

Wittke:

Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein



## Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein

Professor Dr.-Ing. Dr.-Ing. E. h. Walter Wittke, Geschäftsführer, WBI – Prof. Dr.-Ing. W. Wittke  
Beratende Ingenieure für Grundbau und Felsbau GmbH, Aachen, Deutschland

Die Bemessung von Tübbings erfolgt in der Regel mit Stabwerksberechnungen nach dem Bettungsmodulverfahren. Dabei werden vertikale und horizontale Lasten sowie ein durch elastische Federn gebetteter Tübbingring zu Grunde gelegt. Bei flachliegenden Tunneln im Lockergestein hat diese Vorgehensweise über viele Jahre zu guten Ergebnissen geführt. Anders sieht das für einen Tübbingausbau in klüftigem Fels wie zum Beispiel im Sedimentgestein aus. Hier kommt es oft vor, dass die vertikalen Lasten große Werte annehmen und keine Horizontallasten auftreten, da die Ulmen meist standsicher sind. Das kann zu Beanspruchungen der Tübbingringe führen, die man mit den üblichen Lastansätzen nicht erkennt. Es kommt noch hinzu, dass für die Ringspaltverpressung häufig Mörtel verwendet werden, die nur wenig Zement, Sand und einen Überschuss von Wasser enthalten. In solchen Fällen erreicht der Ringspaltmörtel seine Festigkeit erst nach längerer Zeit und häufig auch nur dann, wenn er Überschusswasser in den Untergrund abgeben kann. In solchen Fällen fehlt es dann an einer ausreichenden Bettung und demnach kommt es zu ungünstigen Beanspruchungen. Dieser Effekt wird noch verstärkt, wenn in der Ulme geringdurchlässige Schichten anstehen und die Firste und die Sohle in durchlässigen Schichten zu liegen kommen. In der Tübbingstatik sowie bei Entwurf und Ausführung muss man diese Effekte berücksichtigen. Im Beitrag werden kurz die für einen wirklichkeitsnahen Standsicherheitsnachweis zu verwendenden Modelle für das Spannungsdehnungsverhalten von Fels dargestellt. Außerdem wird gezeigt, wie man die Beanspruchungen mit der Methode der Finiten Elemente berechnen kann. Die Vorgehensweise wird an Beispielen veranschaulicht.

**Shield Driven Tunnels in Sedimentary Rock, Special Aspects:** *The design of the segmental lining is normally carried out by means of the subgrade reaction method assuming vertical and horizontal loads and a segmental ring bedded by elastic springs. This method has been successfully applied for many years in case of tunnels with low overburden located in soil. In case of a segmental lining located in jointed rock, as for example in a sedimentary rock, the situation is different. In these cases high vertical loads and no horizontal loads occur pretty often since the side-walls in most cases are stable. As a result, the segmental rings may be subjected to loads that cannot be predicted with the usual design models and loads. In addition, the annular gap is often grouted with a mortar, which contains only little cement, sand and an excess of water. In such cases the mortar reaches its strength only after a long time and only if the excess water discharges into the ground. This may lead to insufficient bedding of the segmental ring and as a consequence to unfavorable loading. This effect is even worse if low permeable layers are present at the sidewalls and the roof and the invert are located in highly permeable layers. The article briefly represents the models for the stress-strain behavior that need to be applied for a realistic stability proof. Furthermore, it is shown how the stress resultants can be calculated using the finite element method. This approach is illustrated by means of examples.*

In den letzten Jahren kommen Schildvortriebe mit nachgezogenem, einschaligem Tübbingausbau bei Tunnelbauten im Sedimentgestein immer häufiger zum Einsatz. Dabei werden die bei der Tübbingbemessung im Lockergestein über viele Jahre hinweg verwendeten Ansätze für die Belastung und Bettung sehr häufig kritiklos auf die Verhältnisse im klüftigen Fels übertragen (Bilder 1 und 2) [1].

