

Numerische Studien zur Entwicklung von Gebirgsdruckansätzen für Tunnelbohrmaschinen mit Schild

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

Dr.-Ing. Jörg Gattermann

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

1 Einleitung

Im nachbrüchigen bis gebrächen Fels kommen Tunnelbohrmaschinen mit Schild (Schild-TBM) zum Einsatz. Die zurzeit üblichen Gebirgsdrucksansätze für Schildvortriebe wurden für Vortriebe im Lockergestein mit isotropen Materialverhalten des Gebirges entwickelt. Dagegen existieren für Schild-TBM im Fels mit anisotropen Materialverhalten keine speziellen Gebirgsdruckansätze.

Im Rahmen der Forschungen zum Tunnelbau führt das Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB·TUBS) numerische Studien zur Simulation von Schildvortrieben durch. Zur Entwicklung von Gebirgsdruckansätze für Schild-TBM wurden numerische Berechnungen an einem dreidimensionalen Modell mit der Finiten-Differenzen-Methode (FDM) ausgeführt.

2 Bauablauf und Bautechnik bei einer Schild-TBM

2.1 Bauablauf

Die Schild-TBM gehört zum Maschinentyp, der mit einem offenen Schild ausgestattet ist (Bild 1). Als offene Schilde werden Vortriebsmaschinen bezeichnet, die kein geschlossenes System zum Druckausgleich an der Ortsbrust besitzen. Das heißt, es ist keine Abbaukammer definiert. Im Schutz des Schildes, wird der Tunnel weitgehend automatisiert aufgeföhren und ausgebaut. Die Sicherung des Gebirges erfolgt bei einer

Schild-TBM in der Regel mit Stahlbetontübbing, die im Schildschwanz durch einen Tübbingerektor eingebaut werden. Um sich vorzubohren, stützt sich die Schild-TBM mittels hydraulischer Vortriebspresen am zuletzt eingebauten Tübbingring ab.

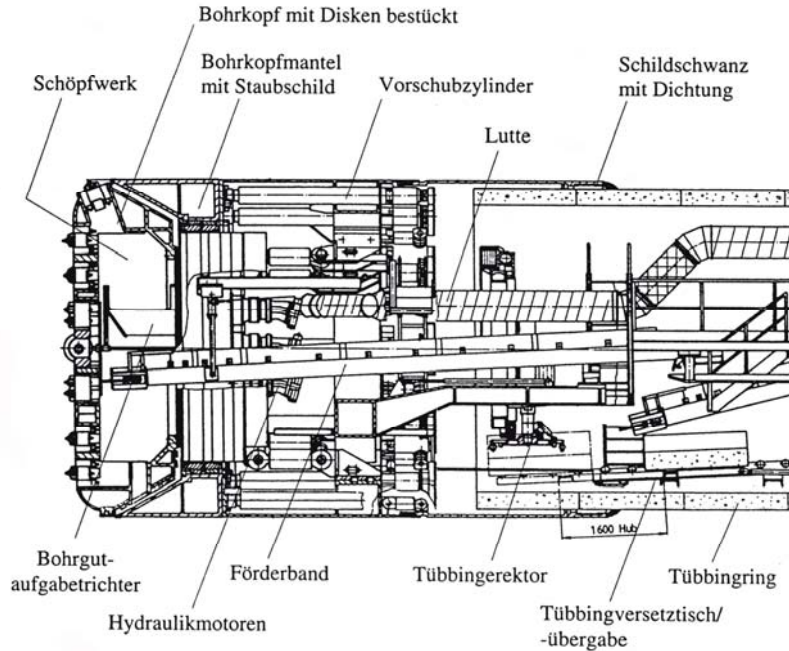


Bild 1 Schild-TBM von Herrenknecht (Girmscheid 2000)

Das Schneidrad ist mit Hartgesteinsdisken bestückt, die an der Ortsbrust abrollen und diese einkerben (Bild 2). Die Kerbwirkung hat zur Folge, dass größere Felsplatten abplatzen. Räumer, die sich etwas hinter den Disken zurückgesetzt befinden, führen den abgebauten Fels hinter das Schneidrad. Über Fördereinrichtungen wird das abgebaute Material dann abtransportiert.

