Kriterium zur Prognose des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Omid Monfaredpur B. Eng., Prof. Dr.-Ing. Ulrich Burbaum, Dr.-Ing. Rohola Hasanpour, alle: Fachbereich Bauingenieurwesen, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Deutschland

Das Verklemmen beziehungsweise Blockieren des Bohrkopfs einer Tunnelbohrmaschine (TBM) stellt ein hohes Risiko für einen Tunnelvortrieb dar. Für Tunnelbohrmaschinen mit Schild und für Doppelschildmaschinen wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und Kriterien für die Konstruktion und Bemessung entwickelt. Die Ansätze lassen sich nicht auf den Vortrieb mit einer Gripper-TBM übertragen, da sich das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges unterscheidet. Der Artikel erläutert dreidimensionale numerische Parameterstudien zur Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges für Vortriebe mit einer Gripper-TBM und daraus abgeleitete Diagramme zur Abschätzung des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM.

Tunnelbau • Vortrieb • TBM • Gripper • Risiko • Modellierung

1 Einführung

Bei Tunnelvortrieben in druckhaftem Gebirge stellen sich große und lang anhaltende Verformungen des aufgefahrenen Hohlraums ein. Dadurch können Tunnelbohrmaschinen (TBM) verklemmen beziehungsweise ihre Bohrköpfe blockieren. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der Vortrieb mit einer Gripper-TBM beim Bau des Gotthard-Basistunnels in der Schweiz [1 bis 4]. Weitere Beispiele für das Verklemmen von TBM können [5 bis 7] entnommen werden. Eine Möglichkeit, das Verklemmen der TBM zu verhindern, besteht durch die Ausführung eines Überschnitts durch am Bohrkopf angeordnete Kaliberdisken.

Das gewählte Maß für den Überschnitt wurde in der Vergangenheit durch Erfahrungswerte aus ausgeführten Projekten festgelegt. Für Tunnelbohrmaschinen mit Schild (TBM-S) und für Doppelschildmaschinen (DSM) wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt sowie Kriterien für die Konstruktion und Bemessung entwickelt [8 bis 17]. Diese Kriterien bzw. Ansätze können aber nicht ohne weiteres auf den Vortrieb mit einer Gripper-TBM angewendet werden. Im Vergleich zu einem Vortrieb mit einer TBM-S bzw. einer DSM, bei der die Stützung des Hohlraums unmittelbar mit dem Einbau der Tübbingsicherung erfolgt, findet die planmäßige Stützung des Gebirges beim Vortrieb mit einer Gripper-TBM erst im Nachläuferbereich der Gripper-TBM mittels einer Spritzbetonsicherung statt. Dieser Bereich hatte beispielsweise bei den Vortrieben des Gotthard-Basistunnels einen Abstand von 46,5 m zur Ortsbrust [4]. Für die nichtplanmäßige Sicherung des Gebirges können bei Vortrieben mit einer Gripper-TBM in nicht standfestem Gebirge unmittelbar hinter dem Bohrkopf z. B. Anker, Spritzbeton und Ausbaubögen eingebaut werden. Dies führt jedoch zu einer deutlichen Reduzierung der Vortriebsleistung und stellt damit die Wirtschaftlichkeit einer Gripper-TBM infrage. Dies bedeutet, dass bei einem planmäßigen Vortrieb mit einer Gripper-TBM ein relativ großer bzw. langer Bereich des ausgebrochenen Hohlraums im Gebirge vorhanden ist, der nicht durch eine Sicherung gestützt wird und in dem sich das Gebirge unbehindert verformen kann. Damit weicht das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM sehr stark von dem Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer TBM-S oder DSM ab [19].

Um das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM analysieren zu können, wurde ein dreidimensionales numerisches Berechnungsmodell entwickelt [19, 20]. Mit diesem Berechnungsmodell wurden Parameterstudien durchgeführt, bei denen die stofflichen Parameter und die Überlagerungshöhe des Gebirges variiert wurden. Aus den Ergebnissen der Parameterstudien wurden Diagramme entwickelt, mit denen die bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM auftretenden Verschiebungen abgeschätzt und das Risiko der Verklemmung einer Gripper-TBM prognostiziert werden können.

2 Dreidimensionales numerisches Berechnungsmodell

Das entwickelte dreidimensionale numerische Modell bildet den kompletten Bauablauf eines Vortriebs mit einer einfach verspannten Gripper-TBM ab. Im Bild 1 ist das numerische Berechnungsmodell mit den einzelnen modellierten Bereichen dargestellt. Die geometrischen Abmessungen, die Materialkennwerte und der Bauablauf entsprechen denen beim Vortrieb mit Gripper-TBM in einzelnen Abschnitten des Gotthard-Basistunnels [19, 20]. Die Modellabmessungen sind im Bild 2 dargestellt. Es wurde ein Tunneldurchmesser von d = 9,5 m angenommen. Anhand von Voruntersuchun-

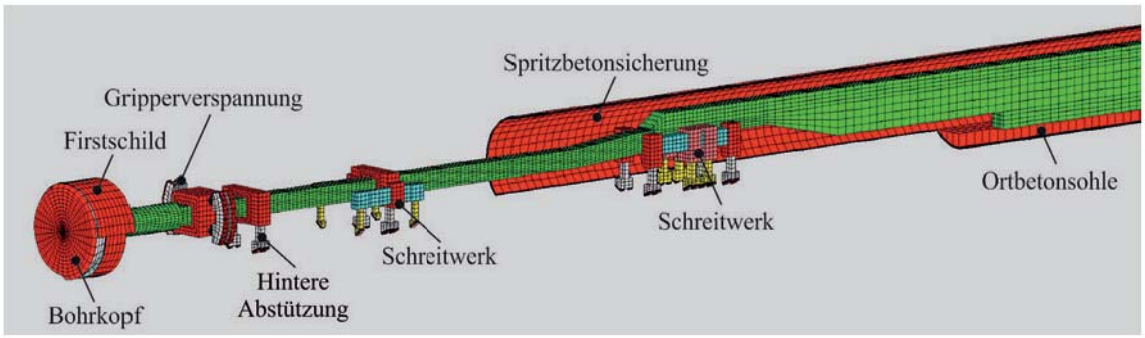


Bild 1: Numerisches Berechnungsmodell der Gripper-TBM
Quelle der Bilder: Hochschule für Angewandte Wissenschaften Darmstadt

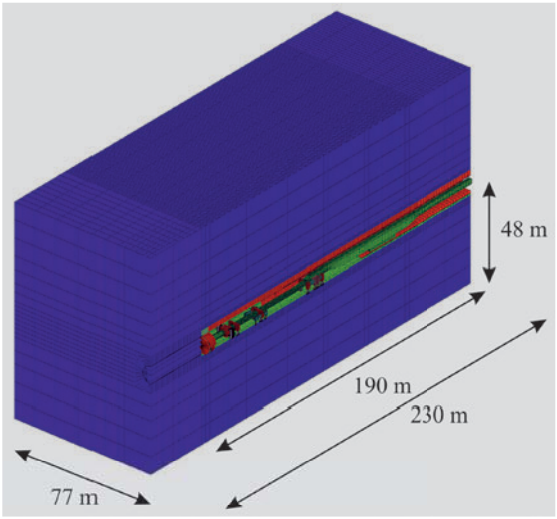


Bild 2: Dreidimensionales numerisches Modell Gripper-TBM mit der Darstellung des simulierten Untergrunds

