

Analysen zum Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krajewski
Hochschule Darmstadt

Dipl.-Ing. Heiner Fromm
CDM Smith Consult GmbH, Alsbach

Dr.-Ing. Christian Wawrzyniak
CDM Smith Consult GmbH, Stuttgart

Zusammenfassung

Der Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschine ist geprägt durch die unterschiedlichen Bereiche, in denen das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges durch den Vortrieb beeinflusst wird. Im Bereich des Bohrkopfes ist es ein Ziel durch einen planmäßigen Überschnitt, das Verklemmen des Bohrkopfes bzw. des Schildmantels zu verhindern. Im Bereich der Gripperpratzen werden hohe Kräfte in das Gebirge eingeleitet, die notwendig sind, damit der Bohrkopf in der Lage ist, den Fels an der Ortsbrust zu lösen. Die Sicherung des Hohlraums mit Spritzbeton erfolgt erst relativ spät im hinteren Bereich der Gripper-TBM, so dass sich bereits vor dem Einbau der Spritzbetonsicherung die Spannungen im Gebirge umlagern können. Zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges wurde ein dreidimensionales numerisches Berechnungsmodell entwickelt, welches die unterschiedlichen Bereiche einer einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschine abbildet. Mit dem Berechnungsmodell wurden in einem ersten Schritt umfangreiche Parameterstudien durchgeführt, von denen erste Ergebnisse im Rahmen des Beitrages auszugsweise vorgestellt werden.

1. Einführung

Das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges ist beim Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschine (Gripper-TBM) abhängig von den verschiedenen Bereichen des Vortriebs.

Der Bereich des Bohrkopfes ist zum einen stark geprägt durch den Abbauprozess an der Ortsbrust. Zum anderen sind die Verformungen des ungestützten Gebirges im Bereich des Bohrkopfes bzw. des Schildmantels von besonderer Bedeutung. Um das Verklemmen des Bohrkopfes bzw. des Schildmantels zu verhindern, wird ein planmäßiger Überschnitt ausgeführt. Das gewählte Maß für den planmäßigen Überschnitt wurde bisher durch Erfahrungswerte festgelegt. Ein Kriterium mit dem das Risiko der Verklemmung des Schildmantels abgeschätzt bzw. die Größe des planmäßigen Überschnitts bemessen werden kann, liegt für Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S) vor (vgl. [4] bis [7]). Dieser Ansatz kann aber nicht ohne weiteres auf den Vortrieb mit einer Gripper-TBM übertragen werden, da im Vergleich mit dem Vortrieb mit einer TBM-

S, bei der die Stützung des Hohlraums unmittelbar nach dem Einbau der Tübbingssicherung erfolgt, erst relativ spät im hinteren Bereich der Gripper-TBM mittels einer Spritzbetonsicherung stattfindet.

Im Krafteinleitungsbereich der Gripperverspannung bzw. der Gripperpratzen ist ein weiterer Bereich, in dem das Spannungsverhalten des Gebirges beeinflusst wird. Untersuchungen zur Verspannung offener Tunnelbohrmaschinen wurden in [8] durchgeführt und analysiert sowie ein Vorschlag abgeleitet, wie die Verspannbarkeit einer TBM bereits vor dem Projektbeginn näherungsweise abgeschätzt werden könnte. Bei den Untersuchungen in [8] wurde nur die Analyse des lokalen Einflusses der Gripperverspannung auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges vorgenommen. Eine großräumige Betrachtung erfolgte dabei nicht.

Für die Umsetzungsvorgänge der Gripper-TBM wird das Gebirge durch die Krafteinleitung im Bereich der verschiedenen Schreitwerke belastet. Untersuchungen zu

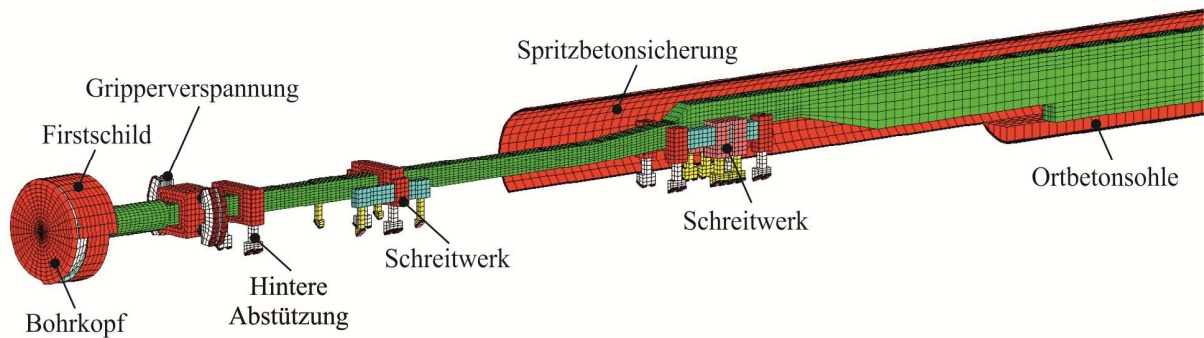


Bild 1: Numerisches Berechnungsmodell einer einfach verspannten Gripper-TBM

den daraus resultierenden Einflüssen wurden bislang noch nicht durchgeführt.

