Tunnelvortrieb mit Gripper-TBM – Vorentlastungsfaktor zur Dimensionierung der Spritzbetonschale

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

Die Lastumlagerung im Gebirge wirkt sich auf die Belastung temporärer Spritzbetonsicherungen in Tunneln aus. Dieser Artikel erläutert numerische Berechnungen, die an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt durchgeführt wurden. Sie dienen der Analyse des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges bei Vortrieben mit Gripper-TBM und der Ermittlung von Vorentlastungsfaktoren für die Dimensionierung der Spritzbetonschale.

Tunnelbau • TBM • Gripper • Spritzbeton

1 Einführung

Um das räumliche Spannungsverformungsverhalten des Gebirges im Tunnelbau in zweidimensionalen numerischen Berechnungsmodellen abbilden zu können, wird sehr häufig das Stützkern- bzw. Stützlastverfahren eingesetzt [1]. In einem ersten Schritt werden beim Stützlastverfahren die Knotenkräfte im Bereich des Rands des Ausbruchsquerschnitts im Primärspannungszustand ermittelt (Bild 1). In einem zweiten rechnerischen Zwischenschritt werden die Elemente im Bereich des Ausbruchs deaktiviert. Im Bereich des Rands des Ausbruchsquerschnitts werden dann die Knotenkräfte, die im Primärspannungszustand ermittelt wurden, angesetzt und um einen Vorentspannungsfaktor α_k reduziert. Anschließend wird dann im dritten Schritt z. B. bei einer temporären Sicherung mit Spritzbeton die Spritzbetonschale aktiviert.

Ein hoher Vorentspannungsfaktor α_k bedeutet, dass der Ausbau nur einen geringen Anteil der Lasten aus der Lastumlagerung aufnehmen muss. Ein geringer Vorentspannungsfaktor α_k hat dagegen die Folge, dass der Tunnelausbau einen größeren Anteil der Lasten aus der Lastumlagerung abtragen muss. Um den Vorentspannungsfaktor α_k bestimmen zu können, sind aufwendige dreidimensionale Berechnungen notwendig, oder die Ableitung ist anhand von Messungen aus vergleichbaren ausgeführten Projekten durchzuführen.

Für maschinelle Tunnelvortriebe existieren aus systematischen dreidimensionalen numerischen Untersuchungen verschiedene Ansätze, um den Vorentspannungsfaktor α_k mit geringem Aufwand abschätzen zu können. Bei maschinellen Vortrieben im Lockergestein sind in [2] entsprechende Ansätze publiziert. Für maschinelle Vortriebe im Festgestein mit einer Tunnelbohrmaschine mit Schild (TBM-S) sind in [3] Ansätze aus umfangreichen numerischen Untersuchungen dargestellt.

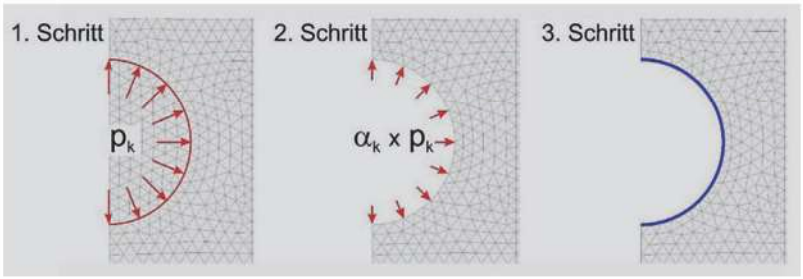
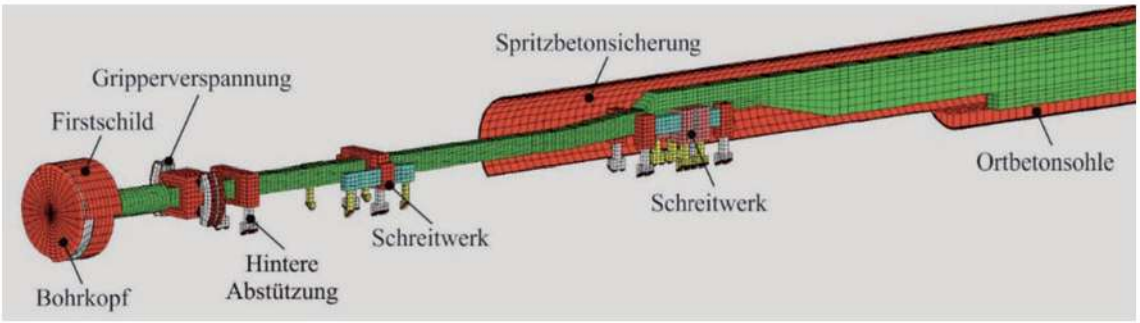


