

# Schildvorgetriebener Tunnelbau in heterogenem Lockergestein, ausgekleidet mittels Stahlbetontübbing

## Teil 1: Geophysikalische Baugrunderkundungsmethoden

Herrn Professor Dr.-Ing. Gerhard Mehlhorn zum 65. Geburtstag gewidmet

Der Tunnelbau mittels teilautomatisierten Vortriebsmaschinen gehört zu den sehr weit entwickelten Bauverfahrenstechniken, hinsichtlich:

- Mechanisierung der Vortriebsmaschinen
- Teilautomatisierung der Datenerfassung vortriebsrelevanter Betriebs- und Vermessungsdaten, Visualisierung und Steuerung der Maschinen und Aggregate
- Automatische Steuerung der Vortriebspresenkräfte und des Vortriebsweges, Drehmomente, Verpreßmörtelmenge sowie Vorpreßmörteldruck; Bentonitsuspensionszugabe und Abbaufördermenge; Druck und Luftmenge zur Steuerung des Ortsbrustdrucks
- Teilautomatisierung des Tübbingausbaus

Derzeit sind zahlreiche Großprojekte im Tunnelbau in Deutschland, z. B. die Schnellbahnstrecken, städtische Autobahn- und Schnellstraßentunnel in Hamburg und Rostock, in der Schweiz das NEAT-Projekt sowie die zahlreichen U-Bahn-Projekte in den asiatischen Ländern im Bau bzw. in der Planung. Aufgrund der größeren Komplexität der anstehenden heterogenen Bodenformation sowie zum Schutz der bestehenden Bausubstanz werden von den Bauherren an die Ausführung erhöhte Forderungen hinsichtlich Risikominimierung und der damit verbundenen Termin- und Kostentreue gestellt. Die technischen Anforderungen bedingt durch immer größere Tunneldurchmesser und immer geringere Überdeckung der Tunnelfirste steigen zusätzlich. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die Gesichtspunkte der baubetrieblichen Risikominimierung großer schildvorgetriebener Tunnelbauwerke. Dabei steht die Entwurfsphase im Vordergrund, in der durch systematische Erkundungsmaßnahmen und unter Berücksichtigung der baupraktischen Erfahrungen die Anforderung an die Tunnelvortriebsmaschine und an das Bauwerk abgeleitet werden können. Dadurch lassen sich Störfälle eingrenzen und Wartungsmaßnahmen verringern und somit eine terminlich und wirtschaftliche Bauabwicklung weitestgehend sicherstellen. Zudem kann der gefährliche, zeitraubende, manuelle Einsatz der Mannschaft an der Ortsbrust zur Wartung bzw. Störfallbeseitigung erheblich verringert werden. In diesem Aufsatz wird folgender Aspekt zur Risikominimierung erörtert:

- Erkundung des Baugrundes, um ein möglichst wirklichkeitsnahes, räumliches Baugrundmodell zu erstellen.

In einem nachfolgenden Beitrag wird ein weiterer Aspekt der Risikominimierung betrachtet:

- Optimierung der Vortriebsmaschinenteknik, um einen möglichst robusten, störungsfreien Bauablauf sicherzustellen unter Berücksichtigung einer großen Bandbreite unterschiedlichster Baugrundverhältnisse.

Zudem wird auf die konstruktive und statische Gestaltung der Tübbingauskleidung im Hinblick auf die Nutzung systemimmanenter Reserven sowie zur effizienten Gestaltung des Bauablaufs eingegangen. Weiterhin werden die baubetrieblichen Anforderungen zur Gewährleistung der Ausbläuersicherheit erörtert, die bei den geringen Überdeckungen des Tunnelscheitels, welche heutzutage zur Minimierung der Baukosten ausgeführt werden, eine große Rolle spielt.

**Machine-driven tunneling techniques for reinforced concrete lined tunnels under heterogeneous soft soil conditions – geophysical exploration techniques.** *The tunnelling construction with its partly automated tunnelling machines belongs to the most developed construction processes techniques with respect to*

- mechanization of tunnelling machines
- collecting operational data partially automated; visualisation of guidance and operational data
- Automated guidance systems for forward thrust
- Partially automated installation of precast reinforced concrete lining

*At the time numerous tunnelling mega-projects are being in the stage of planning and construction in Germany, Switzerland and in many Asian countries. Due to the complexity of the heterogeneous soft soil conditions and stratification as well as for the protection of the existing buildings against settlements in metropolitan areas, the employer has*

*been claiming and stipulating risk minimisation measurements as for project time extension and cost overruns.*

*Due to the tunnel diameters being constantly increased while at the same time the cover of the tunnel crown is being reduced both the technical requirements in design and construction operation as well as the challenge for the engineers are potentially increased.*

*This paper is focusing on the risk minimisation in reference to above – mentioned subjects on machine-driven tunnelling techniques. In particular the paper is highlighting the aspects of advanced methods covering geophysical exploration techniques and the requirements for large diameter tunnelling machines and the structural lining to enable an efficient construction process at low risk.*

*Owing to these measurements the accidental interruption as well as the maintenance cycles of tunnelling operation can be minimised, so the project can be finished on time and within the budget. The tunnelling machine and the construction process can be designed to cope efficiently with the inhomogeneous soil conditions and stratification, if the following can be established:*

- computer-aided spherical soil model through soil mechanical and geophysical explorations. This aspect will be treated hereinafter.
- Optimisation of tunnelling machines to cope with the broad band-width of inhomogeneous soil conditions and to maintain a robust and most probably an uninterrupted tunnelling operation.
- Further attention will be drawn to the robust and efficient design of the lining to facilitate the construction and erection on side.

*Finally, the head stability during tunnelling operation under consideration of shallow tunnels will be explained.*

*The before-mentioned subject as well as the subject last but one will be outlined in a follow-up paper.*

## 1 Einleitung

Der hochmechanisierte, bergmännische Tunnelbau hat in den letzten Jahren eine immer größere Bedeutung zur Lösung der anstehenden Verkehrsprobleme gewonnen. Die z. Z. wichtigsten Anwendungsfelder der unterirdischen Verkehrsanlagen sind wie folgt:

1. überregionale Schnellbahnverbindungen z. T. im innerstädtischen Bereich, deren Trassierung durch die Anforderungen an das Verkehrssystem weitgehend festliegt
2. innerstädtische U-Bahnsysteme und Straßen, welche ohne Lärmbelästigung der Anlieger bzw. des öffentlichen Verkehrs errichtet werden sollen
3. Unterquerung von Flüssen (1) und Meerarmen in Bereichen, in denen Brückenbauwerke aus landschaftsgestalterischen oder technischen Gründen unerwünscht sind.

Bedingt durch die genannten Anwendungsgebiete verlagert sich somit der traditionelle Untertagebau vom Felsbau, zum Durchqueren von Gebirgszügen, zum Tunnelbau in Lockergesteinen.

Die Schildmaschinen zum Auffahren von U-Bahn, Eisenbahn- und Straßentunnel werden immer größer. Die üblichen Schilddurchmesser liegen zwischen 6–12 m (Tabelle 1). Die zur Zeit größten Tunneldurchmesser werden in Japan und Deutschland realisiert. Im Bau befindet sich zur Zeit der Trans Tokyo Highway Tunnel (2) mit einem Schilddurchmesser von 14,14 m, einer Überdeckung von nur 15 m und einer Seewassertiefe von 25 m. Für die 4. Röhre Elbtunnel in Hamburg [3] wird zur Zeit die größte Schildmaschine der Welt mit einem Schneideraddurchmesser von 14,21 m gebaut. Die Schildfahrt hat im Anfahrbereich eine Über-

deckung von nur 6 m, die künstlich stabilisiert werden muß, sowie im Bereich der Elbe eine minimale Überdeckung von ca. 11,5 m unterhalb des Flußbettes und einer Wassertiefe von ca. 40 m. Die Anforderungen für solch gewaltige Durchmesser hinsichtlich betrieblicher Sicherheit, Umweltverträglichkeit und minimaler Differenz- wie auch Totalsetzungen in bebauten Gebieten sind sehr hoch.

