

# Dimensionierung von Tunnelbohrmaschinen unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften

Jürgen Schmitt  
Schübler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH, Frankfurt am Main

## Zusammenfassung

Ein entscheidendes Kriterium für die Dimensionierung einer Tunnelbohrmaschine mit Schild (TBM-S) ist die Festlegung der Größe des planmäßigen Überschnitts. In der Praxis erfolgt die Festlegung des Überschnitts zumeist durch Erkenntnisse aus realisierten Projekten. Ein analytischer Ansatz, über den der Überschnitt anhand der gebirgsmechanischen Kenngrößen definiert werden kann, fehlt. Die TBM-S kommt im Festgestein mit geringer Standzeit oder nachbrüchigem Fels zum Einsatz. Das bedeutet, dass sich das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges in der Regel nicht mit dem Spannungsverformungsverhalten eines isotropen Lockergesteinsbodens vergleichen lässt. Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges wurden umfangreiche dreidimensionale numerische Parameterstudien durchgeführt. Insbesondere wurde dabei der Einfluss einer Trennflächenschar untersucht. Die durchgeführten Berechnungen sowie die entwickelten Ansätze zur Festlegung des planmäßigen Überschnitts werden im Rahmen dieses Beitrages vorgestellt.

## 1. Einführung

Bei einem Vortrieb mit einer Schild-TBM (TBM-S) entsteht durch die Abbauwerkzeuge temporär ein Ausbruchquerschnitt, der größer ist als die Querschnittsfläche des Schildes. Diese Differenz wird als Überschnitt bezeichnet (Bild 1). Bei Vortrieben im Festgestein soll durch den Überschnitt verhindert werden, dass es zu einem Verklemmen des Bohrkopfes kommt bzw. dass eine Reduzierung der Vortriebskräfte erreicht wird. Nach den Empfehlungen des DAUB ([1]) ist der Bereich des Schildmantels so zu dimensionieren, dass durch Festlegung des Überschnitts und der Konizität die Belastung der Schildmaschine im Festgestein so gering wie möglich gehalten und nach Möglichkeit vollständig vermieden wird. Die Festlegung der Größe des planmäßigen Überschnitts stellt somit ein notwendiges Kriterium für die Machbarkeit eines Projektes dar.

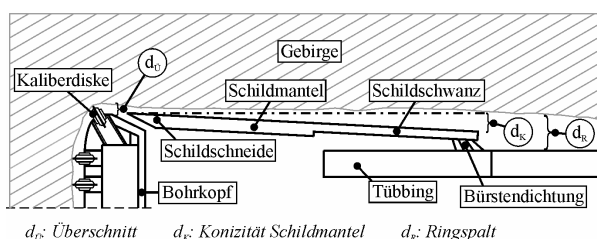


Bild 1: Schemaskizze Überschnitt, Konizität Schildmantel, Ringspalt

Die Festlegung des Überschnitts erfolgt in der Praxis durch gewonnene Erfahrungen aus realisierten Projekten. Ein analytischer Ansatz, über den der Überschnitt durch Kenntnis der gebirgsmechanischen Kenngrößen definiert werden kann, fehlt.

Da die TBM-S im Festgestein mit geringer Standzeit oder nachbrüchigem Fels zum Einsatz kommt, lässt sich in der Regel das Spannungsdehnungs- bzw. das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges nicht mit dem Spannungsverformungsverhalten eines isotropen Lockergesteinsbodens vergleichen. Vielmehr sind anisotrope Zustände zu betrachten. Insbesondere kommt den Eigenschaften des Trennflächengefüges bei einem nachbrüchigen Fels eine große Bedeutung zu. Dies führt zu der Fragestellung, wie sich die Eigenschaften des Trennflächengefüges auf die Spannungsumlagerung bei einem Vortrieb mit einer TBM-S auswirken. Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges wurden umfangreiche dreidimensionale numerische Parameterstudien durchgeführt, bei denen insbesondere der Einfluss einer Trennflächenschar untersucht wurde. Dazu kam für die Berechnungen ein Stoffgesetz zum Einsatz, welches die Scherfestigkeiten einer Trennflächenschar berücksichtigt.

## 2. Numerische Berechnungen

Die umfangreichen Sensitivitätsstudien wurden mit einem dreidimensionalen numerischen Simulationsmo-

dell durchgeführt. Für die Analysen kam dabei das Programmsystem FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-D) zum Einsatz.

## 2.1 Numerisches Berechnungsmodell

Im Berechnungsmodell wurden diskret der Schildmantel, der Tübbingausbau, der Überschnitt und die Ringspaltverfüllung abgebildet (Bild 2). Die seitlichen Randabstände und der untere Randabstand des geometrischen Berechnungsmodells wurden entsprechend den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik ([3]) festgelegt. Um ein zeitlich leistungsfähiges Berechnungsmodell zu erhalten, wurde vom Bohrkopf der TBM-S nur der Schildmantel mit einer Ersatzdicke diskretisiert. Ebenso erfolgte die Abbildung des Tübbingrings als konstanter Querschnitt ohne die Berücksichtigung von Tübbingelenken. Entsprechend den Empfehlungen des DAUB ([1]) wurde lediglich eine Bettung über einen Sektorbereich in der Sohle des Schildmantels angesetzt.

