

Untersuchungen zum Einfluss der Ringspaltverpressung auf die Umlagerung der Gebirgsspannungen beim maschinellen Tunnelvortrieb

J. STAHLMANN, J. GATTERMANN, J. SCHMITT

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

ZUSAMMENFASSUNG

Bei der Herstellung von Tunnelbauwerken in bergmännischer Bauweise werden durch den Ausbruch an der Ortsbrust der Primärspannungszustand gestört und die Gebirgsspannungen umgelagert. Abhängig vom Bauverfahren ergeben sich Unterschiede in der Umlagerung der Gebirgsspannungen. Für die Spritzbetonbauweise sind bereits Ansätze entwickelt worden, um die Umlagerung der Gebirgsspannungen z. B. in einem ebenen numerischen Modell berücksichtigen zu können. Dagegen existieren für den Schildvortrieb nur sehr wenige analytische oder numerische Berechnungsmodelle, die mehr oder weniger stark idealisiert sind.

Zur Untersuchung der Umlagerung der Gebirgsspannungen bei einem Schildvortrieb insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Ringspaltverpressung werden z. Z. räumliche numerische Untersuchungen am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB·TUBS) durchgeführt. Im Rahmen dieses Beitrags werden die bisherigen Ergebnisse der Simulationen dargestellt.

1 Einführung

Der Primärspannungszustand eines Gebirges wird als Spannungszustand, der durch die geologische Entwicklungsgeschichte und die Gebirgsart geprägt ist, definiert. Durch die Herstellung eines Tunnelbauwerks wird der Primärspannungszustand gestört und die Gebirgsspannungen umgelagert. Die Umlagerung der Spannungen ist zeitabhängig und bedingt durch die Art des Tunnelbauwerks, seiner Herstellungsweise und des Gebirgsverhaltens.

Bei der Spritzbetonbauweise wird die Spannungsumlagerung durch die weitgehend ungestützte Ortsbrust, dem zeitlich verzögerten Einbau der Sicherungsmittel und die zeitabhängigen Abbindeprozesse der Spritzbetonschale bestimmt. Mit den bis zur vorgesehenen Endfestigkeit der Spritzbetonschale auftretenden Verschiebungen bildet sich im Gebirge ein Tragring aus, so dass der erforderliche Ausbauwiderstand geringer wird, als bei einer sofortigen Stützwirkung der temporären Sicherung. Dieser Sachverhalt wird in der Bemessung der Spritzbetonschale und der Wahl der Vor-

entspannung ausgenutzt. Darüber hinaus reduzieren sich die Spannungen in der Schale durch Kriech- und Schwindprozesse des Betons.

Beim Schildvortrieb liegt dagegen ein anderer Sachverhalt vor, der einer Entspannung des Gebirges entgegenwirkt. Die Ortsbrust wird beim Schildvortrieb gestützt. Der Schild ist im Verhältnis zur Spritzbetonschale extrem steif und die Verformungen sind dementsprechend gering. Daher ist die Spannungsumlagerung im Bereich des Schilds im Vergleich zur Spritzbetonbauweise sehr klein bzw. lokal begrenzt, so dass sich kein entsprechender Gebirgstragring ausbilden kann. Die als Ausbau verwendeten Stahlbeton- oder Stahlübbinge weisen bereits beim Einbau ihre Endfestigkeit auf. Der Einfluss aus Kriechen und Schwinden ist von untergeordneter Bedeutung. Beim Einbau der Übbinge wird der Ringspalt zwischen dem Gebirge und dem Tübbing mit Mörtel verpresst. Würden diese letztendlich theoretischen Annahmen vollständig gültig sein, so dürften keine Verschiebungen im Gebirge und an der Geländeoberfläche auftreten. Dies wird durch Beobachtung an ausgeführ-

ten Projekten jedoch nicht bestätigt. Die Ursachen hierfür können in der nicht in vollem Umfang durchgeführten oder zu hohen Stützung der Ortsbrust, im Überschritt des Schneidrades in Bezug zum Schilddurchmesser und in der Ringspaltverpressung liegen. Zu den hieraus resultierenden Fragestellungen werden zurzeit Untersuchungen am IGB·TUBS durchgeführt, deren erste Ergebnisse hier dargestellt und erläutert werden.

2 Analytische und numerische Berechnungsmodelle

2.1 Analytische Berechnungsmodelle – Elastisch gebetteter Stabzug

Ein heute noch sehr stark verbreitetes analytisches Berechnungsmodell ist der elastisch gebettete Stabzug (Abb. 1), wie er in [1] beschrieben ist. Beim elastisch gebetteten Stabzug wird die Tunnelschale durch den Stabzug abgebildet. Das Gebirge wird durch den Ansatz einer Bettung berücksichtigt. Teilausbrüche können bei diesem Verfahren gar nicht bzw. nur sehr eingeschränkt simuliert werden. Die räumliche Tragwirkung muss abgeschätzt und mit abgeminderten Lasten angesetzt werden.

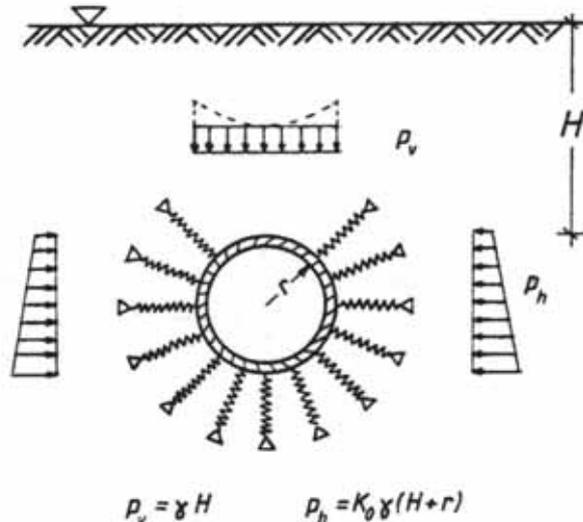


Abb. 1: Elastisch gebetteter Stabzug [2]

2.2 Ebene numerische Berechnungsmodelle

Mit numerischen Berechnungsmodellen kann die Interaktion zwischen Tunnel und Gebirge simuliert werden. Die einzelnen Bauzustände können im Gegensatz zum elastisch gebetteten Stabzug in einem ebenen Berechnungsmodell abgebildet werden. Das Spannungsdehnungsverhalten des Gebirges kann durch geeignete Stoffgesetze untersucht werden. Die räumliche Tragwirkung muss jedoch

wie bei den analytischen Berechnungsmodellen abgeschätzt werden. Dies geschieht in der Regel durch Abschätzung der Vorentspannung infolge der Spannungumlagerung im Gebirge für jeden Teilausbruch. Im nächsten Berechnungsschritt bekommt dann das temporäre Sicherungsmittel den restlichen Lastanteil zugewiesen (vgl. [3]). Für die Vorentspannung haben sich zwei Verfahren etabliert. Im Stützlastverfahren werden die Stützkräfte aus dem Primärspannungszustand für den Ausbruchsbereich vermindert (vgl. [3]). Im zweiten Verfahren, dem Stützkernverfahren, wird die Steifigkeit des Ausbruchsbereichs verringert (vgl. [2] und [3]). Beide Verfahren führen zu Verschiebungen im Gebirge und somit zu einer Vorentspannung. Die Verfahren wurden für die Spritzbetonbauweise entwickelt.

