

Empfehlungen für Konstruktion und Betrieb von Schildmaschinen

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für unterirdisches
Bauen (DAUB)
Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
(ÖGG) und Arbeitsgruppe Tunnelbau der
Österreichischen Forschungsgemeinschaft
Straße und Verkehr
FGU Fachgruppe für Untertagbau
Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-
verein

1 Planerische und baubetriebliche Randbedingungen

Die Wahl der Schildmaschinen, normalerweise hauptsächlich abhängig vom Baugrund und Wasserdruck, wird eingeschränkt durch planerische und geometrische Randbedingungen.

Diese geben Schilddurchmesser sowie Trassen- und Gradientenführung vor.

1.1 Schilddurchmesser

Der Schilddurchmesser wird zu allererst durch die Anforderungen an den herzustellenden Tunnelquerschnitt bestimmt.

1.2 Schildtyp

Bei Durchmessern bis etwa 12 m steht der anstehende Baugrund als Entscheidungsmerkmal für den Schildtyp im Vordergrund. Bei größeren Durchmessern sind für die Entscheidung zwischen Schildmaschinen

mit Erddruck (EPB)- oder Flüssigkeitsstützung ergänzende Überlegungen anzustellen hinsichtlich der Übertragung der bei Erddruck-Maschinen etwa 2,5-mal so großen Drehmomente auf den umgebenden Boden (Verrollungsgefahr) sowie der Wirtschaftlichkeit.

Bei Durchmessern größer etwa 12 m kann die Grobseparation (Schwingklassierer) im Nachläufer mitgeführt werden, um Pumpkosten zu sparen und damit insbesondere bei größeren Vortriebslängen die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.

Grundsätzlich ist die Wahl zwischen elektrischem und hydraulischem Antrieb zu treffen. Elektrischer Antrieb hat einen wesentlich besseren Wirkungsgrad, aber auch einen höheren Anspruch an die Steuerung. Hydraulischer Antrieb ist flexibler.

Für das Versetzen der Tunnelfertigteilelemente haben sich Ring-Erektoren bewährt. Es ist zwischen me-

Recommendations for Design and Operation of Shield Machines

Edited by:
Deutscher Ausschuss für unterirdisches
Bauen (DAUB)
Österreichische Gesellschaft für Geomechanik
(ÖGG) and
Arbeitsgruppe der Österreichischen
Forschungsgemeinschaft Straße und Verkehr
FGU Fachgruppe für Untertagbau
Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-
verein

1 Planning and operational marginal Conditions

The choice of shield machines, usually dependent on subsoil and water pressure, is restricted through planning and geometrical marginal conditions.

These govern the shield diameter and the route and gradient alignment.

1.1 Shield Diameter

The shield diameter is primarily governed by the requirements posed by the tunnel cross-section that has to be created.

1.2 Type of Shield

In the case of diameters of up to roughly 12 m, the type of subsoil encountered represents the decisive factor for the type of shield. In the case of larger diameters, further considerations regarding the transference of the torques to

the surrounding ground which are roughly 2.5 times greater for EPB machines (danger of roll) as well as the economic efficiency have to be taken into account in the choice between earth pressure balance (EPB) shields or slurry support shields.

In the case of diameters greater than 12 m, the coarse separation plant (vibrating classifier) can be included in the back-up in order to save pumping costs and in particular to improve the economy for greater tunnelling lengths.

It is essential to make a choice between electric and hydraulic drive. Electric drive possesses a considerably better degree of efficiency but also places greater demands on the steering system. Hydraulic drive is more flexible.

Ring erectors have proved themselves for moving the precast tunnel elements. It must be differentiated between mechanical and pneumatic devices for attaching the elements to the erector.

chanischen und pneumatischen Vorrichtungen für das Befestigen der Elemente am Erektor zu unterscheiden.

1.3 Trassenführung

Die Wahl der Trassenführung ist bestimmt durch die Anforderungen der verkehrlichen Nutzung und abhängig von den maschinentechnischen Möglichkeiten diesen gerecht zu werden.

Wesentliche Einflussgrößen sind Baugrund, Überdeckung, Wasserdruck, Kurvenradien und Senkungsempfindlichkeit.

1.3.1 Überdeckung

Die Überdeckung sollte nicht kleiner sein als der Schilddurchmesser D , je nach vorhandenen Baugrundgegebenheiten kann u. U. auch eine Überdeckung von $0,8 D$ noch realistisch sein.

Bei Überdeckungen kleiner $0,8$ bis $1 D$ müssen die Stützdrücke in besonders engen Grenzen geregelt werden, um einerseits die Ortsbrust sicher zu stützen und andererseits Ausbläser zu vermeiden (Luft, Flüssigkeit). Das gilt insbesondere bei der Unterquerung von Wasserläufen bei geringen Abständen zwischen Firste des Tunnels und Sohle der zu unterquerenden Wasserfläche. Gegebenenfalls müssen Sondermaßnahmen vorgesehen werden, um die Begehung der Arbeitskammer zu ermöglichen.

Die Auftriebssicherheit ist für alle Bauzustände nachzuweisen.

1.3.2 Wasserdruck

Bei höheren Wasserdrücken besteht die Gefahr, dass in Abhängigkeit von den technischen Gegebenheiten die Schnecke bei Maschinen mit Erddruckstützung nicht mehr abdichtet.

Hier müssen Zusatzmaßnahmen getroffen werden (z. B. Pumpenausstrag am Ende der Schnecke). Schildmaschinen mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust beherrschen hohe Wasserdrücke besser.

Die Dichtungselemente der maschinentechnischen Anlagenteile (Hauptlager, Gelenk, Schildschwanz) sind den hydrologischen Erfordernissen anzupassen.

1.3.3 Kurvenradien

Bei Kurvenradien kleiner 300 m verbessert ein Gelenk in der Schildmaschine die Steuermöglichkeit und die Qualität des Ausbaus. Die Tübbinggeometrie (Breite, Teilung, Ring- und Längsfugen) ist dementsprechend anzupassen. Die Maschine muss eine Schildfahrt mit Überschnitt ermöglichen; ein Kipplager zur gezielten Ergänzung des Überschnitts ist ebenfalls hilfreich, um die Steuerbarkeit zu verbessern.

Bei Rohrvortrieben sind die Kurvenradien abhängig von den Längen und Durchmessern der Vortriebsrohre, der zu akzeptierenden Fugenklaffung, dem Rohrspiel und den Dehnerelementen.

1.3.4 Senkungsempfindlichkeit

Senkungen (Setzungen) entstehen aus der Entspannung der Ortsbrust, der Konizität des Schildmantels, dem Überschnitt und der Schildspur (Schildmantelstärke). Der Entspannung der Ortsbrust wirkt der Stützdruck entgegen. Bei Schildmaschinen mit Flüssigkeitsstützung ist der Stützdruck an der Ortsbrust genauer mess- und regelbar. Die Verpressung der Schildspur – also die Hohlraumverfüllung – hat druck- und vo-

1.3 Tunnel Alignment

The choice of the tunnel alignment is governed by the requirements posed by the purpose of the tunnel and is subject to the technical possibilities of the machine, used to achieve these.

Essential factors of influence are overburden, water pressure, curve radii and susceptibility to settlement.

1.3.1 Overburden

The overburden should be no less than the shield diameter D . Depending on the prevailing subsoil conditions, an $0,8 D$ overburden can be realistic in some cases.

In the case of overburdens less than $0,8$ to $1 D$, the supporting pressures have to be confined within particularly narrow limits so that on the one hand the face is safely supported and on the other to avoid blows-outs (air, liquid). This applies especially for passing beneath watercourses with only a small space between the tunnel roof and the bed of the watercourse. In some cases, special measures have to be introduced to enable access to the working chamber.

The safety against uplift has to be verified for all construction states.

1.3.2 Water Pressure

In the event of higher water pressures the danger exists that, depending on the technical conditions, the in the case of EDP machines screw conveyor no longer seals. Additional measures have to be undertaken here (e.g. pump discharge at the end of the screw). Shield machines with slurry-supported faces are able to master high water pressures.

The sealing elements for the better mechanical equipment (main bearing, articul-

ed section, shield tail) have to be suited to the hydrological requirements.

1.3.3 Curve Radii

In the case of curve radii less than 300 m, an articulated section in the shield machine improves steering and the quality of the support. The segmental geometry (width, division, annular and longitudinal joints) has to be adjusted accordingly. The machine must be capable of a passage with overcut; a tilting bearing to facilitate the overcut is also advantageous in order to enhance the steerability.

As far as pipe-jacking is concerned, the curve radii depend on the lengths and diameters of the thrust pipes, the acceptable joint gap, the pipe level and the extension elements.

1.3.4 Susceptibility to Settlements

Settlements occur from the stress relief at the face, the conicity of the shield skin and the tail gap (shield skin thickness). The stress relief at the face is counteracted by the supporting pressure. In the case of shield machines with slurry-support, the supporting pressure at the face can be more exactly measured and controlled. The grouting of the tail gap – in other words, filling the voids – has to be undertaken so that the pressure and volume are controlled in order that settlements and lifts are minimised. For the same reason, especial importance must be attached to the continuity of the rate of advance.

2 Workability of the Subsoil

The subsoil influences the choice of tools, wear, tool changing, cutting wheel form, cutting wheel pressure

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB) Nationales Komitee der International Tunneling Association (ITA)

Der Deutsche Ausschuss für unterirdisches Bauen DAUB wurde im Jahre 1972 auf Einladung des Bundesministers für Verkehr gegründet und im Jahre 1973 in das Vereinsregister eingetragen.

Die Anregung zur Gründung nationaler Tunnelbaukomitees geht auf die Empfehlung einer OECD-Konferenz zurück, die im Jahre 1970 in Washington/DC, USA, stattfand, bei der Vertreter aus 20 Nationen die Gründung eines internationalen Verbandes für das Gebiet des Unterirdischen Bauens – ITA – beschlossen. Die Gründung der ITA fand im April 1974 mit 20 Gründungsmitgliedern, zu denen auch Deutschland zählte, in Oslo statt. Aufgabe und Ziel der ITA soll die Erarbeitung und weltweite Verbreiterung von technisch abgesicherten Grundlagen im unterirdischen Bauen für eine gesunde urbane Entwicklung in den Ballungszentren sein.

Die nationalen Komitees, inzwischen sind 50 Länder Mitglied in der ITA, erarbeiten in ihren Ländern und mit ihren Mitgliedern in internationalen Arbeitsgruppen Empfehlungen und sonstige Schriften zu wichtigen, aktuellen Themen des unterirdischen Bauens.

Aufgaben und Ziele

Mit der Gründung und Eintragung des DAUB in das Vereinsregister im Jahre 1973 wurde eine Satzung beschlossen, welche das Nationale Gremium auch auf die internationalen Ziele verpflichtet.

Der DAUB hat eine Struktur, nach der die am unterirdischen Bauen beteiligten wesentlichen drei Säulen paritätisch vertreten sind: Bauherren, Wissenschaftler und Planer sowie bauausführende Unternehmer und Tunnelbaumaschinenhersteller. Diese drei Gruppen sind mit jeweils bis zu zehn herausragenden und erfahre-

nen Persönlichkeiten vertreten. Von diesem Kreis werden neue Mitglieder eigenverantwortlich und unabhängig aus dem Kreis der Fachkollegen ausgewählt. Der Vorsitz wird im Turnus von drei Jahren von jeweils einem Mitglied der drei Gruppen wahrgenommen. In diesem Jahr ist der Vorsitz von Herrn Dr. Karl Kuhnnehn, BUNG Beratende Ingenieure, auf Herrn Dr. Günter Brem, Hochtief AG, übergegangen. Die Mitarbeit im DAUB ist ehrenamtlich. Als Ziele sind in der Satzung vereinbart:

- Koordinierung der Arbeiten auf dem Gebiet des unterirdischen Bauens
- Sammlung und Verbreitung von technischen Informationen über unterirdisches Bauen
- Anregung, Auswahl und Bewertung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten
- Bedarfsvorhersage und Sammlung von Planungsdaten über zukünftig geplante unterirdische Bauwerke
- Mitarbeit bei der Aufstellung von Gesetzen, Normen, Richtlinien, Sicherheitsvorschriften usw.
- Förderung der Ingenieurausbildung auf dem Gebiet des unterirdischen Bauens
- Beteiligung an internationalen Arbeiten, die sich mit dem unterirdischen Bauen befassen.

Zusammenarbeit mit der ITA

Der DAUB hat sich von Anbeginn aktiv an der Gestaltung der ITA und der Arbeit in ihren Arbeitsgruppen beteiligt. So waren und sind über lange Jahre deutsche Persönlichkeiten im Vorstand der ITA vertreten.

Von 1979 bis 1989:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. G. Girnau
Von 1989 bis 1995:
Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. H. Duddeck
und seit 1995:
Prof. Dr.-Ing. A. Haack

Besonders hervorzuheben ist, dass Herr Prof. Girnau von 1980 bis 1983 Präsident der ITA war und Herr Prof. Haack dieses Amt seit 1998 bekleidet. Darüber hinaus hat eine Vielzahl von DAUB-Mitgliedern aktiv in verschiedenen Arbeitsgruppen, teilweise als Leiter oder stv. Leiter, mitgearbeitet oder tut dies noch.

DAUB-Veröffentlichungen

Die Ergebnisse der Arbeit des DAUB und seiner Arbeitskreise werden, sobald sie abgeschlossen sind, als Empfehlungen oder Hinweise zuerst in der Fachzeitschrift Tunnel dem Fachpublikum vorgestellt. Bisher sind folgende Empfehlungen zu Fragen des unterirdischen Bauens vom DAUB veröffentlicht worden:

- Definition der Bauverfahren und Bauweisen in Bauverträgen des Untertagebaus (Tunnel 3/87)
- Empfehlungen zur Planung, Ausschreibung und Vergabe von schildgestützten Tunnelvortrieben (Tunnel 2/93)
- Sicherung des Ideenwettbewerbs in Genehmigungsverfahren für Bauvorhaben (Tunnel 5/93)
- Funktionale Leistungsbeschreibung für Verkehrstunnelbauwerke – Möglichkeiten und Grenzen für die Vergabe und Abrechnung (Tunnel 4/97)
- Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen (Tunnel 5/97)
- Diese Ausarbeitung erfolgte in fachlicher Abstimmung mit den Tunnelbaukomitees Österreichs und der Schweiz.
- Empfehlungen zur Risikoverteilung in Tunnelbauverträgen (Tunnel 3/98)
- Eine über Deutschland hinausgehende Bedeutung haben die „Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen“ (Tunnel 5/97), da diese Ausarbeitung in fachli-

cher Abstimmung mit den Tunnelbaukomitees Österreichs und der Schweiz aufgestellt und in allen drei Ländern veröffentlicht wurde.

