskutiert werden. Außerdem sollen die Grundtheorien, auf denen die Methoden basieren, erläutert werden.

Der Ausblick der Diplomarbeit soll unter anderem enthalten, wie die bestmögliche geophysikalische Vorauserkundung aussehen kann, welche Systeme hierfür kombiniert werden sollten und welche Faktoren künftig in Ausschreibungen berücksichtigt werden sollen (z.B. Mitausschreiben von Verrohrung, Position für Stehzeiten,...).

Weiteres Ziel ist es herauszufinden, ob Signale von Diskenkraftmessungen und Ortsbrustmonitoring in Zukunft dazu dienen können, die Ergebnisse der geophysikalischen Vorauserkundung zu verbessern.

Es wurde besprochen, dass derzeit Forschungsarbeiten und Neuentwicklungen zum Thema geophysikalische Vorauserkundung an der TU Freiberg (Prof. Buske), an der Colorado School of Mines und bei NFM in Lyon (EU-Projekt "Nettun") betrieben wird. Nach Absprache mit der ÖBB sollten daher genauere Informationen hierzu eingeholt bzw. Kontakt zu den Institutionen hergestellt werden.

Großteils sind die Vorauserkundungssysteme im Tunnelbau eine Weiterentwicklung von Technologien, die in der Erdölindustrie entwickelt wurden (VSP-Vertical Seismic Profiling, SWD-Seismic While Drilling, MWD-Measurement While Drilling). Daher sollte Frau Lechner beim Unternehmen "Schlumberger" Informationen zum aktuellen Stand der Technik in der Erdölindustrie anfragen. Zudem wurde eine mögliche Kontaktaufnahme zu Herrn Christian Koller besprochen. Dieser hält eine Vorlesungen zu Bohrlochgeophysik an der Uni Leoben.

Frau Kreuzer hat ihre Bereitschaft für weiteren Informationsaustausch und mögliche Rückfragen kundgetan.

Nächste Besprechungstermine sind:

06.02., 10:00 Uhr, Graz: mit Prof. Galler, DI Wagner, DI Schachinger, Lechner

26.02., 08:00 Uhr, Leoben: mit Dr. Lehmann, Prof. Scholger, Prof. Galler, DI Kreuzer, Lechner

zusammengestellt von

Gerhild Lechner

Wien, 27.01.2015

Anhang 8: Besprechungsprotokoll

Ort: ÖBB Infrastruktur
Graz
Datum: 06.02.2015
Beginn - Ende: 10:30 - 11:45 Uhr

Teilnehmer (ohne Titel): Hr. Galler Robert
Fr. Lechner Gerhild
Hr. Schachinger Tobias
Hr. Wagner Oliver
Fr. Wolf Petra

Thema: Diplomarbeit “Geophysikalische Vorauserkundung auf der Tunnelbohr - maschine” von Frau Lechner Gerhild

Ziel der Besprechung war eine klare Zielsetzung der Diplomarbeit von Fr. Lechner sowie die Abstimmung der Vorgehensweise bei der Erstellung der Arbeit.

Die Diplomarbeit dient als Grundlage für die Ausschreibung der geophysikalischen Vorauserkundung auf der Tunnelbohrmaschine, die am Semmering-Basistunnel SBT2.1 zum Einsatz kommen wird. Aus der Arbeit soll hervorgehen, welche Anforderungen an ein Erkundungssystem zu stellen sind und welche Bewertungskriterien bei der Auswahl eines Systems sinnvoll sind.

Im Zuge von Interviews mit Produkthanbietern, Geotechnikern und dokumentierenden Geologen soll Fr. Lechner herausfinden, wie sich die kommerziellen Erkundungssysteme bei bisherigen Projekten bewährt haben. Die Personen sollen über ihre Erfahrungen mit geophysikalischen Vorauserkundungsmethoden im maschinellen und konventionellen Tunnelbau (Wasserproblematik) befragt werden. Zudem soll Fr. Lechner eruiieren, ob es Verbesserungsvorschläge oder neue Ideen für eine erfolgreiche Anwendung geophysikalischer Technologien gibt. Es ist dabei auf die am Semmering prognostizierte Geologie hinzuweisen, da die Qualität der Ergebnisse nicht zuletzt von der angetroffenen Geologie abhängt.

Großteils sind die Vorauserkundungssysteme im Tunnelbau eine Weiterentwicklung von Technologien, die in der Erdölindustrie entwickelt wurden. Daher wird Frau Lechner Informationen zum aktuellen Stand der Technik in der Erdölindustrie einholen.

Nach Auswertung der Interviews sollen die theoretischen Grundlagen zu den geophysikalischen Erkundungsmethoden, deren Anwendung sich im Tunnelbau als erfolgreich herauskristallisiert hat, beschrieben werden. Weiters werden sämtliche Systeme, die derzeit am europäischen Markt erhältlich sind, vorgestellt und diskutiert. Aus der Arbeit soll schlussendlich hervorgehen, welche Systeme sich grundsätzlich bewährt haben und welches am besten für die Geologie am Semmering geeignete ist. Zudem wird Fr. Lechner Entscheidungskriterien zur Wahl des geeignetsten Systems definiert.

Weiteres Ziel der Diplomarbeit ist es zu ermitteln, ob Signale von Diskenkraftmessungen und Ortsbrustmonitoring in Zukunft zur Verbesserung der Ergebnisse von geophysikalischen Vorauserkundungen beitragen können.

Fr. Lechner soll frühestmöglich mit folgenden Personen/Firmen/Institutionen in Kontakt treten und Termine vereinbaren:

- Hr. Ewald Brückl (TU Wien), Fr. Kreutzer, Hr. Galler
- Hr. Scholger (Montanuni), Hr. Lehmann (DMT), Hr. Galler
- Hr. Florian Bleibinhaus (Montanuni), Hr. Galler
- Hr. Buske (TU Freiberg), Hr. Galler
- Hr. Helmut Wannemacher (Marti AG)
- Hr. Stefan Skuk (BBT SE)

- Pyöry (Hr. Radinger)
- Amberg Technologies
- BLM Gesellschaft für Bohrlochmessungen mbH
- Hr. Frank Eibl (TIWAG)
- Geotechniker und dokumentierende Geologen, die an den Projekten in Reiseck, Hieflau und KAT2 beteiligt waren/sind (System von Pyöry)

Das System BEAM war beim Brenner Basistunnel im Einsatz. Fr. Lechner wird recherchieren, bei welchen österreichischen Projekten die Systeme der Firmen Amberg und Herrenknecht verwendet wurden und mit entsprechenden Personen in Kontakt treten. Zudem soll sie in Erfahrung bringen, ob es an der TU München Geophysiker gibt, die auf dem Thema bewandt sind.