Bild 1: Stützlastverfahren am Beispiel eines Vollausbruchs

Dagegen existieren für maschinelle Tunnelvortriebe mit einer Gripper-TBM nur einzelne Ergebnisse [4]. Der Einfluss aus der Variation der stofflichen Parameter

Bild 2: Numerisches Berechnungsmodell der Gripper-TBM



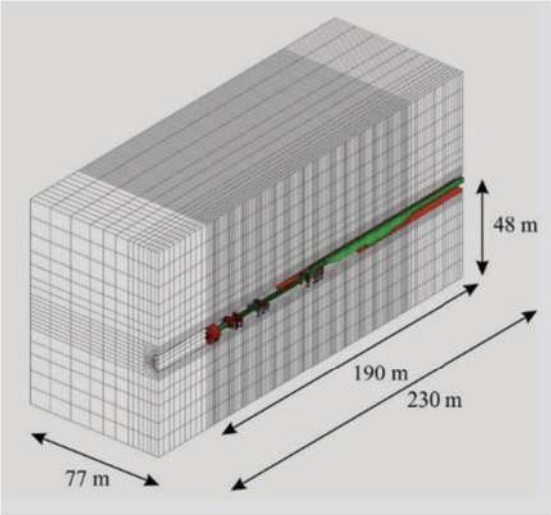


Bild 3: Dreidimensionales numerisches Modell einer Gripper-TBM mit Darstellung des simulierten Untergrunds

zur Beschreibung des Gebirges oder aus der Variation geometrischer Parameter wurde bisher noch nicht weiter für diesen Maschinentyp analysiert. Daher wurden umfangreiche Parameter- bzw. Sensitivitätsstudien mit einem detaillierten dreidimensionalen numerischen Simulationsmodell im Rahmen eines Forschungsprojekts an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse aus diesen Studien werden im vorliegenden Beitrag vorgestellt.

2 Numerisches Berechnungsmodell

Das für die Sensitivitätsstudien entwickelte dreidimensionale numerische Modell bildet den kompletten Bauablauf eines Vortriebs mit einer einfach verspannten Gripper-TBM ab. In den **Bildern 2 und 3** ist das numerische Berechnungsmodell mit den einzelnen modellierten Bereichen dargestellt. Die geometrischen Abmessungen, die Materialkennwerte und der Bauablauf entsprechen denen der Gripper-TBM, wie sie in den einzelnen Abschnitten beim Vortrieb des Gotthard-Basistunnels zum Einsatz kamen [5, 6, 7]. Eine ausführliche Beschreibung des dreidimensionalen Berechnungsmodells ist in [8] und [9] enthalten.

3 Numerische Sensitivitätsstudien

In umfangreichen numerischen Sensitivitätsstudien wurde das theoretische Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem maschinellen Tunnelvortrieb mit einer Gripper-TBM analysiert, um daraus die Beanspruchung bzw. den Vorentspannungsfaktor α_k für die temporäre Spritzbetonsicherung abzuleiten. Unter Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges wurden in den Sensitivitätsstudien die Gebirgskennwerte, die Überlagerungshöhe $h_{ü}$ und die Dicke der temporären Spritzbetonsicherung d_s variiert. In **Tabelle 1** sind die einzelnen Kenngrößen mit den variierten Bandbreiten zusammengefasst.

4 Berechnungsergebnisse

4.1 Radialspannungen im Gebirge

Im **Bild 4** sind die Radialspannungen des simulierten Gebirges, die für den Bereich der Ulme berechnet wurden, für eine Berechnungsvariante exemplarisch abgebildet. Dargestellt sind dabei die Radialspannungen, die im unmittelbaren Ausbruchrand des Tunnelquerschnitts in der Ulme wirken. Hier ist sehr deutlich zu erkennen, dass sich die Gebirgsspannungen im Bereich der Ortsbrust umlagern. Unmittelbar vor dem Ausbruch nimmt die Größe der Radialspannungen im Ulmenbereich sehr stark zu und reduziert sich dann im Bereich des Bohrkopfs sehr stark auf null. Im Bereich der Gripperverspannung vergrößern sich die Radialspannungen erwartungsgemäß durch das Einleiten der Verspannkräfte der Gripperverspannung. Die Vergrößerung der Radialspannungen ist dabei maßgeblich von der Größe der eingeleiteten Kräfte der Gripperverspannung abhängig. Nach dem Umsetzen der Gripperverspannung im Zuge des Vortriebs reduzieren sich die Radialspannungen in dem von den Gripperverspannungen entlasteteten Bereich wieder zu null. Beim Einbau der Spritzbetonsicherung und der Ortbetonsohle kommt es erwartungsgemäß zu einem Anstieg der Radialspannungen in der Ulme, bis sich ein konstanter Wert einstellt. Dabei ist der Anstieg abhängig von der zeitlichen Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons. Sehr deutlich wird bei der Darstellung der Radialspannungen im **Bild 4**, dass die Gebirgsspannungen, die auf die temporäre Spritzbetonsicherung wirken, äußerst gering sind. Bei der Betrachtung der Radialspannungen im Bereich der Firste zeichnet sich ein ähnlicher Spannungsverlauf wie in der Ulme ab, nur dass folgerichtig der Einfluss der Gripperverspannung nicht bemerkbar ist.