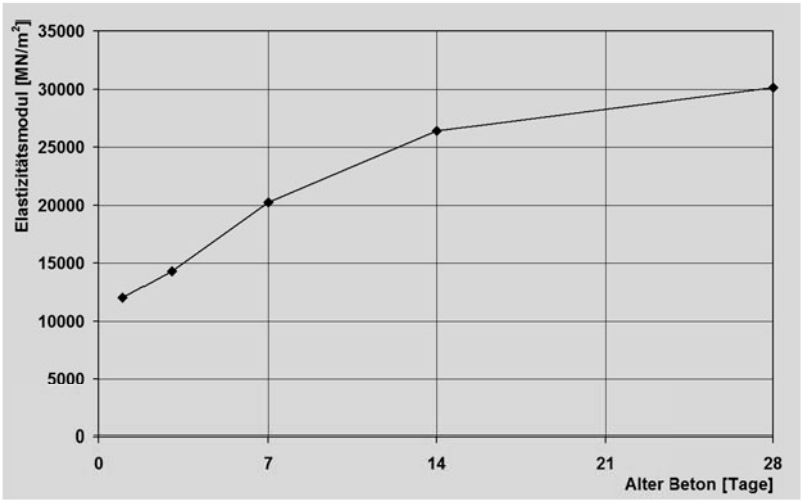


Bild 3: Zeitabhängige Entwicklung des Elastizitätsmoduls für einen Beton C20/25

gen und auf Grundlage der Empfehlungen des Arbeitskreises 1.6 „Numerik in der Geotechnik" der DGGT [29] wurden ein Abstand von 77 m, also das Achtfache des Durchmessers 8d, vom seitlichen Modellrand und ein Abstand von 48 m, also das Fünffache des Durchmessers 5d, vom unteren Modellrand angesetzt. Die Gesamtlänge des Berechnungsmodells beträgt 230 m. Die im Berechnungsmodell abgebildete Vortriebsstrecke wurde mit 190 m diskretisiert.

Für den abgebildeten Untergrund wurde ein homogenes Gebirgsverhalten angenommen. Dabei wurden die stofflichen Eigenschaften des Untergrunds mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb und nicht assoziierter Fließregel simuliert. Die Stahlbauteile der Gripper-TBM wurden mit einem linearelastischen Materialverhalten sowie bereichsweise angesetzten Ersatzsteifigkeiten und Ersatzwichten abgebildet. Die Ortbetonsohle und der Spritzbeton für die erforderliche temporäre Sicherung wurden ebenso durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. Dabei wurden die Elastizitätsmoduli der Ortbetonsohle und des Spritzbetons in Abhängigkeit des Baufortschritts für eine vorgegebene Vortriebsgeschwindigkeit von 13 m/Tag angepasst, um die zeitabhängige Erhärtung des Betons zu simulieren [18, 19]). Die Druckfestigkeit wurde entsprechend [22] in den Elastizitätsmodul umgerechnet (Bild 3). Die Spritzbetonschale und die Ortbetonsohle wurden mit einer Querdehnzahl von $\mu = 0{,}2$ und einer Wichte von $\gamma = 24\ \mathrm{kN/m^3}$ berücksichtigt.

In den räumlichen Berechnungen wurden die einzelnen Vortriebsphasen, wie die einzelnen Bohrhübe, das Umsetzen der Gripperpratzen und das Umsetzen der Schreitwerke, simuliert. Die Berechnungen wurden für die hier dargestellten Ergebnisse als step-by-step Analyse durchgeführt.

3 Parameterstudien

Mit dem zuvor beschriebenen numerischen Modell wurden umfangreiche Sensitivitätsstudien durchgeführt, um daraus das theoretische Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem maschinellen Tunnelvortrieb mit einer Gripper-TBM zu untersuchen. Unter Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges wurden in den Sensitivitätsstudien die Gebirgskennwerte und die Überlagerungshöhe $h_ü$ variiert. In Tabelle 1 sind die einzelnen Kenngrößen mit den variierten Bandbreiten zusammengefasst. Anzumerken ist, dass die unteren Kennwerte für den Elastizitätsmodul des Gebirges $E_{Gebirge}$ und die Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ Grenzfälle darstellen.

Tabelle 1: Bandbreite der angesetzten Gebirgskennwerte mit isotropen Eigenschaften und der Überlagungehöhe

Kenngröße	Einheit	Bandbreite
Wichte Gebirge $\gamma_{Gebirge}$	[kN/m³]	26
Elastizitätsmodul Gebirge $E_{Gebirge}$	[MN/m²]	500 bis 5.000
Querdehnzahl Gebirge $\mu_{Gebirge}$	[-]	0,2
Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{Gebirge}$	[°]	25 bis 40
Kohäsion Gebirge $c_{Gebirge}$	[MN/m²]	0,1 bis 2,0
Überlagerungshöhe $h_ü$	[m]	100 bis 800

