

# Analyse der Plastifizierung des Gebirges im Bereich der Verspannung von Gripper-Tunnelbohrmaschinen

Jürgen Schmitt<sup>1</sup>, Ulrich Burbaum<sup>2</sup>, Rohola Hasanpour<sup>3</sup>  
und Omid Monfaredpur<sup>4</sup>

Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt  
University of Applied Sciences Darmstadt  
Fachbereich Bauingenieurwesen  
Haardtring 100  
64295 Darmstadt  
DEUTSCHLAND

## 1 EINLEITUNG

Beim Bau von Tunneln im Fels kommen insbesondere bei zunehmender Tunnellänge immer häufiger Tunnelbohrmaschinen (TBM) zum Einsatz. Für Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit wird in der Regel eine Gripper-TBM verwendet.

Die Gripper-TBM verspannt sich vor jedem Bohrhub mithilfe von seitlich ausfahrbaren Hydraulikzylindern fest an der zuvor ausgebrochenen Tunnelwand. Die außenliegende Gripperverspannung ist Kern- und namensgebendes Element dieses Maschinentyps. Die Vorschubpressen stützen sich an der verspannten Grippereinheit ab und drücken den rotierenden Bohrkopf an die Ortsbrust. Nach dem Abbohren eines Bohrhubes wird der Vortrieb unterbrochen und die Verspanneinheit nach vorne umgesetzt. Der Tunnelquerschnitt wird temporär mit Spritzbeton durch im Nachläuferbereich montierte Spritzbetonroboter gesichert.

Damit der Bohrkopf bzw. die Hartgesteinsdisken in der Lage sind, den Fels zu lösen, sind hohe Andruckkräfte notwendig. Diese werden durch die Reibung zwischen dem Gebirge und der Gripperverspannung gewährleistet. Dadurch werden in diesem Bereich sehr große Kräfte in das Gebirge eingeleitet. Hierbei kann es bei Überschreitung der Festigkeit des Gebirges zu einer Plastifizierung bzw. Brucherscheinung im Gebirge kommen (s. Bild 1). Ein sicheres Einleiten der Verspannkräfte im Gebirge ist hier nicht mehr gewährleistet, so dass sich ein erhöhtes Risiko für das Personal und die Maschine des Tunnelvortriebs ergibt.

Untersuchungen zur Verspannung von Gripper-TBM wurden in [1] durchgeführt und analysiert sowie ein Vorschlag abgeleitet, wie die Verspannbarkeit einer TBM bereits vor dem Projektbeginn näherungsweise abgeschätzt werden kann. Bei den Untersuchungen in [1] wurde nur die Analyse des lokalen Einflusses der Gripperverspannung auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges vorgenommen. Veränderte Spannungszustände im Gebirge, die sich durch die großräumige Spannungsumlagerung im Gebirge infolge des Tunnelvortriebs ergeben, wurde dabei als Randbedingung nicht berücksichtigt.

---

<sup>1</sup> E-Mail-Adresse: juergen.schmitt@h-da.de

<sup>2</sup> E-Mail-Adresse: ulrich.burbaum@h-da.de

<sup>3</sup> E-Mail-Adresse: rohola.hasanpour@h-da.de

<sup>4</sup> E-Mail-Adresse: omid.monfaredpur@stud.h-da.de

Um die Plastifizierung des Gebirges im Bereich der Verspannung von Gripper-TBM mit der Randbedingung der großräumigen Spannungsumlagerung im Gebirge infolge des Tunnelvortriebs zu analysieren, wurden an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt umfangreiche Sensitivitätsstudien mit einem dreidimensionalen numerischen Berechnungsmodell einer einfach verspannten Gripper-TBM durchgeführt. Im Rahmen des Beitrages werden auszuweise Ergebnisse der Untersuchungen vorgestellt.

