

# **Prognose des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei maschinellen Tunnelvortrieben mit Tübbingsicherung**

**Dipl.-Ing. Jürgen Schmitt, Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann**

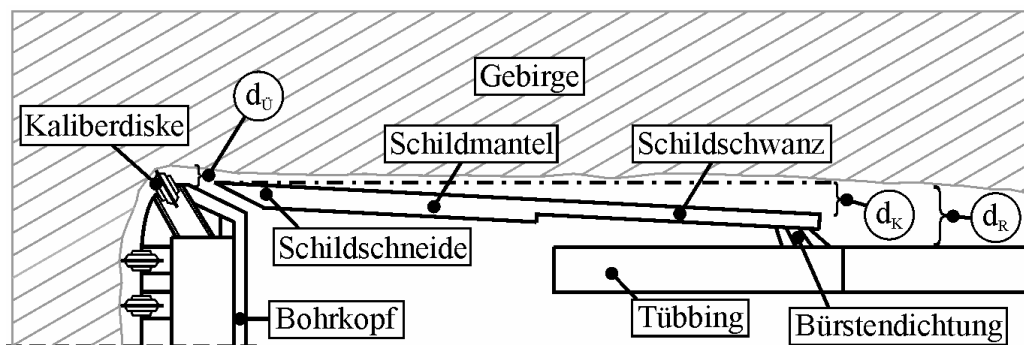
Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

## **1 Einleitung**

Die Planung eines maschinellen Tunnelvortriebs im Fels mit Tübbingsicherung stellt für den Ingenieur immer eine besondere Herausforderung dar. Neben der Beurteilung der generellen Machbarkeit eines solchen Vortriebs ist auch die optimale Wahl des Bemessungsgebirgsdrucks zur wirtschaftlichen Dimensionierung der Tübbingsicherung entscheidend.

Bei einem Vortrieb mit einer Schild-TBM (TBM-S) entsteht durch die Abbauwerkzeuge temporär ein Ausbruchsquerschnitt, 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. Deswegen ist der Bereich des Schildmantels nach den Empfehlungen des DAUB (DAUB 2005) 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.

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



$d_G$ : Überschnitt     $d_K$ : Konizität Schildmantel     $d_R$ : Ringspalt

**Bild 1** Schemaskizze Überschnitt, Konizität Schildmantel, Ringspalt

Bei der Dimensionierung der Tübbingsicherung ist die Wahl des Ansatzes des Gebirgsdrucks von maßgebender Bedeutung. Der Ansatz des Überlagerungsdrucks, wie er für maschinelle Tunnelvortriebe im Lockergestein in der Regel verwendet wird, führt gerade für Tunnelbauwerke mit hoher Überlagerungshöhe zu unwirtschaftlichen Tübbingdicken. Ebenso werden die Spannungsverformungseigenschaften des Gebirges bei einem Großteil der etablierten Ansätze für den Gebirgsdruck vernachlässigt bzw. nur ungenügend berücksichtigt. Ein Ansatz für die spezielle Vortriebsart mit einer TBM-S fehlt gänzlich.