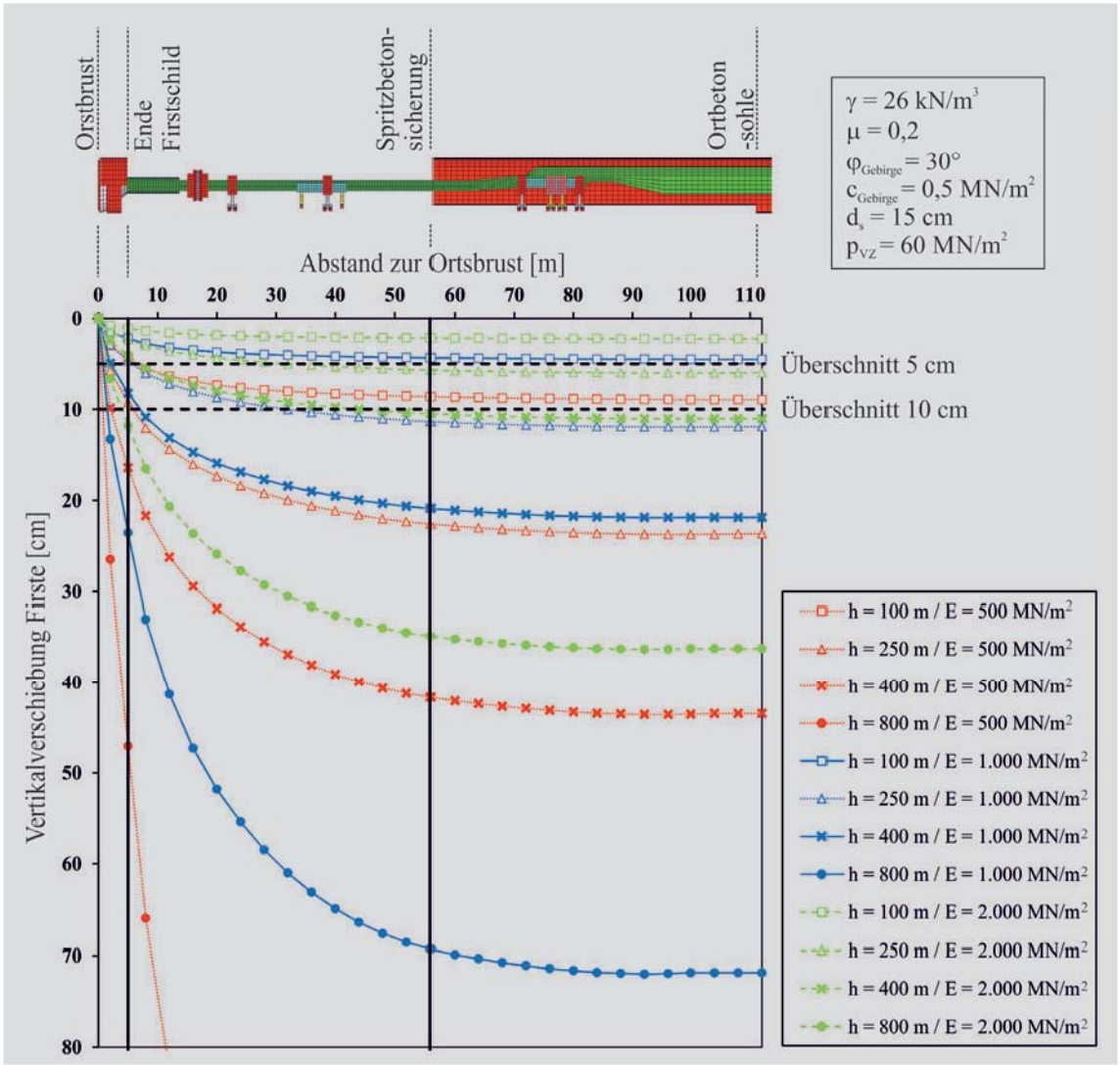
4 Berechnungsergebnisse

Als maßgebend für die Betrachtung der Verschiebungen im Ausbruchquerschnitt wurden die Vertikalverschiebungen in der Firste definiert, da diese über den berechneten Werten der Verschiebungen in der Ulme und der Sohle lagen. Im Bild 4 sind die Vertikalverschiebungen in der Firste für verschiedene Parametersätze visualisiert. Die Vertikalverschiebungen wurden dabei im Abstand zur Ortsbrust aufgetragen. Die einzelnen Kurven bilden die variierten Überlagerungshöhen h und die verschiedenen Elastizitätsmoduli des Gebirges E ab. Mit zunehmender Überlagerungshöhe h und abnehmendem Elastizitätsmodul des Gebirges E vergrößern sich erwartungsgemäß die Vertikalverschiebungen in der Firste. Der größte Teil der Vertikalverschiebungen in der Firste ist mit dem Einbau der temporären Spritzbetonsicherung abgeklungen, da nach Einbau der temporären Spritzbetonsicherung der ausgebrochene Bereich gestützt wird.

Für den Vortrieb mit einer Gripper-TBM sind zwei Bereiche für das Verklemmen einer Gripper-TBM maßgebend. Zum einen besteht das Risiko, dass der Bohrkopf aufgrund zu großer Verschiebungen verklemmen kann, zum anderen können die Verschiebungen im ungestützten Bereich so groß sein, dass der Nachläuferbereich nicht mehr nachgezogen werden kann.

Im Bereich des Firstschildes ergeben sich in den Berechnungen auch für ein „weiches" Gebirge bei einer

Bild 4: Vertikalverschiebungen in der Firste abhängig vom Abstand zur Ortsbrust in Tunnellängsrichtung für verschiedene Überlagerungshöhen h und E-Moduli E des Gebirges



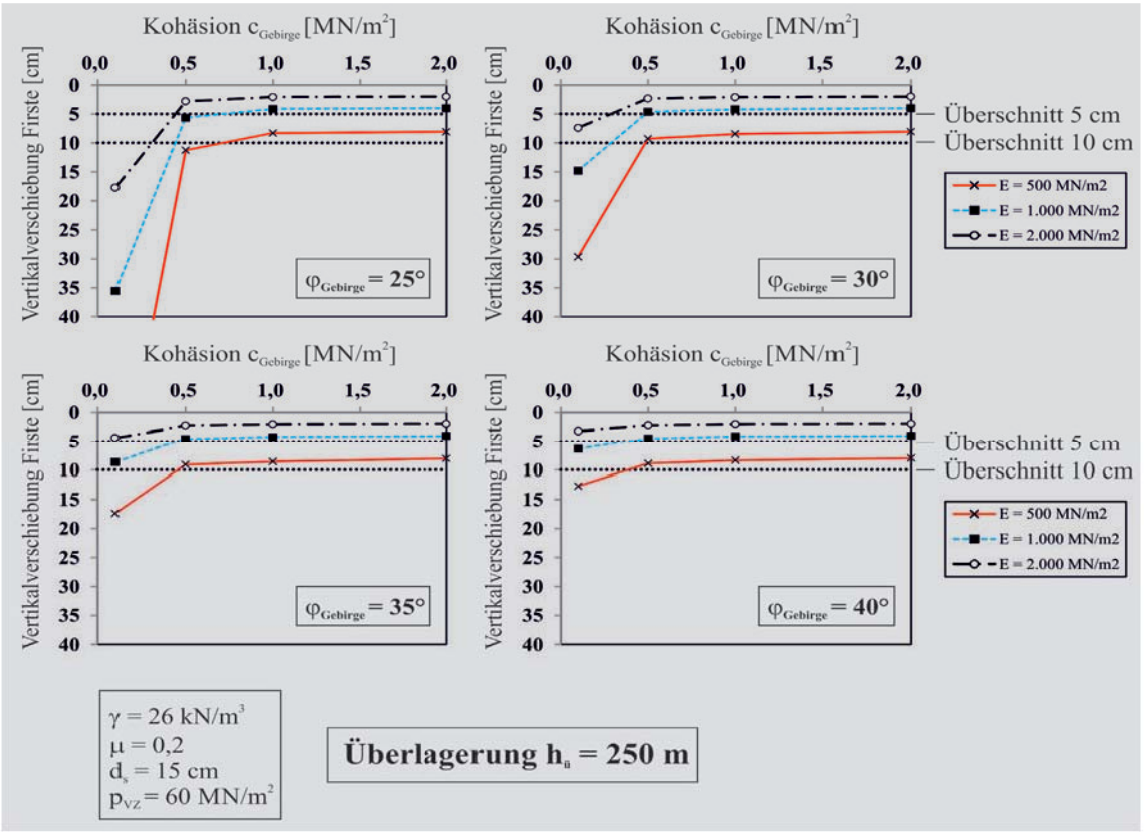
geringen Überlagerungshöhe von 100 m bei den betrachteten Scherfestigkeiten des Gebirges Firstverschiebungen, die unkritisch für den Vortrieb sind und nicht zu einer Verklemmung des Bohrkopfs führen. Dagegen wächst bei höheren Überlagerungen das Risiko des Verklemmens des Bohrkopfs überproportional sehr schnell an (**Bild 4**).

Für den Bereich zwischen Bohrkopf und dem Einbau der temporären Spritzbetonsicherung ergibt sich ein Großteil der Verschiebungen, der sich auf das Nachziehen des Nachläufers auswirken kann. Hier treten wie im Bereich des Bohrkopfs für ein „weiches" Gebirge bei einer geringen Überlagerungshöhe von 100 m bei den betrachteten Scherfestigkeiten des Gebirges Firstverschiebungen auf, die für den Vortrieb als unkritisch zu betrachten sind. Bei höheren Überlagerungen sind auch hier Verschiebungen im Ausbruchbereich zu beobachten, die als kritisch für das Nachziehen des Nachläufers einzustufen sind (**Bild 4**).