Das Unternehmen NFM Technologies entwickelt derzeit ein neues Vorauserkundungssystem. Falls möglich ist die Teilnahme an einem Demonstation-Event geplant.

Hr. Galler wird zu folgenden Personen Kontakt aufnehmen:

- Hr. Stefan Buske (System ISIS, eventuell um Publikationen bitten)
- Hr. Gerhard Thonhauser, Hr. Herbert Hofstätter (Kontaktherstellung zu Schlumberger)
- Hr. Ladislaus Rybach (ehemals ETH Zürich)

Nächster Besprechungstermin:

26.02., 08:00 Uhr, Leoben: mit Dr. Lehmann (DMT), Prof. Scholger, Prof. Galler, DI Kreutzer, Lechner

zusammengestellt von

Gerhild Lechner

Wien, 09.02.2015

Anhang 9: Besprechungsprotokoll

Ort: TU Wien
Gusshausstr. 27-29, 1040 Wien
Datum: 19.02.2015
Beginn - Ende: 14:00 - 16:30 Uhr

Teilnehmer (ohne Titel): Hr. Brückl Ewald
Hr. Galler Robert
Fr. Kreutzer Ingrid
Fr. Lechner Gerhild

Thema: Denkbare Kombination von Diskenkraftmessung und Ortsbrustscanning mit geophysikalischen Vorauserkundungsmethoden

Zentrales Diskussionsthema war zu klären, ob Daten von Diskenkraftmessungen und Ortsbrustmonitoring in Zukunft zur Verbesserung der Ergebnisse seismischer Vorauserkundungsmethoden beitragen können.

Bei der seismischen Vorauserkundungsmethode TSWD wird das Pilotsignal (bzw. Sourcesignal) mit einem Beschleunigungsaufnehmer, der sich ca. 3 m hinter dem Bohrkopf am nicht-rotierenden Bauteil des Hauptlagers befindet, gemessen. Die optimale Position des Beschleunigungsaufnehmers ist dort, wo die Vibration schnell abklingt. Das wurde von Fr. Kreutzer im Zuge von Schlagversuchen ermittelt. Die Samplingrate beträgt 1000 Samples/Sekunde. Daher werden Signale bis 500 Hz korrekt aufgezeichnet. Es wird davon ausgegangen, dass höher frequente Signale von Eigenvibrationen der Tunnelbohrmaschine selbst stammen. Die maximale Frequenz, die bei den Geophonen ankommt, liegt bei ca. 250 Hz.

Hr. Brückl und Fr. Kreutzer gehen davon aus, dass die Diskenkraft-Messergebnisse mit großer Wahrscheinlichkeit zur Verbesserung der seismischen Messung beitragen. Bei der Diskenkraftmessung befindet sich der Sensor unmittelbar am Herd der seismischen Quelle und somit könnte das Pilotsignal exakter bestimmt werden. Bei der Diskenkraftmessung werden die Signale in Real-Time mit einer Frequenz von 100 Hz aufgezeichnet und die Ergebnisse werden in einem Zeit-Kraft-Diagramm dargestellt. Bisherige Messungen haben gezeigt, dass die mittleren Disken wesentlich höher beansprucht werden als die inneren und äußeren.

Hr. Entacher hat im Jänner 2012 je einen Tag Diskenkraftmessungen auf der Baustelle KAT2 durchgeführt. Fr. Lechner wird abklären, ob die Daten mit genauer Zeitaufzeichnung vorhanden sind und Hrn. Entacher um die Bereitstellung der Messergebnisse bitten. Fr. Kreutzer und Hr. Brückl werden in weiterer Folge untersuchen, ob sich die Signale der Diskenkraftmessung im Pilotsignal widerspiegeln. Es wurde angemerkt, dass für eine entsprechende Korrelation der Messdaten möglicherweise eine Frequenzerhöhung der Diskenkraftmessung nötig ist.

Sollte sich zeigen, dass die Diskenkraftmessung tatsächlich zur Verbesserung der seismischen Vorauserkundung dienen kann, wird geplant einen Forschungsantrag in Kooperation zwischen Montanuni Leoben und TU Wien einzureichen.

Durch OB-Monitoring ist laut Hrn. Brückl kein Verbesserungspotential hinsichtlich der Auswertung der seismischen Erkundungsergebnisse zu erwarten. Die Abbildung der Ortsbrust dient aber zum Verständnis der Schneidvorgänge und in weiterer Folge zum Verständnis der Diskenkraft-Messergebnisse.

Bei der Besprechung hat Hr. Brückl angesprochen, dass die Qualifikation des Geophysikers eine große Rolle für die Ergebnisse der geophysikalischen Messung spielt und die Auswertung bzw. vor allem die Interpretation zum Teil subjektiv ist. Der Kenntnisgewinn aus geophysikalischen Erkundungsmethoden ist also nicht nur abhängig vom Messsystem und der angetroffenen Geologie, sondern auch von der menschlichen Komponente. Voraussetzung für eine gute Vorauserkundung ist ein funktionierendes Messsystem in Kombination mit einem erfahrenen Geophysiker, der es versteht die Daten gut aufzubereiten und ein sinnvolles Processing durchführt.

Hinsichtlich der Diplomarbeit von Fr. Lechner hat Hr. Brückl davon abgeraten subjektive Meinungen und Erfahrungen mit geophysikalischer Vorauserkundung in die Diplomarbeit aufzunehmen. In der Arbeit sollten nur Informationen, die in Papers, geologischen Abschlussberichten und dgl. zu finden sind, erwähnt werden. Hr. Brückl empfiehlt eine Tabelle mit Bewertungskriterien zu erstellen (z.B. Nachvollziehbarkeit des geophysikalischen Grundprinzips, Verträglichkeit mit Baustelle, Stillstand,...).

zusammengestellt von

Gerhild Lechner

Wien, 24.02.2015

Anhang 10: Besprechungsprotokoll

Ort: Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Montanuniversität Leoben
Datum: 26.02.2015
Beginn - Ende: 08:00 - 09:00 Uhr

Teilnehmer (ohne Titel): Hr. Galler Robert
Fr. Kreuzer Ingrid
Fr. Lechner Gerhild
Hr. Lehmann Bodo
Hr. Scholger Robert

Thema: Geophysikalische Vorauserkundung auf der Tunnelbohrmaschine

Ziel der Besprechung war ein Informationsaustausch über geophysikalische Vorauserkundungsmethoden im Tunnelbau, da Fr. Lechner eine Diplomarbeit zu diesem Thema verfasst.

