

# **Erfahrungen bei Tunnelvortrieben im Lockergestein und im Fels bei sehr hohem Grundwasserdruck**

**Dr.-Ing. Jörg Holzhäuser**

Smolczyk & Partner GmbH, Stuttgart

**Claus Mayer**

Nordseetaucher GmbH, Ammersbek/Hamburg

**Steven W. Hunt**

CH2M Hill, Milwaukee, WI, USA

## **1 Einführung**

Hohe Grundwasserdrücke sind bei Tunnelvortrieben im Lockergestein bzw. im Fels eine große Herausforderung und beeinflussen maßgebend die Auslegung und den Betrieb von Tunnelbohrmaschinen (TBMs). Hierbei gilt es, einen übermäßigen Zustrom von Grundwasser zu verhindern, die Ortsbruststabilität zu gewährleisten und den Zugang zum Schneidrad für Wartungsarbeiten zu ermöglichen. Dies kann zu einer Verlängerung der Bauzeit und zu einem Anstieg der Baukosten führen.

In den letzten Jahren wurden zunehmend Tunnel in größerer Tiefe und mit höherem Grundwasserdruck geplant bzw. gebaut. Bei der derzeitig geplanten A20-Elbquerung bei Glückstadt im Zuge der Nordwestumfahrung von Hamburg müssen ca. 6 bar Wasserdruck beherrscht werden. Einer der Tunnel für das Brightwater-Projekt in Seattle ist derzeit in der Ausführung, bei dem in abrasiven glazialen Böden und bei einer Überdeckung von max. 130 m ein Grundwasserdruck von mehr als 7 bar ansteht. Am Katzenbergtunnel nördlich von Basel wird im Fels ein Grundwasserdruck von max. 9,2 bar erwartet. Der Arrowhead-Tunnel in Kalifornien wird derzeit durch weichen Fels vorgetrieben mit einem Grundwasserdruck von mehr als 10 bar. Bei dem im Jahre 2006 begonnenen Hallandsås-Tunnel in Schweden wird eine Störungszone mit einem Wasserdruck von max. ca. 13 bar durchfahren und am Lake Mead in der Nähe von Las Vegas ist derzeit ein Tunnel für einen Wasserauslass unter einem Stausee mit einem Grundwasserdruck von bis zu 18 bar in teilweise verwittertem Fels geplant.

Hohe Grundwasserdrücke (>4 bar) beeinflussen einerseits die statische Bemessung und die konstruktive Auslegung der Tübbinge sowie das TBM-Design. Zudem wird mit zunehmendem Wasserdruck die zuverlässige Stützung der Ortbrüst schwieriger und der Werkzeugverschleiß größer, insbesondere bei EPB-TBMs. Einstiege in die Abbaukammer der TBM werden sehr viel aufwendiger, da zusätzliche Druckluftinstallationen und spezielle Gasgemische erforderlich werden. Zudem vermindert sich mit zunehmendem Luftdruck signifikant die verfügbare Arbeitszeit für das Druckluftpersonal.

Nachfolgend werden ausgewählte Tunnelprojekte mit einem Wasserdruck von mehr als 4 bar vorgestellt und einige dabei aufgetretene Schwierigkeiten erläutert. Eine Übersicht dieser Projekte zeigt Tabelle 1. Weitergehende Informationen können Holzhäuser et al. (2006) entnommen werden.

## **2 TBM-Projekte mit hohem Grundwasserdruck (>4 bar)**

### **2.1 South Bay Ocean Outfall Tunnel, San Diego**

Der 5,8 km lange South Bay Ocean Outfall Tunnel liegt auf ca. 4,3 km Länge unterhalb des Pazifiks, ca. 70 m unter dem Meeresspiegel. Der Tunnel verläuft auf ca. 12% der Strecke durch Sand und Kies mit Steinen und Blöcken, während 32% in schwach bis mäßig zementiertem schluffigem Sand bis sandigem Schluff und 56% in steifem bis hartem Ton bzw. Schluff liegen. Eingesetzt wurde eine EPB-TBM ( $\varnothing$  3,98 m), die aufgrund des Grundwasserdruckes von etwa 6 bis 7 bar mit 2 hintereinander angeordneten Förderschnecken ausgestattet war, um einen kontrollierten Druckabbau zwischen dem Stützdruck in der Abbaukammer und dem atmosphärischen Druck im Tunnelinneren zu ermöglichen. Der Vortrieb in den standfesten kohäsiven Böden war in der Regel unproblematisch. In den grobkörnigen Böden kam es jedoch zu mehreren Wassereintritten durch die Förderschnecken in den Tunnel hinein, als die Bodenconditionierung nicht zuverlässig funktionierte und der Stützdruck nicht mehr gehalten werden konnte. Der Vortrieb kam zum Erliegen. Durch Einsatz einer neuen Mixtur zur Bodenconditionierung, bestehend aus Schaum, Bentonitsuspension und Polymeren, gelang es schließlich, die erforderliche pastenartige Konsistenz des Erdbreies zu erzielen, die für den Druckaufbau erforderlich ist.

Das Projekt South Bay Ocean Outfall zeigt, dass mit einer geeigneten Bodenconditionierung ein Vortrieb mit einer EPB-TBM in überwiegend feinkörnigen, kohäsiven Böden auch bei einem Wasserdruck von 7 bar gelingen kann. Werkzeugwechsel wurden nur im kohäsiven Boden ausgeführt. Hierbei wurde Druckluft eingesetzt, wobei die Druckluftschleuse nur auf max. 3 bar ausgelegt war. Nur knapp schaffte es die Vortriebsmannschaft, eine ca. 600 m lange Strecke im Sand und Kies ohne Werkzeugwechsel zu überwinden. Sonst wären sehr zeit- und kostenaufwendige sowie risikobehaftete Zusatzmaßnahmen, wie z.B. Injektionen oder Bodenvereisung erforderlich geworden. Der Verzicht auf die Ausrüstung der TBM mit Druckluftinstallationen (z.B. für Mischgase bzw. Sättigungs-Technik), die Arbeiten unter Drücken >3 bar ermöglicht hätten, hat sich bei diesem Projekt glücklicherweise nicht negativ ausgewirkt.