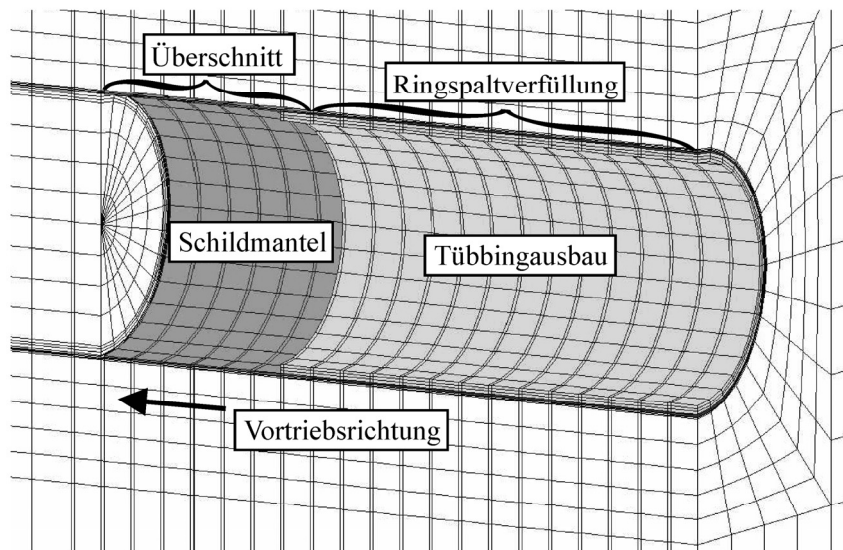
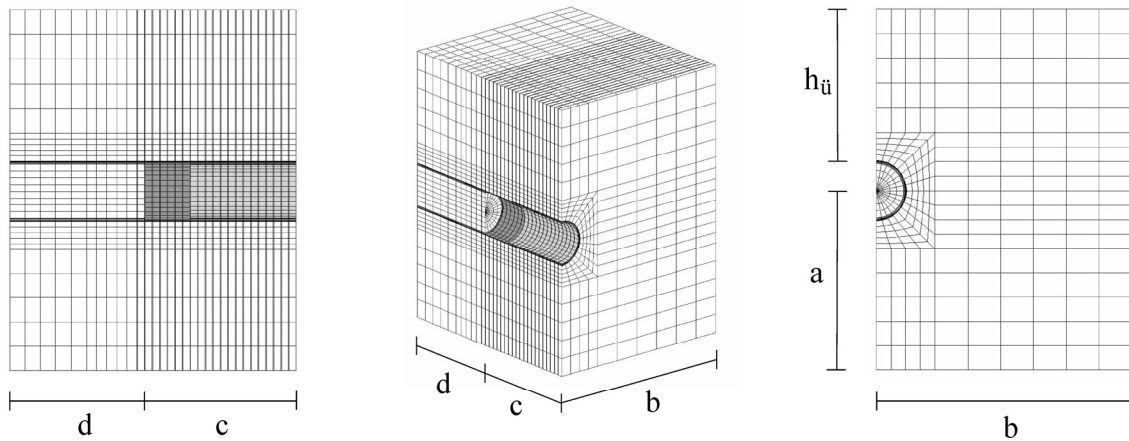
## 2 Numerische Berechnungen

Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei einem maschinellen Tunnelvortrieb mit Tübbingsicherung wurden umfangreiche Sensitivitätsstudien an einem dreidimensionalen numerischen Simulationsmodell durchgeführt. Für die dreidimensionalen numerischen Analysen kam das Programmsystem  $FLAC^{3D}$  (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3-D) zum Einsatz, welches auf der expliziten Finiten Differenzen Methode (FDM) beruht.

### 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 (Meißner 1996) 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 Tübbinggelenken. Entsprechend den Empfehlungen des DAUB (DAUB 2005) wurde lediglich eine Bettung über einen Sektorbereich in der Sohle des Schildmantels angesetzt.



**Bild 2** Diskretisierung des numerischen Berechnungsmodells TBM-S

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 Er-

satzwichte 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.

| 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           |

**Tabelle 1** Materialkennwerte Schildmantel, Tübbingausbau und Kiesverfüllung

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 genannten Stoffgesetzes, dem Ubiquitous joint model, verwendet. 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  $h_{\bar{u}}$ , 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. Auf die weitere Darstellung der Untersuchungen, bei denen der Einfluss einer Trennflächenschar mit dem Ubiquitous joint model analysiert wurde, wird im Folgenden nicht näher eingegangen.

| 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 $h_{\bar{u}}$                   | [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     |

