

# Empfehlungen für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen

Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) – Arbeitskreis Schildstatik

Beim Aufstellen von Belastungs- und Bettungsannahmen für die statische Berechnung einer Schildmaschine ist eine sorgfältige Abwägung zwischen wirtschaftlichen Aspekten und der Sicherstellung der Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit der Maschine erforderlich. Ziel des Entwurfsprozesses ist es, die Funktionstauglichkeit der Schildmaschine sicherzustellen sowie konstruktive und wirtschaftliche Faktoren wie z. B. die Blechdicke des Schildschwanzes und die resultierende Dicke des Ringspalts zu optimieren.

## 1 Einleitung

In der weit überwiegenden Zahl der Praxiseinsätze von Schildmaschinen sind bislang

Zusammensetzung des DAUB-Arbeitskreises „Schildstatik“:  
Dr.-Ing. G. Brem (Hochtief AG),  
Dipl.-Ing. W. Burger (Herrenknecht AG),  
Dipl.-Ing. K. O. Fritz (Anakon),  
Prof. Dipl.-Ing. F. Gröbl (PSP Beratende Ingenieure),  
Prof. Dr.-Ing. B. Maidl (Ruhr-Universität Bochum),  
Dr.-Ing. U. Maidl (Ingenieurbüro Maidl & Maidl),  
Prof. Dr.-Ing. D. Placzek (Erdbaulaboratorium Essen),  
Dr.-Ing. U. Rehm (Herrenknecht AG),  
Dipl.-Ing. W. Schuck (Deutsche Bahn AG),  
Dr.-Ing. I. Spohr (Zerna, Köpper u. Partner),  
Dr.-Ing. A. Städing (Duddeck u. Partner),  
Dr.-Ing. M. Thewes (STUVA)

keine grundlegenden Probleme mit der Tragfähigkeit oder mit Verformungen aufgetreten. Die starke Ausweitung der Einsatzbereiche von Schildmaschinen in den letzten 10 Jahren hat jedoch zu einer Sensibilisierung gegenüber den Berechnungsannahmen für Schildmaschinen geführt, für deren Aufstellung bislang nur wenige Hinweise vorliegen. Bei Tunnelprojekten der jüngeren Zeit war festzustellen, dass dieses Thema verstärkt in der Praxis diskutiert wird und ein Bedarf für entsprechende Empfehlungen besteht. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich die Anforderungen an eine temporär für den Tunnelvortrieb eingesetzte Baumaschine erheblich von den Anforderungen an einen Tunnelausbau,

# Recommendations for static Analysis of Shield Tunnelling Machines

German Committee for Underground Construction (DAUB) – Shield Statics Working Group

When establishing load and bedding assumptions for the static analysis of a shield machine it is essential to arrive at a fine balance between economic aspects and safeguarding the bearing capacity as well as the serviceability of the machine. The objective of the design process is to secure the shield machine's functionality as well as optimising constructional and economic factors like the tail skin plate thickness and the resultant thickness of the annular gap.

## 1 Introduction

So far in the majority of cases relating to practical applications of shield machines no basic problems have occurred with regard to the bearing capacity or deformations. The pronounced increase in the ranges of application for shield machines during the past 10 years has, however, led to a sensitisation regarding the analytical assumptions for shield machines, for which few references are available up till now. It became evident in the case of recent tunnel projects that this topic is widely discussed in practice and that there is a need for corresponding recommendations. In this connection, it must be taken into consideration that the requirements posed on a con-

struction machine, which is temporarily used for driving a tunnel can differ substantially from the demands placed on a tunnel lining, which is devised for a service life of 100 years or more.

Compiled by the DAUB Working Group on "Shield Statics":  
Dr.-Ing. G. Brem (Hochtief AG),  
Dipl.-Ing. W. Burger (Herrenknecht AG),  
Dipl.-Ing. K. O. Fritz (Anakon),  
Prof. F. Gröbl (PSP Beratende Ingenieure),  
Prof. B. Maidl (Ruhr-Universität Bochum),  
Dr.-Ing. U. Maidl (Ingenieurbüro Maidl & Maidl),  
Prof. Dr.-Ing. D. Placzek (Erdbaulaboratorium Essen),  
Dr.-Ing. U. Rehm (Herrenknecht AG),  
Dipl.-Ing. W. Schuck (Deutsche Bahn AG),  
Dr.-Ing. I. Spohr (Zerna, Köpper u. Partner),  
Dr.-Ing. A. Städing (Duddeck u. Partner),  
Dr.-Ing. M. Thewes (STUVA)

Tabelle 1: Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen nach DIN 18800 [2]

Einwirkungsart	Beispiele	$\gamma_F$
Ständige Einwirkungen und kontrollierte veränderliche Einwirkungen	Erddruck, Wasserdruck, installierte Pressenkräfte	1,35
Ungünstig wirkende veränderliche Einwirkungen	Maximaler Druck in Abbau- und Arbeitskammer für Bemessung von Druck- und Tauchwand	1,50
Außergewöhnliche Einwirkungen (mit gemeinsam wirkenden ständigen und veränderlichen Einwirkungen)	Injektionsdrücke, Einwirkungen aus unplanmäßigen Steuerbewegungen	1,00

der für eine mehr als hundert-jährige Gebrauchsdauer auszu-legen ist, unterscheiden können.

Die vorliegenden Empfehlungen für die statische Berechnung von Schildmaschinen stellen praxisnahe Hinweise für die Entwurfsphase bereit. Sie wurden von einem Arbeitskreis des Deutschen Ausschusses für Unterirdisches Bauen (DAUB) erarbeitet. Die Empfehlungen gelten für Schildmaschinen, mit denen begehbare Tunnelquerschnitte aufgeföhren werden. Dazu gehören entsprechend der vom DAUB in den Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen [1] eingeföhrenen Terminologie:

- Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S)
- Schildmaschinen mit Vollschnittabbau (SM-V)
- Schildmaschinen mit teilflächigem Abbau (SM-T)

## 2 Sicherheitskonzept

### 2.1 Nachweisziele

Ziel der statischen Berechnung einer Schildmaschine ist es, die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit für die zu erwartenden Belastungszustände sicherzustellen. Beim Tragfähigkeitsnachweis werden die tragenden Bauteile und ihre Verbindungen für eine ausreichende Standsicherheit be-

messen. Die im Betrieb zu erwartenden Verformungen der Schildmaschine und insbesondere des Schildschwanzes werden im Rahmen des Gebrauchstauglichkeitsnachweises überprüft. Bei allen Nachweisen sind grundsätzlich die Vorgaben der einschlägigen Normen zu berücksichtigen.

Es sei darauf hingewiesen, dass Druckluftschleusen nicht Gegenstand dieser Empfehlungen sind. Für sie gelten gesonderte Berechnungsvorschriften.

### 2.2 Tragfähigkeitsnachweis

Der Tragfähigkeitsnachweis einer Schildmaschine wird auf Grundlage der DIN 18800 [2] geführt. Dabei werden zunächst die charakteristischen Werte der Einwirkungen auf die Schildmaschine ermittelt. Die Bemessungswerte der Einwirkungen ergeben sich unter Berücksichtigung der entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerte gemäß Tabelle 1. Für die Widerstände gelten die Teilsicherheitsbeiwerte der Tabelle 2.

Wenn die sich im Rahmen des Tragfähigkeitsnachweises ergebende Verformung des Systems so groß wird, dass sie zu einem rechnerischen Absetzen des Schildschwanzes auf dem Tübbingring führen würde, so ist dies nur dann zulässig, wenn der Gebrauchstaug-

Table 1: Partial safety coefficients for effects according to DIN 18800 [2]

Type of effect	Examples	$\gamma_F$
Constant effects and controlled fluctuating effects	Earth pressure, water pressure, installed thrusting forces	1.35
Unfavourably acting fluctuating Effects	Max. pressure in extraction and working chamber for determining the pressure and diving wall	1.50
Out of the ordinary effects (with jointly acting constant and changing effects)	Grouting pressures, effects from unscheduled control movements	1.00

The presented recommendations for the static analysis of shield machines represent practice-related references for the design phase. They were compiled by a working group of the German Committee for Underground Construction (DAUB). These recommendations apply to shield machines used to excavate accessible tunnel cross sections. They include according to the terminology introduced by DAUB in the recommendations for selecting and evaluating tunnel driving machines [1]:

- tunnel boring machines with shield (TBM-S)
- shield machines with full-face excavation (SM-V)
- shield machines with partial face excavation (SM-T)

## 2 Safety Concept

### 2.1 Verification Objectives

The aim of static analysis for a shield machine is to safeguard the bearing capacity and the serviceability for the expected load states. The bearing construction parts and their connections for sufficient stability are dimensioned for the bearing capacity verification. The deformations affecting the shield machine and the tail skin in particular that are anticipated during operation are checked within the scope of the serviceability

verification. The guidelines for the pertinent norms have to be considered for all verifications.

It should be observed that compressed air locks are not part of these recommendations. Separate regulations apply to their analysis.

### 2.2 Bearing Capacity Verification

Proof of the bearing capacity of a shield machine is based on DIN 18800 [2]. First, the characteristic values for actions on the shield machine are established. The design data for these actions are obtained taking the corresponding partial safety coefficients in accordance with Table 1 into account. The partial safety coefficients according to Table 2 apply to the resistances.

Should the resultant deformation of the system be so large within the scope of the bearing capacity verification that it would lead to the tail skin theoretically touching the segmental ring, then this is only permissible providing that the verification of the serviceability can be maintained for the deformation expected in – during operation according to Ch. 2.3, that is without the tail skin touching on the ring.