Die Sicherung des aufgefahrenen ungestützten Hohlraums erfolgt erst relativ spät im hinteren Bereich der Gripper-TBM, so dass bereits vor dem Einbau der Spritzbetonsicherung Spannungsumlagerungen im Gebirge stattfinden. Erste Untersuchungen hierzu wurden in [3] vorgenommen. Die Ergebnisse zeigten, dass sich für die untersuchten Parametersätze bereits ein sehr großer Anteil der Gebirgsspannungen umlagern konnte und die Spritzbetonschale nur sehr gering belastet wird. Inwieweit sich die Variation der stofflichen Parameter des Gebirges bzw. die Variation geometrischer Größen auf die Spannungsumlagerung auswirkt, wurde bisher nicht weiter untersucht.

Aus den zuvor beschriebenen Sachverhalten wird ersichtlich, dass zum Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einer einfach verspannten Gripper-TBM noch ein erhöhter Forschungsbedarf besteht. Um das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Bereiche auf das gesamte Spannungsverformungsverhalten des Gebirges sowie die lokalen Einflüsse in den einzelnen Bereichen zu untersuchen, wurde ein sehr detailliertes und umfangreiches dreidimensionales numerisches Simulationsmodell einer einfach verspannten Gripper-TBM, in dem die einzelnen Bereiche diskretisiert wurden, erstellt. Mit diesem Simulationsmodell wurden umfangreiche Parameter- bzw. Sensitivitätsstudien durchgeführt, von denen erste Ergebnisse im Rahmen des vorliegenden Beitrages auszugsweise zu bestimmten Aspekten vorgestellt werden.

2. Numerisches Modell

Das entwickelte dreidimensionale numerische Modell bildet den kompletten Bauablauf eines Vortriebs mit einer einfach verspannten Gripper-TBM ab. In Bild 1 ist das numerische Berechnungsmodell mit den einzelnen modellierten Bereichen dargestellt.

Die geometrischen Abmessungen, die Materialkennwerte und der Bauablauf entsprechen denen der Grip-

per-TBM wie sie in den einzelnen Abschnitten beim Vortrieb des Gotthard-Basistunnels zum Einsatz kamen.

Das numerische Modell (Bild 2) wurde durch die Annahme einer Spiegelsymmetrie im Tunnelquerschnitt und eines homogenen Untergrundaufbaus zur Reduzierung des Rechenaufwands hinsichtlich der Dauer und Datenauswertung für die Berechnungen, bei denen ein isotropes Materialeigenschaften des Gebirges berücksichtigt wurde, vereinfacht.

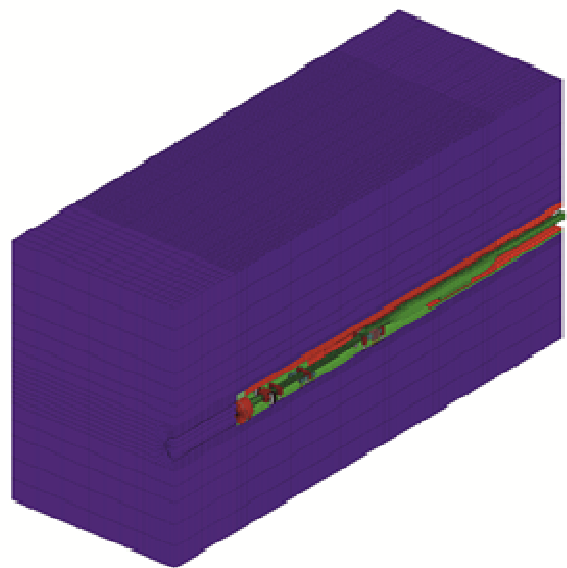


Bild 2: Dreidimensionales numerisches Modell eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM

Der Tunneldurchmesser wurde mit einem Ausbruchsdurchmesser von $d = 9,5$ m angenommen. Die Abmessungen des Berechnungsmodells wurden anhand von Voruntersuchungen mit einem seitlichen Abstand von ca. 77 m entsprechend $8d$, einem Abstand von ca. 48 m entsprechend $5d$ vom unteren Rand und einem Abstand von ca. 57,5 m entsprechend $6d$ vom oberen Rand gewählt. Die Gesamtlänge des Berechnungsmodells beträgt 230 m, in dem eine Vortriebsstrecke von 190 m abgebildet wurde.

Im Kopfbereich der Gripper-TBM (Bild 3) wurden der Bohrkopf, der Bohrkopftrieb sowie der Firstschild/ Teilschild/Sohlschuh diskret abgebildet. Die Kraftübertragung durch den Bohrkopf auf die Ortsbrust wurde vereinfacht durch vollflächige Kontaktelemente realisiert. Ebenso erfolgte die Berücksichtigung einer Reibung des Sohlschuhs auf dem Fels durch die Implementierung von Kontaktelementen. Im Kopfbereich der Gripper-TBM wurde in der Modellierung ein Überschchnitt von 5 cm bzw. 10 cm abgebildet.