In den dargestellten Ergebnissen zeigen sich zum einen die sehr starken Einflüsse durch die Überlagerungshöhe h und durch den Elastizitätsmodul des Gebirges E, und zum anderen ist zu erkennen, dass die maßgeblichen Verschiebungen im Bereich von der Ortsbrust bis zu dem Bereich, in dem die temporäre Spritzbetonsicherung eingebaut wird, auftreten. Nach dem Einbau der temporären Spritzbetonsicherung ist die Zunahme der Vertikalverschiebungen in der Firste nur noch relativ gering. Das ist logischerweise darauf zurückzuführen, dass das Gebirge durch die temporäre Spritzbetonsicherung gestützt wird und weitere Verschiebungen verhindert werden.

Das **Bild 5** dient zum Vergleich und zur Analyse des Einflusses der Scherfestigkeiten und des Elastizitätsmoduls im Bereich des Bohrkopfs anhand der Ergebnisse der Parameterstudien. Betrachtet wurde dabei eine Überlagerungshöhe von $h_Ü$ = 250 m. Variiert wurden der Elastizitätsmodul und die Scherfestigkeiten des Gebirges. Auf der Abszissenachse ist die Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ von links nach rechts zunehmend dargestellt, und auf der Ordinatenachse sind die Vertikalverschiebungen in der Firste von oben nach unten zunehmend dargestellt. Die einzelnen Diagramme stehen jeweils für die unterschiedlichen Variationen des Reibungswinkels des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ und die drei Kurven bilden die unterschiedlichen Elastizitätsmoduli des Gebirges E ab. Bei der Betrachtung des Einflusses der Kohäsion auf die Vertikalverschiebungen ist ersichtlich, dass mit zunehmender Kohäsion die Vertikalverschiebungen stark abnehmen. Handelt es sich um ein Gebirge mit einer geringen Kohäsion, also ein Gebirge, welches schneller in den Bruchzustand übergeht, sind die plastischen Verformungen entsprechend groß. Mit steigender Kohäsion sind die Gesamtvertikalverschiebungen fast nur von den elastischen Eigenschaften des Gebirges abhängig, sodass die Scherfestigkeiten einen geringen Einfluss auf die Größe der Verschiebungen haben. Im Bereich der Extremwerte der Kohäsion $c_{Gebirge}$ von 0,1 bis 0,5 MN/m² sind die Vertikalverschiebun-

Bild 5: Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs am Ende des Firstschildes abhängig von der Kohäsion des Gebirges für eine Überlagerung und verschiedene Reibungswinkel φ und E-Moduli E



gen noch relativ groß, da die Scherfestigkeiten gering sind und das Gebirge, wie zuvor beschrieben, schneller in den Bruchzustand übergeht, wohingegen die Vertikalverschiebungen im Falle einer Kohäsion größer oder gleich 0,5 MN/m² vergleichsweise gering sind und sich bei steigender Kohäsion nur noch mäßig reduzieren. Die Analysen bezüglich der Scherfestigkeiten zeigen ebenfalls, dass der Reibungswinkel ebenso einen Einfluss auf den Betrag der Vertikalverschiebung hat. Allerdings ist der Einfluss geringer als der Einfluss der Kohäsion. Der Einfluss des Reibungswinkels wird ab einer Kohäsion größer oder gleich 0,5 MN/m² vernachlässigbar klein beziehungsweise die plastischen Verformungen infolge des Reibungswinkels werden vernachlässigbar klein. Da es sich für die Kohäsion im Bereich von 0,1 bis 0,5 MN/m² um eine Extremwertbetrachtung handelt und die Werte kein standfestes Gebirge beziehungsweise keinen standfesten Fels charakterisieren, lässt sich sagen, dass im Allgemeinen die Vertikalverschiebungen infolge der plastischen Verformungen des Gebirges eher kohäsionsabhängig sind und der Reibungswinkel nur einen weniger signifikanten Einfluss darauf hat. Des Weiteren ist zu erkennen, dass die Verformungsanteile aus dem Elastizitätsmodul (elastischer Anteil) im Vergleich zu den Verformungsanteilen aus den Scherfestigkeiten (plastischer Anteil) deutlich größer sind. Unter der Betrachtung des Falls $c_{Gebirge}$ größer oder gleich 0,5 MN/m² lässt sich daraus schließen, dass der Einfluss auf die Vertikalverschiebungen überwiegend vom Elastizitätsmodul abhängig ist. Das Gebirge geht dabei aufgrund der hohen Scherfestigkeiten nicht beziehungsweise nur geringfügig in den Bruchzustand über, sodass die Vertikalverschiebungen des Gebirges größtenteils aus dem Einfluss des Elastizitätsmoduls entstehen. Demnach ist aus dem Vergleich zu erkennen, dass durch eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls die Vertikalverschiebungen sprunghaft abnehmen. Dieses Verhalten ist auch bei geringer Scherfestigkeit zu beobachten. Folglich hat der Elastizitätsmodul im Gegensatz zu den Scherfestigkeiten auf jede Variationsart einen größeren Einfluss. Die zuvor aufgeführten Feststellungen für den Bereich des Bohrkopfs sind ebenso im Nachläuferbereich ohne temporäre Spritzbetonsicherung festzustellen.

Im Bild 6 sind die Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs in Abhängigkeit von der Überlagerungshöhe und dem Elastizitätsmodul des Gebirges exemplarisch für einen Reibungswinkel von 30° und eine Kohäsion von 0,5 MN/m² aufgetragen. Auf der Abszissenachse sind die Überlagerungshöhe $h_Ü$ von links nach rechts steigend und auf der Ordinatenachse die Vertikalverschiebung der Firste von oben nach unten zunehmend dargestellt. Die Kurven bilden die unterschiedlichen Elastizitätsmoduli des Gebirges ab.

Bei der Betrachtung des Einflusses der Überlagerungshöhe auf die Vertikalverschiebungen ist zu beobachten, dass mit zunehmender Überlagerungshöhe die Vertikalschiebungen zunehmen. Sehr deutlich ist im Bild 6 zu erkennen, dass die Vertikalverschiebungen in

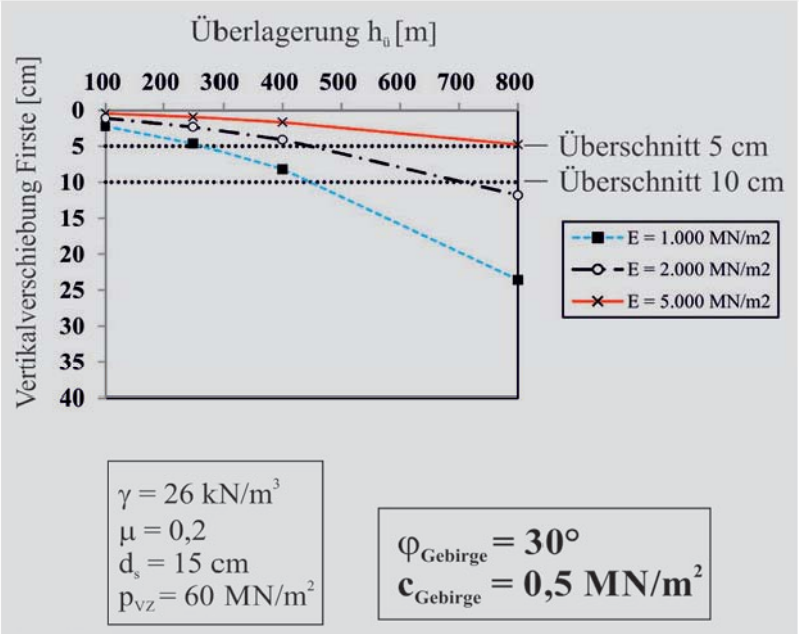


Bild 6: Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs am Ende des Firstschildes abhängig von der Überlagerungshöhe des Gebirges für verschiedene E-Moduli E

der Firste überproportional mit der Überlagerungshöhe anwachsen. Der Einfluss der Überlagerungshöhe auf die Höhe der Vertikalverschiebungen ist trotz zunehmenden Elastizitätsmoduls des Gebirges erkennbar und kann daher nicht vernachlässigt werden. Die zuvor aufgeführten Feststellungen für den Bereich des Bohrkopfs sind hier ebenso im Nachläuferbereich ohne temporäre Spritzbetonsicherung festzustellen.