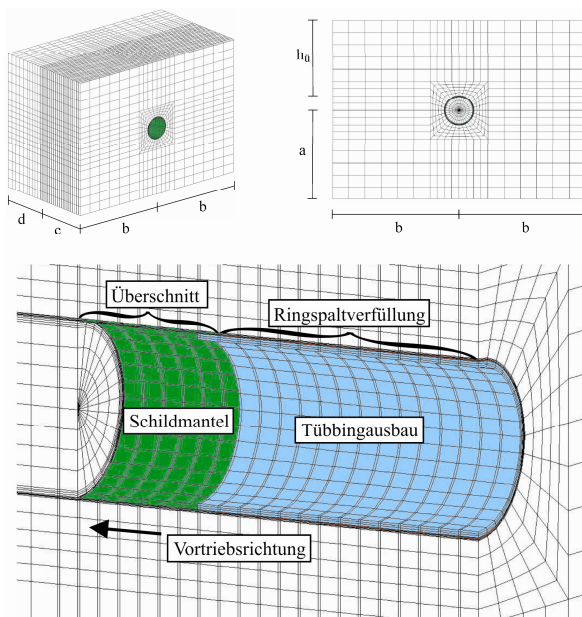


Bild 2: Diskretisierung des numerischen Berechnungsmodells TBM-S

Tab. 1: Materialkennwerte Schildmantel, Tübbingausbau und Kiesverfüllung

Materialkennwerte	Einheit	Schildmantel TBM-S (S235)	Tübbingausbau (Stahlbeton C35/45)	Kiesverfüllung
E-Modul / Ersatz-E-Modul*	[MN/m <sup>2</sup> ]	210.000 / 150.000*	33.500	100
Querdehnzahl	[-]	0,3	0,2	0,35
Wichte / Ersatzwichte*	[kN/m <sup>3</sup> ]	75,0 / 615,0*	24,0	16,0

Für die stoffliche Modellierung wurden der Schild, der Tübbingausbau und die Kiesverfüllung für den Ringspalt mit linearelastischem Materialverhalten mit den in Tab. 1 angegebenen Materialkennwerten abgebildet. Da im geometrischen Berechnungsmodell der Schildmantel vereinfacht diskretisiert wurde, erfolgte eine Umrechnung für den E-Modul und für die Wichte des Schildmantels in einen Ersatz-E-Modul und in eine Ersatzwichte zur Berücksichtigung der Gesamtsteifigkeit und des Gesamtgewichtes der TBM-S im Schildbereich. Bei der Ringspaltverfüllung wurde davon ausgegangen, dass dies mittels einer Kiesverfüllung geschieht. Daher wurde ein konstanter E-Modul für die Kiesverfüllung angenommen.

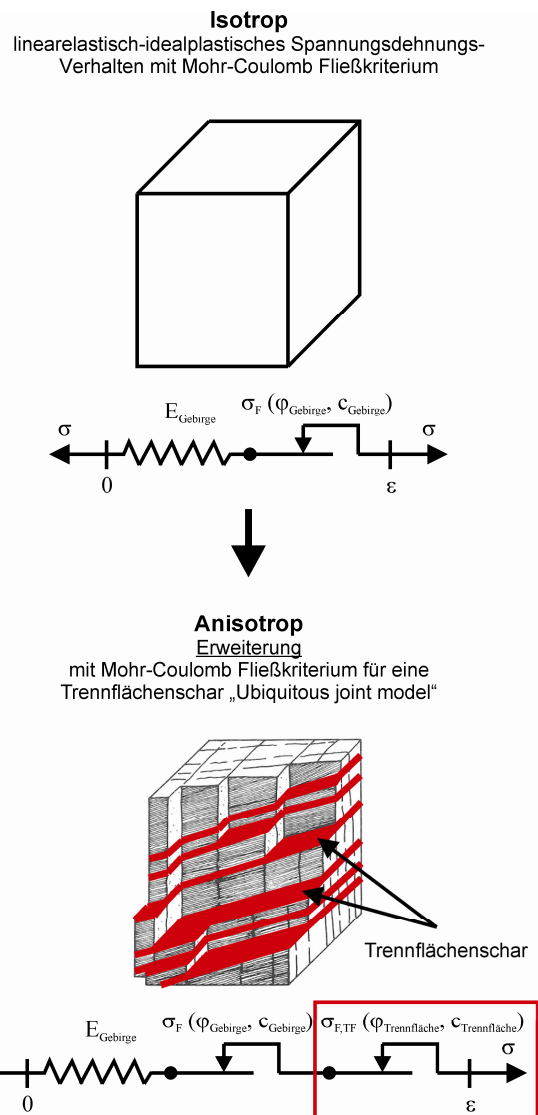


Bild 3: Stoffliche Modellierung Isotropie/Anisotropie

Die stoffliche Modellierung des Festgesteins erfolgte durch elastoplastische Stoffgesetze. Zum einen wurde ein Stoffgesetz mit linearelastisch-idealplastischem Spannungsdehnungsverhalten mit einem Fließ- bzw. Bruchkriterium nach Mohr-Coulomb und zum anderen ein Stoffgesetz mit einer Erweiterung des zuvor ge-

nannten Stoffgesetzes, dem Ubiquitous joint model, verwendet (Bild 3). Dabei ermöglichte die Anwendung des Ubiquitous joint models die Analyse des Einflusses einer Trennflächenschar auf das Spannungsdehnungsverhalten eines Festgesteins. Ein zeitabhängiges Spannungsdehnungsverhalten des Festgesteins war nicht Bestandteil der durchgeführten Studien.

