

Einfluss des Stoffgesetzes zur numerischen Modellierung des Untergrundes auf die Setzungen bei oberflächennahen maschinell aufgefahrenen Tunnelbauwerken

Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann, Dipl.-Ing. J. Schmitt, cand. ing. M. Oberdorf

1 Einleitung

Parallel zu den klassischen Bauverfahren für den Vortrieb bergmännisch aufgefahrener Tunnel in Spritzbetonbauweise hat sich der maschinelle Tunnelbau im Schildvortrieb weltweit etabliert. Mit den Schildvortriebsverfahren können Tunnelbauten in stark gebräuchtem Gebirge, in rolligem Lockergestein sowie in weichplastischen oder gefährdeten Böden insbesondere im Grundwasser und bei geringer Überdeckung realisiert werden. Der kontinuierliche Abbau und die Stützung des Bodens an der Ortsbrust, der schrittweise Vortrieb der Schildmaschine, der Tunnelausbau, die vortriebsbegleitende Ringspaltverpressung sowie die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen Schildmaschine, Boden, Vortriebspresen, Tunnelausbau, Nachläufer und Ringspaltverpressung stellen hohe Anforderungen an ein wirklichkeitsnahes Berechnungsmodell.

Um das Spannungsverformungsverhalten des Untergrundes bei Tunnelvortrieben in Abhängigkeit der einzelnen Bauzustände beschreiben zu können, haben sich numerische Methoden als geeignet erwiesen. Dabei ist die Wahl des Materialgesetzes zur Beschreibung des Spannungsverformungsverhaltens des Untergrundes und insbesondere für die Prognose der Setzungen an der Geländeoberkante von Bedeutung.

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages soll der Einfluss bei der Wahl des Stoffgesetzes zur Beschreibung des Untergrundes auf die prognostizierbaren Setzungen bei oberflächennahen maschinell aufgefahrenen Tunnelbauwerken dargestellt werden.

2 Das Projekt METROSUR Madrid, Spanien

Als Erweiterung der Metro der spanischen Hauptstadt Madrid wurde unter dem Namen „METROSUR“ der Neubau eines 40,8 km langen Tunnels einer Ringlinie südwestlich der Innenstadt geplant und im Zeitraum von 1999 bis 2003 umgesetzt. Einen Überblick liefert Bild 1.

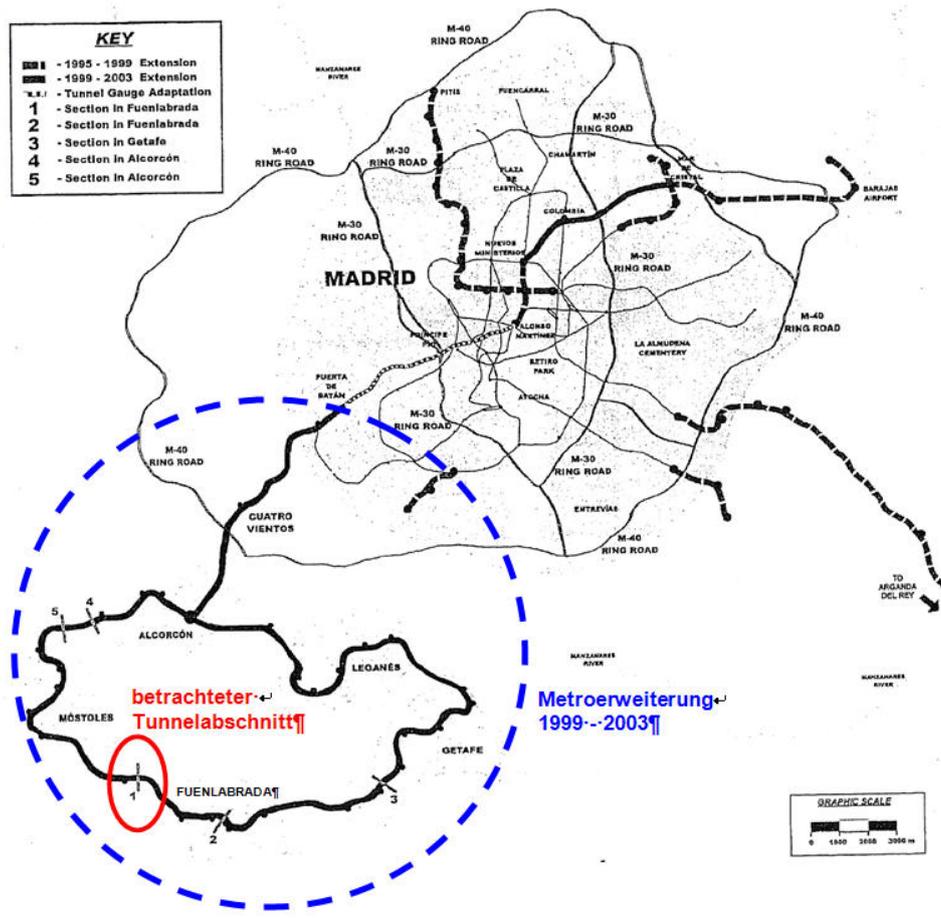


Bild 1: METROSUR (Melis et. al., 2005)

In diesem Zeitraum kamen unterschiedliche Erddruckschildmaschinen verschiedener Hersteller zum Einsatz (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Erddruckschildmaschinen (in Anlehnung an Melis et. al., 2005)

1999 - 2003		
EPB	Linie	maschinell aufgefahrene Strecke
Herrenknecht – 1	Linie 8, Flughafen	3.357 m
Herrenknecht – 1	METROSUR, Fuenlabrada	2.841 m
Herrenknecht – 2	METROSUR, Alcoron	7.440 m
Herrenknecht – 4	METROSUR, Getafe	6.467 m
Mitshubishi-NFM – 2	METROSUR, Leganes	6.282 m
Mitshubishi-NFM – 1	Linie 10	2.760 m
Mitshubishi-NFM – 1	METROSUR, Mostoles	3.963 m
Lovat	Linie 10, Cuatro Vientos	6.089 m

Um die numerischen Simulationen möglichst realitätsnah abbilden zu können, wurde als Grundlage für die verschiedenen Berechnungsansätze wie z. B. Geometrie Schildmaschine, Vortriebsgeschwindigkeit oder Bodenkennwerte ein Abschnitt dieses Projektes ausgewählt (vgl. Bild 1). Des Weiteren lagen für dieses Projekt veröffentlichte Ergebnisse der Setzungenmessungen an der GOK vor (Melis et. al., 2005) und ermöglichten somit die Überprüfung der numerischen Berechnungsergebnisse. Im betrachteten Tunnelabschnitt bei Fuenlabrada kam ein EPB-Schild der Fa. Herrenknecht mit einem Schilddurchmesser von $D = 9.330 \text{ mm}$ und einer Bohrkopfleistung von 2.800 kW zum Einsatz (Bild 2).