Es wurde damit ein länderübergreifender Standard definiert und eine gleichartige Basis für die Entscheidungsfindung bei der Auswahl von Tunnelvortriebsmaschinen in den drei Ländern vereinbart.

In diesem Heft wird die Empfehlung für Konstruktion und Betrieb von Schildmaschinen erstmals veröffentlicht und dem Fachpublikum vorgestellt. Diese Empfehlung wurde wiederum fachlich mit den Tunnelbaukomitees Österreichs und der Schweiz abgestimmt und dort zur Beachtung empfohlen.

In dieser Empfehlung werden speziell für den Schildvortrieb Hinweise für machinentechnische Einsatzgrenzen einzelner Systeme und Bauteile sowie optimierte Anpassungsmöglichkeiten für den Betrieb unter wechselnden geotechnischen Randbedingungen gegeben. Die Erläuterungen und Begriffe beziehen sich auf die vorangegangene: „Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen“.

Alle Fachkollegen sind hiermit herzlich eingeladen, nach kritischer Durchsicht ihre Ergänzungen und Korrekturen vorzubringen.

Mit dem DAUB kann unter folgender Adresse Kontakt aufgenommen werden:

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB)
Mathias-Brüggens-Straße 41
D-50827 Köln
Telefon +49 (0) 221/59795-0
Fax +49 (0) 221/59795-50
www.stuva.de/daub/

*Dr.-Ing. Karl Kuhnnehn, BUNG
Beratende Ingenieure Heidelberg/D*

lumenkontrolliert zu erfolgen, um Senkungen und Hebungen zu minimieren. Aus denselben Gründen ist auf die Kontinuität der Vortriebsleistung besonders Wert zu legen.

2 Abbaubarkeit des Baugrundes

Der Baugrund hat Einfluss auf Werkzeugwahl,

Verschleiß, Werkzeugwechsel, Schneidradgestaltung, Schneidradandruck/Drehmoment, Zentrumsräumung und Steinzerkleinerung.

2.1 Werkzeugwahl

Als Werkzeuge stehen Rollenmeißel (Disken), Stichel und Schälmesser (Flachmeißel) zur Verfügung, wobei grundsätzlich Fels und Steineinlagerungen durch

(torque, central clearance and rock crushing.

2.1 Choice of Tools

Disc cutters, drag bits and scraper teeth (flat bits) are available. Essentially, disc cutters are applied in rock and stone intrusions, drag bits for sand and scraper teeth for cohesive soils. In the case of mixed soils, the cutting wheel has to be equipped with various types of tool. Attention

must be paid to the manner in which the different tools influence one another and the resultant wear.

2.2 Wear/ Changing Tools

When shield machines are used in solid rock, wear is a purely economic factor. Special attention must be accorded the possibility of changing tools for machines where the face is supported. It should be

German Committee for Underground Construction Inc. (DAUB) National Committee of the International Tunnelling Association (ITA)

The German Committee for Underground Construction – DAUB – was established in 1972 at the invitation of the Federal Minister for Transport and registered in 1973.

The call to set up national tunnelling committees can be traced back to a recommendation during an OECD conference dating back to 1970 in Washington/DC, USA, at which the representatives of 20 nations proposed the establishment of an international organisation for the foundation engineering sector – the ITA. The ITA was founded in April 1974 in Oslo, with 20 constitutive members including Germany. The ITA's objective is the working out and worldwide propagation of technically founded principles relating to underground construction to ensure healthy urban development in built-up areas.

In the meantime, 50 countries belong to the ITA. The national committees produce recommendations and other publications pertaining to important, topical subjects on underground construction in their countries and with their members in international working groups.

Tasks and Aims

Through establishing and registering the DAUB in 1973, statutes were decided on, which also committed the national organisation to comply with the international aims.

The DAUB possesses a structure according to which, the 3 important pillars involved in underground construction are represented according to parity: Clients, scientists and architects as well as contractors and the makers of tunnelling machinery. Each of these 3 groups is represented by up to 10 outstanding and experienced

personalities. New members are chosen by the committee independently from among their colleagues in this field. A member of one of the 3 groups takes over as chairman on a rotating basis for 3 years. This year, Dr. Karl Kuhnhehn, BUNG Beratende Ingenieure stepped down in favour of Dr. Günter Brem, Hochtief AG. Members of DAUB work on an honorary basis. All aims are laid down in the statutes:

- co-ordinating work in the field of underground construction
- collecting and disseminating technical information pertaining to underground construction
- proposing, selecting and assessing research and development work
- predicting needs and collecting planning data for future projected underground structures
- involvement in setting up laws, standards, guidelines, safety regulations etc.
- promoting the training of engineers in the field of underground construction
- participating in international projects, which deal with underground construction.

Co-operation with the ITA

The DAUB has been actively involved from the very onset in shaping the destiny of the ITA and taking part in its working groups. German personalities were and still are represented on the ITA board.

from 1979 to 1989: Prof. G. Girnau
from 1989 to 1995: Prof. H. Duddeck
and since 1995: Prof. A. Haack
It should be expressly mentioned that Prof. Girnau was president of the ITA between 1980 and 1983 and that Prof. Haack has held this office since 1998.

In addition, a large number of DAUB members have been or still are active in various working groups, in some cases as chairman or deputy chairman.

DAUB Publications

The results of the work of DAUB and its working groups are first introduced as soon as they are completed in the journal Tunnel. Up till now, the following recommendations relating to underground construction issues have been published by DAUB:

- Definition of Construction Methods and their Application in Construction Contracts for Subsurface Construction (Tunnel 3/87)
- Recommendations on Planning, Tendering and Awarding shield-supported Tunnelling Projects (Tunnel 2/93)
- Securing Competitiveness in the Approval Proceedings for Construction Projects (5/93)
- Functional Description of Performances for Transport Tunnels - Possibilities and Limits for Awarding and Accounting (Tunnel 4/97)
- Recommendations for selecting and evaluating Tunnel Boring Machines (Tunnel 5/97)

These recommendations were produced in collaboration with the tunnelling committees of Austria and Switzerland

- Recommendations for Risk Distribution in Tunnelling Contracts (Tunnel 3/98).

The „Recommendations for selecting and evaluating Tunnel Boring Machines“ (Tunnel 5/97) was of significance outside of Germany as well, as it was drafted in collaboration with the tunnelling committees of Austria and Switzerland and published in all 3 countries.

As a result, a supra-national standard was defined and a common basis for arriving at decisions in choosing tunnelling machines in the 3 countries agreed on.

In this issue of Tunnel, the Recommendations for the Design and Operation of Shield Tunnelling Machines is being published and presented to an interested public for the first time. These recommendations were also drafted in co-operation with the tunnelling committees of Austria and Switzerland and recommended to be followed there.

In these recommendations, pointers for the technical limits of application for individual systems and components as well as optimised possibilities of adjustment for operation and changing geotechnical marginal conditions are provided especially for shield excavation. The explanations and terms relate to the previous „Recommendations for selecting and evaluating Tunnel Boring Machines“.

All interested colleagues are invited to scrutinise them at length and then put forward any additions and corrections.

You can contact DAUB at the following address:

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen e.V. (DAUB)
Mathias-Brüggen-Straße 41
D-50827 Cologne
Phone: +49 (0) 221 / 59795-0
Fax: +49 (0) 221 / 5979550
www.stuva.de/daub/

*Dr.-Ing. Karl Kuhnhehn, BUNG
Beratende Ingenieure Heidelberg/D*

Rollenmeißel, Sand durch Stichel und bindige Böden durch Schälmesser abgebaut werden. Bei Mischböden ist die Bestückung des Schneidrades mit verschiedenen Werkzeugen erforderlich. Auf die gegenseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Werkzeuge und den dadurch bedingten Verschleiß ist Rücksicht zu nehmen.

2.2 Verschleiß/ Werkzeugwechsel

Beim Einsatz von Schildmaschinen im Festgestein ist

der Verschleiß ein rein wirtschaftlicher Faktor. Bei Maschinen mit Ortsbruststützung ist der Möglichkeit des Werkzeugwechsels besondere Beachtung zu schenken. Ein Werkzeugwechsel ohne Veränderung der Stützbedingungen der Ortsbrust ist anzustreben. Gezielt vorbereitete Bereiche im Baugrund von oben zum Werkzeugwechsel sind teuer und oft nicht möglich. Die Möglichkeit, durch die Herstellung von „Bahnhöfen“ aus der Schildmaschine heraus

possible to change tools without altering the supporting conditions. The preparation from above of special points in the subsoil for changing tools is expensive and not always feasible. The possibility of creating “stations” from within the shield machine annular grouting, groutblock ahead of shield machine should be catered technically should the need arise.

2.3 Cutting Wheel Design

The design of the cutter

head for tunnel boring machines operating in solid rock is largely standardised. In the case of slurry-supported machines, especially should there be a danger of clogging, the cutting wheel should be designed as open as possible. The cutting wheel is not intended for supporting the face! The apertures can be closed by supporting plates (when at a standstill). Central cutters act against clogging. It must be ensured that the reamers can be replaced if need be. Points which are ex-

(Kranzinjektionen, Dichtblock vor der Schildmaschine) Werkzeuge wechseln zu können, ist für den Bedarfsfall maschinentechnisch vorzusehen.

2.3 Schneidradgestaltung

Bei Tunnelbohrmaschinen für Fels ist die Schneidradgestaltung weitgehend standardisiert. Bei Maschinen mit Flüssigkeitsstützung sollte, insbesondere bei Verklebungsfahr, das Schneidrad weitgehend offen gestaltet werden. Das Schneidrad dient nicht der Ortsbruststützung! Die Öffnungen können durch Stützplatten (im Stillstandsfall) geschlossen werden. Zentrumsschneider wirken der Verklebung entgegen. Auf die Wechselbarkeit der Räumler ist zu achten. Stellen, die besonderem Verschleiß ausgesetzt sind, müssen mit Verschleißschutz versehen werden.

Der Materialfluss muss sichergestellt werden.

Der Schneidradantrieb sollte zwei Arbeitsdrehrichtungen zulassen, worauf auch der Werkzeugbesatz ausgerichtet werden sollte. Ein Verschieben des Schneidrades in Achsrichtung sollte ebenso wie ein Kippen möglich sein.

2.4 Schneidradandruck/Drehmoment

Schneidradandruck und Drehmoment werden aus Erfahrungswerten festgelegt, jüngste Beispiele zeigen, dass bei bindigen Böden beide Größen oft zu niedrig angesetzt werden.

2.5 Zentrumsräumung

Zum Abbau extremen Drucks im Zentrum sollten geeignete Zentrumsschneider angeordnet werden. Eine wesentliche Verbesserung

bei bindigen Böden wird durch gesondert angetriebene Mittenschneider erzielt.

2.6 Steinzerkleinerung

Anzahl und Größe der erwarteten Steine können die Wahl zwischen Schildmaschinen mit Erddruck- oder Flüssigkeitsstützung beeinflussen. Steinbrecher sind nur bei Flüssigkeitsstützung möglich. Ob Diskenmeißel alleine (beim EPB-Schild) die Steine abbauen können, hängt von deren Bettung, dem Diskenabstand und dem Spurenverlauf der Disken ab.

2.7 Verklebung

Mögliche Verklebungen im Schneidrad mit Flüssigkeitsstützung beeinflussen ganz wesentlich die Vortriebsgeschwindigkeit. Gegenmaßnahmen sind

- hohe Spülmengen und hoher Spüldruck
- Bypass-Spülung
- Verteilung der Spüldüsen im Abbauraum

- Zentrumsschneider
- Oberflächenbehandlung im Abbauraum
- geometrische Gestaltung der Speichen
- geometrische Gestaltung des Abbauraums (Materialfluss)

- chemische Zusatzmittel
- Agitatoren
- Walzenbrecher.

Bei Erddruckschilden wird möglichen Verklebungen durch Konditionierung des Erdbreis begegnet (Schaum und/oder Bentonitzugabe).

3 Behandlung des abgebauten Materials

3.1 Einfluss der Standfestigkeit des Baugrundes

Die Behandlung des abgebauten Bodens ist abhän-

gig von der Standfestigkeit des Baugrundes. Die Behandlung des abgebauten Bodens ist abhängig von der Standfestigkeit des Baugrundes.

The material flow must be ensured.

The cutting wheel drive should permit 2 working rotation directions and the fitted tools installed accordingly. A displacement of the cutting wheel in the direction of the axis as well as tilting must be possible.

2.4 Cutting Wheel Pressure/Torque

The cutting wheel contact pressure and torque are determined on the basis of experimental values. Recent examples indicate that in the case of cohesive soils, both parameters are often set too low.

2.5 Central Reaming

In order to remove extreme pressure at the centre, suitable central cutting tools should be installed. Separately driven central cutters achieve a considerably better performance in cohesive soils.

2.6 Rock Crushing

The number and size of the rocks that are anticipated can influence the selection of EPB or slurry-supported shield machines. Whether disc cutters on their own (in the case of the EPB shield) are capable of removing the rocks, depends on the way they are embedded, the gap between discs and the track pursued by the discs.

2.7 Clogging

Eventual clogging of the cutting wheel in the case of slurry-support considerably influences the rate of advance. Counter-measures are:

- high flushing amounts and high flushing pressure
- bypass flushing
- distribution of the flushing nozzles in the working chamber

- central cutters
- surface treatment in the working chamber
- geometric design of the spokes
- geometric design of the working chamber (material flow)
- chemical additives
- agitators
- roller crushers.

In the case of EPB shields, eventual clogging is countered by the conditioning of the slurry (adding foam and/or bentonite).

