

# Numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM

J. SCHMITT, J. STAHLMANN, J. GATTERMANN

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

M. HERRENKNECHT, U. REHM

Herrenknecht AG, Schwanau-Allmannsweier

## ZUSAMMENFASSUNG

Im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit kann bei entsprechender Tunnellänge eine einfach verspannte Gripper-TBM eingesetzt werden, deren Vorteil im hohen Automatisierungsgrad liegt. Zur Erfassung des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges sowie der Beanspruchung und des Ausnutzungsgrads einer Gripper-TBM werden z. Z. am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB•TUBS) räumliche numerische Untersuchungen durchgeführt. Im numerischen Modell wurde dabei der komplette Bauablauf einer einfach verspannten Gripper-TBM, wie sie am Südlos Bodio des Gotthard-Basistunnel derzeit im Einsatz ist, unter realistischen Randbedingungen abgebildet und simuliert. Im Rahmen dieses Beitrags wird das numerische Modell sowie die bisherigen Untersuchungsergebnisse der Simulationen vorgestellt.

## 1 Einführung

Im Festgestein mit mittlerer bis hoher Standzeit kann bei entsprechender Tunnellänge eine einfach verspannte Gripper-TBM eingesetzt werden. Ein großer Vorteil des maschinellen Tunnelvortriebs gegenüber einem konventionellen Vortrieb liegt im automatisierten Lösen, Schüttern und Sichern, wodurch die Vortriebsgeschwindigkeit i. d. R. beträchtlich höher ist.

Der Entwurf einer projektspezifischen und somit auf die vorliegenden Anforderungen angepassten TBM samt Nachläufersystem bestimmt hauptsächlich die erzielbaren Vortriebsleistungen und somit die Wirtschaftlichkeit des Projektes. Deshalb sind v. a. die technischen Fragestellungen

- Lösen und Abrasivität des Gesteins
- Verspannbarkeit der TBM
- Gebirgsstandfestigkeit bzw. -gefüge
- Spannungsverformungsverhalten des Gebirges
- Werkzeugmanagement
- Bohrkopfdesign

von besonderer Bedeutung. Zur Beschreibung des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges für den konventionellen Tunnelvortrieb existieren bereits analytische und numerische Ansätze zur Planung des Vortriebs und zur Bemessung und Dimensionierung der Sicherungsmittel, die sich in der Praxis bewährt haben. Ansätze für maschinelle Tunnelvortriebe werden oft vom konventionellen Tunnelvortrieb übertragen, ohne deren Gültigkeit hierfür zu hinterfragen.

Der Vortrieb mit einer offenen Gripper-TBM stellt eine Kombination aus maschinellm vollflächigem Tunnelvortrieb in Verbindung mit Felssicherungsmaßnahmen aus dem konventionellen Vortrieb dar. Um dem hieraus resultierenden spezifischen Spannungsverformungsverhalten Rechnung zu tragen, werden z. Z. am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB•TUBS) räumliche numerische Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde im numerischen Modell der Bauablauf einer einfach verspannten Gripper-TBM, wie sie derzeit am Südlos Bodio des Gotthard-Basistunnel zum Einsatz kommt, unter realistischen Randbedingungen abgebildet und simuliert.