2.3 Räumliche numerische Berechnungsmodelle

Der Vorteil von räumlichen numerischen Berechnungsmodellen besteht darin, dass ein Vorentlastungsfaktor nicht abgeschätzt werden muss, da die räumliche Tragwirkung und die Festigkeitsentwicklung des Betons mit dem Berechnungsmodell selber abgebildet werden kann. Ebenso kann die Spannungumlagerung durch die Bauzustände erfasst werden. Als Nachteil ist der hohe Aufwand in der Modellerstellung und der Berechnungsauswertung sowie in der hohen Berechnungsdauer zu sehen.

3 Bauablauf und Bautechnik beim Tunnelvortrieb mit einem Erddruckschild

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. Des Weiteren kann eine Einteilung in verschiedene Klassen von Schildmaschinen bzgl. der Ortsbruststützung erfolgen. Hier sind exemplarisch der Erddruckschild, der Druckluftschild oder der Flüssigkeitsschild (z.B. Hydro- oder Bentonit-schild) zu nennen. Nachfolgend werden der Bauablauf und die Bautechnik für einen Erddruckschild beschrieben, der als Grundlage für das verwendete 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 Abb. 2 ist der schematische Aufbau eines Erddruckschildes dargestellt.

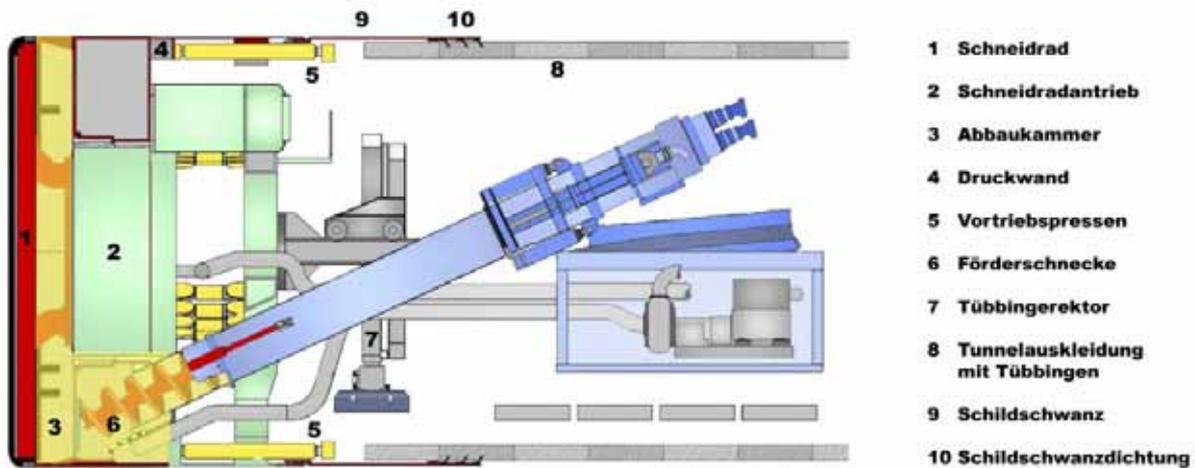


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines Erddruckschildes nach [6]

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 Schneirades 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 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.

4 Ringspaltverpressung

Das Vorpressen des Schildes führt dazu, dass sich zwischen dem Gebirge und dem Tübbingring ein Freiraum bildet, der als Ringspalt oder Ringraum (Abb. 3) bezeichnet wird. Der Ringspalt muss mit Verpressmörtel verfüllt werden, um Auflockerungen und damit Lastumlagerungen des umgebenden Bodens zu reduzieren, die zu zusätzlichen Setzungen an der Geländeoberfläche führen.

Bei der Ringspaltverpressung kommen zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz. Der Verpressmörtel kann entweder durch Rückschlagventile in den einzelnen Tübbingelementen 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

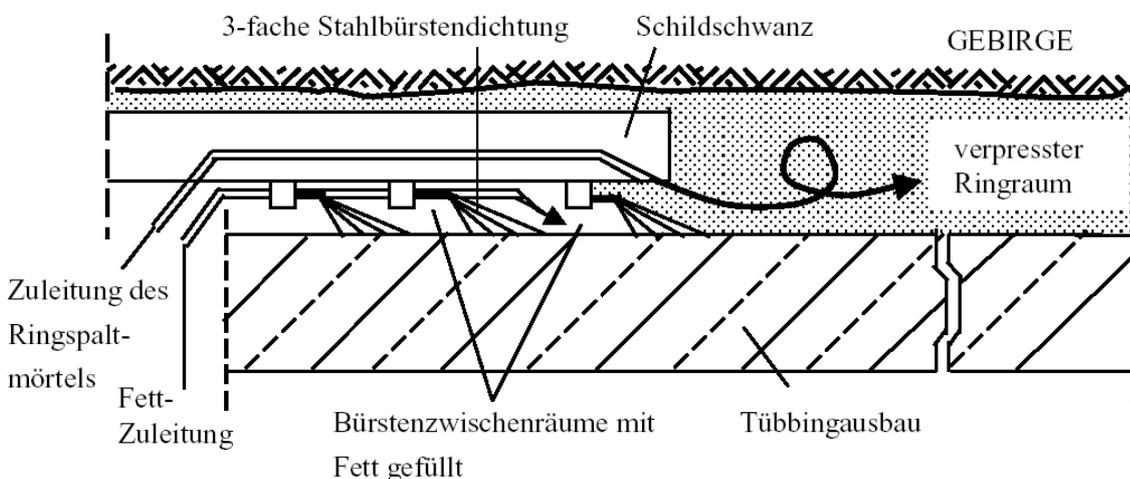


Abb. 3: Ringspalt bzw. Ringraum bei einer Schildschwanzdichtung mit Stahlbürsten [8]