Projekt-Name	South Bay Ocean Outfall, San Diego, USA	Kanal-Tunnel (französ. Seite), Frankreich	Storebaelt Tunnel, Dänemark	4. Röhre Elbtunnel, Hamburg	Wesertunnel, Dedesdorf
TBM Typ	EPB-TBM	3 EPB-TBMs	4 EPB-TBMs	Slurry-TBM	Slurry-TBM
TBM Hersteller	Mitsubishi Heavy Industry	1 x Robbins-Komatsu; 2 x Robbins-Kawasaki	Howden/Wirth	Herrenknecht	Herrenknecht
TBM Durchmesser	3,98 m	5,72 m (1x) 8,72 m (2x)	8,75 m	14,20 m	11,71 m
Tunnel Länge	5.795 m	15,6 km; 20 km; 18,9 km	2 x 7.412 m	2.561 m	2 x 1.645 m
Baugrund in Tunneltrasse und darüber	12% Sand, steinig + Kies, 14% schluffiger Sand, 18% sandiger Schluff, 56% steifer-harter schluffiger Ton und toniger Schluff	Kreide und kalkhaltiger Mergel, UCS 6-9 MPa, $k < 10^{-7}$ m/s	Mergelstein (stark geklüfteter Schluffstein, $k = 5 \times 10^{-4}$ m/s) und glaziale Moräne (sehr abrasiver Sand mit Kies und Kalkstein- bzw. Granitblöcken)	Glaziale Böden: Sand und Geschiebemergel mit Blöcken, Ton mit Sandlinsen und Blöcken	Enggestufte, z.T. lockere Sande mit Granitblöcken; Klei; Torf; steifer bis harter Ton; Geschiebemergel
Max. Überdeckung	58 m	90 m	45 m	35 m	20 m (unterm Deich)
Max. GW-Druck in Tunnelsohle	7,0 bar (gemessen)	11,0 bar (theoretisch)	8,0 bar (theoretisch) 6,3 bar (gemessen)	4,2 bar (gemessen)	4,3 bar (gemessen)
Max. TBM Schild Design-Druck	8,5 bar	11 bar Schild, 18 bar Schildschwanz	8,0 bar	6,0 bar	6,0 bar
Max. Außendruck Tunnelschale	7 bar	10 bar	8,0 bar	5,5 bar	6,0 bar
Max. aufgebrachter Stützdruck in Tunnelsohle beim Vortrieb (Slurry/Erdbrei)	7,3 bar	-3,5 bar (Vortrieb in Open-Mode)	meistens < 3 bar	5,0 bar	5,3 bar
Anzahl Interventionen für Werkzeugwechsel/Reparaturen	an 16 Stationen versucht, an 10 Stationen ausgeführt	mittlerer Abstand 1,2 km	nicht dokumentiert	2738	1400
Anzahl druckloser Interventionen	8	nicht dokumentiert	nicht dokumentiert, aber verwendet	nicht verwendet	nicht verwendet
Anzahl Interventionen unter Druckluft	2	nicht verwendet	nicht dokumentiert, aber verwendet	2738	1400
Anzahl Interventionen mit Mischgas	nicht verwendet	nicht verwendet	nicht verwendet	nicht verwendet	nicht verwendet
Anzahl Interventionen mit Mischgas + Sättigung	nicht verwendet	nicht verwendet	Sättigung war in Ausschreibung gefordert, wurde aber nicht auf TBMs installiert.	nicht verwendet	nicht verwendet
Max. aufgebrachter Stützdruck (Druckluft) während Interventionen	1,8 bar	0 bar (drucklos)	max: 2,7 bar meistens: 0 bar	4,5 bar	5,0 bar
TBM Besonderheiten	Möglichkeit für Vorausbohrung, Injektionen und Bodenvereisung an der Ortsbrust vorhanden	Doppelschild, eine insgesamt 11 m lange Förderschnecke mit Doppelkolbenpumpe auf TBM D=5,72 m und zwei Förderschnecken (7 und 10 m lang) auf TBMs D=8,72 m	2 Förderschnecken + Putzmeister Kolbenpumpe; 4-reihige Bürstendichtung	begehbare Schneidradarme für Werkzeugwechsel unter atmosphärischen Bedingungen; Rettungsshuttle konnte an Druckluftschleuse auf TBM angedockt werden	abgeschlossener Sohlbereich in Arbeitskammer: Trennung der Stützdruckkontrolle vom Materialaustag (2. Röhre)
Tunnelauskleidung	5 + 1 Stahlbeton-Tübbinge (D <sub>innen</sub> =3,35 m, t= 30 cm, L= 3,81 m)	5 + 1 Stahlbeton-Tübbinge (D <sub>innen</sub> = 7,6 m, t= 40 cm L=1,6 m)	6 + 1 Stahlbeton-Tübbinge (D <sub>innen</sub> = 7,70 m; t=40 cm; L=1,65 cm; B35)	8 + 1 Stahlbeton-Tübbinge, 2 Dichtungsrahmen (D <sub>innen</sub> =12,35 m; t=70 cm; L=2,0 cm)	6 + 1 Stahlbeton-Tübbinge (D <sub>innen</sub> =10,30 m; t=50 cm; L=1,50 cm)
Bemerkungen	Förderschnecken blockiert auf Grund von Blöcken; im Kies zeitweise unkontrollierter Zufluß von Wasser + Boden durch die Förderschnecke; dann Anpassung der Bodenkonditionierung	Hauptsächlich Open-Mode auf Grund von gering durchlässiger und standfester Kreide	Übermäßiger Verschleiß am Schneidrad, massiver Wasserzufluß während des Vortriebs, Überflutung von 2 TBMs und von 2 Tunneln; umfangreiche Grundwasser-Absenkung (Project 'Moses'), um den GW-Druck auf <3 bar zu reduzieren; 100% Mehrkosten und 2 Jahre Bauzeit-Verzug	Instabilität der Ortsbrust, Verbruch und dadurch Ausbläser bei 4,5 bar. Taucher-Einsatz für Unterwasser-Einsatz auf der TBM und in der Elbe.	Einsatz eines Endoskops zur Inspektion mit ferngesteuerter Kamera; Abgeschlossener Sohlbereich in Arbeitskammer ermöglichte Verbesserung der Vortriebsleistung
Bauzeit	1995-1999	1988-1991	1990-1994	1995-2000	1998-2002
Baufirma	Traylor Brothers	JV Bouyges, Dumez, SAE, SGE, Spie Batignolles	JV Monberg & Thorsen, Campenon Bernard, Dyckerhoff & Widmann, Kiewit Construction, Sogea	JV Biffinger+Berger, Dywidag, Heitkamp, Hochtief, Philipp Holzmann, Wayss & Freitag, Züblin	JV Hochtief, Philipp Holzmann, L. Freitag, Hecker, Oetken
Literatur	Robinson & Jatczak (1999)	Dumont (1991)	Darling (1993); Biggart (1995); Zell (1995)	Becker (1999)	Babendererde et al. (2000); Wirtz (2004)