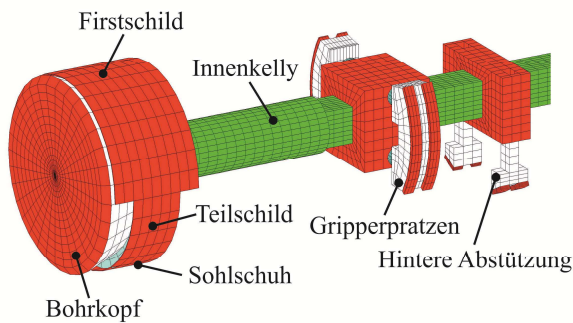


Bild 3: Kopfbereich / Verspannbereich Gripper-TBM im numerischen Modell

Im Bereich der Gripperverspannung wurden die Gripperpratzen diskret modelliert (Bild 3). Die Vorschubpressen wurden nicht diskretisiert, sondern durch Ansatz von Flächenlasten in den Einleitungsbereichen im numerischen Modell simuliert. Das Aus- und Einfahren der Gripperpratzen wurde über Kontaktelemente gesteuert.

Im Arbeitsbereich L1 wurde davon ausgegangen, dass nur eine Ankerung zur Sicherung notwendig ist. Die Ankerung in den Arbeitsbereichen L1 (Maschinenbereich) und L2 (Nachläuferbereich) wurde durch eine Ersatzkohäsion nach dem Ansatz von [9] bzw. [10] berücksichtigt (Bild 4).

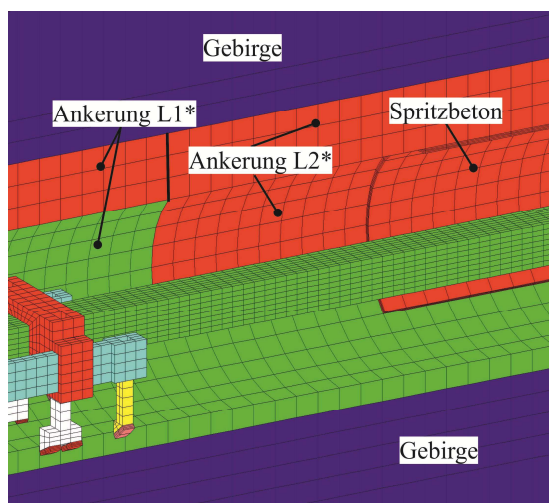


Bild 4: Abbildung der Ankerungsbereiche im numerischen Modell

Die Spritzbetonsicherung (Bild 4) wurde mit einer Dicke von $d = 15$ cm bzw. 20 cm berücksichtigt. Ebenso wurde die Ortsbetonsohle im numerischen Modell abgebildet.

Des Weiteren erfolgte eine Diskretisierung der einzelnen Schreitwerke der Gripper-TBM (Bild 5 und Bild 6), so dass das Ein- und Ausziehen der einzelnen Schreitwerke in den einzelnen Bauphasen realitätsnah abgebildet werden konnte.

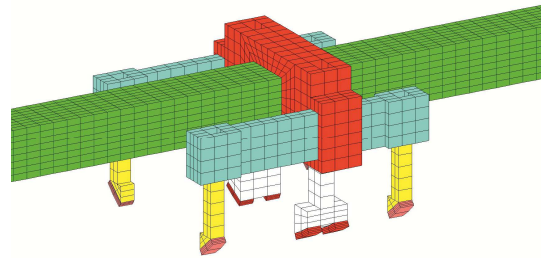


Bild 5: Schreitwerk 1 der Gripper-TBM im numerischen Modell

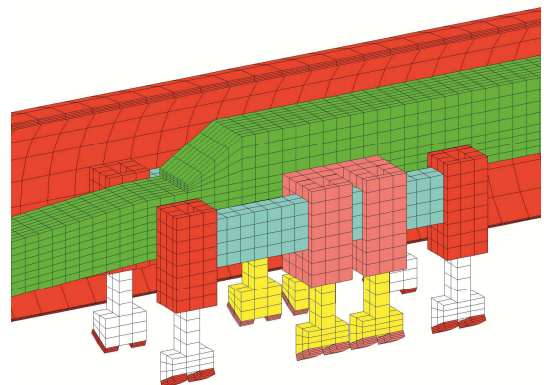


Bild 6: Schreitwerk 2 der Gripper-TBM im numerischen Modell

Der Untergrund wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb mit nicht assoziierter Fließregel simuliert.

Die Stahlbauteile der Gripper-TBM wurden mit linearelastischen Materialverhalten sowie bereichsweise angesetzten Ersatzsteifigkeiten und Ersatzwichten erfasst.

Ebenso wurden der Spritzbeton und die Ortsbetonsohle durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. Der Elastizitätsmodul des Spritzbetons und der Ortsbetonsohle wurde in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die Simulation des Baufortschritts angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Betons zu simulieren.