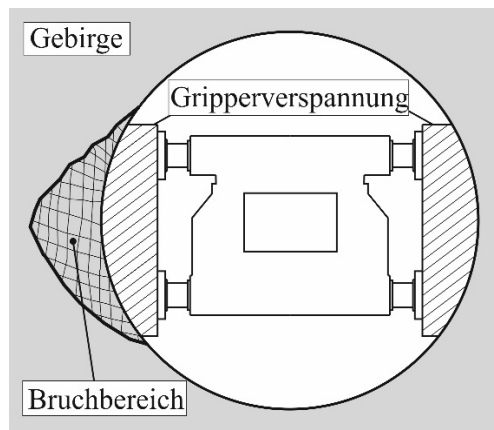


Bild 1: Schemaskizze Brucherscheinungen im Gebirge im Bereich der Gripper-verspannung

## 2 NUMERISCHES BERECHNUNGSMODELL

Das für die Sensitivitätsstudien verwendete dreidimensionale numerische Modell bildet den kompletten Bauablauf eines Vortriebs mit einer einfach verspannten Gripper-TBM ab. In Bild 2 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 (vgl. [2] bis [4]).

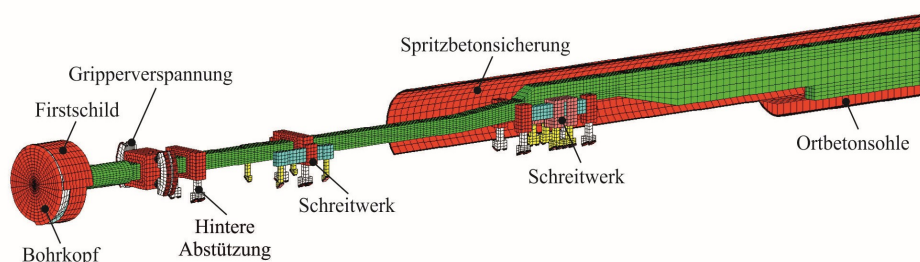


Bild 2: Berechnungsmodell Gripper-TBM mit Nachläufer

Der Ausbruchsdurchmesser im Modell beträgt  $d = 9,5$  m. Die Gesamtlänge des Berechnungsmodells beträgt 230 m, in dem eine Vortriebsstrecke von 190 m abgebildet wurde (vgl. Bild 3). Im Kopfbereich der Gripper-TBM wurden der Bohrkopf, der Bohrkopftrieb sowie der Firstschild/Teilsschild/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 Bereich der Gripperverspannung wurden die Gripperpratzen diskret modelliert. 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. Die Spritzbetonsicherung wurde mit einer Dicke von  $d = 20$  cm berücksichtigt. Ebenso wurde die Ortbetonsohle im numerischen Modell abgebildet. Des Weiteren erfolgte eine Diskretisierung der einzelnen Schreitwerke der Gripper-TBM, so dass das Ein- und Ausziehen der einzelnen Schreitwerke in den einzelnen Bauphasen realitätsnah abgebildet werden konnte.

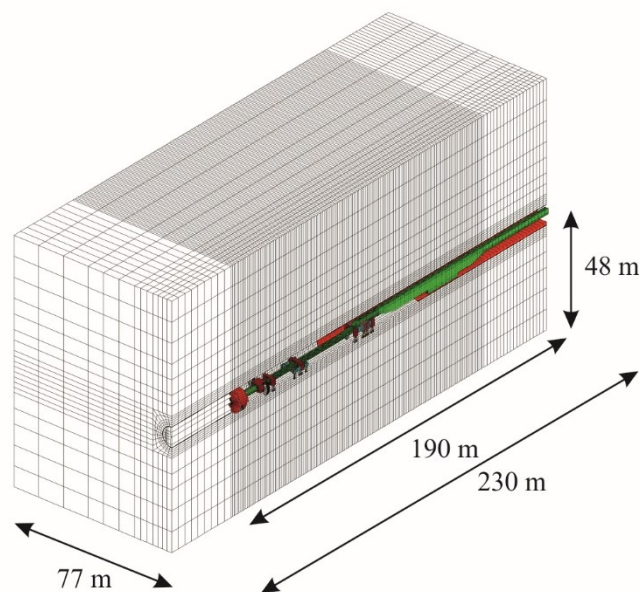


Bild 3: Dreidimensionales numerisches Modell Gripper-TBM mit der Darstellung des simulierten Untergrundes