Die Geophysik stellt ein Hilfsmittel für die Vorauserkundung im Tunnelbau dar. Hr. Lehmann erwähnt, dass nur in Kombination mit zusätzlichen geophysikalischen Untersuchungen oder anderen Erkundungsmethoden, wie z.B. Vorausbohrungen, Aussagen zu den geologisch/geotechnischen Verhältnissen im Vortriebsbereich möglich sind. Das Untersuchungsziel muss im Vorhinein klar definiert werden, um ein geeignetes Erkundungskonzept wählen zu können. Da sich während des Vortriebs möglicherweise die Geologie ändert, sollte im Idealfall die geophysikalische Erkundungsmethode an die jeweiligen geologischen Verhältnisse angepasst werden bzw. eine anderes Untersuchungssystem gewählt werden. Beispielsweise ist eine Vorauserkundung mit Seismik, Geoelektrik oder Georadar nicht bei jeder Geologie geeignet.

Im europäischen Raum stellt die Geophysik kein normatives Tool dar, sondern es wird lösungsorientiert an Problemstellungen herangegangen. Es wäre hinsichtlich einer zielführenden Vorauserkundung wünschenswert, dass bei Tunnelprojekten nicht ein bestimmtes System oder Arbeitsgerät ausgeschrieben, sondern eine geowissenschaftliche Arbeitsgruppe zusammengestellt wird. Diese soll das Projekt während des Vortriebs betreuen und vor Ort das Vorauserkundungskonzept an die gegebenen geologischen und strukturellen Verhältnisse anpassen. Es sollte von den Auftraggebern angedacht werden, eine funktionale Ausschreibung für die vortriebsbegleitende Vorauserkundung zu erstellen oder ein Leistungsverzeichnis zusammenzustellen, das sämtliche Erkundungsmethoden, wie z.B. Geoelektrik, Seismik, Bohrlochgeophysik,..., abdeckt. In der Ausschreibung müssten die geforderten Erkundungsziele definiert werden und die geowissenschaftliche Arbeitsgruppe entscheidet, wie diese Erkundungsziele erreicht werden. Um die Zuschlagsentscheidung nicht nur vom Preis abhängig zu machen, müssen für eine Vergleichbarkeit der Angebote Entscheidungskriterien (z.B. eine Referenzliste) eingeführt werden.

Gemäß dem Bundesvergabegesetz erhält in Österreich momentan der Billigstbieter den Auftrag. Im internationalen Raum gibt es oft andere Entscheidungskriterien und der Preis hat nur eine untergeordnete Rolle für die Vergabe.

Hr. Lehmann merkt an, dass es manchmal so erscheint, dass die Auftragsvergabe für die geophysikalische Vorauserkundung nicht nur von der angebotenen Leistung und dem Preis abhängt. Andere Faktoren, wie z.B. in welcher Bietergemeinschaft angeboten wird und welches geologische Schlüsselpersonal vom AG gewünscht wird, sind entscheidend.

Im Zuge der Besprechung werden Systeme erwähnt, bei denen die Auswertung automatisch mit einer mitgelieferten Blackbox erfolgt (z.B. TSP). Die Messung und Auswertung werden hier nicht individuell an die geologischen Verhältnisse angepasst und das Ergebnis der Messung ist möglicherweise nicht so gut, als wenn ein Geophysiker/Geologe/Geotechniker die Auswertung/Interpretation durchführt und begleitet. Es stellt sich die Frage, warum sich solche Systeme trotzdem verkaufen lassen. Hier merkt Hr. Lehmann an, dass ein Bauherr in der Regel das Baugrundrisiko trägt. Sollten während des Vortriebs geologisch/geotechnische Komplikationen auftreten, kann sich der Bauherr rechtfertigen und

vorweisen, dass er bzw. die bauausführende Firma eine geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Einsatz hatte.

Hr. Lehmann bezweifelt, dass das geophysikalische Erkundungssystem von Herrenknecht im Vergleich zu aufwändigeren Messmethoden zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Es gibt nur einen Sender und 2 Empfänger und daher ist die Datenmenge sehr gering. Das Unternehmen erwartet möglicherweise durch die Implementierung eines geophysikalischen Erkundungssystems auf der Tunnelbohrmaschine einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Maschinenhersteller.

Es wird von Hrn. Galler die Frage gestellt, ob Daten von Diskenkraftmessungen zur Verbesserung der Ergebnisse seismischer Vorauserkundungsmethoden beitragen können. Hr. Lehmann meint, dass die Diskenkraftmessung die prognostizierte Geologie verifizieren kann. Allerdings bezweifelt er, dass bei aktiven seismischen Erkundungsmethoden das Ergebnis durch eine Koppelung mit Diskenkraftmessungen verbessert werden kann. Möglicherweise kann die Diskenkraftmessung zur besseren Erkennung des Pilotsignals beim System TSWD der Firma Pöyry beitragen.

Grundsätzlich ist Hr. Lehmann nicht vom System TSWD überzeugt, da die Quellanregung der seismischen Wellen kontinuierlich durch den Bohrkopf erfolgt und daher die Identifizierung von geologisch bedingten Reflexionssignalen schwierig ist.

zusammengestellt von

Gerhild Lechner

Wien, 03.03.2015

Anhang 11: Besprechungsprotokoll

Ort: Lehrstuhl für Subsurface Engineering
Montanuniversität Leoben

Datum: 23.03.2015

Beginn - Ende: 10:15 – 11:30 Uhr

Teilnehmer (ohne Titel): Hr. Bleibinhaus Florian
Hr. Galler Robert
Fr. Lechner Gerhild

Thema: Geophysikalische Vorauserkundung auf der Tunnelbohrmaschine

Ziel der Besprechung war ein Informationsaustausch über geophysikalische Vorauserkundungsmethoden im Tunnelbau, da Fr. Lechner eine Masterarbeit zu diesem Thema verfasst.