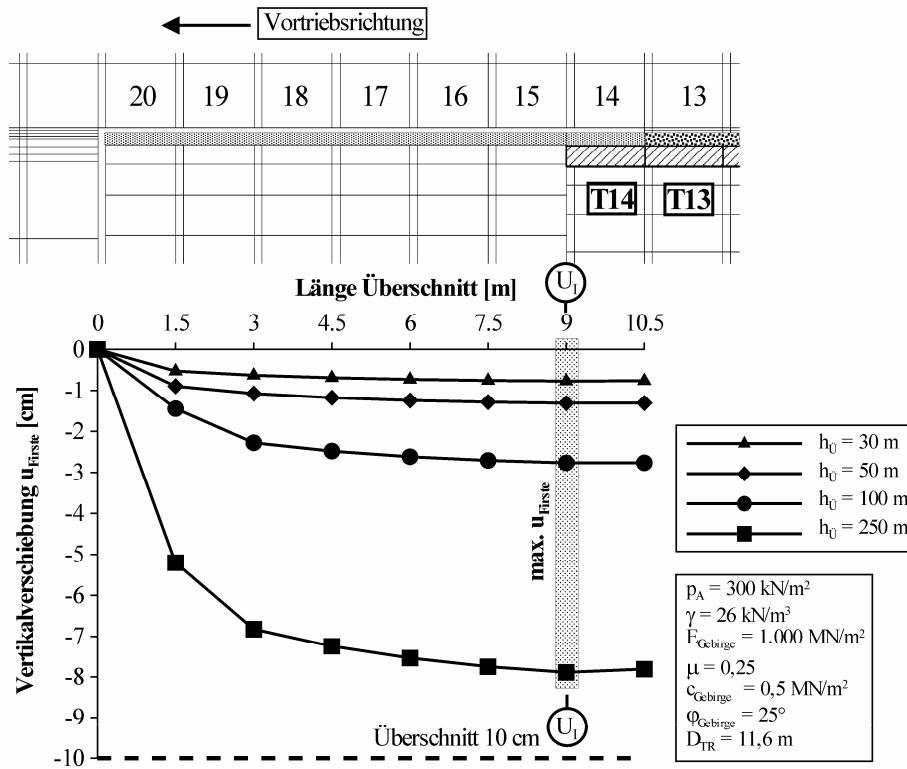
**Tabelle 2** Bandbreite Parameter (isotrope Materialeigenschaften Gebirge)

## 3 Berechnungsergebnisse

Auf eine umfassende Darstellung der Berechnungsergebnisse wird im Rahmen dieses Beitrags aufgrund des Umfangs der Ergebnisse verzichtet. Vielmehr sollen exemplarisch und schematisch nur einzelne Berechnungsergebnisse gezeigt und erläutert werden. Eine ausführliche Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt an einer anderen Stelle.

Die maximale Verschiebung nach der Herstellung des Überschchnitts ergibt sich im Bereich des Schildschwanzes (Schnitt  $U_I$ - $U_I$ , Bild 3). Mit zunehmender Überlagerungshöhe  $h_{\bar{u}}$  nehmen die Vertikalverschiebungen in der Firste entsprechend stark zu. Bei Betrachtung der Radialverschiebungen zeigt sich in allen Berechnungen, dass sich die ma-

ximalen Verschiebungen in der Firste einstellen. Daher wird als maßgebendes Kriterium für die Beurteilung des Risikos der Verklemmung des Schildmantels die vertikale Firstverschiebung  $u_{\text{Firste}}$  betrachtet. Die Berechnungen zeigen, dass sich der maßgebende Einfluss auf die Größe der vertikalen Firstverschiebung  $u_{\text{Firste}}$  durch die Überlagerungshöhe, den E-Modul des Gebirges sowie durch die Scherfestigkeiten des Gebirges ergibt (Tab. 3).



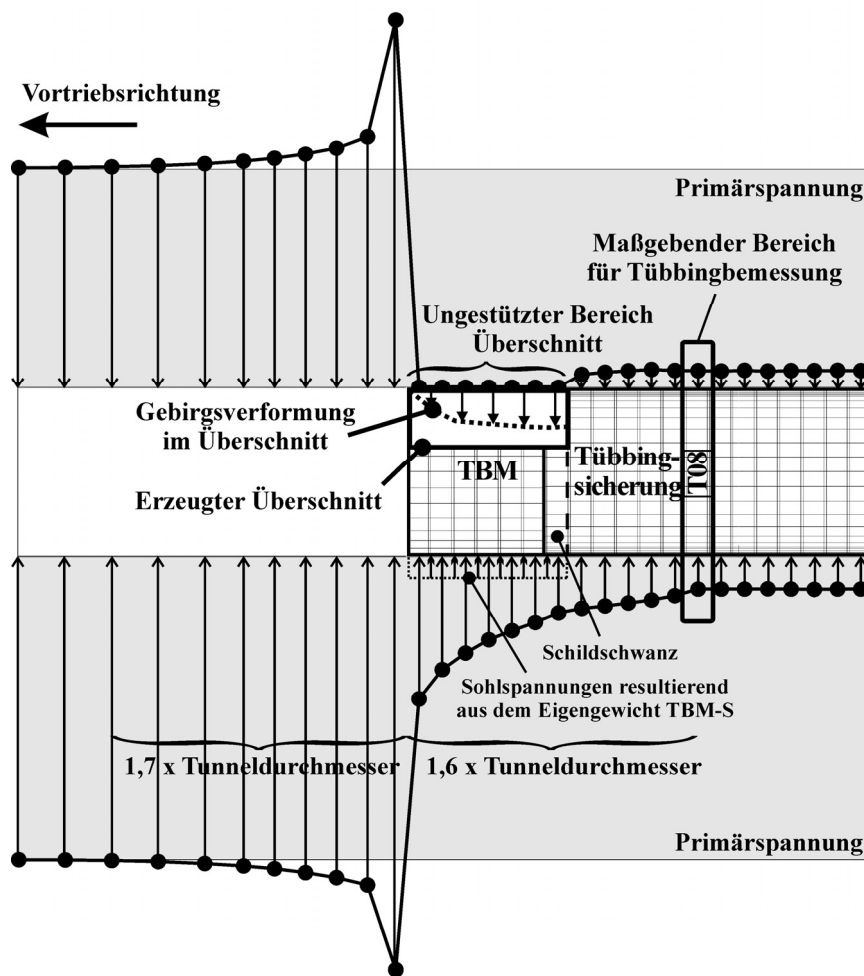
**Bild 3** Vertikalverschiebung der Firste im Längsschnitt des Überschnitts