**Tabelle 1a** TBM-Tunnelprojekte mit sehr großem Wasserdruck

Projekt-Name	Westerschelde Tunnel, Niederlande	St. Petersburg, Red Line, Russland	Nara Prefecture Water Conveyance Tunnel, Japan	Tokyo Wan Aqua Line Tunnel, Japan
TBM Typ	2 Slurry-TBMs	Slurry-TBM	EPB-TBM	8 Slurry-TBMs
TBM Hersteller	Herrenknecht	Voest Alpine	Japanischer Hersteller	3-Kawasaki Heavy Industries, 3-Mitsubishi, 1 Hitachi, 1-IHL = 8 total
TBM Durchmesser	11,33 m	7,40 m	3,95 m	14,14 m
Tunnel Länge	2 x 6.600 m	2 x 800 m	1.151 m	2 x (4,6 km + 4,5 km)
Baugrund in Tunneltrasse und darüber	Mittel- und Feinsande; steifer Ton, dichte Sande in tiefen Abschnitten	Glaziale Böden: Lehm und Sand	25% Kohäsive schluffige-tonige Kiese mit Steinen und kleinen Blöcken, 75% Kompaktierter kiesiger Sand	weiche marine schluffige bis sandige Tone, darunter dichte kohäsionslose bis leicht zementierte Sande
Max. Überdeckung	35 m	55 m	135 m	20 m
Max. GW-Druck in Tunnelsohle	6,4 bar (gemessen)	5,5 bar (gemessen)	11,0 bar (gemessen)	6,0 bar (gemessen)
Max. TBM Schild Design-Druck	8,0 bar	8,0 bar	11 bar	9 bar
Max. Außendruck Tunnelschale		6,0 bar	11 bar	6 bar
Max. aufgebracht Stützdruck in Tunnelsohle beim Vortrieb (Slurry/Erdbreie)	7,4 bar	6,4 bar	11 bar	6,5 bar
Anzahl Interventionen für Werkzeugwechsel/Reparaturen	ca. 817	nicht dokumentiert	3	keine
Anzahl druckloser Interventionen	1	nicht dokumentiert, aber verwendet	3	keine
Anzahl Interventionen unter Druckluft	ca. 800	nicht dokumentiert, aber verwendet	Druckluft-Einsatz ist nicht dokumentiert	keine
Anzahl Interventionen mit Mischgas	10	nicht dokumentiert, aber verwendet	nicht verwendet	keine
Anzahl Interventionen mit Mischgas + Sättigung	6	nicht verwendet	nicht verwendet	keine
Max. aufgebracht Stützdruck (Druckluft) während Interventionen	6,9 bar	6,0 bar	Druckluft-Einsatz ist nicht dokumentiert	kein Einsatz von Druckluft
TBM Besonderheiten	Mischgas und Sättigungs-Einrichtungen inkl. Shuttle und Habitat	Druckluft-Shuttle konnte an TBM Schleuse angedockt werden, 4-reihige Bürstendichtung	4-reihige Bürstendichtung	Möglichkeit für vorausseilende Injektionen und Bodenvereisung, 4-reihige Bürstendichtung (12 bar Design-Druck)
Tunnelauskleidung	7 + 1 Stahlbeton-Tübbing (D <sub>innen</sub> =10,10 m; t=45 cm; L=2,0 cm)	5 + 1 Stahlbeton-Tübbing (t=35 cm; L=1,40 cm)	Stahl-Tübbing, D <sub>außen</sub> =3650 mm, L=1,0 m. Final lining: verschweißte Stahlrohre D <sub>innen</sub> =2400 mm	11+1 Stahlbeton-Tübbing (D <sub>innen</sub> = 11,9m, t= 65 cm L=1,5 m)
Bemerkungen	Erstmaliger Einsatz von Tauchern für Arbeiten am Schneidrad unter Druckluft mit Mischgasen; Erstmaliger Einsatz eines Shuttle-Transfer-Systems für Druckluftpersonal	Lange Stillstände auf Grund von kurzen Arbeitszeiten bei hohen Drücken von bis zu 5,5 bar und Verwendung von Mischgasen <u>ohne</u> Saturation	3 Förderschnecken, Schlamm (Mud)-Zufuhr in die Abbaukammer, Wasserzufluß in den Tunnel	Unterirdisches Andocken von 8 TBMs mit Hilfe des Gefrierverfahrens in 2 Tunneln mit je 4 Einzelvortrieben.
Bauzeit	1998-2001	2002-2004	1984-1988 (inklusive Sprengvortrieb)	1994-1997
Baufirma	JV Bredero Infrabow, Franki, Heijmans, Voormolen, Philip Holzmann, Wayss & Freytag	JV Impregilo/ NCC	JV Okumaragumi + Obayashigumi	24 Baufirmen, darunter: Kajima, Taisei, Nishimatsu, Tobishima, Obayashi, Maede, Kumagai and Shimizu
Literatur	Braach et al. (2003)	Wallis (2002)	Kawai & Tunabe (1988)	Funazaki et al. (1999)

**Tabelle 1b** TBM-Tunnelprojekte mit sehr großem Wasserdruck (Fortsetzung)

## 2.2 Kanaltunnel (französische Seite)

Auf der französischen Seite des Kanaltunnels wurden 3 TBMs eingesetzt, die für einen Wasserdruck von bis zu 11 bar ausgelegt waren. Der Vortrieb wurde mit einer Robbins-Komatsu EPB-TBM ( $\varnothing$  5,72 m) für den Service-Tunnel begonnen, die auf den ersten 5 km mit einem Stützdruck von 3 bis 4 bar betrieben wurde. Die darauf folgenden ca. 11 km wurden überwiegend im Open-Mode vorgetrieben und nur vereinzelt in Störungszonen im Closed-Mode. Durch vorausseilende Injektionen wurde die Durchlässigkeit der Kreide vermindert. Dadurch hatte die Kreide im Allgemeinen eine geringere Durchlässigkeit, als in der Planung angenommen. Der Wasserzustrom im Open-Mode-Betrieb betrug maximal 80 l/s. Werkzeugwechsel wurden im Open-Mode ohne Einsatz von Druckluft ausgeführt. Aus dem Service-Tunnel heraus wurde die Kreide vor den beiden Haupttunneln (Running Tunnels) vorausseilend injiziert, sodass beide Haupttunnel durchgängig im Open-Mode ohne Stützdruck aufgefahren werden konnten. Die 3 Vortriebe auf der französischen Seite des Kanaltunnels haben gezeigt, dass aufgrund der Standfestigkeit und der geringen Durchlässigkeit der Kreide überwiegend ein Tunnelvortrieb mit aktiver Ortsbruststützung nicht erforderlich war. Die Investitionen für TBM-Einrichtungen, die im Bedarfsfall auch einen Closed-Mode-Betrieb ermöglicht haben, erwiesen sich in Anbetracht der möglichen Risiken als richtige Entscheidung.

## 2.3 Storebaelt-Tunnel, Dänemark

Der 7412 m lange Storebaelt Tunnel in Dänemark verläuft in einer Tiefe vom max. 80 m unter dem Meeresspiegel. Für den Bau dieses Eisenbahntunnels wurden vier baugleiche EPB-TBMs  $\varnothing$  8,75 m eingesetzt mit zwei hintereinander angeordneten Förderschnecken. Zu Beginn behinderte extremer Verschleiß in abrasivem Geschiebemergel die Vortriebsarbeiten. Die Folge waren häufige Werkzeugwechsel im Abstand von etwa 75 Ringen (124 m). Ein weiteres Problem war die unzureichende Bodenkonditionierung, um einen ausreichenden Bodenpfropfen in der Förderschnecke zu bilden, der für den Aufbau eines Stützdruckes notwendig ist. Der Vortrieb wurde daher vorwiegend im Open-Mode ausgeführt, die Abbaukammer war dabei etwa zu  $\frac{3}{4}$  gefüllt. Zufließendes Grundwasser wurde dazu verwendet, den abgebauten Boden in eine förderbare Konsistenz zu verwandeln (Zell, 1995). Da es mit der installierten Maschinenteknik zuweilen nicht gelang, den erforderlichen Stützdruck aufzubauen, wurde bei zwei TBMs nachträglich eine Doppelkolbenpumpe hinter der ersten Förderschnecke eingebaut.

