

# TBM Headings in Jointed Rock

## Maschinelle Vortriebe in klüftigem Fels

Germany's national railway company "Deutsche Bahn" plans for new railway lines with a number of long tunnels in jointed rock. In view of their length, these are suitable for TBM heading. In the past, TBM heading in jointed rock have often been connected with difficulties, which have led to exceeding of the planned construction times and costs. It is therefore advisable to deal with the relevant issues in order to achieve reliability in cost and time for future projects. The following article is intended to make a contribution to this. The focus is put on typical and essential properties of sedimentary rocks, which play a decisive role in mechanized tunnelling. Standard considerations, such as the verification of segments for temporary conditions such as storage, transport, etc., are deliberately not dealt with.

Im Zuge der von der DB Netz AG geplanten Neubaustrecken sind eine Reihe langer Tunnel im klüftigen Fels geplant, die aufgrund ihrer Länge für den maschinellen Tunnelvortrieb in Frage kommen. In der Vergangenheit sind bei maschinellen Vortrieben im klüftigen Fels des Öfteren Schwierigkeiten aufgetreten, die zu einer Überschreitung der vorgesehenen Bauzeiten und -kosten geführt haben. Es ist deshalb angeraten, sich mit den hier relevanten Fragestellungen zu befassen, um für zukünftige Projekte Kosten- und Terminsicherheit zu erreichen. Der folgende Artikel soll hierzu einen Beitrag leisten. Dabei wird der Fokus auf typische und wesentliche Eigenschaften der Sedimentgesteine gelegt, die bei maschinellen Vortrieben eine maßgebliche Rolle spielen. Standard-Betrachtungen, wie z. B. Nachweise von Tübbinggen für temporäre Zustände wie Lagerung, Transport, etc., werden bewusst nicht behandelt.

Prof. Dr.-Ing. WALTER WITTKÉ, Dr.-Ing. PATRICIA WITTKÉ-GATTERMANN, Dr.-Ing. BETTINA WITTKÉ-SCHMITT, Dr.-Ing. MARTIN WITTKÉ, Dipl.-Ing. DIETER SCHMITT, WBI GmbH, Weinheim, Deutschland

### 1 Interaction of Rock Mass, Tunnel Boring Machine and Segmental Lining

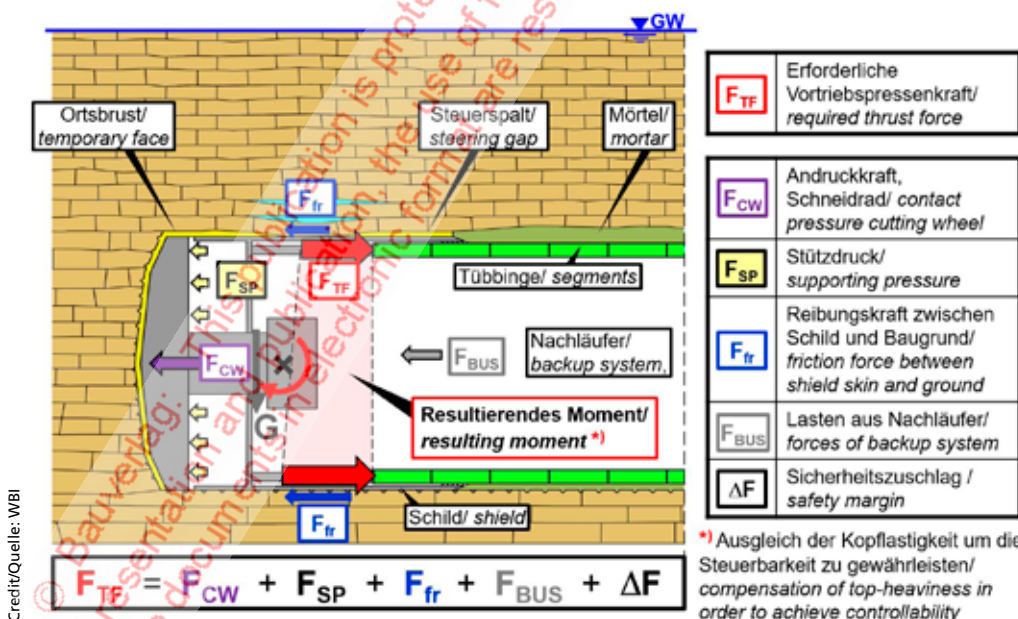
#### 1.1 Problem

Mechanized tunnelling involves a complex interaction of loads and acting forces, which needs to be taken into account (Fig. 1):

### 1 Interaktion Fels – Tunnelvortriebsmaschine – Tübbingauskleidung

#### 1.1 Aufgabenstellung

Beim maschinellen Vortrieb ist ein komplexes Zusammenspiel aus Einwirkungen und erforderlichen Kräften zu beachten (Bild 1):



1 Interaction of TBM, segmental lining and rock mass  
Zusammenwirken von TBM, Tübbingauskleidung und Gebirge

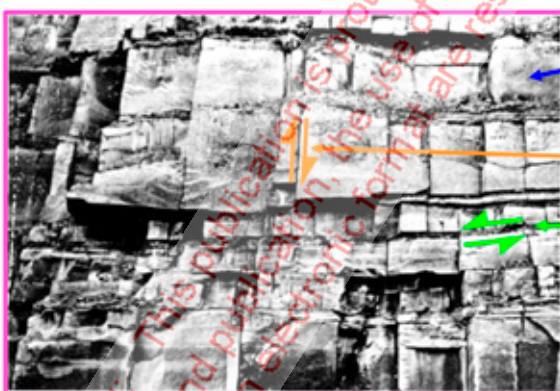
- The temporary face must be supported against the effects of rock mass pressure and water pressure or seepage pressure, respectively. The pressure of the cutterhead  $F_{CW}$  and possible support pressures  $F_{SP}$  serve this purpose. Both must be applied with the help of the jacking forces  $F_{TF}$ .
- At the same time, the temporary face serves as an abutment. It must be sufficiently "competent" so that the jacking forces can be applied. If this is not the case and there is no possibility of compensating for this in another way, the jacking forces will drop (cf. section 1.4.5).
- The cutterhead pressure  $F_{CW}$  as well as the torque must be sufficiently large to allow for cutting the rock.
- The frictional forces between the shield and the ground  $F_{fr}$  must be overcome. The jacking forces  $F_{TF}$  must also be sufficiently dimensioned for this purpose.
- The trailer load of the back-up  $F_{BUS}$  must also be moved with the jacking forces.

Thus, taking into account a safety margin  $\Delta F$ , the jacking forces must be dimensioned in such a way that they can ensure the required cutter wheel pressure  $F_{CW}$ , the support pressure  $F_{SP}$ , as well as overcoming the frictional forces  $F_{fr}$  and the trailer load of the back-up  $F_{BUS}$  (force equilibrium in the horizontal direction, Fig. 1). The jacks strut against the segmental ring. The segments must be dimensioned against the expected maximum jacking force. At the same time, it must be ensured that a minimum value of jacking force is acting on the segmental rings in order to maintain the pre-stress in the sealing gaskets of the circumferential joints and thus

- Die Ortsbrust muss gegen die Einwirkungen aus Gebirgs- und Wasserdruck bzw. Strömungsdruck gestützt werden. Hierzu dienen die Andruckkraft des Bohrkopfs  $F_{CW}$  sowie etwaige Stützdrücke  $F_{SP}$ . Beide müssen mithilfe der Vortriebspresenkräfte  $F_{TF}$  aufgebracht werden.
- Gleichzeitig dient die Ortsbrust als Widerlager. Sie muss ausreichend „kompetent“ sein, damit die Vortriebspresenkräfte aufgebracht werden können. Ist dies nicht gegeben und besteht keine Möglichkeit, dies auf andere Weise zu kompensieren, so kommt es zu einem Abfallen der Vortriebspresenkräfte (vgl. Kap. 1.4.5).
- Die Andruckkraft des Bohrkopfs  $F_{CW}$  sowie das Drehmoment müssen ausreichend groß bemessen sein, um ein Lösen des Felses zu ermöglichen.
- Die Reibungskräfte zwischen Schild und Baugrund  $F_{fr}$  müssen überwunden werden. Auch hierfür müssen die Vortriebspresenkräfte  $F_{TF}$  ausreichend bemessen werden.
- Auch die Anhängelast des Nachläufers  $F_{BUS}$  muss mit den Vortriebspresenkräften bewegt werden.

Damit müssen die Vortriebspresenkräfte unter Berücksichtigung eines Sicherheitsaufschlags  $\Delta F$  so bemessen sein, dass sie die erforderliche Andruckkraft  $F_{CW}$ , den Stützdruck  $F_{SP}$ , sowie die Überwindung der Reibungskräfte  $F_{fr}$  und der Anhängelast des Nachläufers  $F_{BUS}$  gewährleisten können (Kräftegleichgewicht in horizontaler Richtung, Bild 1).

Die Vortriebspresen stützen sich gegen den Tübbingring ab. Die Tübbinge müssen gegen die zu erwartende maximale Vortriebspresenkraft bemessen werden. Gleichzeitig ist ein Mindestwert der Vortriebspresenkraft auf die Tübbingringe zu gewährleisten, um die Vorspannung der Dichtungsprofile in den Ringfugen zu erhalten und damit die Dichtigkeit der Tübbingringe sowie die Lagesicherheit der ersten, „schwebenden“ Tübbingringe zu garantieren.

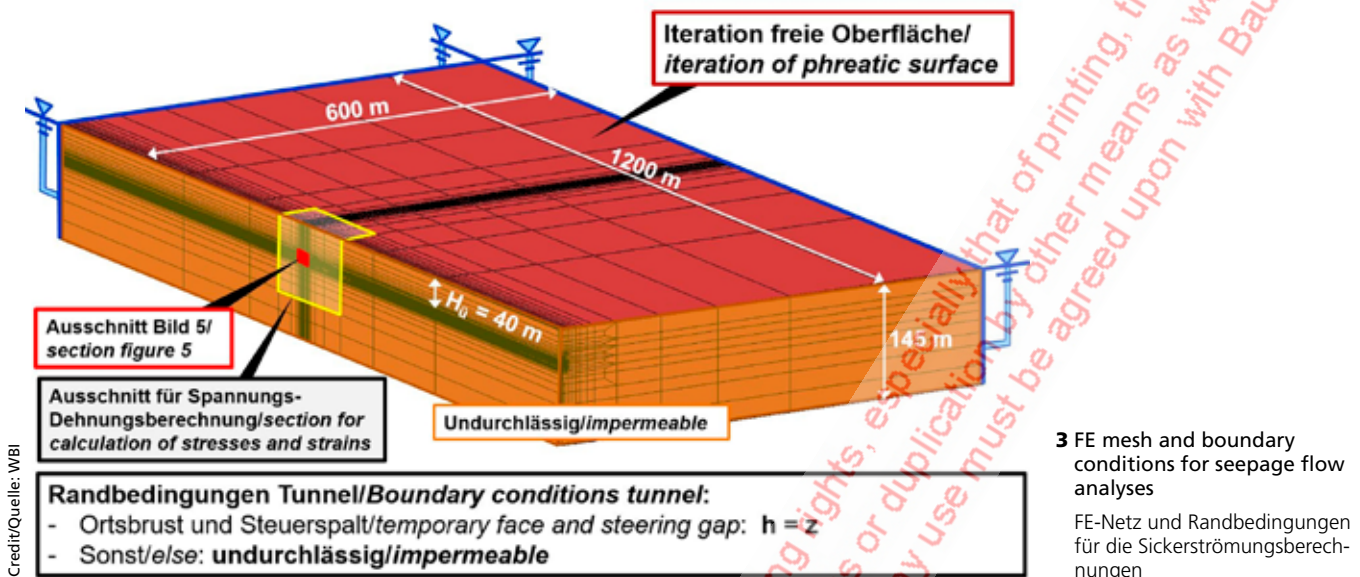


- Gestein/intact rock  $\sigma_{clR}$
- Klüftung/joints  $c_J, \varphi_J$
- Schichtung/bedding  $c_B, \varphi_B$
- Fels/rock:  $E, \nu$   
(u.U.  $E_1, E_2, G_2, \nu_1, \nu_2$ )

Verformbarkeit Fels/deformability rock		Festigkeit Gestein/strength intact rock		Scherfestigkeit Trennflächen/ shear strength discontinuities				Durchlässigkeit/ permeability	
E [MN/m <sup>2</sup> ]	$\nu$ [-]	$\sigma_{clR}$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$c_B$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_B$ [°]	$c_J$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi_J$ [°]	$k_{f, II B}$ [m/s]	$k_{f, LB}$ [m/s]	
500	0,25	15	0	15	40	30	10 <sup>-4</sup>	10 <sup>-7</sup>	

2 Rock mechanical model  
Felsmechanisches Modell





Credit/Quelle: WBI

ensure the tightness of the segmental lining, as well as to guarantee that the first „floating“ segmental rings are kept in position.