3 Treating the removed Material

3.1 Influence of the Subsoil Stability

The treatment of the removed soil depends on the stability of the subsoil.

Stable, little or no groundwater:

This subsoil can be removed dry without any ancillary supporting measures from one point or by means of an open cutting wheel. Discharge can be undertaken using a chain conveyor and subsequent belt haulage or entirely by means of a belt conveyor. No special treatment of the subsoil is required. There is no restriction on its dumping properties.

Less stable, non-cohesive with and without groundwater:

This subsoil requires supporting. Mechanised supports can scarcely be considered when a cutting wheel is used. On the other hand, support by bentonite suspension support has proved itself very well. The amount of bentonite is determined depending on the permeability of the subsoil so that the optimal viscosity of the supporting slurry is attained

gig von der Standfestigkeit des Baugrundes.

Standfest, kein oder wenig Grundwasser:

Dieser Baugrund lässt sich ohne zusätzliche Stützmaßnahmen punktuell oder mit einem offenen Schneidrad trocken abbauen. Die Abförderung kann mit Kettenförderer und anschließender Bandförderung oder ausschließlich durch Bandförderung erfolgen. Eine gesonderte Behandlung des Baugrundes ist nicht erforderlich. Die Deponierbarkeit ist nicht eingeschränkt.

Wenig standfest, rollig, mit und ohne Grundwasser:

Dieser Baugrund benötigt eine Abstützung. Mechanische Abstützungen kommen bei Anwendung eines Schneidrades kaum mehr in Betracht. Im Gegensatz dazu hat sich die Stützung durch Bentonitsuspension sehr gut bewährt. In Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Baugrundes ist der Bentonitanteil festzulegen, um die optimale Viskosität der Stützflüssigkeit zu erzielen und einen zuverlässigen Aufbau des Filterkuchens an der Ortsbrust sicherzustellen.

Der abgebaute Boden wird mit der Suspension im Volumenverhältnis von etwa 1:10 vermischt. Die Abförderung erfolgt durch geeignete, leistungsfähige Pumpen über ein Leitungssystem und wird der Separieranlage zugeführt. Diese Anlage trennt den abgebauten Boden von der Stützflüssigkeit, die dann wieder zum Stütz- und Fördervorgang in die Arbeitskammer der Schildmaschine zurückgeführt werden kann (5 % bis 10 % Boden, 90 % bis 95 % Suspension). Die Anforderungen an den Trennvorgang sind abhängig von den

Vorgaben für die Deponierung des separierten Materials.

Standfest bis rollig mit Grundwasser:

Böden, die sich im wesentlichen aus Sanden, Schluffen und Tonen mit einem Feinstanteil unter 0,06 mm von > 30 % zusammensetzen, eignen sich zur Anwendung des Erddruckschildprinzips. Damit nach dem Abbauvorgang eine ausreichend fließfähige breiige Masse entsteht, ist das Vorhandensein von Grundwasser erforderlich. Dieser Abbauvorgang verändert die in situ vorgegebenen Baugrundverhältnisse nicht.

Reicht die Fließfähigkeit des abgebauten Bodens in der Arbeitskammer nicht aus, dann muß konditioniert werden. Zum Konditionieren eignet sich die Zugabe von Wasser, von Bentonitsuspension und von geeigneten Schäumen bzw. Polymeren. Bei Wasser wird die Deponierfähigkeit nicht beeinträchtigt. Bei einer Zugabe von Bentonitsuspension kann dies, wenn gewisse Mengen überschritten werden, zur Beeinträchtigung der Deponierfähigkeit führen. Bei den Schäumen bzw. Polymeren ist dies nur dann der Fall, wenn sehr strenge Auflagen bezüglich der Restbestandteile von Kohlenwasserstoffen vorliegen. Es sind daher die nationalen Vorschriften bezüglich der zulässigen Schadstoffinhalte für die einzelnen Deponieklassen zu beachten. Der Hinweis der Hersteller auf die biologische Abbaubarkeit der Materialien ist nicht ausreichend.

3.2 Separieranlage bei Flüssigkeitsstützung

Der Ausgestaltung der Separieranlage bei flüssigkeits-

and it is ensured that the filter cake is reliably removed at the face.

The removed soil is mixed with the suspension in a volumetric ratio of roughly 1:10. It is transferred using suitably, high-powered pumps via a pipe line system to the separating plant. This plant separates the removed soil from the supporting slurry, which can then be recycled into the shield machine's working chamber for the supporting and conveying phase (5–10 % soil, 90–95 % suspension). The requirements made on the separating phase depend on the conditions for dumping the separated material.

Stable to non-cohesive with Groundwater:

Soils which are largely made up of sands, silts and clays with a share of ultra-fines below 0.06 mm of > 30 %, are suitable for applying the EPB shield principle. To ensure that a sufficiently flowable pulpy mass is created after extraction, it is essential that groundwater is present. This excavation phase does not alter the in situ subsoil conditions.

Should the flowability of the removed soil in the working chamber be insufficient, then it has to be conditioned. Water, bentonite suspension and certain foams or polymers are suitable additives. The dumpability of the material is not affected in the case of water. However, when bentonite suspension is added, this can lead to a negative influence on the dumpability should certain quantities be exceeded. In the case of foams or polymers this is only the case if very stringent regulations relating to the residual amounts of hydrocarbons exist. As a consequence, the national rules governing the per-

missible toxic contents for the individual storage classifications have to be observed. References provided by the producers pertaining to the biological separability of the materials are not sufficient.

3.2 Slurry treatment plant

The design of the separation plant for slurry-supported shield tunnelling must be accorded particular attention. Should it not be appropriately dimensioned, the slurry treatment plant will govern the performance achieved by the shield machine.

The slurry treatment plant requires a systematic layout with corresponding cut-off points for the grain sizes. Generally, such plants comprise 3 to 4 stages although there can be as many as 6 stages depending on the soil material and the requirements on the material that has to be stored: First screen cut

pre-screening
Second screen cut
1st cyclone stage at 60 µm
Third screen cut
multi-cyclone at 30 µm
Fourth screen cut or stage

centrifuges or band filter presses
Centrifuges serve to separate ultra-fine particles whereas the band filter presses are applied to drain the residual slurry.

The outlay for the separating phase increases with the fine granulation. In order to make sure that the desired separating effect is attained, the centrifuges and filter presses must possess sufficient power.

There is the possibility of improving the separating process by means of adding substances to the slurry requiring to be treated, e.g. flocculation agents.

gestützem Schildvortrieb muss besondere Beachtung geschenkt werden. Bei nicht hinreichender Dimensionierung bestimmt die Separieranlage die Leistungsfähigkeit des Schildmaschinenvortriebs.

Die Separieranlage benötigt einen systematischen Aufbau mit entsprechenden Trennschnitten für die Körnungen. Die Anlagen bestehen im allgemeinen aus 3 bis 4 je nach Bodenmaterial und Anforderung an das zu deponierende Material auch bis zu 6 Stufen:

Erster Trennschnitt Vorsiebe
Zweiter Trennschnitt 1. Zyklonstufe bei 60 µm
Dritter Trennschnitt Multizyklone bei 30 µm
Vierter Trennschnitt
bzw. Stufe Zentrifugen
 oder Bandfilterpressen

Zentrifugen dienen zur Separierung von Feinstteilen, während die Bandfilterpressen zur Entwässerung des Restschlammes Verwendung finden.

Der Aufwand für den Separiervorgang steigt mit der Feinkörnigkeit an. Es muss insbesondere der ausreichenden Leistungsfähigkeit der Zentrifugen bzw. der Filterpressen Aufmerksamkeit geschenkt werden, um den gewünschten Separiereffekt sicherzustellen.

Es gibt die Möglichkeit, durch Zusätze zur zu separierenden Flüssigkeit den Separiervorgang zu verbessern, z. B. durch Flockungsmittel.

Im Rahmen des Störfallmanagements ist eine Bevorratung von Suspension über den vom Normalablauf bestimmten Bedarf hinaus vorzusehen (z. B. wegen Suspensionsverlusten).

4 Minderung von Senkungen (Setzungen) unter Bezug auf Bauverfahren und Arbeitsabläufe

4.1 Auswahl der Verfahrenstechnik

Die Anwendung des Schildvortriebs ermöglicht vor allem im Lockergestein in Verbindung mit Grundwasser das Auffahren eines Tunnels unter Einhaltung aller dabei notwendigen Sicherheitsaspekte. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, bei sachgerechtem Vorgehen die Senkungen beim Vortrieb klein zu halten. Dies geschieht alleine schon durch die Anwendung der geeigneten Verfahrenstechnik mit Flüssigkeits- oder Erddruckstützung anstelle einer möglichen Grundwasserabsenkung.

Durch die Anwendung der Flüssigkeits- oder Erddruckstützung kann eine Optimierung der Senkungswerte erreicht werden, wobei die zu erwartenden Senkungen von den Baugrundverhältnissen, dem Durchmesser des herzustellenden Tunnels und von den möglichen Spannungsvorgängen im Ortsbrustbereich abhängig sind. Ganz wesentlich ist dabei außerdem die Überdeckung sowie der Abstand zur Gründungssohle vorhandener Bauwerke.

Bei sorgfältigem, sachgemäßem Vorgehen und durch evtl. notwendige Zusatzmaßnahmen können auch unter ungünstigen Baugrundverhältnissen geringe Senkungswerte eingehalten werden. Auch bei parallel verlaufenden Tunneln können bei Überlagerung der Senkungswerte Senkungsmulden erreicht wer-

Within the framework of incident management, a supply of suspension should be maintained in excess of what would normally be required (e.g. should there be suspension losses).

4 Reduction of Settlements in Conjunction with Construction Methods and Work Phases

4.1 Choosing Process Technology

The application of shield tunnelling facilitates the heading of a tunnel especially, in soft ground with groundwater taking all necessary safety aspects into consideration. Furthermore, there is the possibility to ensure that the settlements created during the heading are kept as small as possible – providing tunnelling is executed properly. This takes place solely through the application of the appropriate process technology with slurry or EPB support instead of possibly lowering the groundwater.

Through the application of slurry or EPB support, the settlement values can be optimised. In this connection, the anticipated settlements depend on the subsoil conditions, the diameter of the tunnel being built and on the possible stress relief processes in the face zone. In addition, the overburden also plays an important role together with the distance to the foundation level of existing buildings.

Low settlement values can be attained even given unfavourable subsoil conditions providing that tunnelling is carried out carefully and properly, if need be with additional measures. Even for tunnels

running parallel to one another, settlement troughs can be attained through superimposing the settlement values, whose inclination values are generally non-critical for building purposes. Continuous excavation enables settlements to be avoided when tackling soils liable to deformation.

4.2 Bulk Control

When comparing theoretical and actually excavated amounts of soil, a trend towards removing an excessive quantity of soil and the danger of added settlements is evident. The measuring of the amount of soil removed must not be accomplished with absolute accuracy in this connection. Roughly determining the quantity e.g. by weighing the amount of soil obtained from a slurry treatment plant reveals corresponding tendencies albeit with a certain time delay.

4.3 Optimal Supporting Pressure

Through adhering to the supporting pressure required for stabilisation purposes during excavation as much as possible, low settlement values can be attained, providing that stress relief at the face zone is kept small. In the case of loosely bedded sands, it has been shown on the other hand that a further reduction in settlements can be arrived at through increasing the supporting pressure beyond that originally determined for stabilisation purposes. In the case of slurry support, the application of a compressed air cushion in keeping with the hydro-shield system has proved itself. The operating accuracy ranges from 0.05 to 0.1 bar and must be carefully monitored, controlled and documented using the appropriate measuring equipment.

den, deren Neigungswerte für eine Bebauung im allgemeinen unkritisch sind. Bei verformungsfähigen Böden können durch einen kontinuierlichen Vortrieb die Senkungen vermindert werden.

4.2 Massenkontrolle

Aus einer Gegenüberstellung der theoretischen mit der tatsächlich abgeführten Bodenmenge lässt sich eine Tendenz zur übermäßigen Bodenentnahme und die Gefahr von zusätzlichen Senkungen erkennen. Die Messung der abgeführten Bodenmenge muss dabei nicht mit absoluter Genauigkeit erfolgen. Auch eine überschlägige Mengenermittlung z. B. durch Wiegen der von einer Separieranlage ausgeschiedenen Bodenmenge zeigt, wenn auch mit zeitlichen Verzögerungen, entsprechende Tendenzen auf.

4.3 Optimaler Stützdruck

Durch eine möglichst genaue Einhaltung des für die Stabilisierung notwendigen Stützdrucks beim Vortrieb sind geringe Senkungswerte erreichbar, wenn dadurch die Entspannung im Ortsbrustbereich klein gehalten wird. Bei locker gelagerten Sanden hat sich andererseits gezeigt, dass durch eine Erhöhung des Stützdruckes über den aus Stabilitätsbetrachtungen abgeleiteten Stützdruck hinaus eine weitere Verminderung der Senkungen erreicht werden kann. Bei der Flüssigkeitsstützung hat sich die Anwendung des Druckluftpolsters nach dem Prinzip des Hydroschildsystemes bewährt. Die Regelpgenauigkeit bewegt sich im Bereich von 0,05 bis 0,1 bar und muss durch entsprechende Messgeräte sorgfältig überwacht, gesteuert und dokumentiert werden.

Bei Anwendung des Erd-druckschildprinzips können durch in der Arbeitskammer über die Druckwand gleichmäßig verteilte Druckmessdosen die Druckverhältnisse überwacht und der Stützdruck gemäß der Erfordernis im Ortsbrustbereich geregelt werden. Am einfachsten geschieht dies beim Abbauvorgang durch die Erhöhung oder Verminderung der Drehzahl des Schneckenförderers und damit der Fördermenge in der Schnecke.