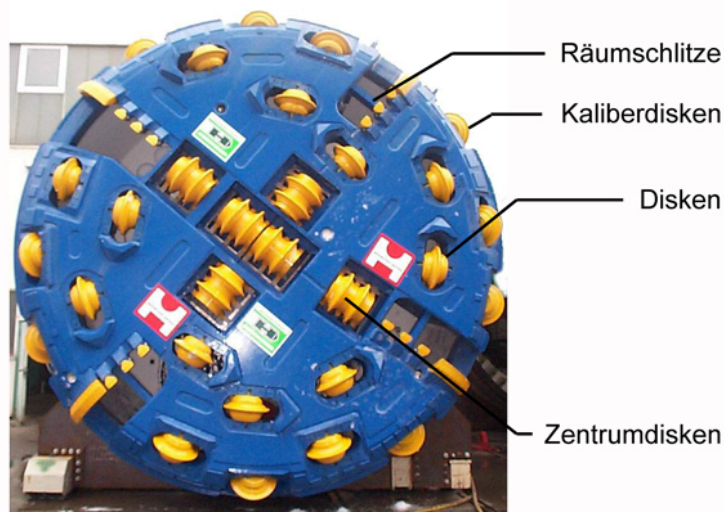


Bild 2 Bohrkopf einer Schild-TBM von Herrenknecht

2.2 Überschnitt

Beim Schildvortrieb entsteht durch die Abbauwerkzeuge und bei Kurvenfahrt durch den Schildmantel selbst temporär ein Ausbruchsquerschnitt, der größer ist als die Querschnittsfläche des Schildes. Diese Differenz wird als Überschnitt bezeichnet. Durch den Überschnitt wird eine Reduzierung der Vortriebskräfte erreicht, um den Vortrieb zu erleichtern bzw. die Auskleidung zu schonen. Ebenso wird durch den Überschnitt die Steuerung des Schildes unterstützt.

Ein planmäßiger Überschnitt lässt sich durch die Kaliberwerkzeuge erzeugen, indem längere Kaliberwerkzeuge am Bohrkopf angeordnet werden. Darüber hinaus kann ein planmäßiger Überschnitt durch einen konischen, d. h. zum Schildschwanz hin sich verjüngenden Schildmantel entstehen. Bei Kurvenfahrten kann durch eine kippbare Schneidradlagerung oder bei fest im Schild eingebauter Abbaumechanik mit drehwinkelabhängigen gesteuerten und ausfahrbaren Kaliberwerkzeugen ein planmäßiger Überschnitt erreicht werden.

2.3 Ringspalt

Aufgrund der o. g. Überschnitts und des kleineren Durchmessers der Tübbingringe ergibt sich zum Gebirge ein Freiraum, der als Ringspalt oder Ringraum bezeichnet wird. Dieser Ringspalt muss verfüllt werden, um Auflockerungen und damit Lastumlagerungen des umgebenden Bodens zu reduzieren und um die notwendige Bettung der Tübbingröhre zu gewährleisten. Für die Verfüllung des Ringspalt es stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung.

In der Regel wird der Ringspalt bei TBM-Vortrieben im Fels oberhalb des Grundwassers mit einem feinkörnigen und enggestuften Kies verfüllt, der z. B. mit einer Trockenspritzmaschine verblasen wird. Dazu werden an den Tübbingungen entsprechende Öffnungen vorgesehen, um Schlauchleitungen anbringen zu können (Bild 3).

Im Gebirge mit geringer Standfestigkeit und in Bereichen in denen Grundwasser vorhanden ist, wird der Ringspalt mit Mörtel verpresst (Bild 4). 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 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.

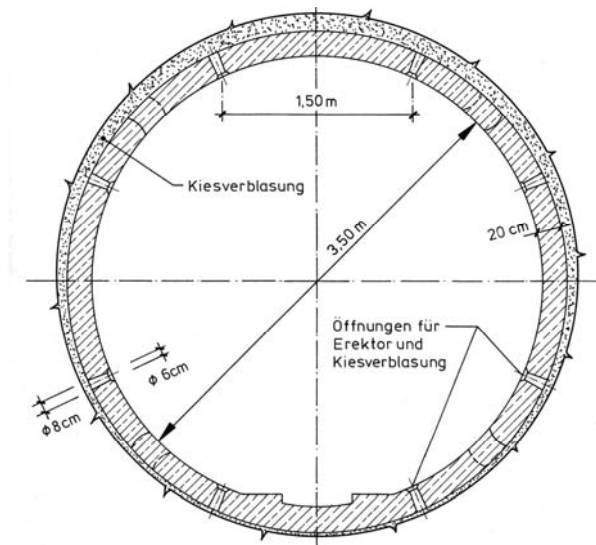


Bild 3 Kiesverblasung (Maidl et al. 2001)