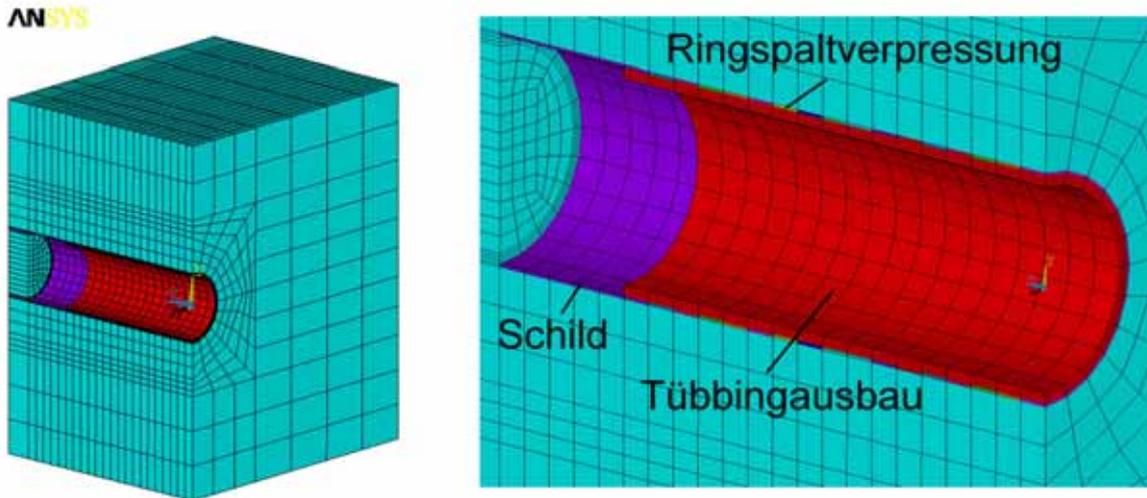


Abb. 4: Dreidimensionales numerisches Modell des Tunnelvortriebs mit einer Schildmaschine

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 Spannungumlagerungen zu minimieren. Diese sich widersprechenden Anforderungen bedingen, dass bei der Festlegung der Materialkennwerte für den Verpressmörtel eine Kompromisslösung gefunden werden muss.

5 Numerische Modelle

5.1 Numerisches 3D-Modell

Zu Untersuchung der Gebirgsumlagerung bei einem Schildvortrieb insbesondere hinsichtlich des Einflusses der Ringspaltverpressung werden zurzeit numerische Untersuchungen am IGB·TUBS durchgeführt. Dazu wurde ein dreidimensionales numerisches Modell eines Schildvortriebs entwickelt und Parameterstudien durchgeführt (Abb. 4).

Bei einem Durchmesser des Tunnelquerschnitts von $d = 11,0$ m wurden die Abmessungen des Berechnungsmodells entsprechend den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik festgelegt [3]. Danach wurde 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 Dicke der Tübbing wurde durch eine Vorbemessung für eine Überlagerung von 30 m entsprechend dem Verfahren nach [1] mit $d = 50$ cm festgelegt.

Der Untergrund wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Drucker-Prager mit Kompressionskegel

und nicht assoziierter Fließregel simuliert. In die Tab. 1 sind die verwendeten Materialparameter für den Untergrund dargestellt.

Tab. 1: Verwendete Materialparameter Untergrund

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

Zur Vereinfachung der Modellierung wurde nur der Schildmantel im Modell abgebildet. Der Schild und die Tübbinge wurden mit linearelastischen Materialverhalten, mit den in Tab. 2 und Tab 3. angegebenen Materialkennwerten, angesetzt.

Tab. 2: Erddruckschild (Stahl)

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

Tab. 3: Tübbing (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 Tübbing wurde der Verpressmörtel durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. Um den besonderen Ein-

fluss der Ringspaltverpressung zu untersuchen, wurde die Steifigkeit des Materials für die Ringspaltverpressung in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die einzelnen Berechnungslastfälle angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Verpressmaterials zu simulieren. Dazu wurde die Druckfestigkeit in den Elastizitätsmodul (Abb. 5) entsprechend [4] umgerechnet und in den Berechnungen angesetzt. Für den Verpressmörtel wurde eine Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ und eine Wichte von $\gamma = 18 \text{ kN/m}^2$ berücksichtigt. Bei der Ringspaltverpressung wurde zunächst von einer drucklosen Verfüllung ausgegangen.

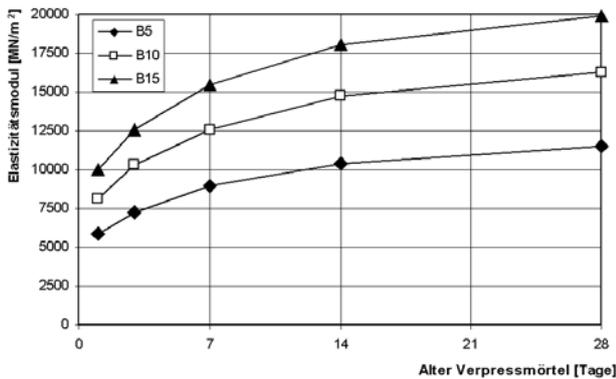


Abb. 5: Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls von Verpressmörtel

Für die Simulation des Stützdrucks an der Ortsbrust wurde eine gleichmäßig verteilte Last angesetzt (vgl. Abb. 6). Diese wurde aus dem in der Tiefenlage, in der der Tunnel zum Liegen kommt, wirkenden Erddruck ermittelt. Für den Ansatz des Erddrucks wurde der aktive Erddruckbeiwert gewählt.

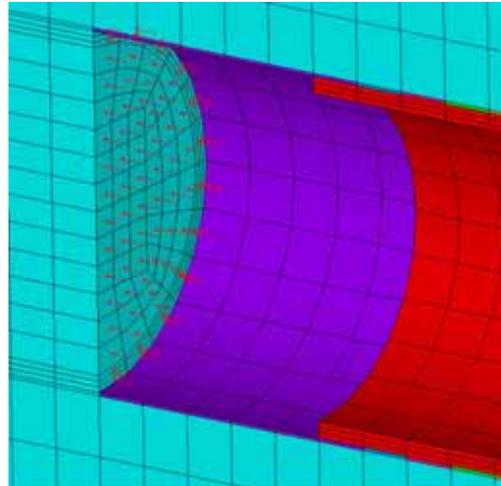


Abb. 6: Angesetzter Stützdruck FE-Modell

Die räumlichen Berechnungen wurden als step-by-step Analyse durchgeführt. Dazu wurden 23 Lastfälle bzw. Bauzustände abgebildet. Im ersten Bauzustand wurde der Primärspannungszustand simu-