In Bild 4 ist in einer Schemaskizze die Gebirgsverformung im ungestützten Bereich des Überschnitts und die dazugehörige Spannungumlagerung, die im Ausbruchsbereich in der Firste und in der Sohle in den durchgeführten numerischen Studien berechnet wurde, dargestellt. Diese Skizze zeigt, wie komplex die Spannungumlagerung in den einzelnen Bereichen des Tunnelvortriebs ist. Bei dem Vortrieb mit einer TBM-S kommt es im Abstand des ca. 1,7-fachen Tunneldurchmessers vom Bohrkopf unabhängig von der Größe des Tunneldurchmessers zu einem zunächst leichten Anstieg der Radialspannungen, der sehr stark bis vor den Bereich der Ortsbrust anwächst. Im Bereich des Überschnitts ergeben sich im Randbereich durch die fehlende Stützung bzw. den fehlenden Gegendruck keine Radialspannungen in der Firste. Nachdem die Tübbingsicherung im Schildschwanz eingebaut und der Ringspalt verfüllt wird, steigen die Spannungen in der Firste an, bis es in einem Abstand des ca. 1,6-fachen Tunneldurchmessers bezogen auf die Ortsbrust unabhängig von der Größe des Tunneldurchmessers zu einem konstanten

Spannungswert kommt. Für die Radialspannungen im Ulmenbereich, welche in Bild 4 nicht dargestellt sind, ergibt sich qualitativ der gleiche Verlauf wie in der Firste.