Laut Hr. Bleibinhaus ist die Seismik die wichtigste geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau, auch wenn keines der geophysikalischen Verfahren als etabliert angesehen werden kann. Es gibt verschiedene seismische Erkundungssysteme, die sich unter anderem in der Messanordnung und in der Art der Anregung unterscheiden. Beim Erkundungssystem Tunnel Seismic While Drilling – TSWD – erfolgt die Anregung der seismischen Wellen über das Schneidrad. Die Aufzeichnung des Quellsignals ist hier aufgrund der Eigenvibration der Tunnelbohrmaschine mit einer gewissen Problematik verbunden und es ist nicht klar, an welcher Position das Quellsignal am besten registriert werden soll. Zurzeit wird das Erregersignal mittels Beschleunigungsaufnehmer möglichst nah am Schneidrad aufgezeichnet und näherungsweise wie eine Punktquelle behandelt. Zudem wird bei der Messung nur ein geringer Frequenzbereich abgedeckt.

Alternativ kann eine seismische Anregung aktiv z.B. mit einem Rüttler oder einer Sprengung erfolgen.

Eine Diskenkraftmessung liefert vielleicht einen gewissen Mehrwert für TSWD-Verfahren, wenn damit die Aufzeichnungen des Quellsignals beim System TSWD verbessert werden.

Neben der Seismik besteht vielleicht die Möglichkeit mithilfe eines Georadars das Vorfeld der Ortsbrust zu erkunden. Mit einem Georadar könnte je nach Leitfähigkeit bei Anordnung der Antennen an der Ortsbrust eine Eindringtiefe von bis zu 30 m erzielt werden. Grundsätzlich wird aus sicherheitstechnischen Gründen vermieden, dass das Baustellenpersonal den ungesicherten Bereich vor dem Schneidrad betritt. Daher müsste untersucht werden, ob die Positionierung der Antennen auch durch die Mannlöcher möglich ist. Ein Problem wären sicherlich die Reflexionen von der Tunnelbohrmaschine, die man in den Griff bekommen müsste.

Hr. Bleibinhaus ist der Meinung, dass es bislang keine ausgereifte geophysikalische Vorauserkundungsmethode im Tunnelbau gibt und das hier definitiv weiterer Forschungsbedarf besteht. Testkonfigurationen in Testtunnels könnten die Entwicklung der geophysikalischen Messsysteme im Tunnelbau voranbringen.

Bezüglich der Masterarbeit von Fr. Lechner erklärt sich Hr. Bleibinhaus bereit die Arbeit nach Fertigstellung korrekturlesen.

zusammengestellt von

Gerhild Lechner

Wien, 24.03.2015

Anhang 12: Übersicht TSWD

LEISTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbarkeit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG			GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reichweite	Lagegenauigkeit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenzprojekte
TSWD	ANBIETER • Dienstleister • Lieferant • Geophysiker	• Reflexionsseismik • Grundprinzip nachvollziehbar	• Anwendung nur im Festgestein • 1 Räumliche Detektion mächtiger Störungs zonen ("ca. 10m) mit einem Streich- bzw. Einfallswinkel >30° zur Tunnelachse • 2 Klassifizierung der Störungs zonen bzgl. Vortriebsrelevanz unter Einbeziehung der Ergebnisse von Drehschlag- und Kernbohrungen • 3 Potential zum Einsparen von Drehschlagbohrungen • 4 Kontinuierliche Messung → geringere Prognoseunsicherheit bei Lagebestimmung des Reflektors • 5 Fließende Übergänge der Gebirgsarten werden erkannt	• 1 Anwendung nur in Verbindung mit einer TBM • 2 sehr flach liegende und schiefend zur Tunnelachse streichende Strukturen werden nicht erkannt • 3 Nur eingeschränkt Aussagen zu Bergwässer verhältnissen möglich • 4 Mächtigkeit und geotechnische Relevanz der Diskontinuität mit Seismik nicht erkennbar • 5 Fließende Übergänge der Gebirgsarten werden erkannt • 6 Aufgrund kontinuierlicher Messung → Großes Datenvolumen	• 1 <150m • 2 ca. 5m	• 1 1 Messtechniker (Wochen- od. Dekadenbetrieb)	• 1 einmalig 4-5 Tage	• 1 Umbau des MQ in Wartungsschicht	• 1 Signalgeber: Schneidräder am Bohrkopf • 2 Beschleunigungsaufnehmer für Plotsignalaufzeichnung möglichst nah am Bohrkopf • 3 2 gegenüberliegende Geophone pro MQ (08:00 und 16:00 Uhr) • 4 es gibt mind. 2 MQ: • 5 1 MQ: 100-400m hinter Bohrkopf • 6 Abstand zw. MQ: 100m-200m	• 1 5m-10m tiefe Bohrlöcher für Geophone • 2 4-6 Dreikomponentengeophone • 3 4 Atomuhr od. GPS-Signal mit Batterie • 5 Steuerkasten • 6 ca. 400kBit/s Breitbandverbindung	• 1 1 Messtechniker für Verkabelung und Positionierung der Geophone (je nach Erfordernis im Wochen- od. Dekadenbetrieb)	• 1 kontinuierliche Messung		• 1 Gestapelte seismische Spuren bzw. Wellenbilder • 2 Klassifikation des Gebirges bzgl. Vortriebsrelevanz mit Ampelsystem	• 1 nur Processing automationsgestützt	• 1 1 Geophysiker (Dekadenbetrieb)	• 1 1/2 Tag für Auswertung der axialen Komponente	k.A.	• bisher 5 Projekte in Ö • 1 Heflau • 2 Reifack • 3 Bärenwerk • 4 Koralm tunnel	• Anbieter und TU Wien • ca. 8 Publikationen • 3 Persönliche Gespräche • 4 Anwender • 1 Publikationen • 3 Persönliche Gespräche • 3 sonstige Publikationen	
	ANWENDER • Geotechniker • Geologen • Auftraggeber		• 1 Detektion von Diskontinuitäten, die möglichst normal zur Tunnelachse verlaufen und subvertikal einfallen • 2 keine Information zur bautechnischen Relevanz der Störung • 3 Fließende Übergänge der Gebirgsarten sind problematisch → keine deutlichen Impedanzkontraste • 4 Liefert keine Info zu Bergwässer verhältnissen • 5 bei geringem Rohrenabstand u. parallelem Vortrieb → Störsignale • 6 wenn Geophon nicht bündig mit Gebirge → Signal abgeschwächt • 7 bei hoher Überlagerung kaum Einsparung von Drehschlagbohrungen	• 1 Orientierung der Störung kann detektiert werden, wird aber für tägliche Prognose selten gemacht • 2 keine Information zur bautechnischen Relevanz der Störung • 3 Fließende Übergänge der Gebirgsarten sind problematisch → keine deutlichen Impedanzkontraste • 4 Liefert keine Info zu Bergwässer verhältnissen • 5 bei geringem Rohrenabstand u. parallelem Vortrieb → Störsignale • 6 wenn Geophon nicht bündig mit Gebirge → Signal abgeschwächt • 7 bei hoher Überlagerung kaum Einsparung von Drehschlagbohrungen	• 1 ca. 10m								X	• 1 Darstellung der Ergebnisse sollte verbessert werden	k.A.						