Bild 2: EPB-Schild Fa. Herrenknecht, METROSUR

3 Numerisches 3D-Modell

Für die numerischen Berechnungen wurde das explizite Finite Differenzen Programm $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) verwendet.

In dem numerischen dreidimensionalen Modell wurde der komplette Bauablauf eines EBP-Schildes abgebildet. Die geometrischen Abmessungen, die Material- und Untergrundkennwerte und der Bauablauf entsprachen dabei, wie zuvor beschrieben,

denen des EPB-Schildes, welches im Tunnelabschnitt bei Fuenlabrada zum Einsatz kam.

Das numerische Modell (Bild 3) wurde durch die Annahme einer Spiegelsymmetrie im Tunnelquerschnitt und durch die Reduzierung des Untergrundaufbaus auf die maßgebenden drei Bodenschichten zur Verringerung des Rechenaufwands hinsichtlich der Dauer und Datenauswertung vereinfacht. Der Tunneldurchmesser wurde mit einem Ausbruchsdurchmesser von $D = 9,33 \text{ m}$ angenommen. Die Abmessungen des Berechnungsmodells betragen seitlich vom Tunnelquerschnitt 42 m und $23,3 \text{ m}$ vom Tunnelquerschnitt zum unteren Modellrand bei einer Überlagerung von $h = 9,5 \text{ m}$. Die Festlegung der Modellgeometrie erfolgte anhand von Voruntersuchungen auf Grundlage der Empfehlungen der DGGT Arbeitskreis 1.6 (1996). Die Gesamtlänge des Berechnungsmodells beträgt $71,5 \text{ m}$, in dem eine Vortriebsstrecke von 45 m Länge abgebildet wurde.

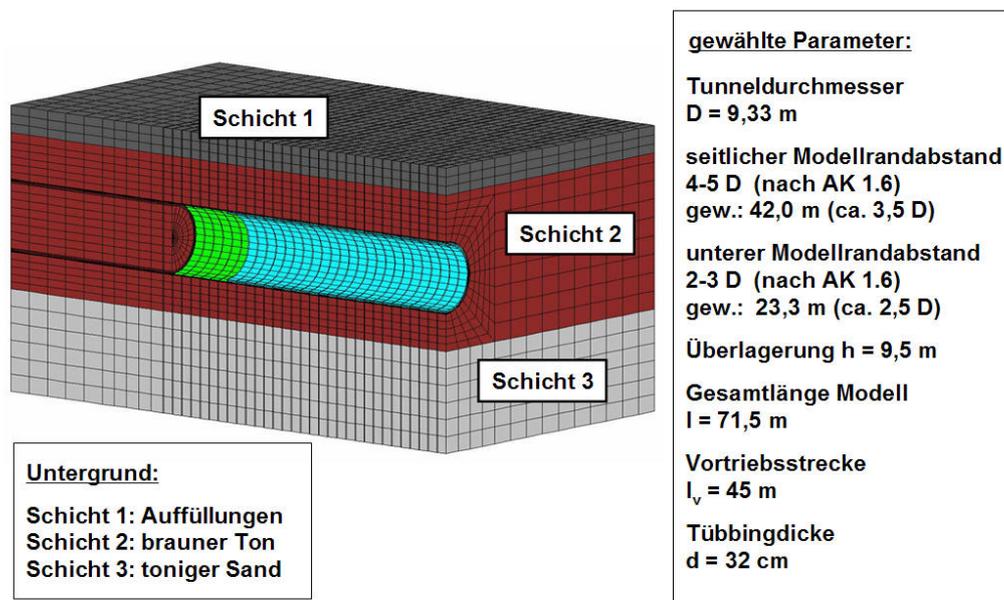


Bild 3: Numerisches Modell Vortrieb mittels eines EPB-Schildes

Von dem Schildbereich des EPB-Schildes, der sich aus den Hauptkomponenten Schneidrad, Schneidradantrieb, Schildmantel, Vortriebspresen, Schneckenförderer und Tübbingrektor zusammensetzt, wurde vereinfacht nur der Schildmantel diskret abgebildet (Bild 4). Die Berücksichtigung der Steifigkeiten und der Wichten des Gesamtsystems erfolgte durch den Ansatz einer Ersatzsteifigkeit und einer Ersatzwichte. Der Stützdruck an der Ortsbrust wurde durch den Ansatz einer rechteckig verteilten Flächenlast im Modell in entsprechender Größenordnung aus den erfassten Vortriebsdaten simuliert. Des Weiteren wurde im Schneidradbereich ein Überschnitt von

7,5 cm abgebildet (Bild 4). Die Tübbingsicherung wurde mit einer Dicke von $d = 32$ cm berücksichtigt (Bild 4). Ebenso erfolgte die Abbildung des Ringspaltes mit einer Dicke von $d = 8$ cm (Bild 4).