Die Entwicklung der Senkungen ist bei der Flüssigkeitsstützung besser beherrschbar und beeinflussbar als bei der Erddruckstützung. Die Regelung des Stützdruckes ist sensibler als bei der Erddruckschildmaschine. Bei entsprechenden Durchlässigkeiten des Baugrundes oder bei vorhandenen Hohlräumen ist allerdings das Risiko des Flüssigkeitsverlustes vorhanden, was einen plötzlichen Druckverlust mit sich bringen kann. Bei Verdacht des Vorhandenseins von Bodenschichten mit sogenannten offenen Strukturen, z. B. sandarme Kiese mit hoher Durchlässigkeit oder Hohlräumen sollten weitergehende Bodenuntersuchungen, z. B. durch Einpressversuche, erfolgen. Bei der Erddruckschildmaschine gibt es diese Gefahr nicht; das gesamte System ist in seiner Funktion und Wirkung weniger anfällig. Dabei muss sichergestellt sein, dass durch das Austragsystem – Förderschnecke mit gegebenenfalls erforderlichen Zusatzrichtungen – kein plötzlicher Druckabfall eintreten kann.

4.4 Arbeiten in der Abbaukammer

Bei Störungen und der Notwendigkeit des Betretens

During the application of the EPB shield principle, the pressure cells which are evenly distributed over the pressure wall of the working chamber can be monitored and the supporting pressure regulated in keeping with the requirements at the face zone. This can be most easily accomplished during the excavation phase through increasing or diminishing the screw conveyor speed and in turn, the amount extracted by the screw.

The development of settlements can be more easily mastered and influenced in the case of slurry support than EPB support. Regulating the supporting pressure is more sensitive than in the case of the EPB shield machine. Given appropriate subsoil permeabilities or existing cavities, however, there is a risk of losing slurry, something which can result in a sudden loss of pressure. Should the presence of layers of soil with so-called open structures be suspected, e.g. gravels containing little sand with high permeability or cavities, then further soil investigations e.g. by means of injection tests should be undertaken. This danger does not exist in the case of the EPB shield machine; the entire system is less susceptible in terms of the way it functions and acts. In this connection, it must be ensured that no sudden loss in pressure can occur through the discharge system – the conveyor screw possibly with necessary ancillary equipment.

4.4 Activities in the Working Chamber

In the event of disturbances and the need to enter the working chamber, this can be done very easily in the case of slurry support through pumping out the slurry while

at the same time admitting compressed air. On the other hand, clearing out the working chamber in the case of the EPB shield machine is a complicated and tedious business. It should be observed that when admitting compressed air into the working chamber of the slurry supported shield machine, a filter cake which has a sealing effect is present. However, this dries out after a time so that there is a danger of air escaping resulting in the face collapsing. Thus it is essential that the working chamber is filled again with slurry at certain appropriate intervals so that the efficacy of the filter cake under compressed air is restored. If necessary, additional measures to seal the face have to be resorted to, such as applying foil.

If the cutting wheel is not largely closed at the front but designed as a spoked wheel, the use of supporting plates has proved itself. These are retracted towards the pressure wall under normal circumstances and are first extended to support the face between the spokes with the cutting wheel in a defined position. They can be applied both for the slurry and the EPB supported shield machine. Experience has shown that breaks in tunnelling are associated with greater settlements.

4.5 Tail gap Grouting

The scheduled, continuous and careful grouting of the tail gap has great influence on the development of settlements. Today it is standard practice to grout the injection mortar through lines distributed evenly over the periphery of the tail continuously into the entire shield track as the shield machine advances. Through corresponding monitoring and control devices,

des Arbeitsraumes lässt sich dies bei der Flüssigkeitsstützung sehr einfach durch Abpumpen der Stützflüssigkeit unter gleichzeitiger Beaufschlagung mit Druckluft regeln. Dagegen ist das Ausräumen der Arbeitskammer bei der Erddruckschildmaschine aufwendig und langwierig. Zu beachten ist, dass bei der Druckluftbeaufschlagung der Arbeitskammer der flüssigkeitsgestützten Schildmaschine ein abdichtender Filterkuchen entstanden ist. Dieser trocknet jedoch mit der Zeit aus, sodass die Gefahr von Luftaustritten besteht und des Hereinbrechens der Ortsbrust. Es ist deshalb erforderlich, dass in gewissen angemessenen Abständen die Arbeitskammer wieder mit Stützflüssigkeit aufgefüllt wird, um die Wirksamkeit des Filterkuchens unter Druckluft wieder herzustellen. Ggf. müssen zusätzliche Maßnahmen zur Abdichtung der Ortsbrust ergriffen werden, wie z. B. eine Verwendung von Folien.

Wenn das Schneidrad an der Front nicht weitgehend geschlossen, sondern als Speicherschneidrad ausgebildet ist, hat sich die Anwendung von Stützplatten bewährt. Diese sind im normalen Betrieb bis zur Druckwand zurückgefahren und werden erst zur Abstützung der Ortsbrust zwischen die Speichen bei einer definierten Lage des Schneidrades ausgefahren. Sie können sowohl für die flüssigkeits- als auch die erddruckgestützte Schildmaschine zur Anwendung kommen. Erfahrungsgemäß sind Vortriebsunterbrechungen mit vergrößerten Senkungen verbunden.

4.5 Schildspurverpressung

Von weiterem Einfluss auf die Entwicklung der Senkun-

gen ist die planmäßige, kontinuierliche und sorgfältige Verpressung der Schildspur. Es ist heute üblich, den Verpressmörtel durch gleichmäßig auf den Schildschwanzumfang verteilte Leitungen kontinuierlich beim Vorschub der Schildmaschine in die Schildspur über den gesamten Umfang zu verpressen. Durch entsprechende Überwachungs- und Steuervorrichtungen sollte eine druckgesteuerte und volumenkontrollierte Schildspurverpressung erfolgen, wobei ein Überdrücken möglich ist, was zu einer Reduzierung der Senkungen führen kann. Dabei ist darauf zu achten, dass der eingepresste Mörtel nicht nach vorne über den Ringspalt des Schildmantels in die Arbeitskammer fließt. Wichtig ist, dass die Zusammensetzung und Verarbeitbarkeit des Verpressmörtels durch Vorversuche jeweils auf die spezifischen Bedürfnisse des Einzelfalles abgestimmt wird.

Beim Verpressvorgang dürfen die Verpressdrücke nicht zu groß gehalten werden, da u. U. die Gefahr der Überbeanspruchung des Tübbingrings besteht. Der Einsatz einer Ringabstützvorrichtung kann dafür in Erwägung gezogen werden. Diese kann ungewollte Deformationen auch beim Verpressvorgang vermeiden und sichert damit auch geringe Senkungswerte.

4.6 Besondere Steuerungsvorgänge

Zur Steuerung der Schildmaschine wird auch mit Überschnitten beim Abbauvorgang gearbeitet, um einseitige, richtungsweisende Bewegungsvorgänge des Schildes zu bewirken. Der Überschnitt sollte jedoch klein gehalten werden, um

pressure and volume controlled shield track grouting should be facilitated. In this connection, overpressure can be used, which can lead to a reduction of the settlements. However, care should be taken to ensure that the mortar which has been injected does not flow forward through the annular gap of the shield jacket into the working chamber. It is essential that the composition and workability of the grouting mortar are determined through advance trials relating to the specific requirements of each individual case.

During grouting, the injecting pressure must not be kept too high as possibly there is the danger of over-straining the segmental ring. The application of a ring supporting device can be contemplated in this case. This can ensure that undesired deformations are also avoided during grouting which in turn assures lower settlement values.

4.6 Special Steering Processes

For controlling the shield machine, overcutting during the excavation process is applied in order to arrive at unilateral, direction-oriented shield movement cycles. However, the overcut should be kept as small as possible so that additional settlements are avoided. Extreme directional corrections resulting on constraints in the shield tail zone and undesired deformations can lead to additional settlements. Thus they should be avoided if at all possible. Deviations can be better compensated for by means of working out a new, adjusted alignment within the framework of the given tolerances.

Should the shield jacket be extremely long, it is worthwhile considering dividing it

and linking the shield tail by means of articulated jacks in order to be able to steer the machine more easily.

Regardless of whether the shield jacket is divided or articulated, the steering of the shield machine should generally be assisted by calculating the optimal ring position of the next conical ring to the tunnel axis as well as by activating the advancing jacks in accordance with requirements.

5 Face and Subsoil Stabilisation

5.1 General

Face stability with minimum face deformation must be assured in all operating states. The water pressure is the determining factor here along with the earth pressures which occur at the perpendicular face due to the subsoil conditions.

The necessary measures during breaks in tunnelling are generally different from those measures required during excavation. Accessibility during maintenance and repair require compressed air support at all times given a groundwater table; i.e. compressed air support has to be investigated for all headings undertaken in groundwater. Should the compressed air support not be feasible e.g. owing to high water overpressure, a diving operation might possibly be required to enter the working chamber.

Ultimate cases and incidents have to be taken into account during the planning phase. Corresponding verifications for all construction states have to be worked out for the execution phase.

5.2 Requirements

The prerequisites for safe excavation with only minimum settlements are sup-

dadurch nicht zusätzliche Senkungsvorgänge auszulösen. Auch extreme Richtungskorrekturen mit der Folge der Verzängung im Schildschwanzbereich und ungewollter Verformungen können zu zusätzlichen Senkungen führen. Sie sind daher möglichst zu vermeiden. Die Abweichungen können durch eine neu zu berechnende, angepasste Trassierung im Rahmen der vorgegebenen Toleranzen besser ausgeglichen werden.

Bei größeren Baulängen des Schildmantels ist zu überlegen, ob zur Verbesserung der Steuerungsmöglichkeit der Schildmantel geteilt und der Schildschwanz über Gelenkpressen gelenkig angehängt wird.

Unabhängig davon, ob der Schildmantel ungeteilt oder gelenkig ausgeführt wird, sollte die Steuerung der Schildmaschine in der Regel durch eine Berechnung der optimalen Ringlage des nächsten konischen Ringes zur Tunnelachse unterstützt werden, sowie durch unterschiedliche Beaufschlagung der Vortriebspresen erfolgen.

5 Ortsbrust- und Baugrundstabilisierung

5.1 Allgemeines

Die Ortsbruststabilität und eine geringe Ortsbrustverformung muss in allen Betriebszuständen gewährleistet sein. Neben den sich in Abhängigkeit von den Baugrundverhältnissen an der senkrechten Ortsbrust einstellenden Erddrücken ist der Wasserdruck der maßgebliche Einflussfaktor.

Die notwendigen Maßnahmen sind bei Betriebsunterbrechungen in der Re-

gel abweichend von den Maßnahmen beim Vortrieb. Die Begehbarkeit bei Wartung und Reparatur erfordert unter einem Grundwasserspiegel ausnahmslos Druckluftstützung; d. h. für alle Vortriebe unter Grundwasser ist Druckluftstützung zu untersuchen. Sollte die Druckluftstützung z. B. wegen hohem Wasserüberdruck nicht möglich sein, ist ggf. ein Tauchereinsatz bei der Begehung des Arbeitsraumes erforderlich.

Grenzfall- und Störfallbetrachtungen sind bereits in der Entwurfsphase anzustellen. Für die Ausführungsphase sind entsprechende Nachweise für alle Bauzustände zu erarbeiten.

5.2 Anforderungen

Die Stützung und Stabilisierung der Ortsbrust sind die Voraussetzungen für einen senkungsfreien und sicheren Vortrieb. Soweit der Baugrund nicht selbststabilisierend ist, wie z. B. standfester Fels, sind zusätzliche Maßnahmen unabdingbar. Je nach Schildmaschine sind folgende Stützungsmaßnahmen vorzusehen:

■ **Mechanische Stützung:**
Bei Handschilden wird mittels Bühnen und Stützplatten dem Erddruck entgegengewirkt.

Bei vollmechanisierten flüssigkeitsgestützten Schildmaschinen werden zur Stützung der Ortsbrust zwischen den Schneidradspeichen bei Stillstand Stützplatten ausgefahren

■ **Flüssigkeitsstützung:**
Wasser- und Erddruck wird entgegengewirkt mittels druckregelter Stützflüssigkeit

■ **Erdstützung:**
Wasser- und Erddruck wird mittels über die Förderschnecke druckkontrollier-

portung und Stabilisierung der Fläche. Unless the subsoil happens to be self-supporting e.g. stable rock, additional measures are essential. Depending on the type of shield machine, the following support measures have to be applied:

■ **mechanical support:**
platforms and supporting plates act against the earth pressure in the case of hand dug shields.

in the case of fully-mechanised, slurry-supported shield machines, supporting plates are extended between the cutting wheel spokes when the machine is at a standstill in order to support the face

■ **slurry-support:**
water and earth pressure is counteracted by pressure-regulated supporting slurry

■ **earth support:**
water and earth pressure is counteracted by means of pressure-controlled earth slurry removed via the screw conveyor

■ **compressed-air support/ compressed air activation:**
the water pressure is compensated by means of compressed air and the soil's stability is increased by dewatering it. The earth pressure must be coped with by additional mechanical support if need be.

It can be assumed that the working chamber has to be entered at some point during the heading either for operational reasons or because something unexpected happens. The working chamber of slurry and earth supported shields has to be emptied prior to this taking place. The support that is lost here must be replaced by compressed air and if necessary, ancillary measures.

Planned standstills with use of compressed air can be prepared for by means of advance measures in the sub-

soil. The necessary face and subsoil stabilisation measures have to be undertaken prior to emptying the working chamber in the event of standstills caused by unforeseen circumstances.

5.3 Subsoil Stabilisation

The subsoil conditions prevailing over a section to be headed can be of such a wide variety or the other marginal conditions can be so unfavourable that it is not possible to accomplish excavation with a minimum of subsidence without additional measures in some parts even given the best possible adapted tunnelling method. Even inevitable standstills with access of the working chamber can require stabilisation measures for the subsoil.

In this connection, among others things, the following measures for subsoil stabilisation should be foreseen from the shield machine or the tunnel:

- grouting ports in the shield skin
- thickening the supporting medium e.g. with sawdust
- grouting ports in the segments.

5.4 Subsoil Stabilisation from the Surface

Providing that the terrain along the route is accessible and no excessively high overburdens have to be mastered, the measures can be undertaken from the surface. In this connection, it is an advantage that these measures can be accomplished in advance without disturbing the tunnel drive.