Quellenverzeichnis

- 1 FREUDENTHALER, A.; et al.: Looking ahead of the face with TSWD, In: Tunnelling Journal, Feb/March 2013, S. 43-45.
- 2 BRÜCKL, E.; et al.: Exploration Ahead of a Tunnel Face by TSWD – Tunnel Seismic While Drilling, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 5, S. 460-465.
- 3 RADINGER, A; et al.: Konsequente Vorauserkundung mittels Bohrungen und TSWD am Beispiel des Koralm tunnels, In: Geomechanik und Tunnelbau 7 (2014), S. 540-549.
- 4 KREUTZER, I; et al.: TSWD - State of the art and current developments, Proceedings of SAGEEP, Boston, 2014.
- 5 Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 3)
- 6 Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 1)

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anmerkung zum Quellenverweis: Gedächtnisprotokolle geben die subjektive Meinung des Interviewpartners wieder

Anhang 13: Übersicht TSP

LEISTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbarkeit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG				GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reichweite	Lagegenauigkeit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenzprojekte	Informationsverfügbarkeit und -quellen
TSP	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Reflexionsseismik •Grundprinzip nachvollziehbar	•Anwendung nur im Festgestein •Einsatz im konventionellen und maschinellen Tunnelbau •Räumliche Detektion mächtiger Störungszonen bei Impedanzkontrast >20% und einem Streich- und Einfallswinkel >25° im Bezug zur Tunnelachse •Detektion von Karsthohlräumen	•Tunneldurchmesser >2m •Graduierende Übergänge können mit Seismik nicht dargestellt werden •Eindeutige Prognose von Bergwasser ist möglich aber schwierig	•>150m •5% der Erkundungsreichweite	k.A.	•90min-120min (inkl. Messung) •Messdurchführung alle 80m-120m •2-3-tägige Einschulung des zuständigen Baustellenpersonals	•Wartungsschicht od. Vortriebsunterbrechung für: -Installation der Geophone -Laden mit Sprengstoff	•ca. 24 Schussbohrlöcher im Abstand von 1,5m zueinander am linken od. rechten Uml -1.Bohrloch möglichst knapp hinter Bohrkopf (bei Tübbingausbau: Bohrung durch Verpressloch) •mind. vier je 2m tiefe Bohrlocher für Positionierung der Geophone	•ca. 24 je 1,5m tiefe Schussbohrlöcher •Detonator •Feldlaptop	•2-3 Personen (Baustellenpersonal)	•45min-120min (Sprengen und Aufzeichnen) •Messdurchführung alle 80m-120m	•Wartungsschicht od. Vortriebsunterbrechung für: -Sprengung	•P- u. S-Wellengeschwindigkeit •Parameter für Datenbearbeitung werden automatisch oder halbautomatisch eingestellt •Poisson Zahl •Dichte •Dynamischer E-Modul •Charakterisierung der Geologie hinsichtlich vortriebsrelevanter Störungen	•"Blackbox" •Grundparameter bleiben immer gleich •Leitfaden für Auswertung	k.A.	•ca. 3h für unmittelbare Auswertung •1-2 Tage für Schlussbericht	k.A.	z.B.: •Gotthard-Basistunnel (CH) •Centovalli-Tunnel (I) •Zuckerbergtunnel (D) •Pahang Selangor Raw Water Transfer project (Malaysia)	•Anbieter ca. 10 Publikationen •Produktvorstellungen •1 Leistungsbeschreibung •Anwender •1 Publikation •2 Persönliche Gespräche		
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber		•Großflächige Erkundung des Baugrunds •flach liegende und schiefend zur Tunnelachse streichende Strukturen werden nicht erkannt •subhorizontal verlaufende Störungen werden nicht erkannt •Reflektoren deuten nicht immer auf Gesteinswechsel od. Störungszonen hin →z.B.: erhöhter Quarzanteil od. Variation im Glimmergehalt beeinflussen die seismische Geschw., sind aber nicht immer von bautechnischer Relevanz •Empfangsantennen sind anfällig •Ausrüstung ist schwer und sperrig •Geophonbohrlöcher müssen sauber hergestellt u. standfest sein			•2-3 Personen (Baustellenpersonal)			•ca. 24 je 1,5m tiefe Bohrlocher für Positionierung der Geophone •es gibt mind. 2 MQ: -1.MQ: 15m hinter letztem Schussbohrloch -Abstand zw. MQ: 5m		•Ein- und Ausfahrt in den Tunnel •ca. 60min (Sprengen und Aufzeichnen)			•halbautomatisiert •Grundparameter bleiben immer gleich •Leitfaden für Auswertung	•1 Ingenieur (Baustellenpersonal)	•1h	k.A.					

Quellenverzeichnis

- DICKMANN, T.: 3D Tunnel Seismic Prediction: A next generation tool to characterize rock mass conditions ahead of the tunnel face. In: Journal of Rock Mechanics & Tunneling Technology 20 (1), 2014, S. 35-47.
- Interner Ergebnisbericht der ÖBB: Erkundungsstollen Leibenfeld, 2006.
- Produktbeschreibung: Tunnel Seismic Prediction TSP 303 Plus, See ahead-build safer, Methode statement, Regensdorf, 2014.
- Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 4)
- REHBOCK-SANDER, M.; WIELAND, G; JESEL, T.: Vorauserkundungsmaßnahmen bei den TBM-Vortrieben der Südlose des Gotthard-Basistunnels-Erfahrungen und Folgerungen für andere Projekte, In: Geomechanik und Tunnelbau 7 (2014), S. 551-564.
- DICKMANN, T.: Predicting rock conditions ahead of the face, Proceedings of Tunnel Talk, 2012.
- DICKMANN, T.: Theoretical and Applied Case Studies of Seismic Imaging in Tunneling, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), S. 436-441
- DICKMANN, T.: Seismic prediction while tunnelling in hard rock, Proceedings of Annual Meeting of German Geophysical Society, Graz, 2005.
- DICKMANN, T.: An engineering view of the seismic prediction during tunneling, Proceedings of the 12th International Congress on Rock Mechanics, Beijing, Oktober, 2011.