Die wirtschaftlichen Einsatzbedingungen der Tunnelvortriebsmaschinen im Vergleich zum Sprengbetrieb, maschinellen Abbaumethoden mittels Baggern, etc., bzw. offene Deckelbauweise ergeben sich wie folgt:

- längere Baulose, zur Zeit größer als 2000 m
- ungünstige Bodenart- und Grundwasserverhältnisse, die ein geschlossenes System erfordern

Tabelle 1. Charakteristische Tunnelbauwerke in Lockergestein  
Table 1. Typical tunnels in sedimented soils

| Nr. | Projekt:<br>Bauwerk/Ort                   | Jahr der<br>Bauaus-<br>führung | Schild-<br>system   | Schneid-<br>durch-<br>messer<br>(m) | Länge<br>(m)                                               | Wasser-<br>höhe<br>(m)              | Innen-<br>durch-<br>messer<br>(m) | minimale<br>Über-<br>deckung<br>(m) |
|-----|-------------------------------------------|--------------------------------|---------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|
| 1   | 4. Röhre – Elbtunnel                      | 1997–1998                      | Hydroslurry         | 14,20                               | 2600                                                       | 40,00                               | 12,35                             | 6,00–11,50                          |
| 2   | Trans-Tokyo Bay Highway                   | 1994–1997                      | Hydroslurry         | 14,14                               | 7600                                                       | 55,00                               | 12,60                             | 15,00                               |
| 3   | Kanada River Regulation,<br>Project Tokyo | 1989–1995                      | Hydroslurry         | 13,94                               | 2000                                                       | 20,00–30,00                         | 12,50                             | 30,00–40,00                         |
| 4   | Grauholz                                  | 1988–1993                      | Mix: Hydr./<br>EPBS | 11,60                               | 6300                                                       | 10 m über<br>Tunnel-<br>scheitel    | 10,60                             | 10,00                               |
| 5   | Southern Extension,<br>Lisabon Metro      | 1994–1996                      | EPBS                | 9,71                                | 2700                                                       | bis 6 m über<br>Tunnel-<br>scheitel | 8,80                              | 30,00–48,00                         |
| 6   | Ärmelkanal Fahrtunnel                     | 1988–1991                      | EPBS                | 8,78–8,36                           | 7412                                                       | 126,00                              | 7,60                              | 17,00–60,00                         |
| 7   | Belttunnel                                | 1990–1996                      | EPBS                | 8,50                                | 4500                                                       | 80,00                               | 7,60                              | 15,00                               |
| 8   | Metro Paris RATP                          | 1993–1995                      | Hydroslurry         | 8,60                                | 6400                                                       | 5,00                                | 7,50                              | 25,00                               |
| 9   | Taipei Baulos CC560,<br>U-Bahn EPS        | 1992–1996                      | EJPBS               | 6,27                                | 3700                                                       | 5,00–15,00                          | 5,60                              | 6,00                                |
| 10  | Stadtbahn Duisburg                        | 1988–1990                      | Hydroslurry         | 6,521                               | 547                                                        | –                                   | –                                 | 10,00–5,00<br>z. Fundam.            |
| 11  | Metro Köln Baulos M1                      | 1992–1994                      | Hydroslurry         | 6,56                                | 4<br>Vortriebs-<br>abschnitte<br>zu je 600 m<br>bzw. 640 m | max. 4,00 m<br>über<br>Scheitel     | 5,70                              | 4,40–13,50                          |

HSS = Hydroslurryschild

EPBS = Erddruckschild

Mix = Mixschild (unbrauchbar)



- hohe Anforderungen bezüglich geringer Oberflächensetzungen

Die wichtigsten Vorteile dieser Bauverfahrenstechnik sind:

- hohe Vortriebsgeschwindigkeit durch hochmechanisierte und zum Teil roboterisierte Bauverfahrenstechniken und damit kürzere Bauzeit
- geringe Beeinflussung vorhandener Bebauung durch Lärm, Setzungen, Baustellenverkehr, etc.
- geringe Beeinflussung des Grundwassers

Die wichtigsten Nachteile dieses Bauverfahrens sind:

- sorgfältige Vorerkundung des Baugrundes mittels geotechnischer – bodenmechanischer sowie geophysikalischer Methoden erforderlich
- sorgfältige Planung des Geräts in bezug auf die Bodenarten, Grundwasserverhältnisse, Bodenüberdeckung, Überbauungen und Auskleidung ist erforderlich
- hoher Investitionsaufwand für die Baustelleneinrichtung: Tunnelvortriebsmaschine, Nachläufersystem, Separationseinrichtung (nur bei Hydroschild) etc.
- hohe Anforderungen an das technische sowie praktische Know-how des Personals

Nur, wenn die optimalen Einsatzbedingungen sowie die Vor- und Nachteile sorgfältig abgewogen werden, wird der Einsatz erfolgreich sein und somit der Baubetrieb wirtschaftlich durchgeführt werden können. Dadurch erhält der Auftraggeber im vereinbarten terminlichen Rahmen ein qualitativ gutes Bauwerk unter geringer Beeinflussung der Umwelt.

Die spezielle Problematik des Schildvortriebs in Lockergesteinen wird in den Beiträgen:

- Geophysikalische Baugrunderkundungsmethoden und
- Aspekte der Vortriebsmaschinen- und Tragwerksplanung

unter dem Gesichtspunkt der baubetrieblichen Risikominimierung betrachtet.

Dieser Beitrag befaßt sich mit einigen wichtigen Aspekten hinsichtlich der geophysikalischen Vorerkundung.

## 2 Erkundung des Baugrunds

### 2.1 Einsatz geophysikalischer Methoden zur Ergänzung von singulären bodenmechanischen Baugrunderkundungen

Der umgebende Baugrund eines Tunnels ist für die Standfestigkeit von ausschlaggebender Bedeutung. Dabei liegen meist nur geringe Informationen über die stoffliche Charakteristik sowie der Verteilung der materialspezifischen Parameter des Baugrundes vor.

Die notwendigen geotechnischen Untersuchungen in den einzelnen Phasen der Projektbearbeitung sowie während des Baus sind in [4] dargelegt. Da sich die konservativen bodenmechanischen Erkundungen meist nur auf einzelne Bohrungen abstützen, ergeben sich nur punktförmige Kenntnisse des Baugrundes, die dann mittels praktischer Erfahrung und Intuition zu einem ebenen bzw. räumlichen Bild zusammengefaßt werden. Naturgemäß sind solche Interpretationen und Interpolationen, in sehr heterogenen Böden, besonders im Moränenbereich der eiszeitlichen Gletscher, relativ ungenau. Für die Auswahl der Tunnelstrecke wie auch für die Auswahl des Bauverfahrens sind möglichst genaue Informationen über Schichtenfolge, Schichtenverwerfungen, Größe und Ausdehnungen von Geröllfeldern sowie Findlingkonzentrationen, wassergefüllte Sandlinsen innerhalb von Tonschichten, etc. erforderlich, um eine technisch wie auch wirtschaftlich optimale Lösung zu finden.