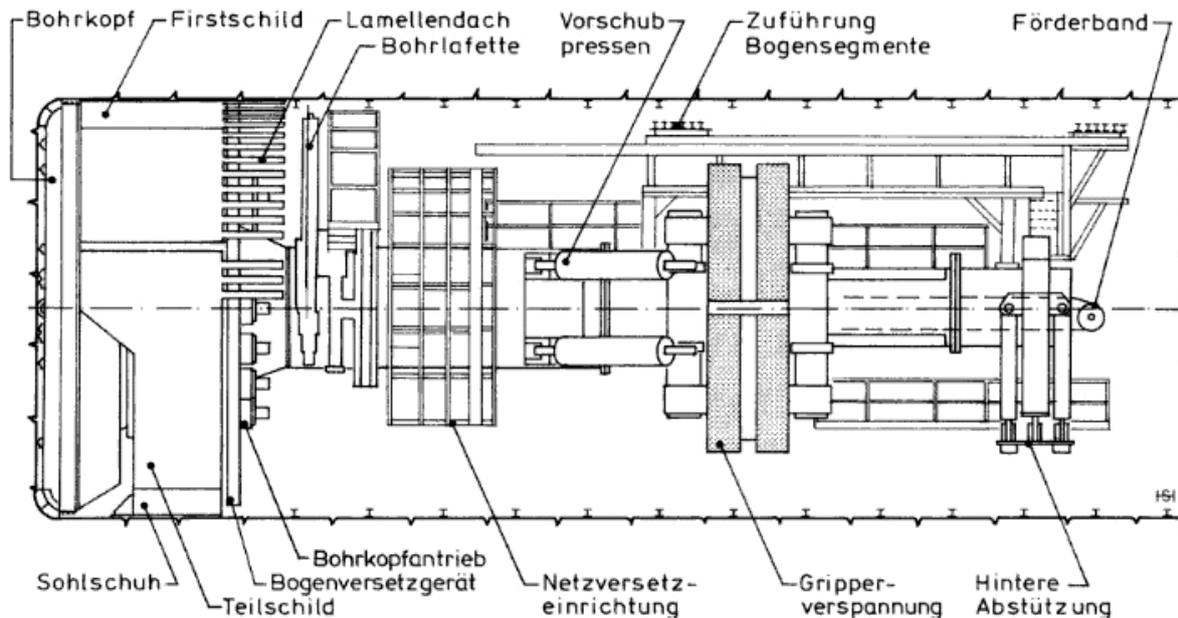


Abb. 1: Gripper-TBM S-167 (Herrenknecht, Lötschberg) mit einfacher Verspannung [1]

Im Rahmen dieses Beitrags werden das numerische Modell sowie die bisherigen Untersuchungsergebnisse der Simulationen vorgestellt.

## 2 Bauablauf und Bautechnik bei einer einfach verspannten Gripper-TBM

Das automatisierte Vortriebssystem gliedert sich in die Auffahrung des Tunnels sowie die für den Vortrieb und die unmittelbar damit zusammenhängenden Arbeiten. Es umfasst somit die Vortriebsmaschine, die Transport- und Versorgungseinrichtungen inkl. der Belüftung sowie die Sicherungsmaßnahmen (Ortsbrust und ausgebrochener Hohlraum) im Bereich der Maschine.

Das Funktionsprinzip der einfach verspannten Gripper-TBM besteht aus dem Bohrprozess, dem Spann- und Abstützsystem, dem Felsicherungssystem sowie der Abraumschutterung.

Die Vortriebsanlage für das Südlos Bodio am Gotthard-Basistunnel besteht aus dem elektrisch angetriebenen Bohrkopf, der mit den Abbauwerkzeugen bestückt ist (Abb. 1). Zusammen mit den Vorschubpressen bildet dieser Bereich ein wesentliches leistungsbestimmendes Teilsystem der TBM.

Der Bohrkopf ist bestückt mit Rollenmeiseln und baut rotierend den Fels an der Ortsbrust ab. Dabei wird in Abhängigkeit des Meiselrollenabstandes und der spezifischen Anpresskraft eine Penetration in den Fels erreicht, die zum Ablösen des Felses an der Ortsbrust führt.

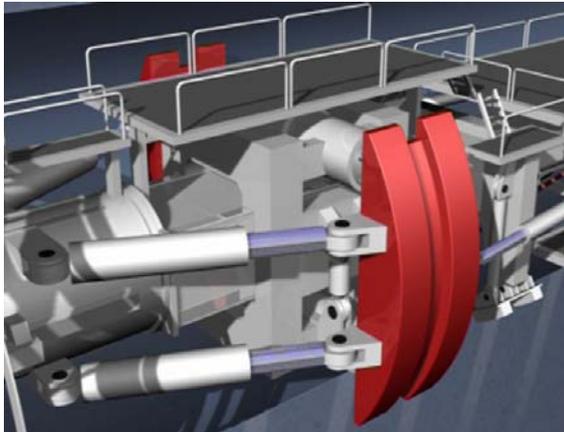
Für die Materialabfuhr befinden sich im Bohrkopf entlang des Umfangs verteilte Räumeröffnungen, die das Bohrklein aufnehmen und durch die Rotation des Bohrkopfes bzw. die Schwerkraft über Förderkanäle und den sog. Muckring ins Zentrum des mittelfrei gelagerten Bohrkopfes fördern. Diese Förderkanäle sind kegelförmige Kammern, welche aus den Leitblechen gebildet werden. Das Material gelangt im Zentrum auf ein Förderband und wird über die Länge der TBM auf das Übergabeband zwischen TBM und Nachläufer gefördert. Von dort erfolgt der Transport des Aushubs entweder direkt über Tunnelbänder oder einen Tunnelzug nach draußen.