Weitere Schwierigkeiten bereiteten die Werkzeugwechsel, da die installierten Druckluftschleusen nur auf max. 3 bar ausgelegt waren, obwohl die Ausschreibung den Einsatz der Saturations-Technik vorgesehen hatte, die für wesentlich höhere Drücke geeignet ist. Die kurze Standzeit des Gebirges machte Interventionen schwierig. Häufig mussten umfangreiche Bodenverbesserungsmaßnahmen ausgeführt werden.

Bei Vortriebsmeter 350 trat ein plötzlicher, unerwarteter Wasserzufluß auf, als die TBM für Wartungsarbeiten am Schneidrad und am Steinfang angehalten worden war. An der

ungestützten Ortsbrüst stand Upper Till an (15% Ton). Zufließendes Wasser wurde abgepumpt. Wasserschläuche und Stromkabel waren durch die offenen Schleusentüren in die Abbaukammer gelegt und ein Inspektionsdeckel am Schneckenförderer war geöffnet, als ein plötzlicher Wassereinbruch an der Ortsbrüst stattfand. Wasser und Boden strömten in das Innere der TBM, überfluteten die TBM, den Startschacht und auch den Tunnel und die TBM der Nachbarröhre. Glücklicherweise wurde niemand verletzt, jedoch erforderten die Reparaturarbeiten einen 8-monatigen Stillstand.

Es folgten noch weitere 15 ähnliche Verbrüche, die eine lokale Tieferlegung des Meeresbodens verursachten, jedoch war hierbei die Abbaukammer, im Gegensatz zu vorgenanntem Beispiel, abgesperrt, sodass keine weiteren Schäden aufgetreten sind. Schließlich wurde ein umfangreiches Programm zur Grundwasserabsenkung gestartet (genannt „MOSES“). Für insgesamt 32 Mio. \$ wurden im Abstand von 200 m insgesamt 43 Brunnen ( $\varnothing$  400 mm, L = 35 bis 115 m) eingebaut und mit einer Förderrate von insgesamt 3.400 m<sup>3</sup>/h betrieben (Biggart, 1995).

Die Erfahrungen am Storebaelt-Tunnel zeigen, dass EPB-TBMs in nicht standfesten, abrasiven Böden unter hohem Grundwasserdruck an ihre Grenzen stoßen, wenn wichtige Komponenten, wie z.B. Einrichtungen zur Bodenconditionierung und Einrichtungen für Drucklufteinstiege (z.B. Saturations-Technik) fehlen. Die unterschiedlichen Schwierigkeiten beim Tunnelvortrieb führten zu einem Zeitverzug von 2 Jahren und zu Mehrkosten von ca. \$550 Mio., bei ursprünglich kalkulierten Baukosten von \$520 Mio.

#### 2.4 4. Röhre Elbtunnel, Hamburg

Die 4. Röhre Elbtunnel war ein Meilenstein für den Tunnelbau mit Slurry-TBMs auf Grund des großen TBM-Durchmessers von 14,20 m, der geringen Überdeckung von minimal 7 m und dem hohen Grundwasserdruck von max. 4,2 bar.



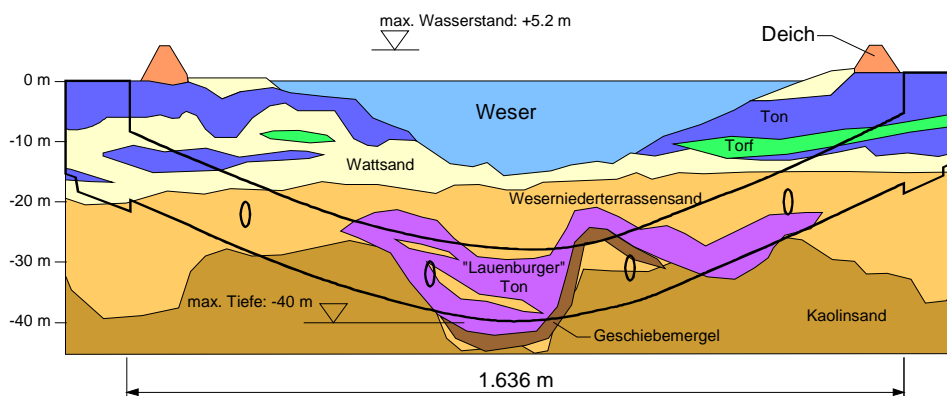
**Bild 1** Arbeiten unter Druckluft (4. Röhre Elbtunnel) - Schweißen auf der Rückseite des Schneidrades aufgrund von sehr großem Verschleiß (links) sowie Reparaturarbeiten am Steinbrecher (rechts)

Der 2.561 m lange Autobahn-Tunnel wurde in glazialen Böden mit Sanden, Geschiebemergel mit Blöcken und Ton mit Sandlinsen aufgefahren. Auf Grund der abrasiven Böden waren häufig Interventionen erforderlich (Bild 1). Übermäßiger Verschleiß entstand an den Abbauwerkzeugen und an der Rückseite des Schneirades, das stets eine Ansammlung von Ausbruchmaterial in der Sohle der Abbaukammer durchpflügte. Die Dicke der Schneiradstruktur verminderte sich dadurch von 80 mm auf 15 mm. Am tiefsten Punkt der Tunneltrasse hatte das Druckluft-Personal bei einem Luftdruck von 4 bis 4,5 bar lediglich 80 min Zeit zum Werkzeugwechsel und musste dann zur Dekompression 2 h in der Druckluftschleuse verbringen.

Ein Zwischenfall ereignete sich etwa 50 m vor dem Punkt, an dem die geringste Überdeckung erreicht wurde (Becker, 1999). Hier war die TBM auf Grund von erhöhtem Drehmoment angehalten worden und die Räum- und Halter mussten gewechselt werden. Dies dauerte etwa 5 Wochen. Unmittelbar vor dem Beenden der Reparaturarbeiten brach die Ortsbrust schollenförmig ein, es entwickelte sich dann ein Verbruch, gefolgt von einem Ausbläser. Es entstand hierbei ein Verbruchkrater mit einem Volumen von 500 m<sup>3</sup>. Dieses Beispiel zeigt die Variabilität der Standzeit der Ortsbrust, die zwischen einer Stunde und mehreren Wochen betragen kann. Mit zunehmender Zeit trocknet die Druckluft die Ortsbrust aus, dringt in die Ortsbrust ein und vermindert dadurch die für die Stützung notwendige Druckdifferenz (Babendererde et al., 2000). Das Beispiel der 4. Röhre Elbtunnel zeigt, dass lange Stillstände an einer Station möglichst vermieden werden sollten, um das Risiko einer plötzlichen Instabilität zu vermindern.