Daher ist es unbedingt nötig, zur Eingrenzung von Risiken hinsichtlich Sicherheitsaspekten wie auch der Kosten alle modernen Erkundungsmethoden einzusetzen, um die Transparenz des Baugrunds zu verbessern. Die singulären bodenmechanischen Aufschlüsse sollten durch flächendeckende, geophysikalische Untersuchungen ergänzt werden. Die geophysikalischen Vorerkundungen [5] verdichten das Raster der Bohrungen und werden an diesen kalibriert.

Mittels der ergänzenden verdichteten, flächendeckenden, geophysikalischen Vorerkundung kann

in der Planungsphase die optimale Lage des Tunnels gefunden und die wirtschaftlichsten Bauverfahrenstechniken eingegrenzt werden. Noch immer gilt „vor der Ortsbrust ist es schwarz“, daher ist es besonders wichtig, baubegleitende geophysikalische Vorerkundungen durchzuführen, um möglichst frühzeitig Probleme vor der Ortsbrust zu erkennen. Somit können Maßnahmen getroffen werden (Schirminjektionen, Verfestigungsinjektionen, Schneidraddrehgeschwindigkeit, Polymereinmischungen, etc.), die Sicherheitsrisiken, Stillstandzeiten, Reparaturarbeiten verhindern bzw. minimieren können.

Die geophysikalischen Methoden wurden bis heute hauptsächlich zur Erdöl-, Erdgas- und Hohlraumexploration sowie zur Vermessung des Meeresgrunds verwendet. Die ersten Großanwendungen für Ingenieurprojekte erfolgten in Berlin im Bereich des neuen Regierungsviertels. Im Zuge des Baus der 4. Röhre des Elbtunnels soll eine baubegleitende Erkundung zur Risikominimierung erfolgen [6].

Empfehlenswert wären folgende Maßnahmen:

- a) vor Baubeginn des Tunnels: Entwicklung eines realistischen räumlichen Bodenmodells entlang der Vortriebsspur
- b) während des Vortriebs: detaillierte Hindernisentdeckung sowie Überprüfung und Verbesserung des Baugrundmodells

Dabei besteht das Problem darin, daß sich die geophysikalischen Erkundungsmethoden aus ingenieurmäßiger Sicht noch in der Entwicklungsphase befinden hinsichtlich:

- Anwendungsgebiete einzelner Verfahren bezüglich unterschiedlicher Bodenarten unter Berücksichtigung der jeweiligen Variationsbreite bodenmechanischer Parameter
- Tiefenwirkung einzelner Verfahren
- optimale Kombinationen von geophysikalischen Verfahren zur Verbesserung der Auswertung
- Verbesserung der graphischen und numerischen Aufarbeitung der Ergebnisse und der ingenieurmäßigen Darstellung.

Die physikalischen Grundlagen der Verfahren sind ausreichend erforscht, jedoch die baupraktische, ingenieurmäßig verwertbare Nutzung bedarf noch intensiver Forschungs- und Kalibrierungsanstrengungen.

## 2.2 Geophysikalische Verfahren und mögliche Einsatzgebiete

Die geophysikalischen Verfahren basieren auf der Ausbreitung von magnetischen, elektrischen und seismischen Wellen im Untergrund. Die Verfahren können wie folgt gegliedert werden:

1. Potentialverfahren: Geomagnetische-, geoelektrische-, geoelektromagnetische Verfahren, Bodenradar, etc.
2. Seismische Verfahren: Flachwasserseismik, Luftschallseismik, Körperschallseismik, etc.)
3. Bohrlochkalibrierungsverfahren: Gammastrahlverfahren, Full-Wave-Sonic

Jedes einzelne Verfahren hat spezielle Anwendungsbereiche zur Erkundung im Lockergestein. Die spezifischen Vorteile der einzelnen Verfahren, der schichtspezifischen Anwendungsgrenzen und die Interpretation der Kennwerte müssen noch besser mit den bodenmechanisch notwendigen Aussagen kalibriert werden. Die wirksamsten geophysikalischen Potentialverfahren [7], [8], [9] sind:

– Gravimetrie:

Bei der Gravimetrie wird das Gravitationsfeld (Potential) aus-

schließlich durch natürliche Quellen verursacht. Die Quellstärke hängt von der Dichte des geologischen Körpers ab (Fels, Lockergestein, etc.).

– Geomagnetik:

Bei der Geomagnetik werden die Intensitätsanomalien im natürlichen Magnetfeld von Störkörpern gemessen. Das Verfahren ist sehr wirksam z. B. bei vulkanischen Schloten, die das Deckenmaterial durchstoßen haben oder beim Aufsuchen von Rohrleitungen, Tanks, etc.

– Geoelektrik:

Die Quellen des Potentials der Geoelektrik bilden die Gleich- oder Niederfrequenzströme, die künstlich in den Untergrund eingeleitet werden. Dieses elektrische Feld wird mittels Stromelektroden aufgeprägt. Die Spannung, die entlang der Oberfläche verläuft, wird durch Spannungssonden empfangen. Da die Anordnung der Quellen bekannt ist, liegt die Aufgabe in der Ermittlung der Verteilung des spezifischen Widerstandes. Je weiter die Elektroden voneinander entfernt sind, desto größer ist die Tiefenwirkung.

– Elektromagnetik:

Die Elektromagnetik arbeitet mit elektromagnetischen Wechselfeldern, deren Ausbreitung im Untergrund als Diffusionsvorgang beschrieben werden kann. Die Wechselfelder werden mittels elektromagnetischer Spulen in den Boden eingespeist. Der Empfang

erfolgt durch Empfangsspulen. Der Diffusionsvorgang wird durch die spezifische Leitfähigkeit, dem Kehrwert des spezifischen Widerstandes der geologischen Schichten (Körper), beeinflusst. Das Verfahren eignet sich gut zum Kartieren von gut leitenden Körpern.

Die Reichweite der elektrischen und magnetischen Verfahren ist hinsichtlich der Tiefenwirkung auf 2 bis 10 m begrenzt. Der wesentliche Vorteil der Potentialverfahren liegt in der effizienten Grundrißabbildung und Kartierung von geologischen Zonen sowie der Ortung von Rohrleitungen, Kanälen, Fundamenten, etc. Die magnetischen Verfahren unterliegen stark den Störeinflüssen metallischer Gegenstände.

Zur Erstellung von vertikalen Bodenprofilen sowie räumlichen Baugrundmodellen eignen sich besonders die seismischen Verfahren sowie das Georadar (Tabelle 2).

Das Radarverfahren [10] eignet sich besonders in festen Gesteinen wie Granit, Salzen, etc.