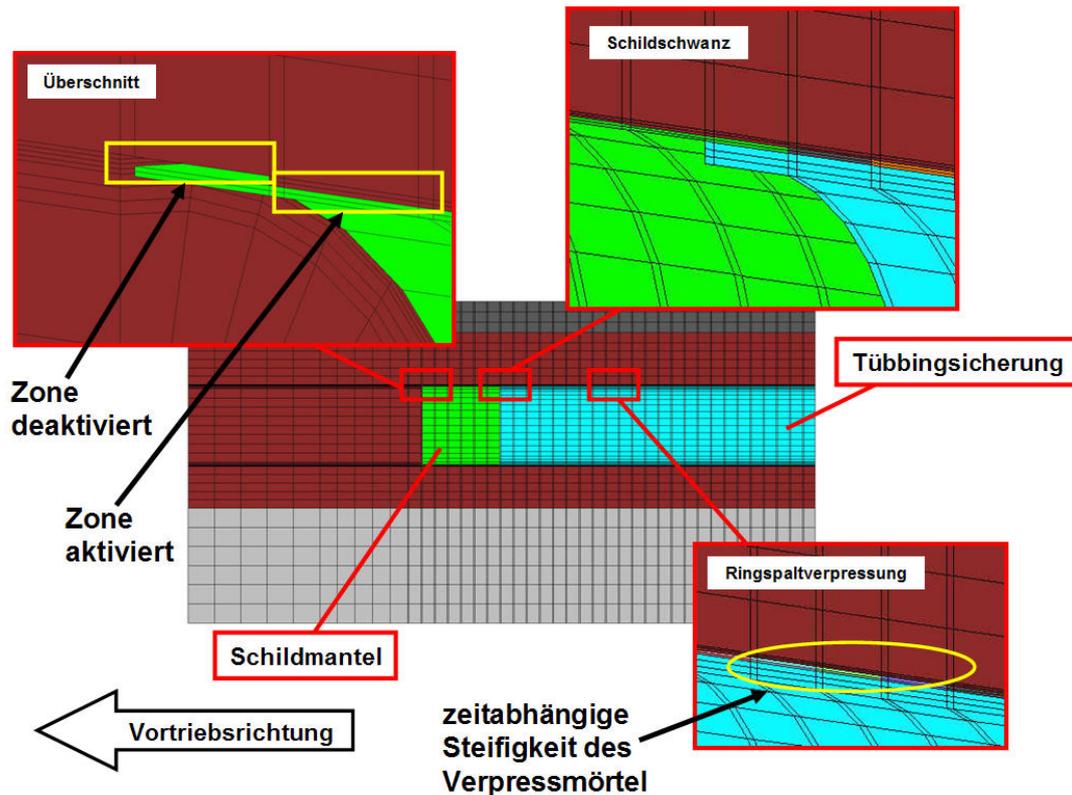


Bild 4: Diskretisierung numerisches Berechnungsmodell EPB-Schild

Hauptbestandteil der numerischen Berechnung war die Untersuchung des Einflusses der Wahl des Stoffgesetzes zur Abbildung des Untergrundes. In den Berechnungen wurden dabei folgende elastoplastische Stoffgesetze analysiert:

- (1) linearelastisches Stoffgesetz
- (2) linearelastisches-idealplastisches Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb
- (3) linearelastisches-idealplastisches Stoffgesetz nach Drucker-Prager (Extensionskegel)
- (4) Elastoplastisches Stoffgesetz mit Ver- bzw. Entfestigungsregel (Strain-Hardening / Softening)
- (5) Modifiziertes Cam-Clay-Modell

Auf die einzelnen Stoffgesetze soll im Rahmen dieses Beitrags nicht explizit eingegangen werden. Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Stoffgesetze ist z. B. den Handbüchern des verwendeten Programms $FLAC^{3D}$ zu entnehmen.

Die verwendeten Stoffgesetze lassen sich in drei Gruppen unterteilen.

- a) Stoffgesetze mit ausschließlich linearem Verformungsanteil
- b) Stoffgesetze mit linearem Verformungsanteil und plastischen Verformungsanteil beim Überschreiten der Materialfestigkeit
- c) Stoffgesetze mit linearem Verformungsanteil und plastischen Verformungsanteilen vor und nach dem Überschreiten der Materialfestigkeit

Während sich das erste Stoffgesetz (1) der Gruppe a) zuordnen lässt, sind die Stoffgesetze (2) / (3) / (4) in die Gruppe b) und das Stoffgesetze (5) in die Gruppe c) einzuordnen. Im Folgenden sind die einzelnen stofflichen Parameter der verwendeten Stoffgesetze dargestellt.

Tabelle 2a: Materialparameter Untergrund (in Anlehnung an Melis et. al., 2005)

Stoffgesetz	linearelastisch / Mohr-Coulomb / Drucker-Prager elastoplastisches Stoffgesetz mit Ver- bzw. Entfestigungsregel			
	Steifemodul E_s [MN/m ²]	Querdehnzahl ν [-]	Reibungswinkel φ' [°]	Kohäsion c' [kN/m ²]
Schicht 1 (Auffüllungen)	10	0,35	28	5
Schicht 2 (brauner Ton)	160	0,30	32	36,5
Schicht 3 (toniger Sand)	100	0,28	33	15

Tabelle 2b: Materialparameter Untergrund (in Anlehnung an Melis et. al., 2005)

Stoffgesetz	Modifiziertes Cam-Clay-Modell		
	Neigung der Kompressionskurve λ [-]	Neigung der Schwellkurve κ [-]	Neigung der Critical State Line M [-]
Schicht 1 (Auffüllungen)	0,110	0,020	1,11
Schicht 2 (brauner Ton)	0,086	0,009	1,30
Schicht 3 (toniger Sand)	Stoffgesetz Mohr-Coulomb		