4.2 Belastung der temporären Spritzbetonsicherung

In den **Bildern 5, 6, 8 und 9** ist der maßgebliche Teil der Auswertungen der Sensitivitätsstudien aufbereitet. Die für die Bemessung der temporären Spritzbetonsicherung bzw. -schale maßgebende Schnittgröße stellt die maximale Normalkraft im Bereiche der Ulme dar. Das berechnete Biegemoment aus den Parameterstudien spielt aufgrund der sehr geringen Größe bei der Bemes-

Tabelle 1: Bandbreite der Parameter (isotrope Materialeigenschaften Gebirge)

Kenngröße		Bandbreite
Wichte Gebirge $\gamma_{Gebirge}$	[kN/m³]	25
E-Modul Gebirge $E_{Gebirge}$	[MN/m²]	500 bis 5.000
Querdehnzahl μ	[-]	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
Dicke Spritzbeton d_s	[cm]	10 bis 25

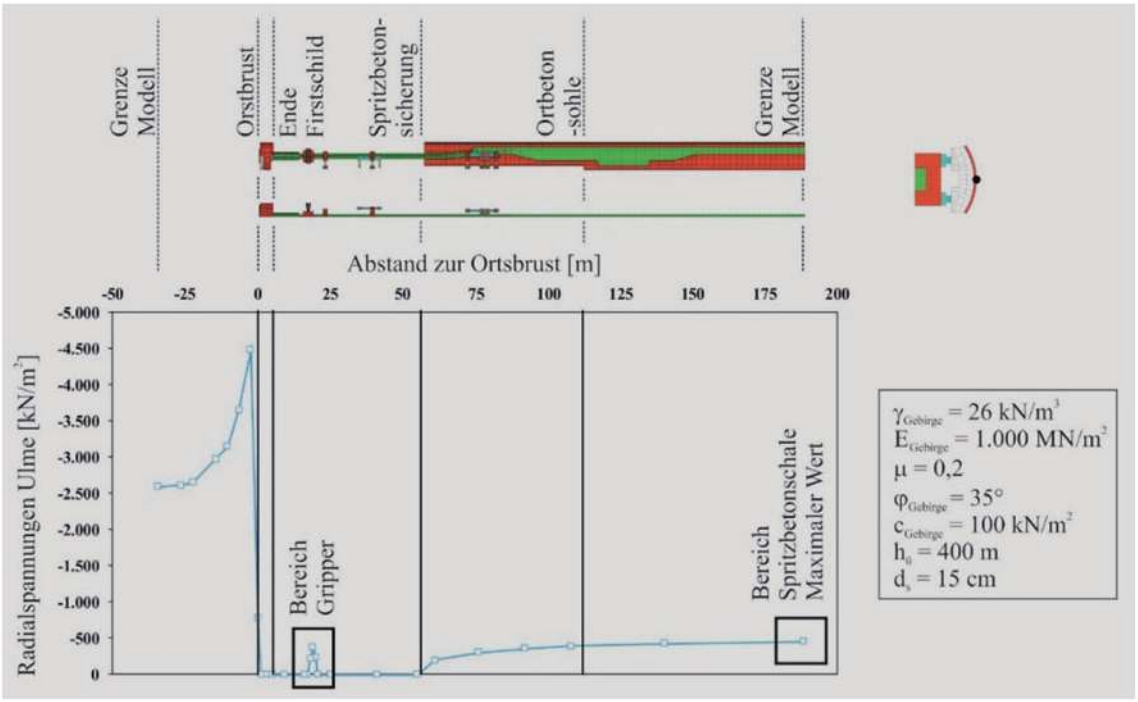


Bild 4: Radialspannungen im Ulmenbereich bezogen auf den Abstand zur Ortsbrust

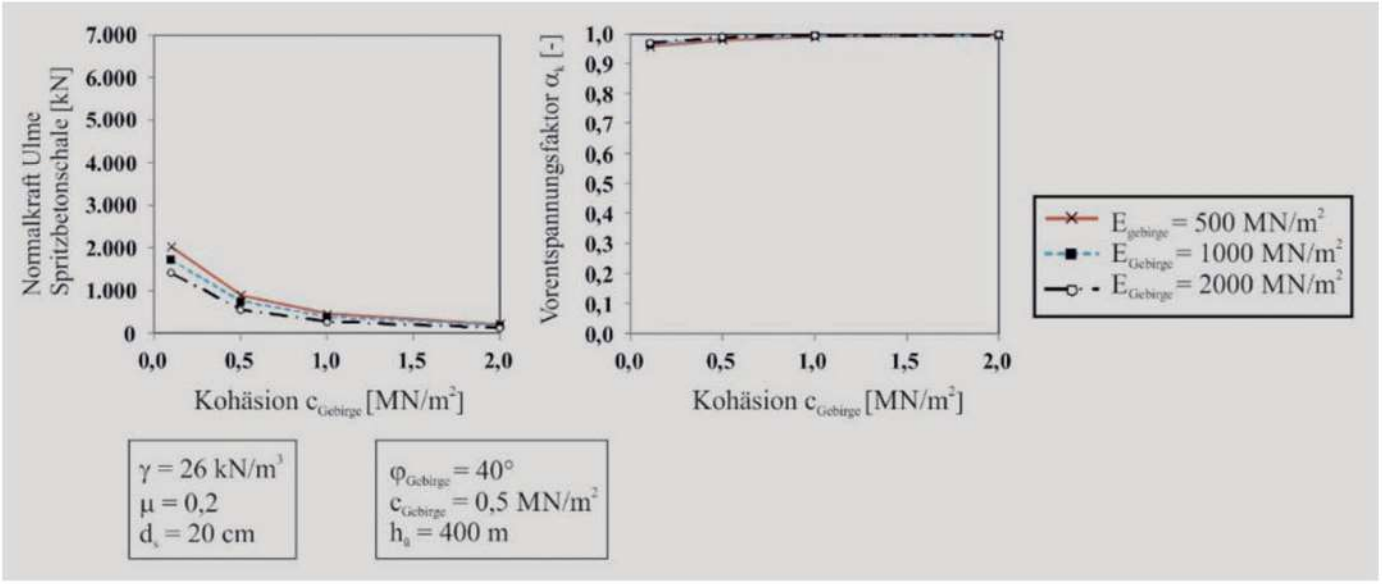


Bild 5: Maximale Normalkraft der Spritzbetonschale im Bereich der Ulme und Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ für variierte Elastizitätsmoduli des Gebirges $E_{Gebirge}$ und Überlagerungshöhe $h_ü = 400$ m