Im Vergleich mit allen anderen geophysikalischen Oberflächen- und Bohrlochverfahren zeichnet sich das Radarverfahren durch seine hohe Auflösung aus. Das Verfahren kann in folgende zwei Meßmodi unterteilt werden:

- Reflexionsmethode
- Durchstrahlungsmethode (Tomographie)

Bei der Reflexionsmessung befinden sich z. B. Empfänger und

Tabelle 2. Anwendungsbereiche von Seismik und Georadar zur Vorerkundung in Lockergesteinen  
Table 2. Application fields of seismic and georadar for soil investigation

|                      |   | Physikalische Methode |            |       | Verfahren/Anwendung    |                     |                        |     |                      |                     |
|----------------------|---|-----------------------|------------|-------|------------------------|---------------------|------------------------|-----|----------------------|---------------------|
|                      |   | Reflexion             | Refraktion | Radar | Erdoberflächen-seismik | Flachwasser-seismik | Seismische Tomographie | SSP | Georadar Tomographie | Reflektion Georadar |
| Land                 | H | ++                    | –          | ++    | ++                     | –                   | +++                    | –   | ++                   | ++                  |
|                      | S | +++                   | ++         | +++   | +++                    | –                   | +++                    | –   | –                    | –                   |
| Fluß                 | H | +++                   | –          | –     | –                      | +++                 | +                      | –   | –                    | –                   |
|                      | S | +++                   | –          | –     | –                      | +++                 | +                      | –   | –                    | –                   |
| aus dem Schneide-rad | H | +++                   | –          | +     | –                      | –                   | ++                     | +++ | ++                   | ∅                   |
|                      | S | ++                    | +          | +     | –                      | –                   | ++                     | +   | ++                   | ∅                   |

H = Hinderniserkennung (Findlinge)

S = Schichtenunterschiede (Schichtung, Dichte)

+++ = hohe Erfolgsaussichten

++ = mittlere Erfolgsaussichten

+

∅ = unklare Erfolgsaussichten

– = keine Erfolgsaussichten



Sender in einem Bohrloch und werden schrittweise versetzt. An jedem Haltepunkt wird vom Sender ein elektromagnetischer Impuls abgestrahlt. Elektrische Diskontinuitäten im Gestein, Klüfte, Schichtgrenzen, Hohlräume etc. reflektieren einen Teil der Energie des elektromagnetischen Impulses zurück. In Analogie zur Seismik werden die Laufzeiten des Signals aufgezeichnet. Die Erkundungstiefe wird durch den elektrischen Widerstand und die Dielektrizitätskonstante des Bodens bestimmt. Die Richtwerte sind:

- tonig, schluffiges Material  $\pm 0$  m (meist keine Auflösung)
- normal geklüftetes Gestein 10–40 cm
- massives Gestein 40–150 cm

Bei der Durchstrahlungsmethode befinden sich Sender und Empfänger in zwei separaten Bohrlöchern. In jeder Sender- und Empfängerposition werden die Laufzeit und die Amplitude des Signals aufgezeichnet. Mittels Inversionsrechnung wird dann aus der großen Anzahl von Daten ein kontinuierliches Bild der Verteilung der Geschwindigkeiten und der Dämpfung berechnet.

Die Effektivität des Radarverfahrens geht verloren, wenn tonige oder schluffige Böden angetroffen werden. Die Messungen aus dem Schild bei Verwendung konduktiver Stützflüssigkeiten (Bentonitsuspension) im Bereich der Ortsbrust ist nicht möglich, da das Material als Dämpfer wirkt, wenn nicht zeitraubende verrohrte Bohrungen durch den Bentonitbrei in die Ortsbrust gebracht werden. Die Energie der Radarwellen wird größtenteils in Wärme umgesetzt (Mikrowelleneffekt). Solch konduktive Materialien reflektieren nicht.

Für die Zwecke des schildvorgetriebenen Tunnelbaus sind im wesentlichen nur die seismischen Verfahren geeignet. Die anderen Verfahren dienen oft nur zur Abklärung des Ergebnisses.

## 2.3 Seismische Verfahren von der Erdoberfläche

### 2.3.1 Reflexionsseismik

Die Reflexionsseismik [11] hat ein sehr hohes vertikales und laterales

Auflösungsvermögen und zeichnet sich damit durch eine hohe Genauigkeit in der Sicherheit und Detailliertheit der Aussage aus. Die Anwendung der Reflexionsseismik [12], [13] führt (neben bzw. zusammen mit potential-geophysikalischen Messungen) zu einer Optimierung und Reduzierung des Bohraufwandes bei der Baugrund- erkundung.

Zur Anregung auf der Erdoberfläche werden folgende Erreger benutzt:

1. Lautsprecher
2. Hammerschlag
3. Fallgewichte
4. leichte Sprengungen
5. elektromechanische Schallgeber

Zum Empfang der Reflexionswellen der nahseismischen Messungen werden Geophone mit Eigenfrequenzen von 40 bis 100 Hz benutzt. Bei der Auswahl der Eigenfrequenz sind das Spektrum der Quellen und die Ausbreitungsbedingungen zu berücksichtigen; außerdem sind die durch Oberflächenwellen hervorgerufenen niederfrequenten Störwellen optimal auszufiltern.

Die niederfrequenten Wellen (Bässe) werden aufgrund der größeren Wirkungstiefe zur Erkundung großer Tiefen eingesetzt, wobei jedoch eine geringe Auflösung erzielt wird. Die hochfrequenten Wellen (Höhen) werden zur Erkundung geringer Tiefen verwendet, jedoch mit guter Auflösung. Die Signale werden mit Hilfe von Seismographen von hoher Dynamik und niedrigem instrumentellem Rauschen aufgenommen, wobei mit bis zu 120 Kanälen aufgezeichnet wird, um die hohe Empfangsdichte abzudecken. Für die Seismographen ist eine hohe Auflösung bzw. Dynamik erforderlich, da das meist schwache Nutzsignal teilweise von sehr intensiven Störwellen (Ground roll) überlagert wird, und die hohen Frequenzen des Nutzsignals einer besonders starken Dämpfung bei der Ausbreitung in den quellennahen Lockersedimentböden unterworfen sind. Die hohe Genauigkeit wird durch 24-Bit-Seismographen gewährleistet.

Die Auswertungssoftware ist in ständiger Entwicklung, um In-

formationen aussagekräftiger zu verarbeiten, um Störungen herauszufiltern, das Nutz-/Störverhältnis zu verbessern und die graphische, ingenieurmäßige Lesbarkeit zu erhöhen.

Zur Interpretation seismischer Zeit- und Tiefenschnitte (Bild 1) ist die Einbeziehung der Bohrergebnisse zur Kalibrierung unerlässlich.

### 2.3.2 Refraktionsseismik

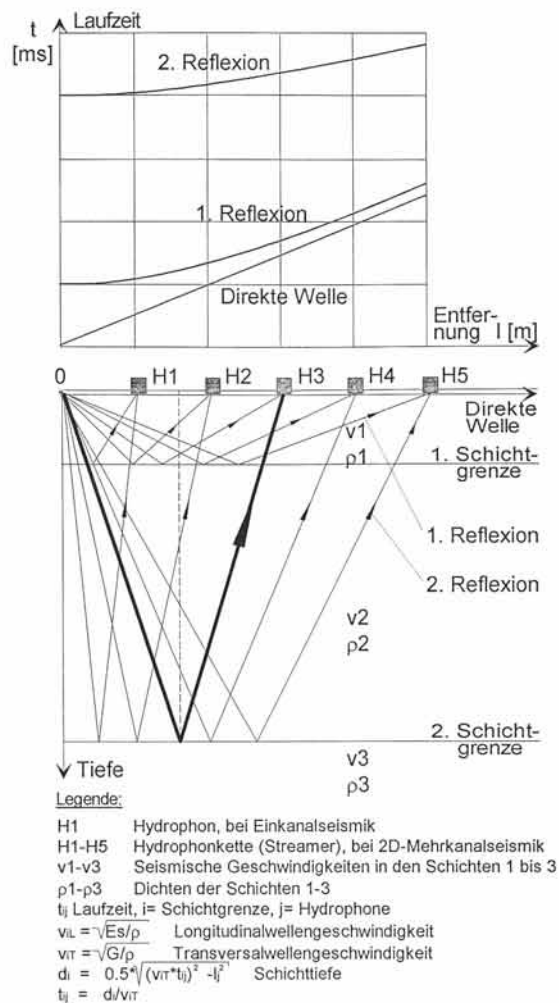
Der Nachteil dieser Methode besteht darin, daß die geologische Interpretation auf einem Modell [14] beruht, das aus Laufzeitkurven iterativ abgeleitet wird und eine inhärente Mehrdeutigkeit besitzt. Die Aussagefähigkeit der refraktionsseismischen Messungen wird gesteigert durch:

- moderne Ingenieurseismographen mit bis zu 120 Kanälen und speziellen Schaltungen, um das Grundrauschen (intensive Störwellen) des Erregers abzuschwächen um damit das Nutz-/Störverhältnis zu erhöhen. Die Genauigkeit wird durch 24-Bit-Seismographen gewährleistet.
- die interaktive „Generalized Reciprocal Method (GRM)“ und die Auswertung mittels EDV. Die Mehrdeutigkeit steigt mit zunehmendem geologischem Schwierigkeitsgrad. Aus diesem Grunde müssen in geologisch komplexen Strukturen die refraktionsseismischen Aussagen durch Aufschlußbohrungen kalibriert werden.

### 2.3.3 Seismische Tomographie

Die Tomographie [13] basiert auf mathematisch-physikalischen Grundprinzipien. Diese Prinzipien gehen davon aus, daß sich jedes zweidimensionale Gebiet durch eine endliche Folge eindimensionaler Projektionen eindeutig rekonstruieren läßt. Tomographische Prinzipien lassen sich deshalb überall dort anwenden, wo Meßergebnisse als Linienintegrale im zweidimensionalen Wertefeld aufgefaßt werden können (Bild 2).

Das Ergebnis ist eine diskretisierte Geschwindigkeits- oder Absorptionsverteilung der Kompressionswellen in der durchschallten Ebene. Mathematisch wird die Ebene durch die Geschwindigkeits- und Belegungsdichtematrix



beschrieben, die in finite Felder ( $V_p$ -Elementarflächen) unterteilt ist, die durch ihre Zeilen- und Spaltenziffern lageweise identifiziert werden können. Die Belegungsdichtematrix enthält die Summen aller Laufwege pro Element.

Zur Lösung der tomographischen Inversion wird die modifizierte „Simultaneous Interaktive Reconstruction-Technique“ eingesetzt. Mittels Tomographie lassen sich Ergebnisse mit sehr hoher Aussagekraft erzeugen.

## 2.4 Flachwasserseismik

Bei reflexionsseismischen Verfahren werden Schallimpulse im Wasser erzeugt. Diese dringen in den Untergrund ein und werden an Schichtgrenzen oder Hindernissen, an denen die seismischen Eigenschaften diskontinuierlich sind (Änderung der seismischen Materialeigenschaften, wie Geschwindigkeit der elastischen Wellen, Dichte), teilweise reflektiert. Die reflektierten Wellen laufen

zurück und werden von einem oder mehreren druckempfindlichen Hydrophonen dicht unter der Wasseroberfläche oder an der Gewässersohle empfangen.

Zur Erzeugung der Schallimpulse [15] werden zwei Arten von Energiequellen verwendet:

- Resonanzquellen: Sonar, Chrip Sonar
- Impulsquellen: Boomer, Plasma-gun, Sparker, Watergun, Airgun, etc.

Die Resonanzquellen funktionieren auf piezoelektrischer Basis. Die Druckwelle hat einen sinusförmigen Verlauf. Die Frequenz der Erregung ist durch die Eigenfrequenz eines piezometrischen Kristalls festgelegt. Die Schallwelle entsteht durch Ausdehnen und Zusammenziehen der Kristalle. Die maximale Stärke des Signals ist begrenzt durch die Kavitation der Wassermoleküle. Diese Methode wird daher in der Sonartechnik im Seeverkehr und zur Kartierung der Profilierung der See verwendet und wegen ihrer geringen Energie meist

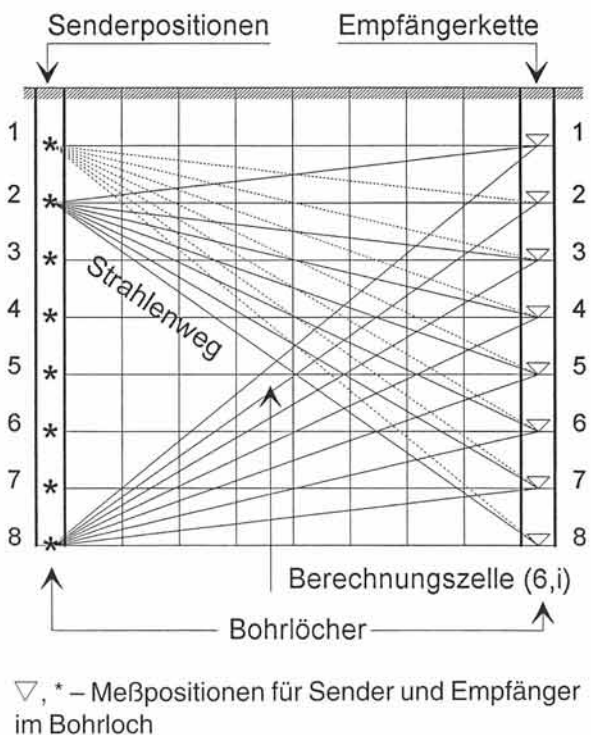


Bild 2. Prinzip tomographischer Messungen

Fig. 2. Principles of tomographic measurements

Bild 1. Prinzip reflexionsseismischer Messungen

Fig. 1. Principles of seismic reflexion measurements

nicht für geophysikalische Zwecke benutzt.

Die Impulsquellen geben ihre Energie durch einen kurzen Schlag ab. Der Impuls sollte bezüglich seines Frequenzspektrums und der Amplitude exakt wiederholbar sein. Zur einfacheren Auswertung sollte das erzeugte Frequenzspektrum möglichst gering sein. Der ideale Impuls sollte zur besseren Auswertung die Form einer mathematischen Funktion aufweisen. Dies wird aber gerätetechnisch praktisch nicht erreicht. Signale, die durch eine Impulsquelle erzeugt werden, sind charakterisiert durch eine Frequenzbandbreite. Die gebräuchlichsten Impulsquellen für den „Schuß“ sind auf Druckluft oder elektrischer Entladung aufgebaut (z. B. Boomer = Platte mit elektrischer Spule/Knallfrosch; Sparker = Stromüberschlag durch zwei Elektroden). Der große Vorteil dieser Impulsquelle ist die Bandbreite. Der Nachteil liegt in der Schwierigkeit der Erkennung des schwachen



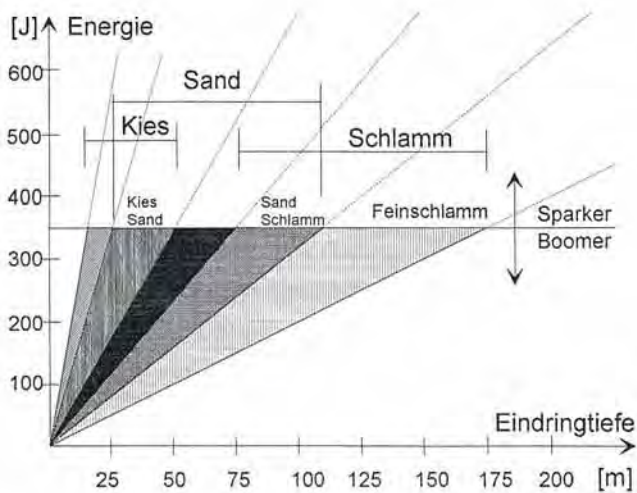


Bild 3. Qualitatives Eindringvermögen der akustischen Wellen (nach GeoAcoustics Ltd.) in den Untergrund  
Fig. 3. Qualitative penetration depth of acoustic waves in soils

Nutzsignals in Gegenwart von anderen Störquellen (Geräuschen).