Der Verlauf der zeitlichen Erhärtung des Spritzbetons ist in Bild 7 dargestellt. Für den Erhärtungsvorgang wurde von einer durchschnittlichen Vortriebsleistung von 13 m/Tag in den ersten Studien ausgegangen. Die Spritzbetonschale und die Ortbetonsohle wurden mit einer Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ und einer Wichte von $\gamma = 24 \text{ kN/m}^2$ berücksichtigt.

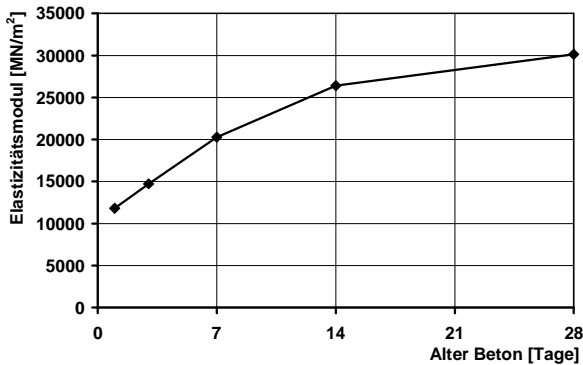


Bild 7: Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls für einen Beton C20/25

In den räumlichen Berechnungen können die einzelnen Vortriebsphasen, wie z. B. die einzelnen Bohrhübe, das Umsetzen der Gripperpratzen, das Umsetzen der Schreitwerke simuliert werden. Für die hier dargestellten Ergebnisse wurden die Berechnungen als step-by-step Analyse durchgeführt.

3. Sensitivitätsstudien

Mit dem zuvor beschriebenen numerischen Modell wurden umfangreiche Sensitivitäts- bzw. Parameterstudien durchgeführt, um daraus das theoretische Spannungsverformungsverhalten des Gebirges ableiten zu können.

Tab. 1: Bandbreite Parameter (isotrope Materialeigenschaften Gebirge)

Kenngröße	Bandbreite
Wichte Gebirge γ [kN/m ³]	20 bis 26
E-Modul Gebirge E_{Gebirge} [MN/m ²]	500 bis 10.000
Querdehnzahl μ [-]	0,2 bis 0,3
Reibungswinkel Gebirge ϕ_{Gebirge} [°]	25 bis 40
Kohäsion Gebirge c_{Gebirge} [MN/m ²]	0,1 bis 2,0
Überlagerungshöhe $h_{\text{Ü}}$ [m]	100 bis 800
Spritzbetondicke d_s [cm]	15 bis 20
Verspanndruck pro	
Verspannzylinder p_{VZ} [MN/m ²]	50 bis 70

In den Sensitivitätsstudien wurden unter Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges die Gebirgskennwerte, die Überlagerungshöhe $h_{\text{Ü}}$, die Dicke des Spritzbetons der temporären Tunnelsicherung

d_s und der Verspanndruck der Verspannzylinder p_{VZ} variiert. In der Tabelle 1 sind die einzelnen Kenngrößen mit den variierten Bandbreiten zusammengefasst. Eine mögliche Zugfestigkeit σ_t für das Gebirge wurde nicht angesetzt.

4. Berechnungsergebnisse

Auf eine umfassende Darstellung der Berechnungsergebnisse wird im Rahmen dieses Beitrags aufgrund des Umfangs der Ergebnisse verzichtet. Vielmehr sollen exemplarisch und schematisch nur einzelne erste Berechnungsergebnisse gezeigt und erläutert werden. Eine ausführliche Darstellung der Berechnungsergebnisse erfolgt an einer anderen Stelle.

Wie in Kapitel 1 ausgeführt, sind die Verformungen des ungestützten Gebirges im Bereich des Bohrkopfes bzw. des Schildmantels von besonderer Bedeutung. In den Sensitivitätsstudien zeigt sich, dass die vertikale Firstverschiebung u_{Firste} die maßgebende Größe zur Abschätzung des Risikos der Verklemmung des Bohrkopfes bzw. des Schildmantels ist.

In Bild 7 sind die Vertikalverschiebungen in der Firste u_{Firste} im Längsschnitt für verschiedene Überlagerungshöhen h und für die unteren Werte der Bandbreite des E-Moduls E des Gebirges aufgetragen. Mit zunehmender Überlagerungshöhe und abnehmendem E-Modul des Gebirges vergrößern sich, wie zu erwarten ist, die Vertikalverschiebungen in der Firste. Der Großteil der Vertikalverschiebungen in der Firste ist mit Einbau der Spritzbetonsicherung abgeklungen.

Für den Bereich des Firstschildes ergeben sich auch für ein „weiches“ Gebirge bei einer geringen Überlagerung von 100 m bei den betrachteten Scherfestigkeiten des Gebirges Verschiebungen, die bei einem planmäßigen Überschchnitt von 5 cm bzw. 10 cm für den Vortrieb unkritisch sind und nicht zu einer Verklemmung des Schildes führen. Dagegen wächst bei höheren Überlagerungen das Risiko des Verklemmens des Schildes überproportional sehr schnell an (vgl. Bild 7).

Im Bereich zwischen Firstschild und dem Einbau der temporären Spritzbetonsicherung (vgl. Bild 7), der im Berechnungsmodell ca. 55 m in Vortriebsrichtung lang ist, tritt ein Großteil der Verschiebungen auf, der sich entsprechend auf den Bauablauf auswirken kann.