Since tunnel boring machines are generally top-heavy, an additional requirement is that greater jacking forces are applied in the invert area than in the roof area. This results in a moment that compensates for the head load and thus permits control steering of the tunnel boring machine (Fig. 1). However, this is only possible if – as already mentioned – the temporary face provides a sufficiently competent abutment or – if this is not the case – appropriate measures are taken to compensate (cf. section 1.4.5).

## 1.2 Properties of Jointed Rock Masses

The essential properties of jointed rock masses can be described and simulated with the “Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)”, which has been used successfully for many years. A more detailed description of the AJRM can be found in [1, 2, 3, 4]. Fig. 2 shows a typical example of a sedimentary rock mass with approximately horizontal bedding parallel joints, which are partially filled with clay, and steeply dipping joints. These steep joints frequently end at the bedding parallel joints. The strength and deformation behavior of the rock mass is determined by the intact rock and the discontinuities. For stresses below the strength, one can assume linear-elastic behavior for most rock mass types. However, sedimentary rocks, clay shales and also gneisses do not always behave isotropically in the elastic range. The compressibility perpendicular to bedding or schistosity is often greater than parallel to it. This property can be described in good approximation by the assumption of a transversal isotropy with the help of five elastic constants:

Da die Tunnelvortriebsmaschinen (TVM) in der Regel kopflastig sind, ergibt sich als zusätzliche Forderung, dass im Sohlbereich größere Vortriebspresenkräfte aufgebracht werden als im Firstbereich. Hieraus ergibt sich ein Moment, das die Kopflastigkeit ausgleicht und damit eine planmäßige Steuerung der TVM erlaubt (Bild 1). Dies ist jedoch nur dann möglich, wenn – wie bereits erwähnt – die Ortsbrust ein ausreichend kompetentes Widerlager bietet oder, falls dies nicht der Fall ist, angemessene Maßnahmen zur Kompensation ergriffen werden (vgl. Kap. 1.4.5).

## 1.2 Eigenschaften von klüftigem Fels

Klüftiger Fels lässt sich mit dem „Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM)“, das seit vielen Jahren erfolgreich angewendet wird, in seinen wesentlichen Eigenschaften erfassen und nachbilden. Eine nähere Beschreibung des AJRM findet sich z. B. in [1, 2, 3, 4]. **Bild 2** zeigt ein typisches Beispiel eines Sedimentgesteins mit annähernd horizontalen Schichtfugen, die teilweise mit Ton gefüllt sind, und steil stehender Klüftung. Die Klüfte setzen häufig an den Schichtfugen ab. Das Festigkeits- und Verformungsverhalten des Felses wird vom Gestein und von den Trennflächen bestimmt.

Für Beanspruchungen unterhalb der Festigkeit kann man bei den meisten Felsarten näherungsweise von linear-elastischem Verhalten ausgehen. Sedimentgesteine, Tonschiefer und auch Gneise verhalten sich aber im elastischen Bereich nicht immer isotrop. Vielmehr ist die Zusammendrückbarkeit senkrecht zur Schichtung oder Schieferung häufig größer als parallel dazu. Diese Eigenschaft kann in guter Näherung durch die Annahme einer transversalen Isotropie mit Hilfe von fünf elastischen Konstanten beschrieben werden: die E-Moduln parallel und senkrecht zur Schichtung  $E_1$  und  $E_2$ , zwei Poisson'sche Zahlen  $\nu_1$  und  $\nu_2$  und den Schubmodul  $G_2$ . In dem in Bild 2 dargestellten Fall kann näherungs-

the Young's modulus parallel and perpendicular to bedding  $E_1$  and  $E_2$ , two Poisson's ratios  $\nu_1$  and  $\nu_2$  and the shear modulus  $G_2$ . In the case shown in Fig. 2, an elastically isotropic deformation behavior can be assumed, which can be described by the Young's modulus and the Poisson's ratio.

With regard to strength, a distinction is made between the strength of the unfractured intact rock  $\sigma_{cIR}$  and the shear strength on the discontinuities (bedding parallel joints & joints), which in practice can be described by a friction angle  $\phi_B / \phi_J$  and a cohesion  $c_B / c_J$ . The shear strengths on the discontinuities are usually considerably smaller than the intact rock strength and thus decisive for the stability of structures in rock.

Due to the different characteristics of the discontinuities, the permeability of the rock mass parallel and perpendicular to bedding is often also different and thus anisotropic. The table in Fig. 2 shows examples of typical characteristic values of the Bunter formation with a pronounced anisotropy of strength and also of permeability.

The calculations illustrated in the following have been carried out for the example of TBM tunneling in a Bunter formation with these characteristic values (Fig. 2) at an overburden of around 40 m above the tunnel's roof and a groundwater table at the ground surface (cf. Fig. 1).

### 1.3 Groundwater and Seepage Flow

If tunnel excavation is carried out below the groundwater table and water can enter in the area of the temporary face and shield, then a seepage flow directed toward the tunnel is triggered. In this case, which is the basis for the following considerations, seepage pressures and uplift forces act on the rock mass. If no water can enter in the area of the shield or via the temporary face, then the full water pressure acts on the temporary face,

weise von einem elastisch isotropen Verformungsverhalten ausgegangen werden, welches durch den E-Modul und die Querkontraktionszahl beschrieben werden kann.

Hinsichtlich der Festigkeit wird unterschieden zwischen der Festigkeit des unzerklüfteten Gesteins  $\sigma_{cIR}$  und der Scherfestigkeit auf den Trennflächen (Schichtfugen, Klüfte), die in der Praxis durch einen Reibungswinkel  $\phi_B / \phi_J$  und eine Kohäsion  $c_B / c_J$  beschrieben werden können. Die Scherfestigkeiten auf den Trennflächen sind in der Regel erheblich kleiner als die Gesteinsfestigkeit und damit maßgeblich für die Standsicherheit von Felsbauwerken.

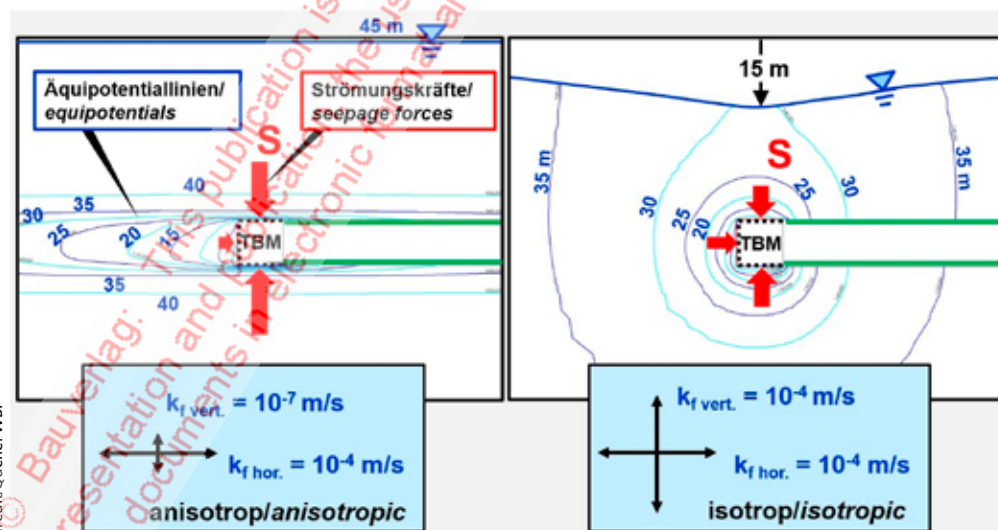
Aufgrund der unterschiedlichen Ausbildung der Trennflächen ist häufig auch die Durchlässigkeit des Felses parallel und senkrecht zur Schichtung verschieden und damit anisotrop.

Die Tabelle in Bild 2 zeigt beispielhaft typische Kennwerte eines Buntsandsteins mit einer ausgeprägten Anisotropie der Festigkeit und auch der Durchlässigkeit.

Die nachstehenden rechnerischen Betrachtungen werden für das Beispiel eines maschinellen Vortriebs in einem Buntsandstein mit diesen Kennwerten (Bild 2) bei einer Überlagerung von etwa 40 m oberhalb der Tunnelrinne sowie einem an der Geländeoberfläche anstehenden Grundwasserspiegel durchgeführt (vgl. Bild 1).