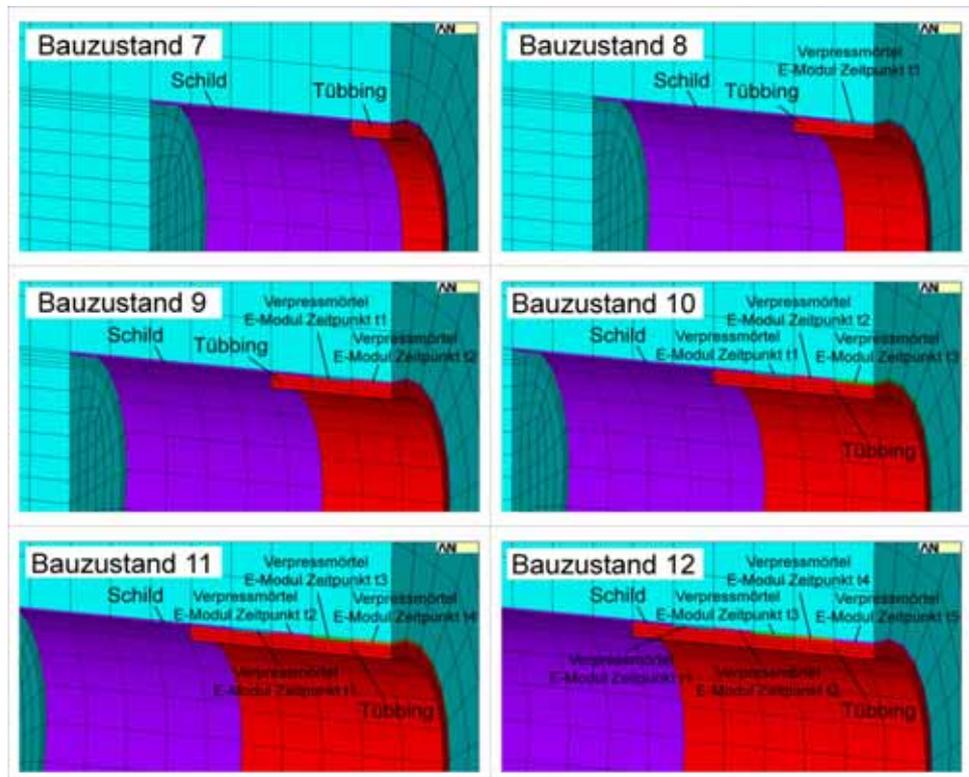


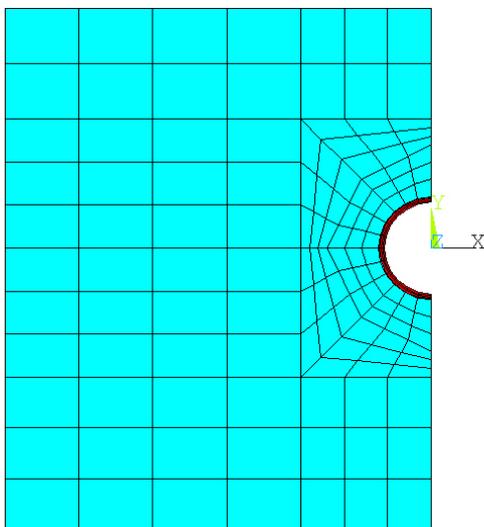
Abb. 7: Zuweisung der Materialeigenschaften der Elemente für die Bauzustände 7 bis 12

liert. In den nächsten Bauzuständen wurde die Schildfahrt bzw. der Vortrieb der Schildmaschine für eine Länge von 7,5 m abgebildet. Im Bauzustand 7 wurde der erste Tübbingring im Bereich des Schildschwanzes aktiviert. Mit Aktivierung des nächsten Tübbingrings in Bauzustand 8 wurde das Material des Schildmantels gegen das Material des Verpressmörtels ausgetauscht. Dabei wurde der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels entsprechend der Vortriebsgeschwindigkeit, die mit 10 m/Tag berücksichtigt wurde, angepasst. In den darauf folgenden Bauzuständen wurde für jeden Tübbingring der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels neu angepasst, um so die zeitliche Entwicklung des Erhärtungsvorgangs des Verpressmörtels abbilden zu können. Zur Veranschaulichung sind die Bauzustände 7 bis 12 in Abb. 7 abgebildet.

Mit dem dreidimensionalen Modell wurden Variationsberechnungen durchgeführt. Dabei wurden die Überlagerungshöhe, der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels und die Ringspaltdicke variiert.

5.2 Numerisches 2D-Modell

Um Aussagen über einen Vorentspannungsfaktor analog den Stützlast- bzw. Stützkernverfahren zu erhalten, wurde ein zweidimensionales Berechnungsmodell mit den entsprechenden Geometrie- und Materialparameter des dreidimensionalen Berechnungsmodells generiert (Abb. 8). In den Berechnungen wurden zwei Lastfälle berücksichtigt. Neben dem Primärspannungszustand wurde im zweiten Lastfall simuliert, dass der Tübbingring die gesamte Last durch den Gebirgsausbruch aufnehmen muss. Eine Vorentspannung wurde dabei nicht angesetzt.



6 Ergebnisse der Parameterstudien

6.1 Gebirgsspannungen

Zur Ermittlung der Spannungsumlagerungen im Gebirge wurden die in der dreidimensionalen Berechnung ermittelten radialen Spannungen in der Firste (Punkt A), der Ulme (Punkt B) und der Sohle (Punkt C) im Schnitt X-X für die maßgebenden Bauzustände herangezogen (vgl. Abb. 9). Die Berechnungsergebnisse sind für die Berechnung mit einer Ringspaltdicke von 10 cm, einer Betongüte des Verpressmörtels von einem Beton B5 und einer Überlagerungshöhe von 30 m angegeben. Aus dem Diagramm der Radialspannungen über dem Baufortschritt (Abb. 9 oben) ist zu erkennen, dass eine größere Spannungsumlagerung erst eine Tübbingbreite vor dem Schild im Bauzustand 12 auftritt. Mit dem Erreichen des Schneidkopfes im betrachteten Schnitt (Bauzustand 13) steigen die Spannungen über die Primärspannungen an. Dabei ist festzustellen, dass die Spannungserhöhung der Radialspannungen im Bereich der Ulme größer ist, als die der Spannungen in der Firste und der Sohle. Bei der Durchfahrt des Schildes kommt es dann zu einer Spannungsreduktion in allen drei Punkten. Mit dem Einbau der Tübbinge (Bauzustand 19) erfolgt ein Spannungsanstieg. Im darauf folgenden Bauzustand reduzieren sich die Spannungen wieder und steigen danach auf einen konstanten Wert an. Auffällig ist bei dem Vergleich der einzelnen Punkte, dass sich die Radialspannungen im Bereich der Sohle (Punkt C) im Gegensatz zu den Punkten in der Firste und in der Ulme durch den Einfluss des Schildes geringer verändern. Wie oben bereits beschrieben, treten die größeren Spannungszuwächse im Bereich der Ulme auf. In einem Abstand von ca. einem Tunneldurchmesser vom Schildende liegen diese Spannungen in der

