

Einfluss der stofflichen Modellierung auf die numerische Simulation eines Schildvortriebs

J. Schmitt, M. Fritsch, C. Kuhn, J. Stahlmann

Institut für Grundbau und Bodenmechanik
der Technischen Universität Braunschweig, Germany

Summary

In tunneling the engineer is challenged by the save and economic design of the tunnel lining. Simplifications of the complex spatial structure and the non-linear material behaviour in analytical procedures often lead to overdimensioned solutions. Numerical computation in order to simulate the three-dimensional geometry and the interaction between lining and soil is applied to achieve economic design results.

In the range of the research activities of the Institute of Soil Mechanics and Foundation Engineering of the Technical University of Braunschweig a three-dimensional numerical model was developed in ANSYS to simulate the tunnel driving with a shield machine. As basis for the numerical model the typical characteristics of an EPB-Shield (Earth Pressure Balanced Shield) was used. With the numerical model several calculations have been carried out.

With these calculations especially the influence of the material behaviour of the gapbackfilling and the overburden was investigated. The internal forces and moments of the tubbing segments and the settlement of the ground surface were analysed.

Keywords

civil engineering, geotechnics, tunnelling, shield driving

1. Einleitung

Bei der Bemessung von Tunnelbauwerken steht der Ingenieur vor der Herausforderung, neben der standsicheren Konstruktion auch eine wirtschaftliche Lösung zu entwickeln. Die klassischen analytischen Berechnungsmodelle liefern in der Regel standsichere aber auch überdimensionierte und daher unwirtschaftliche Tunnelbauwerke, da das räumliche Tragverhalten, der Bauablauf und das Materialverhalten der Sicherungsmittel nicht bzw. nur stark vereinfacht abgebildet werden können. Um eine wirtschaftlichere Lösung zu erhalten, kommen daher verstärkt numerische Berechnungsmodelle zum Einsatz, mit denen das räumliche Tragverhalten des Bauwerks und der Bauablauf des Tunnelvortriebs besser abgebildet werden können.

Am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB-TUBS) ist der Tunnelbau ein Forschungsschwerpunkt. Im Rahmen der Forschungsaktivitäten wurde ein dreidimensionales numerisches Modell mit der Finite-Elemente-Software ANSYS entwickelt, um den Tunnelvortrieb mit einer Schildmaschine zu simulieren. Mit diesem Modell wurden Variationsberechnungen durchgeführt, um die verschiedenen Einflüsse zu untersuchen, die sich aus dem Bauablauf und dabei insbesondere der Vortriebsgeschwindigkeit, den Materialeigenschaften der Ringspaltverfüllung und den Überlagerungshöhen ergeben. Im Folgenden werden der Bauablauf und die Bautechnik beim Vortrieb mit einer Schildmaschine dargestellt, die Umsetzung in ein numerisches Modell erläutert und die Ergebnisse der Parametervariationen vorgestellt.

2. Bauablauf und Bautechnik beim Tunnelvortrieb mit einer Schildmaschine

Im maschinellen Tunnelbau gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Schildmaschinen, die je nach anstehendem Untergrund (z.B. Lockerboden oder Festgestein), hydrogeologischen Verhältnissen, bauablaufbedingten Verhältnissen und geometrischen Randbedingungen zum Einsatz kommen. Ebenso kann in verschiedene Klassen von Schildmaschinen bzgl. der Ortsbruststützung unterschieden werden. Hier sind exemplarisch der Erddruckschild, der Druckluftschild oder der Flüssigkeitsschild (z.B. Hydro- oder Bentonitschild) zu nennen. Nachfolgend werden der Bauablauf und die Bautechnik für einen Erddruckschild beschrieben, der als Grundlage für das hier vorgestellte numerische Modell diente.

Das Haupteinsatzgebiet des Erddruckschildes oder EPB-Schildes (Earth Pressure Balanced Shield) sind Lockerböden, die einen hohen Ton- oder Schluffanteil mit geringer Wasserdurchlässigkeit aufweisen. In Fig. 1 ist der schematische Aufbau eines Erddruckschildes dargestellt.