Bei Injektion mit Mörtel haben sich für verschiedene Projekte im Fels Probleme ergeben (Girmscheid 2000). Es wurde beobachtet, dass sich hinter den Vorschubpressen in den Bereichen, in denen der frische Mörtel des Ringspaltes noch nicht erhärtet war, die Tübbinge schwimmen. Des Weiteren wurde beim Schildmantel und den Tübbingen eine Verrollung, aufgrund der ungenügenden Reibung für den Reaktionswiderstand des sehr hohen Bohrkopfantriebsmomentes im Fels, festgestellt.

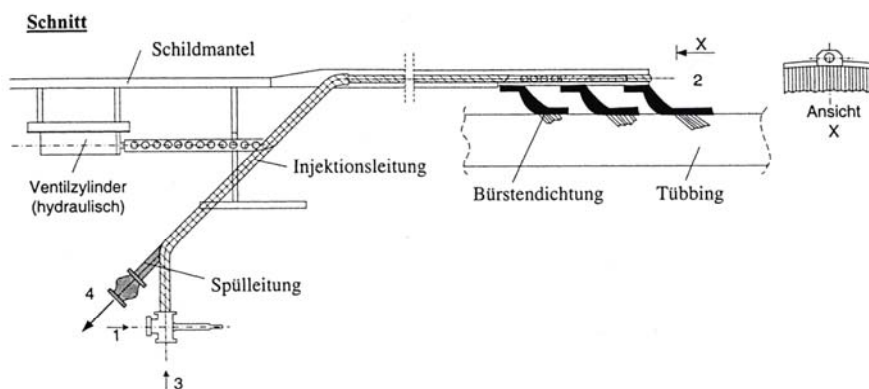


Bild 4 Ringspaltverpresseinrichtung und Bürstendichtung (Girmscheid 2000)

3 Einflüsse auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einer Schild-TBM

Bei einem Vortrieb mit einer Schildmaschine übernimmt der Schildmantel als relativ starrer Körper die Stützung des Hohlraums im Bereich des Schildes. Hinter dem Schild erfolgt die Stützung des Hohlraums durch den Tübbingausbau, der bereits beim Einbau

seine Endfestigkeit besitzt. Durch diese steife Konstruktion besteht die Annahme, dass im Gebirge keine signifikanten Verformungen auftreten und dementsprechend keine Gebirgsspannungsumlagerungen stattfinden dürften.

Die Beobachtungen bei ausgeführten Projekten zeigen jedoch, dass es zu Gebirgsspannungsumlagerungen kommt. Zusammenfassend lassen sich dafür folgende Ursachen benennen:

- Planmäßiger Überschchnitt des Schneidrads
- Planmäßiger Überschchnitt durch einen konischen Schildmantel
- Unplanmäßiger und planmäßiger Überschchnitt durch Kurvenfahrten
- Ringspaltverfüllung / fehlerhafte Ringspaltverfüllung
- zu geringe Ortsbruststützung
- Ungleichmäßige Stützung an der Ortsbrust

4 Numerisches Modell

Für Vortriebe im Lockergestein wurde bereits vom IGB·TUBS der Vortrieb mit einem Erddruckschild durch numerische Berechnungen an einem dreidimensionalen FE-Modell simuliert (Schmitt et al. 2003). Dabei zeigte sich, dass die Umlagerung der Gebirgsspannungen zur Simulation eines Schildvortriebs nicht durch ein einfaches numerisches Modell abzubilden sind. Damit sich ein Gebirgstragring bei einem zweidimensionalen FE-Modell ausbilden konnte, war eine Vorentspannung im Bereich von 10 % bis 15 % erforderlich. Des Weiteren zeigten 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 (Stahlmann et al. 2004).