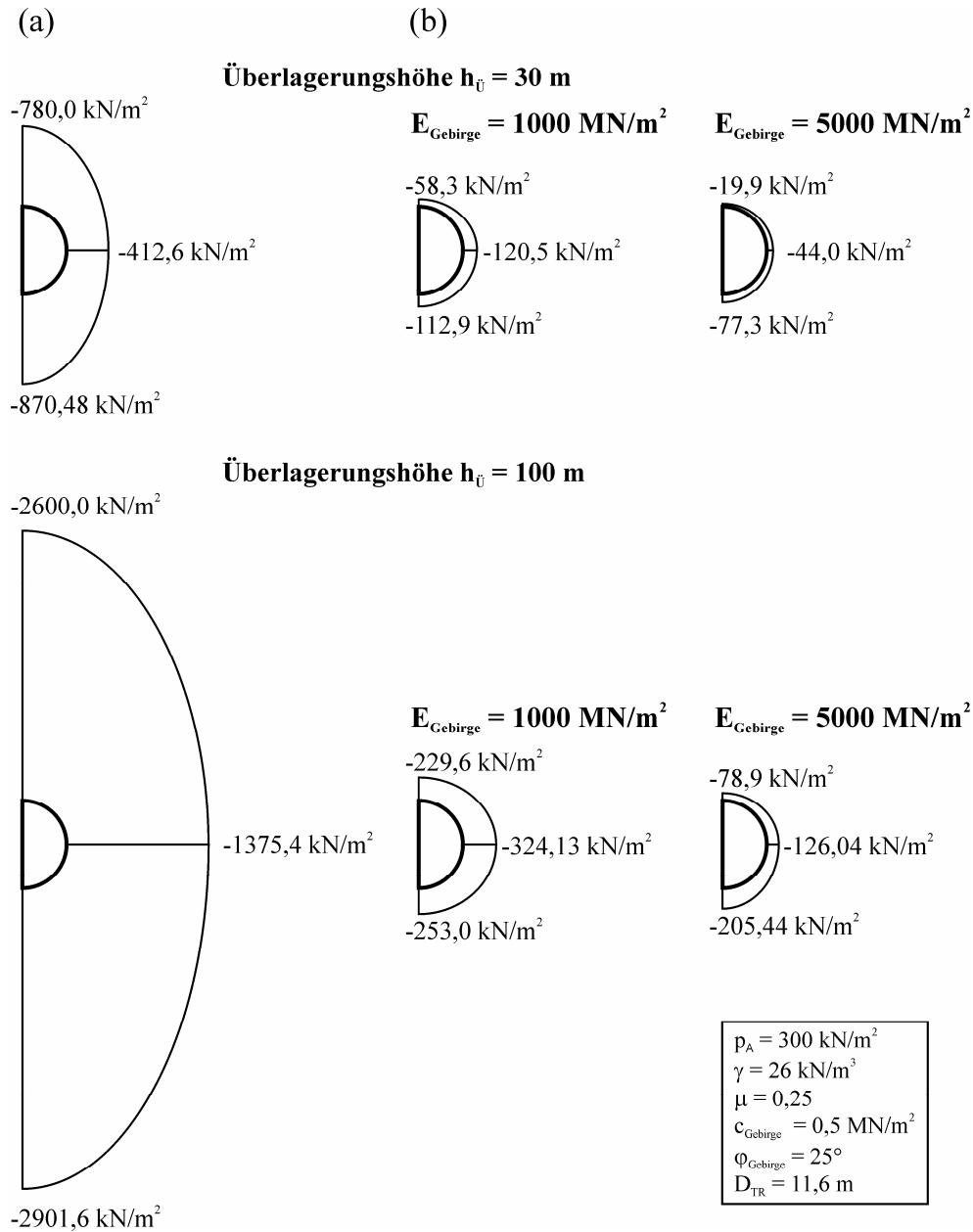
Im Sohlbereich, in dem die TBM-S auf der Sohle aufliegt, zeigt sich, dass die Radialspannungen kontinuierlich abnehmen, bis sich entsprechend dem Verlauf in der Firste ein konstanter Spannungsverlauf in einem Abstand des 1,6-fachen Tunneldurchmessers bezogen auf die Ortsbrust abzeichnet. Im Sohlbereich wirkt das Eigengewicht der TBM-S (Bild 4). Das bedeutet, dass in den berechneten Sohlspannungen im Bereich der TBM-S ca.  $250 \text{ kN/m}^2$  aus dem Eigengewicht der TBM-S resultieren. Diese temporäre Belastung ist im Bereich der Tübbingsicherung unwirksam und somit Ursache für die abnehmenden Radialspannungen im Sohlbereich.

Für eine Bemessung der Tübbingsicherung sind die Gebirgsspannungen, die in einem Abstand des 1,6-fachen Tunneldurchmessers bezogen auf die Ortsbrust auftreten, als maßgebend zu betrachten (Bild 4).



**Bild 4** Schemaskizze Gebirgsverformung im Überschchnitt und Spannungsumlagerung im Gebirge bei einer TBM-S

Das Bild 5 zeigt beispielsweise einen Vergleich zwischen den berechneten Gebirgsspannungen, die im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsstudien im maßgebenden Bereich für die Tübbingbemessung ermittelt wurden (Bild 5(b)), und den in der Praxis allgemein üblichen Lastansätzen zur Bemessung einer Tüblingsicherung (Bild 5(a)).