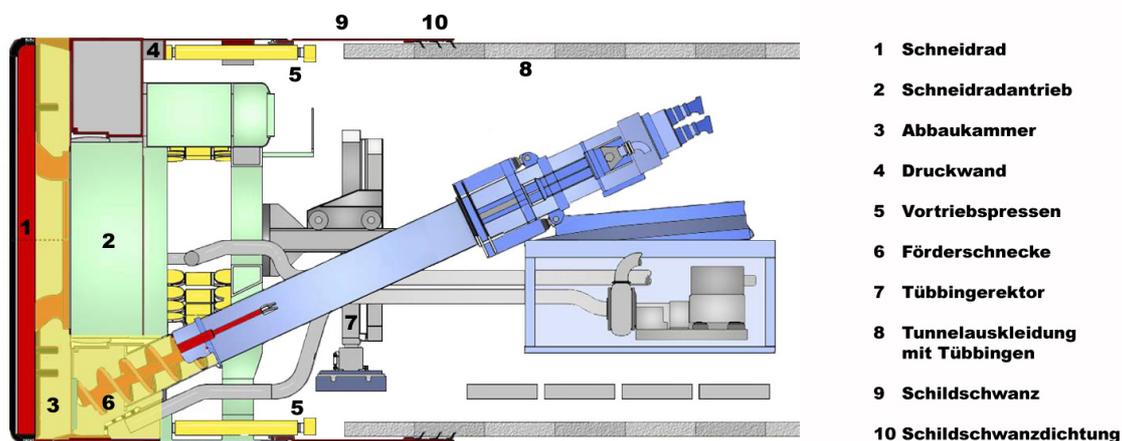


Fig. 1: Schematischer Aufbau eines Erddruckschildes

Um in nicht standfesten Böden einen Tunnel aufzufahren, muss zur Ortsbruststützung vor dem Schneidrad (1) in der Schildmaschine ein Stützdruck aufgebaut werden. Im Fall des Erddruckschildes geschieht dies dadurch, dass der an der Ortsbrust anstehende Boden durch das Schneidrad gelöst und durch die Öffnungen des Schneidrades in die Abbaukammer (3) gedrückt wird. Dort wird der gelöste Boden mit dem bereits vorhandenen Erdbrei vermischt. Über die Druckwand (4) wird die Vortriebspresenkraft (5) auf den Erdbrei übertragen, um damit ein unkontrolliertes Eindringen des Bodens in die Abbaukammer zu verhindern. Mit der Förderschnecke (6) wird der in der Abbaukammer

unter Druck stehende Erdbrei gefördert und anschließend z.B. über Förderbänder oder Lastkraftwagen aus dem Tunnel abtransportiert. Im Schildschwanz (9) werden durch einen Errektor (7) Tübbingsegmente (8) als temporäres Sicherungsmittel in den Tunnel eingebaut. Auf den zuletzt eingebauten Tübbingring stützen sich dann die Vortriebspresen (5) ab.

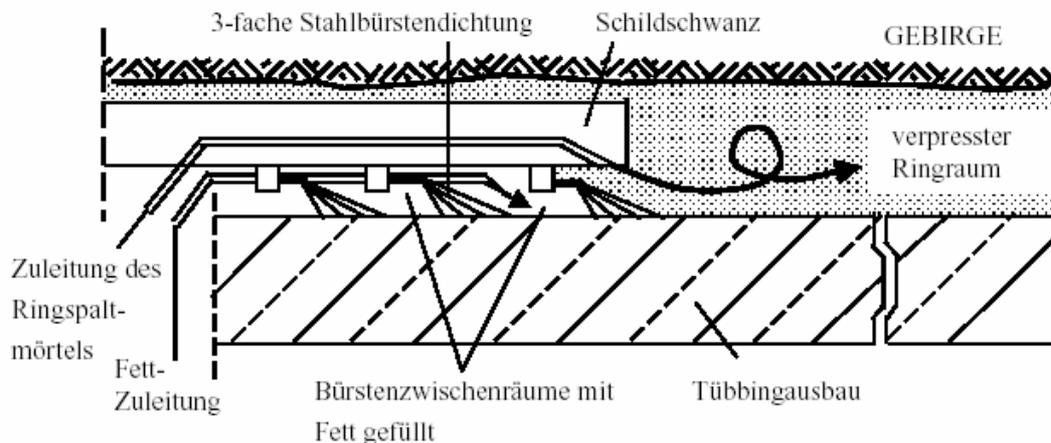


Fig. 2: Ringspalt bei einer Schildschwanzdichtung mit Stahlbürsten

Das Vorpressen des Schildes führt dazu, dass sich zwischen dem Schildschwanz und dem Tübbingring ein Freiraum bildet, der als Ringspalt oder Ringraum (Fig. 2) bezeichnet wird. Dieser Ringspalt muss mit Verpressmörtel verfüllt werden, um Auflockerungen und damit Lastumlagerungen des umgebenden Bodens zu minimieren, die zu zusätzlichen Setzungen an der Geländeoberfläche führen. Bei der Ringspaltverpressung können zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz kommen. Der Verpressmörtel kann entweder durch Rückschlagventile in den einzelnen Tübingelementen oder an der Dichtung vorbei durch den Schildschwanz eingebracht werden. Bei der Einbringung des Verpressmörtels ist dabei darauf zu achten, dass die Rohre, durch die das Verpressgut eingebracht wird, bei einem Stillstand der Maschine nicht verstopfen, indem das Verpressgut entsprechend fließfähig ist bzw. eine besondere Abbindeverzögerung enthält. Dieses wird jedoch erschwert durch die Forderung, dass der Verpressmörtel durch einen schnellen Erhärtungsvorgang eine große Steifigkeit aufweisen soll, um Spannungsumlagerungen zu minimieren. Diese sich widersprechenden Anforderungen bedingen, dass bei der Festlegung der Materialkennwerte für den Verpressmörtel eine Kompromisslösung gefunden werden muss.

3. Numerische Modellierung des Erddruckschildes

Das hier vorgestellte numerische Modell eines Erddruckschildes wurde mit der Finite-Elemente-Software ANSYS Vers. 7.0 erstellt. Die Erstellung des numerischen Modells lässt sich in die folgenden drei Schritte unterteilen:

- Geometrische Modellierung
- Stoffliche Modellierung
- Belastungsansätze und Lastfälle

Die einzelnen Modellierungsschritte werden im Folgenden beschrieben.