Der Untergrund wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb mit nicht assoziierter Fließregel simuliert. Der Einfluss von Trennflächen im Gebirge wurde im Rahmen der vorgestellten Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Stahlbauteile der Gripper-TBM wurden mit linear-elastischen Materialverhalten sowie bereichsweise angesetzten Ersatzsteifigkeiten und Ersatzwichten erfasst. Ebenso wurden der Spritzbeton und die Ortbetonsohle durch ein linear-elastisches Materialverhalten beschrieben. Der Elastizitätsmodul des Spritzbetons und der Ortbetonsohle wurde in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die Simulation des Baufortschritts angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Betons zu simulieren (vgl. [5] bis [9]).

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 UND BERECHNUNGSERGEBNISSE

Mit dem zuvor beschriebenen numerischen Modell wurden umfangreiche Sensitivitätsstudien durchgeführt. Dabei wurden unter Berücksichtigung isotroper Materialeigenschaften des Gebirges, die Gebirgskennwerte, die Überlagerungshöhe sowie die Verspannkkräfte und die Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen, die im Bereich der Gripperverspannung ins Gebirge eingeleitet werden, variiert (vgl. Tab. 1). Im Vorfeld wurden hierzu verschiedene bereits aufgeführte Tunnelbauprojekte hinsichtlich der zuvor genannten Kraftgrößen ausgewertet und analysiert. Für die Verspannkkräfte wurde dabei eine maximale Verspannkraft pro Gripperpratze von 35.000 kN, für welche die Vortriebsmaschinen ausgelegt waren, bestimmt. Im Nachfolgenden bezieht sich die angegebene Verspannkraft immer als Angabe pro Gripperpratze.

Tabelle 1: Bandbreite variierte Parameter Sensitivitätsstudien

Kenngröße	Einheit	Bandbreite / Werte
Wichte Gebirge $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	26
E-Modul Gebirge $E_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	500 / 1.000 / 2.000 / 5.000
Querdehnzahl $\mu$	[-]	0,2
Reibungswinkel Gebirge $\varphi_{\text{Gebirge}}$	[°]	25 / 30 / 35 / 40
Kohäsion Gebirge $c_{\text{Gebirge}}$	[MN/m <sup>2</sup> ]	0,1 / 0,5 / 1,0 / 2,0
Überlagerungshöhe $h_{\bar{u}}$	[m]	100 / 250 / 400 / 800
Spritzbetondicke	[cm]	20
Verspannkraft	[kN]	0 bis 1.000.000
Vortriebspressenkraft	[kN]	0 bis 100.000

Im einem ersten Arbeitsschritt wurde zunächst nur die Verspannkkräfte sukzessive erhöht, um einen Kollaps bzw. Bruchversagen im Gebirge numerisch zu erzeugen. Eine Vortriebskraft aus den Vorschubpressen wurde dabei nicht angesetzt.

In Bild 4 sind die Horizontalspannungen des simulierten Gebirges, die in Vortriebsrichtung im Bereich der Ulme berechnet wurden, für eine Variante a exemplarisch abgebildet. Die für die Variante a angesetzten Kennwerte sind Bild 4 zu entnehmen. In der Darstellung ist zu erkennen, dass sich die Gebirgsspannungen im Bereich der Ortsbrust sehr stark umlagern. Unmittelbar vor dem Ausbruch nimmt die Größe der Horizontalspannungen im Ulmenbereich sehr stark zu und reduziert sich dann im Bereich des Bohrkopfs sehr stark. Im ausgebrochen ungestützten Bereich liegen dann die Horizontalspannungen bei 0 kN/m<sup>2</sup>. Im Bereich der Gripperverspannung, in dem die Verspannkkräfte ins Gebirge eingetragen werden, kommt es dann erwartungsgemäß zu einer entsprechenden Vergrößerung der Horizontalspannungen aufgrund des Anliegens der Gripperverspannung bzw. durch das Einleiten der Verspannkkräfte durch die Gripperverspannung. Nach dem Umsetzen der Gripperverspannung ist im nachfolgenden ungestützten Bereich wieder eine Reduktion der Horizontalspannungen auf 0 kN/m<sup>2</sup> in der Ulme feststellbar. Beim Einbau der Spritzbetonsicherung und der Ortbetonsohle erhöhen sich die Horizontalspannungen in der Ulme wieder leicht.