5 Bemessungsdiagramme

Die durchgeführten Sensitivitätsstudien zeigen, dass die Parameter Überlagerungshöhe, Elastizitätsmodul des Gebirges sowie Kohäsion des Gebirges den maßgebenden Einfluss auf die Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs und im Nachläuferbereich ohne temporäre Spritzbetonsicherung haben. Der Parameter Reibungswinkel des Gebirges weist ebenso einen Einfluss auf die Vertikalverschiebungen in der Firste auf. Allerdings ist hier der Einfluss nicht so stark ausgeprägt wie bei den zuvor aufgeführten Parametern. Auf Grundlage der Ergebnisse der Parameterstudien wurden Diagramme entwickelt, mit denen es möglich ist, die Verschiebungen abzuschätzen, die bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM auftreten, um damit eine Prognose hinsichtlich des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM beispielsweise im Rahmen einer Machbarkeitsstudie erstellen zu können.

Die Diagramme wurden dabei für die zwei maßgebenden Bereiche für drei Varianten des Elastizitätsmoduls des Gebirges aufgestellt. Im Abschnitt 5.1 sind die Diagramme für den Bereich des Bohrkopfs dargestellt. Der Bereich des Bohrkopfs ist dabei gemäß Bild 4 als Ende des Firstschildes definiert. Für den Nachläuferbereich sind die Diagramme im Abschnitt 5.2 dargestellt. Als Nachläuferbereich ist hierbei gemäß Bild 4 die Stel-

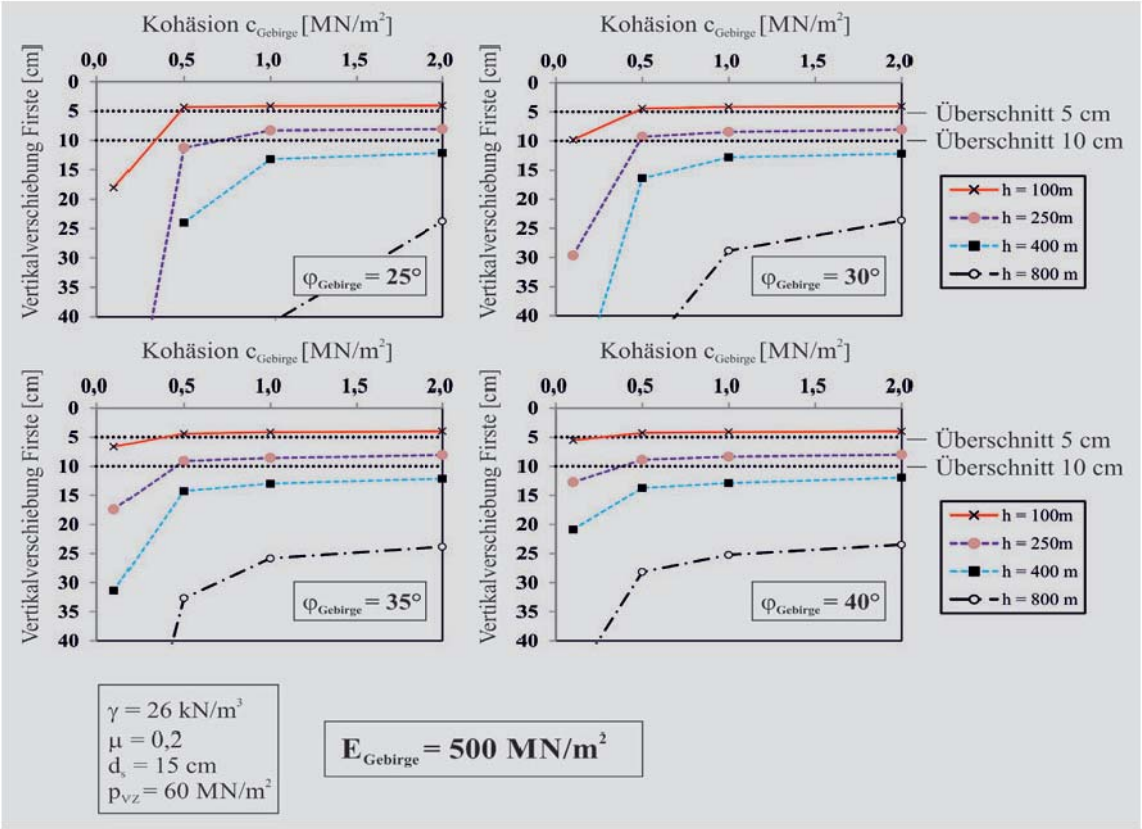
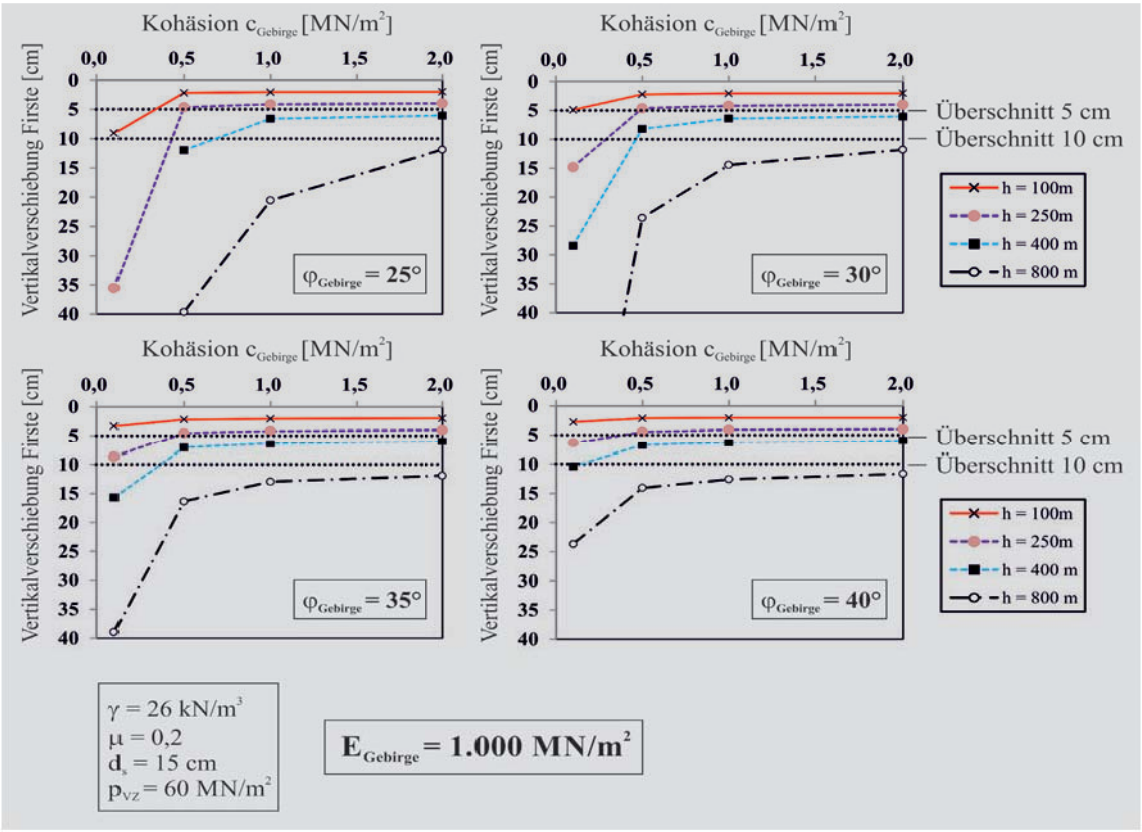