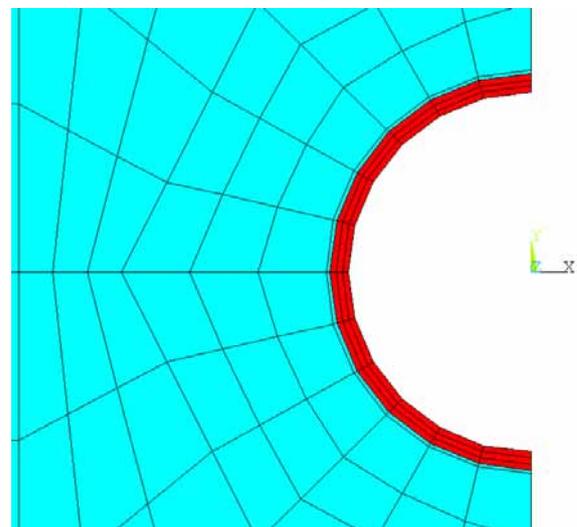
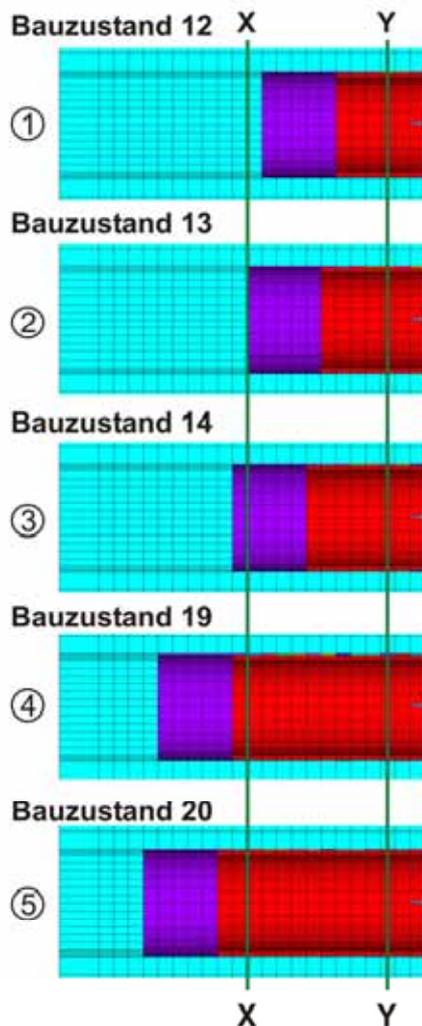
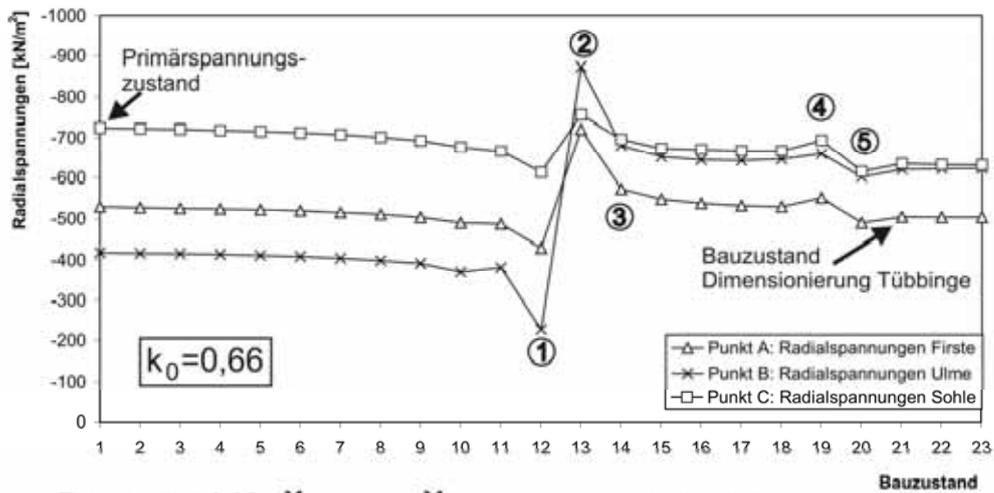


Abb. 8: Zweidimensionales numerisches Modell des Tunnelvortriebs mit einer Schildmaschine Zuweisung

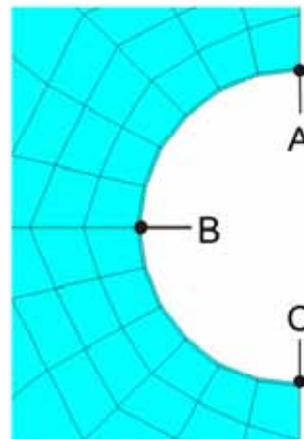
Größenordnung der Radialspannungen in der Sohle. Generell ist festzuhalten, dass die auf den Tübbingausbau wirkenden Spannungen über den Primärspannungen liegen. Die im Bauzustand 12 aufgetretene Vorentspannung wird damit durch den Stützdruck des Schneirades, die Steifigkeit des Schildmantels, die Verpressung des Ringspaltes und die Steifigkeit des Tübbingausbaus voll-

ständig kompensiert. Der Tunnel zieht durch sein Spannungsverformungsverhalten Lasten aus dem Gebirge an.

Um diese Punkte näher zu untersuchen, wurden weitere ebene numerische Berechnungen durchgeführt. Dazu wurde das unter Abs. 5.2 beschriebene Modell mit sofortigem Tübbingausbau sowie das



Schnitt X-X



Berechnung

Ringspaltbreite 10 cm
 Betongüte Verpressmörtel B5
 Überlagerungshöhe 30 m

Abb. 9: Radialspannungen in Abhängigkeit vom Baufortschritt

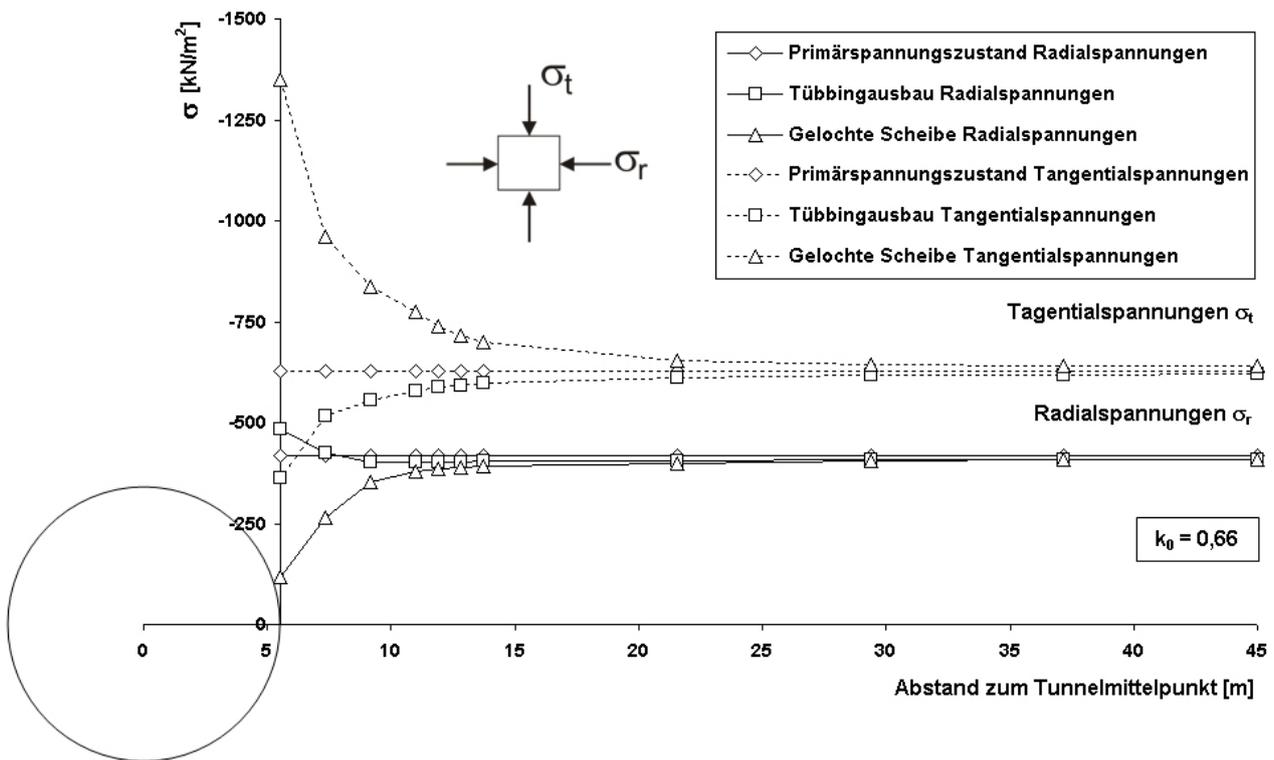
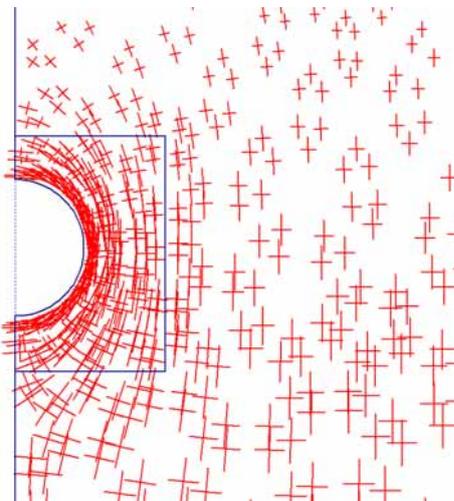