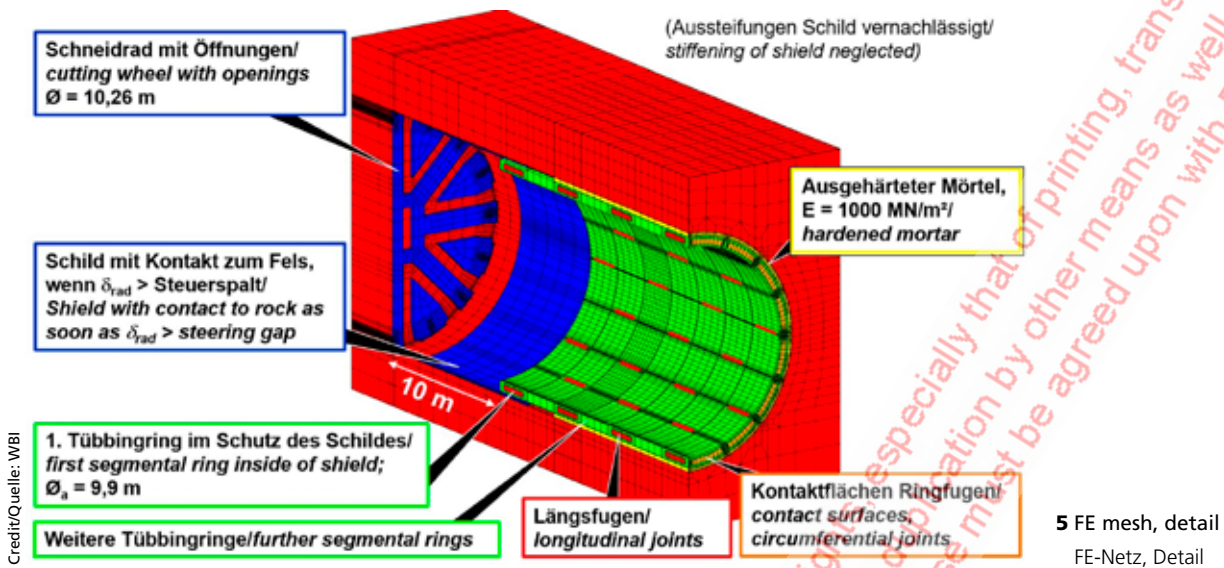
### 1.3 Grundwasser und Sickerströmung

Wenn ein Tunnelvortrieb unterhalb des Grundwasserspiegels durchgeführt wird und Wasser im Bereich der Ortsbrust und des Schildes eintreten kann, dann wird eine zum Tunnel gerichtete Sickerströmung ausgelöst. In diesem Fall, der den nachstehenden Betrachtungen zugrunde liegt, wirken auf den Fels Strömungs- und Auftriebskräfte. Wenn im Bereich des Schildes oder über die Ortsbrust kein Wasser eintreten kann, dann wirkt der volle Wasserdruck auf Ortsbrust, Schild und Tübbingauskleidung, und im Fels wirken die Auftriebskräfte.



4 Seepage flow analyses, longitudinal section with equipotentials  
Sickerströmungsberechnung, Längsschnitt mit Potentiallinienverteilung





shield and segmental lining, and uplift forces act on the rock mass.

The corresponding forces can be determined with the aid of seepage flow analyses. Such calculations have been carried out for the example case with the finite element mesh shown in Fig. 3. In case of seepage flow, the distribution of equipotentials changes over a wide area. Therefore, a large calculative section (600 m x 1200 m x 145 m) is required for these calculations. The boundary conditions are shown in detail in Fig. 3.

Fig. 4 shows the calculated distribution of equipotential lines in the vicinity of the tunnel, which result from the seepage flow directed towards the tunnel. Assuming an anisotropic permeability of the rock mass ( $k_{fh} \gg k_{fv}$ , see Fig. 2), there is a clear concentration of the equipotential lines and thus of the hydraulic gradient above and below the shield and the segmental lining (Fig. 4, left). As a result, significantly higher seepage pressures (S) act in the vertical direction than in the horizontal direction. Furthermore, there is practically no lowering of the groundwater table at the ground surface.

For comparison, Fig. 4 shows on the right the distribution of equipotential lines that results in the case of isotropic permeability of the rock mass: in this case, there is a significant and extensive lowering of the groundwater table at the ground surface. The distribution of equipotential lines around the tunnel is nearly symmetrical, the seepage pressures in vertical direction are clearly smaller, however, the seepage pressures directed to the temporary face are larger than in the case of anisotropic permeability.

These results show very clearly that the anisotropy of the permeability has a major influence both on the forces acting in the area of the temporary face, shield and segmental lining and on the changes in the groundwater table at the ground surface. This is an effect that must not be neglected in planning and execution.

Die entsprechenden Einwirkungen können mit Hilfe von Sickerströmungsberechnungen ermittelt werden. Solche Berechnungen wurden für den Beispielfall mit dem in Bild 3 dargestellten FE-Netz durchgeführt. Im Falle einer Sickerströmung ändert sich die Potentialverteilung weiträumig. Deshalb ist für diese Berechnungen ein großer Berechnungsausschnitt (600 m x 1200 m x 145 m) erforderlich. Die Randbedingungen sind im Einzelnen in Bild 3 dargestellt.

Bild 4 zeigt die errechneten Potentiallinienverteilungen im Nahbereich des Tunnels, die sich infolge der zum Tunnel gerichteten Sickerströmung ergeben. Bei Annahme einer anisotropen Durchlässigkeit des Felses ( $k_{fh} \gg k_{fv}$ , siehe Bild 2) ergibt sich eine deutliche Konzentration der Potentiallinien und damit des Gefälles ober- und unterhalb des Schildes und der Tübbingauskleidung (Bild 4, links). In der Folge wirken in vertikaler Richtung deutlich höhere Sickerströmungskräfte (S) als in horizontaler Richtung. Darüber hinaus stellt sich praktisch keine Absenkung des Grundwasserspiegels an der Geländeoberfläche ein.

Zum Vergleich ist in Bild 4 rechts die Potentiallinienverteilung dargestellt, die sich bei isotroper Durchlässigkeit des Felses ergibt: in diesem Fall stellt sich eine deutliche und weitreichende Absenkung des Grundwasserspiegels an der Geländeoberfläche ein. Die Potentiallinienverteilung um den Tunnel ist annähernd symmetrisch, die Strömungskräfte in vertikaler Richtung sind deutlich geringer, die zur Ortsbrust gerichteten Strömungskräfte hingegen größer als im Falle anisotroper Durchlässigkeit.

Diese Ergebnisse zeigen sehr deutlich, dass die Anisotropie der Durchlässigkeit einen großen Einfluss sowohl auf die Krafteinwirkungen im Bereich von Ortsbrust, Schild und Tübbingauskleidung als auch auf die Änderungen des Grundwasserspiegels an der Geländeoberfläche hat. Ein Effekt, der in der Planung und Ausführung nicht vernachlässigt werden darf.

## 1.4 Stresses and Deformations

### 1.4.1 Calculative Section and FE Mesh

For the calculation of stresses and deformations, a much smaller calculative section is sufficient (see yellow marking in Fig. 3). In addition to the rock mass, the FE mesh used reproduces in detail the cutting wheel with openings as well as the shield and the segmental rings (cf. detail of the FE mesh in Fig. 5; position of the detail: see red rectangle in Fig. 3).

At the beginning of the calculation, an open steering gap is simulated between the shield and the rock mass, which in the case considered is 4 cm thick at the roof and 2 cm thick at the bottom. The first segmental ring is located within the shield and is therefore not embedded in the annular gap mortar. The second segmental ring is embedded in fresh annular gap mortar. The mortar pressure is taken into account in the calculation. The following segmental rings are embedded in hardened annular gap mortar. The dead weight of the first two segmental rings must be held by frictional forces in the circumferential joints between the first, second and third segmental rings. Corresponding jacking forces are required for this.

### 1.4.2 Assumptions and Calculative Steps

The example case already explained was considered (cf. chapter 1.2). Beforehand seepage flow analyses were carried out – assuming that groundwater can flow in the area of the face and the shield. This way, the uplift forces and seepage pressures were calculated (cf. chapter 1.3) and then introduced in the calculations of stresses and deformations.

The calculations of stresses and deformations have been performed in a total of ten calculation steps. The first calculation step is used to simulate the in-situ stress state.

## 1.4 Spannungen und Verformungen

### 1.4.1 Berechnungsausschnitt und FE-Netz

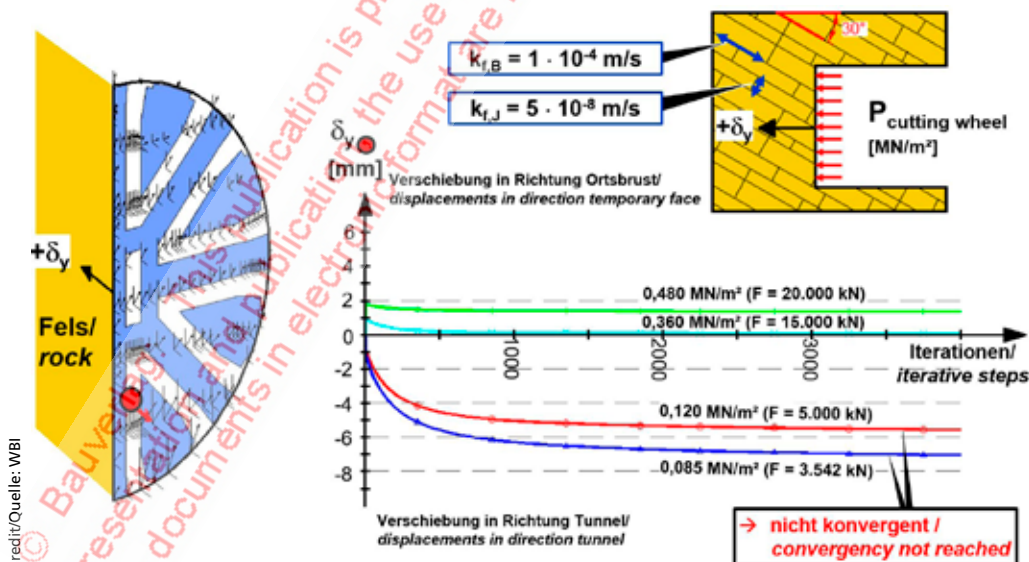
Für die Berechnung der Spannungen und Verformungen reicht ein deutlich kleinerer Berechnungsausschnitt (vgl. gelbe Kennzeichnung in Bild 3). Neben dem Fels werden in dem verwendeten FE-Netz sowohl das Schneidrad mit Öffnungen, als auch der Vortriebsschild und die Tübbingringe im Detail nachgebildet (vgl. Detail des FE-Netzes in Bild 5; Lage des Details: siehe rotes Rechteck in Bild 3).

Zwischen dem Vortriebsschild und dem Gebirge wird zu Beginn der Berechnung ein offener Steuerspalt simuliert, der in dem betrachteten Fall in der Firste 4 cm und in der Sohle 2 cm dick ist. Der erste Tübbingring befindet sich noch im Schutze des Schildes und ist somit nicht im Ringspaltmörtel gebettet. Der zweite Tübbingring ist in noch nicht erhärtetem Ringspaltmörtel gebettet. In der Rechnung wird der Mörteldruck berücksichtigt. Die folgenden Tübbingringe sind im erhärteten Ringspaltmörtel gebettet. Das Eigengewicht der ersten beiden Tübbingringe muss durch Reibungskräfte in den Ringfugen zwischen erstem, zweiten und dritten Tübbingring gehalten werden. Dazu sind entsprechende Vortriebspresenkräfte erforderlich.

### 1.4.2 Annahmen und Berechnungsschritte

Es wurde der bereits erläuterte Beispielfall betrachtet (vgl. Kap. 1.2). In einer vorgelagerten Sickerströmungsberechnung wurden – unter der Annahme, dass Grundwasser im Bereich der Ortsbrust und des Schildes zuströmen kann – die Auftriebs- und Strömungskräfte ermittelt (vgl. Kap. 1.3). Diese werden in den Berechnungen der Spannungen und Verformungen als Lasten berücksichtigt.