Zur Entwicklung von Gebirgsdruckansätze für Schild-TBM werden zurzeit numerische Untersuchungen am IGB·TUBS durchgeführt. Dazu wurde ein dreidimensionales numerisches Modell mit der Hilfe der Finiten-Differenzen-Methode (FDM) einer Schild-TBM entwickelt, bei dem die zuvor genannten Erkenntnisse bei der Modellerstellung berücksichtigt wurden (Bild 5). Um die Auswirkungen des Überschchnitts und den Einfluss aus der Ringspaltverfüllung auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges zu untersuchen, wurden folgende geometrischen Variationen bei dem entwickelten numerischen Modell simuliert (Bild 5):

- Modell a: keine Berücksichtigung eines Überschchnitts oder einer fehlerhaften Ringspaltverfüllung
- Modell b: Berücksichtigung eines Überschchnitts
- Modell c: fehlerhafte Ringspaltverfüllung
- Modell d: Kombination aus Modell b und Modell c

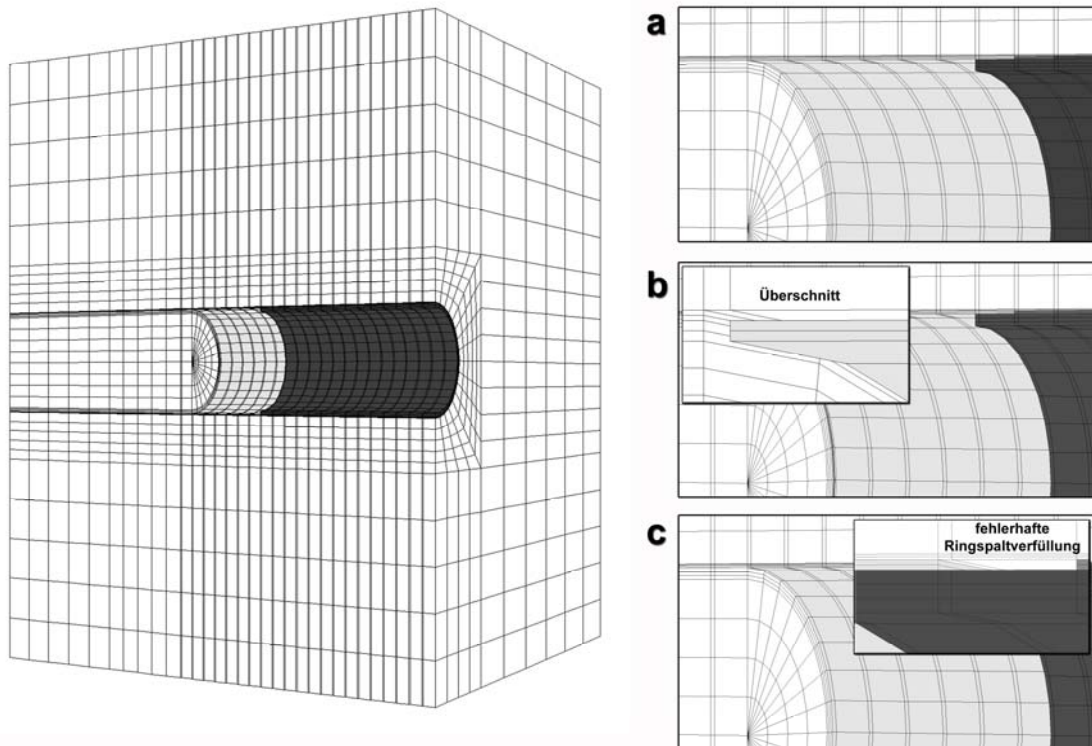


Bild 5 numerisches Modell, geometrische Variationen a) ohne Überschnitt b) mit Überschnitt c) fehlerhafte Ringspaltverfüllung

Bei einem Durchmesser des Tunnelquerschnitts von $d = 11,60$ m wurden die Abmessungen des Berechnungsmodells entsprechend den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik festgelegt (Meißner, 1996). Danach wurden 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 Tübbinge wurde durch eine Vorbemessung für eine Überlagerung von 30 m mit $d = 40$ cm festgelegt. Für die Tübbingbreite wurde 1,5 m angesetzt.

	Untergrund	TBM (St37)	Tübbinge (Stahlbeton B35)	Kies- verfüllung
E-Modul E [MN/m ²]	1.000	210.000	33.500	100
Querdehnzahl v [-]	0,25	0,3	0,2	0,35
Wichte γ [kN/m ³]	26,0	75,0	24,0	16,0
Reibungswinkel φ' [°]	25	-	-	-
Dilatanzwinkel ψ' [°]	0	-	-	-
Kohäsion c' [MN/m ²]	0,5	-	-	-

Tabelle 1 Angesetzte Materialkennwerte

Der Untergrund wurde für die isotropen Berechnungen mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb und nicht assoziierter Fließregel simuliert. In Tab. 1 sind die verwendeten Materialparameter für den Untergrund und die Konstruktionselemente dargestellt.