Abb. 10: Verlauf der Tangential- und Radialspannungen in der Umgebung des Ausbruchsquerschnitts im Bereich der Ulme

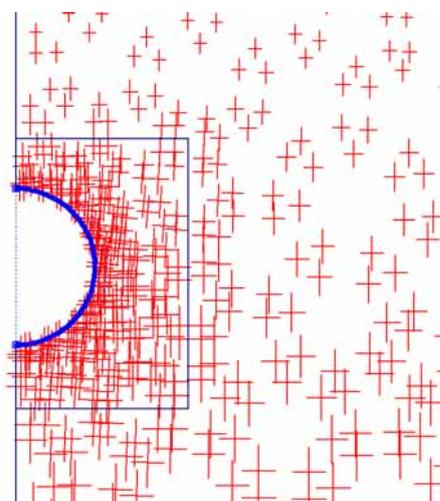
Berechnungsmodell einer gelochten Scheibe verwendet. Trägt man die Radial- und Tangentialspannungen in der Umgebung des Ausbruchsquerschnitts im Bereich der Ulmen auf und vergleicht die Spannungen des Modells mit sofortigem Tübbingausbau mit dem Modell der gelochten Scheibe (Abb. 10), so ergibt sich ein genau entgegengesetztes Bild. Für den Tübbingausbau nehmen die Tangentialspannungen zum Ausbruchsquerschnitt ab

und die Radialspannungen zu. Dagegen nehmen bei der gelochten Scheibe die Tangentialspannungen zum Ausbruchsquerschnitt zu und die Radialspannungen ab.

Betrachtet man für die beiden Modelle die Spannungstrajektorien (Abb. 11), so zeigt sich für das Modell der gelochten Scheibe erwartungsgemäß die Ausbildung eines Gebirgstagrings bzw. die



a) gelochte Scheibe



b) Tübbingausbau

Abb. 11: Spannungstrajektorien gelochte Scheibe / Tübbingausbau

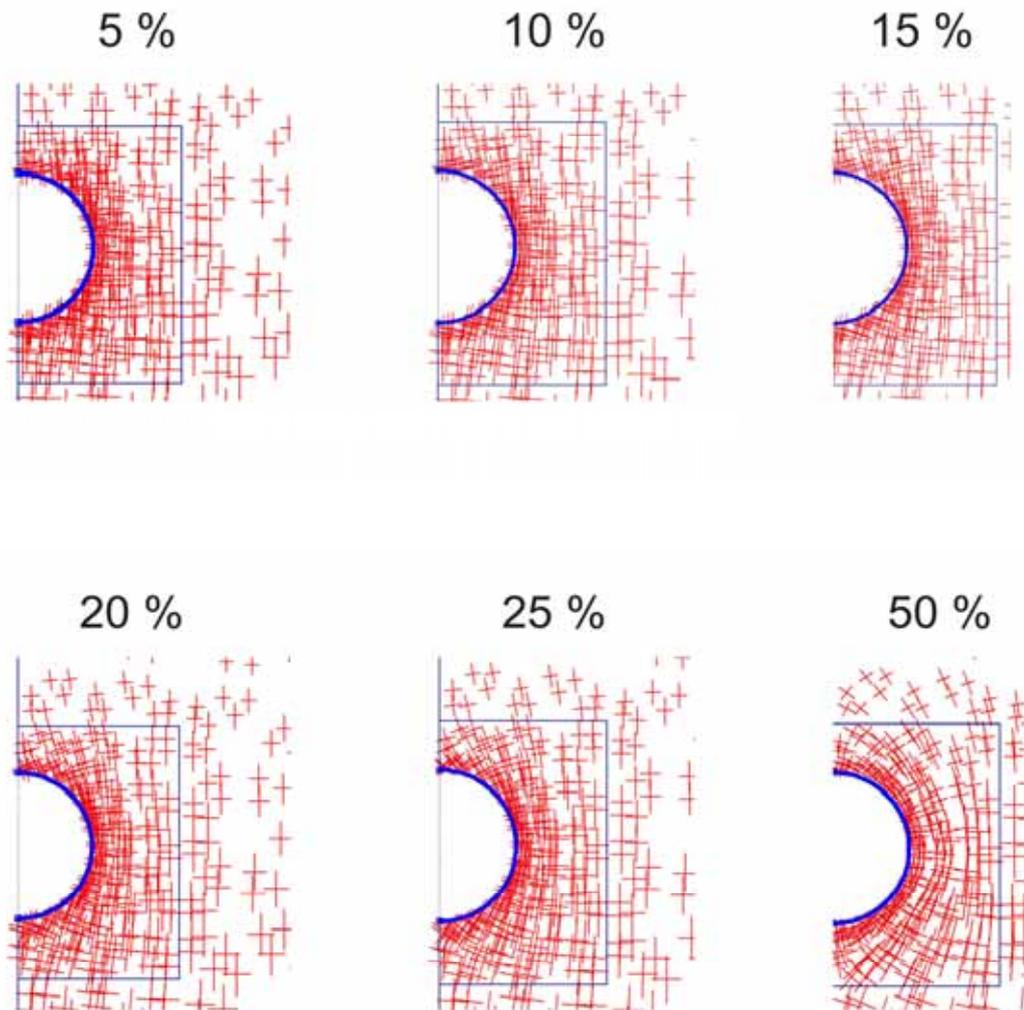


Abb. 12: Entwicklung der Spannungstrajektorien in Abhängigkeit von der Vorentlastung