Sehr deutlich wird im Bild 4, dass der Spannungszustand, der im Bereich der Gripperverspannung wirkt, davon abhängig ist, wie sich die Spannungen im Gebirge durch den Vortrieb umlagern. Daraus kann geschlussfolgert werden,

dass es zu einer realitätsnahen Beurteilung der Verspannbarkeit von Gripper-Tunnelbohrmaschinen im Fels notwendig ist, die umgelagerten Spannungszustände, die im Gebirge wirken, bei der Betrachtung zu erfassen und abzubilden.

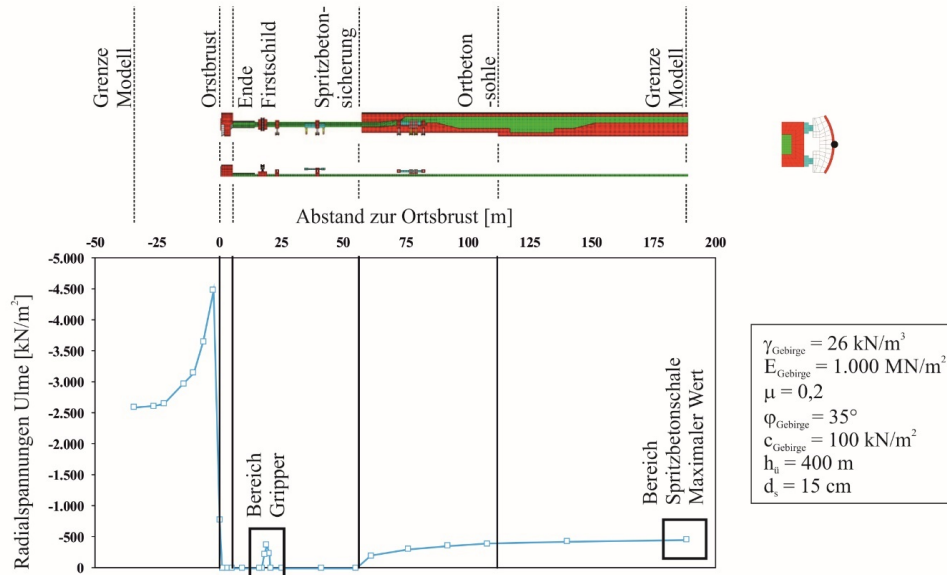


Bild 4: Horizontalspannungen im Ulmenbereich bezogen auf den Abstand zur Ortsbrust für die Variante a, Verspannkraft 35.000 kN, Vortriebskraft Vorschubpressen 0 kN

Bild 5 zeigt die Spannungsverteilung der Horizontalspannungen im simulierten Gebirge in einer räumlichen sowie in einem Schnitt quer zur Vortriebsrichtung im Bereich der Gripper-verspannung für die Varianten a und b für eine Verspannkraft von 35.000 kN und 300.000 kN. Bei der Variante b wurde dabei im Vergleich zur Variante a die Kohäsion des Gebirges  $c_{\text{Gebirge}}$  von  $100 \text{ kN/m}^2$  auf  $500 \text{ kN/m}^2$  erhöht. Hier ist anzumerken, dass zur Sensitivitätsabschätzung auch Verspannkräfte angesetzt wurden, die deutlich über den maximalen Verspannkräfte liegen, für die die Gripper-TBM üblicherweise ausgelegt bzw. dimensioniert sind. Bei einer Verspannkraft von 35.000 kN zeigt sich, dass die Größe der Horizontalspannungen im Bereich der Ulme am Ausbruchrand geringer ist als die Horizontalspannungen im Randbereich im Gebirge. Bei Steigerung der Verspannkraft auf 300.000 kN ergeben sich dagegen am Ausbruchrand höhere Horizontalspannungen. Insbesondere für die Variante b bei einer Verspannkraft von 300.000 kN zeigt sich in Bild 5, dass die Einleitung der Verspannkraft einen lokal beschränkten Bereich im Gebirge aktiviert.