3.1 Geometrische Modellierung

Das geometrische Modell (Fig. 3) wurde mit dreidimensionalen Elementen des Typs Solid95 mit quadratischen Verschiebungsansätzen generiert. Die Abmessungen des Berechnungsmodells wurden entsprechend den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik festgelegt [1]. Danach wurde bei einem Durchmesser des Tunnelquerschnitts von $d = 11,0$ m ein seitlicher Abstand zum Rand von 45 m entsprechend $4d$ bis $5d$ und ein Abstand vom unteren Rand von 30 m entsprechend $2d$ bis $3d$ gewählt. Die

Tunnelüberlagerung wurde im Rahmen der Parameterstudie variiert. Dafür wurden Überlagerungen von 10 m, 20 m und 30 m abgebildet.

ANSYS

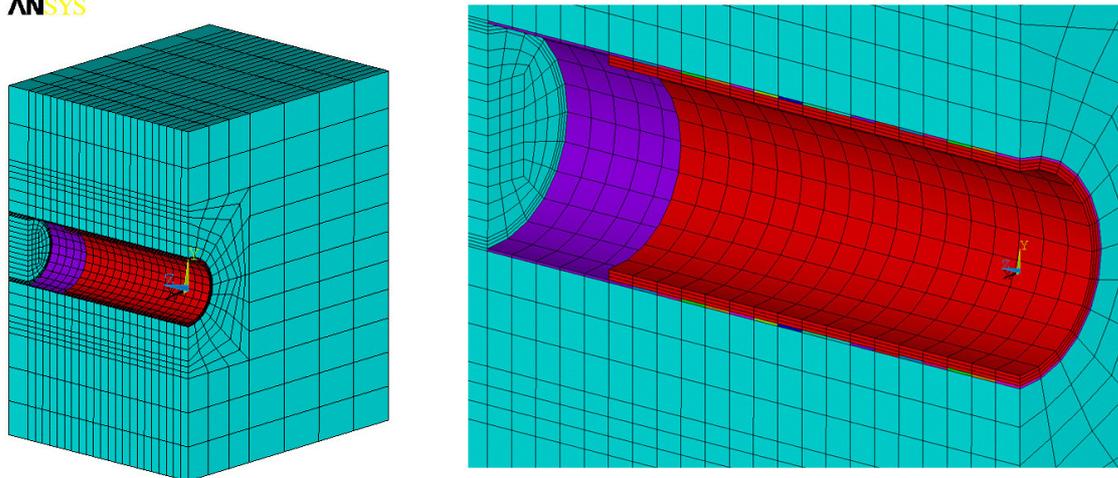


Fig. 3: Dreidimensionales numerisches Modell des Tunnelvortriebs mit einer Schildmaschine

Bei der Modellierung der Schildmaschine wurde zur Vereinfachung nur der Schildmantel generiert. Die Dicke des Schildmantels wurde mit 10 cm berücksichtigt. Die Tübbinge wurden mit einer Dicke von 0,5 m und einer Breite von 1,5 m abgebildet. Der Ringspalt wurde bei den Variationsberechnungen mit einer Dicke von 10 cm, 12,5 cm und 15 cm berücksichtigt.

3.2 Stoffliche Modellierung

Das stoffliche Verhalten des Untergrundes wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Drucker-Prager mit Kompressionskegel und nicht assoziierter Fließregel simuliert. Der Untergrund wurde als homogen angenommen. Die verwendeten Materialparameter sind in Tab. 1 dargestellt.

Tab. 1: Verwendete Materialparameter Untergrund

Elastizitätsmodul [MN/m ²]	$E = 10$
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,4$
Wichte [kN/m ³]	$\gamma = 18$
Reibungswinkel [°]	$\varphi' = 20$
Dilatanzwinkel [°]	$\psi' = 0$
Kohäsion [kN/m ²]	$c' = 20$

Der Schild und die Tübbinge wurden mit einem linearelastischen Materialverhalten abgebildet. Die angesetzten Materialparameter sind Tab. 2 und Tab 3. zu entnehmen.

Tab. 2: Erddruckschild (Stahl)

Elastizitätsmodul [MN/m ²]	$E = 210.000$
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,3$
Wichte [kN/m ³]	$\gamma = 75$

Tab. 3: Tübbinge (Stahlbeton B35)

Elastizitätsmodul [MN/m ²]	$E = 33.500$
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,2$
Wichte [kN/m ³]	$\gamma = 24$

Ebenso wie der Schild und die Tübbinge wurde der Verpressmörtel durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. In den Variationsberechnungen wurden drei Varianten für die Festigkeitseigenschaften des Verpressmörtels untersucht. Dafür wurden Druckfestigkeiten nach 28 Tagen berücksichtigt, die der Betongüte eines Betons B5, eines Betons B10 und eines Betons B15 entsprechen. Des Weiteren wurde für die Simulationen die zeitliche Druckfestigkeitsentwicklung der verschiedenen Verpressmörtel berücksichtigt. Dazu wurde die Druckfestigkeit in den Elastizitätsmodul entsprechend [2] umgerechnet und in den Berechnungen angesetzt. Für den Verpressmörtel wurde eine Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ und ein Wichte von $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$ verwendet. Die zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls ist in Fig. 4 dargestellt.