### 2.3 Serviceability Verification

The serviceability verification for the tunnelling machine

Tabelle 2: Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände nach DIN 18800 [2]

Nachweisart	$\gamma_M$
Nachweis der Tragsicherheit	1,1
Nachweis der Gebrauchstauglichkeit (keine Gefahr für Leib u. Leben)	1,0

Table 2: Partial safety coefficients for resistances according to DIN 18800 [2]

Type of verification	$\gamma_M$
Verification of bearing safety	1.1
Verification of serviceability (no danger for life and health)	1.0

lichkeitsnachweis für die im Betrieb zu erwartende Verformung gemäß Kapitel 2.3, das heißt ohne ein Aufliegen des Schildschwanzes, geführt werden kann.

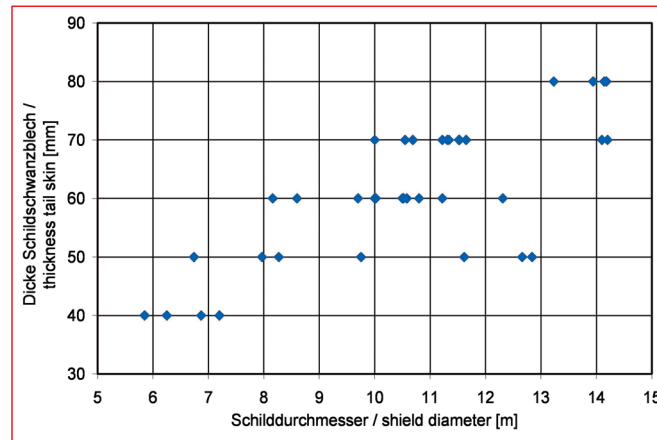
### 2.3 Gebrauchstauglichkeitsnachweis

Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis für die Vortriebsmaschine kann in der Regel auf einen Verformungsnachweis des Schildschwanzes beschränkt werden. Der Verformungsnachweis erfolgt gemäß DIN 18800 [2] mit den charakteristischen Einwirkungen (Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen  $\gamma_F = 1,0$ ; vgl. Tabelle 1).

Allgemeines Ziel des Nachweises ist, dass die aus den zu berücksichtigenden Einwirkungen resultierende maximale nach innen gerichtete Verformung an der Abweisleiste des Schildschwanzes einen weiteren Ringbau zulässt. Ein planmäßiges rechnerisches Absetzen der Abweisleiste auf den Tübbingring ist zu vermeiden.

Praxiserfahrungen und Messungen bei ausgeführten Projekten zeigen, dass in der Praxis auftretende Schildschwanzverformungen in der Regel geringer sind als die berechneten Verformungen. Für eine realitätsnähere rechnerische Abbildung des tatsächlich auftretenden Verformungsverhaltens liegen bislang noch keine gesicherten Erkenntnisse vor. Hinsichtlich eines verbesserten Modells für die Interaktion von Baugrund und Maschine besteht noch Forschungsbedarf.

Um auch bei sehr günstigen Baugrundverhältnissen mit geringen rechnerischen Belastungen eine sichere Dimensionierung des verformungsempfindlichen Schildschwanzes zu gewährleisten, wird bei der Festlegung der Blechdicke ein Vergleich mit bislang erfolgreich verwendeten Materialstärken empfohlen.



1 Dicke des Schildschwanzblechs von erfolgreich ausgeführten Schildvortrieben

1 Thickness of the tailskin plate for successfully undertaken shield drives

In Bild 1 werden für zahlreiche erfolgreich durchgeführte Projekte die verwendeten Blechdicken des Schildschwanzes grafisch dargestellt. Die Darstellung enthält keine Differenzierung nach den jeweiligen geologischen und hydrologischen Verhältnissen. Sie dient als Orientierungshilfe und ersetzt keinesfalls detaillierte projektbezogene Analysen der vorherrschenden Randbedingungen. Das aufgeführte Spektrum der Blechstärken für Schildschwänze kann bei Bedarf überschritten werden, sollte jedoch, außer in begründeten Einzelfällen, nicht unterschritten werden.

## 3 Einwirkungen

### 3.1 Allgemeines

Bei der statischen Berechnung einer Schildmaschine sind folgende Einwirkungen zu berücksichtigen:

- Eigengewicht
- Radiale äußere Einwirkungen: Erddruck, Wasserdruck, Reaktionskräfte aus Steuerbewegungen
- Axiale äußere Einwirkungen: Stützdruck in der Abbau- und ggf. auch der Arbeitskammer, Werkzeugandruck an der Ortsbrust, Vortriebspresenkräfte, Anhängelast der Nachläufer
- Weitere Einwirkungen: Mantelreibung, Reaktionskräfte an

can generally be limited to proof of deformation for the tail skin. The proof of deformation takes place according to DIN 18800 [2] with the characteristic actions (partial safety coefficient for the actions  $\gamma_F = 1,0$ ; see Table 1).

The general objective of the verification is that the maximum inward deformation of the tail skin according to the actions, which are to be taken into account, will still permit further ring building. A contact of the tail skin by design must be avoided.

Practical experience and measurements from projects previously executed indicate that the tail skin deformations that occur in practice are normally lower than the estimated ones. So far no confirmed findings are available for a more realistic computational simulation of the deformation behaviour that actually takes place. There is still a need for research to come up with an improved model for the inter-action of subsurface and machine.

In order to ensure that the tail skin, which is sensitive to deformation, is safely dimensioned also in the event of extremely favourable subsurface conditions with low computational loads, it is recommended

that a comparison with previously successfully used material thicknesses is made prior to determining the plate thickness.

In Fig. 1 the applied plate thicknesses for the tail skin for numerous successfully executed projects are presented graphically. The graph does not draw any distinctions in keeping with the given geological and hydrogeological conditions. It serves as an orientation aid and by no means replaces detailed project-related analyses of the prevailing general conditions. The listed range of plate thicknesses for tail skins can be exceeded if necessary but should not be underrun except in founded individual cases.

## 3 Actions

### 3.1 General

The following actions have to be considered for the static analysis of a shield machine:

- deadweight
- radial external actions: earth pressure, water pressure, reaction forces from steering movements
- axial external actions: support pressure in the excavation and if applicable in the working chamber, tool contract pressure at the face, driving thrust forces, trailing load from the back-up units
- further actions: skin friction, reaction forces at the shield edge, reaction forces from the erector during ring installation, reaction forces from the cutting wheel torque, thrusting forces from hydraulic auxiliary cylinders, reaction forces from the brush seal and grease chamber pressure, grouting pressure from subsurface improvement from the shield.

Recognised computational methods have been in existence for quite some time for a number of the actions listed here such as e.g. the support pressure or the skin friction,

der Schildschneide, Reaktionskräfte des Erektors beim Ringbau, Reaktionskräfte aus dem Schneidraddrehmoment, Pressenkräfte von hydraulischen Hilfszylindern, Reaktionskräfte einer Bürstendichtung und Fettkammerdruck, Injektionsdrücke bei Baugrundverbesserung aus dem Schild

Für einige der hier aufgeführten Einwirkungen wie z. B. den Stützdruck oder die Mantelreibung bestehen seit längerem anerkannte Berechnungsverfahren, die bei guter Näherung zur Realität sinnvolle Ergebnisse liefern. Hierzu wird auf die bestehende Fachliteratur verwiesen, z. B. [4] und [5].

Insbesondere jedoch die radialen äußeren Einwirkungen durch den Baugrund werden

in der Praxis vielfach diskutiert. Da diese Einwirkungen einen erheblichen Einfluss auf die Dimensionierung und damit auch auf die Wirtschaftlichkeit einer Schildmaschine haben, wird diese Thematik im Folgenden näher behandelt.

### **3.2 Auswahl des Berechnungsquerschnitts**

Die maßgebenden Berechnungsquerschnitte einer Vortriebsstrecke müssen die ungünstigsten zu erwartenden Einwirkungen sowohl hinsichtlich der Tragfähigkeit als auch hinsichtlich der Auslegung der Vortriebspresenkraft berücksichtigen. Sie sind aus den nachfolgenden Gründen nicht zwangsläufig identisch mit den maßgebenden Berechnungs-

querschnitten, die in der Literatur angegeben sind, sondern welche, die sich aus der Analyse der Einwirkungen ableiten lassen, welche die besten Ergebnisse liefern, welche die besten Näherungen an die Realität liefern. In diesem Zusammenhang wird die bestehende Fachliteratur zitiert, z. B. [4] und [5].

Dennoch, die radialen äußeren Einwirkungen durch den Baugrund sind in der Praxis besonders wichtig. Diese Einwirkungen üben einen erheblichen Einfluss auf die Dimensionierung und in der Folge auf die Wirtschaftlichkeit einer Schildmaschine aus. In diesem Zusammenhang wird die bestehende Fachliteratur zitiert, z. B. [4] und [5].

### **3.2 Choice of Calculation Cross section**

The design cross sections for a tunnel drive must consider the most unfavourable actions that can be expected both with regard to the bearing capacity

and the dimensioning of the driving thrust force. They are not necessarily identical with the design cross sections for the tunnel tubes for the following reasons.

A tunnel tube is dimensioned for one hundred years' serviceability given complete contact with the ground whereas the shield machine is only exposed to the actions exerted by the ground on a temporary basis. The ground only makes contact with the shield skin after a major deformation due to geometrical reasons, which leads to 3-dimensional arching resulting in reduced actions on the machine from the ground.

Generally for a reinforced concrete tunnel tube, the authoritative design section is de-

querschnitten der Tunnelröhre.