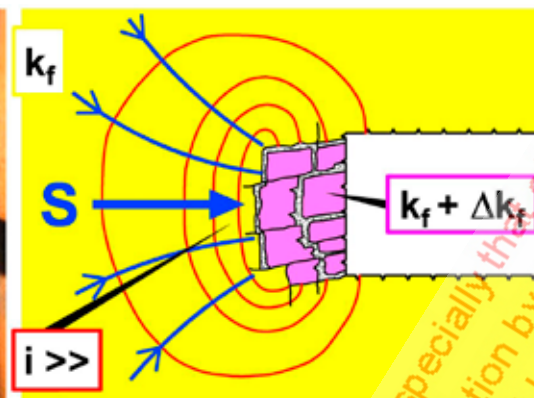
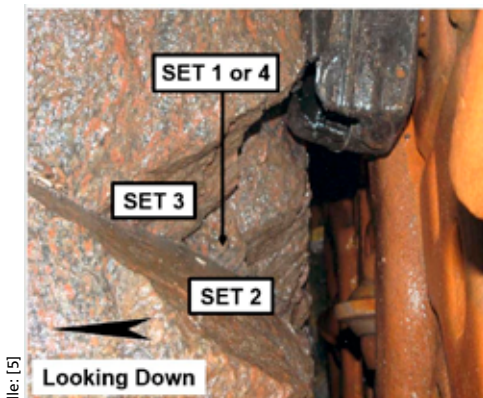
Die Berechnungen der Spannungen und Verformungen werden in insgesamt zehn Rechenschritten ausgeführt. Der erste Rechenschritt dient der Simulation des In-Situ-Spannungszu-



6 Influence of cutting wheel pressure on displacements of temporary face

Einfluss des Anpressdrucks auf die Verschiebungen der Ortsbrust





**Instabilität, Auflockerung und Vergrößerung der Durchlässigkeit  $k_f$**   
*instability, loosening and increase of permeability  $k_f$*

**7 Hallandsås Tunnel, reasons for instability of temporary face**

Hallandsås-Tunnel, Gründe für Standsicherheitsprobleme an der Ortsbrust

In calculation steps 2 and 3, excavation and support of an 85 m long tunnel section are simulated. The result forms the initial state for the subsequent calculation of a step-by-step excavation in calculation steps 4 to 10. In each of these calculation steps, the excavation of a 2 m long tunnel section is simulated. The following factors are taken into account: the cutting wheel with contact pressure at the face, the excavation, the construction of the segmental ring, the fixation of the segmental ring's position with the aid of the jacking forces, the grout injection pressure in the area of the previously installed segmental ring, the hardened grout in the area of the segmental rings further back.

### 1.4.3 Support of the Temporary Face

In one of the calculations, it was assumed that the bedding parallel joints enter the temporary face at an angle of  $30^\circ$  (Fig. 6). Apart from that, the assumptions of the example case apply.

In the calculations, the contact pressure of the cutting wheel against the temporary face was varied. It was shown that resulting forces of 3542 kN and 5000 kN are not sufficient to stabilize the temporary face. In order to ensure the stability of the temporary face under the assumptions made, forces of 15 000 to 20 000 kN would be required (Fig. 6). This clearly shows that such considerations of the stability of the temporary face, taking into account the spatial position of the discontinuities, the anisotropy of strength and permeability as well as the seepage flow, are important for the correct design of the tunnel boring machine for heading in jointed rock masses.

A practical example where a very high groundwater level and the resulting seepage flow pressure led to problems with regard to the stability of the temporary face is the Hallandsås Tunnel on the railway line from Malmö to Gothenburg in Sweden (Fig. 7). More detailed information on this can be found in [5].

stands. In den Rechenschritten 2 und 3 werden Ausbruch und Sicherung eines 85 m langen Tunnelabschnitts nach dem Stützkernverfahren simuliert. Das Ergebnis bildet den Ausgangszustand für die nachfolgende Berechnung eines schrittweisen Vortriebs in den Rechenschritten 4 bis 10. In jedem dieser Rechenschritte wird der Vortrieb eines 2 m langen Tunnelabschnitts simuliert. Dabei werden berücksichtigt: das Schneidrad mit Anpressdruck an der Ortsbrust, der Vortrieb, der Bau des Tübbingrings, die Lagesicherung des Tübbingrings mit Hilfe der Vortriebspresenkräfte, der Mörtelverpressdruck im Bereich des zuvor eingebauten Tübbingrings, der erhärtete Mörtel im Bereich der weiter zurückliegenden Tübbingringe.

### 1.4.3 Stützung der Ortsbrust

In einer der Berechnungen wurde angenommen, dass die Schichtung unter einem Winkel von  $30^\circ$  in die Ortsbrust einfällt (Bild 6). Ansonsten gelten die Annahmen des Beispielfalls. In den Berechnungen wurde der Anpressdruck des Schneidrads gegen die Ortsbrust variiert. Es zeigte sich, dass resultierende Kräfte von 3542 kN und 5000 kN nicht ausreichen, um die Ortsbrust zu stabilisieren. Um die Standsicherheit der Ortsbrust unter den getroffenen Annahmen gewährleisten zu können, wären rechnerisch Kräfte von 15 000 bis 20 000 kN erforderlich (Bild 6). Dies macht deutlich, dass derlei Betrachtungen zur Standsicherheit der Ortsbrust unter Berücksichtigung der Raumstellung der Trennflächen, der Anisotropie der Festigkeit und der Durchlässigkeit sowie der Sickerströmung wichtig sind für die richtige Auslegung der Tunnelvortriebsmaschine für den Vortrieb im klüftigen Fels.

Ein Beispiel aus der Praxis, bei dem ein sehr hoher Grundwasserstand und der daraus resultierende Strömungsdruck zu Problemen im Hinblick auf die Standsicherheit der Ortsbrust führte, ist der auf der Bahnstrecke von Malmö nach Göteborg liegende Tunnel Hallandsås (Bild 7). Nähere Angaben hierzu finden sich in [5].

#### 1.4.4 Loads on Shield and Segmental Lining

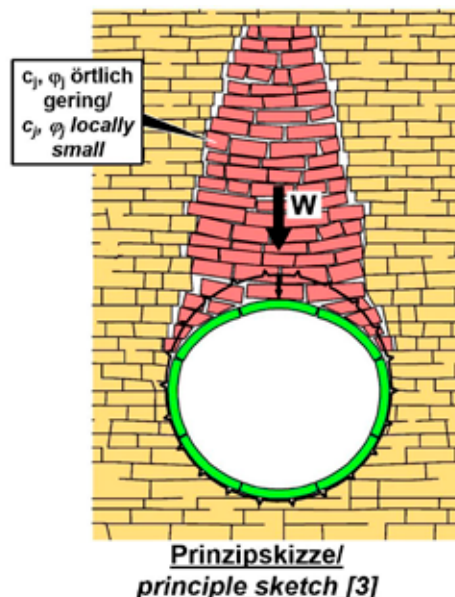
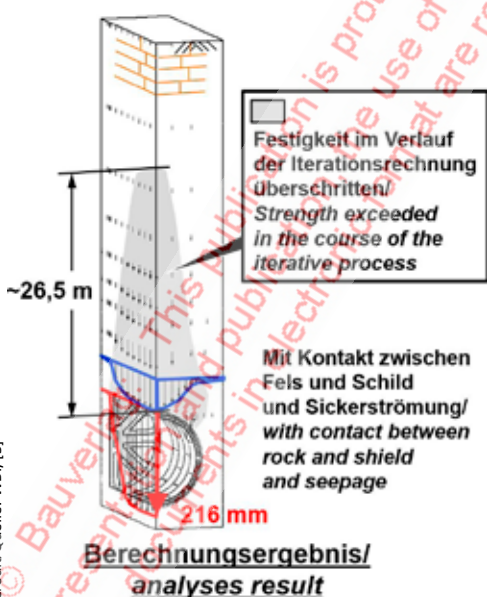
In further calculations, a horizontal bedding was assumed. The assumptions of the example case apply in all other respects. These calculations show that a rock mass volume of around 26 m height moves down onto the shield and thus also onto the subsequent segmental rings (Fig. 8, left). The schematic diagram sketched on the right hand side of the calculation result, illustrates the process caused by bedding and jointing, which also corresponds to observations of roof failures during conventional tunnelling in sedimentary rock. In this process, the steering gap in the roof area closes, and the shield mantle deforms under the load of the rock mass (Fig. 9). The segmental rings experience the displacements shown in Fig. 10 in the various construction stages, which must be superposed to obtain the final displacement pattern. The resulting moments and normal thrusts are shown in Fig. 11. For the sake of accuracy, it should be mentioned that the stress concentrations acting in the longitudinal joints due to the limited load transfer area, against which the segments are to be designed with an appropriate tensile reinforcement, are not shown here.

For comparison, additional calculations were also executed assuming a rock mass without groundwater. The resulting displacements are significantly smaller in such case, but still large enough to close the steering gap so that the shield is loaded. In this case, too, a loosened rock volume forms above the roof, but it reaches only about half as high as when interacting with a seepage pressure for anisotropic permeability. Apart from the requirement that load assumptions are to be determined specifically for each project under

#### 1.4.4 Belastung des Schildmantels und der Tübbingauskleidung

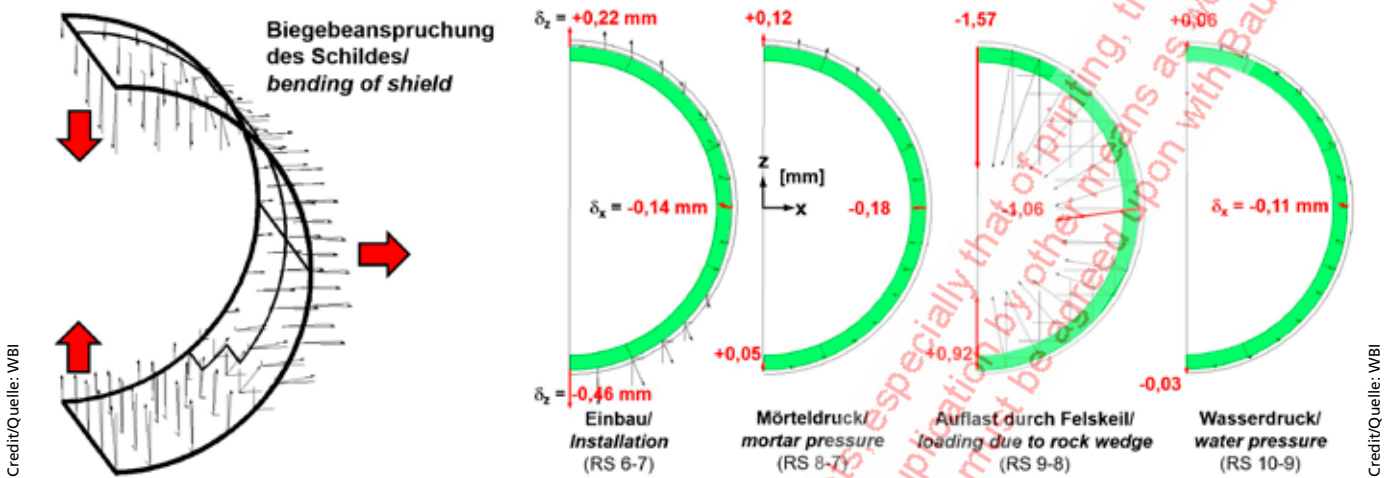
In weiteren Berechnungen wurde eine horizontale Schichtung angenommen. Ansonsten gelten die Annahmen des Beispielfalls. Diese Berechnungen zeigen, dass sich ein etwa 26 m hoher Felsblock auf den Schildmantel und somit auch auf die nachgelagerten Tübbingringe auflegt (Bild 8, links). Das rechts von dem Rechenergebnis skizzierte Prinzipbild veranschaulicht den durch die Schichtung und Klüftung verursachten Vorgang, der auch mit Beobachtungen von Nachbrüchen bei konventionellen Tunnelvortrieben im Sedimentgestein übereinstimmt. Dabei schließt sich der Steuerspalt im Firstbereich, und der Schildmantel verformt sich unter der Belastung des Felsblocks (Bild 9). Die Tübbingringe erfahren in den verschiedenen Bauzuständen die in Bild 10 dargestellten Verschiebungen, die man superponieren muss, um das endgültige Verschiebungsbild zu erhalten. Die daraus resultierenden Momenten- und Normalkraftverläufe sind in Bild 11 dargestellt. Der Ordnung halber sei erwähnt, dass die in den Längsfugen aufgrund der begrenzten Lastübertragungsfläche wirkenden Spannungskonzentrationen, gegen die die Tübbinge mit einer entsprechenden Spaltzugbewehrung zu bemessen sind, hier nicht dargestellt sind.