### Last- und Bettungsansätze

Im Fels kann es aber durchaus vorkommen, dass der Hohlraum im Bereich des Schilds und auch dahinter standsicher ist und der Tübbingring dementsprechend keine äußere Belastung erfährt. Wird in solchen Fällen der Ringspaltmörtel zu spät eingebracht, so ist der Ring nur durch sein Eigengewicht belastet und erfährt keine Bettung. Ein solcher Fall, bei dem der Tübbingring nur im Sohlbereich gebettet ist, wurde in einer 2D-FE-Berechnung untersucht (Bild 3). Dabei

ergaben sich große Verschiebungen und hohe Beanspruchungen, besonders im Bereich der Fugen als Folge großer Winkelverdrehungen. Ein entsprechendes Beispiel aus der Praxis zeigt das Bild 4. Man erkennt, dass in einem solchen Fall große Schäden am Tübbingring entstehen.

In Sedimentgesteinen werden häufig horizontale, durchgehende Schichtfugen mit begrenzter Scherfestigkeit angetroffen. Darüber hinaus sind solche Gesteine häufig senkrecht zur Schichtung geklüftet, wobei die Klüfte oft an den Schichtfugen absetzen (Bild 5). In Fällen, in denen die in-situ-Spannungen in horizontaler Richtung klein sind, kann sich bei solchem Gebirgsverhalten oft kein Gewölbe ausbilden. Auf diese Weise kann sich im Bereich des Schilds oberhalb des Steuerspalts eine Auflockerungszone ausbilden, die eine relativ hohe Vertikallast auf den Tübbingring bewirkt (Bild 6). In horizontaler Richtung ist bei solchem Gebirgsverhalten dagegen nicht mit einer nennenswerten Horizontallast zu rechnen. Auf diese Weise kommt eine sehr ungünstige Belastung des

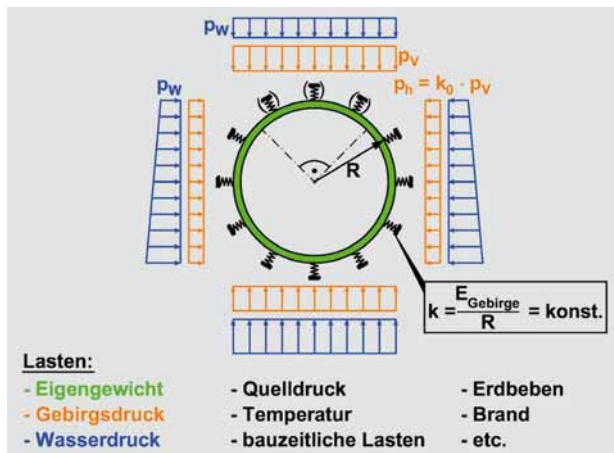


Bild 1. Belastung und Bettung, Lockergestein.

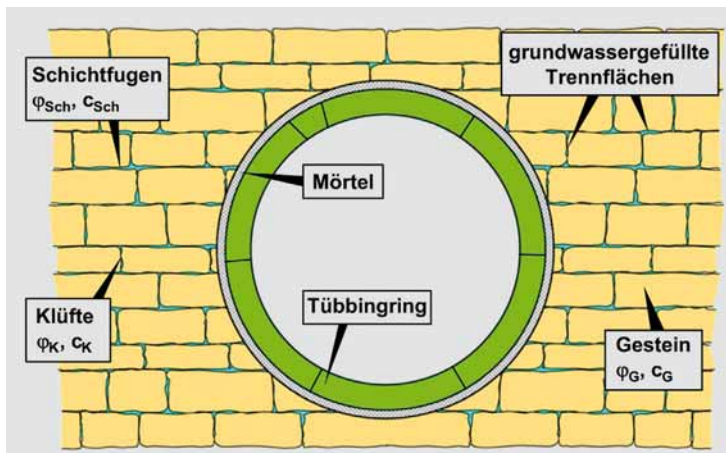


Bild 2. Tübbingausbau im klüftigen Fels.