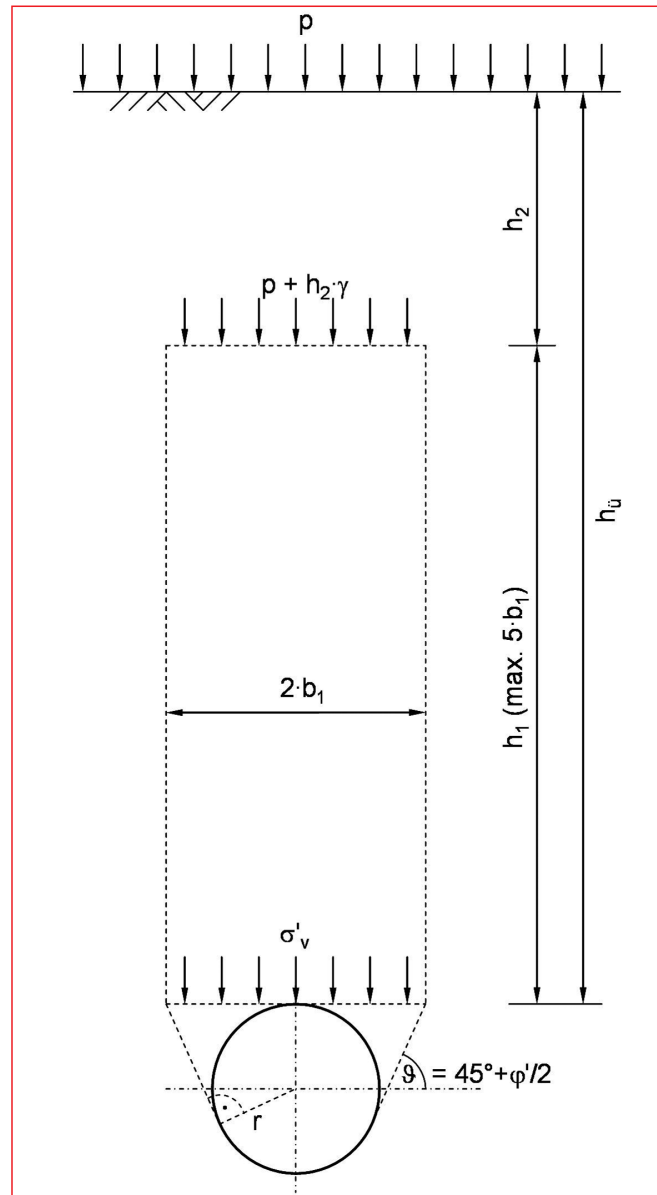
Eine Tunnelröhre wird für einen 100-jährigen Gebrauchslastfall bei vollständigem Kontakt zum Untergrund bemessen, während die Schildmaschine den Einwirkungen aus dem Baugrund nur vorübergehend ausgesetzt ist. Geometrisch bedingt (Überschnitt, Schildkonizität) liegt der Baugrund erst nach erheblicher Verformung am Schildmantel an, wodurch es in der Regel zu einer dreidimensionalen gewölbartigen Spannungumlagerung mit reduzierten Einwirkungen aus dem Baugrund kommt.

Für eine Tunnelröhre aus Stahlbeton ist in der Regel ein Berechnungsquerschnitt maßgebend, bei dem im Bauteil eine relativ hohe Biegebeanspruchung und eine vergleichsweise niedrige Normalkraftbeanspruchung (geringe Überdrückung des Querschnitts) erzeugt werden.

Für die in Stahl ausgeführte Schildmaschine sind dagegen Querschnitte maßgebend, die im Bauteil sowohl eine hohe Biegebeanspruchung als auch eine hohe Normalkraftbeanspruchung hervorrufen.

Für die Bemessung von Bauteilen in der Abbaukammer, z. B. der Druckwand, ist der Berechnungsquerschnitt mit dem maximal auftretenden Stützdruck maßgebend. Zur Auslegung der Vortriebspressenkraft ist die maximale Summe aus Mantelreibung und Stützdruck zu berücksichtigen.

Bei einer großen Anzahl möglicher Berechnungsquerschnitte kann die Zahl der rechnerischen Nachweise für die Schildmaschine durch vergleichende Voruntersuchungen eingegrenzt werden. Maßgebliche Vergleichsparameter aus verschiedenen Schnitten sind dabei die absolute Größe der Belastung aus Erd- und Wasserdruck, die Differenz zwischen Vertikal- und Horizon-



2 Erddrucktheorie mit Silowirkung nach Terzaghi [6, 7]

2 Earth pressure theory with silo effect according to Terzaghi [6, 7]

talbelastung und der zum jeweiligen Schnitt gehörige Bettungsansatz.

### 3.3 Ermittlung der Einwirkungen aus dem Baugrund

Das Auffahren des Hohlraumes führt in der Umgebung des Schildes zu einer Umlagerung der Gebirgsspannungen. Die räumliche Ausdehnung, der zeitliche Ablauf und die Größe der Spannungumlagerung hängen von den Gebirgs-/Bodenkennwerten und hier

finiert durch eine relativ hohe Biegebeanspruchung und eine vergleichsweise niedrige Normalkraftbeanspruchung in der Bauelemente.

As far as the shield machine made of steel is concerned on the other hand, cross sections are authoritative, which cause both a high bending action as well as a high normal force action in the construction element.

For the dimensioning of construction parts in the excavation chamber, e.g. the pressure bulk-

head, the design section with the maximum occurring support pressure is decisive. The maximum total from skin friction and support pressure must be considered for determining the driving thrust force.

For a large number of possible design sections the number of computational calculations of the shield machine can be reduced through comparative preliminary investigations. In this case, the decisive parameters for a comparison of various sections are the absolute magnitude of the load from earth and water pressure, the difference between vertical and horizontal load and the subgrade reaction belonging to a given section.

### 3.3 Determining the Actions from the Subsurface

Driving a tunnel leads to a redistribution of the ground stresses around the shield. The spatial extent, the chronological course and the magnitude of the stress redistribution depend on the rock/soil characteristic values, particularly on the shear parameters, the permeability as well as the ratio of overburden to tunnel diameter. Procedural aspects, as e.g. supporting the face and the excavation side wall as well as geometrical ones such as overcut and shield conicity also exert an influence on the stress redistribution and have to be taken into account for choosing the calculation approach.

#### 3.3.1 Actions in soft Ground Analytical Determination of the Earth Pressure

The vertical earth pressure can be applied in simplified form as a uniform load on the shield machine. In this connection, the stress redistribution in the subsurface can be taken into consideration with an analytical model based on the silo theory.

Terzaghi's analytical method

insbesondere von den Scherparametern, der Durchlässigkeit sowie dem Verhältnis von Überdeckung zu Tunneldurchmesser ab. Verfahrenstechnische Aspekte, z. B. die Stützung der Ortsbrust und der Ausbruchlaibung, aber auch geometrische Aspekte wie Überschnitt und Schildkonizität haben ebenfalls Einfluss auf die Spannungumlagerung und sollten bei der Wahl des Berechnungsansatzes berücksichtigt werden.

### 3.3.1 Einwirkungen im Lockergestein Analytische Ermittlung des Erddrucks

Der vertikale Erddruck kann vereinfacht als gleichförmige Last auf die Schildmaschine

angesetzt werden. Dabei kann die Spannungumlagerung im Baugrund mit einem an die Silotheorie angelehnten Berechnungsmodell berücksichtigt werden.

Als geeignete Abschätzung wird hierfür das analytische Verfahren von Terzaghi [6] (und in [7]) empfohlen (Bild 2).

$$\sigma'_v = \frac{b_1 \cdot \gamma - c'}{k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi'} \cdot \left( 1 - e^{-k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi' \frac{h_1}{b_1}} \right) + \quad (1)$$

$$(p + h_2 \cdot \gamma) \cdot e^{-k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi' \frac{h_1}{b_1}} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{r}{\tan \left( \frac{\vartheta}{2} \right)}$$

[6] (and in [7]) is recommended to provide a suitable approximation (see Fig.2).

$$\sigma'_v = \frac{b_1 \cdot \gamma - c'}{k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi'} \cdot \left( 1 - e^{-k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi' \frac{h_1}{b_1}} \right) + \quad (1)$$

$$(p + h_2 \cdot \gamma) \cdot e^{-k_{\text{sil}} \cdot \tan \varphi' \frac{h_1}{b_1}} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{r}{\tan \left( \frac{\vartheta}{2} \right)}$$

$$\vartheta = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \quad (3)$$

In formulae 1 to 3:

$\sigma'_v$  reduced vertical stress

according to Terzaghi  
 $b_1$  half silo width  
 $h_1$  height, over which according to Terzaghi an arching effect occurs, maximum value is  $5 \cdot b_1$   
 $h_2$  height, over which an arching effect no longer occurs (if  $h_{\bar{u}} \leq 5 \cdot b_1$ , then  $h_1 = h_{\bar{u}}$  and  $h_2 = 0$ ) (if  $h_{\bar{u}} > 5 \cdot b_1$ , then  $h_1 = 5 \cdot b_1$  and  $h_2 = h_{\bar{u}} - h_1$ )  
 $k_{\text{sil}}$  lateral pressure coefficient in the silo (according to [8] and [9]  $k_{\text{sil}} = 0,8$  is recommended)  
 $\varphi'$  angle of friction of the drained soil  
 $c'$  unit weight of the soil  
 $\gamma$  (above groundwater  $\gamma$ , beneath  $\gamma'$ )  
 $p$  surface load  
 The reduction of the vertical

$$\vartheta = 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \quad (3)$$

In den Formeln 1 bis 3 bedeuten:

$\sigma'_v$  abgeminderte Vertikalspannung nach Terzaghi

$b_1$  halbe Silobreite

$h_1$  Höhe, über die gem. Terzaghi eine Gewölbewirkung auftritt, Maximalwert ist  $5 \cdot b_1$

$h_2$  Höhe, über die es zu keiner Gewölbewirkung mehr kommt

(Wenn  $h_{\bar{u}} \leq 5 \cdot b_1$ , dann  $h_1 = h_{\bar{u}}$  und  $h_2 = 0$ )

(Wenn  $h_{\bar{u}} > 5 \cdot b_1$ , dann  $h_1 = 5 \cdot b_1$  und  $h_2 = h_{\bar{u}} - h_1$ )

$K_{\text{Silo}}$  Seitendruckbeiwert im Silo (nach [8] und [9] wird  $K_{\text{Silo}} = 0,8$  empfohlen)

$\varphi'$  Reibungswinkel des dränierten Bodens

$c'$  Kohäsion des dränierten Bodens

$\gamma$  Wichte des Bodens (oberhalb Grundwasser  $\gamma$ , unterhalb  $\gamma'$ )

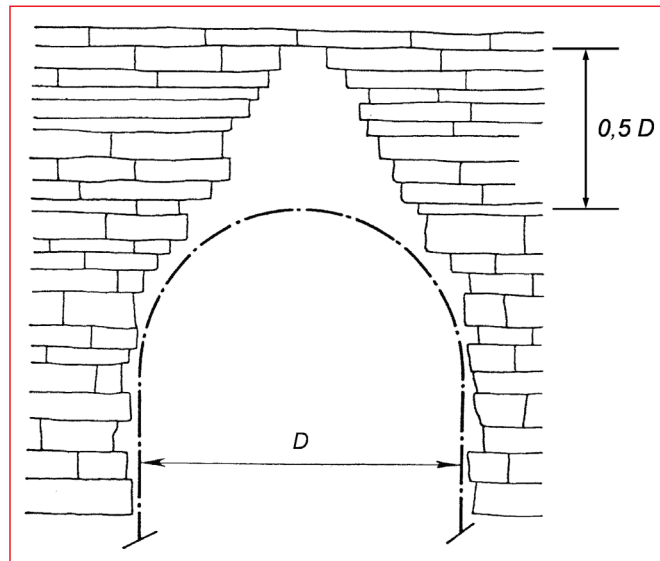
$p$  Oberflächenlast

Die Abminderung des vertikalen Erddrucks darf erst ab einer Überdeckung von mehr als einem Tunneldurchmesser ( $h_{\bar{u}} > D$ ) angewendet werden. Bei geringerer Überdeckung ( $h_{\bar{u}} \leq D$ ) ist die volle Auflast aus der Überlagerung anzusetzen.

Ein weiterer anerkannter Ansatz zur analytischen Berücksichtigung der Gewölbewirkung wurde von Houska [10] aufgestellt.

Der horizontale Erddruck auf die Schildmaschine  $\sigma'_h$  kann ebenfalls als konstante Flächenlast angesetzt werden. Er kann in Anlehnung an [7] und [10] auf Höhe der Schildachse wie folgt ermittelt werden:

$$\sigma'_h = ((h_{\bar{u}} + r) \cdot \gamma + p) \cdot \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) - 2 \cdot c' \cdot \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (4)$$



3 Ausmaß des wahrscheinlich größten Nachbruchs über einem ungestützten Hohlraum bei waagerechter Schichtung [7]

3 Extent of the probably largest break above an unsupported cavity given horizontal strata [7]

In bindigen Böden kann der Erddruck auf eine Schildmaschine unter Berücksichtigung der Vortriebsgeschwindigkeit und der gegebenen Entwässerungsmöglichkeiten für den undrinierten Zustand ermittelt werden. Dabei ist die Wichte des wassergesättigten Bodens zu berücksichtigen (kein Auftrieb). Besteht dagegen auf Grund einer langsamen Schildfahrt, eines Vortriebsstillstands oder der Durchlässigkeit der bindigen Böden die Möglichkeit zur Entwässerung, so ist der Erddruck für dränierte Bedingungen zu wählen.

Tangentiale Lastanteile der Erddrücke können wegen der geringen Reibung zwischen Baugrund und Schildmantel vernachlässigt werden. Dementsprechend wird für das Berechnungsmodell auch keine tangentielle Bettung angesetzt (vgl. Kapitel 4).

#### Numerische Ermittlung des Erddrucks mit einem Kontinuumsmodell

In Einzelfällen, z. B. bei großen Tiefenlagen, kann die Ermittlung der Einwirkungen aus

earth pressure may first be applied given an overburden in excess of one tunnel diameter ( $h_{\bar{u}} > D$ ). In the event of shallower overburden ( $h_{\bar{u}} \leq D$ ) the full load from the overburden should be applied.

A further recognised approach for the analytical consideration of the arching effect was established by Houska [10].

The horizontal earth pressure from the shield machine  $\sigma'_h$  can also be applied as a constant specific load. It can be determined as follows at the height of the shield axis based on [7] and [10]:

$$\sigma'_h = ((h_{\bar{u}} + r) \cdot \gamma + p) \cdot \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) - 2 \cdot c' \cdot \tan \left( 45^\circ - \frac{\varphi'}{2} \right) \quad (4)$$

In cohesive soils, the earth pressure on a shield machine can be established for the undrained state taking the rate of progress and the given drainage possibilities into consideration. In this connection, the unit weight of the water-saturated soil has to be taken into account (no uplift). However,

er, should there be an opportunity for drainage on account of a slow shield passage, a hold-up in driving or the permeability of the cohesive soil then the earth pressure for drained conditions should be selected.

Tangential load proportions of the earth pressures can be neglected on account of the low friction between the subsurface and the shield skin. As a result, no tangential bedding is applied for the analytical model (please see Ch. 4).

#### Numerical Determining of the Earth Pressure with a Continuum Model

In individual cases, e.g. given major depths, it may be advisable to establish the actions from the subsurface with the aid of a numerical continuum model. Should no 3-D numerical modelling of the overall system machine-subsurface be performed according to Ch. 4.2 on account of the computing capacity then the load can alternatively be determined by means of a 2-D calculation with a rigid circular ring as a simplified machine model. For a follow-up calculation with a bedded shell model according to Ch. 4.1, the actions thus determined can be converted into vertical and horizontal uniformly distributed loads.

The load from the subsurface on the simplified machine model depends to a great extent on the simulated preliminary tension release of the ground in the machine cross section. The application of the contraction method is recommended here, in the case of which based on the primary state a loss of volume in the tunnel cross section (loss of ground) is simulated before the installation of the shell elements for the shield machine are undertaken in the next analytical step. The amount of volume loss can be determined

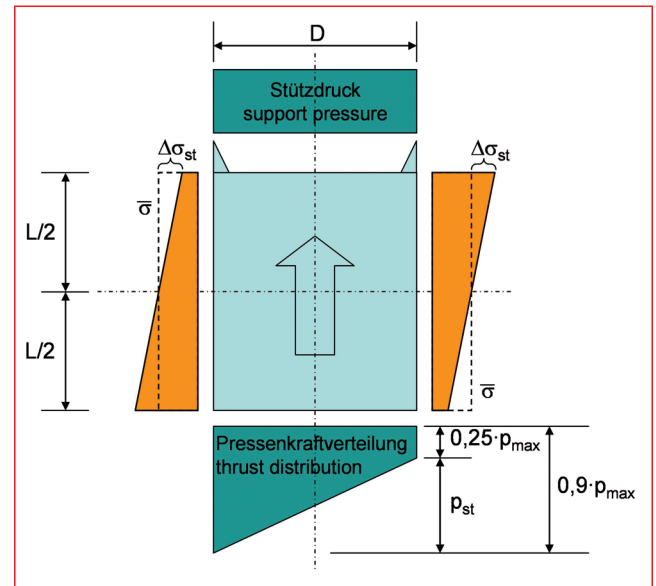
dem Baugrund mithilfe eines numerischen Kontinuumsmodells sinnvoll sein. Soll aus Gründen der Rechenkapazität keine numerische Modellierung des räumlichen Gesamtsystems Maschine – Baugrund nach Kapitel 4.2 erfolgen, so kann die Belastung ersatzweise in einer ebenen Finite-Elemente-Berechnung mit einem starren Kreisring als vereinfachtes Maschinenmodell ermittelt werden. Für eine darauf folgende Berechnung mit einem gebetteten Schalenmodell nach Kapitel 4.1 dürfen die so ermittelten Einwirkungen in vertikale und horizontale Ersatzflächenlasten umgerechnet werden.

Die Belastung aus dem Baugrund auf das vereinfachte Maschinenmodell ist stark abhän-

gig von der simulierten Vorentspannung des Baugrunds im Querschnitt der Maschine. Hier wird die Anwendung des Kontraktionsverfahrens empfohlen, bei dem ausgehend vom Primärzustand ein Volumenverlust des Baugrunds im Tunnelquerschnitt („Loss of ground“) simuliert wird, bevor im nächsten Berechnungsschritt der Einbau der Schalenelemente der Schildmaschine erfolgt. Der Betrag des Volumenverlustes kann aus dem Flächenanteil von Überschnitt und Konizität an der gesamten Ausbruchfläche bestimmt werden.

### 3.3.2 Einwirkungen im Festgestein

Einwirkungen im Festgestein werden neben der Tiefen-



4 Schematische Darstellung der Beanspruchungen bei der Kurvenfahrt

4 Schematic drawing of the stresses during the curve passage



lage des Tunnels und verfahrensspezifischen Parametern erheblich von den unterschiedlichen geologischen Verhältnissen beeinflusst. Die Lastannahmen sind daher entsprechend den Aussagen des geotechnischen Gutachtens projektspezifisch festzulegen. Dabei sollte das zeitabhängige Spannungs-Verformungs-Verhalten des Gebirges berücksichtigt werden.