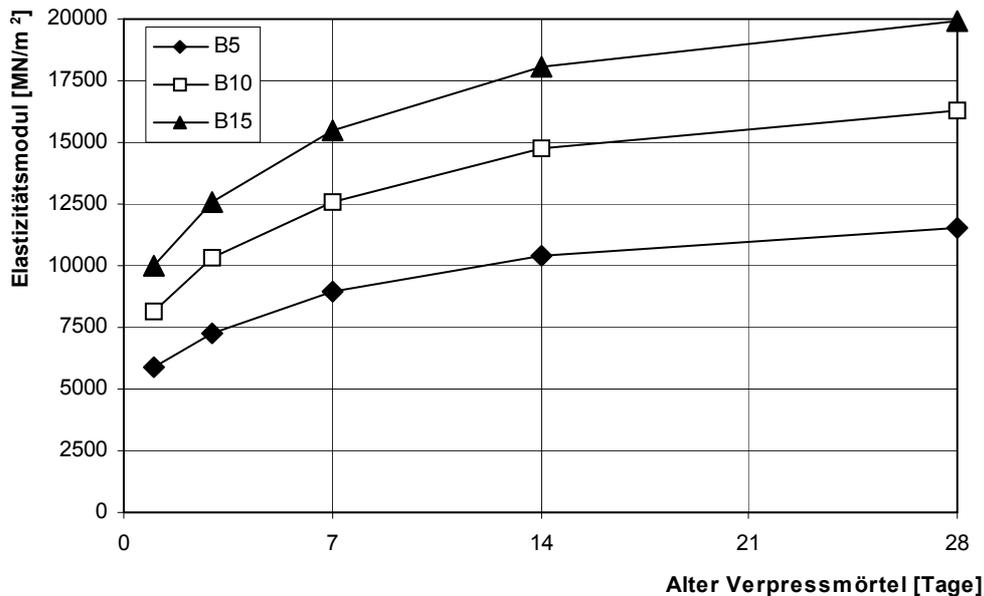


Fig. 4: Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls von Verpressmörtel

3.3 Belastungsansätze und Lastfälle

Für die Simulation des Stützdrucks an der Ortsbrust wurde eine gleichmäßig verteilte Flächenlast angesetzt. Diese wurde aus dem in der Tiefenlage, in der der Tunnel zum Liegen kommt, wirkende Erddruck ermittelt (vgl. Fig. 5). Für den Ansatz des Erddrucks wurde hierbei der aktive Erddruckbeiwert gewählt.

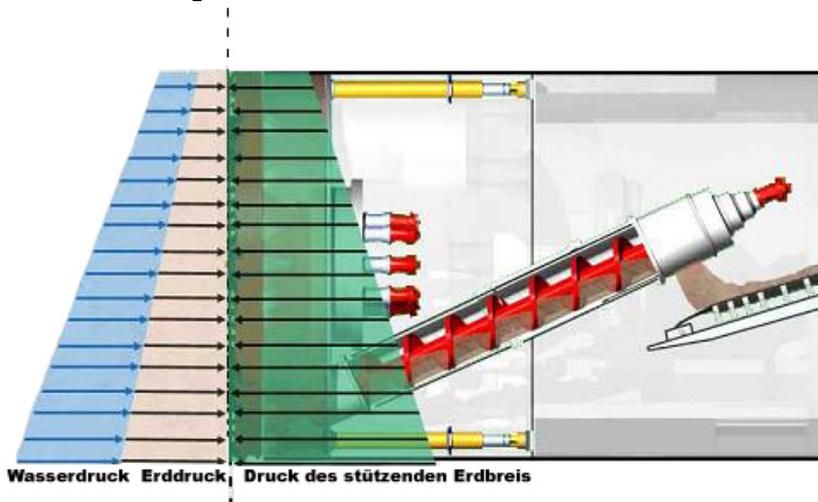


Fig. 5: Prinzip der Erdstützung

Ein aus Wasserdruck wirkender Stützdruck wurde nicht berücksichtigt, da angenommen wurde, dass der Tunnel nicht unterhalb des Grundwasserspiegels liegt.

Die Berechnungen wurden als step-by-step Analyse durchgeführt. Insgesamt wurden 23 Lastfälle berechnet. In den Lastfällen 2 bis 5 wurden die Elemente des Schildmantels aktiviert. Im Lastfall 7 wurde dann der 1. Tübbingring eingebaut, dabei waren in diesem Bereich die Elemente des Schildmantels noch aktiv. Für die Berechnungen wurde eine Vortriebsgeschwindigkeit von 10 m/Tag angesetzt. In Abhängigkeit von der Vortriebsgeschwindigkeit wurde dann der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels entsprechend Fig. 4 zugewiesen. Im 8. Lastfall, in dem der 2. Tübbingring aktiviert wurde, wurden die Elemente des Schildmantels, die im Bereich des 1. Tübbingrings liegen, mit den Materialeigenschaften des Verpressmörtels in Abhängigkeit von der Vortriebsgeschwindigkeit versehen. In den nächsten Lastfällen wurde für jeden Tübbingring der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels angepasst, so dass die zeitliche Entwicklung des Erhärtungsvorgangs des Verpressmörtels in den Berechnungen berücksichtigt werden konnte. Zur Veranschaulichung sind in Fig. 6 die Lastfälle 7 bis 12 dargestellt.