Zur Vereinfachung der Modellierung wurde nur der Schildmantel im Modell abgebildet. Der Schild, die Tübbinge und die Kiesverfüllung für den Ringspalt wurden mit linear-elastischen Materialverhalten, mit den in Tabelle 1 angegebenen Materialkennwerten, angesetzt.

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, wirkenden Erdruchdruck mit 300 kN/m^2 abgeschätzt.

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 mit einer Länge von 10,5 m simuliert. Im Bauzustand 7 erfolgte die Aktivierung des ersten Tübbingrings im Bereich des Schildschwanzes. Mit Aktivierung des nächsten Tübbingring in Bauzustand 8 wurde das Material des Schildmantels gegen das Material der Kiesverfüllung ausgetauscht. Zur Veranschaulichung sind die Bauzustände 6 bis 9 in Bild 6 dargestellt.

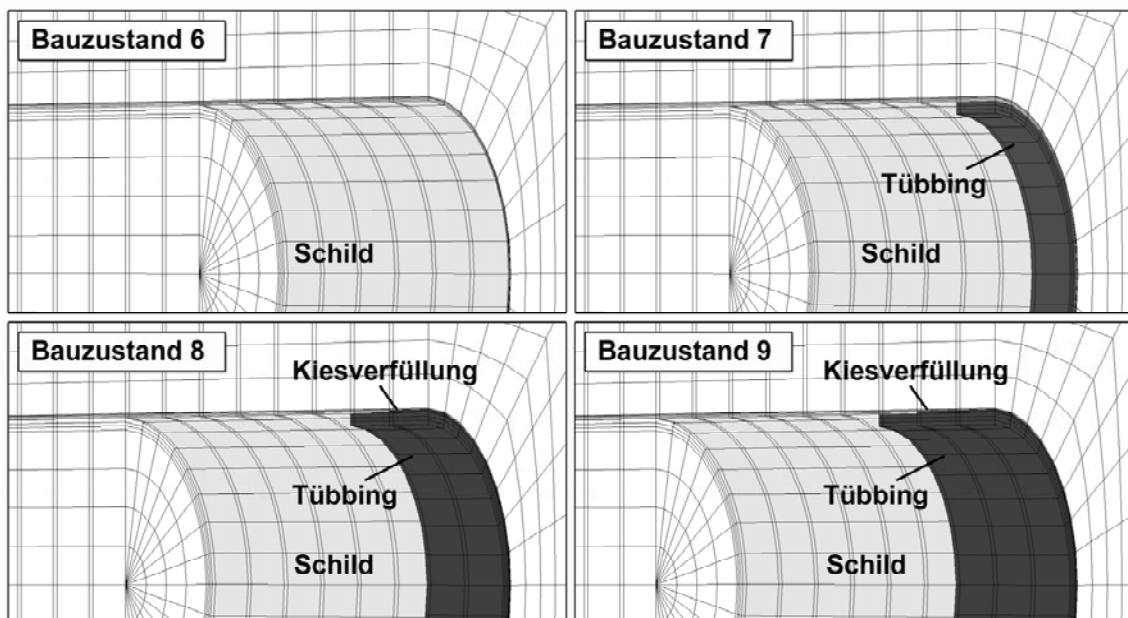


Bild 6 Zuweisung Materialeigenschaften Bauzustände 6 bis 9

5 Berechnungsergebnisse Parameterstudien

Zur Analyse der Umlagerung der Gebirgsspannungen bei den verschiedenen geometrischen Modellvariationen wurden die Radial- und Tangentialspannungen im Bereich der Ulme betrachtet.