Beim Vergleich der Firstverschiebungen bei einem Vortrieb mit einer TBM-S und einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM zeigen sich deutliche Unterschiede insbesondere in Abhängigkeit zur Überlagerungshöhe (vgl. Tabelle 2).

Insbesondere für die Überlagerungshöhe von 800 m liegt eine signifikante Differenz zwischen den Firstverschiebungen im Vergleich der beiden Vortrieben von

Tab. 2: Vergleich Firstverschiebungen u_{Firste} TBM-S / Gripper-TBM (Berechnungsergebnisse Bild 7)

E-Modul Gebirge E_{Gebirge}	Überlagerungshöhe h_{T}	TBM-S u_{Firste}	Gripper-TBM u_{Firste}	Differenz
[MN/m ²]	[m]	[cm]	[cm]	[%]
500	100	4,9	6,0	21
500	400	21,5	24,0	12
500	800	46,4	74,3	60
1.000	100	2,5	3,0	22
1.000	400	10,7	12,0	12
1.000	800	23,2	37,2	60
2.000	100	1,2	1,5	22
2.000	400	5,4	6,0	12
2.000	800	11,6	18,6	60

Tab. 3: Bewertung Einfluss Parameter Firstverschiebung u_{Firste} Bereich Firstschild (isotrope Materialeigenschaften Gebirge)

Kenngröße	u_{Firste}
Wichte Gebirge γ	++
E-Modul Gebirge E_{Gebirge}	++
Querdehnzahl μ	0
Reibungswinkel Gebirge φ_{Gebirge}	++
Kohäsion Gebirge c_{Gebirge}	++
Überlagerungshöhe h_{T}	++
Verspanndruck p_{vz}	0