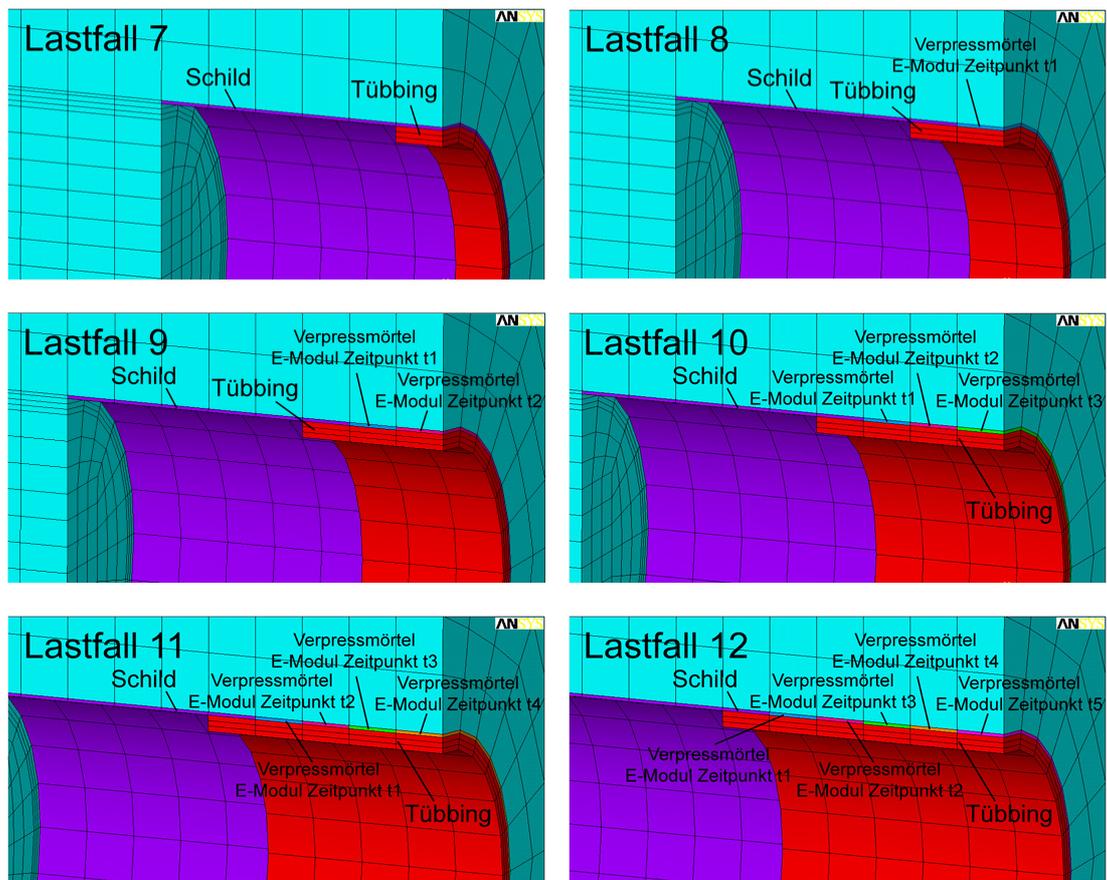


Fig. 6: Zuweisung der Materialeigenschaften der Elemente für die Lastfälle 7 bis 12

4. Berechnungsergebnisse und Auswertung

Mit dem zuvor beschriebenen numerischen Modell eines Erddruckschildes wurden Variationsberechnungen durchgeführt. In den Berechnungen wurden folgende Parameter variiert:

- Überlagerungshöhe: 10 m, 20 m, 30 m
- Elastizitätsmodul des Verpressmörtels: Betongüte B5, B10, B15
- Ringspaltdicke: 10 cm, 12,5 cm, 15 cm

Des Weiteren wurde eine Berechnung ohne Berücksichtigung der Ringspaltverpressung durchgeführt.

Die Berechnungen wurden hinsichtlich der Schnittkräfte in den Tübbing in Ringrichtung und der Setzungen an der Geländeoberfläche ausgewertet.

4.1 Auswertung der Schnittkräfte in den Tübbing

Bei der Auswertung der Variationsberechnungen zeigt sich, dass sich die maximalen Schnittgrößen im Bereich der Ulme ergeben. Betrachtet man die Entwicklung der maximalen Normalkräfte in Abhängigkeit vom Baufortschritt, so ist bei allen durchgeführten Berechnungen zu erkennen, dass sich die maximale Normalkraft für den einzelnen Tübbingring erst ergibt, nachdem drei Tübbingringe eingebaut wurden bzw. sich zwei Tübbingringe zwischen dem Schildschwanz und dem betrachteten Tübbingring befinden. Dieses Verhalten ist beispielhaft in Fig. 7 dargestellt.