Subsoil stabilisation measures e.g. via chemical grouting, jet-grouting or freezing are applied particularly at

tem, abgebautem Erdbrei entgegengewirkt

■ **Druckluftstützung/Druckluftbeaufschlagung:** Mittels abströmender Druckluft wird der Wasserdruck ausgeglichen und durch Entwässerung des Bodens seine Standfestigkeit erhöht. Der Erddruck muss erforderlichenfalls durch zusätzliche mechanische Stützung aufgenommen werden.

Es ist davon auszugehen, dass jeder Vortrieb betriebsbedingt oder unvorhergesehen eine Begehung der Abbaukammer erforderlich macht. Hierfür muss bei Flüssigkeits- und Erdstützung die Abbaukammer entleert werden. Die hierbei verlorengehende Stützung muss durch Druckluft und ggf. zusätzliche Maßnahmen ersetzt werden.

Geplante Stillstände können durch Vorwegmaßnahmen im Baugrund auf den Druckluftfall vorbereitet werden. Bei durch nicht vorhersehbare Einflüsse erzwungenen Stillständen müssen die erforderlichen Ortsbrust- und Baugrundstabilisierungsmaßnahmen vor dem Entleeren der Abbaukammer vorgenommen werden.

5.3 Baugrundstabilisierung

Die über eine Vortriebsstrecke anstehenden Baugrundverhältnisse können eine so große Bandbreite aufweisen oder die sonstigen Randbedingungen können so ungünstig sein, dass man mit dem bestmöglich angepassten Vortriebsverfahren bereichsweise ohne Zusatzmaßnahmen keinen senkungsarmen Vortrieb gewährleisten kann. Auch die unabdingbaren Stillstände mit Begehung der Arbeitskammer können Stabilisie-

rungsmaßnahmen im Baugrund erfordern.

Hierzu sollten u. a. folgende Möglichkeiten einer Baugrundstabilisierung aus der Schildmaschine bzw. dem Tunnel vorgesehen werden:

- **Verpressöffnungen im Schildmantel**
- **Andickung des Stützmediums z. B. mit Sägemehl**
- **Verpressöffnungen in den Tübbing**

5.4 Baugrundstabilisierung von der Geländeoberfläche

Sofern das Gelände im Trassenbereich zugänglich ist und keine zu hohen Überlagerungen zu überwinden sind, können die Maßnahmen von der Oberfläche aus vorgenommen werden. Vorteilhaft ist hierbei, wenn diese Maßnahmen vorab ohne Störung des Vortriebs ausgeführt werden.

Insbesondere vor Start- und Zielschächten werden zum Aus- und Einfahren Baugrundstabilisierungen, z. B. mittels Injektionen, Bodenvermörtelung nach dem Düsenstrahlverfahren oder Gefrieren ausgeführt.

Geplante Stillstandsorte (Bahnhöfe) mit Begehung der Abbaukammer können ebenso mit diesen Verfahren hergestellt werden.

Auch für das gewählte Vortriebsverfahren erkannte Problemzonen können damit für einen senkungsarmen Vortrieb vorbereitet werden. Gleiches gilt auch bei der Unterfahrung von senkungsgefährdeten Bauwerken und bei geringer Überdeckung.

5.5 Baugrundstabilisierung aus der Schildmaschine

Insbesondere bei unzugänglicher Oberfläche, zu

starting and target shafts for driving the shield out or in.

Planned standstill points (stations) with access to the working chamber can also be created using this method.

Zones recognised as problematic for the selected tunnelling method can also be prepared for a low-settlement drive. The same applies for passing under buildings endangered by settlement and for shallow depths.

5.5 Subsoil Stabilisation from the Shield Machine

Measures from the machine itself must be feasible especially in the event of inaccessible surface terrain, excessively high overburden or unexpected events having a destabilising effect. For this purpose, ports for subsoil stabilisation measures should be provided in the shield jacket and at the face zone. First and foremost, grouting to stabilise the subsoil around the machine head is necessary.

In the event of unexpected incidents, these measures will require stopping the machine to avoid further unacceptable settlements.

6 Mastering natural and artificial Obstacles

Even given careful prior investigation, encountering obstacles cannot always be ruled out. However obstacles can also frequently be identified when the route is selected and have to be calculated for during tunnelling.

The occurrence of obstacles demands that the associated risks are tackled in an intensive manner, e.g. in the choice of suitable cutting tools.

In the event of stones and boulders in soft ground, the

knowledge obtained from investigating the subsoil will enable a rock crusher to be positioned in such a way that the large majority of rocks can be crushed as far as possible so that only a few large boulders have to be removed manually through entering the working chamber. Generally, this can be avoided by use of disc cutters, which break the rocks. Often the diameter of the machine sets limits for the maximum size of the crusher.

Basically, it is easier to tackle obstacles in a slurry-supported shield machine than in an EPB shield machine.

Major difficulties are posed should timber be met, be it fossilised trees or foundation piles. The conventional extraction tools are not particularly suitable for cutting wood.

It is often difficult during tunnelling to realise that contact has been made with an obstacle. The outcome can be high wear, the destruction of tools or of parts of the cutting wheel right up to the cutting wheel becoming stuck.

Essentially it is possible to locate geological changes and obstacles (boulders, foundations etc.) prior to heading a tunnel by means of geophysical methods (seismics, radar). This advance investigation can be carried out from the machine or through boreholes.

Pre-investigation in soft material from the machine calls for systems which are integrated in the cutting wheel, extending as far as continuous measurement. Such systems require measurement data from the TBM for locating obstacles.

It is thus a welcome factor that work on developing tracking systems is progressing most intensively. These are capable of providing data re-

hoher Überlagerung oder bei unerwarteten destabilisierend wirkenden Ereignissen müssen Maßnahmen aus der Maschine selbst möglich sein. Hierzu sollten im Schildmantel und im Ortsbrustbereich Öffnungen für Baugrundstabilisierungsmaßnahmen vorgesehen sein. In erster Linie kommen Injektionen zur Stabilisierung des den Maschinenkopf umgebenden Baugrundes infrage.

Bei überraschend auftretenden Ereignissen werden diese Maßnahmen zur Vermeidung weiterer unverträglicher Senkungen einen Maschinenstillstand erfordern.

6 Bewältigung natürlicher und künstlicher Hindernisse

Auch bei sorgfältiger Vorerkundung ist das Anfahren von Hindernissen nicht immer sicher zu vermeiden. Oftmals sind aber auch Hindernisse schon bei der Trassenwahl bekannt und müssen beim Vortrieb eingeplant werden.

Das Auftreten von Hindernissen erfordert beim Entwurf der Maschine eine intensive Auseinandersetzung mit den damit verbundenen Risiken, z. B. bei der Wahl geeigneter Abbauwerkzeuge.

Bei erwarteten Steinen und Findlingen in Lockergestein wird man aus den Erkenntnissen der Baugrunderkundung die Art, Positionierung und Größe eines Steinbrechers so festlegen, dass nach Möglichkeit die überwiegende Anzahl von Steinen gebrochen werden kann und nur wenige zu große Steine von Hand durch Einstieg in die Abbaukam-

mer beseitigt werden müssen. In der Regel kann dies durch Rollenwerkzeuge, die die Steine zerkleinern, vermieden werden. Der Maschinendurchmesser setzt für die maximale Brechergröße oftmals Grenzen.

Grundsätzlich ist die Hindernisbehandlung in einer flüssigkeitsgestützten Schildmaschine einfacher zu handhaben als in einer Erddruckschildmaschine.

Große Schwierigkeiten sind beim Antreffen von Holz, seien es fossile Bäume oder Gründungspfähle, gegeben. Die üblichen Abbauwerkzeuge sind für Holzzerkleinerung schlecht geeignet.

Oftmals ist es schwierig, während des Vortriebs den Kontakt mit einem Hindernis zu erkennen. Hoher Verschleiß, die Zerstörung von Werkzeugen oder von Teilen des Abbaurades bis hin zum Festfahren des Schneidrads können die Folge sein.

Durch geophysikalische Verfahren (Seismik, Radar) ist es grundsätzlich möglich, geologische Veränderungen und Hindernisse (Findlinge, Fundationen etc.) im Vorfeld eines aufzufahrenden Tunnels zu orten. Diese Vorerkundung kann aus der Maschine oder aus Bohrungen heraus erfolgen.

Vorerkundung im Lockermaterial aus der Maschine heraus verlangt nach Systemen, die im Schneidrad integriert sind und häufig bis kontinuierlich messen. Solche Systeme benötigen zur Ortung von Hindernissen Messdaten der TBM.

Es ist daher sehr zu begrüßen, dass intensiv an der Entwicklung von Ortungssystemen gearbeitet wird, die über die Schildmaschine während des Vortriebs entsprechende Daten liefern

garding the ground conditions during tunnelling via the shield machine. Most promising are apparently seismic methods (e.g. sonic soft ground probing system).

7 Operating Safety of the Shield Machine

Operating safety is interpreted here as the total availability of all individual components.

Availability is determined contractually on the basis of existing formulae. It should not be lower than 85 %. A number of requirements have to be observed to secure operating safety and availability.

7.1 Systematic Maintenance

The machine manufacturer is responsible for supplying complete operating instructions at the latest during the trial runs. These state the nature of the maintenance and the relevant intervals. The carrying out of maintenance must be monitored and documented.

7.2 Changing Tools

The correct choice of cutting tools is decisive for the technical and economic success.

Bits must be checked and replaced at regular intervals before their bushes are affected. Should excessive wear be evident, the possibility of switching to other tools must be contemplated.

7.3 Storage of Components

After consulting with the manufacturer, stores of the machine components, which – as experience indicates – will probably have to be replaced during the operating period, have to be maintained.

7.4 Changing Tools for Shield Machines with EPB and Slurry Support

In this case, the working chambers have to be entered to check the tools, something which signifies the time-consuming replacement of the earth or slurry by compressed air. Here, it is necessary to resort to indications such as an increase in the torque and a higher thrust force in order to determine the right time for changing the tools.

Statistical evaluations relating to the state and service life of the tools in conjunction with the geomechanical values and machine parameters are helpful for determining the time when tools have to be changed.

It is customary to use scheduled, prepared areas in the subsoil for tool changing purposes ("stations").

7.5 QM/Working Instructions

Detailed working instructions, especially relating to cases when it is necessary to enter the chamber, have to be drawn up prior to tunnelling and discussed with those involved. This is best realised by compiling an organisation manual, in which the construction site organisation, the machine layout, the availability and layout of equipment, standard and special procedures and the safety concepts are laid down.

7.6 Risk analysis, interruptions, management of disruptions

It is advisable to undertake a risk analysis, which assesses possible cases of disruptions and determines remedies. These have to be documented in the working instructions.

(z. B. Sonic soft ground probing system).

7 Betriebs-sicherheit der Schildmaschine

Unter Betriebssicherheit wird in diesem Zusammenhang die Summe der Verfügbarkeit aller Einzelkomponenten verstanden.

Die Verfügbarkeit ist anhand bestehender Formeln vertraglich festzulegen. Sie sollte nicht unter 85 % liegen. Zur Sicherstellung von Betriebssicherheit und Verfügbarkeit sind eine Reihe von Vorgaben zu beachten.

7.1 Systematische Wartung

Der Maschinenhersteller hat spätestens zu den Probeläufen eine vollständige Bedienungsanleitung zu liefern, aus der die Art der Wartung und deren Intervalle hervorgehen. Die Durchführung ist zu überwachen und zu dokumentieren.

7.2 Werkzeugwechsel

Die richtige Wahl der Abbauwerkzeuge ist entscheidend für den technischen und wirtschaftlichen Erfolg.

Meißel sind in regelmäßigen Abständen zu kontrollieren und zu erneuern, bevor die Halterungen angegriffen werden. Bei übermäßigem Verschleiß müssen Überlegungen hinsichtlich veränderter Werkzeugbestückung angestellt werden.

7.3 Konsignations-lager

In Abstimmung mit dem Hersteller sind die Maschinenkomponenten vorzuhalten, deren Auswechslung während der Betriebszeit aus Erfahrung wahrscheinlich ist.

7.4 Werkzeugwechsel bei Schildmaschinen mit Erd- und Flüssigkeitsstützung

Hier muss zur Kontrolle der Werkzeuge die Arbeitskammer betreten werden, was den zeitaufwendigen Ersatz der Erd- bzw. Flüssigkeitsfüllung durch Druckluft bedeutet. Man wird hier auf Indikatoren, wie Ansteigen des Drehmomentes und Erhöhung der Vorschubkraft, zurückgreifen, um den Zeitpunkt des Werkzeugwechsels zu bestimmen.

Hilfreich zur Bestimmung des Zeitpunktes eines Werkzeugwechsels sind auch statistische Auswertungen über Zustand und Standzeit der Werkzeuge in Verbindung mit den geomechanischen Kennwerten und Maschinenparametern.

Üblich sind auch gezielt vorbereitete Bereiche im Baugrund zum Werkzeugwechsel („Bahnhöfe“).

7.5 QM/Arbeitsanweisungen

Detaillierte Arbeitsanweisungen, insbesondere für die Einstiegsfälle, sind vor Beginn des Vortriebes aufzustellen und mit den Ausführenden durchzusprechen. Dies geschieht am wirkungsvollsten durch die Erstellung eines Organisationshandbuchs, in dem die Baustellenorganisation, die Maschinenauslegung, die Bereithaltung und Auslegung der Gerätschaften, der Ablauf des Normal- und Sonderbetriebes und die Sicherheitskonzepte festgelegt sind.

7.6 Risikoanalyse/ Störfälle/ Störmanagement

Es empfiehlt sich, eine Risikoanalyse durchzuführen, bei der mögliche Störfälle bewertet und Abhilfemaß-

7.7 Personnel

A major factor to enhance operating safety and availability is the employment of experienced personnel for key positions. It is an error to assume that tunnelling can be carried out technically and economically by personnel without the appropriate experience and training.

8 Control Technology/Data Compilation and Evaluation

8.1 Directional Control

Today, the required control precision in conjunction with high rates of advance call for semi or fully automatic control systems.

Various control systems are available on the market, e.g. ZED, Tuma, Dywidag, VMT-Herrenknecht. In order to ensure that the control system functions perfectly, it is essential when the machine is being designed, particularly with regard to its back-up, to make sure that a laser window is left open, temperature influences are compensated and all important components are accessible.