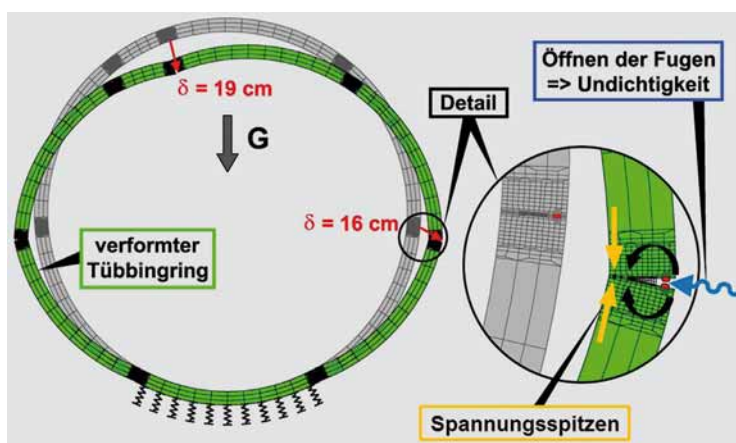


Bild 3. Fehlende Horizontalbelastung und Bettung.



Bild 4. Schäden infolge fehlender Horizontalbelastung und Bettung.

Tübbingringszustände, mit der man im Lockergestein üblicherweise nicht rechnen muss.

### Ringspaltmörtel

Die Zementmörtel zur Ringspaltverpressung besitzen in der Regel geringe Zementanteile mit einem hohen W/Z-Faktor. Die Streubreiten der Massenanteile der verwendeten Komponenten für Ringspaltmörtel von 21 Projekten sind im Bild 7 zusammengestellt.

Die Folge dieser Zusammensetzungen sind geringe E-Moduln, die sich zudem nur langsam entwickeln. Die Bettung des Tübbingrings stellte sich deshalb häufig erst weit hinter der temporären Ortsbrust ein (Bild 8). Darüber hinaus ist die zeitliche Entwicklung des E-Moduls von den Drainagebedingungen, das heißt vom  $k_f$ -Wert des Baugrunds, abhängig. So entwickelt sich der Steifemodul eines Mörtels mit  $50 \text{ kg/m}^3$  Zementanteil wesentlich günstiger bei dränierten als bei undrännierten Bedingungen (Bild 9).

### Felsmechanisches Modell und Berechnungsverfahren

Das im Abschnitt „Last- und Bettungsansätze“ skizzierte Beispiel zeigt die Bedeutung des den

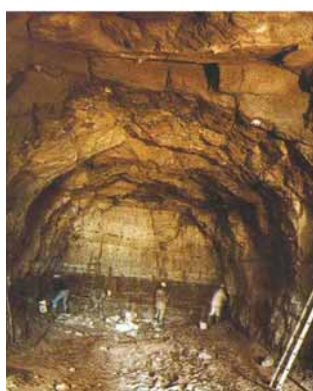


Bild 5. Ortsbrust im Stubensandstein.

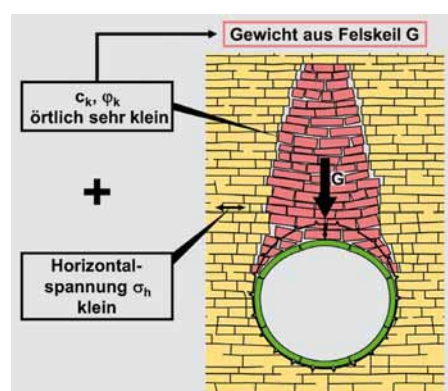


Bild 6. Fehlende Gewölbewirkung im Sedimentgestein.

statischen Berechnungen zu Grunde gelegten felsmechanischen Modells. Wesentlich ist die Erfassung der Anisotropie im elastischen Bereich. Weiterhin muss die durch die Trennflächen bedingte Festigkeitsanisotropie in der Statik berücksichtigt werden (Bild 10) [2].