Die räumlichen Berechnungen erfolgten als step-by-step Analyse. Dazu wurden 20 Lastfälle bzw. Bauzustände abgebildet. Nach der Berechnung des Primärspannungszustandes wurden in den nächsten Bauzuständen die Schildfahrt bzw. der Vortrieb der Schildmaschine simuliert. Im Bauzustand 7 erfolgte die Aktivierung des ersten Tübbingrings im Bereich des Schildschwanzes. Mit Aktivierung des nächsten Tübbingrings in Bauzustand 8 wurde das Material des Schildmantels gegen das Material der Kiesverfüllung ausgetauscht.

Für die Simulation des Anpressdrucks  $p_A$  an der Ortsbrust wurde stark vereinfacht eine gleichmäßig verteilte Flächenlast angesetzt, die im Zuge der Sensitivitätsstudien variiert wurde.

Bei den Berechnungen wurde angenommen, dass es sich um ein trockenes Gebirge handelt. Daher erfolgte keine Berücksichtigung von mechanischen Beanspruchungen aus Wasserdruck.

## 2.2 Sensitivitätsstudien

Mit dem zuvor beschriebenen numerischen Modell wurden Sensitivitäts- bzw. Parameterstudien durchgeführt, um daraus das theoretische Spannungsverformungsverhalten des Gebirges ableiten zu können.

In den Sensitivitätsstudien wurden unter Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges die Gebirgskennwerte, die Überlagerungshöhe  $h_U$ , der Außendurchmesser des Tübbingrings  $D_{TR}$ , die Tübbingdicke  $d_T$  und der Anpressdruck  $p_A$  variiert. In der Tab. 2 sind die einzelnen Kenngrößen mit den variierten Bandbreiten zusammengefasst. Dabei basieren die Bandbreiten der Kennwerte für das Festgestein auf einer umfangreichen Literaturrecherche. Eine mögliche Zugfestigkeit  $\sigma_t$  für das Gebirge wurde nicht angesetzt.

Die Parameterstudien, in denen als Anisotropie die Scherfestigkeiten einer Trennflächenschar berücksichtigt wurden, umfassten zum einen Variationen der Überlagerungshöhe  $h_U$ , des Außendurchmessers des Tübbingrings  $D_{TR}$  und der Tübbingdicke  $d_T$ . Dabei wurde der Umfang der einzelnen Parameterwerte im Vergleich zu den Parameterstudien bei Berücksichtigung von isotropen Materialeigenschaften des Gebirges reduziert, um den Gesamtumfang der Variationsberechnungen zu begrenzen. Der Parameter Anpressdruck  $p_A$  wurde bei den Parameterstudien bei Berücksichtigung einer Trennflächenschar nicht variiert, da dieser entspre-

chend den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Untersuchungen keinen Einfluss auf die maximalen Verschiebungen im Schildmantelbereich und den Radialspannungen zur Bemessung der Tübbingsicherung aufweist.

Tab. 2: Bandbreite Parameter (isotrope Materialeigenschaften Gebirge)

Kenngröße	Einheit	Bandbreite
Wichte Gebirge $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17 bis 26
E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	100 bis 20.000
Querdehnzahl $\mu$	[-]	0,2 bis 0,4
Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{\text{Gebirge}}$	[°]	15 bis 45
Kohäsion Gebirge $c_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	0,1 bis 2,0
Überlagerungshöhe $h_U$	[m]	30 bis 1.000
Außendurchmesser Tübbingring $D_{TR}$	[m]	5,0 bis 17,5
Tübbingdicke $d_T$	[cm]	10 bis 50
Anpressdruck $p_A$	[kN/m <sup>2</sup> ]	0 bis 1000

Tab. 3: Bandbreite Parameter (anisotrope Materialeigenschaften Gebirge)

Kenngröße	Einheit	Bandbreite
Wichte Gebirge $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	26
E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	100 bis 10.000
Querdehnzahl $\mu$	[-]	0,25 bis 0,4
Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{\text{Gebirge}}$	[°]	25 bis 45
Reibungsw. Trennflächens. $\varphi_{\text{Trennfläche}}$	[°]	10 bis 20
Kohäsion Gebirge $c_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	0,3 bis 1,0
Kohäsion Trennflächens. $c_{\text{Trennfläche}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	0,01 bis 0,25
Überlagerungshöhe $h_U$	[m]	30 bis 1.000
Außendurchmesser Tübbingring $D_{TR}$	[m]	5,0 bis 11,6
Tübbingdicke $d_T$	[cm]	30 bis 50
Anpressdruck $p_A$	[kN/m <sup>2</sup> ]	300