## 2.5 Wesertunnel, Dedesdorf

Der 1,6 km lange Wesertunnel südlich von Bremerhaven unterquert die Weser in einer Tiefe von ca. 45 m unter dem max. Flusswasserstand (Bild 2). Die beiden parallelen Tunnelröhren wurden mit einer Slurry-TBM ( $\varnothing$  11,71 m) aufgefahren. Hierbei wurden glaziale Böden durchfahren, bestehend aus Sanden, Klei, Torf, Ton und Geschiebemergel, sowie eingelagerte Granitblöcke. Die abrasiven Böden erforderten umfangreiche Wartungsarbeiten unter 'normaler' Druckluft, die mit max. 4,5 bar Druck für Arbeiten



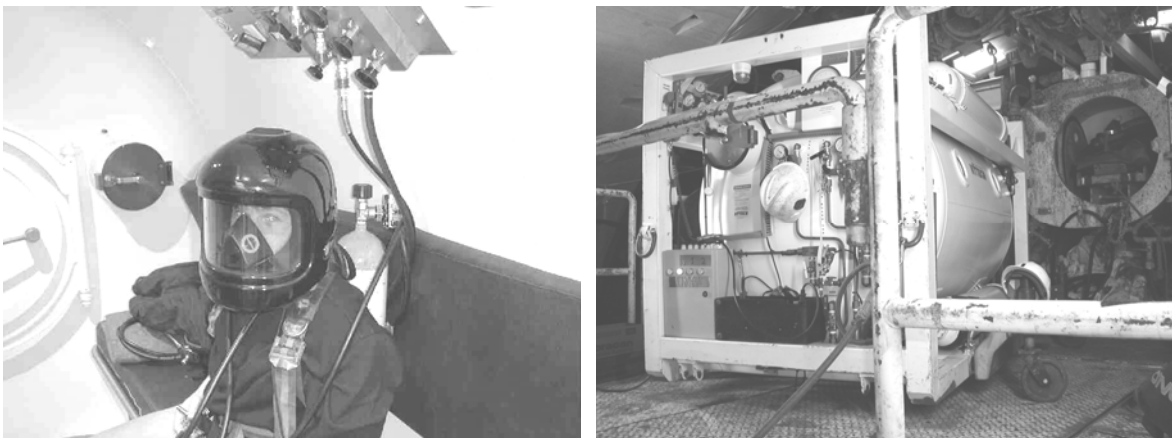
**Bild 2** Tunneltrasse des Wesertunnels

am Schneidrad und mit max. 5 bar für Arbeiten am Steinbrecher ausgeführt wurden. Zusätzlich wurden Taucher für Arbeiten in der Bentonitsuspension mit max. 5 bar Druck eingesetzt. Diese Arbeiten wurden durch die fehlende Sicht nicht sonderlich erschwert. Insgesamt wurden 5.000 Druckluftstunden ausgeführt, wobei 600 h unter einem Druck von mehr als 3,6 bar ausgeführt wurden. Es traten nur 15 kleinere Fälle mit Drucklufterkrankungen auf. Alle ausnahmslos unterhalb 3,6 bar.

## 2.6 Westerscheldetunnel, Niederlande

Der 6,6 km lange Westerscheldetunnel ist das erste Projekt, bei dem die Sättigungstechnik für TBM-Interventionen eingesetzt wurde. Der Tunnel ( $\varnothing$  11,3 m) liegt max. 60 m unter dem Meeresspiegel, sodass 'normale' Druckluft auf Grund des Druckniveaus nicht mehr eingesetzt werden konnte. Bei der aus Offshore-Projekten bekannten Sättigungs-Technik halten sich Taucher über einen längeren Zeitraum (bis zu 28 Tage) unter Überdruck (ca. 4,5 bar) in Wohnkammern auf. Mit Hilfe von zwei Transport-Shuttles werden die Taucher im Wechsel in den Tunnel auf die TBM gebracht. Der Shuttle dockt an die Druckluftschleuse der TBM an, die Taucher werden auf den erforderlichen Arbeitsdruck (>6 bar) gebracht und können dann ca. 4 h lang Wartungsarbeiten an der TBM ausführen. Die Atemluft besteht aus Mischgas, einer Mischung aus Helium und Sauerstoff (Heliox) oder aus Helium, Stickstoff und Sauerstoff (Trimix), je nach Druckstufe. Die Taucher tragen hierbei einen speziellen Helm, der mit zwei Atemluftreglern für die Mischgasversorgung und mit einem steuerbaren Kühlungssystem ausgestattet ist, da in der Abbaukammer Temperaturen bis 50°C auftreten können (Bild 3). Insgesamt wurden 6 Einsätze mit Sättigungs-Technik durchgeführt mit einer Arbeitszeit unter Sättigung von insgesamt 40 Tagen bei Drücken von max. 6,9 bar. Die Dekompressionszeit betrug jeweils 4 Tage. Zusätzlich wurden 10 Einsätze mit Mischgas (ohne Sättigung) durchgeführt sowie 1652 Stunden Arbeiten unter 'normaler' Druckluft.

Insgesamt sind 5 Fälle mit Drucklufterkrankungen aufgetreten bei Arbeiten unter 'normaler' Druckluft, die alle in der Krankenschleuse behandelt werden konnten.



**Bild 3** Einsatz vom Mischgas am Westerscheldetunnel - Spezialhelm für Tauchereinsatz (links) und Shuttle angedockt an die Druckluftschleuse der TBM (rechts)



## **2.7 Red Line St. Petersburg, Russland**

Der 800 m lange Tunnel für die Metro in St. Petersburg liegt bis zu 65 m unter Gelände in unmittelbarer Nähe zum Fluss 'Neva'. Zu Beginn des Tunnelvortriebs mit einer Slurry-TBM ( $\varnothing$  7,4 m) wurden Werkzeugwechsel ohne Druckluft ausgeführt, da der anstehende Tonstein standfest war, ohne jeglichen Wasserzufluss. In dem darauf folgenden Abschnitt mit durchlässigen Sanden, Schluffen und Tonen wurden Interventionen unter Druckluft bzw. unter Mischgas ausgeführt. Beim Einsatz von Mischgas trugen die Arbeiter spezielle Atemmasken. Ein Transfer-Shuttle konnte an die Druckluftschleuse auf der TBM angedockt werden, um die Arbeiter in die Dekompressionsschleuse zu bringen. Bei einem Druck von 5,5 bar betrug die Arbeitszeit etwa 1,5 h, gefolgt von einer Dekompressionszeit von etwa 5 h. Dadurch verlangsamte sich der Vortrieb, da im 3-Schichtbetrieb nur 4,5 h Brutto-Arbeitszeit je Arbeitstag möglich waren. Bei jedem Einstieg wurden etwa 15 bis 25 Minuten benötigt, um den Luftdruck aufzubringen, Sicherheitsbolzen und -riegel an der Tauchwandtür zu entfernen und um die Abbaukammer für den Einstieg vorzubereiten. Demnach betrug die für den eigentlichen Werkzeugwechsel verfügbare Netto-Arbeitszeit nur ca. 3,5 h pro Tag. So verlängerte sich ein Werkzeugwechsel, der unter atmosphärischen Bedingungen ca. 5 Tage gedauert hätte, auf etwa einen Monat bei 5,5 bar Luftdruck.