Als Berechnungsverfahren hat sich die Methode der Finiten Elemente bewährt. Hiermit gelingt es, bei Verwendung geeigneter Programme das Zusammenwirken von Gebirge und Auskleidung

Wittke:  
Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein

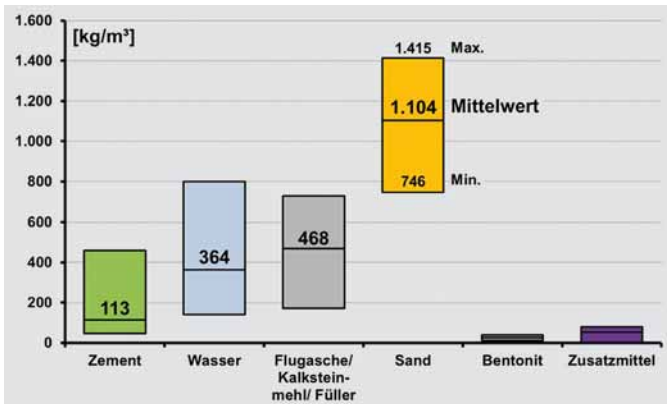


Bild 7. Zusammensetzung von Ringspaltmörteln.

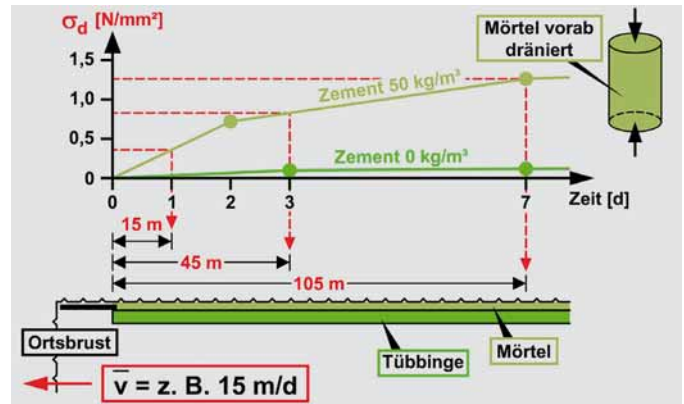


Bild 8. Versuche zur Mörtelfestigkeit und Übertragung auf den Vortrieb.

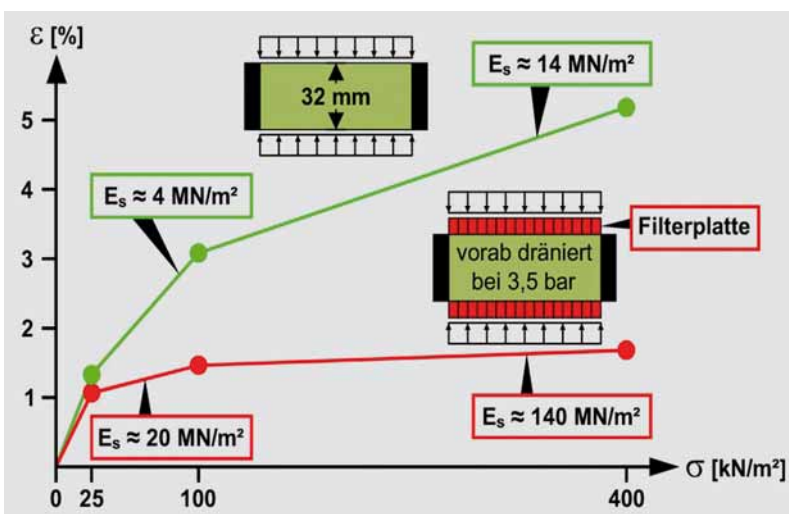
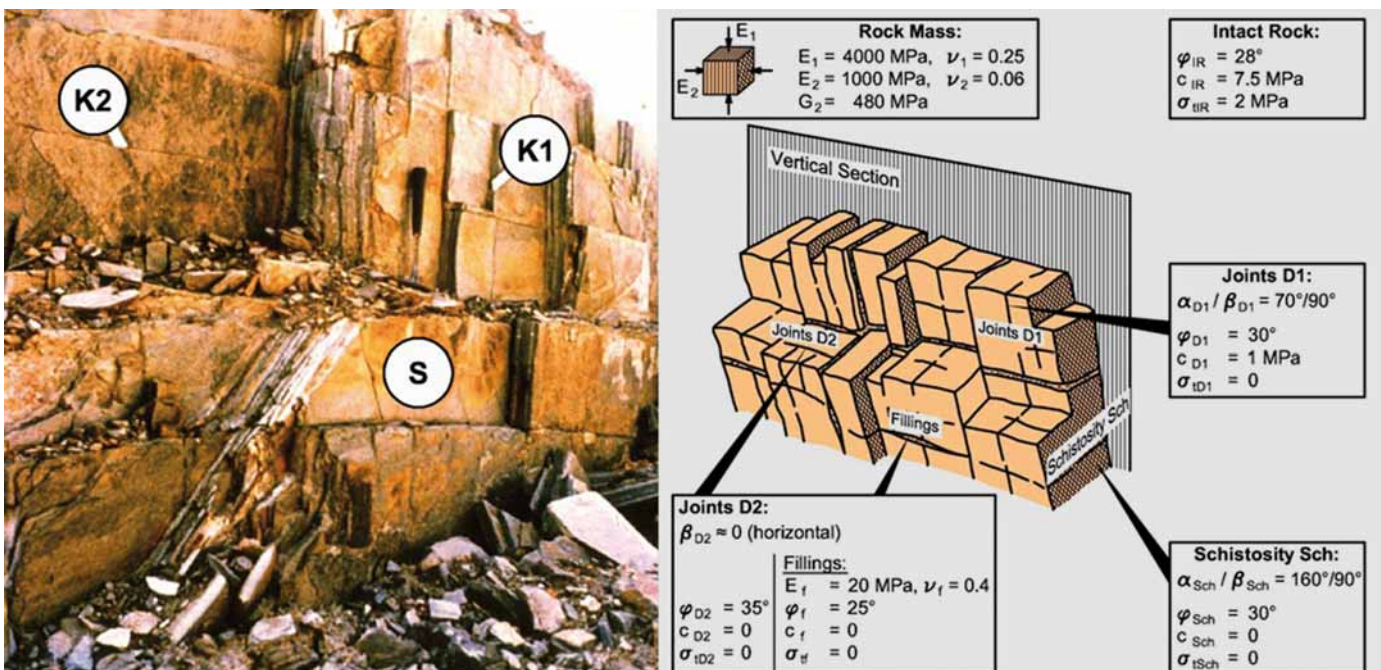