sung keine Rolle und wird daher nicht weiter dargestellt. Neben dem absoluten Maximalwert der Normalkraft im Bereich der Ulme ist in den **Bildern 5, 8 und 9** auch der Vorentspannungsfaktor α_k aufgetragen.

Im **Bild 5** ist die Abhängigkeit der Normalkraft in der Ulme und des Vorentspannungsfaktors α_k von der Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ für variierte Elastizitätsmoduli des Gebirges $E_{Gebirge}$ dargestellt. Es zeigt sich, dass der Einfluss des Elastizitätsmoduls auf die Normalkraft in der Ulme mit zunehmender Kohäsion des Gebirges gegen null geht. Bei der Betrachtung des Vorentspannungsfaktors wird ebenso deutlich, dass der Elastizitätsmodul des Gebirges keinen relevanten Einfluss auf die temporäre Spritzbetonsicherung hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich der elastische Anteil der Verformungen bereits vor dem relativ späten Einbau der temporären Spritzbetonsicherung eingestellt hat und daraus keine Spannungsumlagerungen mehr resultieren können. Dagegen zeigt sich, dass die Kohäsion des Gebirges einen Einfluss auf den Lastabtrag der temporäreren Spritzbetonsicherung aufweist. Dabei ist allerdings anzumerken, dass mit einem Vorentspannungsfaktor im Bereich von 0,96 bis 1,0 der Einfluss nur gering ist.