Ziel der geometrischen Festlegung des Überschchnitts und der Konizität ist es, die Belastung der Schildmaschine im Festgestein so gering wie möglich zu halten und nach Möglichkeit vollständig zu vermeiden.

Bei längeren Stillständen müssen ggf. Zusatzmaßnahmen ergriffen werden, um ein Einklemmen und eine Überlastung der Schildmaschine zu verhindern.

Beim Vortrieb in horizontal geschichtetem Gebirge mit der Gefahr von „Sargdeckelbildung“ (Ausbildung eines Bruchkörpers entlang der Schicht- und Klufflächen im Firstbereich) muss als Zusatzlastfall eine schlaffe Auflast auf den Schildmantel berücksichtigt werden.

Die vertikale Auflast infolge dieses Bruchkörpers (vgl. Bild 3) sollte mindestens zu

$$\sigma_v = 0,5 \cdot D \cdot \gamma_{\text{Fels}} \quad (5)$$

und die horizontale Belastung zu  $\sigma_h = 0$  (6) angesetzt werden.

### 3.3.3 Einwirkung aus Grundwasser

Der Druck des Grundwassers ist beim Vortrieb in durchlässigen Böden mit geschlossenen Schildmaschinen (Flüssigkeitsschild, Erddruckschild) grundsätzlich dem maximalen Bauwasserstand entsprechend anzusetzen.

In standfestem Gebirge mit geringer Wasserdurchlässigkeit kann eine Dränung erfolgen, wenn dies zulässig ist. Für

die statische Berechnung der Schildmaschine kann in diesem Fall von einer teilweisen oder auch vollständigen Dränung ausgegangen werden. Mögliche Strömungsdrücke sind dabei gesondert zu beachten. Dies gilt auch für einen Maschinenstillstand ohne Aushubförderung, wenn das Grund- oder Bergwasser mit entsprechen-

from the proportion of overcut and conicity related to the total excavated area.

### 3.3.2 Actions in solid Rock

Actions in solid rock are substantially influenced by the different geological conditions in addition to the tunnel's depth. The load assumptions are consequently to be determined for

the project in question based on the statements contained in the geotechnical expertise. In this process, the rock's time-related stress-deformation ratio has to be taken into account.

The aim of establishing the overcut and the conicity in geometric terms is to ensure that the shield machine is affected by load in solid rock as minimal-

Tabelle 3: Zusammenhänge zwischen Lagerungsdichte, Seitendruckbeiwert und Steifemodul bei nicht bindigen Böden für den Vorentwurf von Schildmaschinen

Table 3: Interrelationships between bulk density, lateral pressure coefficient and stiffness module for non-binding soils for the preliminary draft of shield machines

Lagerung Density	Lagerungsdichte D Relative density D [-]	Seitendruckbeiwert k Lateral pressure coefficient k [-]	Steifemodul E <sub>s</sub> Stiffness modulus E <sub>s</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	Wichte γ unit weight γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte γ' unit weight γ' [kN/m <sup>3</sup> ]	Reibungswinkel φ' Angle of friction φ' [°]
locker/soft	0.15 ... 0.30	0.5 -0.6	15- 25	18	10	30.0
mitteldicht medium dense	0.30 ... 0.50	0.35-0.5	25- 50	19	11	32.5
dicht/dense	0.50 ... 0.80	0.3 -0.45	50-100	19	11	35.0

Tabelle 4: Zusammenhänge zwischen Konsistenz, undrännierter Scherfestigkeit, Seitendruckbeiwert und Steifemodul bei normal konsolidierten bindigen Böden für den Vorentwurf von Schildmaschinen

Table 4: Interrelationships between consistency, undrained shear strength, lateral pressure coefficient and stiffness module for normally consolidated binding soils for the preliminary draft of shield machines

Konsistenz Consistency	Undrännierte Scherfestigkeit c <sub>u</sub> Undrained shear strength c <sub>u</sub> [kN/m <sup>2</sup> ]	Seitendruckbeiwert k Lateral pressure coefficient k [-]	Steifemodul E <sub>s</sub> Stiffness modulus E <sub>s</sub> [MN/m <sup>2</sup> ]	Wichte γ unit weight γ [kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte γ' unit weight γ' [kN/m <sup>3</sup> ]	Reibungswinkel φ' Angle of friction φ' [°]	Kohäsion c' Cohesion c' [kN/m <sup>2</sup> ]
breiig/pappy	< 25	0.7-1.0	1- 5	17	7	15.0	5
weich/soft	25 ... 60	0.5-0.8	5-10	18	8	20.0	5
steif/stiff	60 ... 150	0.4-0.6	10-20	19	9	25.0	10
halbfest semi-solid	150 ... 300	0.3-0.5	15-30	20	10	27.5	15
fest/solid	> 300	0.2-0.4	25-50	22	12	30.0	20

Tabelle 5: Zusammenhang zwischen Festigkeitsbezeichnung, Gesteinsdruckfestigkeit, Seitendruckbeiwert und Steifemodul des Gebirges für den Vorentwurf von Schildmaschinen bei mittlerem Durchtrennungsgrad und nicht druckhaftem Gebirge

Table 5: Interrelationship between strength description, rock compressive strength, lateral pressure coefficient and stiffness module of the rock for the preliminary draft for shield machines given average degree of separation and non-squeezing ground

Bezeichnung der Festigkeit Description of the Strength	Einaxiale Druckfestigkeit Uni-axial compressive strength [MN/m <sup>2</sup> ]	Seitendruckbeiwert Lateral pressure coefficient [-]	Steifemodul Stiffness modulus [MN/m <sup>2</sup> ]
gering/low <sup>1</sup>	< 15	0.3-0.5	40-150
fest/solid	> 50	0.2-0.3	> 100

1) Manche sehr weiche Gesteine verhalten sich wie Lockergestein und sollten daher auch als solches beschrieben werden.

1) Some extremely soft rocks act like soft ground and should thus be described as such.

der Kapazität aus der Abbaukammer abgepumpt werden kann.

Die Berücksichtigung der Möglichkeit einer teilweisen oder vollständigen Dränung erfordert eine Abstimmung mit einem im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen.

### 3.3.4 Einwirkungen aus Bebauung und Verkehr

Einwirkungen auf eine Schildmaschine aus Bebauung und Verkehr müssen innerhalb ihrer jeweiligen Lastausbreitungsbereiche berücksichtigt werden. Liegt eine Fundament- oder Verkehrslast dabei nicht zentrisch über dem aufzufahrenden Tunnel, so können sich daraus in einzelnen

Fällen auch asymmetrische Belastungen ergeben. Nach Abstimmung mit einem geotechnischen Sachverständigen dürfen diese auf Grund der Spannungs- und Umlagerungsmöglichkeiten im Bereich einer Schildmaschine in symmetrische Einwirkungen umgerechnet werden, wenn sie das ursprüngliche Lastbild auf konservative Weise berücksichtigen.

### 3.3.5 Abschätzung der Einwirkungen aus unplanmäßigen Steuerbewegungen

Grundsätzlich ist das Auftreten von Kurvenzwängungen bei planmäßiger Kurvenfahrt und den dazugehörigen Steuerbewegungen durch eine geeignete geometrische Auslegung der Schildmaschine (Über-

ly as possible and to avoid it completely if at all feasible.

Should there be lengthier standstills then additional measures may have to be undertaken in order to prevent the shield machine becoming jammed or overloaded.

During excavations in horizontally layered rock with the danger of "coffin lid formation" (forming of a broken layer along the fissured and layered rocks in the roof zone) an additional load on the shield skin has to be considered.

The vertical load resulting from this broken layer (please see Fig. 3) should be at least applied as

$$\sigma_v = 0.5 \cdot D \cdot \gamma_{\text{rock}} \quad (5)$$

$$\text{and the horizontal load as } \sigma_h = 0 \quad (6)$$

### 3.3.3 Actions from Groundwater

During a drive through permeable soils with closed shield machines (e.g. hydro or bentonite shields, EPB shield) the maximum construction water level should essentially be applied for the groundwater pressure.

In stable rock with low water permeability drainage may be undertaken providing this is permissible. For the shield machine's static analysis in this case, partial or also complete drainage can be presupposed. Possible flow pressures must be observed separately in this connection. This also applies to a machine at a standstill without any material being removed if the groundwater and under-

schnitt, Schneidradkinematik, Konizität) zu vermeiden. Dies gilt insbesondere für Schildmaschinen ohne Schildschwanzgelenk.

Auf Grund von Bedienungsfehlern oder in anderen unplanmäßigen Betriebsituationen können auch bei korrekter geometrischer Auslegung zusätzliche Belastungen des Schildmantels entstehen, die beim Tragsicherheitsnachweis zu berücksichtigen sind. Sie stellen außergewöhnliche, nur kurzzeitig wirkende Einwirkungen dar, für die kein Gebrauchstauglichkeitsnachweis erforderlich ist.

Bei Schildmaschinen mit Schildschwanzgelenk trifft die nachfolgend beschriebene Reaktionsspannung auf Grund unplanmäßiger Kurvenfahrt ausschließlich für den Schneiden- und Mittelschuss und nicht für den Schildschwanz zu.