Variante: Überlagerungshöhe 10 m, Ringspaltbreite 10 cm, Betongüte Verpressmörtel B10

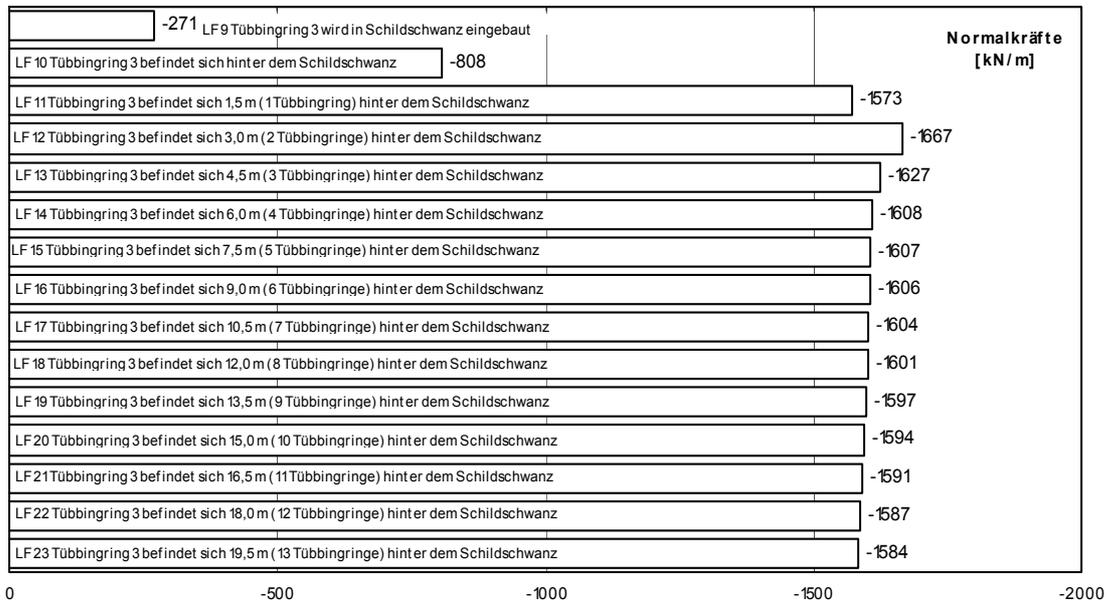


Fig. 7: Entwicklung der maximalen Normalkraft im 3. Tübbingring in Abhängigkeit vom Baufortschritt

In Fig. 8 ist die Abhängigkeit der maximalen Normalkraft von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltbreite dargestellt. Dabei zeigt sich, dass sich für die Normalkräfte Änderungen im Bereich von 2 % bis 3 % im Maximalwert ergeben.

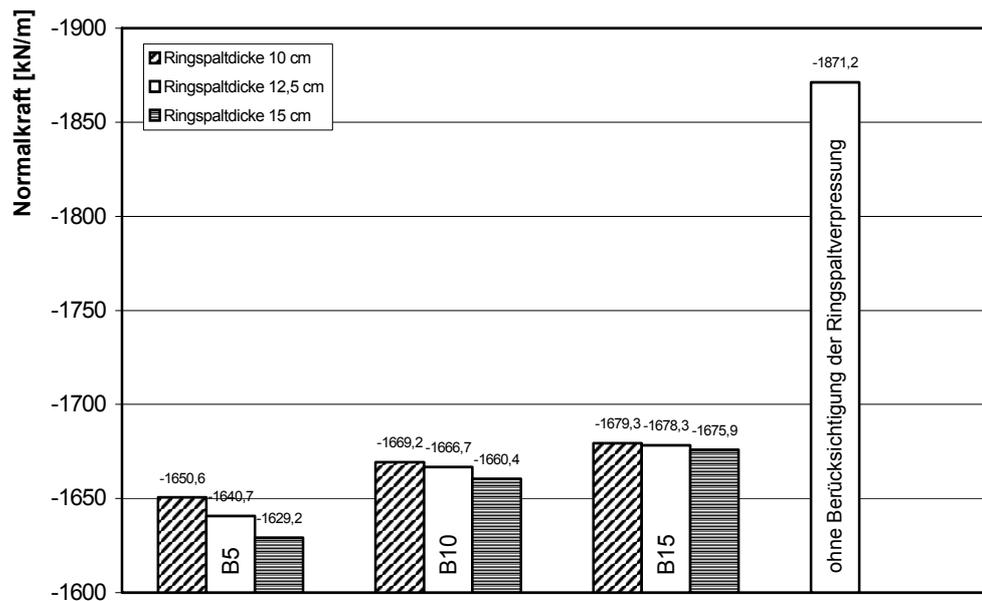


Fig. 8: Abhängigkeit der maximalen Normalkraft von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltbreite

Ebenso zeigt sich, dass bei zunehmender Betongüte des Verpressmörtels die Abhängigkeit der Normalkraft zur Dicke des Ringspaltes geringer wird. Auffällig bei den Berechnungen ist, dass sich die Größe des Momentes durch die Variation der Druckfestigkeit des Verpressmörtels einerseits und der Dicke des Ringspaltes andererseits kaum verändert. Die Differenz dieser Änderung liegt bei < 1 %.

Vergleicht man die Maximalwerte der Normalkraft (s. Fig. 8) zwischen den Berechnungen bei Berücksichtigung mit und ohne Ringspaltverpressung, ergibt sich eine Differenz von bis zu 15 %. Beim maximalen Moment liegt diese Differenz bei ca. 10 %.