Die große mögliche Bandbreite bezüglich des Frequenzinhalts kann im Prinzip eine Auflösung von Untergrundstrukturen bis in den Dezimeterbereich ermöglichen. Das qualitative Eindringvermögen der seismischen Wellen eines Boomers ist im Bild 3 dargestellt. Als Empfänger für die aus dem Untergrund reflektierten Wellen dienen Hydrophone. Zur Realisierung einer flachwasserseismischen Untersuchung gibt es folgende mögliche Meßanordnungen:

1. Einkanalvermessung:

Seismische Quelle und ein Hydrophon werden entlang paralleler Profillinien geschleppt.

2. 2D-Vermessung:

Seismische Quelle und mehrere Hydrophone werden als Aufnehmerkette entlang paralleler Profillinien geschleppt.

3. 3D-Vermessung:

Bei der 3D-Vermessung werden die Hydrophone in parallelen Strängen ausgelegt, so daß ein ebenes Raster von Empfängern vorliegt. Die seismische Schallquelle wird nun über dem Raster an diskreten Punkten angeregt (Schußpunkte).

Die Entfernung zwischen der Schallquelle und den Hydrophonen sollte kurz sein im Verhältnis zur signifikanten Wellenlänge.

Zur Ankoppelung an das Medium Wasser sollte die seismische

Quelle wie auch der Empfänger bzw. die Empfängerkette direkt unterhalb der Wasseroberfläche angeordnet werden. Die Entfernung von der Wasseroberfläche sollte auf ein Minimum beschränkt sein, um die Geisterreflexion der Wasseroberfläche und deren Überlagerung mit den Untergrund-Reflexionswellen gering zu halten.

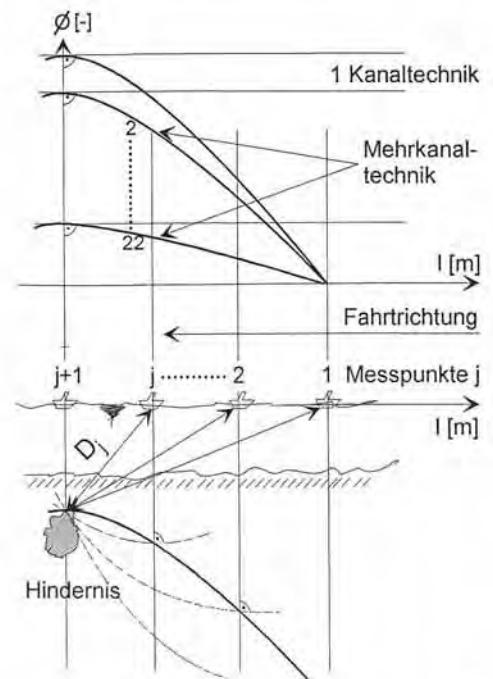
Bei geringen Tiefen der Erkundung bis 50 bis 60 m hat das Einkanalssystem große wirtschaftliche Vorteile gegenüber den 3D- bzw. 2D- Erkundungsverfahren:

- Aufwand und Datenmenge sind geringer.

- Bei erhöhter Anzahl von Schußpunkten ist die Anzahl von Primärdaten meist geringer als bei der 2D-Erkundung. Dadurch sinkt der Aufwand.

- Hindernisse (Findlinge) lassen sich gut als Hyperbeln abbilden (Bild 4). Mehrkanalsysteme haben keine gute Auflösung von Hindernissen, da die Hyperbeln sehr flach werden. Die Findlingsordnung erfolgt mit einem speziellen Algorithmus.

Schallwellen breiten sich im Wasser wegen ihrer geringen Dämpfung über große Entfernungen aus. Zudem sind die Hydrophone an das Übertragungsmedium ausgezeichnet angekoppelt. Die Qualität der Reflexionswellen von Impulsschallquellen ist oft stark reduziert durch die Gegenwart von Störgeräuschen. In den Fällen von unkonsolidierten Ton-



Anmerkung:

Mehrkanal-Systeme haben keine gute Auflösung von Hindernissen, da die Hyperbeln sehr flach werden.

$v_T = 0$  Transversalgeschwindigkeit im Wasser

$v_L = \sqrt{E/\rho}$  Longitudinalgeschwindigkeit

$D_j = v_L \cdot t_j/2$  Entfernung zum Hindernis

Bild 4. Ortung von Findlingen – Auswirkungen der Anzahl der Empfangskanäle

Fig. 4. Detection of obstacles – influence of the numbers of receivers

oder Sedimentschichten können die Reflexionssignale meist nicht aus den Störgeräuschen herausgefiltert werden. Bei Schlickansammlungen wirkt der Gasanteil im Sediment störend. In solchen Fällen sollte zuerst der Einfluß von Störgeräuschen überprüft werden.

Folgende Störgeräuschgruppen (16) können u. a. auftreten:

- Elektrische Störgeräusche, durch elektrische Leitungen und Geräte im Schiff (Pumpen, Funkgeräte, etc.) die die Signalleitungen beeinflussen

- Schiffsgeräusche: Motor, Antriebsschrauben, Wasserfahrgeräusche, etc.

- Seewellengeräusche: besonders bei stürmischem Wetter.

Die Störgeräusche sollten auf ein Minimum reduziert werden, um eine aussagekräftige Messung zu erhalten. Die Ausschaltung von

Störgeräuschen ist eine „trial and error“ Angelegenheit.

Durch diese flächenhafte Erkundung entlang parallelen Profillinien, deren Lage mittels GPS (Global Positioning System) während jedes Schusses ermittelt wird, erhält man somit ein Bodenmodell. Dieses besteht aus parallelen, vertikalen Ebenen. Die einzelnen Ebenen können durch Querinterpolationen zu einem räumlichen Bodenmodell zusammengefaßt werden. So ist es möglich, die Kontur des Bauwerks in das räumliche Bodenmodell zu legen und somit die möglichen Probleme während des Vortriebes zu verdeutlichen.

Zur Verarbeitung und Auswertung der gesammelten Daten [17] werden ähnliche Softwarealgorithmen und Programme verwendet, wie sie unter Reflexionsseismik beschrieben wurden.