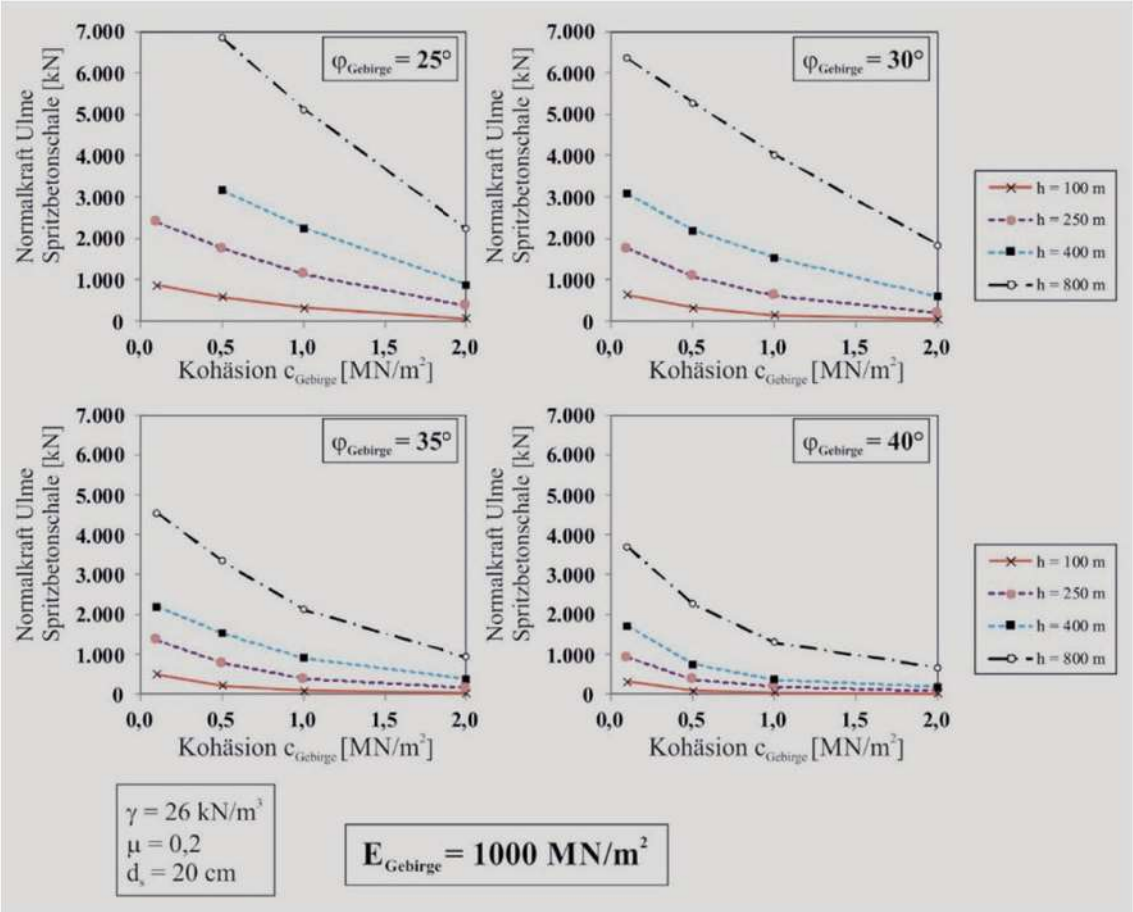
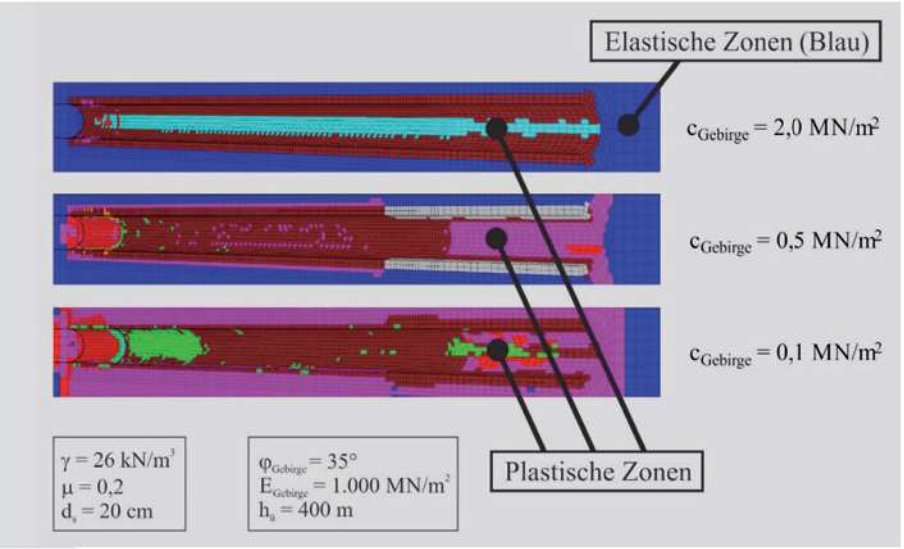


Bild 6: Maximale Normalkraft der Spritzbetonschale im Bereich der Ulme abhängig von der Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ für variierte Reibungswinkel des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ und Überlagerungshöhen $h_ü$