Bild 7: Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 500 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h

Bild 8: Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 1.000 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h



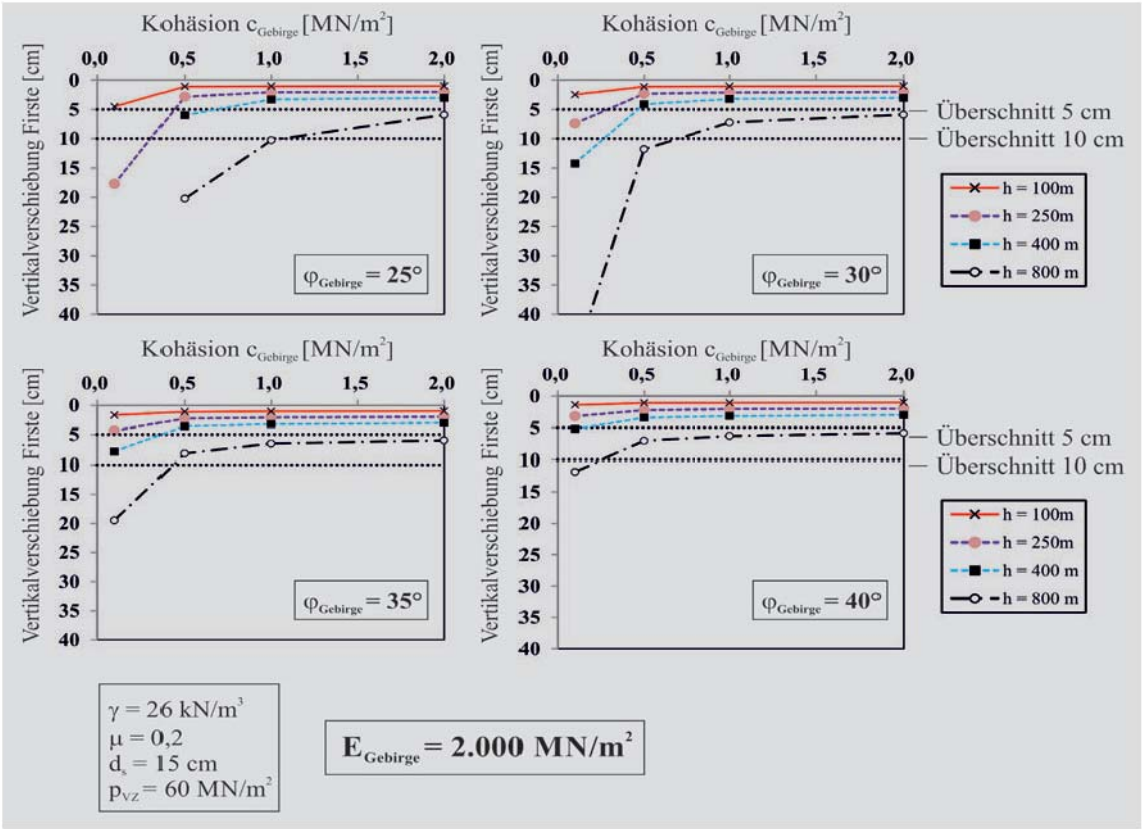


Bild 9: Vertikalverschiebungen in der Firste im Bereich des Bohrkopfs abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 2.000 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h

le im Nachläuferbereich definiert, an der die temporäre Spritzbetonbetonsicherung beginnt.

5.1 Bereich des Bohrkopfs der Gripper-TBM am Ende des Firstschildes

In den **Bildern 7 bis 9** sind die Vertikalverschiebungen, die sich gemäß **Bild 4** in der Firste im Bereich des Bohrkopfs am Ende der Firstschildes ergeben, von oben nach unten zunehmend abhängig von der von links nach rechts zunehmenden Kohäsion des Gebirges aufgetragen. Das **Bild 7** zeigt die Vertikalverschiebungen für einen E-Modul des Gebirges von 500 MN/m², **Bild 8** für einen E-Modul von 1.000 und **Bild 9** von 2.000 MN/m². In jedem Bild sind vier Diagramme für vier verschiedene Reibungswinkel abgebildet. Die vier Kurven der einzelnen Diagramme bilden unterschiedliche Überlagerungshöhen ab.

5.2 Nachläuferbereich der Gripper-TBM

Für den Nachläuferbereich sind in den **Bildern 10 bis 12** die maximalen Verschiebungen in der Firste an der Stelle, an der gemäß **Bild 4** die temporäre Spritzbetonsicherung beginnt, analog wie in den im Abschnitt 5.1 erläuterten **Bildern 7 bis 9** dargestellt.

6 Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Das Verklemmen beziehungsweise das Blockieren des Bohrkopfs stellt bei einem Tunnelvortrieb mit einer TBM ein hohes Risiko für den Vortrieb dar. Die für die Konstruktion und Bemessung für Vortriebe mit einer Tunnelbohrmaschine mit Schild und für Doppelschildmaschinen entwickelten Kriterien und Ansätze lassen sich nicht auf den Vortrieb mit einer Gripper-TBM übertragen. Um das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM analysieren zu können, wurden daher dreidimensionale numerische Parameterstudien durchgeführt. Darin wurden die stofflichen Parameter des simulierten Gebirges und die Überlagerungshöhe des Gebirges variiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Überlagerungshöhe, der Elastizitätsmodul sowie die Kohäsion des Gebirges den maßgebenden Einfluss auf die Vertikalverschiebung in der Firste haben, welche entscheidend für die Prognose für das Risiko des Verklemmens einer Gripper-TBM im Bereich des Bohrkopfs und im Nachläuferbereich ist.

Aus den Ergebnissen der Parameterstudien wurden Diagramme entwickelt, die eine Abschätzung der Verschiebungen bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM und damit eine Prognose des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM beispielsweise im Rahmen einer Machbarkeitsstudie ermöglichen.