Abkürzungen

k.A.	keine
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anmerkung zum Quellenverweis: Gedächtnisprotokolle geben die subjektive Meinung des Interviewpartners wieder

Anhang 14: Übersicht ISIS

LEISTUNG / PRODUKT	Informationsquelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbarkeit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG				GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reichweite	Lagegenauigkeit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher gerätechnischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenzprojekte	Informationsverfügbarkeit und -quellen
ISIS	ANBIETER • Dienstleister • Lieferant • Geophysiker	• Reflexionsseismik • Grundprinzip nachvollziehbar	• ¹ Anwendung nur im Festgestein • ² Detektion vorausliegender Gefahrenquellen od. geologischer Besonderheiten • ³ Bei abrupt wechselndem Zerlegungsgrad: Detektion w. wasser- od. luftgefüllter Hohlräume, Schwächezonen od. Störungen	• Anwendung nur in Verbindung mit einer TBM • ³ Graduierende Übergänge können mit Seismik nicht dargestellt bzw. prognostiziert werden	• ² ca. 150m	• ² in Vortriebsrichtung: 5m-10m • ² rechtwinklig zur Vortriebsrichtung: 15m-25m	k.A.	k.A.	• nicht notwendig	• ² 2 Geophone je MQ (auf 02:00 und 10:00 Uhr) • ¹ es gibt 2-4 MQ: - Abstand zw. MQ: 10m-15m	• ¹ Hartgesteins-TBM - ca. 1m tiefe Bohrlöcher für Messanker • ¹ Schild-TBM - 2m tiefe Bohrlöcher für Messanker (bei Tubbingausbau Bohrung durch Verpressloch)	• ² 2 pneumatisch betriebene Impakthammer • ¹ 4-8 Dreikomponentengeophone • ¹ Hartgesteins-TBM: 4-8m lange Messanker • ¹ Schild-TBM: 2m lange Messanker	k.A.	• ca. 2min pro Messung • ¹ Messung nach jeder Hublänge	• ¹ nicht notwendig • ¹ Messung während Ruhelage des Schneidrads	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	z.B.: • ² Bleiberg-Tunnel (D) • ² S-351 Glendoe Hydro Project (Schottland)	• GFZ Potsdam u. Universitäten - ca. 7 Publikationen • Anbieter - 1 Publikation - 1 Produktvorstellung
	ANWENDER • Geotechniker • Geologen • Auftraggeber	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	• ¹ Installation des Messsystems auf TBM auch nachträglich möglich	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.

Quellenverzeichnis

1	HEIM, A.: Einrichtungen zur Vorauserkundung und vorauseilenden Gebirgsbehandlung auf einer TBM. In: Geomechanik und Tunnelbau 5 (2012), S. 57-65.
2	URL: https://www.herrenknecht.com/de/innovation/forschung-entwicklung/maschinentechnik-und-komponenten/isis.html , ISIS Datenblatt, Produktinformation, (12.03.2015)
3	DICKMANN, T.: Predicting rock conditions ahead of the face, Proceedings of Tunnel Talk, 2012.

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anhang 15: Übersicht TRUST

LESTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbar- keit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG			GENERELLES			
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reich- weite	Lagegenau- igkeit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenz- projekte	Informations- verfügbarkeit und -quellen
TRUST	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Reflexionsseismik •Grundprinzip nachvollziehbar	•Einsatz im konventionellen und maschinellen Tunnelbau •Erkennen von Anomalien im Baugrund •Erkennen steil stehender Störungen	•Tunnel sollte trocken sein •Graduierende Übergänge können mit Seismik nicht dargestellt bzw. prognostiziert werden	• ² <150m	k.A.	k.A.	• ¹ 1h	k.A.	•Empfänger in radialen Bohrlöchern •Abstand zw. MQ: 50m	•alle 50m ca. 2m tiefe radiale Bohrlöcher für Positionierung der Geophone •bei Bedarf tunnelachsenparallele Bohrungen •Sprengbohrlöcher im Abstand von 5m	•Datenerfassungsanlage •event. Schlaghammer od. Hochfrequenzquelle •Ein- od. Dreikomponentengeophone •PC für Datenaufbereitung	• ¹ Aufsichtsperson mit Ortskenntnis • ¹ Sprengberechtigter + 2 Helfer •Helfer zum Aufbohren zugefallener Bohrlöcher	• ¹ 2-4 Stunden	• ¹ Messungen erfolgen in Wartungsschicht	• ¹ gestapelte seismische Spuren	X	• ¹ Geotechniker oder Ingenieurgeologen	• ¹ ca. 8h für Schnellauswertung • ¹ 1 Tag für Detailsauswertung	k.A.	z.B.: • ¹ Gotthard-Basistunnel (Flora-Mulde) (CH) • ¹ Kohleexploration in D	•Anbieter •4 Publikationen (relativ ungenaue Informationen) •Anwender •1 Interner Bericht •2 persönliche Gespräche
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber		k.A.	•Störungen werden z.T. nicht erkannt		k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	• ¹ sehr umfangreiches Equipment	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		k.A.	k.A.				

Quellenverzeichnis

1	LEHMANN, B.; DOMBROWSKI, B.: Risikominimierung bei Tunneltrassen durch eine hochauflösende geophysikalische Erkundung, In: Tagungshandbuch des 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TAE Esslingen, 2006, S. 489-493.
2	MISIEK, R.; LEHMANN, B.; BREITENBAVH; J.: Seismische Vorfelderkundung zur Optimierung der untertägigen Strecken- bzw. Tunnelauffahrung, Glückauf 144 (2008), Nr. 6, S. 280-284.
4	Interner Bericht der 3G
5	DOMBROWSKI, B; et al.: Combination of rockburst monitoring and seismic exploration ahead of the tunnel face: A new seismic concept for risk reduction, Proceedings of the World Tunnel Congress, Budapest, 2009, S. 60.
6	Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 6)
7	DICKMANN, T.: Predicting rock conditions ahead of the face, Proceedings of Tunnel Talk, 2012.