Tab. 4: Bandbreite Parameter (anisotrope Materialeigenschaften Gebirge), Trennflächenorientierung

Kenngröße	Einheit	Bandbreite / Werte
Winkel der Einfallrichtung $\alpha_F$	[°]	0 / 15 / 30 / 45 / 60 / 75 / 90 / 105 / 120 / 135 / 150 / 165 / 180 / 195 / 210 / 225 / 240 / 255 / 270 / 285 / 300 / 315 / 330 / 345 / 360
Fallwinkel $\beta$	[°]	0 / 15 / 30 / 45 / 60 / 75 / 90

Außerdem wurden die Materialeigenschaften und die mechanischen Eigenschaften der Gebirgsparameter variiert. Dies umfasste die Untersuchung des Einflusses der Trennflächenorientierung durch den Winkel der Einfallrichtung  $\alpha_F$  und dem Fallwinkel  $\beta$ , der E-Modul des Gebirges  $E_{\text{Gebirge}}$ , die Querdehnzahl des Gebirges  $\mu$  sowie die Scherfestigkeitsparameter des Gebirges  $\varphi_{\text{Gebirge}}$  und  $c_{\text{Gebirge}}$  bzw. die Scherfestigkeitsparameter der Trennflächenschar  $\varphi_{\text{Trennfläche}}$  und  $c_{\text{Trennfläche}}$ . Eine Zugfestigkeit des Gebirges  $\sigma_t$  bzw. der Trennflächen-

schar  $\sigma_{TF}$  wurde in den Berechnungen nicht angesetzt. Die Bandbreite der variierten Parameter ist in den Tab. 3 und Tab. 4 aufgeführt.

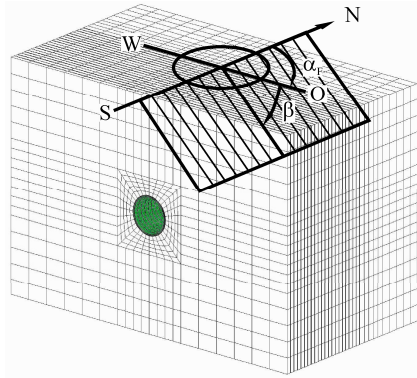


Bild 4: Definition Trennflächenorientierung

Bild 4 zeigt die im numerischen Modell definierte Einfallrichtung  $\alpha_F$  und den Fallwinkel  $\beta$ .

### 3. Berechnungsergebnisse

Auf eine umfassende Darstellung der Berechnungsergebnisse wird im Rahmen dieses Beitrags aufgrund des Umfangs der Ergebnisse verzichtet. Vielmehr sollen exemplarisch nur einzelne Berechnungsergebnisse gezeigt und erläutert werden. Eine ausführliche Darstellung der Berechnungsergebnisse findet sich in [6].

In Bild 5 ist die maximale Verschiebung bei Ansatz isotroper Materialeigenschaften des Gebirges, die sich nach der Herstellung des Überschnitts im Bereich des Schildmantels (Schnitt  $U_T$ - $U_D$ ) ergibt, dargestellt. Mit zunehmender Überlagerungshöhe  $h_{Ü}$  nehmen die Vertikalverschiebungen in der Firste entsprechend stark zu. Bei Betrachtung der Radialverschiebungen zeigt sich in allen Berechnungen, dass sich die maximalen Verschiebungen in der Firste einstellen. Daher wurde als maßgebendes Kriterium für die Beurteilung des Risikos der Verklemmung des Schildmantels die vertikale Firstverschiebung  $u_{Firste}$  betrachtet. Die Berechnungen zeigen, dass sich der maßgebende Einfluss auf die Größe der vertikalen Firstverschiebung  $u_{Firste}$  durch die Überlagerungshöhe  $h_{Ü}$ , der Wichte des Gebirges  $\gamma$ , den E-Modul des Gebirges  $E_{Gebirge}$  sowie durch die Scherfestigkeiten des Gebirges  $\phi_{Gebirge}$  und  $c_{Gebirge}$  ergibt. In Tab. 5 ist der Einfluss der einzelnen variierten Kenngrößen auf die vertikale Firstverschiebung  $u_{Firste}$  für die Berechnungen bei Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges zusammengefasst.

Unter Berücksichtigung anisotroper Materialeigenschaften des Gebirges zeigte sich in den Studien die Bedeutung der Trennflächenorientierung. Diese hat maßgebenden Einfluss auf die Größe der Firstverschiebung im Überschnittsbereich. Dabei treten zwei Grenzfälle auf. Bild 6 zeigt die berechnete maßgebende

Trennflächenorientierung für die minimale und maximale Vertikalverschiebung in der Firste im Bereich des Überschnitts.