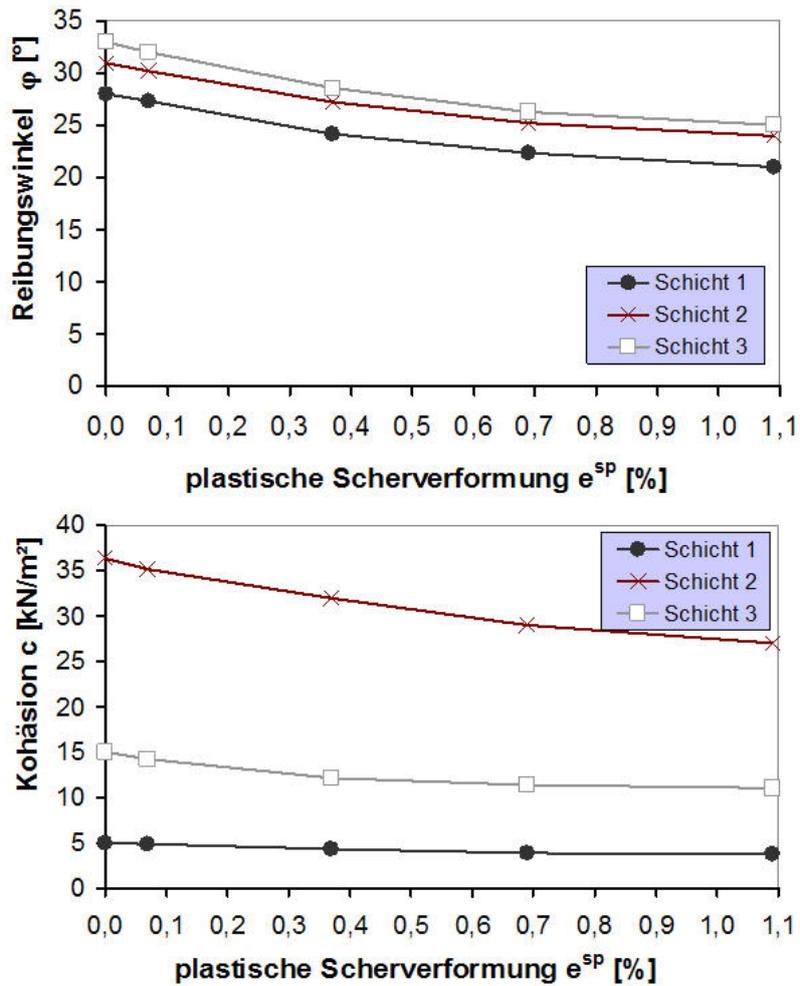


Bild 5: Definition der Entfestigungsfunktion für das elastoplastische Stoffgesetz mit Ver- bzw. Entfestigungsregel

Tab. 3: Materialparameter Schildmantel / Tübbingsicherung / Ringspaltverpressmörtel

Stoffgesetz	linearelastisch		
	Elastizitätsmodul	Querdehnzahl	Wichte / Ersatzwichte
	E	ν	γ / γ_{Ersatz}
Material	[MN/m ²]	[-]	[kN/m ³]
Schildmantel (Stahl)	210.000	0,3	650
Tübbingsicherung (B35)	33.500	0,2	24
Ringspaltverpressmörtel (B5)	zeitabhängig	0,2	22

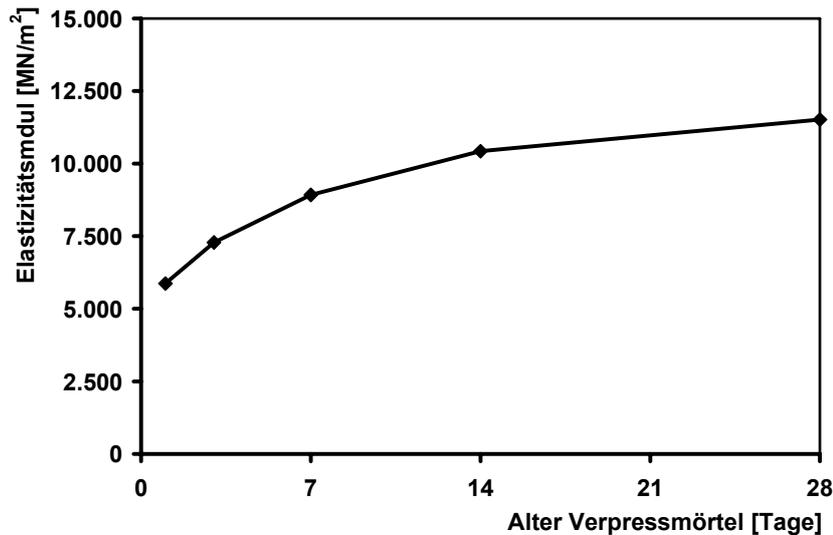


Bild 6: Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls des Verpressmörtels

Der Schildmantel, die Tübbingsicherung und der Ringspaltverpressmörtel wurden mit linearelastischen Materialverhalten mit den in Tab. 3 angegebenen Materialkennwerten angesetzt. Der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels wurde in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die einzelnen Berechnungslastfälle angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Betons zu simulieren (Bild 6). Dazu erfolgte eine Umrechnung der Druckfestigkeit in den Elastizitätsmodul entsprechend Grübl et. al., 2001.

Die räumlichen Berechnungen wurden als step-by-step Analyse durchgeführt. Dazu wurden 30 Lastfälle bzw. 29 Bauzustände abgebildet. Im ersten Bauzustand wurde der Primärspannungszustand simuliert. In den nächsten Bauzuständen erfolgte die Abbildung der Schildfahrt bzw. der Vortrieb der Schildmaschine für eine Länge von 7,5 m. Im Bauzustand 6 wurde der erste Tübbingring im Bereich des Schildschwanzes aktiviert. Mit Aktivierung des nächsten Tübbingrings in Bauzustand 7 wurde das Material des Schildmantels gegen das Material des Verpressmörtels ausgetauscht. Dabei wurde der Elastizitätsmodul des Verpressmörtels entsprechend der Vortriebsgeschwindigkeit, die mit 15 m/Tag berücksichtigt wurde, angepasst. In den darauf folgenden Bauzuständen erfolgte für jeden Tübbingring die Anpassung des Elastizitätsmoduls des Verpressmörtels, um so die zeitliche Entwicklung des Erhärtungsvorgangs des Verpressmörtels abbilden zu können. Zur Veranschaulichung sind die maßgebenden Bauzustände in Bild 7 abgebildet.