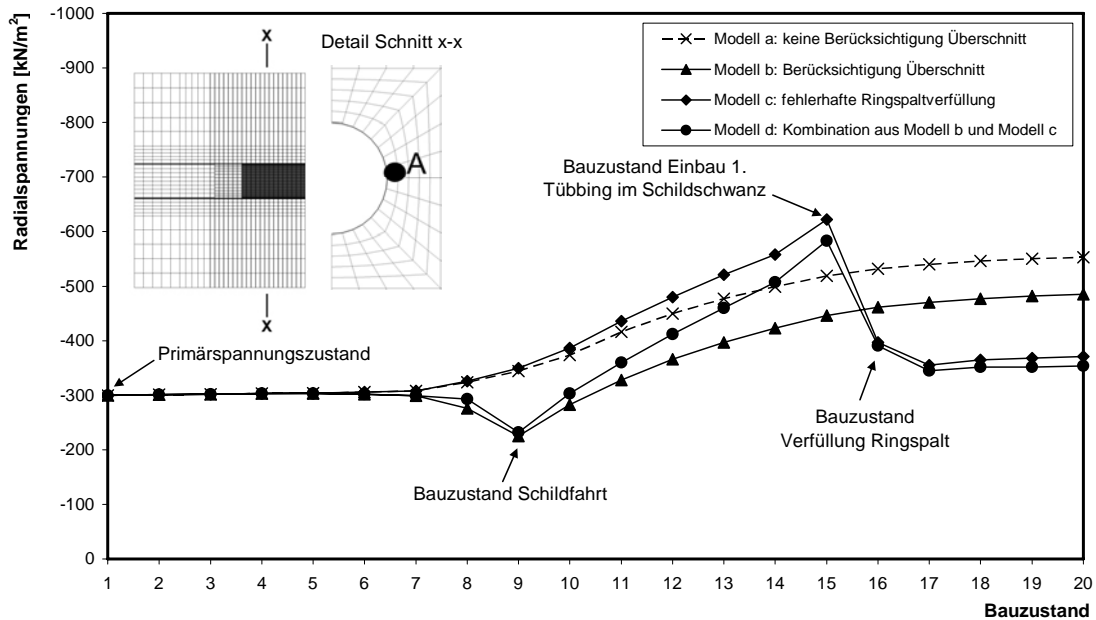


Bild 7 Radialspannungen in Abhängigkeit vom Baufortschritt im Schnitt x-x für den Punkt A

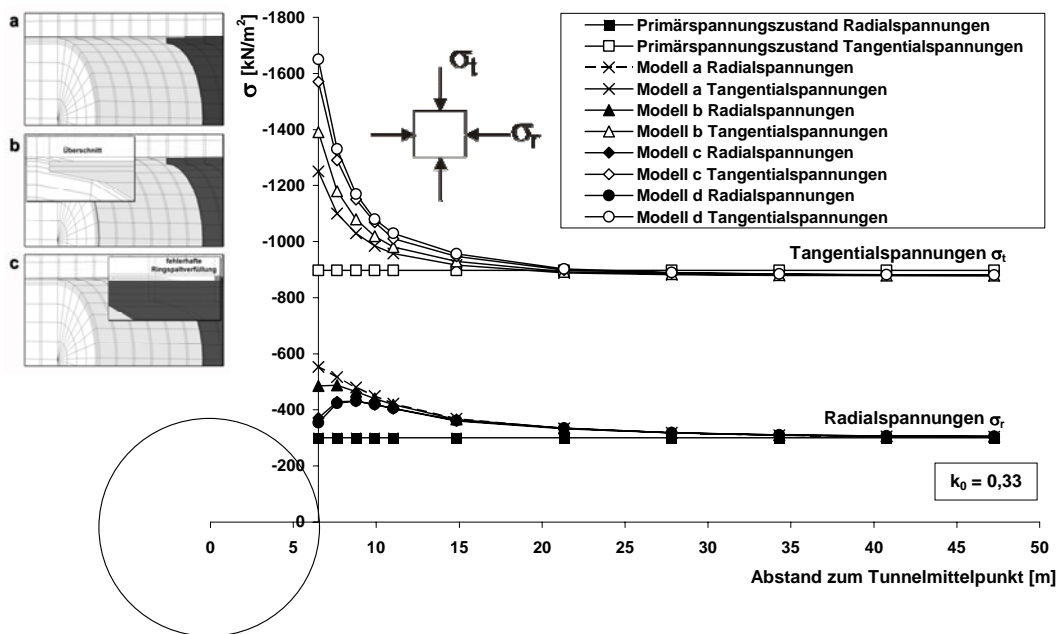


Bild 8 Verläufe der Tangential- und Radialspannungen in der Umgebung des Ausbruchquerschnitts im Bereich der Ulme im Schnitt x-x für den Punkt A