Sehr deutlich wurde bei den Untersuchungen im ersten Arbeitsschritt, dass die Verspannkräfte, die aufgebracht werden müssen, damit sich ein Kollaps bzw. Bruchversagen im Gebirge ergibt, wesentlich größer sind, als maximale Verspannkräfte für welche die Gripper-TBM üblicherweise ausgelegt bzw. dimensioniert sind.

In einem zweiten Arbeitsschritt wurden nun zusätzlich zu den Verspannkräften die Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen aufgebracht und variiert. Hierbei zeigte sich, dass es durch den Ansatz der Vortriebskräfte aus

den Vorschubpressen zu einer zusätzlichen Schub- und Scherbeanspruchung des Gebirges kommt, die dazu führt, dass sich bei Ansatz üblicher maximaler Verspannkraften der Gripperverspannung ein Kollaps bzw. Bruchversagen im Gebirge simulieren lässt, dabei liegen allerdings auch hier die Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen über den Kräften, die in der Regel beim Vortrieb auftreten.

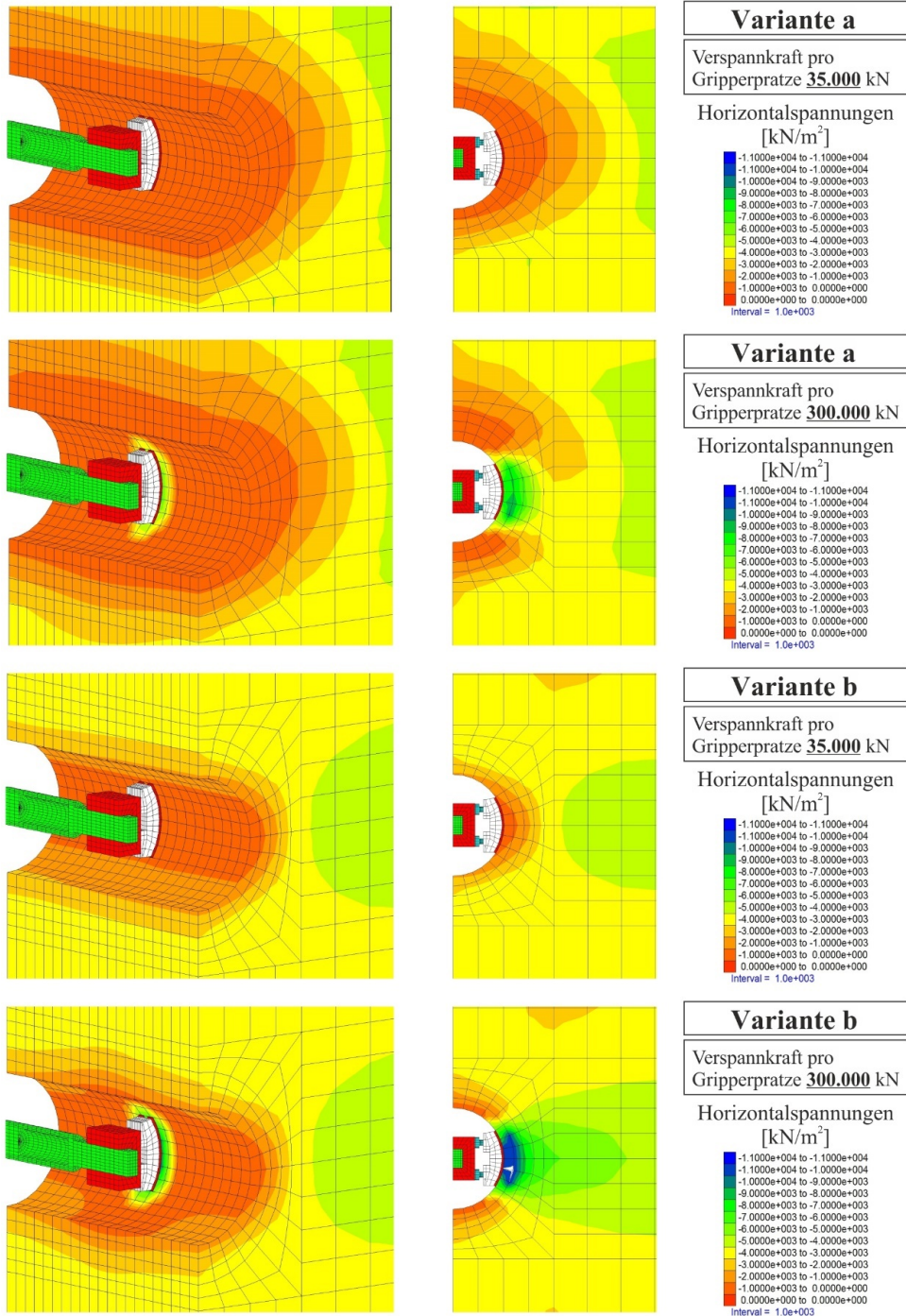


Bild 5: Horizontalspannungen im Ulmenbereich bezogen auf den Abstand zur Ortsbrust für die Variante a, Verspannkraft 35.000 kN, Vortriebskraft Vorschubpressen 0 kN

#### 4 AUSBLICK

Bei den bisher durchgeführten Variationsberechnungen zeigte sich, dass die Verspannkräfte und die Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen, die aufgebracht werden müssen, damit sich ein Kollaps bzw. Bruchversagen im Gebirge ergibt, wesentlich größer sind, als die maximale Verspannkräfte und Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen für welche die Gripper-TBM üblicherweise ausgelegt bzw. dimensioniert sind. Zurzeit werden hierzu weitere numerischen Studien an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt durchgeführt, bei denen ein Trennflächengefüge des Gebirges in den numerischen Berechnungen berücksichtigt wird.