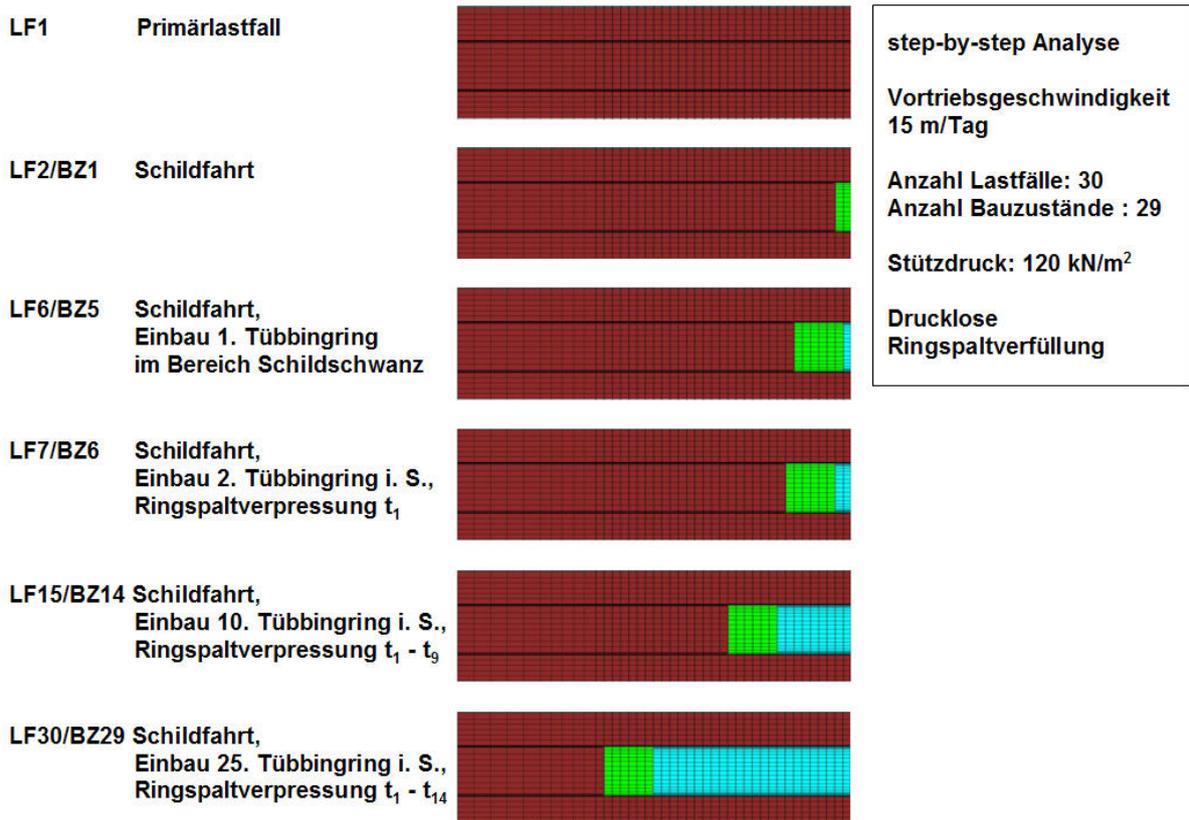


Bild 7: Bauablauf numerisches Modell

4 Berechnungsergebnisse

Die durchgeführten Berechnungen wurden hinsichtlich der Setzungen an der GOK sowie der Vertikal- und Horizontalverschiebungen für bestimmte Punkte an der GOK und im Bereich des Tunnelquerschnitts ausgewertet. In Bild 8 sind exemplarisch die berechneten räumlichen Setzungenmulden für das linearelastische-idealplastische Stoffgesetz nach Mohr-Coulomb und das modifizierte Cam-Clay-Modell dargestellt. Alle untersuchten Stoffgesetze weisen bis auf das modifizierte Cam-Clay-Modell annähernd die gleiche Größe und Verteilung der Setzungen an der GOK auf. Dabei ergeben sich für alle untersuchten Stoffgesetze bis auf das modifizierte Cam-Clay-Modell in bestimmten Bereichen unrealistische Hebungen. Beim Vergleich der numerisch ermittelten Setzungen mit den veröffentlichten In Situ-Setzungsmessungen ist festzustellen, dass für alle Stoffgesetze mit Ausnahme des modifizierten Cam-Clay-Modells zu geringe Setzungen berechnet wurden (vgl. Bild 9). Dagegen zeigen die Berechnungsergebnisse mit dem modifizierten Cam-Clay-Modell im Bereich unmittelbar über dem Tunnelquerschnitt zu große bzw. in den Randbereichen zu kleine Setzungen.

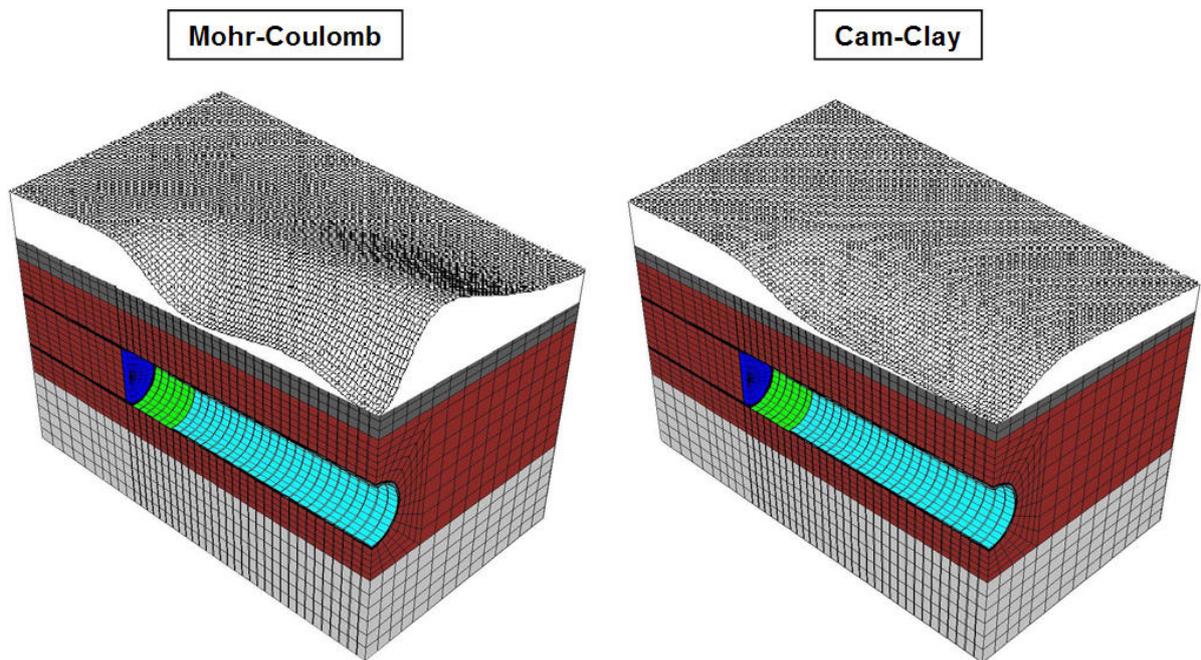


Bild 8: Räumliche Darstellung der Setzungsmulde, Bauzustand 29, Vergleich Mohr-Coulomb / Cam-Clay