++	Kat. 1: Starker Einfluss
+	Kat. 2: Schwacher Einfluss
0	Kat. 3: Kein Einfluss

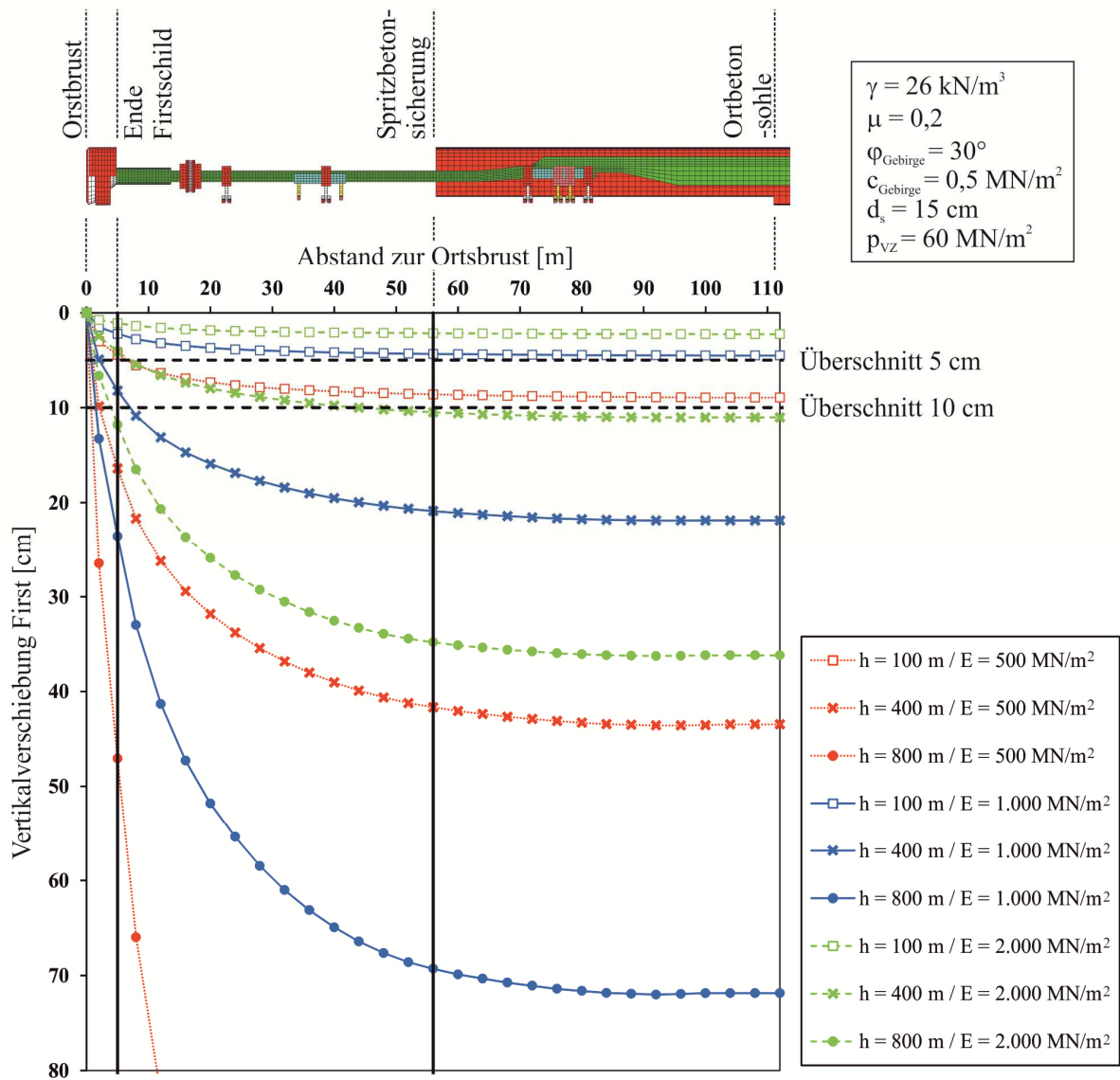


Bild 7: Vertikalverschiebungen in der Firste u_{Firste} im Längsschnitt für verschiedene Überlagerungshöhen h und E-Moduli E des Gebirges

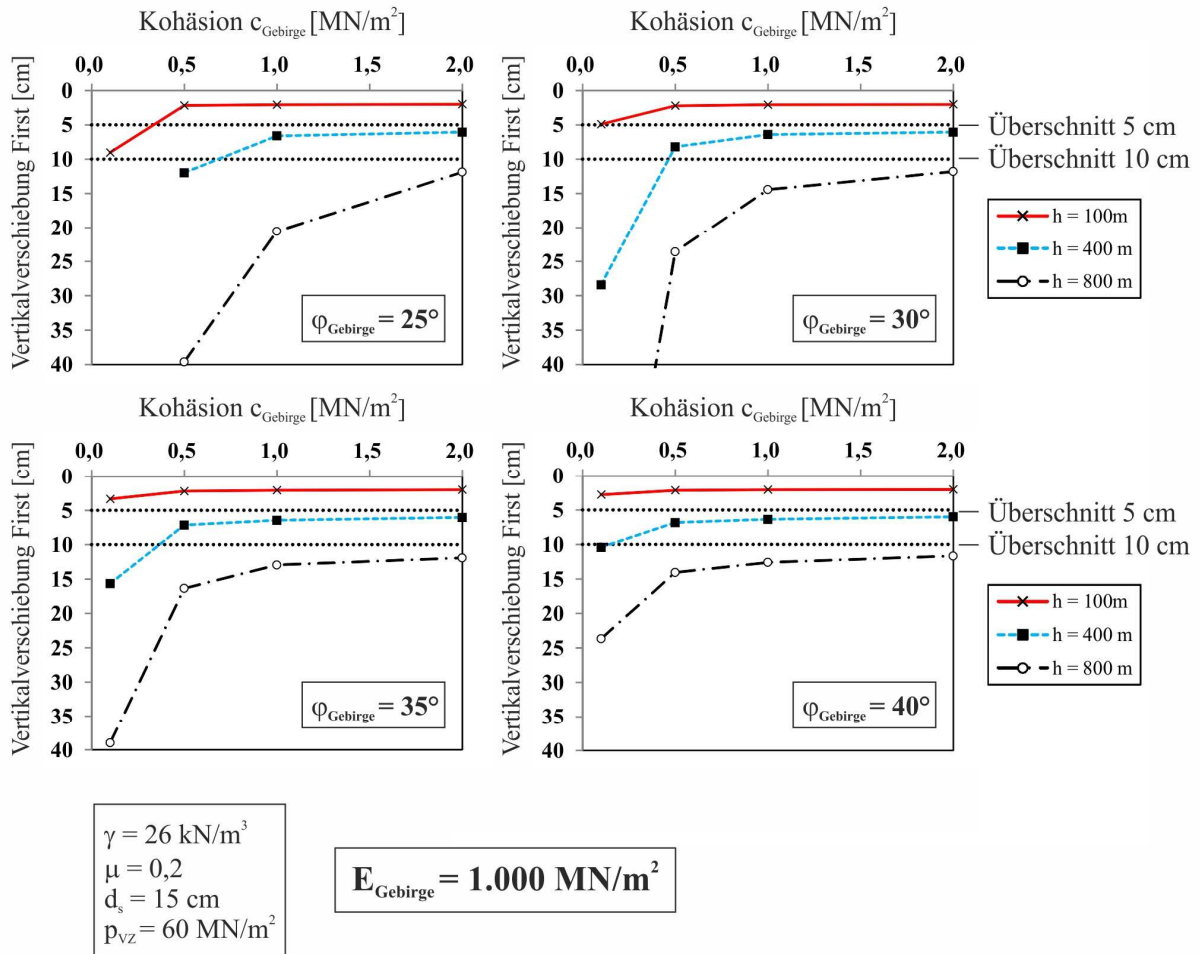


Bild 8: Vertikalverschiebungen in der Firste u_{Firste} in Abhängigkeit von den Gebirgsscherfestigkeiten, E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}} = 1.000 \text{ MN/m}^2$

bis zu 60% vor. Bemerkenswert dabei ist, dass kein proportionaler Zusammenhang zwischen Überlagerungshöhe und der Differenz feststellbar ist. So beträgt die Differenz bei einer Überlagerungshöhe von 100 m bis zu 21% und bei einer Überlagerungshöhe von 400 m bis zu 12% (vgl. Tabelle 2). Dies führt auch zu dem Schluss, dass die Prognoseansätze bzgl. der Verklemmung des Schildes bei einem Vortrieb mit einer TBM-S aus [4] bis [7] nicht auf den Vortrieb mit einer Gripper-TBM übertragbar sind. Eine genauere Analyse dieser Ergebnisse ist noch zu führen.