Bild 9. Kompressionsversuche bei Frischmörtel.

wirklichkeitsnah zu erfassen [2]. Dazu gehört die Diskretisierung des Tübbingrings durch mindestens drei Reihen gekrümmter, isoparametrischer Elemente ebenso wie die Nachbildung der Fugen und der Dichtung sowie der Verschraubung durch gesonderte Stabelemente. Ebenso sollte der Ringspaltmörtel durch eine gesonderte Elementreihe mit seinen Eigenschaften berücksichtigt werden (Bilder 11 und 12).

In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung können die Berechnungen räumlich mit Berücksichtigung der Spannungen und Verschiebungen im Bereich des Vortriebschildes durchgeführt werden. In der Regel reichen jedoch zweidimensionale oder besser pseudoräumliche Berechnungen aus, um die Beanspruchung des Tübbingrings genau genug zu erfassen. Im letztgenannten Fall wird die räumliche Wirkung näherungsweise durch eine Vorentspannung berücksichtigt [2, 3].

Bild 10. Beispiel für ein felsmechanisches Modell.



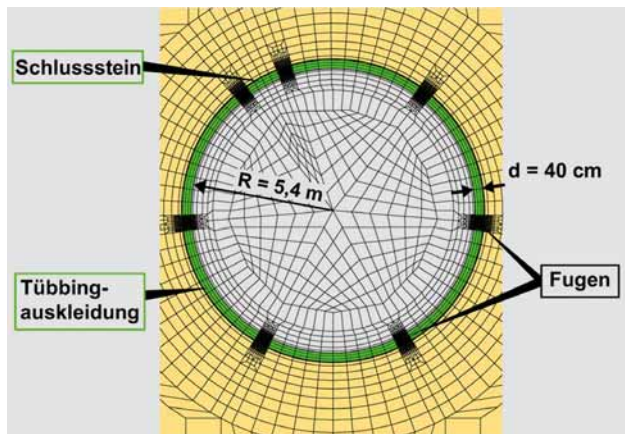


Bild 11. FE-Netz, Detail Tunnel.