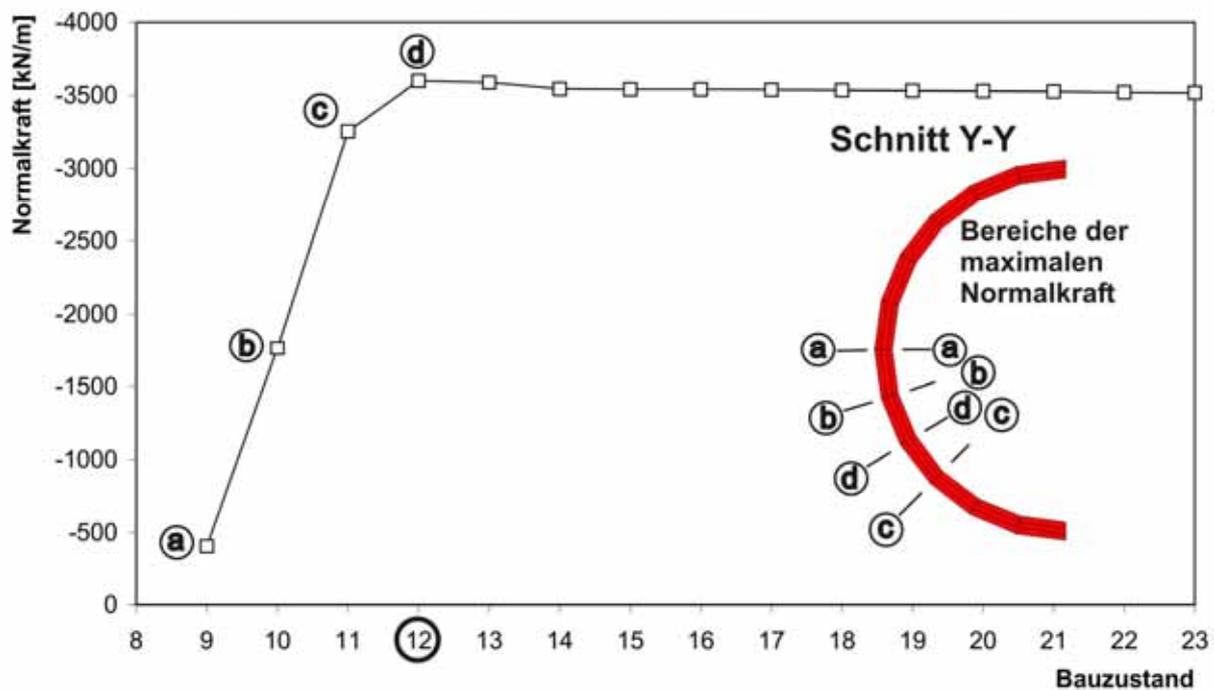
Ausbildung eines Gewölbes. Bei dem Modell mit sofortigem Tübbingausbau ergibt sich dagegen kein Gewölbe, so dass der Tübbingausbau die Last aufnehmen muss. Um nun zu bestimmen, welche Vorentlastung notwendig ist, damit sich ein Gebirgstragring ausbilden kann, wurden mit dem ebenen Berechnungsmodell Variationsberechnungen durchgeführt, bei denen ein Vorentlastungsfaktor entsprechend dem Stützlastverfahren angesetzt wurde. Die Parameterstudie zeigt danach, dass es bei einer Vorentlastung von 10 % bis 15 % zur Ausbildung eines Tragringes kommt (Abb. 12). Die hierfür erforderlichen rechnerischen Verschiebungen betragen nur wenige Millimeter.

6.2 Schnittkräfte

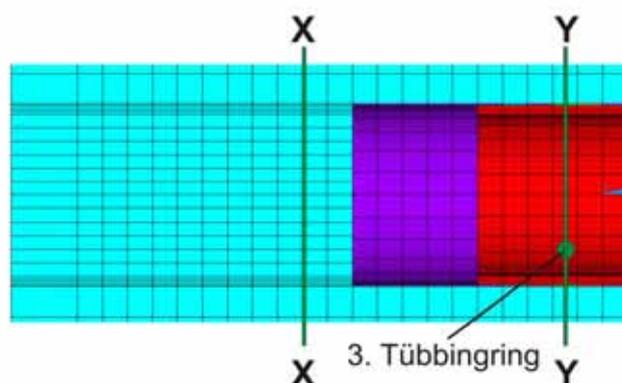
Bei der Auswertung der Schnittkräfte, die mit dem räumlichen Berechnungsmodell ermittelt wurden, zeigt sich, dass sich die maximalen Schnittkräfte im Bereich der Ulmen ergeben. Untersucht man die Schnittkraftentwicklung in Abhängigkeit vom

Baufortschritt, so zeigen die durchgeführten Berechnungen, dass die maximalen Normalkräfte erst auftreten, nach dem sich drei bzw. zwei weitere Tübbingringe zwischen dem Schildschwanz und dem betrachteten Tübbingring befinden (vgl. Abb. 13). Des Weiteren ist in Abb. 13 zu erkennen, dass sich die Position der maximalen Normalkraft in Abhängigkeit vom Baufortschritt verändert. So wandert die maximale Normalkraft zunächst in Richtung der Sohle. Bei Erreichen des absoluten Maximalwertes wandert die Position des Maximalwertes wieder zurück bzw. verbleibt für die weiteren Bauzustände an dieser Position.

In Abb. 14 ist die Abhängigkeit der maximalen Normalkraft von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltdicke bei einer Überlagerung von 10 m dargestellt. Dabei zeigen sich für die Normalkräfte Änderungen von 2 % bis 3 % im Maximalwert.



Bauzustand 12: maximale Normalkraft



Berechnung

Ringspaltdicke 10 cm
 Betongüte Verpressmörtel B10
 Überlagerungshöhe 30 m

Abb. 13: Entwicklung der maximalen Normalkraft in Abhängigkeit vom Baufortschritt

Weiterhin 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 einerseits und der Dicke des Ringspaltes andererseits kaum verändert. Die Differenz dieser Änderung liegt bei $< 1\%$.

Bei einem Vergleich der Maximalwerte der Normalkraft (s. Abb. 14) bei Ansatz ohne Ringspalt und mit Berücksichtigung einer Ringspaltverpressung, ergibt sich eine Differenz von bis zu 15%. Beim maximalen Moment liegt diese Differenz bei ca. 10%.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Um den Einfluss der Ringspaltverpressung bei der Umlagerung der Gebirgsspannungen zu untersuchen, werden z. Z. numerische Untersuchungen am

IGB-TUBS durchgeführt. In einem 1. Arbeitsschritt wurden in Parameterstudien die Steifigkeit des Verpressmörtels und die Ringspaltdicke variiert.