By means of the computer programmes linked to the control system, the ring construction sequence, the ring torsion as well as the action of the jacks can be determined. However, a probability check is necessary.

Systems exist with "traveling" theodolites, which determine their position of their own accord through reference to rearward pipe sections, for curved pipe drives. The basis here is provided by the assumption that the pipe is located at the same spot as previously occupied by the shield machine (invariance of the pipe position). This not

quite accurate assumption still generally suffices for attaining the necessary accuracy. The measurement accuracy for the track of pipe jacking shields can also be improved in absolute direction and position through the application of a digital gyroscope in conjunction with a hydrostatic tube balance or a digital inclinometer. This method also results in considerable time being saved, particularly during curved passages.

8.2 Data Compilation

Technology nowadays affords the possibility of practically unlimited data compilation. It is essential that this is restricted to what is absolutely necessary.

During excavations with supported face, the following data should at least be recorded:

- total thrust
- thrust on cutterhead
- torques
- working chamber pressure
- suspension level (for slurry support)
- discharge amount and density (for slurry support)
- screw conveyor speed (for EPB support)
- volume and pressure of the annular gap grout
- rough estimation of the transported amount of soil
- thrust stroke.

These values are particularly important for reconstructing irregularities. They serve too for subsequent correlation between geological/hydrological conditions and excavation and driving rates. For this reason, it must be assured that the data can be related to a driving state at a given time.

Apart from the time-related tabular listing or summary of the tunnelling data, a graphic presentation of the most important data governing the

nahmen festgelegt werden. Diese sind in den Arbeitsanweisungen zu dokumentieren.

7.7 Personal

Ein wesentlicher Faktor zur Erhöhung von Betriebssicherheit und Verfügbarkeit ist erfahrenes Personal für Schlüsselfunktionen.

8 Steuerungstechnik/Datenerfassung und -auswertung

8.1 Richtungssteuerung

Die geforderten Steuergenauigkeiten in Verbindung mit hohen Vortriebsgeschwindigkeiten erfordern heute halb- oder vollautomatische Steuersysteme.

Verschiedene Steuersysteme sind heute am Markt erhältlich, z. B. ZED, Tuma, Dywidag, VMT-Herrenknecht. Zur Sicherstellung der einwandfreien Funktion des Steuersystems muss bereits bei der Konstruktion der Schildmaschine, insbesondere im Nachläuferbereich, darauf geachtet werden, dass ein Laserfenster offen bleibt, Temperatureinflüsse kompensiert werden und eine ausreichende Zugänglichkeit aller wesentlichen Teile sichergestellt ist.

Anhand von an das Steuersystem angeschlossenen Rechenprogrammen kann die Ringbaufolge, die Ringverdrehung sowie die Pressenbeaufschlagung ermittelt werden. Eine Probabilitätskontrolle ist jedoch erforderlich.

Für gekrümmte Rohrvortriebe existieren Systeme mit „mitfahrenden“ Theodoliten, die sich ihren Standpunkt durch Bezug auf rückwärtige Rohrstrecken selbst bestimmen! Grundlage dazu

ist die Annahme, dass das Rohr sich an der gleichen Stelle befindet wie vorher die Schildmaschine (Invarianz der Rohrlage). Diese nicht ganz richtige Annahme reicht jedoch im allgemeinen für die geforderte Fahrgenauigkeit aus. Die Messgenauigkeit für die Fahrspur von Rohrvortriebsschilden kann auch durch den Einsatz eines digitalen Kreiselkompasses verknüpft mit einer Schlauchwaage oder eines digitalen Neigungsmessgerätes in absoluter Richtung und Lage verbessert werden. Dieses Verfahren hat auch einen erheblich zeitsparenden Einfluss, insbesondere bei Kurvenfahrten.

8.2 Datenerfassung

Die Technik bietet heute die Möglichkeit einer fast unbegrenzten Datenaufnahme. Hier liegt die Kunst in der Beschränkung auf das Sinnvolle.

Bei Vortrieben mit gestützter Ortsbrust sollten mindestens folgende Daten aufgenommen werden:

- Vortriebskräfte
- Andruckkräfte
- Drehmomente
- Abbaukammerdruck
- Suspensionsspiegelhöhe (bei Flüssigkeitsstützung)
- Fördermenge und -dichte (bei Flüssigkeitsstützung)
- Schneckendrehzahl (bei Erddruckstützung)
- Volumen und Druck der Ringspaltverpressung,
- Überschlägige Erfassung der geförderten Bodenmenge
- Vorschubweg.

Diese Werte sind insbesondere wichtig bei der Konstruktion von Unregelmäßigkeiten. Sie dienen auch zur nachträglichen Korrelation zwischen geologischen/hydrologischen Verhältnissen und Abbau- und

driven length should also be provided. These visualised data relating to the current operating state of the shield machine form an important addition to the geotechnical data available on the tunnel. As a result, they should be integrated in a joint plan if possible.

Data compilation also serves for coping with future eventualities. By means of radar or sonic measurements, the subsoil that is being penetrated can if necessary be investigated in advance to trace possible problem zones such as boulders or erosion.

Such evaluations should be carried out currently.

9 Changing Methods by means of Modification or Conversion

Tunnelling machines are used in very different geological, hydrogeological and geotechnical conditions. As a consequence, there are various techniques for supporting the face and removing the spoil.

9.1 Methods

9.1.1 Characterising Features

- a) Unsupported face with the spoil removed via belt or chain conveyor (SM V1)*
- b) Compressed air supported face (SM V3)*
- c) Slurry-supported face with spoil removed via pumps (SM V4)*
- d) EPB-supported face with spoil removed via screw conveyor (SM V5)*

* Designations in accordance with "Recommendations for selecting and evaluating Tunnel Boring Machines". Tunnel 5/1997, page 20–35 pertaining to a)

In the case of a stable face and depending on the hydrogeological conditions, tun-

nelling machines without face support are used. The spoil is removed from the extraction chamber via a belt or chain conveyor, with the follow-up material transport via track, belt or dumper.

pertaining to b)

In the case of headings below the groundwater level, the face can be supported by compressed air. This has to be accomplished through a suitable material lock so that only the working chamber is placed under compressed air and not the whole tunnel.

pertaining to c)

Loose non-cohesive soils such as gravels, sands and extremely fissured rock, possibly in conjunction with high air permeabilities and high groundwater levels, require the face to be supported by a membrane, which is formed with the help of a bentonite mix. The spoil is removed by flushing. The removed soil is separated from the supporting slurry. This technique is known under names such as hydro, mix or slurry shield tunnelling.

pertaining to d)

Clayey and silty soils permit the application of shield machines with EPB supported face and screw conveyor discharge. Compared with slurry support, the problem of the cutting tools clogging plays a more minor role. The transport capacity of the follow-up spoil haulage via conveyor belts, track or high viscosity pumps is higher, there is no need for separation and the possibility of dumping the spoil generally presents no problems. Polymer additives such as foam have to be checked to find out if they are biologically acceptable.

9.1.2 Changing the Operating Mode

A change of the operating mode without conversion is

Vortriebsleistung. Aus diesem Grund ist sicherzustellen, dass die Daten einem Vortriebszustand mit Zeitanzeige zugeordnet werden können.

Neben der nach Zeit geordneten tabellarischen Aufstellung bzw. Zusammenfassung der Vortriebsdaten sollte auch eine grafische Darstellung der wichtigsten Daten über die Vortriebslänge vorgesehen werden. Diese visualisierte Information über den jeweiligen Betriebszustand der Schildmaschine bildet eine wichtige Ergänzung zu den im Tunnelband enthaltenen geotechnischen Angaben. Sie sollte deshalb nach Möglichkeit in einen gemeinsamen Plan integriert werden.

Die Datenerfassung dient daneben auch der Vorauschau. Durch Radar- oder Schallmessungen kann ggf. der aufzufahrende Baugrund vorab im Hinblick auf evtl. Problembereiche wie z. B. Findlinge oder Auskolkungen erfasst werden.

Diese Bewertungen sollten zeitnah ausgeführt werden.

9 Verfahrenswechsel durch Umbau oder Umstellung

Tunnelvortriebsmaschinen werden in sehr unterschiedlichen geologischen, hydrogeologischen und geotechnischen Verhältnissen eingesetzt. Daraus ergeben sich für die Stützung der Ortsbrust und den Materialaustrag unterschiedliche Verfahrenstechniken.

9.1 Verfahren

9.1.1 Unterscheidungsmerkmale

a) Ungestützte Ortsbrust mit Materialaustrag über Band oder Kette (SMV1)*

b) Druckluftbeaufschlagte Ortsbrust (SMV3)*

c) Flüssigkeitsgestützte Ortsbrust mit Materialaustrag über Pumpen (SMV4)*

d) Erddruckgestützte Ortsbrust mit Materialaustrag über Schnecke (SMV5)*
(* Bezeichnungen gemäß „Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen“. Tunnel 5/1997, Seiten 20–35)

zu a) Bei standsicherer Ortsbrust und je nach hydrogeologischen Bedingungen kommen Tunnelvortriebsmaschinen ohne Ortsbruststützung zum Einsatz. Der Materialaustrag aus der Abbaukammer erfolgt über Band- bzw. Kettenförderer, der nachgeschaltete Materialtransport über Gleis, Band oder Dumper.

zu b) Bei Vortrieben unterhalb des Grundwasserspiegels kann eine Beaufschlagung der Ortsbrust durch Druckluft erfolgen. Notwendigerweise erfordert dies eine geeignete Materialschleuse, wenn nur die Arbeitskammer unter Druck gesetzt wird und nicht der gesamte Tunnel.

zu c) Rollige kohäsionslose Böden wie Kiese, Sande und stark klüftiger Fels, eventuell einhergehend mit hohen Luftdurchlässigkeiten und hohen Grundwasserständen, erfordern eine Stützung der Ortsbrust durch eine Membrane, die sich mit Hilfe eines Bentonitgemisches bildet. Der Materialaustrag erfolgt mittels Spülförderung. Eine Separierung trennt den abgebauten Boden von der Stützflüssigkeit. Bekannt ist diese Verfahrenstechnik unter Begriffen wie Hydro-, Mix-, oder Slurryschildvortrieb.

zu d) Tonige und schluffige Böden erlauben den Einsatz von Schildmaschinen mit erd-

possible in the following cases:

a) Unsupported Face

In soils carrying a lot of water, it can be necessary to introduce compressed air into the extraction chamber of a shield machine. This operating mode, however, is only possible providing the extraction chamber can be sealed against pressure. In addition, a material lock (chamber lock, screw conveyor) is necessary.

b) Slurry-supported Face

In the event of increasingly stable soil or in order to reduce clogging of the cutting wheel, it is advisable to change the operating mode, through replacing the slurry support by compressed air support with partly lowered bentonite level.

c) EPB-supported Face

In the event of increasingly stable soil, the EPB support can partly be replaced by compressed air. The earth slurry level can only be lowered to such an extent that no compressed air escapes through the screw conveyor. In special cases, compressed air can also be dispensed with. Excavation then is carried out under atmospheric conditions. Through the resultant higher strength of the loosened soil, the screw conveyor will be subject to more wear.

9.2 Changing the Method

The field of application of shield machines with a certain kind of technology has considerably expanded through the further development of the cutting tools and discharge techniques as well as the application of chemical additives for conditioning the soil or the supporting suspension.

The outcome is an ever greater overlapping sector as

far as applying EPB shields and shields with slurry-supported face are concerned even in fields which had previously been given over to another technology.

Notwithstanding, a change in technology can be inevitable on account of changing subsoil conditions during the course of heading a tunnel, because a change in the operating mode is not worthwhile for economic reasons or generally impossible.

Changing the method is usually linked to modifying the cutting wheel, the method of removing the spoil, the follow-up spoil discharge right up to post-treatment and if need be, dumping.

A corresponding means of access is required in order to modify the machine. This is usually provided through a shaft.

9.2.1 Unscheduled Change of Method through Modification

Should the subsoil conditions change unexpectedly during the course of a shield drive and in turn, the basic assumptions and prerequisites for determining the method, a change of face support can also become necessary for scheduling or economic reasons. Usually, the shield machine has to be modified from within the driven tunnel itself. This is bothersome and time-consuming, conversion can last several weeks. This results in high costs, a possible time delay, further additional measures to speed up the project and related costs. In some cases, soil stabilisation measures have to be undertaken to temporarily shore up the face. An unscheduled change of method should be excluded as far as possible through suitable advance investigation.

druckgestützter Ortsbrust und Schneckenausstrag. Gegenüber der Flüssigkeitsstützung spielt die Verklebungproblematik der Schneidwerkzeuge eine geringere Rolle. Die mögliche Transportleistung der nachgeschalteten Materialförderung über Förderbänder, Gleis oder Dickstoffpumpen ist höher, eine Separierung entfällt und die Deponiermöglichkeit des Abraums ist in der Regel unproblematischer. Polymere Zusatzmittel, wie Schaum, müssen auf ihre biologische Abbaubarkeit überprüft werden.

9.1.2 Wechsel der Betriebsart

Ein Wechsel in der Betriebsart ist in folgenden Fällen ohne Umbau möglich:

a) Ungestützte Ortsbrust

In stark wasserführenden Böden kann es erforderlich werden, den Abbauräum einer Schildmaschine mit Druckluft zu beaufschlagen. Diese Betriebsart ist allerdings nur möglich, wenn der Abbauräum druckdicht verschließbar ist. Außerdem wird dann eine Materialschleuse (Kammerschleuse, Förderschnecke) erforderlich.

9.2.2 Scheduled Change of Method through Modification

The nature of the face support and in turn, the entire technology including the supply and disposal logistics for a tunnelling machine are determined at a very early stage of the planning process. Any unforeseen change in the technology must be taken into consideration during planning. In order to be able to alter the shield machine technically in the starting or target shaft: locating for these should be in the transition zone of changing subsoil con-

ditions. Should the conversion process not be possible in the shaft for topographical or other reasons, then it has to be carried out if need be protected by a specially set up „station“ from the completed tube.