Zum Vergleich wurden auch Berechnungen unter Annahme eines Gebirges ohne Grundwasser durchgeführt. Die resultierenden Verschiebungen sind in diesem Fall deutlich kleiner, jedoch immer noch so groß, dass sich der Steuerspalt schließt und der Schild belastet wird. Auch in diesem Fall bildet sich ein Felskeil oberhalb der Firste aus, der allerdings nur etwa halb so hoch reicht, wie beim Zusammenwirken mit einem Strömungsdruck bei anisotroper Wasserdurchlässigkeit. In den Empfehlungen des DAUB für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen [6] wird – neben der Forderung,



8 Displacements and zones with exceeding of strength along discontinuities  
Verschiebungen und Bereiche mit Überschreitung der Festigkeit auf den Trennflächen





9 Deformation of shield due to loading  
Verformung des Schildmantels unter Belastung

10 Segmental ring 4, front, displacements calculated in different steps of analyses  
Tübbingring 4, Vorderseite, Verschiebungen im Verlauf der Rechenschritte

consideration of the statements of the geotechnical expert, the recommendations of the DAUB for static calculations of shield tunnelling machines [6] request that a vertical load on the shield must be considered as additional load case, if tunnel heading is to be carried out in horizontally stratified rock with the risk of formation of rock wedges along the discontinuities in the roof area. The additional vertical load due to these rock wedges should amount to at least  $\sigma_v = 0.5 \cdot D \cdot \gamma_{Rocks}$  as a minimum [6]. This corresponds to a rock wedge of about 5 m height, which is considerably less than results from the calculations explained above, with and also without the influence of groundwater. A more accurate calculation is therefore necessary and important for the correct design of the shield as well as the segmental lining.

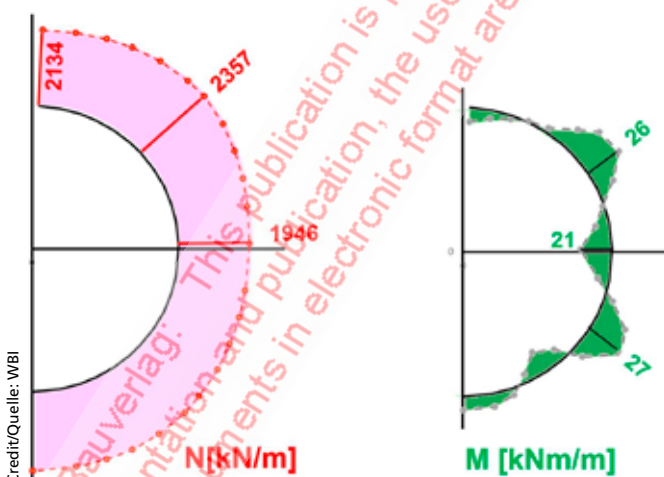
dass Lastannahmen entsprechend den Aussagen des Gutachtens projektspezifisch festzulegen sind – für Vortriebe „in horizontal geschichtetem Gebirge mit der Gefahr von „Sargdeckelbildung“ (Ausbildung eines Bruchkörpers entlang der Schicht- und Klufflächen im Firstbereich)“ vorgegeben, dass „als Zusatzlastfall eine schlanke Auflast auf den Schildmantel berücksichtigt werden“ muss. „Die vertikale Auflast infolge dieses Bruchkörpers sollte mindestens zu  $\sigma_v = 0,5 \cdot D \cdot \gamma_{Fels}$  (...) angesetzt werden.“ Dies entspricht einem Felskeil von etwa 5 m Höhe, was deutlich weniger ist als sich aus den vorstehend erläuterten Berechnungen mit und auch ohne Einfluss von Grundwasser ergibt.

Eine genauere rechnerische Betrachtung ist also notwendig und wichtig für die richtige Bemessung des Vortriebschildes sowie der Tübbingauskleidung.

#### 1.4.5 Einleitung der Vortriebspresenkräfte in den Tübbingring

Wie in Kapitel 1.1 erläutert, dienen die Tübbingringe als Widerlager für die Vortriebspresen. Die Kräfte werden von den Vortriebspresen an die in den Ringfugen angeordneten Kontaktflächen abgegeben und führen dort zu Spannungskonzentrationen, die ihrerseits zu Spaltzugkräften in den Tübbing führen (wie es Bild 12 für ein Projektbeispiel [3, 7] zeigt). Um die Tübbing entsprechend bemessen zu können, müssen die maximalen Vortriebskräfte, die sich aus den in Bild 1 dargestellten Anteilen zusammensetzen, in der Planungsphase ermittelt werden. In dem in Kapitel 1.4.4 betrachteten Fall tragen auch Kraftanteile, die zur Überwindung der Reibung des eingeklemmten Schildes erforderlich sind, erheblich zur Größe der Vortriebspresenkräfte bei.

Auf der anderen Seite erfordern die Dichtungen in den Ringfugen zwischen den Tübbingringen eine Vorspannung,



11 Normal thrust and bending moments in segmental ring 4  
Normalkräfte und Biegemomente im 4. Tübbingring

### 1.4.5 Transfer of Jacking Forces Into the Segmental Ring

As explained in chapter 1.1, the segmental rings serve as abutments for the jacks. The forces are transferred from the jacks to the contact surfaces in the circumferential joints and lead to stress concentrations there, which result in tensile splitting forces in the segments, as shown in Fig. 12 for an example project [3, 7]. To be able to design the segments accordingly, the maximum jacking forces, which are composed of the components shown in Fig. 1, must be determined in the design phase. In the case considered in chapter 1.4.4, force components required to overcome the friction of the clamped shield also contribute significantly to the magnitude of the jacking forces.

On the other hand, the sealing gaskets located in the circumferential joints between the segmental rings need to be compressed. This necessity leads to minimum jacking forces that must be achieved.

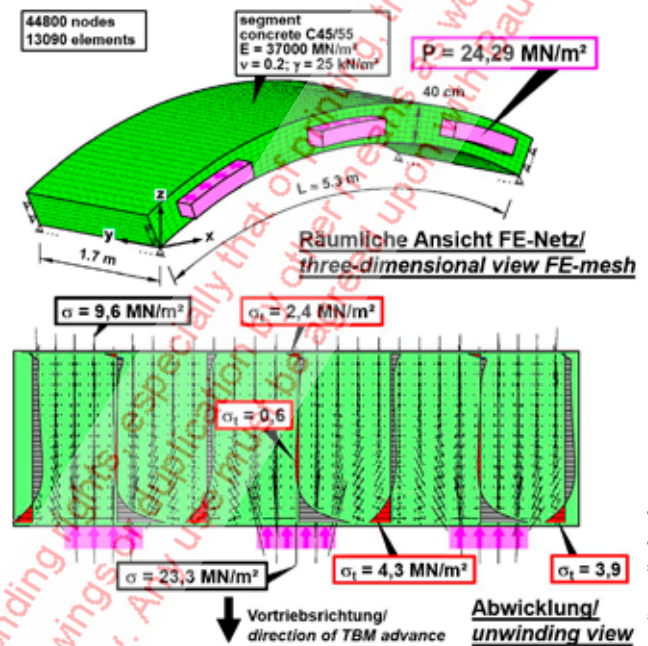
As already mentioned, the temporary face must also provide a sufficient abutment so that the jacking forces can be applied. The authors know various cases from practice of TBM tunneling in EPB mode in jointed rock, in which the rock mass strength at the temporary face was so low and/or the stability of the temporary face was not given, so that it was not possible to apply the required jacking forces. As a result, the jacking forces dropped repeatedly, problems arose with steering the tunnel boring machine and with the positional stability and tightness of the segmental rings. Supplementary compressed air support (EPB & partial filling & compressed air) had to be provided to enable proper driving. Corresponding observations were made, for example, in a section of the Neue Schlüchterner Tunnel in the strata of the upper Bunter formation [8].

## 2 Reflections on the Annular Gap Mortar

### 2.1 Bi-Component Mortar

The use of bi-component mortar for annular gap filling has advantages from the point of view of construction operation as well as with regard to the uplift forces resulting from fresh mortar. However, from the authors' point of view, such mortar is not suitable for tunneling in rock in most of the cases, because complete filling of the annular gap, which is required for a sound bedding of the segmental ring, cannot be guaranteed for the following reasons:

It can or must be assumed that the cavity in the area of the shield is stable at least in some sections of the tunnel. In such case, the steering gap in the roof area remains open. As a result, the bi-component mortar can flow towards the temporary face. Consequently, no grout



12 Tensile splitting forces resulting from jacking forces for a project example

Spaltzugkräfte aus Vortriebspresenkräften für ein Projektbeispiel

aus der sich Mindest-Vortriebspresenkräfte ableiten lassen, die nicht unterschritten werden dürfen.

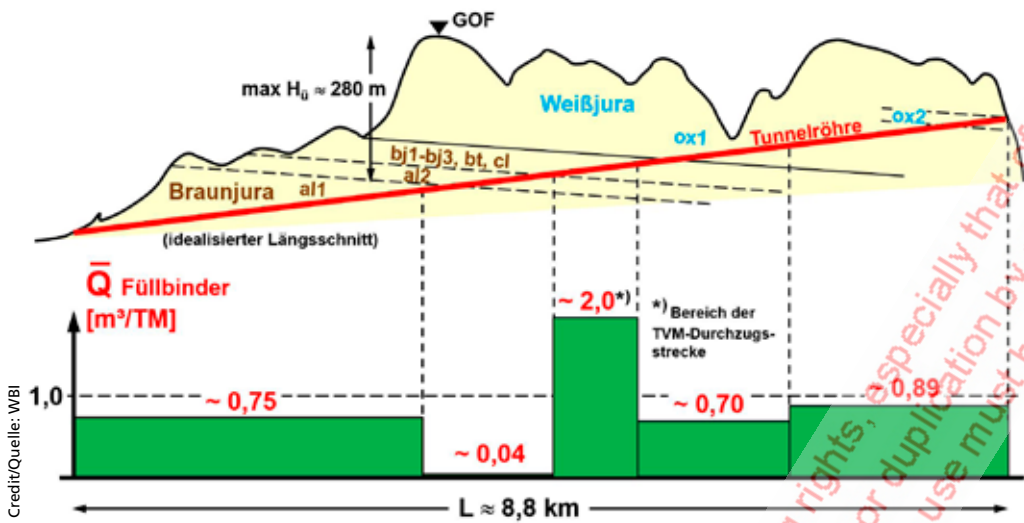
Wie bereits erwähnt, muss auch die Ortsbrust ein ausreichendes Widerlager bieten, um die Vortriebspresenkräfte aufbringen zu können. Den Autoren sind aus der Praxis verschiedene Fälle von maschinellen Vortrieben im EPB-Modus im klüftigen Fels bekannt, bei denen die Gebirgsfestigkeit an der Ortsbrust derartig gering war und/oder die Standsicherheit an der Ortsbrust nicht gegeben war, so dass diese Kräfte nicht aufgebracht werden konnten. Die Vortriebspresenkräfte fielen in der Folge wiederholt ab, es kam zu Problemen bei der Steuerung der Tunnelvortriebsmaschine sowie bei der Lagesicherung und Dichtigkeit der Tübbingringe. Es musste eine ergänzende Druckluftstützung (EPB & Teilfüllung & Druckluft) vorgesehen werden, um einen einwandfreien Vortrieb zu ermöglichen. Entsprechende Beobachtungen wurden beispielsweise in einem Abschnitt des Neuen Schlüchterner Tunnels in den Schichten des oberen Buntsandsteins gemacht [8].