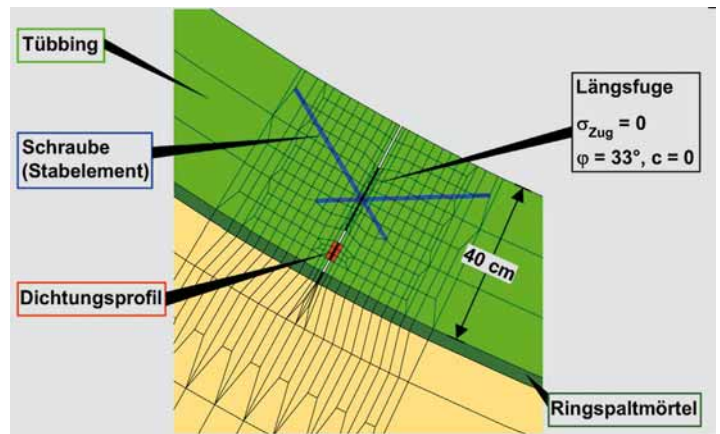


Bild 12. FE-Netz, Detail Fuge.

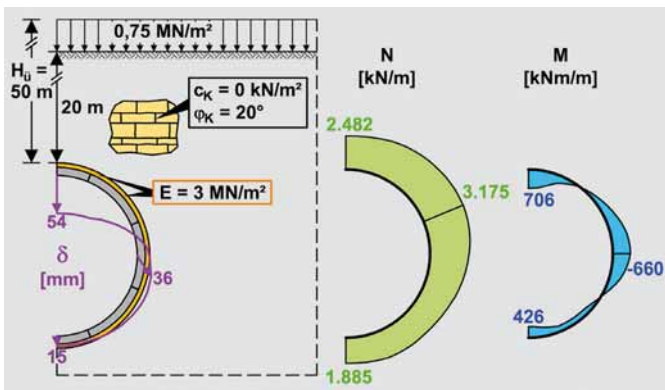


Bild 13. Fall B, Mörtel „weich“.

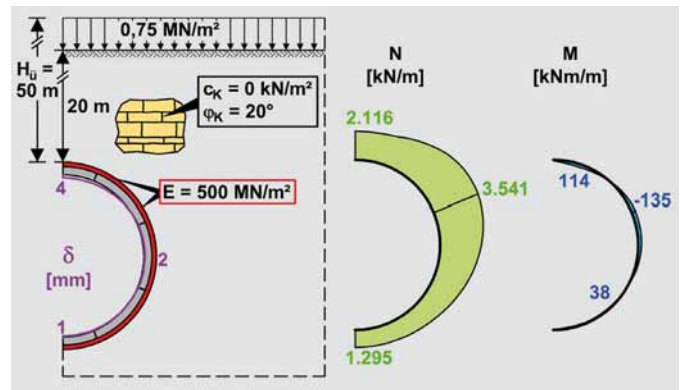


Bild 14. Fall A, Mörtel „steif“.

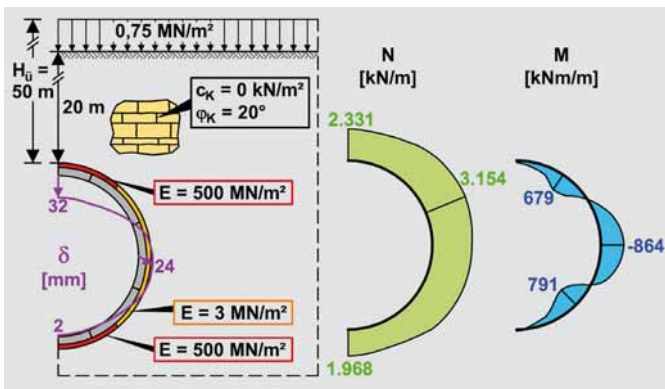


Bild 15. Fall C, Mörtel in der Firste und Sohle „steif“ und in der Ulme „weich“.