9.2.3 Scheduled Change of Method through Conversion

The costs and the amount of time needed to change a method are considerable. Especially if the material discharge and the follow-up material transport system also

9.3.1 Wechsel zwischen flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und Bodenausstrag mittels Flüssigkeitsförderung zur Erddruckstützung mit Schneckenausstrag am Beispiel Duisburg TA 7/8 durch Umbau

Auf der 6,0 km langen Tunnelstrecke wechselt die Geologie zwischen quartären Kiesen und Sanden und weichen bis steifen Kreideschichten. Aufgrund der wechselhaften bodenmechanischen Eigenschaften des Baugrunds wurde eine Umstellung der Verfahrenstechnik im Zuge der Vortriebsarbeiten als notwendig angesehen.

Der Umbau war im Start- und Zielschacht vorgesehen, der daher in den Wechselbereich der Geologie verlegt wurde.

Die Vortriebsanlage war zunächst für die Verfahrenstechnik „Flüssigkeitsstützung“ ausgelegt und sollte auf „Erddruckstützung“ umgebaut werden. Aufgrund der notwendigen Leistung im EPB-Betrieb wurden die installierte Pressenkraft und das Drehmoment bereits für den Einsatz im Erddruckbetrieb ausgelegt.

Für den Wechsel des Verfahrens sollte das untere Segment des Schneidenschuhes mit Steinbrecher, Rechen, Ansaugrohr und Bentonitdüsen gegen ein Element mit Förderschnecke und Verschlussmöglichkeit an der ursprünglichen Tauchwand, das offene Schneidrad gegen eine geschlossene Schürfscheibe mit Schaumaustrittsöffnung ausgetauscht werden.

Die Stützplatten und der Tauchwandschieber sollten ausgebaut werden.

Im Bereich der Nachläufer war vorgesehen, die Komponenten zur hydraulischen Förderung des Materials gegen eine Bandförderanlage auszutauschen, die Separieranlage dafür entfallen zu lassen.

Als Folge der erzielten hohen Vortriebsleistungen sowie Maßnahmen zur Minimierung der Verklebung der Abbauwerkzeuge und zur Reduzierung des Druckes im Schneidradzentrum wurde jedoch in der Bauausführung auf den Umbau verzichtet.

9.3.1 Change between slurry-supported Face and Soil Discharge via Slurry Support to EPB-Support with Screw Conveyance – taking the Example of Duisburg TW 7/8 – through Modification

Over the 6.0 km long tunnel route, the geology changes from quaternary gravels and sands and soft to stiff chalk layers. On account of the changing soil mechanical properties of the subsoil, a change of technology during tunnelling operations was regarded as necessary.

The modifications were foreseen to take place in the starting and target shaft, which was thus set up in the geological transition zone.

The tunnelling machine was initially designed for “slurry-support” technology and was to be modified to the “EPB support mode”. Owing to the required power in the EPB mode, the installed thrust force and the torque were designed in advance for application in this mode.

When the method was changed, the lower segment of the cutting edge with rock crusher, screen suction pipe and bentonite nozzles had to be replaced by an element with screw conveyor and possible connection to the original submersible wall, while the open cutting wheel had to be exchanged for a closed cutting disc with foam aperture.

The supporting plates and the submersible wall valve were to be removed.

It was intended to replace the components for the hydraulic transport of the material with a belt conveyor unit on the back-up and to dispense with the separation plant.

However, as a result of the high rates of advance achieved as well as measures designed to minimise clogging of the extraction tools and reduce the pressure at the cutting wheel centre, no modifications were undertaken in practice.

9.3.2 Wechsel zwischen flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und Bodenaustrag mittels Flüssigkeitsförderung zur ungestützten Ortsbrust mit Bandaustrag am Beispiel Grauholztunnel durch Umbau bzw. Umstellung

Der Grauholztunnel durchquert glaziale, sehr heterogene Lockergesteinszonen mit praktisch allen möglichen Kornverteilungen, über und unter dem Grundwasserspiegel, weichen Fels der Molasseformation und mehrere Abschnitte mit gemischter Ortsbrust.

Die Lockersteine reichen von nachglazialen, wenig bis leicht vorbelasteten Tonen, reinen Schluffen, fast sauberen Fein- bis Mittelsanden bis zu fast sauberen Kiesen, aber auch bindigen Grundmoränen. Die hydrogeologischen Verhältnisse sind von stark schwankenden Durchlässigkeiten und unterschiedlichen Druckverhältnissen gekennzeichnet. Die quartären Sedimente werden vom Fels aus dem Tertiär der unteren Süßwassermolasse unterlagert. Der Fels tritt an einigen Stellen zutage, während wenige hundert Meter daneben große Lockergesteinsüberdeckungen angetroffen werden.

Zur Ausführung gelangte eine Tunnelvortriebsmaschine mit 11,6 m Durchmesser.

Im Lockergestein und im Fels mit geringer Überlagerung und gemischter Ortsbrust wurde die TVM als Slurry-Schild mit flüssigkeits- und teilweise druckluftgestützter Ortsbrust und hydraulischer Förderung betrieben.

In den Felsabschnitten war die TVM als Hartgesteinsmaschine (TBM) mit einer Abförderung des Abraumes über ein Maschinenband eingesetzt. Im Vortriebsverfahren mit hydraulischer Förderung wurden die vorhandenen Steine mit Hilfe eines zentral angeordneten Steinbrechers zerkleinert und anschließend im Flüssigkeitskreislauf zur Primärseparierung auf dem Nachläufer und teilweise zur Sekundärseparierung vor das Tunnelportal gefördert und getrennt.

Das Schneidrad war zu Beginn des Vortriebes mit Disken und Baggerzähnen besetzt, das im Verlauf der Vortriebsarbeiten umgebaut wurde zugunsten von Schneidleisten an den Flanken der Speichen.

Im Vortriebsverfahren der flüssigkeitsgestützten Ortsbrust traten aufgrund vorhandener Tongesteine häufig Verklebungserscheinungen der Schneidwerkzeuge und des Schneidrades auf. Schluffe wurden in der Suspension gelöst mit der Folge hohen Verschleißes. Der Werkzeugwechsel erfolgte unter Druckluftstützung. Da der Untergrund auf Druckluft anders als auf Flüssigkeitsstützung reagierte, ergaben sich neue Probleme. In gering durchlässigen Böden reichte die normale Stützflüssigkeit zur Bildung einer Membrane aus, bei Böden mit hoher Durchlässigkeit mussten Spezialflüssigkeiten mit Additiven und Füllstoffen eingesetzt werden, um eine Membrane zum Druckaufbau bilden zu können.

Um der Verklebungsproblematik der Schneidwerkzeuge zu entgehen, wurde so oft es ging die Betriebsart der Teilabsenkung des Flüssigkeitsspiegels mit Druckluftstützung gewählt. Hohe Senkungen infolge unvollständiger Stützung in der Firste waren die Folge.

Das Schneidrad war peripher angetrieben, sodass das Zentrum der Maschine frei blieb für die Durchführung eines Förderbandes im Hartgesteinsvortrieb, das den Tunnelausbruch auf ein nachgeschaltetes Band übergab. Zu diesem Zweck wurden die Brecherstempel ausgebaut, ein Förderband in das im Schneidradzentrum sitzende Brechergehäuse geschoben und die Tauchwandöffnung verschlossen.

Die Förderbandöffnung konnte nach dem Zurückziehen des Förderbandes rasch mit Hilfe einer Schnellverschleißeinrichtung verschlossen und damit auf hydraulische Förderung mit Flüssigkeitsstützung der Ortsbrust umgerüstet werden.

Bei diesem Tunnelvortrieb wurde der Wechsel zwischen zwei Verfahrenstechniken erfolgreich eingesetzt.

b) Flüssigkeitsgestützte Ortsbrust

Bei zunehmend standfestem Boden oder zur Reduzierung der Verklebung des Schneidrades ist ein Wechsel der Betriebsart sinnvoll, indem die Flüssigkeitsstützung zum Teil durch eine Druckluftstützung mit teilabgesenktem Bentonitpiegel ersetzt wird.

c) Erddruckgestützte Ortsbrust

Bei zunehmend standfesten Böden kann die Erddruckstützung teilweise durch Druckluft ersetzt werden. Die

Absenkung des Erdbreispiegels kann nur so weit erfolgen, dass keine Druckluft durch die Schnecke entweicht. In besonderen Fällen kann auch auf die Druckluft verzichtet werden. Der Abbau erfolgt nunmehr unter atmosphärischen Bedingungen. Durch die in diesem Fall höhere Festigkeit des gelösten Bodens wird der Verschleiß der Austragschnecke anwachsen.

9.2 Verfahrenswechsel

Der Einsatzbereich von Schildmaschinen einer be-

have to be changed. Thus should the technology have to undergo a scheduled change, it has to be examined whether suitable technical provisions can simplify the modifications or even make them entirely superfluous.

Recent developments in shield machine technology make it possible for the method to be converted within a few shifts, even within hours. This conversion can be accomplished at any desired point in the tunnel.

As a change of method also results in a change of the

follow-up material transport, added costs for converting the follow-up material transport system must be taken into account during investment consideration favouring variable machine technology. The conversion times for the technology and the follow-up material transport should be in harmony with one another. Thus it is not really acceptable if the shield machine can be converted within a few hours but days are required to convert the follow-up material transport system.

The dimensioning of the

9.3.2 Change between slurry-supported Face and Soil Discharge via Slurry Conveyance to unsupported Face with Belt Conveyance taking the Example of the Grauholz Tunnel - through Modification or Conversion

The Grauholz Tunnel passes through glacial, extremely heterogeneous soft ground zones with practically all possible grain distributions, above and below the groundwater level, soft rock of the molasse formation and several sections with a mixed face.

The soft rocks range from post-glacial, low to slightly weathered clays, pure silts, practically clean fine to medium sands right up to almost clean gravels as well as cohesive ground moraines. The hydrogeological conditions are characterised by strongly fluctuating permeabilities and differing pressure conditions. The quaternary sediments are underlain by tertiary rock of the lower sweet water molasse. The rock crops out at a number of points, whereas a few hundred metres away expansive soft ground sections of overburden are encountered.

A tunnelling machine with 11.6 m diameter was used for the project.

In soft ground and in rock with slight overburden and mixed face, the tunnelling machine was operated as a slurry shield with slurry and in some cases, compressed air supported face and hydraulic conveyance.

In the rock sections, the tunnelling machine was applied as a solid rock machine (TBM) with the spoil removed via a machine belt. When hydraulic spoil handling was used, the rocks encountered were crushed by means of a centrally located crusher and subsequently carried in the fluid cycle for primary separation on the back-up and partly for secondary separation in front of tunnel portal.

The cutting wheel was fitted with discs and teeth prior to tunnelling. During the course of the excavation work, it was modified with cutting edges being placed on the flanks of the spokes.

When in the mode with slurry-supported face, clogging frequently occurred on the cutting tools and the cutting wheel on account of the presence of clayey rocks. Silts were dissolved in the suspension so that higher wear resulted. The tools were replaced under compressed air support. As the underground reacted differently to compressed air as to slurry supporting, fresh problems ensued. In slightly permeable soils, the normal supporting slurry sufficed to form a membrane. In the case of soils with greater permeability, special slurries had to be employed with additives and filling materials so that a membrane could be produced to sustain pressure.

In order to avoid the problems caused by the clogging of the cutting tools, the partial lowering of the fluid level with "compressed air support" was selected as often as possible. The outcome was high settlements owing to incomplete support in the roof section.

The cutting wheel was driven on the periphery so that the machine centre was free for installing a conveyor belt in solid rock mode, which passed on the tunnel spoil to a follow-up belt. For this purpose end, the crusher jaws were removed, a conveyor belt pushed into the crusher housing at the centre of the cutting wheel and the submersible wall opening closed.

The conveyor belt opening could be rapidly closed after it was pulled back using a jiffy closing device and in this way modified to hydraulic spoil handling with slurry-supported face.

For this tunnelling project, the change between 2 technologies was successfully employed.

stimmten Verfahrenstechnik hat sich durch die Weiterentwicklung der Abbauwerkzeuge und Fördertechniken sowie der Anwendung von chemischen Zusätzen zur Konditionierung des Bodens bzw. der Stützsuspension deutlich verbreitert.

Die Folge ist ein immer größerer Überlappungsbereich in der Einsetzbarkeit von Erddruckschilden und Schilden mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust, selbst in jenen Einsatzbereichen, die bislang der jeweils anderen Technologie vorbehalten waren.

Dennoch kann infolge wechselhafter Baugrundverhältnisse im Verlauf einer aufzufahrenden Tunnelstre-

cke ein Wechsel in der Verfahrenstechnik unumgänglich werden, weil ein Wechsel in der Betriebsart aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll oder generell nicht möglich ist.

Mit einem Verfahrenswechsel ist meist eine Modifizierung des Schneidrades, des Bodenaustragsverfahrens, der nachgeschalteten Materialförderung bis zur Nachbehandlung und gegebenenfalls auch der Deposition verbunden.

Für die maschinentechnische Veränderung ist eine entsprechende Zugangsmöglichkeit erforderlich. Dies wird in der Regel über einen Schacht erfolgen.

transport capacity of the alternative material handling method should be set at what is regarded as the most suitable performance. The more frequently the change of method is anticipated, all the more should be invested in a rapid modification or conversion of the method. Should the technical provisions merely be an option for the event that the selected method does not achieve the expected performances, less will be invested than for a scheduled change resulting from altered subsoil conditions.

In the case of a universal tunnelling machine, limitations must be reckoned with regarding the maximum rates of advance which are achieved

by means of individual technologies.

9.2.4 Common Changes of Method

In practice, the following changes of method are known. In the interim, it has become possible in engineering terms to achieve changes in method, which previously could only be arrived at through modifications, by means of conversion.

Slurry-supported shield	
SM-V4 \$ shield without support	SM-V1*
Slurry-supported shield	
SM-V4 \$ EPB shield	SM-V5*
EPB shield	
SM-V5 \$ shield without support	SM-VI*

9.3.3 Change between EPB-supported Face and Soil Discharge via a Screw conveyor slurry-support Face and Slurry Conveyance and vice versa taking the Example of Socatop, Paris – through Conversion

The following formations are encountered along the route:

Sandy soils in Fontainebleau, plastic clayey soils, limestone in Champigny, marl and gravel, lime, sandy soils in Beauchamp, false letten, massive limestone, sandy soils in Auteuil, marl in Meudon, oyster marl, limestone and ground clayey soils, supra gypsum marl.