Für die Kurvenfahrt bei einer unplanmäßigen Steuerbewegung wird folgendes Szenario zu Grunde gelegt: Bei Schildmaschinen ohne aktives Steuergelenk werden Lenkbewegungen dadurch eingeleitet, dass die Hauptvortriebspresen mit unterschiedlichen Drücken beaufschlagt werden. Dabei werden die Pressen auf der Kurveninnenseite in der Praxis mit einem Minimaldruck von ca. 25 % der maximal installierten Pressenkraft beaufschlagt, um ein Öffnen der Tübbingringfugen zu verhindern. Auf der Kurvenaußenseite werden die Pressen mit etwa 90 % der maximal installierten Pressenkraft beaufschlagt. Dazwischen kann über den Querschnitt eine lineare Pressenkraftverteilung angenommen werden.

Bei tief liegenden Vortrieben mit hohem Stützdruck kann der geringste Pressendruck auf der Kurveninnenseite möglicherweise auch höher als 25 % liegen, wodurch das

mögliche Kurvenmoment auch geringer ausfallen kann.

Der Stützdruck und die Reibungskräfte am Maschinenmantel können als symmetrische Einwirkungen angesetzt werden. Sie führen zwar zu erhöhten Pressenkräften in der Sohle, sind aber für eine horizontale Drehmomentbetrachtung nicht relevant, da sie keinen horizontalen Hebelarm zur Schildachse aufweisen.

Der von der linearen Pressendruckverteilung effektiv für die Steuerbewegung verbleibende Anteil  $p_{st}$  ergibt sich gemäß Bild 4 aus der Differenz des betrieblich maximalen und minimalen Pressendrucks. Das Kurvendrehmoment  $M_{st}$  errechnet sich aus  $p_{st}$  und dem Radius des Vortriebspresenkreises  $r'$  zu:

$$M_{st} = 1/2 \cdot p_{st} \cdot r'^2 \cdot \pi \quad (7)$$

Das Reaktionsmoment  $M_r$  resultiert aus einer linear veränderlichen Erddruckverteilung gemäß Bild 4. Der Mittelwert  $\bar{\sigma}$  entspricht dabei dem nach Kap. 3 ermittelten Erddruck.

$$M_r = 1/3 \cdot \Delta\sigma_{st} \cdot L^2 \cdot D \quad (8)$$

Durch Gleichsetzen der beiden Momente  $M_{st}$  (7) und  $M_r$  (8) ergibt sich die Einwirkung aus dem Erdwiderstand zu:

$$\Delta\sigma_{st} = \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot p_{st} \cdot \frac{r'^2}{L^2} \cdot \frac{1}{D} \quad (9)$$

#### Beispiel

$D = 6,60 \text{ m}$

12 Vortriebspresen mit je

$150 \text{ t} = 1800 \text{ t} = 18\,000 \text{ kN}$

Für den lfd. m Mantelumfang:

$$p_{max} = 18\,000 \text{ kN} / (6,6 \text{ m} \cdot \pi) = 868 \text{ kN/m}$$

$$p_{st} = (0,90 - 0,25) \cdot p_{max} = 564 \text{ kN/m}$$

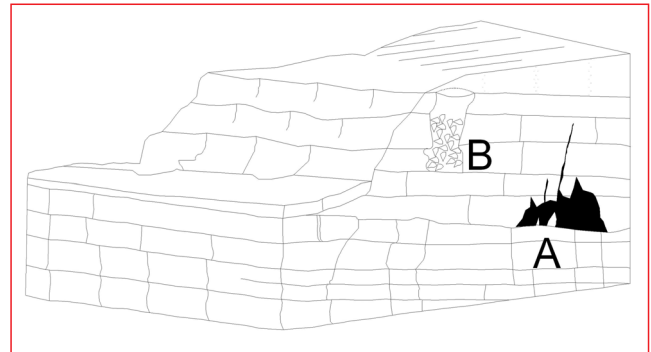
$r' = 3,00 \text{ m}$

$L = 6,20 \text{ m}$

$$\Delta\sigma_{st} = 1,5 \cdot \pi \cdot (6,0/6,2)^2 \cdot 564 \cdot 1/6,6 = 94 \text{ kN/m}^2$$

#### 3.4 Baugrundkennwerte für den Vorentwurf

Für den Vorentwurf von Schildmaschinen können die in



5 Karstgebirge

5 Karst rock

ground water can be pumped from the extraction chamber with corresponding capacity.

Any consideration of the possibility of partial or complete drainage requires consultation with a geotechnical expert, who is experienced in tunnelling.

#### 3.3.4 Actions imposed by Structures and Traffic

Actions imposed by structures and traffic on a shield machine have to be considered within their given load distribution range. Should a foundation or traffic load not be located centrally above the tunnel being excavated, then asymmetrical loads can be the outcome in individual cases. Following consultation with a geotechnical expert these can be converted to symmetrical actions on the basis of the relief and redistribution possibilities around a shield machine, if the original load case is considered in a conservative manner.

#### 3.3.5 Estimating the Actions deriving from unscheduled Steering Movements

Basically the occurrence of curve constraints given scheduled curve passage and the relevant steering movements through a suitable geometrical shield machine design (overcut, cutting wheel kinematics, conicity) must be avoided. This applies especially for shield ma-

chines without tail skin articulation.

Due to operational errors or in other unscheduled operating situations additional loads can be imposed on the shield skin even given correct geometrical design, which must be considered for bearing capacity verification. They represent out of the ordinary actions that act only for a short period, for which proof of serviceability is not needed.

In the case of shield machines with tail skin articulation the following reaction stress owing to an unscheduled curve passage that is described applies solely to the front and middle sections of a shield machine and not to the tail skin.

The following scenario is taken as a basis for the curve passage in the event of an unscheduled steering movement: in the case of shield machines without an active articulation, steering movements are initiated by activating the jacks with varying pressures. In this way, the jacks on the inner side of the curve are activated in practice with roughly 25 % of the maximum installed thrust in order to prevent the segmental ring joint from opening. On the outer side of the curve the jacks are activated with around 90 % of the maximum installed thrust. Between these a linear thrust distribution can be assumed over the cross section.

den Tabellen 3 bis 5 angegebenen geotechnischen Kenngrößen angesetzt werden.

Die aufgeführten Seitendruckbeiwerte geben die Bandbreite wieder, die sich unter Berücksichtigung der unterschiedlichen aktivierten Scherfestigkeiten einstellt.

Die hier für einen Vorentwurf empfohlenen Kenngrößen können und dürfen die im Ausführungsfall erforderlichen Baugrunduntersuchungen und Bewertungen durch einen im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen nicht ersetzen.

In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass das Verhältnis von Horizontal- zu Vertikalspannung, ausgedrückt durch den Seitendruckbeiwert  $k$ , im Einklang mit den mechanischen Eigenschaften (Scherfestigkeit und Zusammendrückbarkeit) des Baugrunds stehen muss.

### 3.5 Einwirkungen in Sondersituationen

Zusätzlich zu den o. g. Regeleinwirkungen sind bei der Berechnung von Schildmaschinen in Einzelfällen auch Sondersituationen zu berücksichtigen. Diese können im Rahmen der vorliegenden Empfehlungen nur allgemein behandelt werden, da sie stark von den jeweiligen örtlichen Gegebenheiten abhängen. Zutreffende Berechnungsvorgaben können in der Regel nur unter Einbeziehung von im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen gefunden werden.

#### 3.5.1 Eng liegende Tunnelröhren

Bei parallel verlaufenden Tunnelröhren im Lockergestein mit einem lichten Abstand von mindestens einem Tunneldurchmesser kann die gegenseitige Beeinflussung der Schildvortriebe vernachlässigt werden.

In the case of deep-lying drives with high support pressure the slightest thrusting pressure on the inner side of the curve can possibly also be higher than 25 %, as a result of which the possible curve moment can also be lower.

The support force and frictional forces on the machine skin can be assumed to be symmetrical actions. They admittedly lead to increased thrusting forces in the invert but are not relevant for horizontal torque consideration as they do not possess any horizontal lever arm to the shield axis.

The remaining amount  $p_{st}$  from the linear thrusting pressure distribution that is effective for the steering movement results according to Fig. 4 from the difference between the operational maximum and minimum thrust. The curve torque  $M_{st}$  is calculated from  $p_{st}$  and the radius of the driving jack circle  $r'$  as:

$$M_{st} = 1/2 \cdot p_{st} \cdot r'^2 \cdot \pi \quad (7)$$

The reaction moment  $M_r$  results from a linearly changing earth pressure distribution according to Fig. 4. The average value  $\bar{\sigma}$  in this case corresponds to the earth pressure calculated according to Ch. 3.

$$M_r = 1/3 \cdot \Delta\sigma_{st} \cdot L^2 \cdot D \quad (8)$$

The action of the earth resistance results from equating the two moments  $M_{st}$  (7) and  $M_r$  (8) to:

$$\Delta\sigma_{st} = \frac{3}{2} \cdot \pi \cdot p_{st} \cdot \frac{r'^2}{L^2} \cdot \frac{1}{D} \quad (9)$$

#### Example

$D = 6,60 \text{ m}$

12 driving jacks each of 150 t =

1800 t = 18 000 kN

Loads per circumferential

running metre:

$$p_{max} = 18\,000 \text{ kN} / (6,6 \text{ m} \cdot \pi) =$$

868 kN/m

$$p_{st} = (0,90 - 0,25) \cdot p_{max} =$$

564 kN/m

$r' = 3,00 \text{ m}$

$L = 6,20 \text{ m}$

Bei geringerem Abstand ist zu untersuchen, ob die Änderung des Spannungszustands im Baugrund infolge der Herstellung der ersten Röhre beim darauf folgenden Vortrieb der zweiten Röhre eine maßgebliche Veränderung des Erd-drucks auf die Schildmaschine hervorrufen kann. Diese Veränderung des Erd-drucks kann mithilfe einer Berechnung nach der Methode der Finiten Elemente für den ebenen Verformungszustand abgeschätzt werden. Ein geringer Abstand bei Start- und Zielbauwerken ist wegen der vergleichsweise geringen Tiefenlage und der vielfach durchgeführten Baugrundverbesserungen in der Regel nicht maßgebend.