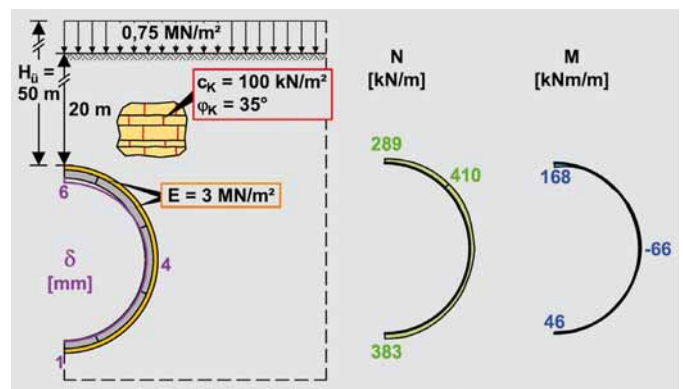


Bild 16. Fall D, Mörtel „weich“, erhöhte Scherfestigkeit auf den Klüften.

### Beispiele

Für eine kleine Parameterstudie wird ein Tunnel mit einem Innendurchmesser von 9 m, der mit Tübbings 40 cm dick ausgekleidet ist, untersucht (Bild 13). Der Tunnel liegt in einem Sedimentgestein mit horizontaler Schichtung und vertikaler Klüftung.

Die Kohäsion auf der Schichtung wird in allen Fällen zu  $c_s = 0$  und der Reibungswinkel zu  $\varphi_s = 30^\circ$  angenommen. Der E-Modul des Felses beträgt einheitlich  $E = 2.000$  MPa. Variiert werden die

Scherparameter auf der vertikalen Klüftung und der E-Modul des Ringspaltmörtels.

Im ersten Fall wurde für den E-Modul des Ringspaltmörtels ein Wert von nur  $3$  MN/m<sup>2</sup> angenommen (Bild 13). Im zweiten Fall (Bild 14) wurde ein E-Modul von  $E = 500$  MN/m<sup>2</sup> und im dritten Fall werden im First- und Sohlbereich  $E = 500$  MN/m<sup>2</sup>, im Ulmenbereich aber nur  $E = 3$  MN/m<sup>2</sup> zu Grunde gelegt (Bild 15). Man erkennt, dass sich die Normalkräfte in den drei Fällen nur wenig voneinander unterscheiden,

Wittke:

Besonderheiten bei schildvorgetriebenen Tunneln im Sedimentgestein

während die Biegemomentenverteilung sehr unterschiedlich ist (Bilder 13 bis 15).

Sehr günstig wirkt sich eine Vergrößerung der Scherparameter auf der Klüftung aus. Die Normalkräfte gehen auf circa 1/10 zurück, und es treten kaum noch Biegemomente auf (Bild 16).

### Zusammenfassung

Bei Schildvortrieben mit einem einschaligen Tübbingausbau im Sedimentgestein ist eine wirklichkeitsnahe Berücksichtigung des Zusammenwirkens von Fels und Tübbingring beim statischen Nachweis sehr wichtig. Die Festigkeit auf den Trennflächen und der E-Modul des Ringspaltmörtels haben einen großen Einfluss auf die Beanspruchung des Tübbingrings.

Als Berechnungsverfahren eignet sich bei Auswahl entsprechender Programmsysteme am besten die Methode der Finiten Elemente.

An Beispielen wird gezeigt, dass sich ein geringer E-Modul des Ringspaltmörtels und geringe Scherparameter auf vertikalen Klüften ungünstig auf die Beanspruchung der Tübbingringe auswirken.

### Quellenverzeichnis

- [1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik/Arbeitskreis Tunnelbau: Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“ ETB. 1995, Ernst & Sohn, Berlin, (1995).
- [2] Wittke, W.: Tunnelstatik, Grundlagen. Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 4, Verlag Glückauf GmbH, Essen, (1999).
- [3] Wittke, W.; Druffel, R.; Erichsen, C.; Gattermann, J.; Kiehl, J.; Schmitt, D.; Tegelkamp, M.; Wittke, M.; Wittke-Gattermann, P.; Wittke-Schmitt, B.: Statik und Konstruktion maschineller Tunnelvortriebe. WBI-PRINT 6, Verlag Glückauf GmbH, Essen, (2006).