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anmerkung zum Quellenverweis: Gedächtnisprotokolle geben die subjektive Meinung des Interviewpartners wieder

Anhang 16: Übersicht SSP

LEISTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbar- keit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG				AUSWERTUNG DER MESSUNG				GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reich- weite	Lagegenauig- keit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte- technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenz- projekte	Informations- verfügbarkeit und -quellen	
SSP	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Reflexionsseismik •Grundprinzip nachvollziehbar	• ¹ Anwendung im Lockergestein • ² Detektion von Hindernissen bei Impedanzkontrasten >20% und subparalleler Anordnung zur OB • ³ Erkennen von Hindernissen, wenn sie größer als die kleinste Wellenlänge des Sendesignals sind → Objekte ab 1m Größe bis 20m vor der OB • ⁴ Detektion von Änderungen in der Geologie • ⁵ Detektion von Findlingen und künstlichen Hindernissen (Spundwand, Schächte,...)	• ¹ Anwendung nur in Verbindung mit einer Mix- Slurry- und Erddruckschildmaschine • ² Tunneldurchmesser >5m	• ¹ 40m	k.A.	k.A.	k.A.	•nicht notwendig	•schneidradintegrierte Signalgeber und Empfänger		•mind. 2 im Schneidrad integrierte Empfänger • ¹ 1 Signalgeber • ¹ PC-Einheit im Nachläuferbereich			•kontinuierliche Messung •nicht notwendig	• ¹ 3-D-Abbild der Reflexionen im quaderförmigen Bereich 10m x 10m x 40m vor der TBM	• ¹ vollautomatisch		• ¹ 3-5h	k.A.	z.B.: • ¹ 4_Röhre Ebtunnel (D) • ¹ City-Tunnel Leipzig (D)	•Anbieter -1 Publikation -1 Produktvorstellung	
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber		k.A.	k.A.	k.A.				k.A.	k.A.				k.A.	k.A.	k.A.	k.A.						

Quellenverzeichnis

1	GEHRING, M.; KASSEL, A.; LORENZ, K.: Vortriebsbegleitende Vorauserkundung: Mixschild mit Weitblick, Tunnel 3 (2010), S. 14-29.
2	SCHMITT, J.; GATTERMANN, J.; STAHLMANN, J.: Hohlraumerkundung im Tunnelbau, http://tunnelbau-technik.de/download/download11.pdf , (16.02.2015).
3	Informationsbroschüre der Herrenknecht AG: Herrenknecht SSP: Unsichtbares sichtbar machen – Durch seismische Vorauserkundung.

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anhang 17: Übersicht BEAM (Geo Exploration Technologies)

LESTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbar- keit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG				GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reich- weite	Lagegenau- keit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenz- projekte	Informations- verfügbarkeit und -quellen
BEAM Geo Exploration Technologies	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Goelektrik -fokussierend- elektrisch induzierte Polarisation	•Anwendung im Locker- und Festgestein •Detektion von Störungs- u. Karstzonen, Hohlräume, wasser- u. gasführende Zonen •BEAM Integral: 1- dimensionale Detektion •BEAM Scan: 3-dimensionale Detektion, zusätzlich Identifizierung der Schichten und deren Einfallen, Hohlräume... •Detektion von Sand- u. Kiesaquifere	k.A.	• ¹ 3x der Tunneldurch- messer	k.A.	k.A.	k.A.	•Messstromelektrode: -gesamtes Schneidrad (Beam INTEGRAL) od. -einzelne Abbau erzeuge (Beam SCAN) •Steuerelektrode: Schild der TBM •Referenzelektrode: einseitig am Urm in großer Distanz zur Ortsbrust •Steuerkabine		•Referenzelektrode •Beam SCAN -elektr. Rotor -Inkrementalgeber -spez. Abbau erzeuge, über die Strom eingeleitet wird •Beam-Unit in Steuereinheit			•kontinuierliche Messung		•PFE-Wert→ Klassifizierung des Gebirges •Widerstand→ Klassifizierung der hydrogeologischen Verhältnisse •Ground Change Indicator •Kombination PFE/Widerstand→ Gebirgscharakteri- sierung	•vollautomatisiert		•automatisch in Echtzeit	k.A.	z.B: •Prisinig Tunnel (I) •Metro Napoli Linea 1 ((I)) •Ginori Tunnel (I) •Erkundungsstollen Brenner Basistunnel (I)	•Anbieter -1 Publikation -3 Produktbeschreib- ungen •Anwender -1 Persönliches Gespräch •keine Publikation mit Erklärung zum genauen geophysikalischen Prinzip
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber	• ^{3,4} Grundprinzip nicht eindeutig nachvollziehbar	X	• ² Störungen werden nicht erkannt • ² Bergwasser wird nicht erkannt • ² z. T. Ausfälle des Systems aufgrund defekter Kabelverbindungen od. Softw areprobleme • ⁶ Streu- u. Störströme im Tunnel→negative Auswirkung auf Daten					X		X		X				X			k.A.		

Quellenverzeichnis

1	KAUS, A.; BOENING, W.: BEAM - Ahead Monitoring for TBM-Drives, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), Heft 5, S. 442-449.
2	Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 6)
3	Besprechungsprotokoll (siehe Anhang 10)
4	Besprechungsprotokoll (siehe Anhang 9)
5	MOONEY, M.A.; KARAOULIS, M.; REVIS, A.: Investigation of Goelectric-While-Tunneling Methods through Numerical Modeling, Proceedings of World Tunnel Congress, Geneva, 2013.
6	PÖTTLER, R.; et al.: Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen, In: Felsbau 20 (2002), S. 10-21

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anmerkung zum Quellenverweis: Besprechungs- und Gedächtnisprotokolle geben die subjektive Meinung des Gesprächs- bzw. Interviewpartners wieder

Anhang 18: Übersicht BEAM (QuMon GmbH)