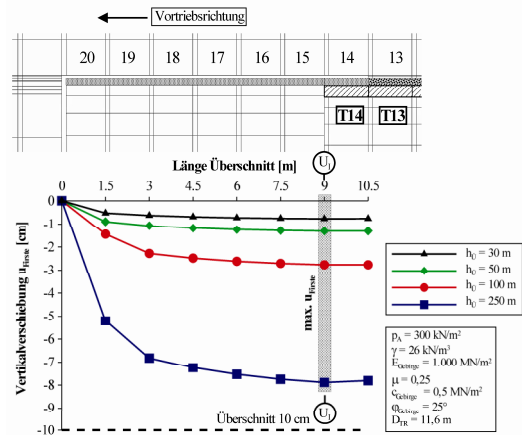


Bild 5: Vertikalverschiebung der Firste im Längsschnitt des Überschnitts

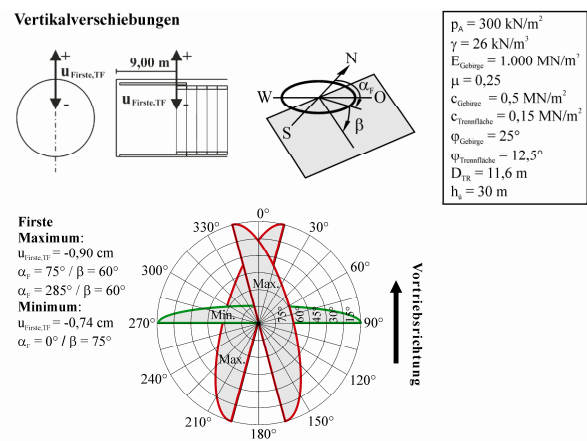


Bild 6: Maßgebende Trennflächenorientierung für minimale bzw. maximale Vertikalverschiebung Firste

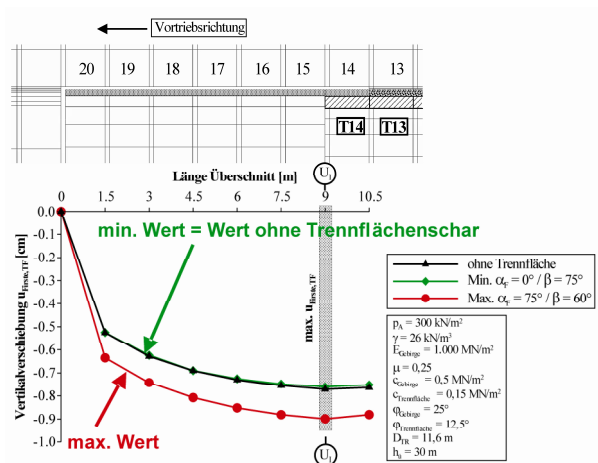


Bild 7: Vertikalverschiebung der Firste im Längsschnitt des Überschnitts im Vergleich

In Bild 7 und Bild 8 ist ersichtlich, dass die minimalen Verschiebungen bei Berücksichtigung einer Trennflächenschar deckungsgleich mit denen der Berechnung bei Berücksichtigung von isotropen Materialeigenschaften des Gebirges sind und die Trennflächenfestigkeiten keinen Einfluss auf die Größe der Verschiebungen haben. Bei der Veränderung der Trennflächenorientierung ergeben sich dagegen größere Verschiebungen und die Berücksichtigung der Trennflächenscherfestigkeiten zeigt ihre Wirkung. Dieser Umstand findet sich durchgehend in allen Variationsberechnungen wieder.

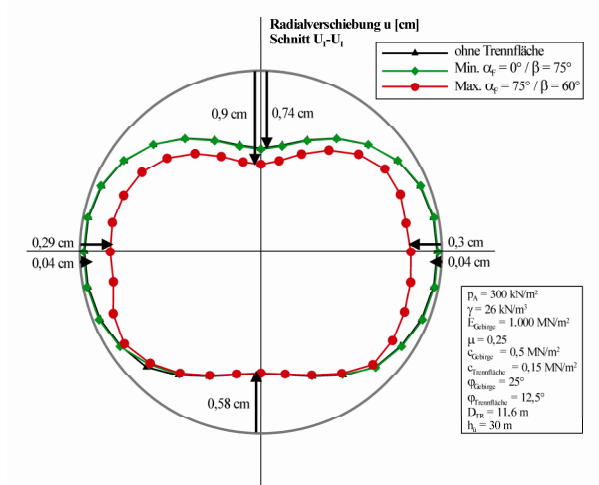


Bild 8: Radialverschiebungen im Schnitt  $U_1-U_1$  im Vergleich

Tab. 5: Bewertung Einfluss Parameter ohne / mit Berücksichtigung einer Trennflächenschar

Kenngröße	$u_{\text{Firse}}$	$u_{\text{Firse,TF}}$
Winkel der Einfällrichtung $\alpha_F$	-	++
Fallwinkel $\beta$	-	++
Wichte Gebirge $\gamma$	++	-
E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}}$	++	0
Querdehnzahl $\mu$	0	0
Reibungswinkel Gebirge $\phi_{\text{Gebirge}}$	++	++
Reibungsw. Trennflächenschar $\phi_{\text{Trennfläche}}$	-	++
Kohäsion Gebirge $c_{\text{Gebirge}}$	++	+
Kohäsion Trennflächenschar $c_{\text{Trennfläche}}$	-	++
Überlagerungshöhe $h_U$	++	++
Außendurchmesser Tübbingring $D_{\text{TR}}$	0	0
Anpressdruck $p_A$	0	0