This large number of extremely different geological layers characterises the heterogeneity of the subsoil that has to be penetrated.

The frequent change of geotechnical conditions made a corresponding alteration of the technology essential in order to ensure optimal and economic tunnelling conditions.

The tunnelling machine was thus designed in such a manner that it contained the installations necessary for both modes (EPB and slurry support).

As a result, the machine was equipped with screw conveyor as well as with pump, flushing nozzles and rock crusher. The cutting wheel did not require to be modified.

After retracting the screw conveyor and activation of the rock crusher, the machine was converted from EPB support to slurry support or vice versa within a few hours.

9.3.3 Wechsel zwischen erddruckgestützter Ortsbrust und Bodenaustrag mittels Schnecke zur flüssigkeitsgestützten Ortsbrust und Flüssigkeitstransport und umgekehrt am Beispiel Socatop, Paris, durch Umstellung

Entlang der aufzufahrenden Strecke stehen folgende Formationen an:

Sandböden in Fontainebleau, plastische Tonböden, Kalkstein in Champigny, Mergel und Schotter, Kreide, Sandböden in Beauchamp, falsche Letten, Massenkalkstein, Sandböden in Auteuil, Mergel in Meudon, Austernmergel, Kalkstein und grüne Tonböden, Supragipsmergel.

Diese Vielzahl sehr unterschiedlicher geologischer Schichten charakterisiert die Heterogenität des zu durchörternden Baugrunds.

Der häufige Wechsel der geotechnischen Verhältnisse zwingt zu einer entsprechenden Veränderung der Verfahrenstechnik, wenn optimale und wirtschaftliche Vortriebsbedingungen geschaffen werden sollen.

Die TVM war daher so konzipiert, dass sie alle für beide Verfahren (Erddruck- und Flüssigkeitsstützung) erforderliche Einbauten enthält.

So war die Maschine mit Schnecke als auch mit Pumpe, Spüldüsen und Steinbrecher ausgerüstet. Das Schneidrad brauchte nicht modifiziert zu werden.

Durch Zurückziehen der Förderschnecke und Aktivierung des Steinbrechers war die Umstellung binnen weniger Stunden von Erddruckstützung auf Flüssigkeitsstützung oder umgekehrt möglich.

9.2.1 Unplanmäßige Verfahrenswechsel durch Umbau

Verändern sich im Verlauf eines Schildvortriebes die Baugrundverhältnisse unvorhergesehen und damit die Ausgangslage und Voraussetzung zur Verfahrensfestlegung nachhaltig, so kann auch aus terminlichen oder wirtschaftlichen Gründen ein Wechsel der Ortsbruststützung erforderlich werden. Meistens erfolgt dann der Umbau der Schildmaschine aus der aufgefahrenen Tunnelröhre heraus. Dies ist mühsam und zeitaufwendig, der Umbau kann mehrere Wochen dauern. Dies erzeugt hohe Kosten, einen möglichen Zeitverzug, weitere zusätzliche Beschleunigungsmaßnahmen und Beschleunigungskosten. Gegebenenfalls müssen Boden-

stabilisierungsmaßnahmen zur temporären Stützung der Ortsbrust durchgeführt werden. Ein unplanmäßiger Verfahrenswechsel sollte durch geeignete Vorerkundungen weitestgehend ausgeschlossen werden.

9.2.2 Planmäßige Verfahrenswechsel durch Umbau

Die Art der Ortsbruststützung und damit die gesamte Verfahrenstechnik einschließlich der Vor- und Entsorgungslogistik einer Tunnelvortriebsmaschine werden in einer sehr frühen Planungsphase festgelegt. Auch ein vorhersehbarer Wechsel in der Verfahrenstechnik ist planerisch zu berücksichtigen. Um die maschinentechnische Veränderung der Schildmaschine im Start- oder Zielschacht vornehmen

Slurry-supported shield
SM-V4 § tunnel boring machine with shield without support TBM-S*
Shield without support SM-VI § compressed air shield SM-V3*
Tunnel boring machine without support TBM-S § compressed air shield SM-V3*
The possibility of adjustment also exists through changing the operating mode: EPB shield SM-V5 § compressed air shield SM-V3*
Slurry-supported shield SM-V4 § compressed air shield SM-V3*

Designations in accordance with „Recommendations for selecting and evaluating Tunnel Boring Machines“. Tunnel 5/1997, page 20-35

9.3 Examples

Examples can be found in chapters 9.3.1 to 9.3.4 on the last pages of this article.



9.3.4 Change between EPB-supported Face and Soil Discharge via Screw conveyor unsupported Face with Soil Discharge via Belt and vice versa taking the Example of the Glattstollen, Zurich – through Modification

The 5,300 m long tunnel was to be driven in 2 geologically very different formations. 2,500 m of the route is located in molasse and 2,400 m in soft material. The molasse rock comprises an intercalation of sandstone banks and marl layers; it is only fissured in its peripheral zones, but densely bedded for the most part and as a consequence, largely dry and without any gas intrusions. The overburden has a maximum thickness of 150 m.

The soft ground consists of heterogeneously composed, mostly fine-grained, slippery-clayey lake-bed deposits with embedded stones with a diameter of up to 40 cm.

A layer up to 3 m thick comprising compact or alluvial moraine with a great deal of gravel and stones with a diameter of up to 70 cm is located between the molasse rock and the lake-bed deposit. A rock ridge juts out over a length of approx. 140 m into the tunnel cross-section. The overburden varies between 13 and 30 m.

The molasse and soft material were to be headed using different technologies. A central point-of-attack – the starting shaft – was selected as close to the border between the 2 formations as possible. The entire stretch was to be driven using a tunnelling machine. For the rock section, the tunnelling machine was equipped with a 5.30 m diameter solid rock cutterhead and fitted with disc cutters. Conveyor belts catered for the spoil discharged from the machine as well as the follow-up material conveyance. The tunnelling machine was modified in the starting shaft for the earth pressure mode (EPB shield machine) to comply with the requirements of the soft ground section.

The cutterhead was replaced by a four-armed cutting wheel, the extraction chamber closed by means of a pressure wall. A lock system was installed for access purposes and a screw conveyor took over the spoil discharge instead of the conveyor belt from the extraction chamber to the follow-up conveyor belt.

For the installation of the material conditioning unit, the back-up was extended by two 4.5 m long elements; a bentonite plant and the equipment for producing the foam were mounted on them. A regulating unit ensured that it was possible to add bentonite or foam at 12 different points through the rotating cutting wheel, through the pressure wall or into the screw conveyor. The compressor station for the compressed air support was expanded.

Depending on the subsoil conditions, the tunnelling machine was operated according to the "EPB-support" or „part-lowering with compressed air" mode. Problems cropped up when passing through the rock with the soft ground mode with the resultant outcome of low rates of advance and higher wear.

9.3.4 Wechsel zwischen erddruckgestützter Ortsbrust und Bodenaustrag mittels Schnecke zur ungestützten Ortsbrust mit Bodenaustrag mittels Band und umgekehrt am Beispiel Glattstollen, Zürich, durch Umbau

Der 5300 m lange Stollen sollte in zwei geologisch sehr unterschiedlichen Formationen hergestellt werden. Die Strecke liegt auf 2500 m in der Molasse und 2400 m im Lockermaterial. Der Molassefels besteht aus einer Wechsellagerung von Sandsteinbänken und Mergellagen, ist nur in den Randzonen geklüftet, größtenteils aber dicht gelagert und daher weitgehend trocken und ohne Gaseinschlüsse. Die Überdeckung beträgt max. 150 m.

Das Lockermaterial besteht aus heterogen zusammengesetzten, meist feinkörnigen rollig-tonigen Seebodenablagerungen mit eingelagerten Steinen bis 40 cm Durchmesser.

Zwischen Molassefels und Seebodenablagerung befindet sich eine bis 3 m mächtige Schicht aus kompakter oder verschwemmter Moräne mit viel Kies und Steinen bis zu 70 cm Durchmesser. Eine Felsrippe ragt auf einer Länge von ca. 140 m ins Stollenprofil hinein. Die Überdeckung variiert zwischen 12 und 30 m.

Molasse und Lockermaterial waren mit unterschiedlichen Verfahrenstechniken aufzufahren. Ein zentraler Angriffspunkt – der Startschacht – wurde möglichst nahe an der Grenze beider Formationen gewählt. Die gesamte Strecke sollte mit Hilfe einer TVM aufgefahren werden. Für die Felsstrecke wird die TVM mit einem Hartgesteinsbohrkopf Ø 5,30 m ausgerüstet und mit Rollenmeißeln bestückt. Der Erdaustrag aus der Maschine sowie die nachgeschaltete Materialförderung erfolgte über Förderbänder. Für die Bedürfnisse der Lockermaterialstrecke wurde die TVM im Startschacht in eine Erddruckmaschine (EPB-Schildmaschine) umgebaut.

Der Bohrkopf wurde durch ein vierarmiges Schneidrad ersetzt, der Abbauraum mit einer Druckwand abgeschlossen. Zum Ein- und Ausstieg wurde ein Schleusensystem eingebaut und anstelle des Förderbandes übernahm eine Förderschnecke den Bodenaustrag aus dem Abbauraum bis zum nachgeschalteten Förderband.

Für die Installation der Materialkonditionierung wurde der Nachläufer um zwei 4,5 m lange Elemente erweitert und darauf eine Bentonitanlage und die Geräte für die Schaumerzeugung montiert. Eine Regleranlage sorgte für die Möglichkeit, Bentonit oder Schaum an 12 verschiedenen Stellen durch das sich drehende Schneidrad, durch die Druckwand oder in die Förderschnecke zuzugeben. Die Kompressorstation für die Luftdruckstützung wurde erweitert.

Je nach Baugrundverhältnissen wurde die TVM in der Betriebsart „Erddruckstützung“ oder „Teilabsenkung mit Druckluft“ gefahren. Probleme zeigten sich beim Durchörten von Fels mit der Einrichtung für Lockergestein, geringe Vortriebsleistungen und hoher Verschleiß waren die Folge.

zu können, wird dieser in den Übergangsbereich der wechselnden Baugrundverhältnisse gelegt. Ist der Umbau im Schacht aus topografischen oder sonstigen Gründen nicht möglich, so erfolgt er gegebenenfalls im Schutze eines dafür hergerichteten „Bahnhofs“ aus der fertiggestellten Röhre heraus.

9.2.3 Planmäßiger Verfahrenswechsel durch Umstellung

Der Kosten- und Zeitaufwand zum Wechsel eines Verfahrens ist beträchtlich. Insbesondere dann, wenn auch der Materialaustag und die nachfolgende Materialförderung geändert werden müssen. Bei vorhersehbarem Wechsel der Verfahrenstechnik ist daher zu prüfen, ob geeignete maschinentechnische Vorkehrungen den Umbau vereinfachen oder völlig überflüssig machen können.

Neueste Entwicklungen in der Schildmaschinentechnik erlauben es, eine Umstellung des Verfahrens in wenigen Arbeitsschichten, ja sogar in wenigen

Stunden vorzunehmen. Die Umstellung kann dann an jeder beliebigen Stelle des Tunnels erfolgen.

Da ein Verfahrenswechsel auch ein Wechsel der nachgeschalteten Materialförderung zur Folge hat, sind bei Investitionsüberlegungen zu Gunsten einer variablen Maschinentechnik immer auch die Mehrkosten für die Umstellung der nachgeschalteten Materialförderung zu berücksichtigen. Die Umstellzeiten für die Verfahrenstechnik und die nachgeschaltete Materialförderung sollten im Einklang stehen. So nützt es wenig, wenn die Schildmaschine in wenigen Stunden umgestellt ist, aber für die Umrüstung der nachgeschalteten Materialförderung Tage vergehen.

Die Dimensionierung der Förderkapazität der alternativen Materialförderung wird auf die als zweckmäßig erachtete Leistung ausgelegt. Je häufiger ein Verfahrenswechsel zu erwarten ist, desto mehr sollte in einen zügigen Umbau bzw. eine Umstellung des Verfahrens investiert wer-

den. Sind die maschinentechnischen Vorkehrungen lediglich eine Option für den Fall, dass das gewählte Verfahren nicht die erwarteten Leistungen erreicht, wird man weniger als für einen planmäßigen Wechsel in Folge sich verändernder Baugrundverhältnisse investieren.

Bei einer Universal-TVM muss mit Einschränkungen hinsichtlich der zu erreichenden maximalen Vortriebsleistungen in den einzelnen Verfahrenstechniken gerechnet werden.

9.2.4 Gängige Verfahrenswechsel

In der Praxis sind die nachfolgenden Verfahrenswechsel bekannt. Inzwischen ist es maschinentechnisch möglich, Verfahrenswechsel, die bislang nur durch Umbau zu bewältigen waren, durch Umstellung zu erreichen.

Flüssigkeitsschild
SM-V4 § Schild ohne
Stützung SM-V1*
Flüssigkeitsschild
SM-V4 § Erddruckschild
SM-V5*

Erddruckschild
SM-V5 § Schild ohne
Stützung SM-V1*
Flüssigkeitsschild
SM-V4 § Tunnelbohr-
maschine mit Schild
ohne Stützung TBM-S*
Schild ohne Stützung
SM-V1 § Druckluftschild
SM-V3*

Tunnelbohrm. o. Stützung
TBM-S § Druckluftschild
SM-V3*

Auch durch Wechsel der Betriebsart ist die Möglichkeit der Anpassung gegeben: Erddruckschild

SM-V5 § Druckluftschild
SM-V3*

Flüssigkeitsschild
SM-V4 § Druckluftschild
SM-V3*

(* Bezeichnungen gemäß „Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen“. Tunnel 5/1997, Seiten 20–35)

9.3 Beispiele für Verfahrenswechsel

Beispiele finden Sie in den Kapiteln 9.3.1 bis 9.3.4 in den Kästen am Ende dieses Beitrages.