Im Bild 6 ist die maximale Normalkraft der temporären Spritzbetonschale in der Ulme in Abhängigkeit von der Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ für verschiedene Reibungswinkel des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ und Überlagerungshöhen $h_ü$ visualisiert. Bei einem Reibungswinkel des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ von 25° in Kombination mit einer Kohäsion des Gebirges $c_{Gebirge}$ von 0,1 MN/m² und einer Überlagerungshöhe $h_ü$ von 400 bzw. 800 m konnten keine Werte abgebildet werden, da hier das simulierte Gebirge numerisch kollabierte. Dies bedeutet, dass bei dieser Kennwertekombination der ungestützte Bereich nicht mehr ausreichend standsicher ist und hier eine temporäre Sicherung z. B. durch eine Systemankerung bzw. durch Ausbaubögen im ungestützten Bereich im Rahmen des Vortriebs notwendig wäre. Bei der Betrachtung der Diagramme im Bild 6 zeigt sich zum einen der Einfluss der Scherfestigkeiten des Gebirges und zum anderen der Einfluss der Überlagerungshöhe auf die Größe der maximalen Normalkraft im Ulmenbereich. Bei einem Gebirge mit geringen Scherfestigkeiten ergeben sich erwartungsgemäß für die Spritzbetonschale größere Normalkräfte als bei einem Gebirge mit höheren Scherfestigkeiten. Dies resultiert daraus, dass sich die Spannungen bei einem Gebirge mit geringeren Scherfestigkeiten stärker umlagern, d. h. dass die Spannungen im unmittelbaren Bereich des Ausbruchquerschnitts nicht aufgenommen werden können und das Gebirge plastiziert (Bild 7). Damit ergibt sich im Gebirge ein größeres Gewölbe. Der Gebirgsdruck, der unterhalb des

Bild 7: Ausbildung der plastischen Zonen im Gebirge in Abhängigkeit von der Kohäsion des Gebirges



Gewölbes entsteht, muss entsprechend von der temporären Spritzbetonsicherung aufgenommen werden. Mit steigender Überlagerungshöhe vergrößern sich, wie im Bild 6 zu sehen ist, die Normalkräfte in der Spritzbetonschale. Auch mit zunehmender Überlagerungshöhe bildet sich ein größeres Gewölbe aus.

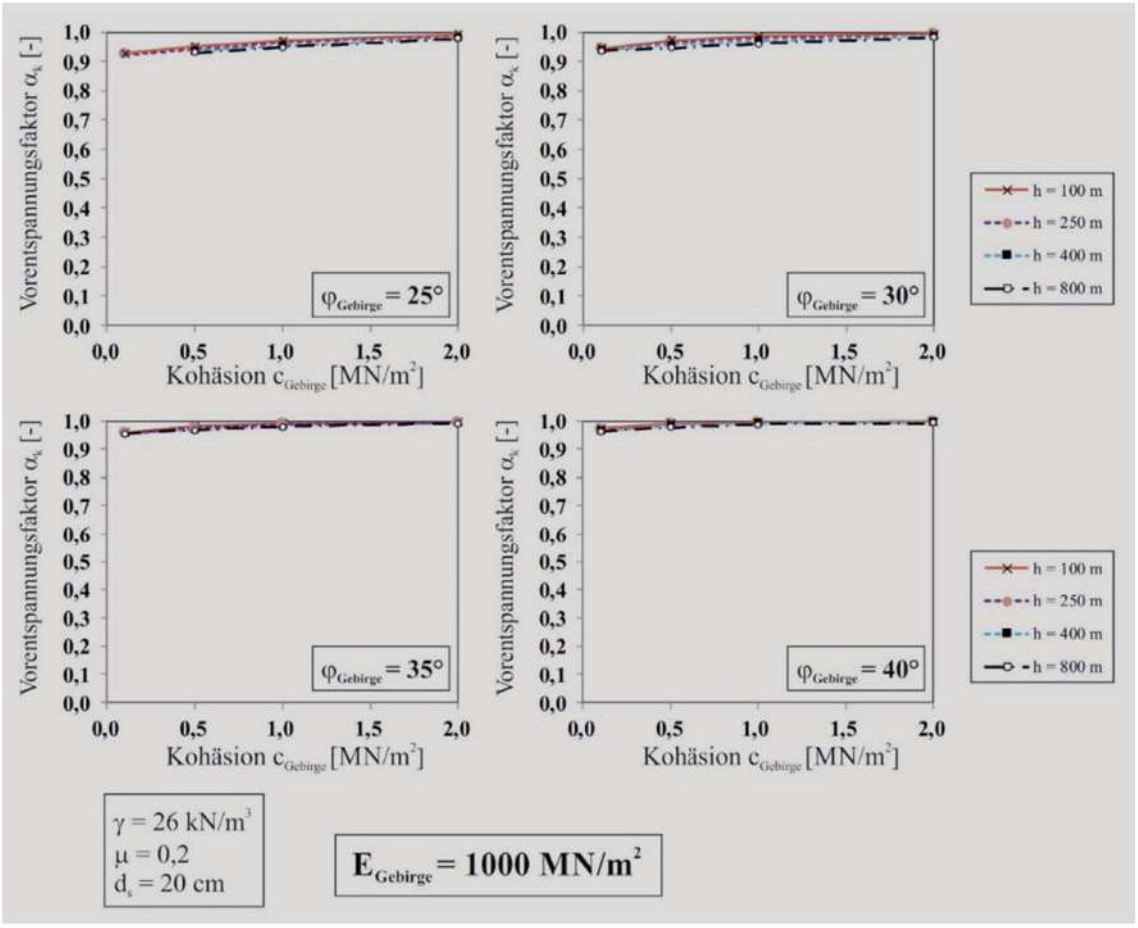
Der Einfluss der Scherfestigkeiten des Gebirges und der Überlagerungshöhe auf die Belastung der temporären Spritzbetonsicherung relativiert sich bei der Betrachtung des Bilds 8. Hier ist der Vorentspannungsfaktor für die im Bild 6 dargestellten Einflussgrößen visualisiert. Für die dargestellten Varianten liegt der Vorentspannungsfaktor zwischen 0,92 und 1,0. Bei Vergleich der Überlagerungshöhen zeigt sich, dass die Kurvenverläufe fast deckungsgleich sind und die Überlagerungshöhe keine Auswirkung auf die Größe des Vorentlastungsfaktors besitzt. Für den Reibungswinkel des Gebirges ist ein geringer Einfluss auf die Größe des Vorentspannungsfaktors feststellbar. Der größte Einfluss auf die Größe des Vorentspannungsfaktors resultiert aus der Kohäsion des Gebirges.