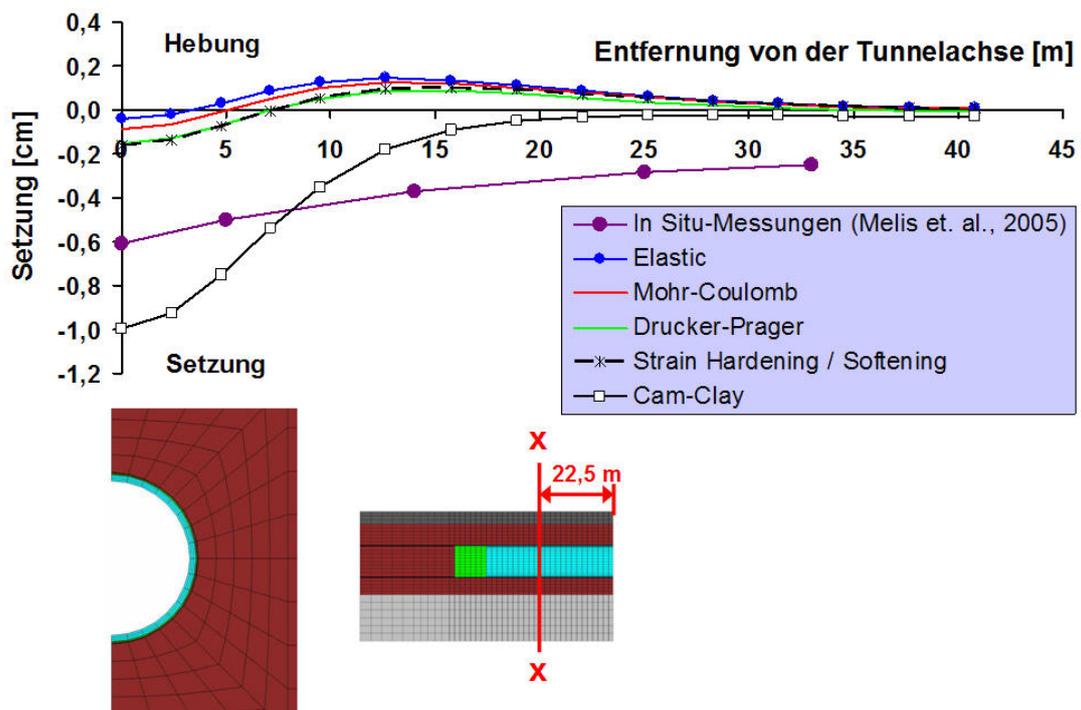


Bild 9: Setzungsmulden an der GOK quer zur Vortriebsrichtung im Schnitt x-x, Bauzustand 29, Vergleich der untersuchten Stoffgesetze