#### 5 LITERATUR / QUELLEN

- [1] R. Galler, Geotechnische Untersuchungen zur Verspannungen offener Tunnelbohrmaschinen, Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Konstruktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben, (1997).
- [2] H. Ehrbar, A. Sala, R. Wick, Vortriebe am Gotthard-Basistunnel – ein Rückblick, Erfahrungen und Lehren aus Sicht des Bauherrn. Swiss Tunnel Congress 2012, (2012).
- [3] G. Brux, TBM-Einsatz am Gotthard-Basistunnel, Sachstandsbericht: Mitte 2007, Tiefbau 12/2007, (2007).
- [4] J. Gollegger, A. Priller, M. Rausch, Einsatz von offenen Tunnelbohrmaschinen bei druckhaftem Gebirge im Gotthard Basistunnel, Geomechanics and Tunnelling 2, (2009).
- [5] J. Schmitt, J. Stahlmann, J. Gattermann, M. Herrenknecht, U. Rehm, Numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM, Tagungsband des 5. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, (2006).
- [6] J. Schmitt, W. Krajewski, H. Fromm, C. Wawrzyniak, Analysen zum Spannungsverformungsverhalten des Gebirges bei einfach verspannten Gripper-Tunnelbohrmaschinen, 9. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, (2014).
- [7] J. Schmitt, T. Edelmann, Bestimmung der Einsatzgrenzen im Fels für die Verspannung von Gripper-Tunnelbohrmaschinen, 10. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, (2016).
- [8] J. Schmitt, O. Monfaredpur, U. Burbaum, R. Hasanpour, Kriterium zur Prognose des Risikos der Verklemmung einer Gripper-TBM, GeoResources Journal, (2017).
- [9] J. Schmitt, O. Monfaredpur, U. Burbaum, R. Hasanpour, Criterion for Predicting the Risk of a Gripper TBM Jamming, GeoResources Journal, (2017).