## 2.5 Seismische Vorerkundung aus dem Schild

Der Wunsch des Bauingenieurs, mit einem „sehenden“ Schild den Tunnel aufzufahren, kann auch von den geophysikalischen Methoden bis heute noch nicht erfüllt werden. Zur Verdichtung und Detaillierung des erstellten Baugrundmodells mittels geotechnischer, bodenmechanischer und geophysikalischer Methoden dient das von Amberg [18] entwickelte, baubegleitende schneidradintegrierte Sonic Soft Ground Probing (SSP) System. Das SSP-Verfahren basiert auf der seismischen (akustischen) Reflexionsmessung (Bild 5). Mit Hilfe dieses Verfahrens sollen der Mannschaft vor Ort im voraus möglichst konkrete Informationen vermittelt werden über Problemzonen vor dem Schild, wie z. B.:

- Lage von Findlingen und anderen Hindernissen
- schräge oder vertikale Schichtgrenzen sowie schräge, nach oben verlaufende Grobkiesschichten
- Geröllfelder (grober Kies, Steine) sowie wassergefüllte Sandlinsen im Ton

Dadurch erhält die Vortriebsmannschaft Vorlaufzeit, um die adäquaten Maßnahmen zur Minimierung und Verhinderung von Risiken vorzubereiten, die möglicherweise Störfälle mit Still-

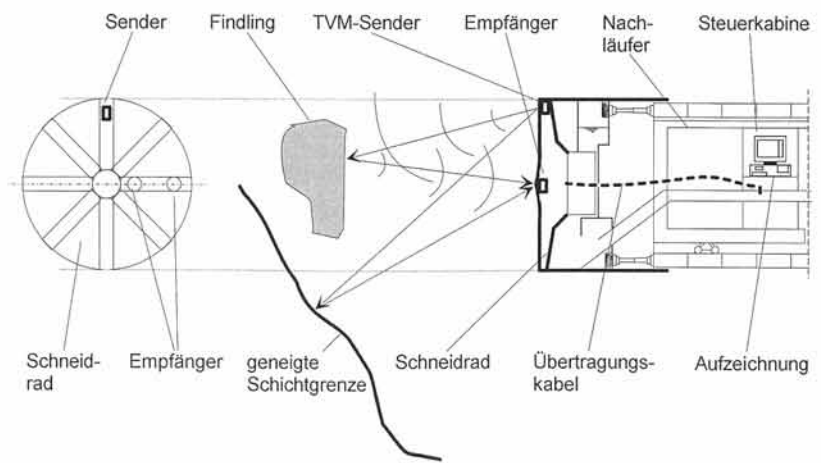


Bild 5. Schneidradintegrierte seismische Meßverfahren [18]

Fig. 5. Cutter wheel integrated seismic soft ground measuring system [18]

standszeiten, Reparatur- und Korrekturmaßnahmen verursachen könnten. Aufgrund des in der Planungsphase aufgestellten Bauwerksmodells lassen sich bereits Problem- und Störfallkataloge aufstellen. Bereits zu diesem Zeitpunkt können dann Problem-, Störfallverhinderungs- und Störfallbehebungsmaßnahmen schriftlich konzipiert werden, die auf das Vortriebsmaschinenkonzept abgestellt sind. Dadurch werden die Störfallüberraschungen drastisch verringert und ein terminlich wie kostenmäßig kontrollierter Ablauf weitgehend gesichert.

Das System besteht aus einem elektrodynamischen Schallsender mit Frequenzen von 100 bis 5000 Hz. Als Empfängergruppe dienen mindestens 2 Geophone, die gegenüber dem Empfänger um 90° versetzt werden. Der Sender wie auch die Empfänger werden in die Speichen des Schneidrades integriert. Die beiden akustischen Gerätegruppen sind jeweils getrennt in einem Gehäuse mit Anschlußflansch untergebracht, um unter den rauen Vortriebsbedingungen ausreichend geschützt zu sein. Diese Gehäuse werden in die vorbereiteten Öffnungen der Speichen zur Ortsbrust hin mittels Flansch befestigt. Sender- und Empfängergehäuse bilden mit dem Schneidrad eine ebene Oberfläche zur Ortsbrust. Die Resonanzplatten, ca. 20 bis 30 cm Durchmesser, müssen relativ dünn sein und daher aus hochfesten Stählen bzw. veredelten Stählen bestehen, um

die Schwingung aufs Erdreich zu übertragen bzw. die Reflexionen aufzunehmen und gleichzeitig den extremen Verschleiß- und Stoßbedingungen zu widerstehen. Das Gehäuse und die Schneidradspeiche müssen durch eine dämpfende Dichtung im Bereich des Flansches getrennt werden, um Geisterwellen von Reflexionen aus der Maschine zu unterdrücken.

Durch diese Anordnung wird ein ausreichender Kontakt zum Boden vor der Ortsbrust hergestellt. Dabei bildet die Bentonitsuspension wie auch das Grundwasser vor der Ortsbrust eine optimale akustische Ankoppelung. Die horizontalen Schichtgrenzen lassen sich nicht gut oder gar nicht abbilden, wenn die Konvergenzwinkel zwischen ausgesandten und reflektierenden Schallwellen annähernd parallel verlaufen.

Die elektrischen Steuersignale für die elektrodynamische Schallquelle wie auch die akustischen Empfängersignale werden über geschützte Kabel über einen Zentrumschleifring in der Hauptachse der Vortriebsmaschine zu einem Speicher und einem PC in der Steuerkabine zur ersten groben Auswertung übertragen. Mittels spezieller Auswertungssoftware können Hindernisse, Findlinge, etc. mittels Hyperbelverfahren gefiltert werden sowie separat planare Schichten in relativ vertikaler Richtung lokalisiert werden. In einem bereits ausgeführtem Projekt (Züblin Taipei) wurde die Messung in den Ringbaupausen durchge-



führt, um die Störquellengeräusche der Vortriebsmaschine durch Bodenschäl- und Maschinenvibrationsgeräusche, Hydraulikmotorengeräusche, etc. auszuschalten. Dabei wird das Speichenrad mehrmals im Uhrzeigersinn um äquidistante Rotationswinkel gedreht. In jeder Meßposition werden einzelne Meßebenen um die Tunnelspur erzeugt. Durch Interpolation zwischen den Aufzeichnungsebenen erhält man ein räumliches Bild. Zu diesem Zweck muß die Speichenposition z. B. in den Achtelpunkten des Kreisringes im Raum lokalisiert werden. Die Messungen dauern ca. 20 bis 30 Minuten während der Ringbauzeit. Um die Datendichte und dadurch die Interpretation zu verbessern wird versucht, eine möglichst permanente Messung während des Vortriebs vorzunehmen. Um dies zu ermöglichen, müssen effiziente Methoden gefunden werden, die Störquellen als Spektrum zu identifizieren und dann aus den akustischen Empfangswellen zu filtern.

Ein ähnliches System wurde zur Anwendung im Felsbau entwickelt [19], [20].

## 2.6 Bohrlochkalibrierungsverfahren

Zur Kalibrierung der gewonnenen physikalischen Parameter sind Bohrlochaufschlüsse unumgänglich. Folgende Messungen und Ergebnisse können zur Parameterbestimmung der geophysikalischen Oberflächenverfahren genutzt werden:

1. bodenmechanische Auswertung der schichtweise gewonnenen Bohrproben in bezug auf Klassifizierung der Bodenschichten, Lage der Schichtgrenzen, labormäßige Bestimmung bodenmechanischer Parameter
2. Mittels Gammaverfahren kann der Tonanteil im Boden bestimmt werden. Die Tonhaltigkeit kann jedoch auch aus den Bohrproben bodenmechanisch bestimmt werden
3. Beim Full-Wave-Verfahren wird ein Ultraschallsender verwendet. Die horizontal reflektierenden Signale werden von zwei Empfängern aufgezeichnet. Mittels dieser Messung lassen sich die elasti-

schen Parameter, z. B. die Schallgeschwindigkeit der einzelnen Bodenschichten vorab bestimmen, um später die Mehrdeutigkeit der Refraktionsmessungen zu kalibrieren. Auch hier muß man sichern, daß die Lage der Schichtgrenzen durch die bodenmechanischen Aufschlüsse bekannt ist. Die Messungen werden beim Ziehen des jeweiligen Sensors aus dem Bohrloch kontinuierlich registriert. Auflösung und Genauigkeit der physikalischen Parameter sind meist um mehrere Größenordnungen besser als bei den Oberflächenverfahren.