Die Ergebnisse beruhen auf idealisierten Modellen und Berechnungsannahmen. Eine messtechnische Verifizierung konnte aufgrund der noch unzureichenden Messdaten aus Projekten noch nicht abgeschlossen werden. In weiteren Parameterstudien soll der Einfluss von

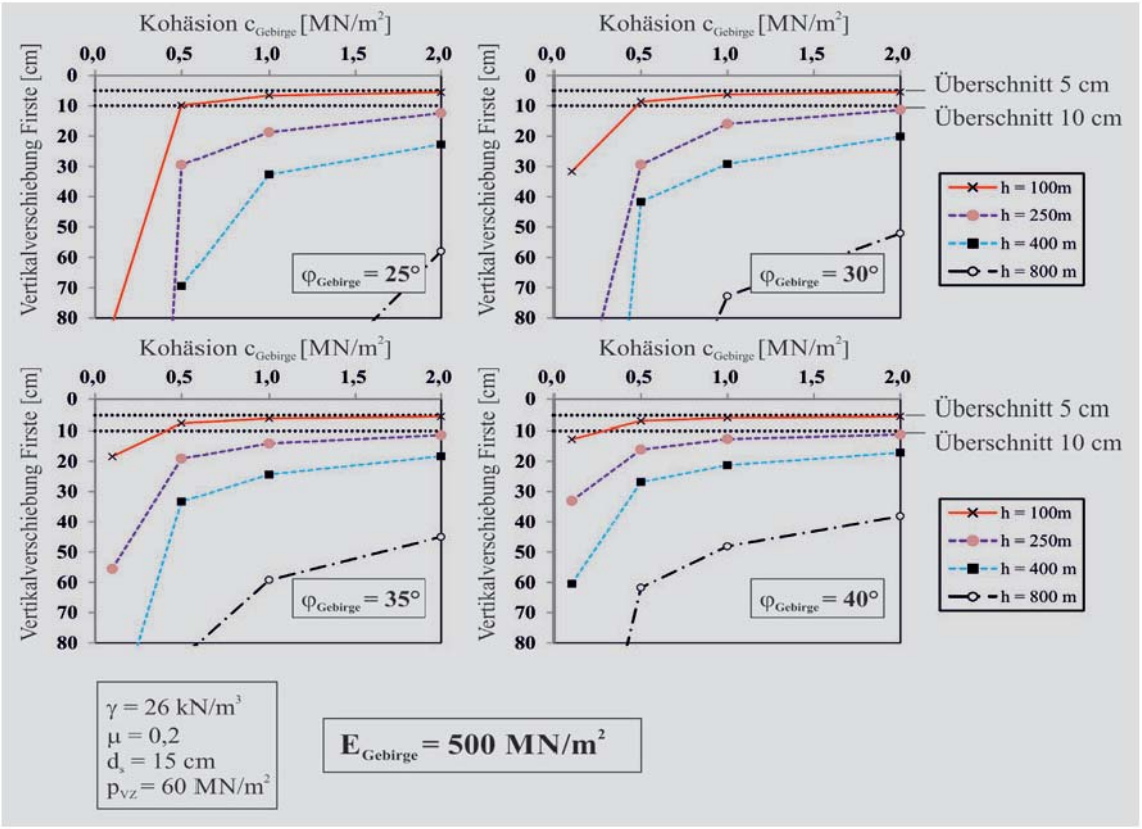
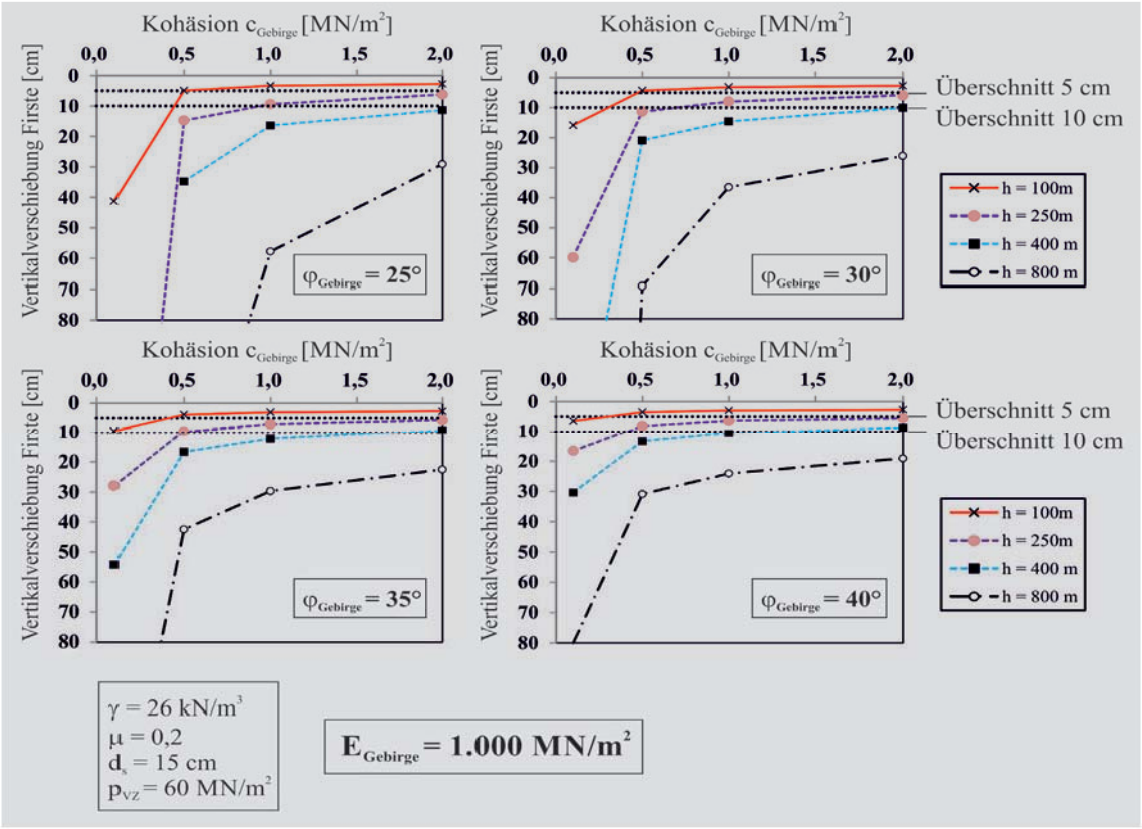


Bild 10: Vertikalverschiebungen in der Firste im Nachläuferbereich abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 500 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h

Bild 11: Vertikalverschiebungen in der Firste im Nachläuferbereich abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 1.000 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h