**Bild 5** Vergleich (a) Lastansätze entsprechend DGEG (DGEG 1980) mit (b) Berechnete Gebirgsspannungen Sensitivitätsstudien

Die in der Praxis verwendeten Lastansätze beruhen auf den Empfehlungen der DGEG (DGEG 1980), welche sich auf Schildvortriebe im Lockergestein beziehen. Diese Empfehlungen gelten für Tunnel bei geringer bis mäßiger Tiefenlage. Eine Abgrenzung des



Begriffs mäßige Tiefenlage erfolgt dabei nicht. Allerdings werden in den Empfehlungen Aussagen zur Modellbildung bei Tunneln mit einer Überlagerung, die größer oder gleich dem dreifachen Tunneldurchmesser ist, gegeben. Als stark vereinfachte zweidimensionale Berechnungsmodelle werden in den Empfehlungen z. B. Stabzugmodelle mit radialer Bettung vorgeschlagen. Als Belastung für diese Berechnungsmodelle wird der Überlagerungsdruck angesetzt, der sich aus dem Produkt der kompletten Überlagerungshöhe mit der Wichte des Gebirges ergibt.

In Bild 5 wird eindrucksvoll deutlich, dass diese Lastansätze im Vergleich zu den in den Sensitivitätsstudien ermittelten Gebirgsspannungen für einen maschinellen Vortrieb im Hartgestein schon für eine geringe Überlagerungshöhe von  $h_U = 30$  m sehr konservative Lastannahmen sind. Dieser Unterschied nimmt mit steigender Überlagerungshöhe extrem zu. Ebenso wird aufgrund der durchgeführten Sensitivitätsstudien unmissverständlich erkennbar, dass die mechanischen Materialeigenschaften des Gebirges z. B. die Steifigkeit einen nicht vernachlässigbaren Einfluss auf die Größe der Gebirgsspannungen haben (Bild 5(b)). Die durchgeführten Sensitivitätsstudien zeigen sehr anschaulich und sehr deutlich, dass eine eingehende Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei einem maschinellen Tunnelvortrieb mit Schild insbesondere auch durch eine messtechnische Begleitung zukünftiger Tunnelvortriebe dringend erforderlich ist, um realistischere und wirtschaftlichere Bemessungsansätze zu gewinnen.

| <b>Kenngröße</b>                                  | <b><math>u_{\text{Firste}}</math></b> | <b><math>\sigma_{r,F}</math></b> | <b><math>\sigma_{r,U}</math></b> | <b><math>\sigma_{r,S}</math></b> |
|---|---------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Wichte Gebirge $\gamma$                           | ++                                    | ++                               | ++                               | ++                               |
| E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}}$              | ++                                    | ++                               | ++                               | ++                               |
| Querdehnzahl $\mu$                                | 0                                     | 0                                | +                                | 0                                |
| Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{\text{Gebirge}}$ | ++                                    | ++                               | ++                               | ++                               |
| Kohäsion Gebirge $c_{\text{Gebirge}}$             | ++                                    | ++                               | ++                               | ++                               |
| Überlagerungshöhe $h_U$                           | ++                                    | ++                               | ++                               | ++                               |
| Außendurchmesser Tübbingring $D_{\text{TR}}$      | 0                                     | 0                                | ++                               | 0                                |
| Tübbingdicke $d_T$                                | -                                     | ++                               | +                                | ++                               |
| Anpressdruck $p_A$                                | 0                                     | 0                                | 0                                | 0                                |
| ++  | Kat. 1: Starker Einfluss              |                                  |                                  |                                  |
| +   | Kat. 2: Schwacher Einfluss            |                                  |                                  |                                  |
| 0   | Kat. 3: Kein Einfluss                 |                                  |                                  |                                  |