## 2 Betrachtungen zum Ringspaltmörtel

### 2.1 Bi-Komponentenmörtel

Die Verwendung von Bi-Komponentenmörtel zur Ringspaltverfüllung hat aus baubetrieblicher Sicht sowie hinsichtlich des Mörtelauftriebs Vorteile. Für Tunnelvortriebe im Fels ist er jedoch aus Sicht der Autoren in den meisten Fällen nicht geeignet, da aus folgenden Gründen eine vollständige Füllung des Ringspalts, die für die Bettung des Tübbingrings erforderlich ist, nicht gewährleistet werden kann:





**13** Two-component mortar, average grout take during post-grouting of annular gap of Eastern tunnel tube of Boßler Tunnel

Bi-Komponenten-Mörtel, Mittlere Aufnahmemengen bei der Nachverfüllung des Ringspalts der Oströhre des Boßlertunnels

pressure can be built up and the annular gap remains open in the roof area.

A practical example where this has been observed is the Boßler Tunnel, which was excavated with a tunnel boring machine in the course of the new railway line from Stuttgart to Ulm in Germany. Extensive post-grouting was required in the roof area after driving (Fig. 13, [9, 10]).

In addition, the joints in sedimentary rocks, such as sandstones, locally may have opening widths, into which the bi-component mortar can also flow off. Also in such case, a complete filling of the annular gap with bi-component mortar cannot be guaranteed.

## 2.2 Cement Mortar

Cement mortars for annular gap grouting usually have low cement contents with a high water-cement-ratio. As a result, the Young's modulus is small and develops only slowly. The complete bedding of the segmental ring may therefore only be achieved at larger distances from the temporary working face. In addition, the development of the Young's modulus depends on the drainage conditions and thus on the  $k_f$ -value of the rock mass. For example, the stiffness modulus of a mortar with a cement content of 50 kg/m<sup>3</sup> develops much more favorably under drained than under undrained conditions (Fig. 14, [11, 3]).

For a project in Israel, oedometric tests on a cement mortar under drained conditions showed that even the fresh, not yet set mortar has a modulus of elasticity of 5 MPa, which in the given case was sufficient for bedding of the segmental ring, if the effective mortar injection pressure amounted to at least 1 bar and was kept upright for a certain period of time to allow for consolidation of the mortar (Fig. 15, [12]). In such case, the rock mass must be sufficiently permeable to allow the mortar to release water. It should be noted that the

Man kann oder muss davon ausgehen, dass der Hohlraum im Bereich des Vortriebsschildes zumindest bereichsweise standsicher ist. In diesem Fall bleibt der Spalt in der Firste offen. In der Folge kann der Bi-Komponentenmörtel nach vorne zur Ortsbrust abfließen. In der Folge lässt sich kein Verpressdruck aufbauen, und der Ringspalt bleibt im Firstbereich offen.

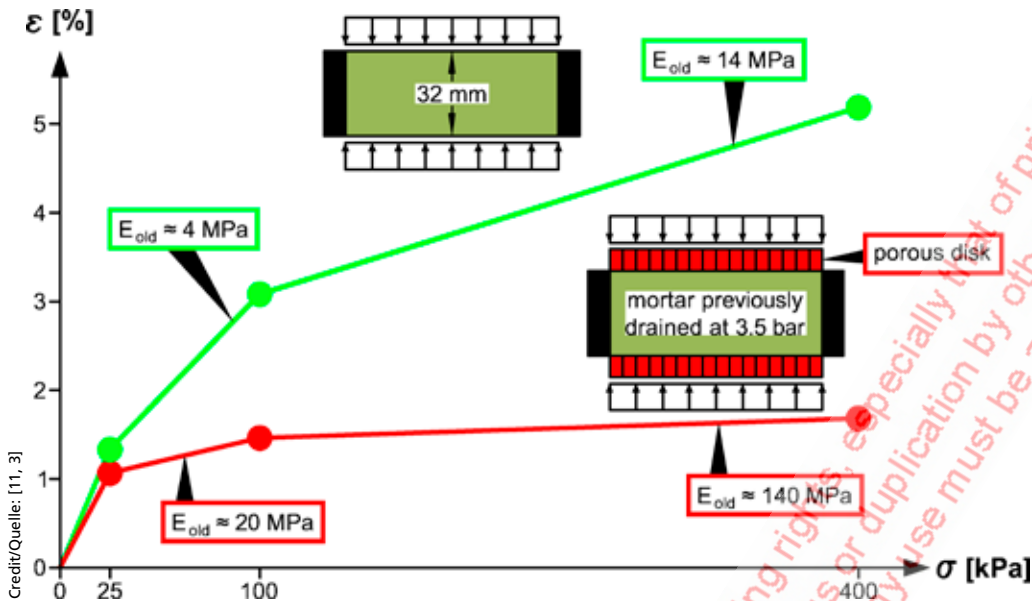
Ein Beispiel aus der Praxis, bei dem dies beobachtet wurde, ist der Boßlertunnel, der im Zuge der NBS Stuttgart-Ulm mit einer Tunnelvortriebsmaschine aufgeföhren wurde. Hier wurden im Nachgang zum Vortrieb umfangreiche Nachverpressungen im Firstbereich erforderlich (Bild 13, [9, 10]).

Darüber hinaus können die Trennflächen in Sedimentgesteinen, wie z. B. Sandsteinen, bereichsweise Öffnungsweiten haben, über die der Bi-Komponentenmörtel ebenfalls abfließen kann. Auch deshalb kann eine vollständige Füllung des Ringspalts mit Bi-Komponentenmörtel nicht gewährleistet werden.

## 2.2 Zementmörtel

Zementmörtel zur Ringspaltverpressung besitzen in der Regel geringe Zementanteile mit einem hohen W/Z-Faktor. Die Folge dieser Zusammensetzungen sind geringe E-Moduln, die sich zudem nur langsam entwickeln. Die vollständige Bettung des Tübbingrings stellt sich deshalb möglicherweise erst in größerem Abstand zur temporären Ortsbrust ein. Darüber hinaus ist die zeitliche Entwicklung des E-Moduls von den Drainagebedingungen und damit von dem  $k_f$ -Wert des Baugrunds abhängig. So entwickelt sich der Steifemodul eines Mörtels mit 50 kg/m<sup>3</sup> Zementanteil wesentlich günstiger bei dränierten als bei undränierten Bedingungen (Bild 14, [11, 3]).

Für ein Projekt in Israel konnte mit Ödometerversuchen an einem Zementmörtel unter dränierten Bedingungen gezeigt werden, dass schon der frische, noch nicht abgebundene Mörtel einen für die Bettung in diesem Fall ausreichenden E-Modul von 5 MPa aufweist, wenn der effektive Mörtelverpressdruck mindestens 1 bar beträgt und über einen gewissen Zeitraum



14 Oedometric tests on annular gap mortar in drained and undrained condition

Oedometer Test an Zementmörtel im dränierten und undrännierten Zustand

modulus of elasticity required for a sufficient bedding as well as the effective grout injection pressure required for grouting must be determined on a project-specific basis, taking into account the respective boundary conditions (regarding this as well as other requirements on the mortar see [13]).

In the case of low permeabilities of the rock mass (undrained conditions), it must be demonstrated by testing that the grout will set even without water release. In this case, it is particularly important during tunnel heading to apply a sufficiently high grout injection pressure and to keep it constant over a certain period of time in order to create hydrostatic conditions. If this is ensured, sufficient bedding of the segmental rings in many cases can be achieved also under such conditions until the grout sets.

However, special considerations are required if conditions are to be expected in which layers of different permeability are present in the tunnel cross-section so that

aufrecht erhalten wird, um die Konsolidation des Mörtels zu ermöglichen (Bild 15, [12]). Der Baugrund muß in diesem Fall ausreichend durchlässig sein, um die Wasserabgabe des Mörtels zu ermöglichen. Es sei darauf hingewiesen, dass der für die Bettung erforderliche E-Modul sowie auch der für die Verpressung erforderliche effektive Mörtelverpressdruck projektspezifisch unter Berücksichtigung der jeweils vorliegenden Randbedingungen bestimmt werden müssen (vgl. hierzu sowie zu weiteren Anforderungen an den Ringspaltmörtel [13]). Im Falle geringer Durchlässigkeiten des Baugrunds (undrännerte Bedingungen) muss versuchstechnisch nachgewiesen werden, dass der Mörtel auch ohne Wasserabgabe abbindet. In diesem Fall ist es beim Vortrieb besonders wichtig, einen ausreichend großen Mörtelverpressdruck aufzubringen und über einen gewissen Zeitraum konstant zu halten, um hydrostatische Bedingungen zu erzeugen. Ist dies sichergestellt, so kann in vielen Fällen auch dann eine ausreichende Bettung der Tübbingringe bis zum Abbinden des Mörtels erreicht werden.



15 Oedometric test on cement mortar

Oedometer-Test an Zementmörtel



different drainage conditions are present, which can lead to uneven bedding of the segmental ring. This may be the case, for example, in the alternating sequences of low-permeable claystones and higher-permeable sandstones that are frequent in sedimentary rocks.

To prevent the segmental rings from floating, the mortar must have a minimum shear strength ([13]). This must be ensured with the composition and verified by testing.

### 3 Cutting the Rock

#### 3.1 Abrasiveness

For tunnelling in jointed rock, the common tests for determining abrasiveness, such as the Cerchar abrasiveness test, are necessary and helpful, but not sufficient.

Even if these tests show an only slightly abrasive rock, considerable wear can occur during tunnelling. The following effects are just a few examples:

- Grinding effect when water enters e.g. during heading in quartzitic sandstones with clayey binders
- One-sided wear of due to clogging non-rotating cutter discs in claystones (see also section 3.3)
- Wear in alternating layers of claystone/sandstone or in mixed-face conditions with fault zones.

Corresponding considerations must be made in time so that the tunnel boring machine and the heading are designed accordingly.