In Tabelle 3 ist zur Übersicht der Einfluss der verschiedenen in den Sensitivitätsstudien variierten Parameter auf die vertikale Firstverschiebung u_{Firste} im Bereich des Firstschildes zusammengestellt.

Neben dem E-Modul des Gebirges und der Überlagerungshöhe ergeben sich starke Einflüsse auf die Firstverschiebung im Bereich des Firstschildes durch die Scherfestigkeiten des Gebirges, dem Reibungswinkel φ_{Gebirge} und der Kohäsion c_{Gebirge} . Die Querdehnzahl des Gebirges μ und der Verspanndruck p_{vz} haben keinen

Einfluss auf die Firstverschiebungen im Bereich des Firstschildes.

In den Bildern 8 und 9 ist der Einfluss der Scherfestigkeiten in Abhängigkeit von der Überlagerungshöhe auf die maximale Firstverschiebung im Bereich des Firstschildes für die Fälle E-Modul des Gebirges $E_{\text{Gebirge}} = 1.000 \text{ MN/m}^2$ und $E_{\text{Gebirge}} = 2.000 \text{ MN/m}^2$ dargestellt. Hier zeigt sich, dass bei einer Kohäsion des Gebirges kleiner als 1 MN/m^2 die Firstverschiebungen des Gebirges im Bereich des Firstschildes bei abnehmender Kohäsion sehr stark zunehmen bzw. beeinflusst werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich durch die geringeren Scherfestigkeiten wesentlich größere Verschiebungsanteile aus den plastischen Verformungen ergeben. Der Reibungswinkel des Gebirges hat ebenso einen starken Einfluss auf die Größe der Firstverschiebungen. Allerdings scheint dieser Einfluss geringer zu sein, als der Einfluss durch die Kohäsion des Gebirges.