Die physikalischen Parameter der Böden werden (abgesehen von den tomographischen Verfahren) nur entlang des Bohrlochs ermittelt und nicht flächenhaft.

## 2.7 Interpretation von geophysikalischen Meßergebnissen

### Kennwertbestimmung – Korrelierbarkeit

Die geophysikalischen Kennwerte sind nicht identisch mit bodenmechanischen Kenngrößen, daher müssen funktionale und/oder statistische Zusammenhänge ermittelt werden. Als Beispiel seien die Beziehungen zwischen dynamischen und statischen Elastizitätsmoduli genannt. Für die Korrelation zwischen geophysikalischen und bodenmechanischen Kennwerten sind noch wichtige grundsätzliche Forschungsarbeiten notwendig.

### Strukturerkundung

Geophysikalische Grenzflächen müssen mit geologischen Strukturen korreliert werden. Hier ist es wichtig, daß der Geophysiker erkennt, welche Informationen für die Ingenieuraufgabe bereitgestellt werden müssen.

### Kontrast

Für die Strukturerkundung müssen sich die geologischen Schichten hinsichtlich geophysikalischer Parameter unterscheiden. Geringe Schallhärtenänderungen (wenige Prozent) ergeben bei seismischen Verfahren deutliche seismische Reflektoren. Jedoch Gesteine oder Bodenschichten, die sich in keiner petrophysikalischen Eigenschaft

unterscheiden, lassen sich nur schwierig identifizieren, wenn sie in ähnlicher Textur, Lagerungsform etc. benachbart vorkommen.

## Objektgröße und Beobachtungsdistanz

Die geophysikalische Auflösbarkeit von Objekten wird z. B. durch die seismische Wellenlänge sowie von dem Abstand der Beobachtungspunkte vom Meßpunkt beeinflusst. Die methodisch erreichbaren Grenzen werden durch die Entwicklung immer weiter verschoben, jedoch die ingenieurmäßig erwarteten Informationen wie auch Auflösungen werden zu meist nicht in der erhofften Präzision gewonnen. Nach dem heutigen Stand der Technik ermöglicht die Reflexionsseismik wie die seismische und elektromagnetische (Radar) Tomographie die höchste Auflösung.

## 3 Ausblick

Die Weiterentwicklung der geophysikalischen Bodenerkundung als Ergänzung der konventionellen bodenmechanischen Aufschlüsse, zur Erstellung eines dreidimensionalen Baugrundmodells ist einer der wichtigen Voraussetzungen zur richtigen und realistischen Beurteilung der zu erwartenden Probleme in den anstehenden heterogenen Böden. Aufgrund dieses Modells, in dem möglichst alle wichtigen, komplexen heterogenen Verhältnisse aufgezeigt werden, kann dann das wirtschaftliche, baubetriebliche wie auch das maschinelle, technische Konzept der Vortriebsanlage und der Abbauwerkzeuge abgeleitet werden.

Der jetzige Stand der geophysikalischen Methoden ist aus bauphysikalischer Sicht noch nicht befriedigend. Daher müssen die geophysikalischen Methoden, im besonderen die Kalibrierung an den bodenmechanisch relevanten Parametern, systematisch weiter erforscht werden einschließlich der Anwendungsgrenzen der Verfahren aus bodenmechanischer Sicht. Ferner ist die Aufbereitung der Ergebnisse mittels EDV den Darstellungsgewohnheiten des Bauingenieurs anzugleichen.



## Literatur

### Allgemeines

- [1] Gebhard, K., Bielecki, R.: Planung und Entwurf der vierten Röhre des Neuen Elbtunnels. Tunnel: Chancen und Grenzen moderner Technik. Heft 32, S. 24 bis 26, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1988.
- [2] Kogoh, M., Okimoto, I.: World Largest Shield Tunnel for Trans-Tokyo Bay Highway – 14,14 m Diameter Pressurized Shurry Shield. Weltneuheiten im Tunnelbau. Heft 36, S. 78–85, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen, STUVA, Köln, 1995.
- [3] Anheuser, L.: Specific Problems of very large Tunneling Shields. RETC Proceedings, chapter 30, page 467–477, San Francisco, 1995.
- [4] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik/Arbeitskreis Tunnelbau: Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ ETB. Hrsg. von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik Berlin: Ernst & Sohn, 1995.
- [5] Brückl, E., Stötzner, U.: Geophysik und die geologisch-geotechnische Vorerkundung von Felsbauten. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 256–261.
- [6] Cremer, S.: Forschung für die 4. Röhre des Elbtunnels. Tunnel (1996), Heft 4, S. 66–68.

### Geophysikalische Bodenerkundung

#### a) Potentialverfahren

- [7] Schulze, E.: Strukturerkundung von Fels mittels Potentialverfahrens. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 278–284.

rens. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 278–284.

- [8] Watzlaw, W., u. a.: Einsatz der Geophysik bei der Erkundung von Tunnelstraßen. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 291–295.
- [9] Raetzo, H.: Geophysikalische Messungen zur Beurteilung von Rutschungen. Schweizer Ingenieur und Architekt. (1995), Heft 48, S. 1109–1111.
- [10] Corin, L., Dethy, B., Halleux, L., Richter, T.: Bohrlochradar – Grundlagen und Anwendung im Festgestein. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 285–290.

#### b) Seismische Verfahren

- [11] Gaertner, H., Bauer, M., Seitz, R.: Reflexionsseismische Erkundung des Nahbereichs für Verkehrsbauten. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 266–271.
- [12] Ingenieur- und Umweltgeophysik. Firmenprospekt DMT – Institut für Lagerstätte, Vermessung und Angewandte Geophysik, Bochum.
- [13] Geophysik und Geodäsie. Firmenprospekt DMT – Institut für Lagerstätte, Vermessung und Angewandte Geophysik, Bochum.
- [14] Frei, W.: Zeitgemäße Refraktionsseismik. Felsbau 13 (1995), Heft 5, S. 262–265.

#### c) Flachwasserseismik

- [15] Verbeek, N. H., McGee, T. M.: Characteristics of high-resolution marine reflexion profiling sources. Journal of Applied Geophysics 33 (1995), S. 251–269.
- [16] McGee, T. M.: High resolution marine reflexion profiling for

engineering and environmental purposes. Part A: Acquiring analogue seismic signals. Journal of Geophysics 33 (1995), S. 271 bis 285.

- [17] McGee, T. M.: High resolution marine reflexion profiling for engineering and environmental purposes. Part B: Digitizing analogue seismic signals. Journal of Geophysics 33 (1995), S. 287 bis 296.

#### d) Seismische Erkundung an der Ortsbrust

- [18] Sonic Soft Ground Probing (SSP). SSP 202 System Description. Produkt- und Verfahrensprospekt der Firma Amberger Measuring Technique Ltd., Regensdorf, Switzerland, 1995.
- [19] Sattel, G., Sander, F., Amberg, F., u. a.: Tunnel Seismic Prediction, TSP – some case histories. Produktbeschreibung tttspp der Firma Amberger Measuring Technique Ltd., Regensdorf, Switzerland, 1995.
- [20] Prediction Ahead TSP 202 System. Catalog 94/95 der Firma Amberger Measuring Technique Ltd., Regensdorf, Switzerland, 1995.

#### Autor dieses Beitrages:

Prof. Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Institut für Bauplanung und Baubetrieb, ETH Zürich, CH-8093 Zürich