Als erste Tendenzen der Berechnungen ergeben sich folgende Aussagen. Eine Umlagerung der Gebirgsspannungen zur Simulation eines Schildvortriebs lassen sich durch ein einfaches numerisches Modell nicht abbilden. Damit sich ein Gebirgstragring bei den hier ausgewählten Parametern ausbilden kann, ist eine Vorentspannung im Bereich von 10% bis 15% erforderlich.

Des Weiteren zeigen die Untersuchungen, dass der Ansatz einer Ringspaltverpressung und die Berücksichtigung des Bauablaufs auf die Ermittlung von Schnittkräften in einer räumlichen numerischen Berechnung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss haben.

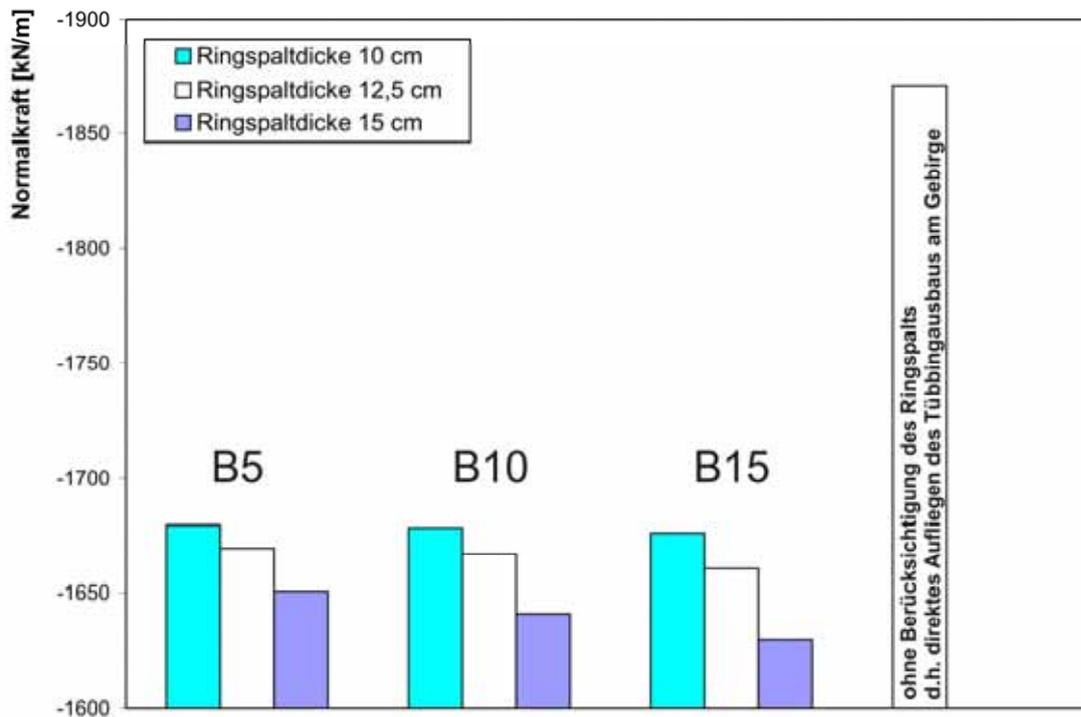


Abb. 14: Abhängigkeit der maximalen Normalkraft von der Betongüte des Verpressmörtels und der Ringspaltdicke bei einer Überlagerungshöhe von 10 m

Die bisher durchgeführten Berechnungen können allerdings nur als Grundlage für weitere Untersuchungen gesehen werden. Um belastbare Ansätze für numerische Berechnungsmodelle für Schildvortriebe zu erhalten, sind noch weitere Einflüsse zu untersuchen bzw. die bisher durchgeführten Untersuchungen noch zu verfeinern. Folgende Untersuchungsschritte werden daher zurzeit ausgeführt.

Bei den Berechnungen wurde eine volle Verbundwirkung zwischen Tübbingausbau, Ringspaltverpressung und dem Untergrund angenommen. Um die Verbundwirkung zu simulieren, ist vorgesehen den Einfluss der Verbundwirkung durch Reibungselemente zu simulieren. Bei dem z. Z. verwendeten Modell sind die Tübbingelenke und die Fugen in Längsrichtung des Tunnels noch nicht abgebildet worden. Deswegen soll das Modell erweitert werden, um die die Steifigkeit des Tunnelbauwerks in Tübbingring- und Längsrichtung berücksichtigen zu können.

Des Weiteren werden Variationsberechnungen durchgeführt, bei denen die Kennwerte für den Untergrund, der Ansatz des Stützdrucks, die Vortriebsgeschwindigkeit, das Stoffgesetz, die Tübbingdicke, die Tübbingbreite und der Tunneldurchmesser variiert werden.

Ebenso sind die Einflüsse durch den Ansatz von Vorpresskräften, Verpressdruck der Ringspaltver-

pressung und Lasten aus dem Nachläufer zu analysieren.

Von besonderer Bedeutung auf die Vorentspannung ist der Überschneidung des Schneidrades in Bezug auf den Durchmesser des Schildes. Es ist nicht auszuschließen, dass die für den Ansatz einer Vorentspannung erforderlichen Verschiebungen im Bereich des Schildes eintreten. Entsprechende theoretische Untersuchungen wurden bereits begonnen.

Um die Übertragbarkeit bzw. eine Verifizierung der numerischen Berechnungsergebnisse zu erhalten, ist eine Rückkopplung durch Messungen an ausgeführten bzw. im Bau befindlichen Tunnelbauwerken wünschenswert.

Literatur

[1] Duddeck, H.: Empfehlungen zur Berechnung von Tunneln in Lockergestein (1980) - Empfehlungen des Arbeitskreises „Tunnelbau“, In: Taschenbuch für den Tunnelbau 1982, Glückauf Verlag, 1981, S. 115 ff.

[2] Schikora, K.; Fink, T.: Berechnungsmethoden moderner bergmännischer Bauweisen beim U-Bahn-Bau, Der Bauingenieur 57 (1982), S. 193 ff.

[3] Meißner, H.: Tunnelbau unter Tage - Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.

[4] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 326 ff., S 393 ff.

[5] Schmitt, J.; Fritsch, M.; Kuhn, C.;
Stahlmann, J.: Einfluss der stofflichen Modellierung auf die numerische Simulation eines Schildvortriebs, 21st CAD-FEM Users' Meeting 2003, 12.11.03 bis 14.11.03, Potsdam

[6] Entwicklungen im maschinellen Vortrieb, Erd-druckschild – EPB, Schaumtechnologie - Einsatzgrenzen, Fa. Herrenknecht, Präsentations-CD

[7] Maidl, B.; Herrenknecht, M., Anheuser, L.: Maschineller Tunnelbau im Schildvortrieb, Ernst & Sohn Verlag, 1995

[8] Rokahr, R. B.: Vorlesungsumdruck, Kurs Unterirdisches Bauen, Institut für Unterirdisches Bauen, Universität Hannover