Das Projekt in St. Petersburg zeigt, welche Schwierigkeiten und Verzögerungen bei Drücken von 5,5 bar auftreten können, wenn keine Saturations-Technik eingesetzt wird. Bei zukünftigen Projekten mit vergleichbaren Bedingungen sollte daher die Saturations-Technik bereits in der Planung vorgesehen werden.

## **2.8 Nara Prefecture Water Conveyance Tunnel, Japan**

Der 1.151 m lange Nara Prefecture Water Conveyance Tunnel wurde mit einer EPB-TBM ( $\varnothing$  3,95 m) aufgeföhren, die mit 3 hintereinander angeordneten Föhderschnecken ausgerüstet war, um einen Vortrieb im Lockergestein (Kies mit Steinen und Blöcken in kohäsiver Matrix, Sande und Kiese mit großer Durchlässigkeit bzw. harte Tone) bei einem Grundwasserdruck von max. 11 bar zu ermöglichen. Zur Bodenconditionierung wurde Bentonitsuspension in die Abbaukammer gepumpt.

Probleme entstanden, als das Ausbruchmaterial dünnflüssig aus der Föhderschnecke herausschoss und nachfolgend ein hoher Grundwasserzufluss in den Tunnel stattfand. Als Gegenmaßnahme wurden die Schieberöffnungen zwischen den Föhderschnecken und der Auslass hinter der 3. Föhderschnecke verkleinert. Dadurch reduzierte sich jedoch auch die Vortriebsgeschwindigkeit. Der Einsatz von Druckluft während Inspektionen ist nicht dokumentiert. Auf der TBM war keine Druckluftschleuse installiert. Werkzeugwechsel wurden daher wahrscheinlich nur in standfestem und gering durchlässigem Gebirge unter atmosphärischen Bedingungen durchgeführt.

## **2.9 Tokyo Bay Wan Aqua Line, Japan**

Die Tokyo Bay Wan Aqua Line ist eine Mautstrasse, die die Bucht von Tokyo mit zwei etwa 9 km langen Tunnelröhren in einer Tiefe von ca. 60 m unter dem Meeresspiegel unterquert. Es wurden insgesamt 8 Slurry-TBMs ( $\varnothing$  14,14 m) eingesetzt. Der Boden besteht aus weichen schluffigen Tonen bzw. sandigen Tonen bis hin zu leicht verfestigten Sanden. Die TBMs waren auf einen Stützdruck von max. 9 bar ausgelegt und waren mit Druckluftschleusen für max. 3 bar ausgestattet. Aus Angst vor einem Druckluft-Ausbläser waren die Tunnelstrecken vergleichsweise kurz. In der Mitte der Bucht wurde eine künstliche Insel errichtet, von der aus 4 Vortriebe begonnen wurden. Glücklicherweise waren keine Interventionen erforderlich, da sonst umfangreiche Zusatzmaßnahmen wie z.B. der Einsatz des Gefrierverfahrens erforderlich geworden wären. Jeweils zwei TBMs führen aufeinander zu. Nach dem Zusammentreffen der TBMs wurden deren Einbauten demontiert. Unter dem Schutze eines Vereisungskörpers wurden schließlich die beiden Schneidräder unterirdisch zurückgebaut und die endgültige Tunnel-Verbindung errichtet.

Das Projekt Tokyo Bay Wan Aqua Line zeigt, dass Slurry-TBM-Vortriebe mit großem Durchmesser in weichem Ton und in nicht-abrasivem Sand auch bei 6 bar Grundwasserdruck und bei geringer Überdeckung (16 m) erfolgreich und ohne Druckluftinterventionen ausgeführt werden können.

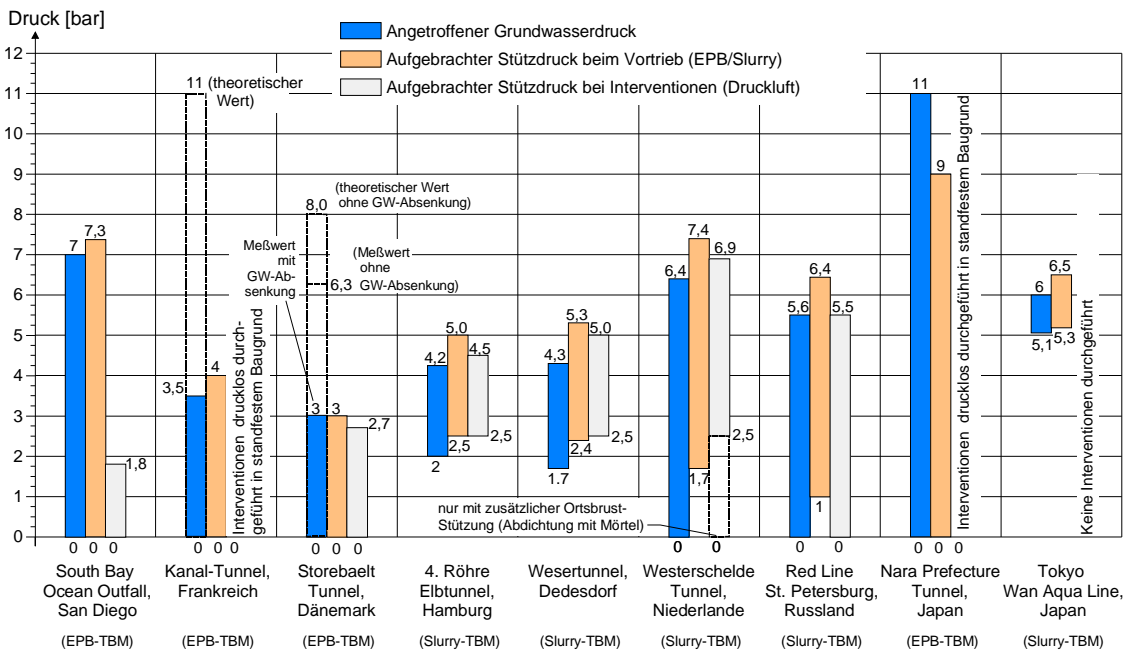
## **3 Vergleich der TBM-Projekte mit hohem Grundwasserdruck**

Die vorgenannte Übersicht zeigt, dass bei einigen Projekten (wie z.B. Storebaelt-Tunnel und Kanal-Tunnel) der angetroffene Wasserdruck auf Grund einer Grundwasserabsenkung bzw. der geringen Durchlässigkeit des Baugrundes sehr viel geringer war, als in der Planung angenommen. Bei zukünftigen Projekten sollte im Zuge der Baugrunderkundung der zu erwartende Grundwasserdruck und der erwartete Wasserzufluss möglichst zutreffend ermittelt werden.

Während des Vortriebs war bei allen Projekten der aufgebrachte Stützdruck im Allgemeinen knapp oberhalb des Grundwasserdruckes, um die Stabilität der Ortsbrust sicherzustellen, sofern diese nicht ohnehin standfest war (Bild 4).