In Bild 7 sind die Radialspannungen in Abhängigkeit vom Baufortschritt im Bereich der Ulme im Schnitt x-x für die verschiedenen geometrischen Modelle a bis d dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Berücksichtigung des Überschnitts und einer fehlerhaften Ringspaltverfüllung in den Berechnungsmodellen zu einer wesentlichen Reduzierung der Radialspannungen im Bereich der Ulme führt. Dabei scheint die fehlerhafte Ringspaltverpressung einen größeren Einfluss auf die Reduzierung der Spannungen zu haben als die Berücksichtigung des Überschnitts. Ebenso ist bei der Analyse der Radial- und Tangentialspannungen im Bereich der Ulme quer zum Tunnelbauwerk im Schnitt x-x festzustellen, dass die Abbildung des Überschnitts und einer fehlerhaften Ringspaltverfüllung einen wesentlichen Einfluss auf die Umlagerung der Gebirgsspannungen haben (Bild 8).

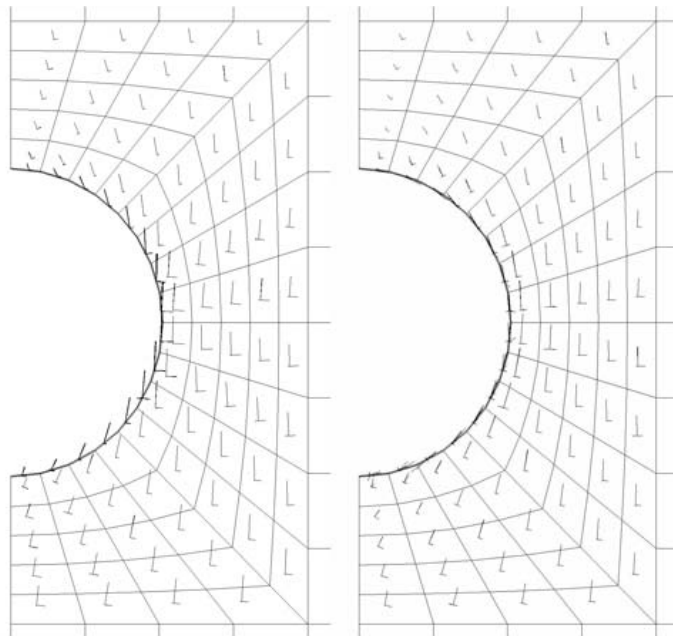


Bild 9 Spannungstrajektorien Modell a / Modell d

Betrachtet man die Spannungstrajektorien im Schnitt x-x, so zeigt sich, dass bei Berücksichtigung des Überschnitts und einer fehlerhaften Ringspaltverfüllung ein Gebirgstragring ausgebildet wird (Bild 9).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die bis jetzt durchgeführten numerischen Untersuchungen zeigen, dass die geometrische Abbildung des Überschnitts und der Ringspaltverfüllung einen wesentlichen Einfluss auf die Umlagerung der Gebirgsspannungen haben. Ebenso zeigen die Analysen, dass die stofflichen Parameter einen wesentlichen Einfluss auf die Ausbildung des Gebirgstragringes haben.

In weiteren Berechnungen werden die Einflüsse untersucht, die sich aus der Variation der geometrischen Parameter z. B. Größe des Überschnitts, Dicke des Ringsspalts, Tunneldurchmesser, Überlagerungshöhe und aus der Variation der stofflichen Parameter zur Beschreibung des Untergrundes z. B. E-Modul, Querdehnzahl, Scherfestigkeiten ergeben.

In der nächsten Stufe sollen numerische Simulationen durchgeführt werden, bei denen das anisotrope Materialverhalten von Festgestein durch die Anwendung entsprechender Stoffgesetze berücksichtigt wird.

Literatur

Girmscheid, G. (2000)

Baubetrieb und Bauverfahren im Tunnelbau. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2000

Maidl, B., Schmid, L., Ritz, W., Herrenknecht, M. (2001)

Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 2001

Meißner, H. (1996)

Tunnelbau unter Tage. Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.

Schmitt, J., Fritsch, M., Kuhn, C., Stahlmann, J. (2003)

Einfluss der stofflichen Modellierung auf die numerische Simulation eines Schildvortriebs. 21st CAD-FEM Users' Meeting 2003, 12.11.03 bis 14.11.03, Potsdam

Stahlmann, J., Gattermann, J., Schmitt, J. (2004)

Untersuchungen zum Einfluss der Ringspaltverpressung auf die Umlagerung der Gebirgsspannungen beim maschinellen Tunnelvortrieb. Tagungsband des 4. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 20.-21.01.2004, S. 305-316