#### 3.2 Blocky Ground

Depending on the spatial position, the spacing and the characteristics of the discontinuities, rock wedges may form at the temporary face in fractured rock. In these cases, the rock is not crushed into rock pieces (chips) at the temporary face, as it is meant to be. Rather, the rock wedges are torn from the rock mass at the temporary face and then move in an uncontrolled manner in front of the cutterhead, which must act as a rock crusher in such a case. The rock wedges can cause considerable damage to the cutting tools and the cutterhead itself, as well as to the subsequent transport system. This phenomenon, known as "blocky ground", has already occurred in a number of tunnel headings in rock. Examples are the Hallandsås Tunnel in Sweden [5] and the Neuer Schlüchtern Tunnel in Germany [8]. If such conditions are to be expected, the openings in the cutterhead must be limited in size, e.g. by means of so-called grill bars (steel struts), so that the size of the rock blocks entering the transport system is limited to a permissible level. At the same time, the cutterhead and the cutting tools must be designed accordingly (reinforcement, wear protection, possibility of simple and fast tool changes). Also, tool changes must be taken into account in planning and costing.

Besondere Betrachtungen werden allerdings erforderlich, wenn Verhältnisse zu erwarten sind, bei denen im Tunnelquerschnitt Schichten verschiedener Durchlässigkeit anstehen, so dass unterschiedliche Drainagebedingungen vorliegen, die zu einer ungleichmäßigen Bettung führen können. Dies kann z. B. bei den in Sedimentgesteinen häufigen Wechselfolgen aus gering durchlässigen Tonsteinen und stärker durchlässigen Sandsteinen der Fall sein.

Um ein Aufschwimmen der Tübbingringe zu verhindern, muss der Mörtel eine Mindest-Scherfestigkeit aufweisen ([13, 14]). Dies ist mit der Zusammensetzung sicherzustellen und versuchstechnisch nachzuweisen.

### 3 Lösen des Gesteins

#### 3.1 Abrasivität

Für Tunnelvortriebe im klüftigen Fels sind die gängigen Versuche zur Bestimmung der Abrasivität, wie z. B. der Cerchar-Abrasivitäts-Versuch zwar notwendig und hilfreich, jedoch nicht hinreichend.

- Auch dann, wenn diese Versuche ein gering abrasives Gestein ausweisen, können beim Vortrieb erhebliche Verschleißerscheinungen auftreten. Nur beispielhaft genannt seien die folgenden Effekte:
- Schmirgel-Effekt bei Wasserzutritt beispielsweise beim Vortrieb in quarzhaltigen Sandsteinen mit tonigen Bindemitteln
- Einseitiges Abschleifen von aufgrund von Verklebung nicht rotierenden Disken in Tonsteinen (siehe hierzu auch Kap. 3.3)
- Verschleiß in Wechsellagen aus Ton-/Sandsteinen oder in mixed-face-conditions mit Störungen.

Entsprechende Überlegungen müssen rechtzeitig angestellt werden, damit die Tunnelvortriebsmaschine und der Vortrieb entsprechend ausgelegt werden.

#### 3.2 Blocky Ground

In Abhängigkeit von der Raumstellung, dem Abstand und der Ausbildung der Trennflächen kann es in klüftigem Fels zur Ausbildung von Gesteinsblöcken an der Ortsbrust kommen. In diesen Fällen wird der Fels nicht wie gedacht an der Ortsbrust zu Gesteinsstücken (Chips) zermahlen. Vielmehr werden die Gesteinsblöcke von dem Bohrkopf aus dem Verband gerissen und bewegen sich dann unkontrolliert vor dem Bohrkopf, der in einem solchen Fall wie ein Steinbrecher fungieren muss. Die Felsblöcke können erhebliche Schäden an den Abbauwerkzeugen und am Bohrkopf selber sowie auch am nachgelagerten Transportsystem verursachen. Dieses als „blocky ground“ bezeichnete Phänomen ist schon bei einigen Vortrieben im Fels aufgetreten. Beispielhaft genannt seien der Hallandsås-Tunnel in Schweden [5] sowie der Neue Schlüchtern Tunnel [8]. Sind solche Verhältnisse zu erwarten, so müssen die Öffnungen im Bohrkopf, z. B. durch sogenannte grill bars (Stahlstreben), so

### 3.3 Clogging

Sedimentary rocks often occur as alternating sequences of low-permeability claystones or siltstones and higher-permeable sandstones or calcareous sandstones (cf. e.g. typical stratigraphic sequences of the formations of Keuper, Jurassic, Bunter). The mudstones often are slaking rocks. They decompose to clay when dried out and subsequently exposed to water. This can be observed in surface outcrops exposed to weathering.

During TBM heading in such formations, especially below the groundwater table, have repeatedly shown problems with clogging. Such observations were made, for example, during the excavation of the Filder Tunnel (Stuttgart 21) in the alternating sequence of mudstones and permeable sandstones of the Stubensandstein formation below the groundwater table [15]. Such phenomena were also observed during the excavation of the Neuer Schluechterner Tunnel in the alternating sequence of claystones and sandstones of the Upper Bunter formation [8]. Due to the clogging, the cutters were blocked, and unilateral wear occurred. As a result, a large number of cutting tool changes became necessary (Fig. 16, [15]). Furthermore, there was a significant decrease in the advance rate. The clogging phenomena in combination with the higher rock strength of the sandstone layers lead to an increase in the required cutting pressure and torques. The temperatures at the cutterhead increased.

Extensive investigations were carried out on this subject in connection with the Filder Tunnel [15]. Laboratory tests showed that after drying and subsequent addition of water, crushed mudstone samples decompose to a medium plastic clay, which, in terms of its plasticity and consistency, falls exactly within the range of soils that are highly susceptible to clogging [16]. During TBM tunnelling, the claystones are first crushed into smaller pieces (chips). They are exposed to elevated tempera-

verkleinert werden, dass die Größe der Gesteinsblöcke, die in das nachgelagerte Transportsystem gelangen, auf ein zulässiges Maß beschränkt wird. Gleichzeitig müssen der Bohrkopf und die Abbauwerkzeuge entsprechend ausgelegt werden (Verstärkung, Verschleißschutz, Möglichkeit des einfachen und schnellen Werkzeugwechsels), und Werkzeugwechsel müssen in Planung und Kalkulation berücksichtigt werden.

### 3.3 Verklebung

Sedimentgesteine treten häufig als Wechselfolge von gering durchlässigen Ton- oder Schluffsteinen und höher durchlässigen Sand- oder Kalksandsteinen auf (vgl. z. B. typische Schichtfolgen der Formationen des Keupers, Juras, Buntsandsteins). Bei den Tonsteinen handelt es sich häufig um veränderlich feste Gesteine. Bei Austrocknung und anschließender Wasserzufuhr zerfallen sie zu Ton. Dies kann an oberflächigen Aufschlüssen, die der Witterung ausgesetzt sind, beobachtet werden.

Bei TVM-Vortrieben in solchen Formationen, insbesondere unter dem Grundwasserspiegel, ist es wiederholt zu starken Verklebungserscheinungen gekommen. Derartige Beobachtungen wurden beispielsweise beim Vortrieb des Fildertunnels (Stuttgart 21) in den Wechsellagerungen aus Tonsteinen und wasserdurchlässigen Sandsteinen des Stubensandstein unterhalb des Grundwasserspiegels gemacht [15]. Auch beim Vortrieb des Neuen Schlüchterner Tunnels in den Wechsellagerungen aus Ton- und Sandsteinen des Oberen Buntsandsteins wurden derartige Erscheinungen beobachtet [8]. Durch die Verklebungen blockieren die Abbauwerkzeuge, und es kommt zu einseitigem Verschleiß. In der Folge werden in großem Umfang Meißelwechsel erforderlich (Bild 16, [15]). Weiterhin kommt es zu einer deutlichen Abnahme der Vortriebsleistung. Die Verklebung in Kombination mit den höheren Gesteinsfestigkeit der Sandsteinlagen führen zu einem Anstieg der erforderlichen Andruckkräfte und Drehmomente. Die Temperaturen am Bohrkopf nehmen zu.



Neuer Schlüchterner Tunnel  
Verklebung Öffnungen im Tonstein  
Clogging of openings in claystones



Filder tunnel  
Meißel, einseitige Abnutzung bei  
Blockade / one-sided cutter disc wear  
due to blockage

16 Clogging in claystones, wear of cutter discs – examples

Verklebung in Tonsteinen, Werkzeugverschleiß – Beispiele



tures at the cutterhead (see above) and can therefore dry out. On the one hand, water can flow in through the permeable sandstone layers. Furthermore, water is added in connection with conditioning and cleaning. In addition, the claystones are “mechanically processed” during excavation. It is therefore obvious that these slaking rocks disintegrate under the given conditions during tunnelling and that, as a consequence, clogging phenomena occur.

Formation of rock chips, “mechanical processing” and increased temperatures are influencing factors that cannot be changed. The only possible countermeasure is therefore to minimize the quantities of water added. All waters added in connection with operation (cleaning, conditioning) should be minimized and immediately drained off. The water inflow from the rock mass (sandstone layers) can be minimized or prevented by (supplementary application of) compressed air. A successful example of this is the excavation of the Filder Tunnel in the sections located in the Lias  $\alpha$  formation, also below the groundwater table, which was carried out without EPB, under compressed air, and did not experience any problems with clogging [15].

Future TBM headings in formations with slaking rock will require appropriate considerations and further investigations to better deal with clogging phenomena.

#### 4 Summary

In TBM tunnelling, there is a complex interaction between the tunnel boring machine, the ground and the segmental lining. Especially for tunnel heading in jointed rock, these interactions must be taken into account in planning and construction, to avoid considerable problems that can lead to construction time and cost overruns.

An essential prerequisite for this is the understanding as well as the realistic description and simulation of the stress and deformation behaviour as well as the permeability of the rock mass, in particular the frequently existing anisotropies of strength and permeability. A suitable model for this purpose is the Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM).

In this article, the interaction of the overall system consisting of tunnel boring machine, ground and segmental lining is explained in principle. Based on the example of a Bunter formation, the realistic description of the rock mass with the aid of the AJRM is described. Subsequently, selected results of finite element calculations are presented, which were carried out on the above-mentioned overall system considering the interactions. It is shown that the discontinuity fabric, the anisotropy of strength and permeability and the seepage flow have considera-

Im Zusammenhang mit dem Fildertunnel wurden umfangreiche Untersuchungen zu diesem Thema angestellt [15]. Mit Laborversuchen konnte gezeigt werden, dass zerkleinerte Tonsteinproben nach Trocknung und anschließender Zufuhr von Wasser zu mittelplastischen Tonen zerfallen, die hinsichtlich ihrer Plastizität und Konsistenz genau in den Bereich stark verklebungsanfälliger Böden nach [16] fallen. Beim TVM-Vortrieb werden die Tonsteine zunächst zerkleinert. Sie sind erhöhten Temperaturen ausgesetzt (s. o.) und können insofern austrocknen. Wasser kann einerseits durch die Sandsteinlagen zufließen. Andererseits wird im Zuge der Konditionierung und der Reinigung Wasser zugeführt. Darüber hinaus werden die Tonsteine beim Vortrieb „mechanisch bearbeitet“. Es liegt also nahe, dass diese veränderlich festen Gesteine aufgrund der Randbedingungen beim Vortrieb zerfallen und in der Folge Verklebungserscheinungen auftreten.