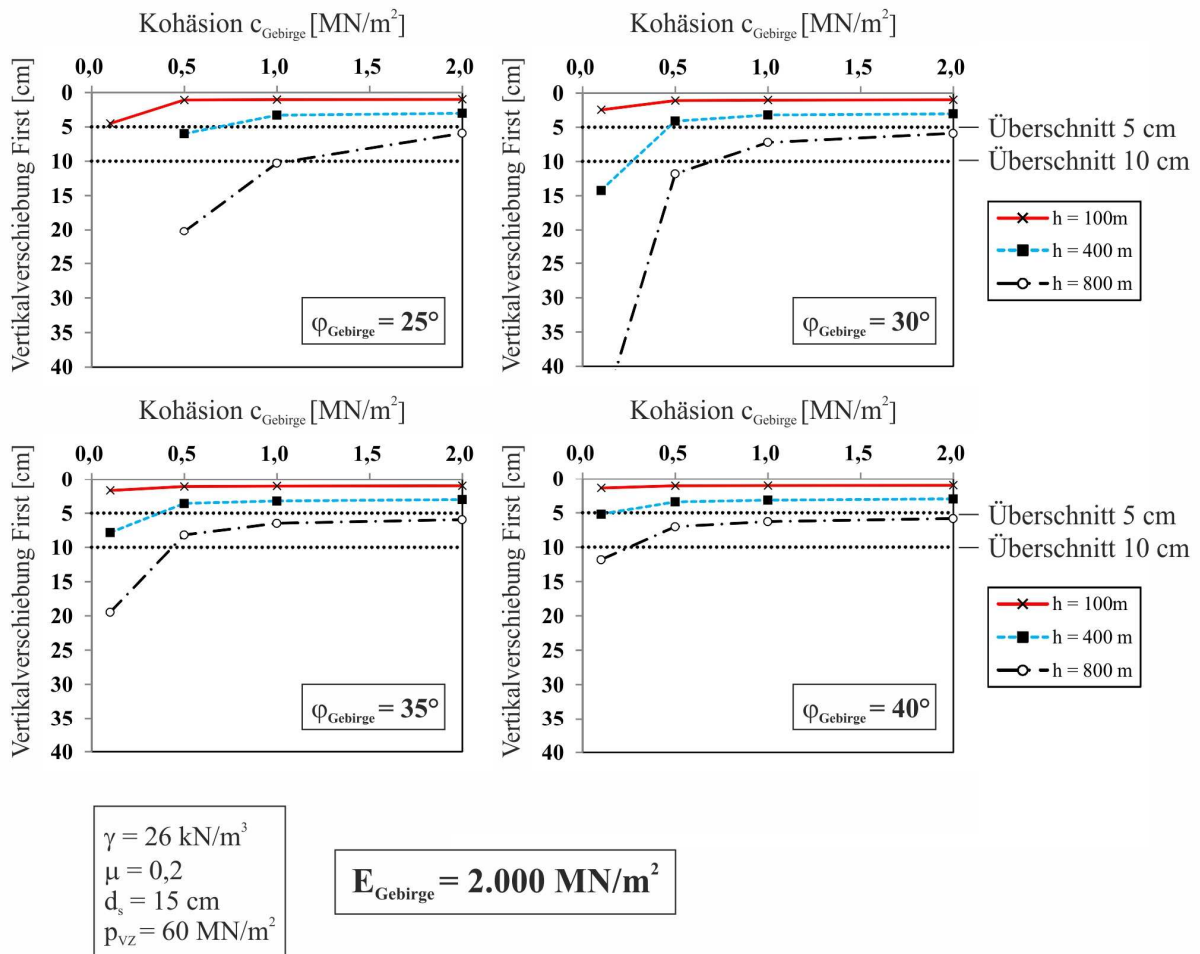


Bild 9: Vertikalverschiebungen in der Firste u_{Firste} in Abhängigkeit von den Gebirgsscherfestigkeiten, E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}} = 2.000 \text{ MN/m}^2$

5. Zusammenfassung und Ausblick

Um das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Bereiche auf das gesamte Spannungsverformungsverhalten des Gebirges sowie die lokalen Einflüsse in den einzelnen Bereichen bei einem Tunnelvortrieb mit einer Gripper-TBM zu untersuchen, wurde ein sehr detailliertes und umfangreiches dreidimensionales numerisches Simulationsmodell einer einfach verspannten Gripper-TBM, in dem die einzelnen Bereiche diskretisiert wurden, erstellt. Mit diesem Simulationsmodell wurden umfangreiche Parameter- bzw. Sensitivitätsstudien durchgeführt. Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wurden auszugsweise, erste Ergebnisse bzw. die Erkenntnisse dargestellt, die sich für die Vertikalverschiebungen in der Firste des Vortriebs ergeben bzw. mit dem das Risiko der Verklemmung der Gripper-TBM abgeschätzt werden kann.

Weitere Untersuchungen, die hier nicht dargestellt wurden bzw. noch durchzuführen sind, beinhalten z.B. die Analyse der Umlagerungen der Spannungen im Gebirge und das Spannungsverformungsverhalten in

den Kräfteleitungs-bereichen, wie z.B. in den Bereichen der Gripper-Verpressung, der Schreitwerke bzw. der Nachläufer. Ebenso sind Analysen durchzuführen, bei denen der Abbauvorgang am Bohrkopf im Detail zu untersuchen ist.

Des Weiteren sind in numerischen Simulationen die Auswirkungen durch das anisotrope Materialverhalten des Gebirges durch Anwendung entsprechender Stoffgesetze zu analysieren und zu bewerten.

Literatur

[1] Maidl, B.; Schmid, L.; Ritz, W.; Herrenknecht, M.: Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein, Ernst & Sohn Verlag, 2001

- [2] Meißner, H.: Tunnelbau unter Tage. Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik, Abschnitt 2, Geotechnik 19, 1996, S. 99 ff.
- [3] Schmitt, J.; Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Herrenknecht, M.; Rehm, U.: Numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM, Tagungsband des 5. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 24.-25.01.2006, ISBN 3-924813-63-9, S. 269-278, 2006
- [4] Schmitt, J.: Spannungsverformungsverhalten des Gebirges beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen mit Schild, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 89, 2009, URL: <http://www.digibib.tu-bs.de/?docid=00028670>
- [5] Schmitt, J.; Stahlmann, J.: Dimensionierung von maschinellen Tunnelvortrieben mit Tübbingausbau im Fels, Bautechnik, Band 86 (2009), Heft 12, S. 743-755
- [6] Schmitt, J.: Dimensionierung von Tunnelbohrmaschinen unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften, Tagungsband des 7. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 26.-27.01.2010, ISBN 3-924813-81-7, S. 125-131, 2010
- [7] Schmitt, J.: Kriterium zur Prognose des Risikos der Verklemmung des Schildmantels bei Tunnelbohrmaschinen unter Berücksichtigung anisotroper Gebirgseigenschaften, Felsbau Magazin, 2010, Heft 2, S. 147-155
- [8] Galler, R.: Geotechnische Untersuchungen zur Verspannungen offener Tunnelbohrmaschinen, Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben, 1997
- [9] Stroh, D.; Huchfeld, J.; Egger, P.: Vergleich von NÖT-Vortriebstechniken beim Großtunnelbau. Baugrundtagung, Berlin, 1996.
- [10] Spang, K.; Egger, P.: Tragverhalten und Bemessung vollvermörtelter, schlaffer Anker im Diskontinuum. Felsbau, Nr. 4, 1998
- [11] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 326 ff., S 393 ff.

Autor:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt
Hochschule Darmstadt
Haardtring 100
64295 Darmstadt
Tel. +49 (0) 6151 / 16-8166
Fax +49 (0) 6151 / 16-8970
E-Mail: juergen.schmitt@h-da.de /
j.schmitt@ingenieur-bauwesen.de