LEISTUNG / PRODUKT	Informations- quelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbar- keit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG				AUSWERTUNG DER MESSUNG				GENERELLES		
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reich- weite	Lagegenau- keit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher gerätetechnischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungs- schicht / Stillstand / Vortriebsunter- brechung	Ergebnis der Auswertung für unmittelbare Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenz- projekte	Informations- verfügbarkeit und -quellen	
BEAM QuMon GmbH	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Goelektrik •fokussierend- elektrisch induzierte Polarisation	•Anwendung im Locker- und Festgestein • ¹ Detektion von wasserführenden Zonen • ¹ Detektion stärker zerrütteter / poröser Bereiche • ¹ Detektion von Störungs- u. Karstzonen, Hohlräume, wasser- u. gasführender Zonen • ² Mächtigkeit der Störungszonen	• ¹ Kabelverbindungen und Isolierungen können Probleme darstellen • ¹ 3x der Tunneldurch- messer	k.A.	k.A.	• ¹ BEAM Integral: 3-5 Tage (inkl. Einschulung des Baustellen- personals)	• ¹ Messstromelektrode: -gesamtes Schneidrad (Beam INTEGRAL) od. -einzelne Abbaumerkzeuge (Beam SCAN) • ¹ Steuerelektrode: Schild der TBM • ² gegenüberliegende Referenzelektroden in großer Distanz zur Ortsbrust		• ¹ Referenzelektrode • ¹ Beam SCAN: -elektr. Rotor -Inkrementalgeber -spez. Abbaumerkzeuge zum Einleiten des Stroms • ¹ Steuereinheit		• ¹ kontinuierliche Messung		• ¹ Complex Scatter (CS): Fluktuationen der elektrischen Koppelung zw. TBM und Baugrund → Hinweis auf Gebirgsart • ² Complex Impedance (CI) • ² Induzierte Polarisation (IP) • ² Kombination CI/IP → Infos zu geologischen / hydrogeologischen Verhältnissen im Vortriebsbereich	• ¹ vollautomatisch		• ¹ automatisch in Echtzeit	k.A.	z.B: ² TianJin (China) ² JinPing II Dversion Tunnel (China) ² Tünel de Cabrera (E) ² Gothard- Basistunnel (CH)	•Anbieter •2 Publikationen •1 Produktvorstellung			
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber	• ^{4,5} Grundprinzip nicht eindeutig nachvollziehbar	k.A.	• ⁶ Streu- u. Störströme im Tunnel → negative Auswirkung auf Daten	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.		k.A.		k.A.		k.A.	k.A.		k.A.						

Quellenverzeichnis

1	KOPP, T.: Beam G4 ground monitoring and real-time prediction while TBM-tunnelling for Jinping hydropower project east stage/ China, Proceedings of ITA-AITES World Tunnel Congress 2009, Budapest, 2009.
2	KOPP, T.: Real-time monitoring of geological conditions during mechanized tunnelling by means of BEAM4 methods, http://www.qumon.de/pdf/Kopp_117_62_3.pdf , (13.03.2015)
3	URL: http://www.geotunnel.de/de/data/beam4.html , Produktbeschreibung, (13.03.2015).
4	Gedächtnisprotokoll (siehe Anhang 10)
5	Besprechungsprotokoll (siehe Anhang 9)
6	PÖTTLER, R.; et al.: Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen, In: Felsbau 20 (2002), S. 10-21
7	URL: http://www.geotunnel.de/pdf/BEAM1-5_Project-References.pdf , Referenzprojekte, (13.03.2015).

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden

Anmerkung zum Quellenverweis: Besprechungs- und Gedächtnisprotokolle geben die subjektive Meinung des Gesprächs- bzw. Interviewpartners wieder

Anhang 19: Übersicht Bohrlochradar

LEISTUNG / PRODUKT	Informationsquelle	Geophysikalisches Grundprinzip + Nachvollziehbarkeit	EINSATZBEREICH				MONTAGE DES MESSSYSTEMS						DURCHFÜHRUNG DER MESSUNG			AUSWERTUNG DER MESSUNG			GENERELLES				
			Machbare Erkundungsziele	Geologische und technische Einschränkungen	Reichweite	Lagegenauigkeit	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Position der Signalgeber und Empfänger	Zusätzliche bauliche Maßnahmen	Zusätzlicher geräte technischer Aufwand	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Wartungsschicht / Stillstand / Vortriebsunterbrechung	Ergebnis der Auswertung für unmittlere Prognose	automatisch	Personeller Aufwand	Zeitlicher Aufwand	Kosten pro Laufmeter	Referenzprojekte	Informationsverfügbarkeit und -quellen	
Bohrlochradar	ANBIETER •Dienstleister •Lieferant •Geophysiker	•Elektromagnetik •Grundprinzip nachvollziehbar	•Räumlicher Nachweis von Kluff-, Störungs- und Verkarstungszonen ab Dimension im cm-Bereich •Azimutale Lagezuordnung geoteter Strukturen •Qualitative Abschätzung von Karststrukturen hinsichtlich Karstfüllung (offen od. verfüllt) •Charakterisierung der Bettungsbedingungen im Liegenden der Tunnelröhre		•wenige Meter in tonigen und schluffigen Gesteinen •10m bis 40 m in normal geklüfteten Gesteinen •40m bis 150 m in massiven Gesteinen •bis zu 300m mehr unter speziellen Bedingungen (z.B. reines Steinsalz, ungestörter Kalkstein oder Granit, Eis)	•²-1m	k.A.	k.A.	•kein Vortrieb während Montage möglich	•je nach Messmethode Sende- und Empfangsantenne in einem Bohrloch oder in zwei getrennten Bohrlochern •Antennen werden schrittweise versetzt	•mind. 1 Vorausbohrung, max. 3 Vorausbohrungen	•Sendeanenne •Empfangsantenne	•1 Geophysiker	•²<1h	•während Messung kein Vortrieb möglich	•Laufzeit, Amplituden und Signalphase → Radargramm mit Darstellung der Klüfte und Angabe der Einfallswinkel	X	•2 Geophysiker	•wenige Stunden	k.A.	z.B.: •Katzentberg tunnel (D) •Löt schberg tunnel (CH) •Neubaustrecke Karlsruhe-Basel (D)	•Anbieter: -4 Publikationen •Anwender: -1 Publikation	
																							•gute Aussage über Vorkommen von Verkarstungsstrukturen
	ANWENDER •Geotechniker •Geologen •Auftraggeber																						

Quellenverzeichnis

- 1 RICHTER, T.: Geophysikalische Vorauserkundung von Störungszonen und Verkarstungen durch Einsatz der Bohrloch-Radar-Technologie, In: Geotechnik 31, Nr. 2, 2008, S. 150-154.
- 2 RICHTER, T.: Geophysikalische Vorauserkundung von Verkarstungs- und Störungszonen bei der TVM-Auffahrung des Katzenbergtunnels, In: Geomechanik und Tunnelbau 1 (2008), S. 450-459.
- 3 LEHMANN, B.; DOMBROWSKI, B.: Risikominimierung bei Tunneltrassen durch eine hochauflösende geophysikalische Erkundung, In: Tagungshandbuch des 5. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TAE Esslingen, 2006, S. 489-493.
- 4 PÖTLER, R.; et al.: Grundkonzept zur Lösung der Karst- und Erdfallproblematik für den Bau von Verkehrswegen, In: Felsbau 20 (2002), Nr. 3, S. 10-21.

Abkürzungen

k.A.	keine Angaben
MQ	Messquerschnitt
X	nicht benötigt / nicht vorhanden