In Abhängigkeit von der Überlagerungshöhe ergibt sich ein etwa linearer Zusammenhang zwischen Schnittgröße und Überlagerungshöhe. In Tab. 4 ist beispielhaft die Abhängigkeit der maximalen Schnittgrößen von der Überlagerungshöhe bei einer Ringspaltbreite von 10 cm und eines Verpressmörtels mit einer Betongüte eines Betons B5 dargestellt.

Tab. 4: Abhängigkeit der maximalen Schnittgrößen von der Überlagerungshöhe

Überlagerungshöhe [m]	10	20	30
Maximale Normalkraft [kN/m]	1650,6	2619,6	3599,8
Maximales Moment [kNm/m]	28,6	49,8	71,1

Zum Vergleich der Schnittgrößen aus den numerischen Berechnungen mit analytischen Berechnungsverfahren wurde eine Schnittgrößenermittlung mit dem Näherungsverfahren nach Windels [3], welches auf das Berechnungsverfahren von Schulze/Dudddeck [4] aufbaut und die Einflüsse aus Theorie II. Ordnung berücksichtigt, für eine Überdeckungshöhe von 10 m durchgeführt. Die mit dem Näherungsverfahren im Bereich der Ulmen bestimmten Schnittgrößen sind in Tab. 5 dargestellt. Für die numerischen Berechnungen wurde die Variante mit einer Ringspaltdicke von 10 cm und eines Verpressmörtels mit einer Betongüte eines Betons B5 sowie die Berechnung ohne Berücksichtigung der Ringspaltverpressung gegenübergestellt.

Tab. 5: Vergleich der maximalen Schnittgrößen numerische / analytische Berechnung

	Normalkraft N [kN/m]	Moment M [kNm/m]	e = M/N	e/d ≤ 0,3	Aufnehmbare Normalkraft [kN/m]	Ausnutzungs- grad [%] für d = 50 cm
numerische Berech. mit Ansatz Ringspaltverpressung	1650,6	28,6	0,017	0,035	5097	32,4
numerische Berech. ohne Ansatz Ringspaltverpressung	1871,2	31,5	0,017	0,034	5107	36,6
Näherungsverfahren nach Windels	1094,5	135,5	0,124	0,248	2764	39,6

Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen numerischer und analytischer Berechnung. Während bei der numerischen Berechnung eine um den Faktor 1,5 bis 1,7 höhere Normalkraft berechnet wurde, ergibt sich für das Moment ein ca. 80 % geringerer Wert. Führt man mit den berechneten Schnittgrößen eine Bemessung entsprechend DIN 1045 [5] aus, so kann der Tübbingquerschnitt als ein auf Druck beanspruchtes Bauteil dimensioniert werden. Berechnet man den Ausnutzungsgrad über das Verhältnis von vorhandener zu aufnehmbarer Normalkraft, so ergibt sich für die Ergebnisse der numerischen Berechnungen ein geringerer Ausnutzungsgrad (vgl. Tab. 5).

4.2 Auswertung der Setzungen an der Geländeoberfläche

Bei der Auswertung der Setzungen an der Geländeoberfläche zeigt sich, dass sich keine Setzungen sondern Hebungen einstellen. Die Hebungen sind darauf zurückzuführen, dass durch die ausgebauten Massen des Ausbruchs eine vertikale Entlastung entsteht. Dies kann sich insbesondere bei oberflächennahen Tunneln in Abhängigkeit von den geotechnischen Verhältnissen und den verwendeten Stoffgesetzen ergeben (vgl. [1]). In situ sind in der Regel keine Hebungen zu beobachten.

Um diesen Effekt zu kompensieren wird in den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ [1] empfohlen unterhalb des Tunnelquerschnittes eine erhöhte Steifigkeit, die sich an die tatsächlichen geotechnischen Gegebenheiten anlehnt, durch Berücksichtigung des Ent- und Wiederbelastungsmoduls anzusetzen. In den durchgeführten Variationsberechnungen wurde auf diesen Schritt zunächst verzichtet.

Mit zunehmender Überlagerung ergeben die Berechnungen geringere Hebungen bzw. nehmen die Setzungen zu (vgl. Fig. 7).

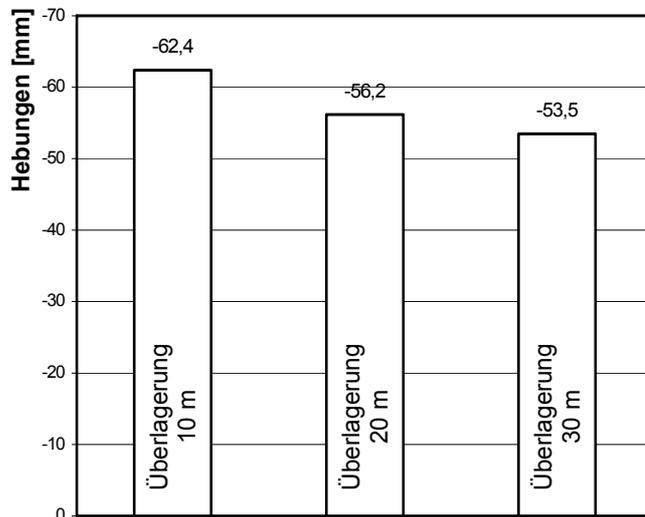


Fig. 7: Abhängigkeit der maximalen Hebungen von der Überlagerungshöhe bei einer Ringspaltdicke von 10 cm und eines Verpressmörtels mit einer Betongüte eines Betons B5

In Fig. 8 ist die Abhängigkeit der Hebungen von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltdicke bei einer Überlagerungshöhe von 10 m dargestellt. Bei zunehmender Ringspaltdicke werden die Hebungen geringer bzw. die Setzungen größer. Bei zunehmender Betongüte des Verpressmörtels werden die Hebungen größer bzw. die Setzungen geringer. Ohne Berücksichtigung der Ringspaltverpressungen sind die Hebungen geringer bzw. die Setzungen größer.