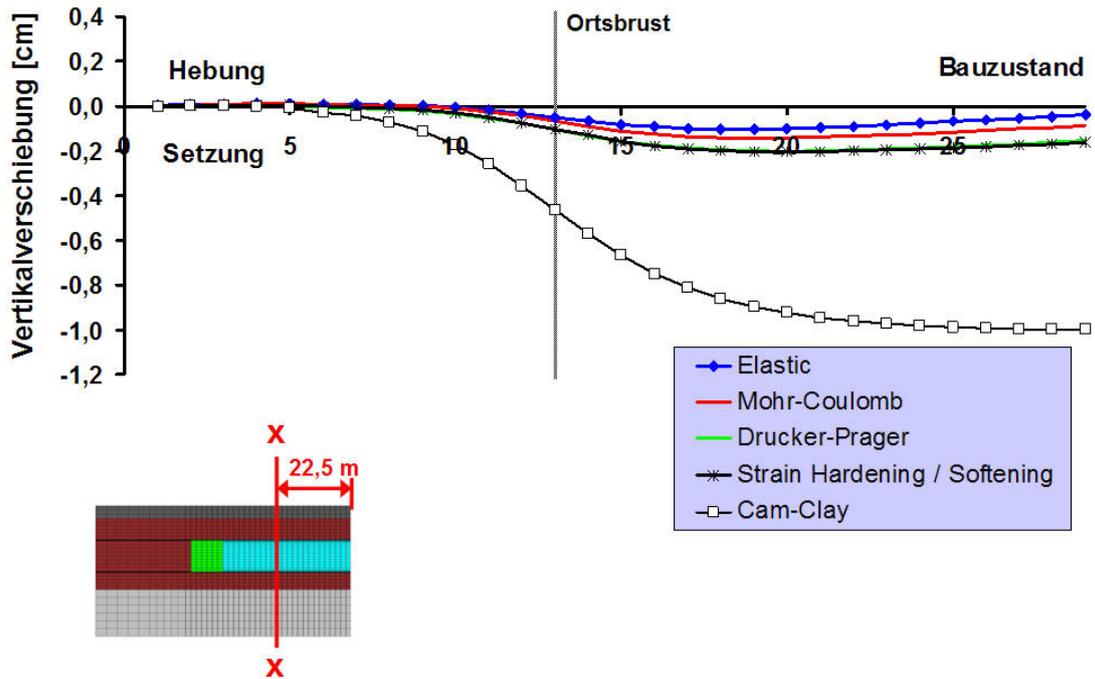


Bild 10: Vertikalverschiebung an der GOK in Abhängigkeit vom Bauzustand

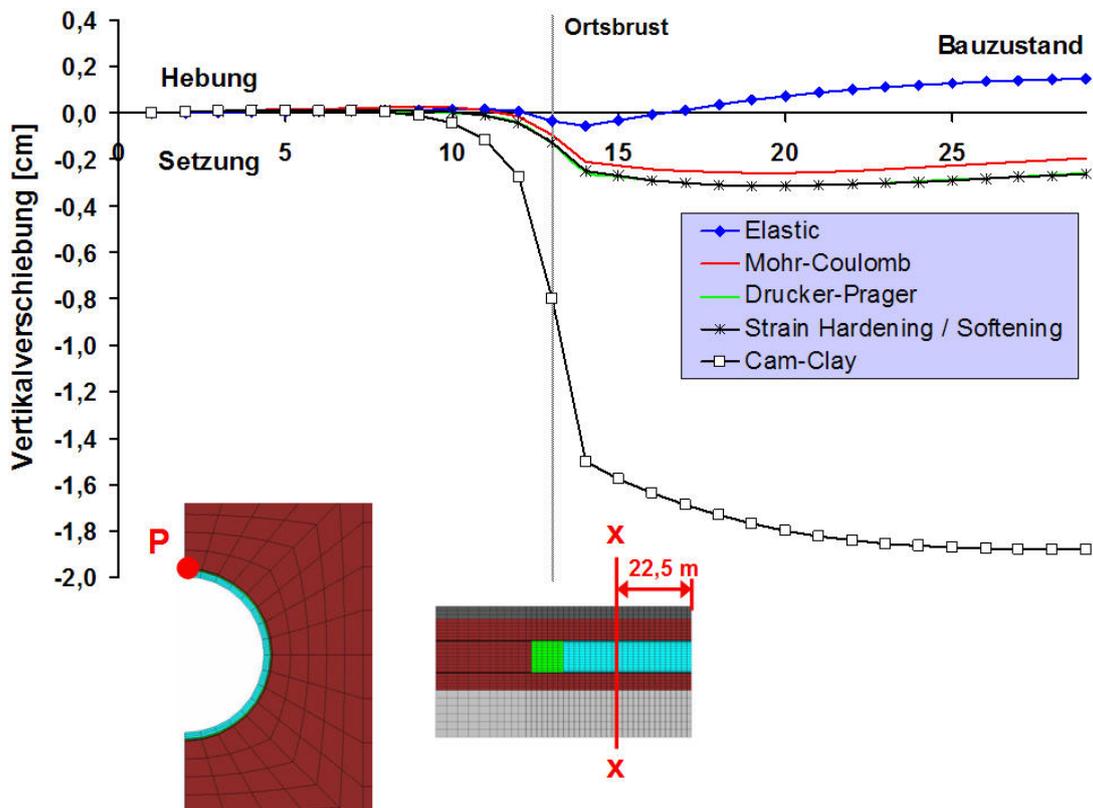


Bild 11: Vertikalverschiebung in der Firste in Abhängigkeit vom Bauzustand

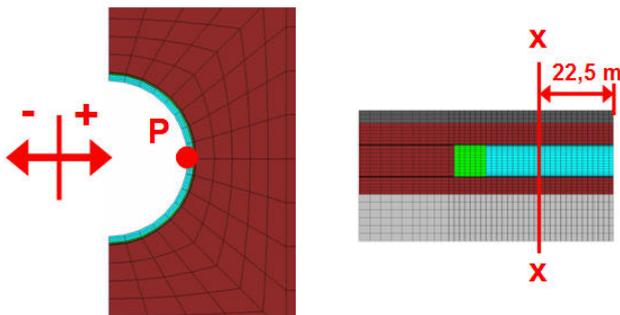
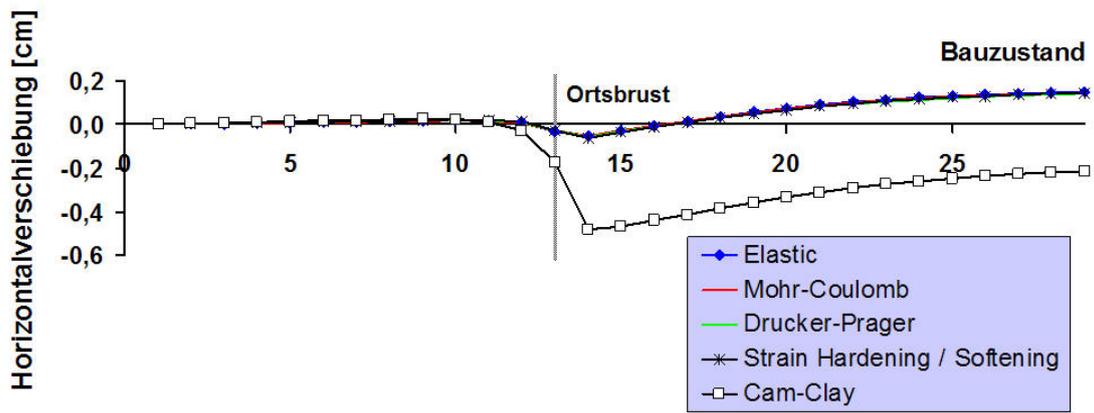