Bei Interventionen gibt es hingegen eine große Bandbreite der aufgebrachten Drücke. Bei einigen Projekten, wie z.B. dem South Bay Ocean Outfall, dem Nara Prefecture-Tunnel, dem Storebaelt-Tunnel und dem Kanal-Tunnel wurden Interventionen ausnahmslos in standfestem und gering durchlässigem Baugrund ohne Druckluft bzw. mit geringem Luftdruck ausgeführt. Bei allen anderen Projekten lag der aufgebrachte Luftdruck in der gleichen Größenordnung wie der Grundwasserdruck bzw. geringfügig darüber.

Nur bei zwei Projekten wurden Mischgase eingesetzt - beim Westerscheldetunnel und in St. Petersburg. Bis dato gibt es erst ein Tunnelprojekt, bei dem die Saturations-Technik eingesetzt wurde (Westerscheldetunnel).



**Bild 4** Projektübersicht mit angetroffenem Grundwasserdruck und aufgebrachtem Stützdruck (EPB/Slurry bzw. Druckluft)

#### 4 Druckbereiche für Arbeiten unter Druckluft, Mischgas bzw. Saturation

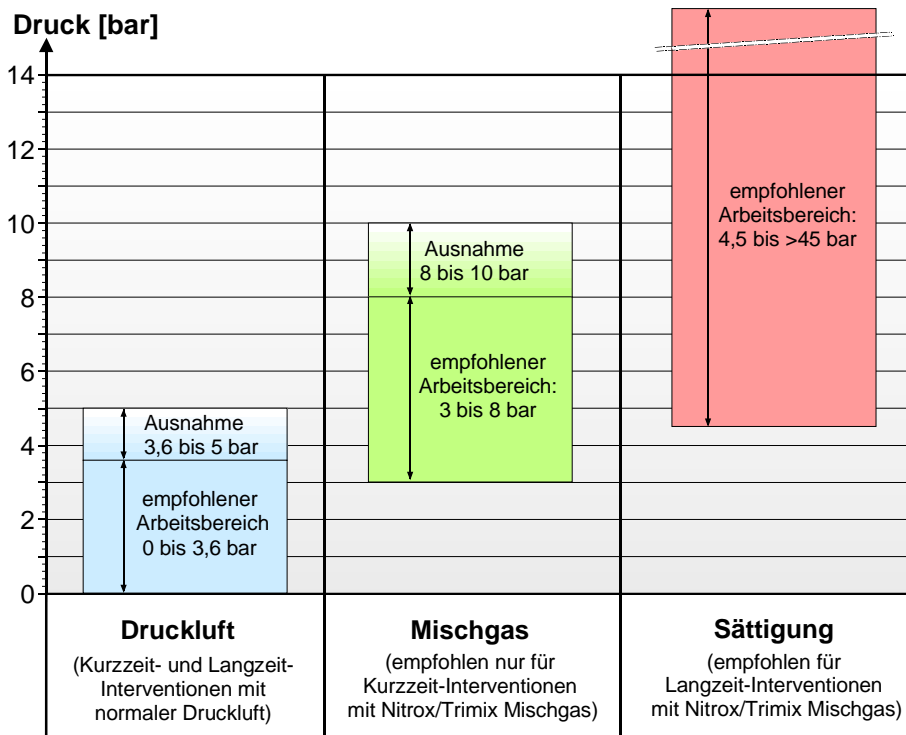
Für Arbeiten unter Druckluft, Mischgas bzw. Saturation gibt es typische Druckbereiche (Bild 5). 'Normale' Druckluft wird empfohlen für Arbeiten bis 3,6 bar. Dies ist die obere Grenze entsprechend der deutschen Druckluftverordnung. In England und in großen Teilen der USA liegt der obere Grenzwert für den Einsatz von Druckluft bei 3,0 bar. Ausnahmegenehmigungen wurden für einzelne Projekte, wie z.B. bei der 4. Röhre Elbtunnel und beim Wesertunnel, beantragt und erteilt, um in ausgewählten Streckenabschnitten und unter besonderen Auflagen 'normale' Druckluft bis max. 5,0 bar einzusetzen.

Bei Verwendung von Mischgasen können im Vergleich zur 'normalen' Druckluft etwas längere Arbeitszeiten erreicht werden. Mischgase können daher für kurze Interventionen wie z.B. für Inspektionen bei Drücken bis 8 bar eingesetzt werden, in Ausnahmefällen auch bis 10 bar.

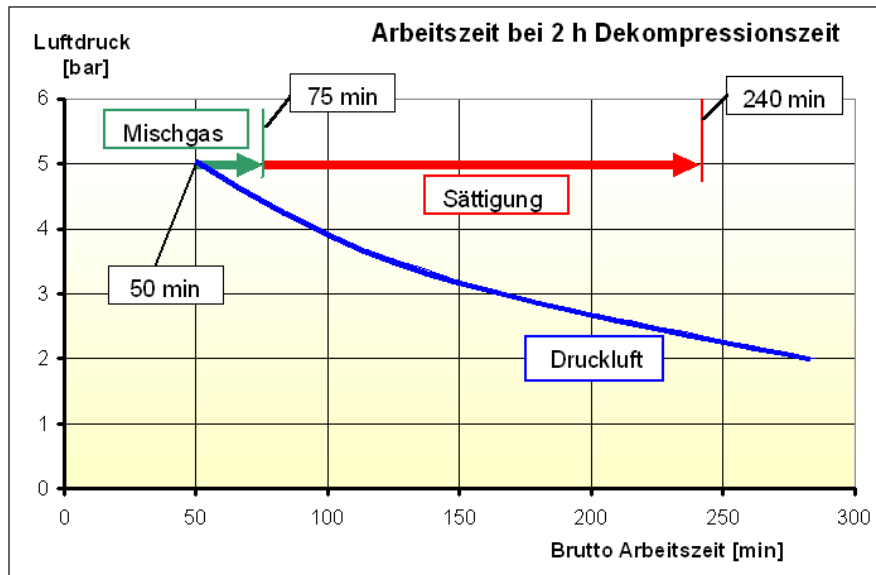
Für längere Reparaturarbeiten oder mehrfache Werkzeugwechsel sollten bei Drücken von mehr als 4,5 bar Mischgase unter Saturation verwendet werden. Bei lang andauernden Saturations-Einsätzen wird der gleiche Helm verwendet wie bei kurzen Mischgas-Einsätzen, jedoch sind zusätzlich ein Transfer-Shuttle und eine Wohnkammer erforderlich.

Mit zunehmendem Druck vermindert sich die verfügbare Arbeitszeit erheblich. Üblicherweise wird eine maximale Dekompressionszeit von 2 h angestrebt, die nicht über-

schritten werden sollte, um den Aufenthalt in einer vergleichsweise kleinen Schleuse und das Tragen der Sauerstoffmaske während der Dekompression zeitlich zu begrenzen.