++ Kat. 1: Starker Einfluss  
+ Kat. 2: Schwacher Einfluss  
0 Kat. 3: Kein Einfluss

Das Maximum für die maximale Firstverschiebung tritt für die Fälle  $\alpha_F = 75^\circ / \beta = 60^\circ$  und  $\alpha_F = 285^\circ / \beta = 60^\circ$  auf. Das Minimum ergibt sich für den Fall  $\alpha_F = 0^\circ / \beta = 75^\circ$ . Für das Maximum ergibt sich dabei eine starke Abhängigkeit von den Scherfestigkeiten der Trennflä-

chenschar  $\phi_{\text{Trennfläche}}$  und  $c_{\text{Trennfläche}}$ . Ebenso zeigen sich große Einflüsse durch die Überlagerungshöhe  $h_U$  sowie durch den Reibungswinkel des Gebirges  $\phi_{\text{Gebirge}}$  (vgl. Tab. 5).

Bei den Variationsberechnungen zeigt sich des Weiteren, dass sich die maximalen Verschiebungen im Querschnitt analog zu den Berechnungen bei Berücksichtigung von isotropen Materialeigenschaften des Gebirges in der Firste einstellen.

#### 4. Analytische Berechnungsansätze

Auf der Grundlage der umfangreichen Berechnungsergebnisse der Sensitivitätsstudien, in denen die einzelnen maßgebenden stofflichen und geometrischen Parameter bestimmt und variiert wurden, erfolgte die Entwicklung analytischer Berechnungsansätze basierend auf Regressionsanalysen. Es wurde ein Kriterium definiert, durch welches das Risiko der Verklemmung des Schildmantels abgeschätzt bzw. die Größe des erforderlichen planmäßigen Überschritts bemessen werden kann (Bild 9).

Die entwickelten Ansätze liegen sowohl für den Fall eines isotropen Materialverhaltens des Gebirges  $u_{\text{Firse}}$  (Gleichung (1) bis (7), Tab. 6) als auch für den Fall eines anisotropen Materialverhaltens des Gebirges bei Berücksichtigung einer Trennflächenschar  $u_{\text{Firse,TF}}$  (Gleichung (8) bis (16), Tab. 7) vor. Dabei ist zu beachten, dass die Anwendungsgrenzen dieser Ansätze auf die in den Tabellen Tab. 2 und Tab. 3 dargestellte Bandbreite beschränkt ist.

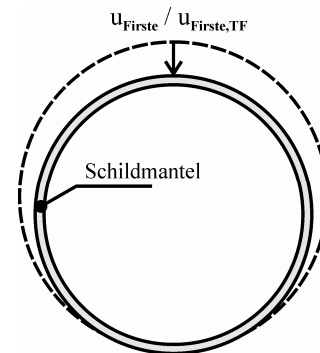


Bild 9: Firstverschiebung im Überschritt zur Prognose der Verklemmung Schildmantel

$$u_{\text{Firste}} = f_L \times \left( \frac{1000}{E_{\text{Gebirge}}} \times (a \times h_{\text{Ü}}^3 + b \times h_{\text{Ü}}^2 + c \times h_{\text{Ü}}) + d \right) \times \eta_{\text{RK}} \leq 0 \quad (1)$$

$$f_L = 4,7 \times 10^{-2} \times \gamma_{\text{Gebirge}} - 0,228 \quad (2)$$

$$a = \frac{a_E}{c_{\text{Gebirge}} \times a_\phi} \quad (3)$$

$$b = -\frac{14,5}{c_{\text{Gebirge}} \times b_\phi} \times b_M \quad (4)$$

$$c = -\frac{c_E \times c_{\text{Gebirge}}}{c_\phi} - 0,018 \quad (5)$$

$$d = \frac{d_E}{c_{\text{Gebirge}} \times d_\phi} - 0,2 \quad (6)$$

$$\eta_{\text{RK}} = 1,02 \quad (7)$$

mit $u_{\text{Firste}}$	Verschiebung Firste	[cm]
$\gamma_{\text{Gebirge}}$	Wichte Gebirge	[kN/m <sup>3</sup> ]
$E_{\text{Gebirge}}$	E-Modul Gebirge	[MN/m <sup>2</sup> ]
$c_{\text{Gebirge}}$	Kohäsion Gebirge	[MN/m <sup>2</sup> ]
$h_{\text{Ü}}$	Überlagerungshöhe	[m]
$\eta_{\text{RK}}$	Sicherheitsfaktor Fehler	
	Regressionsfunktionen	[-]
$f_L$	Lastfaktor Wichte	[-]