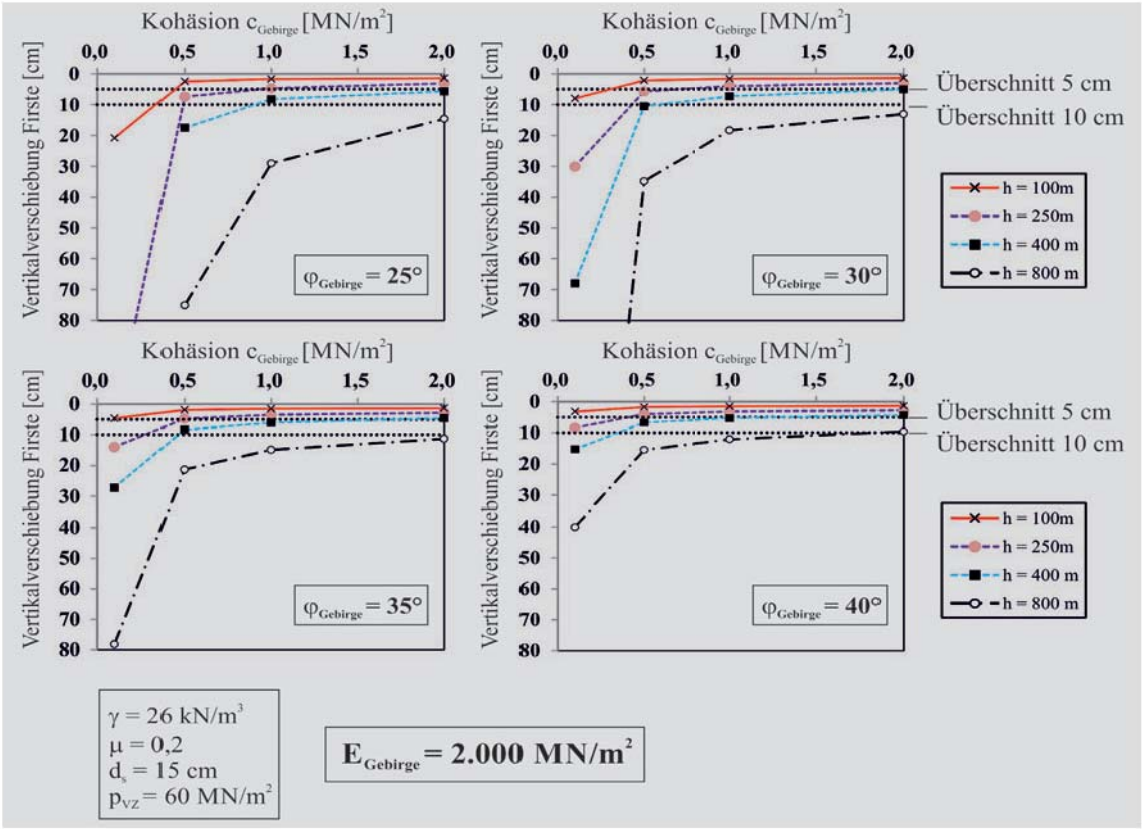


Bild 12: Vertikalverschiebungen in der Firste im Nachläuferbereich abhängig von der Kohäsion des Gebirges für E-Modul E von 2.000 MN/m² und verschiedene Reibungswinkel φ und Überlagerungshöhen h

Trennflächen auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM durch Ansatz entsprechender Stoffgesetze im numerischen Berechnungsmodell analysiert werden.

7 Literatur

[1] Ehrbar, H.; Sala, A.; Wick, R.: Vortriebe am Gotthard-Basistunnel – ein Rückblick, Erfahrungen und Lehren aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Congress 2012, S. 114-135, 2012.

[2] Boissannas, Y.: Gotthard-Basistunnel, Los Faido: Erfahrungen aus einem TBM-Vortrieb mit großer Überdeckung, Kolloquium ETH Zürich, 07.05.2009: Tunnelbau in druckhaften Gebirge, 2009.

[3] Ferrari, A.; Pedrazzini, S.: Experiences with TBM drives in the Gotthard BaseTunnel, Bodio section, 2008.

[4] Gollegger, J.; Priller, A.; Rausch, M.: Einsatz von offenen Tunnelbohrmaschinen bei druckhaftem Gebirge im Gotthard Basistunnel, Geomechanics and Tunnelling 2 (2009), No. 5, S. 591-600.

[5] Bien, S.: Analyse und Bewertung von Schadensfällen während der Bauausführung im maschinellen Tunnelbau, AV Akademikerverlag, 2015.

[6] Bien, S.; Schmitt, J.; Krajewski, W.: Schadensfälle im maschinellen Tunnelbau - Risiko Baugrund, BauPortal, 8/2015, S. 12-15.

[7] Bien, S.; Schmitt, J.; Krajewski, W.: Risikofaktor Baugrund im maschinellen Tunnelbau - Untersuchungen von Schadensfällen während der Bauausführung, 10. Kolloquium ‚Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 19.-20.01.2016, S. 249-255, ISBN 978-3-943563-21-4, 2016.

[8] Schmitt, J.: Spannungsverformungsverhalten des Gebirges beim Vortrieb mit Tunnelbohrmaschinen mit Schild, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig, Heft 89, 2009.

[9] Schmitt, J.; Stahlmann, J.: Dimensionierung von maschinellen Tunnelvortrieben mit Tübbingausbau im Fels, Bautechnik, Band 86 (2009), Heft 12, S. 743-755.

[10] 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.

[11] 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.

[12] Ramoni, M.: On the feasibility of TBM drives in squeezing ground and the risk of shield jamming. Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, 2010.

[13] Hasanpour, R.: Evaluation of Applicability of Double Shield Tunnel Boring Machines (DS-TBM) in Potentially Squeezing Grounds, Hacettepe University (PhD thesis), 2013.

[14] Hasanpour, R.; Rostami, J.; Barla, G.: Impact of Advance Rate on Entrapment Risk of a Double Shield TBM in Squeezing Grounds, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering, Band 48 (2014), S. 1115-1130.

[15] Hasanpour, R.: Advance Numerical Simulation of Tunneling by Using a Double Shield TBM, Computer and Geotechnics, Band 57 (2014), S. 37-52.

[16] Hasanpour, R.; Rostami, J.; Ünver B.: 3D Finite Difference Model for Simulation of Double Shield TBM Tunneling in Squeezing Grounds, International Journal of Tunnelling and Underground Space Technology, Band 40 (2014), S. 109-126.

[17] Hasanpour, R.; Rostami, J.; Özcelik, Y.: Impact of Overcut on Interaction Between Shield and Ground in the Tunneling with a Double-shield TBM, Journal of Rock Mechanics and Rock Engineering Band 49 (2016), S. 2015-2022.

[18] 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, S. 269-278.

[19] Schmitt, J.; Krajewski, W.; Fromm, H.; Wawrzyniak, C.: Analysen zum Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschinen, 9. Kolloquium ‚Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 14.-15.01.2014, S. 187-194.

[20] Schmitt, J.; Edelmann, T.: Bestimmung der Einsatzgrenzen im Fels für die Verspannung von Gripper-Tunnelbohrmaschinen, 10. Kolloquium ‚Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 19.-20.01.2016, S. 287-297.

[21] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT): Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik" – EANG, Ernst & Sohn Verlag, 2014.

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

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt



vertritt im Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Lehrgebiete Geotechnik und Tunnelbau.

Kontakt: juergen.schmitt@h-da.de

Omid Monfaredpur B. Eng.



ist als studentischer Mitarbeiter an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt tätig.

Kontakt: omid.monfaredpur@stud.h-da.de

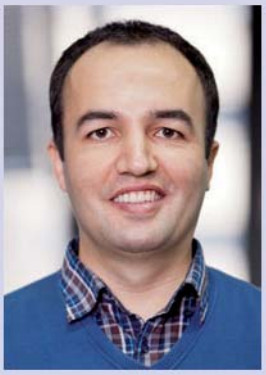
Prof. Dr.-Ing. Ulrich Burbaum



vertritt im Fachbereich Bauingenieurwesen der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Lehrgebiete Geotechnik und Tunnelbau.

Kontakt: ulrich.burbaum@h-da.de

Dr.-Ing. Rohola Hasanpour



ist als Gastwissenschaftler im Rahmen seines Stipendiums der Alexander von Humboldt-Stiftung an der Hochschule Darmstadt tätig.

Kontakt: rohola.hasanpour@h-da.de