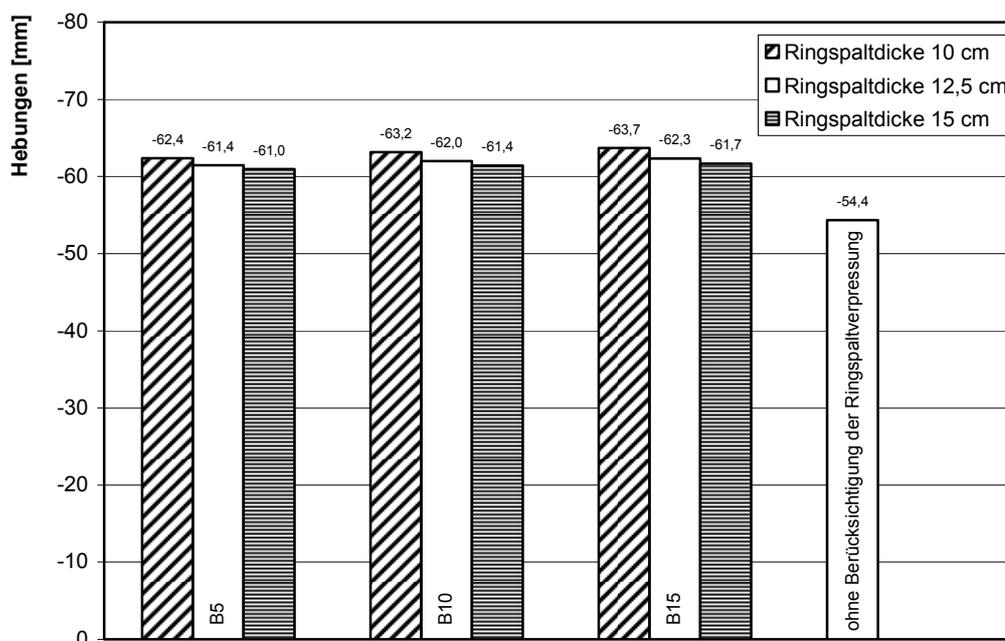


Fig. 8: Abhängigkeit der maximalen Hebungen von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltdicke

5. Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung der verschiedenen Einflüsse, die sich aus dem Bauablauf, den Materialeigenschaften der Ringspaltverpressung und der Überlagerungshöhe ergeben, wurden Variationsberechnungen mit einem numerischen Modell durchgeführt. Die Ergebnisse der Berechnungen wurden hinsichtlich der Schnittgrößen in den Tübbingungen und den Setzungen an der Geländeoberfläche ausgewertet.

Die durchgeführten Untersuchungen bilden die Grundlage zur Beurteilung der Entspannung des Gebirges vor Einbau der Sicherungsmittel bzw. der Ausbildung des Gebirgstragringes. In weiteren Untersuchungen sind die Auswirkungen durch die im Folgenden beschriebenen Randbedingungen, die sich aus dem Bauverfahren und den geotechnischen Eigenschaften des Untergrundes ergeben, zu berücksichtigen. Bei den durchgeführten Berechnungen wurde ein voller Verbund zwischen Tübbingausbau, Ringspaltverpressung und Untergrund angenommen. Um die Verbundwirkung zu untersuchen, sind Variationsberechnungen mit Interface-Elementen durchzuführen. Des Weiteren sind die Bodenkennwerte, der Ansatz des Stützdrucks, die Vortriebsgeschwindigkeit, das Stoffgesetz, die Tübbingdicke, die Tübbingbreite und der Tunneldurchmesser zu variieren. Ebenso sind die Einflüsse durch den Ansatz von Vorpresskräften, Verpressdruck der Ringspaltverpressung und Lasten aus dem Nachläufer zu analysieren. Bei dem z. Z. vorhandenen Modell sind die Tübbingelenke und die Fugen in Längsrichtung des Tunnels noch nicht abgebildet worden. Daher ist das Modell dahingehend zu erweitern, dass die Steifigkeit des Tunnelbauwerks in Tübbingring- und Längsrichtung berücksichtigt werden kann.

6. Literatur

- [1] Meißner, H.: Tunnelbau unter Tage – Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.
- [2] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 326 ff., S 393 ff.
- [3] Windels, R.: Spannungstheorie II. Ordnung für den teilweise gebetteten Kreisring, Bautechnik 43, Heft 8, 1966, S. 265 ff.
- [4] Schulze, H.; Duddeck, H.: Spannungen in schildvorgetriebenen Tunneln, Beton- und Stahlbetonbau 59, Heft 8, 1964, S. 169 ff.
- [5] DIN 1045: Beton und Stahlbeton, Bemessung und Ausführung, Ausgabe Juli 1988