Tab. 6: Beiwerte

$\phi_{\text{Gebirge}}$	15°	20°	25°	30°	35°	40°	≥45°
$a_\phi$	1,0 x 10 <sup>8</sup>	1,5 x 10 <sup>8</sup>	1,0 x 10 <sup>9</sup>	4,0 x 10 <sup>9</sup>	3,0 x 10 <sup>10</sup>	9,0 x 10 <sup>10</sup>	1,2 x 10 <sup>11</sup>
$a_E$	-10,0	0,5	4,0	6,0	4,1	0,0	0,0
$b_\phi$	4,0 x 10 <sup>5</sup>	7,0 x 10 <sup>5</sup>	1,0 x 10 <sup>6</sup>	3,2 x 10 <sup>6</sup>	6,2 x 10 <sup>7</sup>	1,5 x 10 <sup>8</sup>	5,0 x 10 <sup>8</sup>
$b_M$	3,0	1,5	1,0	1,0	0,9	-1,1	-3,5
$c_\phi$	7,0 x 10 <sup>2</sup>	8,2 x 10 <sup>2</sup>	1,0 x 10 <sup>3</sup>	1,2 x 10 <sup>3</sup>	1,4 x 10 <sup>3</sup>	2,0 x 10 <sup>3</sup>	3,0 x 10 <sup>3</sup>
$c_E$	2,0	3,0	3,5	3,5	3,4	3,1	2,9
$d_\phi$	5,0	7,0	10,0	20,0	30,0	100,0	240,0
$d_E$	-3,0	-0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0

$$u_{\text{Firste,TF}} = u_{\text{Firste}} \times F_{\text{F,TF}} \quad (8)$$

$$F_{\text{F,TF}} = 1 + \frac{a_{\alpha\text{F},\beta}}{0,2} \times (F_{\text{GUV,TF}} - 1) \leq 1,0 \quad (9)$$

$$F_{\text{GUV,TF}} = 0,93 \times F_\phi \times F_{h_{\text{Ü}}} \times \eta_{\text{RK,TF}} \quad (10)$$

$$c_{\text{Trennfläche}} \geq 0,01: F_\phi = \frac{1}{c_{\text{Trennfläche}}^{e_{\text{TR}}}} \times f_{\text{TF},\phi} \times f_{\text{GB},\phi} \quad (11)$$

$$f_{\text{TF},\phi} = -0,005 \times \phi_{\text{Trennfläche}} + 1,1 \quad (12)$$

$$e_{\text{TR}} = -0,005 \times \phi_{\text{Trennfläche}} + 0,1625 \quad (13)$$

$$f_{\text{GB},\phi} = 0,0027 \times \phi_{\text{Gebirge}} + 0,9333 \quad (14)$$

$$F_{h_{\text{Ü}}} = 9,0861 \times 10^{-10} \times h_{\text{Ü}}^3 - 2,1465 \times 10^{-6} \times h_{\text{Ü}}^2 + 2,36931 \times 10^{-3} \times h_{\text{Ü}} + 9,28457 \times 10^{-1} \quad (15)$$

$$\eta_{\text{RK,TF}} = 1,02 \quad (16)$$

mit $u_{\text{Firste,TF}}$	Verschiebung Firste bei Berücksichtigung einer Trennflächenschar	[cm]
$u_{\text{Firste}}$	Verschiebung Firste ohne Berücksichtigung einer Trennflächenschar	[cm]
$\phi_{\text{Gebirge}}$	Reibungswinkel Gebirge	[°]
$\phi_{\text{Trennfl.}}$	Reibungswinkel Trennflächenschar	[°]
$c_{\text{Trennfl.}}$	Kohäsion Trennflächenschar	[MN/m <sup>2</sup> ]
$h_{\text{Ü}}$	Überlagerungshöhe	[m]
$\eta_{\text{RK,TF}}$	Sicherheitsfaktor Fehler Regressionsfunktionen	[-]

Tab. 7: Beiwerte  $a_{\alpha\text{F},\beta}$  zur Berücksichtigung der Trennflächenorientierung

	Einfallswinkel $\beta$						
	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
<b>0</b>	1,01	1,01	1,01	1,08	1,14	1,00	1,01
<b>15°</b>	1,01	1,01	1,01	1,09	1,15	1,01	1,01
<b>30°</b>	1,01	1,01	1,01	1,11	1,15	1,01	1,01
<b>45°</b>	1,01	1,02	1,02	1,12	1,17	1,02	1,01
<b>60°</b>	1,01	1,02	1,05	1,13	1,17	1,02	1,01
<b>75°</b>	1,02	1,03	1,08	1,17	1,20	1,03	1,02
<b>90°</b>	1,02	1,04	1,11	1,14	1,19	1,04	1,02
<b>105°</b>	1,01	1,03	1,11	1,12	1,19	1,03	1,01
<b>120°</b>	1,01	1,02	1,09	1,10	1,19	1,02	1,01
<b>135°</b>	1,01	1,02	1,07	1,10	1,18	1,02	1,01
<b>150°</b>	1,01	1,01	1,05	1,08	1,17	1,01	1,01
<b>165°</b>	1,01	1,01	1,03	1,07	1,16	1,01	1,01
<b>180°</b>	1,01	1,01	1,03	1,06	1,15	1,01	1,01
<b>195°</b>	1,01	1,01	1,03	1,07	1,16	1,01	1,01
<b>210°</b>	1,01	1,01	1,05	1,08	1,17	1,01	1,01
<b>225°</b>	1,01	1,02	1,07	1,10	1,18	1,02	1,01
<b>240°</b>	1,01	1,02	1,09	1,10	1,19	1,02	1,01
<b>255°</b>	1,01	1,03	1,11	1,12	1,19	1,03	1,01
<b>270°</b>	1,02	1,04	1,11	1,14	1,19	1,04	1,02
<b>285°</b>	1,02	1,03	1,08	1,17	1,20	1,03	1,02
<b>300°</b>	1,01	1,02	1,05	1,13	1,17	1,02	1,01
<b>315°</b>	1,01	1,02	1,02	1,12	1,17	1,02	1,01
<b>330°</b>	1,01	1,01	1,01	1,11	1,15	1,01	1,01
<b>345°</b>	1,01	1,01	1,01	1,09	1,15	1,01	1,01
<b>360°</b>	1,01	1,01	1,01	1,08	1,14	1,00	1,01