Bild 12: Horizontalverschiebung in der Ulme in Abhängigkeit vom Bauzustand

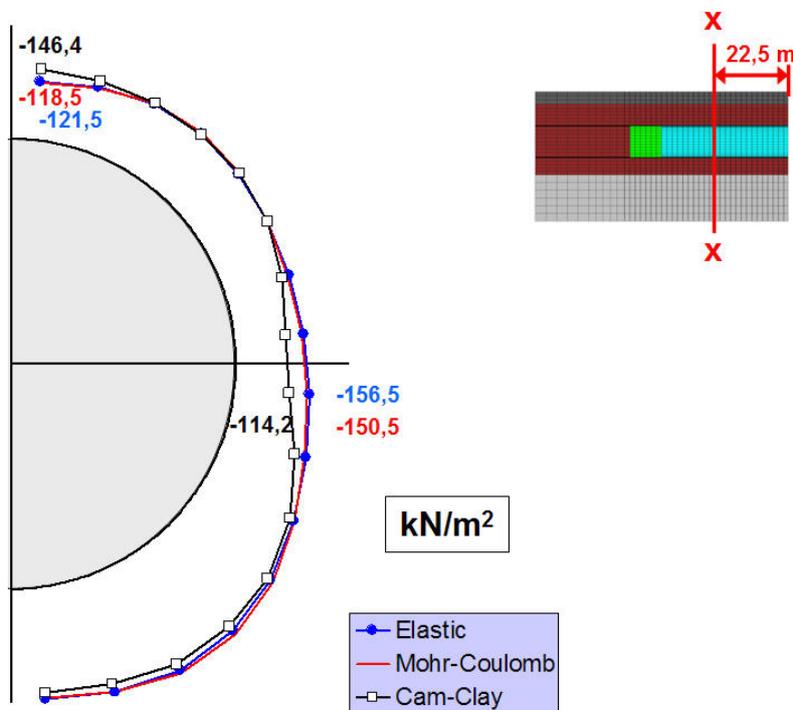


Bild 13: Radialspannungen Untergrund im Schnitt x-x für den Bauzustand 29, Vergleich linearelastisch / Mohr-Coulomb / Cam-Clay

Betrachtet man die Setzungen bzw. Verschiebungen in Abhängigkeit vom Bauzustand (Bild 10 bis Bild 12), so zeigt sich auch hier, dass sich für die Stoffgesetze, die keine plastischen Verformungen vor dem Überschreiten der Materialfestigkeit berücksichtigen, annähernd identische Ergebnisse ergeben und diese in ihre Größe geringer sind als bei dem modifizierten Cam-Clay-Modell. Für die Vertikalverschiebung in der Tunnelfirste ergeben sich für alle untersuchten Stoffgesetze bis auf das linearelastische Stoffgesetz Setzungen (Bild 11). Für die Horizontalverschiebungen in der Ulme zeigt nur das modifizierte Cam-Clay-Modell Verschiebungen in den Tunnelquerschnitt, dagegen ergeben sich für die anderen Stoffgesetze Verschiebungen in den Untergrund (Bild 12).

In Bild 13 sind die Radialspannungen für den letzten Bauzustand dargestellt. Dieses zeigt, dass sich für die untersuchten Stoffgesetze annähernd gleich Spannungsverläufe ergeben.

5 Zusammenfassung

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass mit den verwendeten Bodenkennwerten und Stoffgesetzen die messtechnisch erfassten Setzungen nicht exakt approximiert werden können. Für Stoffgesetze, die ausschließlich einen linearen Verformungsanteil besitzen bzw. die keine plastischen Verformungen vor dem Überschreiten der Materialfestigkeit simulieren, ergeben sich unrealistische Hebungen. Ebenso liefern die untersuchten Stoffgesetze mit Ausnahme des modifizierten Cam-Clay-Modells annähernd gleiche Setzungsbeträge und Verschiebungen, was ebenso darauf zurückzuführen ist, dass sich nur im geringen Maße plastische Bereiche bzw. plastische Verformungen ergeben.

Die berechneten Radialspannungen sind für die verschiedenen Stoffgesetze annähernd gleich.

Es ist festzustellen, dass die Prognose auf der Grundlage von geschätzten oder labortechnisch ermittelten Bodenkennwerten nur als „erster Schritt“ angesehen werden kann. Das Baugrundmodell muss anhand der Messungen im Zuge des Vortriebs kalibriert werden.

Für die Setzungsprognose ist ein höherwertiges Stoffgesetz von Vorteil, welches bereits plastische Verformungen vor dem Überschreiten der Materialfestigkeit simuliert, um so zu realistischeren Setzungsprognosen zu gelangen. Dazu ist anzumerken,

dass die dafür benötigte Bodenkennwerte- bzw. Stoffgesetzparameter in der Regel nicht in einem Baugrundgutachten zu finden sind.

Die dargestellten Ergebnisse sind nicht verallgemeinerbar und sind von Fall zu Fall zu betrachten.

6 Literatur

FLAC^{3D} (2002): Manual Fluid-Mechanical Interaction, FLAC3D Version 2.1, 1st Edition, Itasca Consulting Group, Inc., Mill Place, 111 Third Avenue South, Suite 450, Minneapolis, Minnesota, 55401 (USA).

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

Meißner, H. (1991): Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e. V., Geotechnik 14, 1991, S 1 ff.

Meißner, H. (1996): Tunnelbau unter Tage. Empfehlungen des Arbeitskreises I.6 „Numerik in der Geotechnik“ Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.

Melis, M.; Medina, L.; Rodriguez, J. (2002): Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension, Canadian Geotechnical Journal, NRC Canada, Heft 39, S.1273-1287

Melis, M.; Medina, L.; Rodriguez, J. (2005): Predicted versus measured soil movements induced by shield tunnelling in the Madrid Metro extension Canadian Geotechnical Journal, NRC Canada, Heft 42, S.1160-1172

Schmitt, J.; Fritsch, M.; Kuhn, C.; Stahlmann, J. (2003): Einfluss der stofflichen Modellierung auf die numerische Simulation eines Schildvortriebs, 21. CAD-FEM USER`S MEETING, 12.-14. November 2003, Potsdam, Herausgeber: CAD-FEM Grafing b. München, Abs. 1.4.9

Schmitt, J.; Stahlmann, J.; Gattermann, J. (2005): Numerische Studien zur Entwicklung von Gebirgsdruckansätzen für Tunnelbohrmaschinen mit Schild, 12. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 17.03.2005 in Darmstadt, Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt, Heft 71, S. 47-56

Schmitt, J.; Fritsch, M.; Gattermann, J.; Stahlmann, J. (2005): Numerical investigations to the influence of rearrangement of ground pressure for shield tunneling, 9th International Conference on Structural Safety And Reliability, ICOSSAR'05, Rom, Italien, 19.06.-23.06.2005, Millpress, S. 1317-1323

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

Autoren:

Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann

Dipl.-Ing. J. Schmitt

cand. ing. M. Oberdorf

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

Technische Universität Braunschweig

Gaußstraße 2

38106 Braunschweig

Tel.: (0531) 391-2730

E-Mail: igb@tu-bs.de