### 3.5.2 Seitliche Abgrabungen

Bei der Bemessung der Tübbingauskleidung haben mögliche Abgrabungen über oder seitlich neben der Tunnelröhre vielfach einen maßgeblichen Einfluss. Bei der Bemessung einer Schildmaschine ist ihre Berücksichtigung nicht erforderlich, wenn Abgrabungen während der Vorbeifahrt der Schildmaschine ausgeschlossen werden können.

### 3.5.3 Quellfähiges Gebirge

Schildmaschinen sind beim Regelvortrieb nicht durch Quelleffekte des umgebenden Gebirges gefährdet. Die Quellvorgänge in tonigem oder in anhydritartigem Gebirge wirken sich erst bei längeren Stillstandszeiten der Vortriebsanlage aus. Daher dürfen längere Vortriebsstopps (ab ca. 14 Kalendertagen) nicht planmäßig vorgesehen werden. Ein Nachweis des Maschinenmantels auf Quelldruck kann damit entfallen.

Kommt ein Vortrieb in potenziell quellfähigem Gebirge für einen längeren Zeitraum zum Stillstand, so müssen Zusatzmaßnahmen zur Verhinderung der Gebirgsverformungen oder zur Aufnahme der Mehrbelastung der Schildmaschine ergriffen werden. Diese sind den örtlichen Verhältnissen anzupassen. Infrage kommen beispielsweise:

- Füllen des Spaltes zwischen Schildmantel und Gebirge mit PU-Schaum
- Aussteifen der Schildmaschine
- Ausbrechen einer Kaverne um die Schildmaschine

$$\Delta\sigma_{st} = 1,5 \cdot \pi \cdot (6,0/6,2)^2 \cdot 564 \cdot 1/6,6 = 94 \text{ kN/m}^2$$

### 3.4 Subsurface Characteristic Values for a preliminary design

The geotechnical parameters provided in tables 3 to 5 can be applied to the shield machines' preliminary design. The listed lateral pressure coefficients relate to the existing spectrum taking the different activated shear strengths into consideration.

The parameters recommended here for a preliminary design cannot and should not replace the necessary geotechnical investigations and evaluations undertaken by a geotechnical expert experienced in tunnelling.

In this connection, it is pointed out that the ratio of horizontal to vertical stress, expressed by the lateral pressure coefficient  $k$ , must be in harmony with the mechanical properties (shear strength and compressibility) of the ground.

### 3.5 Actions in special Situations

Special situations also have to be taken into account for cal-

culating shield machines in individual cases in addition to the above mentioned standard actions. These can only be dealt with generally within the framework of the existing recommendations, as they depend to a large extent on the local conditions. Generally speaking appropriate parameters for analysis can only be obtained through consulting a geotechnical expert experienced in tunnelling.

### 3.5.1 Narrow-spaced Tunnel Tubes

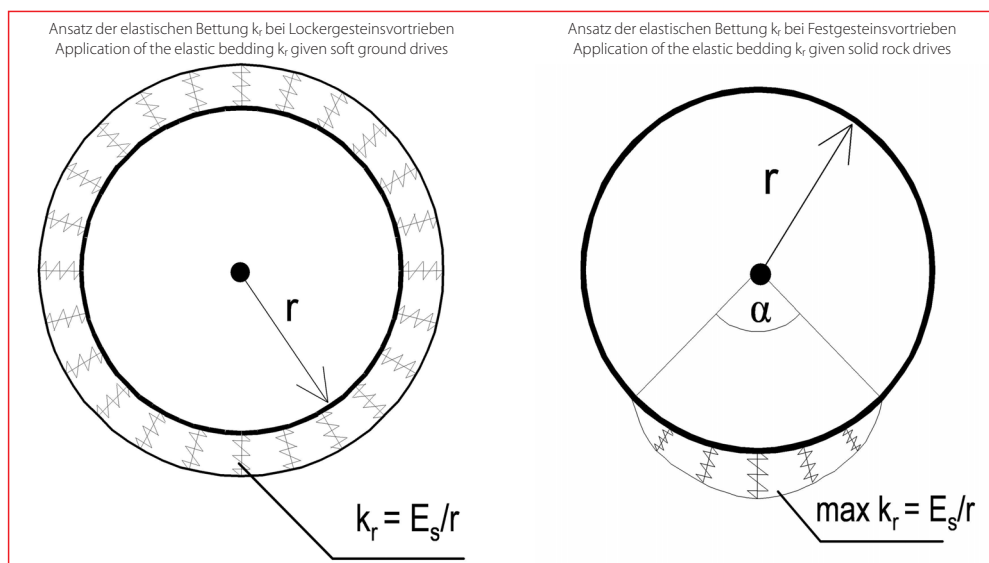
In the case of tunnel tubes running parallel in soft ground set less than 1 tunnel diameter apart, the mutual influence of the shield drives can be neglected. If the gap is less, the question of whether the change in the stress states in the subsurface caused by the first tube can result in the earth pressure exerting a decisive influence on the shield machine during the subsequent excavation of the second tube. This change in earth pressure can be worked out in a two-dimensional numerical analysis. A narrow space in the case of start and target structures is in many cases not decisive on account of the comparatively shallow depth and the many ground improvements, which are usually undertaken.

### 3.5.2 Lateral Excavations

In many cases, possible excavations above or at the side of the tunnel tube exert a considerable influence when it comes to dimensioning the tunnel lining. Their influence does not have to be taken into account when dimensioning a shield machine if such excavations can be excluded during the shield machine's passage.

### 3.5.3 Swelling Ground

Shield machines are not jeopardised by any swelling effect of the surrounding rock



6 Ansatz der elastischen Bettung (Bettungsfedern bei Zugbelastung unwirksam)

6 Application of the elastic bedding (bedding springs ineffective given tensile load)

### 3.5.4 Verkarstetes Gebirge

Durch das Anfahren von Karsthohlräumen im Festgestein (z. B. A im Bild 5) können ungleichmäßige Auflagerungen der Schildmaschine eintreten, die in Abhängigkeit von der prognostizierten Hohlraumgröße und der Größe der Schildmaschine gesondert untersucht werden müssen.

Dabei darf berücksichtigt werden, dass die Belastung des Schildmantels im Festgestein in der Regel gering ist und dass das statische System einer Schildmaschine bereits auf eine Teilflächenlagerung (z. B. auf der Schildwiege) ausgelegt ist.

Muss mit Karsthohlräumen gerechnet werden, die mit Lockermaterial verfüllt und Wasser führend sind (z. B. Doline B im Bild 5), dann sind entsprechende Lockergesteinsdrücke auf die Schildmaschine zu berücksichtigen. Hierbei darf eine Silowirkung gemäß Kapitel 3.3.1 berücksichtigt werden.

## 4 Berechnungsmodelle

Die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit von Schildmaschinen für den Vortrieb begehbarer Tunnelquerschnitte werden mithilfe von räumlichen numerischen Berechnungsmodellen nachgewiesen. Dabei wird die Vortriebsmaschine als räumliches Schalentragsystem abgebildet, das die tragenden Teile der Maschinenstruktur möglichst wirklichkeitsgetreu beschreibt.

Für die Simulation der Interaktion zwischen dem Baugrund und der Maschine stehen zwei Methoden zur Verfügung:

- Belastung durch Flächenlasten und elastische Bettung mithilfe von Federelementen
- Simulation des Baugrunds als Kontinuum unter Verwendung besonderer Kontaktelemente am Übergang zwischen Baugrund und Maschine

during standard operation. Swelling processes in clayey or anhydrite rock first have an effect in the case of lengthy standstill periods of the tunnelling installation. As a result, lengthier breaks in driving (as from roughly 14 calendar days) must not be scheduled by design. Consequently there is no need for verification of the machine skin as far as swelling pressure is concerned.

Should a drive be held up for a lengthier period in potentially swelling ground then auxiliary measures have to be taken to prevent the rock deformations or to accept the additional load of the shield machine. These must be adapted to the local conditions. Possibilities include for instance:

- filling the gap between the shield skin and rock with PU foam
- bracing the shield machine
- excavating a chamber around the shield machine

### 3.5.4 Karstified Ground

Non-uniform bedding of the shield machine can occur through encountering karst cavities in solid rock (e.g. A in Fig.5), which must be investigated with respect to the forecast size of cavity and the size of the shield machine.

It should be taken into consideration that the shield skin load in solid rock normally is low and the static system of a shield machine is designed to be borne on a partial surface area (e.g. on the shield cradle).

Should karst cavities be anticipated, which are filled with soft ground and carry water, (e.g. doline B in Fig. 5) then corresponding soft ground pressures on the shield machine have to be considered. In this connection, a silo effect in keeping with Ch. 3.3.1 may be taken into account.

#### 4.1 Schalenmodell mit elastischer Bettung

Ein vielfach verwendetes Modell zur Simulation der komplexen Interaktionen zwischen Schildmaschine und Baugrund ist eine elastische Bettung der äußeren Schildmantelfläche mit radialen Federelementen. Die Übertragung von Zugkräften ist bei der Simulation der elastischen Bettung über entsprechende Federgesetze auszuschließen. Eine tangentielle Bettung wird den Verhältnissen in der Praxis entsprechend nicht angesetzt.