## 5. Zusammenfassung

Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer Tunnelbohrmaschine mit Schild wurden umfangreiche dreidimensionale numerische Parameterstudien durchgeführt, bei denen insbesondere der Einfluss einer Trennflächenschar untersucht wurde.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss einer Trennflächenschar im Gebirge wird deutlich, dass die Trennflächenorientierung und die Scherfestigkeiten der Trennflächenschar eine sehr starke Auswirkung auf die Größe der Verschiebungen und der Spannungen im Gebirge hat. Hier gibt es die beiden Extremfälle, dass sich für bestimmte Trennflächenorientierungen kein Einfluss auf die Größe der Verschiebungen in lokalen Bereichen des Tunnels im Vergleich zu den Berechnungen ohne Berücksichtigung einer Trennflächenschar trotz des Ansatzes sehr geringer Scherfestigkeiten für die Trennflächenschar zeigt. Im Gegensatz dazu ergeben sich für andere Trennflächenorientierungen sehr gravierende Differenzen, wodurch sich die Bedeutung der anisotropen Eigenschaften des Gebirges auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bestätigt.

Auf der Grundlage der umfangreichen Berechnungsergebnisse der Sensitivitätsstudien, in denen die einzelnen maßgebenden stofflichen und geometrischen Parameter bestimmt und variiert wurden, erfolgte die Entwicklung analytischer Berechnungsansätze basierend auf Regressionsanalysen. Es wurde ein Kriterium definiert, durch welches das Risiko der Verklemmung des Schildmantels abgeschätzt bzw. die Größe des erforderlichen planmäßigen Überschchnitts bemessen werden kann. Die entwickelten Ansätze liegen sowohl für den Fall eines isotropen Materialverhaltens des Gebirges als auch für den Fall eines anisotropen Materialverhaltens des Gebirges bei Berücksichtigung einer Trennflächenschar vor.

Die dargestellten abgeleiteten analytischen Berechnungsansätze beruhen auf idealisierten Modellen und Berechnungsannahmen. Die bis jetzt vorliegenden Messdaten durchgeführter Projekte reichen nicht aus bzw. sind nicht vorhanden, um die berechneten Verschiebungen im Bereich des Schildmantels quantitativ verifizieren zu können. Eine messtechnische Verifizierung der analytischen Berechnungsansätze steht daher noch aus. In [6] ist hierzu ein Konzept zur messtechnischen Verifikation dargestellt.

## Literatur

[1] Deutscher Ausschuss für unterirdisches Bauen (DAUB) - Ak Schildstatik: Empfehlungen für statische Berechnungen von Schildvortriebsmaschinen, Tunnel 7/2005, S. 44 ff.

- [2] DGEG: Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980) der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Taschenbuch für den Tunnelbau 1980, Verlag Glückauf GmbH, Essen, 1980
- [3] Meißner, H.: Tunnelbau unter Tage. Empfehlungen des Arbeitskreises I.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.
- [4] Schmitt, J.; Stahlmann, J.; Gattermann, J.: Numerische Studien zur Entwicklung von Gebirgsdrucksätzen für Tunnelbohrmaschinen mit Schild, 12. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 17.03.2005 in Darmstadt, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 71, S. 47-56, ISBN 3-931396-74-6, 2005
- [5] Schmitt, J.; Stahlmann, J.: Prognose des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei maschinellen Tunnelvortrieben mit Tübbingsicherung, 16. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 19.03.2009 in Darmstadt, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 81, S. 33-46, ISBN 978-3-931396-86-2, 2009
- [6] Schmitt, J.: Spannungsverformungsverhalten des Gebirges beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen mit Schild, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 89, 2009, URL: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00028670>

## Autor:

Dr.-Ing. Jürgen Schmitt  
Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft mbH  
Darmstädter Landstraße 114  
60598 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 (0) 69 / 968857-24  
Fax: +49 (0) 69 / 968857-99  
E-Mail: [jschmitt@schuessler-plan.de](mailto:jschmitt@schuessler-plan.de) /  
[j.schmitt@ingenieur-bauwesens.de](mailto:j.schmitt@ingenieur-bauwesens.de)