**Bild 5** Empfohlene Druckbereiche für den Einsatz von normaler Druckluft, Mischgas und Mischgas unter Sättigung bei TBM-Vortrieben



**Bild 6** Arbeitszeit bei 2 h Dekompressionszeit und Einsatz von normaler Druckluft im Druckbereich von 2 bis 5 bar; Verlängerung der Arbeitszeit durch Einsatz von Mischgas bzw. Mischgas unter Sättigung bei 5 bar Luftdruck

Die Brutto-Arbeitszeit bei 3 bar in 'normaler' Druckluft beträgt 2:45 h (bei 2 h Dekompression). Bei gleich bleibender Dekompressions-Zeit vermindert sie sich bei 4 bar auf 1:35 h und beträgt bei 5 bar nur noch 50 min (Bild 6). Zudem ist die Netto-Arbeitszeit auf Grund der Vorbereitungsarbeiten (siehe Kap. 2.7) jeweils etwa 15 bis 20 Minuten kürzer. Das bedeutet, dass bei 5 bar die Verwendung von 'normaler' Druckluft' nur für eine kurze Inspektion geeignet ist, nicht aber für größere Wartungs- oder Reparaturarbeiten, da dies die Stillstandszeiten erheblich verlängern würde. Bei der Verwendung von Mischgas an Stelle von 'normaler' Druckluft verlängert sich die Brutto-Arbeitszeit bei 5 bar um 50% auf 75 Minuten. Dadurch werden kleinere Wartungsarbeiten ermöglicht.

Für längere Wartungs- oder Reparaturarbeiten wird der Einsatz der Saturations-Technik empfohlen, die eine Arbeitszeit je Team von 4 h ermöglicht. Werden 2 Teams eingesetzt, ist dadurch eine tägliche zusammenhängende Arbeitszeit von 8 h möglich. Dies ist ein wesentlicher Vorteil.

## **5 Zusammenfassung**

Basierend auf den Erfahrungen von 9 ausgeführten Tunnelprojekten im Lockergestein bzw. im Fels bei einem Grundwasserdruck von 4 bis maximal 11 bar, können folgende Aspekte zusammengefasst werden:

- Hohe Grundwasserdrücke (>4 bar) erschweren Tunnelvortriebe und erfordern Spezialkenntnisse während der Planung und bei der Ausführung.
- TBM, Tunnel-Ausrüstung und Vortriebsprozeduren sollten das Aufbringen eines adäquaten Stützdruckes zu jeder Zeit während des Vortriebs und bei Interventionen ermöglichen, um dem Grundwasserdruck entgegenzuwirken.
- Wenn entsprechende Komponenten nicht auf der TBM installiert sind, können erhebliche Vortriebsprobleme, Bauzeitverlängerung und Mehrkosten entstehen, wie z.B. beim Storebaelt-Tunnel.
- Tunnelvortrieb in festen, feinkörnigen, kohäsiven Böden bzw. im Fels unter hohem Grundwasserdruck ist im Allgemeinen für Slurry- und EPB-TBMs unproblematisch, da die Ortsbrust standfest ist und die Menge an zufließendem Wasser auf Grund der geringen Durchlässigkeit gering ist.
- In grobkörnigem Boden oder in nicht standfestem Fels ist eine aktive Ortsbruststützung erforderlich, um während des Vortriebs und bei Interventionen die Stabilität der Ortsbrust zu gewährleisten und Mehrausbruch zu verhindern.
- Eine zuverlässige Ortsbruststützung ist mit Slurry-TBMs leichter zu erreichen. Bei EPB-TBMs sind Anpassungen der Bodenconditionierung er-

forderlich, die insbesondere bei sehr raschem Wechsel der Baugrundeigenschaften schwierig sind. Die Folge können Wassereinbrüche und Mehrausbruch sein, wie z.B. bei den vorgestellten Projekten in San Diego, Stoerebaelt Tunnel und Nara Prefecture Tunnel.

- In Abhängigkeit von der Höhe des Grundwasserdruckes, der Abrasivität und Standzeit des Baugrundes und der Länge der jeweiligen Tunnelabschnitte, sollten auf der TBM Installationen für Interventionen mit 'normaler' Druckluft, Mischgas oder Mischgas mit Saturation vorhanden sein.
- Nur in sehr festen, gering durchlässigen Böden oder in standfestem Fels ist das Risiko von drucklosen Interventionen unter atmosphärischen Bedingungen vertretbar. Jedoch sollten auch dann Vorkehrungen vorbereitet sein, um bei Bedarf sofort einen adäquaten Stützdruck aufbringen zu können oder Baugrundverbesserungen auszuführen.

## **6 Literatur**

Babendererde, S., Babendererde, J., Holzhäuser, J. (2000)

Difficulties with operation of slurry tunnel boring machines. In Levent Ozdemir (ed.), North American Tunneling 2000, Proc., Boston, 6-11 June 2000, Rotterdam, Balkema, 317-326

Becker, C. (1999)

Recent application of Slurry- and EPB-Technique in Europe. RETC, Proc., Orlando 21-23 June 1999, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton CO, USA, 857-864

Biggart, A. (1995)

Light at Storebaelt Tunnel end. Tunnels & Tunnelling International, Sep 1995, 34-36

Braach, O., Frietzsche, W., Gürkan, E. (2003)

Westerschelde Tunnel. In R. Robinson and J. Marquardt (ed.), RETC, Proc., New Orleans 2003, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, CO, USA, 204-219

Darling, P. (1993)

Coming clean over Storebaelt. Tunnels & Tunnelling International, Oct 2003, 18-26.

Dumont, P. (1991)

Channel Tunnel Project French Works. In Wightman W.D. and McCarry D.C. (ed.), RETC, Proc., Seattle 1991: C 43. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, CO, USA, 763-773

Funazaki, T., Nakamura T., Imaishi, T., Miki, K. (1999)

Underground Shield Tunnel Connection Work in Tokyo Wan Aqua-Line Construction. In Hilton, D.E. and Samuelson, K. (eds.), RETC, Proc., 1999: C40, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, CO, USA, 629-644

Holzhäuser, J., Hunt, S.W., Mayer C. (2006)

Global experience with soft ground and weak rock tunnelling under very high groundwater heads. Proc. of the North American Tunneling Conference in Chicago: 10.-15.6.2006, Balkema, Rotterdam, 277-289

Kawai, M., Tanabe, H. (1988)

Penetrating saturated gravel deposits on the “Central tectonic line” by shield method in execution of construction work – Nara Prefecture Water Conveyance Tunnel, construction work, work section 1. Tunnel & Underground 19(2) (auf Japanisch), Übersetzung von Parsons Engineering Science Inc.

Robinson, B. & Jatzak, M. (1999)

Construction of the South Bay Ocean Outfall. In D.E. Hilton & K. Samuelson (eds.), RETC, Proc., Orlando 21-23 June 1999: C38, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, CO, USA, 675-714

Wallis, S. (2002)

Rebuilding the Red Line at St Petersburg. Tunnels & Tunnelling International, January 2002.

Wirtz, C. (2004)

TBM development at the Weser Tunnel. Tunnels & Tunnelling International, March 2004, 14-17

Zell, S. (1995)

Final stage of Storebaelt railway tunnel – summary and appraisal. RETC, Proc., 1995, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration: Littleton, CO, USA, 769-783