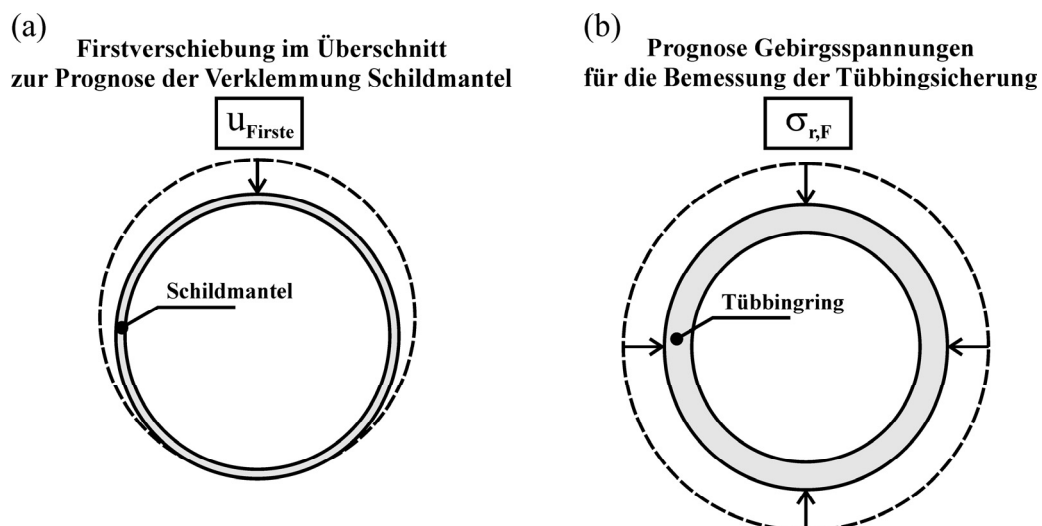
**Tabelle 3** Bewertung Einfluss Parameter ohne Berücksichtigung einer Trennflächenschar

In Tab. 3 ist zur Übersicht der Einfluss der verschiedenen in den Sensitivitätsstudien variierten Parameter auf die vertikale Firstverschiebung  $u_{\text{Firste}}$  im Bereich des Überschchnitts, die Radialspannung in der Firste  $\sigma_{r,F}$ , die Radialspannung in der Ulme  $\sigma_{r,U}$  und die Radialspannung in der Sohle  $\sigma_{r,S}$  im maßgebenden Bereich für die Tübbingbemessung zusammengestellt.

#### 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. Zum einen wurde ein Kriterium definiert, durch welches das Risiko der Verklebung des Schildmantels abgeschätzt bzw. die Größe des erforderlichen planmäßigen Überschchnitts bemessen werden kann (Bild 6(a), Gleichung (1) bis (7), Tab. 4). Zum anderen wurden Ansätze für die Radialspannungen des Gebirges für den Regelfall, d. h. für den Fall, dass der Überschchnittsbereich über die gesamte Schildmantellänge reicht, aufgestellt. Mit diesen Ansätzen für die Radialspannungen des Gebirges lässt sich, vorbehaltlich einer messtechnischen Verifikation, eine Bemessung der Tübbingsicherung durchführen. Exemplarisch ist hier nachfolgend der analytische Ansatz zur Prognose der Radial- bzw. Vertikalspannungen in der Tunnelfirste für den Fall eines isotropen Materialverhaltens des Gebirges dargestellt (Bild 6(b), Gleichung (8) bis (21)). 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 Anwendungsgrenzen dieser Ansätze sind auf die in Tab. 2 dargestellte Bandbreite beschränkt. Ebenso ist zu beachten, dass die Ansätze des Gebirgsdrucks für die Bemessung der Tübbingsicherung nur dann zur Anwendung kommen können, wenn das Kriterium für das Risiko der Verklebung des Schildmantels zeigt, dass der planmäßige Überschchnitt ausreichend dimensioniert ist und sich das Gebirge nicht auf den Schildmantel auflegen kann.



**Bild 6** Übersicht analytische Berechnungsformeln

Analytische Berechnungsformel zur Prognose der Verklemmung des Schildmantels

$u_{\text{Firste}}$ :

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

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

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

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

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

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

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

|     |                           |  |                      |
|-----|---------------------------|--|----------------------|
| 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                              | [-]                  |

| $\varphi_{\text{Gebirge}}$ | 15°                   | 20°                   | 25°                   | 30°                   | 35°                    | 40°                    | ≥45°                   |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| $a_{\varphi}$              | 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                    |
| $b_{\varphi}$              | 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                   |
| $c_{\varphi}$              | 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                    |
| $d_{\varphi}$              | 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                    |