Die Zerkleinerung, mechanische Bearbeitung und die erhöhten Temperaturen sind Einflussfaktoren, die nicht geändert werden können. Als Gegenmaßnahme kommt damit nur die Minimierung der Wasserzufuhr in Frage. Zum einen sollte die Wasserzufuhr aus baubetrieblichen Gründen minimiert werden und etwaige zugeführte Wässer (Reinigung) sollten umgehend abgeführt werden. Der Wasserzufluss aus dem Baugrund (Sandsteinlagen) kann durch eine (ergänzende Beaufschlagung) mit Druckluft minimiert bzw. unterbunden werden. Ein erfolgreiches Beispiel hierfür ist der Vortrieb des Fildertunnels in den Abschnitten im Lias  $\alpha$ , ebenfalls unterhalb des Grundwasserspiegels, der ohne Verbreitung unter Druckluft durchgeführt wurde, und bei dem keine Probleme mit Verklebung aufgetreten sind [15].

Zukünftige maschinelle Tunnelvortriebe in Formationen mit veränderlich festen Gesteinen erfordern entsprechende Betrachtungen und weitergehende Untersuchungen, um die Probleme der Verklebung besser in den Griff zu bekommen.

#### 4 Zusammenfassung

Bei maschinellen Vortrieben liegt ein komplexes Wechselspiel zwischen Tunnelvortriebsmaschine, Baugrund und Tübbingauskleidung vor. Insbesondere für Vortriebe im klüftigen Fels müssen diese Wechselwirkungen in Planung und Bau berücksichtigt werden, da sonst erhebliche Probleme auftreten können, die zu Bauzeit- und Baukosten-Überschreitungen führen.

Eine wesentliche Voraussetzung hierfür ist das Verständnis sowie die realitätsnahe Beschreibung und Erfassung des Spannungs- und Verformungsverhaltens sowie der Durchlässigkeit des Felses, insbesondere der häufig vorliegenden Anisotropien der Festigkeit und Durchlässigkeit. Ein hierfür geeignetes Modell ist das Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM).

Im vorliegenden Artikel wird zunächst das Zusammenwirken des Gesamtsystems aus TVM, Baugrund und Tübbingauskleidung dem Grunde nach erläutert. Basierend auf dem Beispiel

ble influence on the stability of the temporary working face, on the loads and deformations in the area of shield and segmental lining and also on the suitability of the temporary working face as an abutment. This results in essential conditions for the design of the tunnel boring machine (e.g. jacking forces, design of shield, design of segments, requirement for compressed air support, etc.). If the relevant properties of the rock mass are not properly taken into account and the interaction of ground, tunnel boring machine and segmental lining is not adequately simulated, there is a risk that the tunnel boring machine and the segment lining will not be adequately designed and that problems will occur during tunnel heading.

In addition, during TBM excavation in jointed rock, special conditions exist with regard to annular gap filling and rock cutting (wear, blocky ground, clogging), which require appropriate measures. This is also dealt with in the present article.

eines Buntsandsteins wird die realitätsnahe Beschreibung des Felses basierend auf dem AJRM beschrieben. Anschließend werden ausgewählte Ergebnisse von FE-Berechnungen vorgestellt, die an dem o. g. Gesamtsystem unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen durchgeführt wurden. Es wird gezeigt, dass das Trennflächengefüge, die Anisotropie der Festigkeit und Durchlässigkeit und die Sickerströmung erheblichen Einfluss auf die Standsicherheit der Ortsbrust, auf die Belastungen und Verformungen im Schild- und Tübbingbereich sowie auch auf die Eignung der Ortsbrust als Widerlager haben. Es ergeben sich daraus wesentliche Bedingungen für die Auslegung der Tunnelvortriebsmaschine (z. B. Pressenkräfte, Bemessung Schild, Bemessung Tübbinge, Erfordernis Druckluftstützung, etc.). Werden die maßgeblichen Eigenschaften des Felses nicht richtig berücksichtigt und wird die Wechselwirkung von Baugrund, Tunnelvortriebsmaschine und Tübbingauskleidung nicht angemessen erfasst, so besteht das Risiko, dass die TVM und die Tübbingauskleidung nicht angemessen geplant werden und beim Vortrieb Probleme auftreten.

 **BGL** 2020  
BAUGERÄTELISTE

## Das unverzichtbare Standardwerk für Bauausführung und Baustelleneinrichtung

### Nutzen Sie die Vorteile der Online-Version!

- » praktische **Berechnungshilfen**
- » individuelle Maschinen  
**speichern und verwalten**
- » aktueller **Erzeugerpreisindex**
- » übersichtliche **Navigation**
- » einfache **Volltextsuche**

Jetzt Zugang bestellen:  
[www.bgl-online.info](http://www.bgl-online.info)  
[profil@bauverlag.de](mailto:profil@bauverlag.de)  
+49 5241 21 51-20 00





In the past, difficulties have frequently arisen during TBM tunnelling in jointed rock. These have led to an exceeding of the planned construction times and costs. Along the new lines planned by Deutsche Bahn, a number of long tunnels in jointed rock are planned. Due to their length, they are suitable for mechanized tunnelling. With this article, the authors would like to highlight the relevant issues and thus contribute to better cost and schedule reliability of future projects.

Darüber hinaus liegen beim maschinellen Vortrieb im klüftigen Fels besondere Bedingungen hinsichtlich der Ringspaltverfüllung sowie hinsichtlich des Lösens (Verschleiß, Blocky Ground, Verklebung) vor, die entsprechende Maßnahmen erfordern. Auch hierauf wird im vorliegenden Artikel eingegangen.

In der Vergangenheit sind bei maschinellen Vortrieben im klüftigen Fels des Öfteren Schwierigkeiten aufgetreten, die zu einer Überschreitung der vorgesehenen Bauzeiten und -kosten geführt haben. Im Zuge der von der DB Netz AG geplanten Neubaustrecken sind eine Reihe langer Tunnel im klüftigen Fels geplant, die aufgrund ihrer Länge für den maschinellen Tunnelvortrieb in Frage kommen. Die Autoren möchten mit dem vorliegenden Artikel die relevanten Fragestellungen aufzeigen und damit einen Beitrag zu einer besseren Kosten- und Terminalsicherheit zukünftiger Projekte leisten.

#### REFERENCES/LITERATUR

- [1] Wittke, M.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke, W.: Sichere und wirtschaftliche Planung und Ausführung von Tunnelbauwerken im klüftigen Fels nach der AJRM-Methode – Teile 1 und 2. In Zeitschrift Tunnel 3/2021 und 4/2021. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2021.
- [2] Wittke, W.: Felsmechanik, Grundlagen für wirtschaftliches Bauen im Fels. Springer-Verlag, Berlin 1984. ISBN: 3-540-13016-0 / 0-387-13016-0.  
English Version:  
Wittke, W.: Rock mechanics – Theory and application with case histories. Springer: Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1990. ISBN: 3-540-52719-2 / 0-387-52719-2
- [3] Wittke, W.: Rock Mechanics based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM), Verlag Ernst & Sohn GmbH & Co. KG, Berlin 2014. ISBN: 978-3-433-03079-0.
- [4] Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.; Wittke-Gattermann, P.: Das Modell AJRM als Grundlage für wirtschaftliches und sicheres Planen und Bauen im klüftigen Fels. Vortrag anlässlich des 5. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.05.2019. WBI-Print 22, Weinheim, 2019. ISBN: 978-3-00-063255-6
- [5] Lundman, P.; Rosell, K.; Wittke, W.; Wittke-Schmitt, B.: Railway Tunnel Hallandsås/S: Technical problems, reasons for increase of costs and construction time (view of the client). In: Proc. STUVA-Tagung 2009 in Hamburg. Forschung + Praxis 43, 2009.
- [6] DAUB: Empfehlungen für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen. In Zeitschrift Tunnel 7/2005. Bauverlag BV GmbH, Gütersloh, 2005.
- [7] Wittke, W. et al.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe. Geotechnik in Forschung und Praxis – WBI-Print 6. VGE Verlag, Essen, 2006. ISBN: 978-3-7739-1306-7.  
English Version:  
Wittke, W. et al.: Stability Analysis and Design for Mechanized Tunneling. Geotechnical Engineering in Research and Practice – WBI-Print 6. Aachen, 2007.
- [8] Rosenberg, B.; Kammel, H.; Wittke-Schmitt, B.: TBM-Vortrieb im Buntsandstein für den Neuen Schlüchterner Tunnel – Lessons learned. Vortrag anlässlich des 7. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 23.06.2022. Geotechnik in Forschung und Praxis – WBI-Print 24, Weinheim, 2024. ISBN: 978-3-00-072927-0.
- [9] Strauss, A.: Boßlertunnel – Erfahrungen beim Einsatz von Bi-Komponentenmörtel. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 07.06.2018. Geotechnik in Forschung und Praxis – WBI-Print 21, Weinheim, 2021. ISBN: 978-3-00-060352-5.
- [10] WBI: NBS W-U, PFA 2.2, Boßlertunnel, Interne Projektunterlagen. 2017/2018. Unveröffentlicht.
- [11] Wittke, W.: Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein. Vortrag anlässlich des 20. Symposiums für Felsmechanik und Tunnelbau. In: Mining + geo (2012) Nr. 4, S. 634–638.
- [12] Red Line, Tel Aviv, Eastern Section – Einfluss der Eigenschaften des Ringspaltmörtels auf die Bemessung der Tübbingauskleidung. Vortrag anlässlich des 4. Felsmechanik- und Tunnelbautages im WBI-Center am 07.06.2018. Geotechnik in Forschung und Praxis – WBI-Print 21, Weinheim, 2021. ISBN: 978-3-00-060352-5.
- [13] Gehwolf, P. et al.: Erfahrungsstand zur Ringspaltverfüllung bei einschaligen Tunneln mit Schwerpunkt deutsche Eisenbahntunnel. In: Taschenbuch für den Tunnelbau 2022. Ernst & Sohn Vlg., Berlin, 2022.
- [14] Thewes, M.; Budach, C.: Mörtel im Tunnelbau – Stand der Technik und aktuelle Entwicklungen zur Verfüllung des Ringspalt bei Tunnelvortriebsmaschinen, BauPortal 12/2009.
- [15] Wittke, W.; Herrenknecht, M.: Verklebung bei TVM-Vortrieben in veränderlich festen Gesteinen. Vortrag anlässlich des 6. Felsmechanik- und Tunnelbautages im Rosengarten in Mannheim am 10.06.2021. Geotechnik in Forschung und Praxis – WBI-Print 23, Weinheim, 2023. ISBN: 978-3-00-069500-1.
- [16] Thewes, M.: Adhäsion von Tonböden beim Tunnelvortrieb mit Flüssigkeitsschilden, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Bericht Nr. 21, Gesamthochschule Wuppertal. 1999.



◆ **The international industry medium of the worldwide tunnel construction**

*Das internationale Branchenmedium des weltweiten Tunnelbaus*

◆ **planning, execution, maintenance and renovation of underground structures**

*Planung, Ausführung, Unterhalt und Sanierung unterirdischer Bauwerke*

◆ **comprehensive reports and opinions from current research**

*umfassende Berichte und Meinungen aus der aktuellen Forschung und Betriebsführung*



**tunnel E-PAPER – REGISTER AND READ IT NOW!**

[www.tunnel-online.info/read-e-paper](http://www.tunnel-online.info/read-e-paper)