Im Bild 9 sind die Ergebnisse veranschaulicht, die sich für die Variation der Dicke der Spritzbetonschale d_s in Abhängigkeit des Reibungswinkels des Gebirges ergeben. Die Dicke der Spritzbetonschale hat nur einen sehr geringen Einfluss bzw. eine untergeordnete Bedeutung auf die Größe der maximalen Normalkraft in der Ulme. Mit zunehmender Dicke der Spritzbetonschale steigen die Normalkräfte in der Spritzbetonschale geringfügig an, was darauf zurückzuführen ist, dass mit zunehmender Steifigkeit der Spritzbetonschale die Spannungen aus dem Gebirge angezogen werden. Deutlich wird aber auch hier wieder, dass der größere Einfluss auf die Größe der maximalen Normalkräfte in der Spritzbetonschale aus der Scherfestigkeit des Gebirges entsteht. Der Vorentspannungsfaktor liegt für den Vergleich der Dicke der Spritzbetonschale zwischen 0,93 bis 0,98.

5 Beurteilung der Ergebnisse und Ausblick

Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen sehr deutlich, dass von den variierten Parametern Elastizitätsmodul, Reibungswinkel, Kohäsion, Überlagerungshöhe und Dicke der Spritzbetonschale die Kennwerte der Scherfestigkeiten des Gebirges den größten Einfluss auf die für die Bemessung maßgebende Größe der maximalen Normalkraft im Ulmenbereich haben. Bei der Betrachtung der Größe des Vorentspannungsfaktors relativiert sich diese Erkenntnis dadurch, dass die Werte für den Vorentlastungsfaktor, der zur Durchführung von zweidimensionalen numerischen Berechnungen erfor-

Bild 8: Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion des Gebirges für variierte Reibungswinkel des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ und Überlagerungshöhen $h_ü$



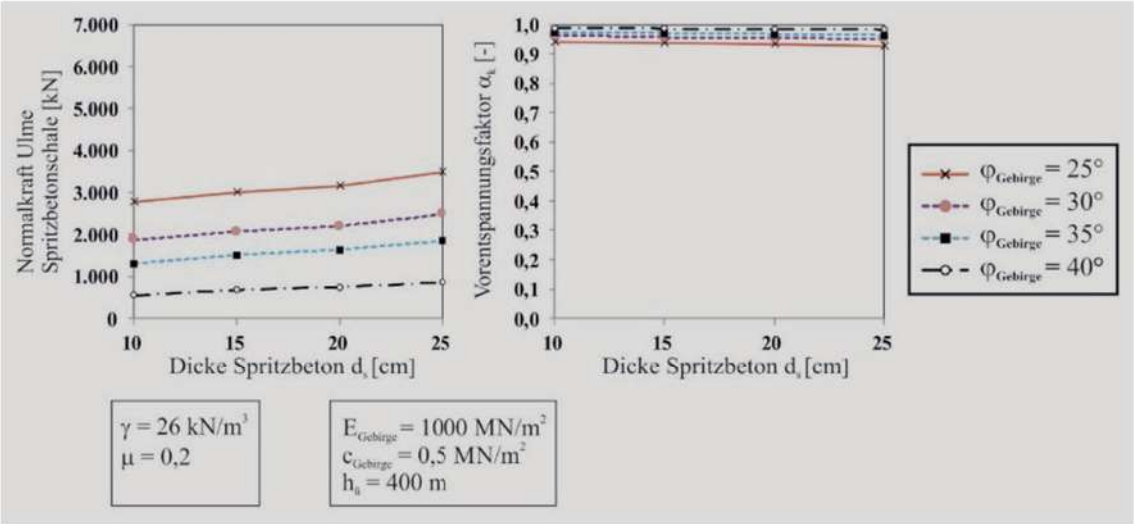


Bild 9: Maximale Normalkraft der Spritzbetonschale im Bereich der Ulme und Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Dicke des Spritzbetons ds für variierte Reibungswinkel des Gebirges $\varphi_{Gebirge}$ und eine Überlagerungshöhe $h_ü$ von 400 m