Die Bettungsziffern  $k_r$  der radialen Federn können, sofern nicht explizit durch einen im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen vorgegeben, näherungsweise mit der folgenden Gleichung abgeschätzt werden:

$$k_r = \frac{E_s}{r} \quad (10)$$

mit  
 $E_s$  Steifemodul des umgebenden Baugrunds  
 $r$  Systemradius des Schildmantels

Die Verteilung der Federelemente über den Schildumfang wird von den Eigenschaften des zu durchfahrenden Baugrunds gekennzeichnet:

Bei Lockergesteinsvortrieben kann die radiale Bettung – unter Voraussetzung der Zugkraftausschaltung – umlaufend über die Mantelfläche in Ansatz gebracht werden. Die Bettungsziffer  $k_r$  kann dabei konstant oder auch dem Baugrund entsprechend veränderlich angesetzt werden.

Im Fall geringer Baugrundüberdeckungen sind möglicherweise im Firstbereich auftretende Federreaktionen auf ihre Plausibilität zu überprüfen und die Bettungsziffern entsprechend abzumindern.

Im Festgestein wird die radiale Bettung lediglich über einen Sektorbereich angesetzt

(Bild 6). Die Größe des Sohlsektors ist von der Gesteinsfestigkeit abhängig und sollte in Abstimmung mit einem im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen festgelegt werden. Für den Vorentwurf kann die Größe des Sohlsektors zu  $\alpha = 90^\circ$  angenommen werden. Sie kann auch durch Vergleichsberechnungen unter Berücksichtigung der Verformungen der Schildmaschine gefunden werden.

Wird ein Übergangsbereich zwischen Locker- und Festgestein schleifend durchfahren, dann kann auch für den im Festgestein befindlichen Teil des Umfangs der Schildmaschine von einer umlaufenden Bettung ausgegangen werden, da der Überschnittspalt in dieser Situation weitgehend mit gelöstem Lockergestein gefüllt ist.

Die Berücksichtigung eines axialsymmetrischen Beanspruchungszustandes an einem „halben“ Schalenmodell ist zulässig und kann zur Begrenzung des Berechnungsaufwands genutzt werden. Unsymmetrische Einwirkungen (z. B. infolge von unplanmäßigen Steuerbewegungen gemäß Abschnitt 3.3.5) werden mit auf der sicheren Seite liegenden, quasi-symmetrischen Ersatzlasten beschrieben.

#### 4.2 Kontinuumsmodell

Bei Verwendung eines Kontinuumsmodells nach der Methode der Finiten Elemente werden die Schalenelemente der Schildmaschine in eine dreidimensionale Finite-Elemente-Struktur integriert, die den Spalt aus Überschnitt und Konizität sowie den daran angrenzenden Baugrund mit Kontinuums-elementen abbildet.

Die Übertragung von Zugspannungen in Kontaktflächen zwischen Schildmaschine, Überschnittspalt und Baugrund ist

## 4 Computational Models

The bearing capacity and the serviceability of shield machines for driving accessible tunnel cross sections are verified with the aid of 3-D numerical computational models. In this case, the tunnelling machine is represented as a spatial shell structure, which describes the bearing parts of the machine structure as close to reality as possible.

For simulating the interaction between the subsurface and the machine, two methods are available:

- loading with specific loads and elastic bedding with the aid of spring elements
- simulation of the subsurface as continuum employing special contact elements in the transition between subsurface and machine

#### 4.1 Shell Model with elastic Bedding

A much used model to simulate complex interactions between shield machine and subsurface is elastic bedding of the outer shield skin area with radial spring elements. The transfer of tensile forces is to be excluded via corresponding spring laws for simulating the elastic bedding. A tangential bedding is not applied in keeping with conditions in practice.

The bedding figures  $k_r$  of the radial springs can be approximately estimated by means of the following equation unless they have been provided by a geotechnical expert experienced in tunnelling:

$$k_r = \frac{E_s}{r} \quad (10)$$

with  
 $E_s$  stiffness modulus of the surrounding subsurface

$r$  system radius of the shield skin

The distribution of the spring elements over the shield periphery is characterised by the properties of the subsurface to be penetrated:

In the case of drives in soft ground, the radial bedding – providing that tensile force is eliminated – can be applied peripherally over the skin area. The bedding figure  $k_r$  can in this case be applied as a constant or varyingly according to the subsurface.

In the event of shallow subsurface overburdens any spring reactions occurring in the roof zone should be checked for their plausibility and the bedding values correspondingly reduced.

In solid rock the radial bedding is merely applied over a sector area (Fig.6). The size of the invert sector depends on the rock strength and should be established in conjunction with a geotechnical expert experienced in tunnelling.

The size of the invert sector can be assumed as  $\alpha = 90^\circ$  for the preliminary design. It can also be found by means of comparative analyses taking the deformations of the shield machine into account.

If a transition zone between soft and solid ground is passed, then the periphery of the machine located in solid rock can be assumed to be surrounded by continuous bedding, as the overcut gap in this situation is largely filled with excavated soft ground.

It is permissible to consider an axial-symmetrical stress state on a “half” shell model. This can be applied to restrict the analytical complexity. Unsymmetrical actions (e.g. resulting from unscheduled steering movements according to Ch. 3.3.5) are described by means of quasi symmetrical equivalent loads lying on the safe side.

auszuschließen. Die Simulation einer Schubspannungsübertragung zwischen Maschine und Baugrund kann ebenfalls vernachlässigt werden.


Die Spannungs-Verformungs-Analyse am Kontinuumsmodell wird ausgehend vom Primärspannungszustand des ungestörten Baugrunds sukzessive über Aktivierung und Deaktivierung von Substrukturen zur Simulation des Vortriebsprozesses durchgeführt.

#### 4.3 Zusätzliche Hinweise zur Modellbildung

In den Berechnungsmodellen dürfen nachweislich dauerhaft wirkende günstige Einwirkungen wie z. B. die Abstützkräfte und der Fettdruck bei einer Bürstendichtung berücksichtigt werden. Die entlastenden Einwirkungen können dabei mithilfe zusätzlicher Federelemente zur Simulation der Bürstendichtung sowie zusätzlicher Flächenlasten zur Simulation des Fettdrucks simuliert werden. Die Federkonstante sollte durch Versuche mit gebrauchten Bürstenelementen nachgewiesen werden. Die Höhe des rechnerisch berücksichtigten Fettdrucks darf

den geringsten zu erwartenden Druck im Zwischenraum der Bürsten nicht überschreiten.

### 5 Schlussbemerkung

Die Zusammenhänge und Abhängigkeiten beim Planungs- und Herstellungsprozess einer Schildmaschine sind sehr komplex. Daher ist eine Vorabstimmung der Last- und Bettingsannahmen mit einem im Tunnelbau erfahrenen geotechnischen Sachverständigen zu empfehlen. Dies sollte rechtzeitig vor der Aufstellung der abschließenden statischen Berechnung erfolgen. 

#### Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB): Empfehlungen zur Auswahl und Bewertung von Tunnelvortriebsmaschinen. Tunnel 5/97, S. 20–35.
- [2] DIN 18800, Teil 1: Stahlbauten, Bemessung und Konstruktion (1990-11).
- [3] DIN 1054: Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau (2005-01).
- [4] Maidl, B.: Handbuch des Tunnel- und Stollenbaus, Band 2, 3. Auflage, Essen, Verlag Glückauf, 2004.
- [5] Maidl, B.; Herrenknecht, M.; Anheuser, L.: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb. Berlin, Ernst & Sohn, 1994.
- [6] Terzaghi, K. v.: Theoretical soil mechanics. John Wiley & Sons, New York, 1946.

[7] Szechy, K.: Tunnelbau. Springer-Verlag, Wien, 1969.

[8] Anagnostou, G.; Kovari, K.: The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnels. Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 9, No. 2, S. 165–174, 1994.

[9] Gudehus, G.; Melix, P.: Standsicherheitsnachweise für Bauzustände von Tunneln in schwach kohäsivem Gebirge. Forschung + Praxis 30, S. 145–152, 1985.

[10] Houska, J.: Beitrag zur Theorie der Erddrücke auf das Tunnelmauerwerk. Schweizerische Bauzeitung, 78. Jg., Heft 38, S. 607–609, 1960.

#### 4.2 Continuum Model

When applying a continuum model in keeping with the FE method, the shield machine's shell elements are integrated in a 3-D finite element structure, which represents the gap stemming from the overcut and the conicity as well as the bordering subsurface in the form of continuum elements.


The transference of tensile forces in contact areas between the shield machine, overcut gap and subsurface is to be excluded. The simulation of transference of shear stress between machine and subsurface is also neglected.

#### 4.3 Additional References for Model Formation

Verified constantly acting favourable actions, as e.g. the

supporting forces and the grease pressure in the case of a brush seal may be taken into consideration in the analytical models. The supporting actions can in the process be simulated with the help of additional spring elements to simulate the brush seal as well as additional specific loads to simulate the grease pressure. The spring constants should be verified through tests with used brush elements. The amount of the calculated grease pressure that is considered should not exceed the lowest pressure to be expected in the gap.

### 5 Conclusion

The interrelationships and dependencies in the planning and production process of a shield machine are extremely complex. As a consequence, it is advisable to agree on the load and bedding assumptions in advance with a geotechnical expert experienced in tunnelling. This should be undertaken well before the final static analyses are carried out. 

Bibliography: see German original



## Errata

Right column on page 49 of tunnel issue 7/2005 resp. page 6 of the pdf facsimile:

$c'$  drained shear strength

$\gamma$  unit weight of the soil (above groundwater  $\gamma$ , beneath  $\gamma'$ )