Tabelle 4 Beiwerte

Analytische Berechnungsformel zur Prognose der Radialspannungen bzw. Vertikalspannungen in der Tunnelfirste  $\sigma_{r,F}$ :

$$\sigma_{r,F} = f_{L,F} \times f_{TD,F} \times k_F \times \eta_{RK,F} \quad (8)$$

$$f_{L,F} = 4,794 \times 10^{-2} \times \gamma_{\text{Gebirge}} - 0,253 \quad (9)$$

$$f_{TD,F} = 7,114 \times 10^{-3} \times d_T + 0,717 \quad (10)$$

$$k_F = (\alpha_F \times h_{\dot{U}}^2 \times a_F + \beta_F \times h_{\dot{U}} \times b_F + \chi_F \times c_F) \times mF_{\varphi,c} \quad (11)$$

$$\alpha_F = \frac{-0,00095}{\frac{1000}{E_{\text{Gebirge}}} \times 0,19 + 0,9} \quad (12)$$

$$\beta_F = \frac{-2,23613}{-0,0246 \times \left(\frac{E_{\text{Gebirge}}}{1000}\right)^2 + 0,7102 \times \frac{E_{\text{Gebirge}}}{1000} + 0,3151} \quad (13)$$

$$\chi_F = \frac{57,91231}{0,0961 \times \left(\frac{E_{\text{Gebirge}}}{1000}\right)^2 + 0,489 \times \frac{E_{\text{Gebirge}}}{1000} + 0,56} \quad (14)$$

$$a_F = \frac{1}{\frac{0,085}{c_{\text{Gebirge}}} + 0,9} \quad (15)$$

$$b_F = \frac{1}{0,7252 \times c_{\text{Gebirge}}^2 + 0,7802 \times c_{\text{Gebirge}} + 0,44} \quad (16)$$

$$c_F = \frac{1}{2,6752 \times c_{\text{Gebirge}}^2 + 5,6832 \times c_{\text{Gebirge}} + 1,1407} \quad (17)$$

$$mF_{\varphi,c} = nF_{\varphi} \times c_{\text{Gebirge}} + bF_{\varphi} \quad (18)$$

$$nF_{\varphi} = 0,0026 \times \varphi_{\text{Gebirge}} + 0,182 \quad (19)$$

$$bF_{\varphi} = 1,874757 \times \varphi_{\text{Gebirge}}^{-1,648} \quad (20)$$

$$\eta_{RK,F} = 1,06 \quad (21)$$

|     |                            |  |                      |
|-----|----------------------------|--|----------------------|
| mit | $\sigma_{r,F}$             | Radialspannung Firste                          | [kN/m <sup>2</sup> ] |
|     | $\gamma_{\text{Gebirge}}$  | 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> ] |
|     | $\varphi_{\text{Gebirge}}$ | Reibungswinkel Gebirge                         | [°]                  |
|     | $h_{\dot{U}}$              | Überlagerungshöhe                              | [m]                  |
|     | $d_T$                      | Tübbingdicke                                   | [cm]                 |
|     | $\eta_{RK,F}$              | Sicherheitsfaktor Fehler Regressionsfunktionen | [-]                  |
|     | $f_{L,F}$                  | Lastfaktor Wichte                              | [-]                  |
|     | $f_{TD,F}$                 | Einflussfaktor Tübbingdicke                    | [-]                  |

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei maschinell aufgefahrenden Tunnelvortrieben mit Tübbingsicherung wurden umfangreiche numerische Studien basierend auf der Finiten Differenzen Methode durchgeführt.

Auf der Grundlage der umfangreichen Berechnungsergebnisse der Sensitivitätsstudien, in denen die einzelnen maßgebenden stofflichen und geometrischen Parameter bestimmt und variiert wurden, erfolgte die Entwicklung einfacher analytischer Berechnungsansätze basierend auf Regressionsanalysen. Zum einen wurde ein Kriterium definiert, durch welches das Risiko der Verklemmung des Schildmantels abgeschätzt bzw. die Größe des erforderlichen planmäßigen Überschchnitts bemessen werden kann. Zum anderen wurden Ansätze für die Radialspannungen des Gebirges für den Regelfall, d. h. für den Fall, dass der Überschchnittsbereich über die gesamte Schildmantellänge reicht, zur Bemessung der Tübbingsicherung aufgestellt. Die entwickelten Ansätze liegen sowohl für den Fall des isotropen Materialverhaltens des Gebirges als auch für den Fall des 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 Radialspannungen im Gebirge bzw. Verschiebungen im Bereich des Schildmantels quantitativ verifizieren zu können. Eine messtechnische Verifizierung der analytischen Berechnungsansätze steht daher noch aus.

### Literatur

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

DGEG (1980)  
Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln im Lockergestein (1980) der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Taschenbuch für den Tunnelbau 1980, Verlag Glückauf GmbH, Essen

Meißner, H. (1996)  
Tunnelbau unter Tage. Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.