derlich ist, um das Stützlast- bzw. Stützkennverfahren anwenden zu können, zwischen 0,93 und 1,0 liegen. Das bedeutet, dass für den betrachteten Bereich der Kennwerte in Tabelle 1 nur eine sehr geringe Belastung der Spritzbetonsicherung auftritt und die Spritzbetonsicherung nur maximal ca. 7 % der Belastung aus dem Gebirge trägt. Bei einem Vergleich der Vorentlastungsfaktoren von Vortrieben mit TBM-S (Ansatz nach [3]) und Gripper-TBM zeigen sich deutlichere Unterschiede (Tabelle 2).

Bei höheren Kennwerten für das Gebirge ist die Belastung der Spritzbetonsicherung bei einem Vortrieb mit einer Gripper-TBM so gering, dass sich ein fast lastfreier Fall ergibt. Das wird in den Untersuchungen dadurch deutlich, dass für isotropes elastoplastisches, nicht zeitabhängiges Materialverhalten des simulierten Gebirges die Spritzbetonschale nicht sinnvoll bemessen werden kann.

Hier zeigt sich weiterer Forschungsbedarf. Zum einen ist zu untersuchen, wie sich das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einem simulierten Trennflächengefüge des Gebirges verhält, und zum anderen, welche Auswirkungen sich durch ein simuliertes zeitabhängiges Materialverhalten des Gebirges auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges ergeben. Derzeit werden hierzu weitere Untersuchungen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt durchgeführt.

Tabelle 2: Vorentlastungsfaktoren α_k für eine TBM-S (Ermittlung nach [3]) und eine Gripper-TBM für zwei Kennwertvarianten A und B

Kenngröße		Variante A	Variante B
Wichte Gebirge $\gamma_{Gebirge}$	[kN/m³]	26	26
E-Modul Gebirge $E_{Gebirge}$	[MN/m²]	1.000	1.000
Querdehnzahl μ	[-]	0,2	0,2
Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{Gebirge}$	[°]	35	30
Kohäsion Gebirge $c_{Gebirge}$	[MN/m²]	1,0	0,5
Durchmesser Bohrkopf	[m]	9,5	9,5
Überlagerungshöhe $h_ü$	[m]	400	100
Dicke Tübbing/Spritzbeton	[cm]	20	20
Vorentlastungsfaktor α_k für TBM-S	[-]	**0,81**	**0,72**
Vorentlastungsfaktor α_k für Gripper-TBM	[-]	**0,98**	**0,97**

6 Literatur

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

[2] Schmitt, J.; Stahlmann, J.: Vergleichende Berechnungen zur Bemessung von Schildvortriebsmaschinen. Tunnel 2/2007, S. 40-49.

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

[4] 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.

[5] 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.

[6] Brux, G.: TBM-Einsatz am Gotthard-Basistunnel, Sachstandsbericht: Mitte 2007. Tiefbau 12/2007, S. 752-755.

[7] 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.

[8] 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.

[9] Schmitt, J., Monfaredpur, O., Burbaum, U., Hasanpour, R.: Kriterium zur Prognose des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM. GeoResources Journal, Heft 1-2017, S. 29-38. Online: http://www.georesources.net/download/GeoResources-Zeitschrift-1-2017.pdf

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

MICHAEL

mago-Tunnelbau-Spezialplatten
Lastverteilungsplatten für den Tunnelbau

mago-tunneling-specialboards
Load distribution plates for tunnel constructions

Erfolgreich eingesetzt:
Successfully used:

- Katzenbergtunnel, NBS Karlsruhe-Basel
- City-Tunnel, Leipzig
- Finnetunnel, Weimar
- Kaiser-Wilhelm-Tunnel, Cochem
- U-Bahn-Linie 4, Hamburg
- Brenner-Zulaufstrecke Nord
- Sluiskiltunnel, Terneuzen (NL)
- Stadtbahntunnel, Karlsruhe
- Boßlertunnel, NBS Wendlingen-Ulm
- Koralmtunnel KAT 3, Steiermark
- Tunnel Rastatt, NBS Karlsruhe-Basel
- Cityringen, Erweiterung Metro Kopenhagen
- Metro Tel Aviv, Israel

Weitere Informationen, Prüfzertifikate und -zeugnisse: | More details and test certificates:
TU@michael-gmbh.com ■ T +49 (0) 421 244 94 90 ■ F-92