Der Frontschild dient als konstruktives Auflager für den Bohrkopf zu dessen Stabilisierung und Verspannung zur Übertragung von Vibrationen während des Bohrprozesses in den Berg. Gleichzeitig dient er als Staubwand, um den Staub und abspalterndes Gestein aus dem Felslöseprozess an der Ortsbrust vom Arbeitsraum des Personals auf der TBM fernzuhalten. Das Firstsegment gibt mit nach hinten auslaufenden Lamellen (Fensterschild) Schutz vor Niederbrüchen.

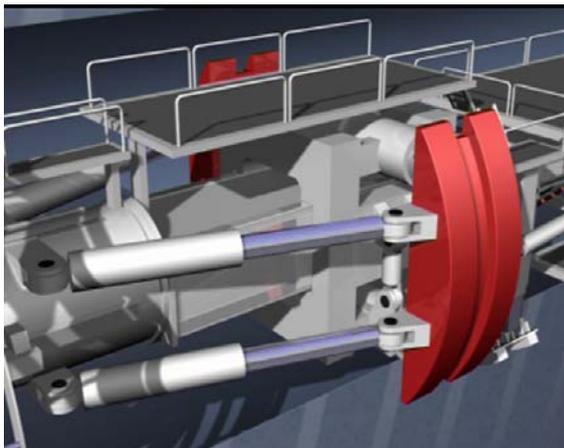
Die Gripper-TBM verspannt sich radial mit den Gripperschuh bzw. Gripperpratzen gegen die Tunnelaibung, um dadurch ein Widerlager für die Anpresskraft des Bohrkopfes zu bekommen. Aus den Reibungs- bzw. Scherkräften zwischen Gripper und Tunnelaibung ergibt sich die Brutto-Vorschubkraft, die über den Hauptrahmen der TBM auf den Bohrkopf übertragen wird. Diese

wird um den Betrag der Reibung am vorderen Spanschild sowie der Schleppkraft der Nachläufer reduziert. Die Verspann- und damit auch die Vorschubkräfte sind maschinentechnisch als auch felsmechanisch begrenzt.

Beginn Bohrhub



Ende Bohrhub



**Abb. 2:** Position der Gripper am Beginn sowie Ende eines Bohrhubs [2]

Der maximale Bohrhub ist abhängig von der Länge der Vorschubzylinder bzw. deren sich während des Bohrhubs ändernder geometrischer Lage. Nach dem Abbohren eines Bohrhubs wird der Bohrvorgang unterbrochen, um die TBM für einen neuen Bohrhub umzusetzen (Abb. 2). Dabei wird der Hauptrahmen der Gripper-TBM mit Hilfe der hinteren hydraulisch ausgefahrenen Stahlstützen abgestützt. Im vorderen Bereich ist er am Bohrkopf angeflanscht, der sich radial gegen die Tunnellaibung verspannt.

Vor dem Umsetzen der Außenkelly um die Länge des folgenden Bohrhubs wird die Gripperverspan-

nung gelöst. Die Nachläufer werden ebenfalls in dieser Phase nachgezogen und entsprechend stabilisiert. Danach werden die Gripperschuhe wieder gegen die Tunnellaibung verspannt und die hintere Abstützung für den nächsten Bohrhub gelöst.

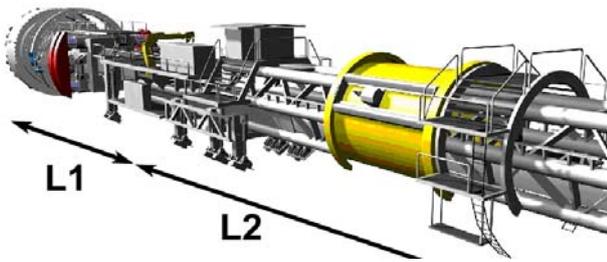
Offene Tunnelbohrmaschinen werden in Gripper-TBM mit einfacher Gripperverspannung sowie mit Doppelverspannsystem unterschieden. Die einfach verspannte Gripper-TBM besitzt nur eine Verspannebene. Bei diesem System sind die geneigten Vorschubzylinder direkt mit der Innenkelly und den Gripperplatten verbunden. Beim Umsetzen sowie beim Bohrprozess ergibt sich immer eine statisch bestimmte Zweipunkt Lagerung durch Frontschild und Gripper bzw. hinterer Abstützung.

Die Vortriebsleistung einer Gripper-TBM hängt in schlechten Gebirgsverhältnissen entscheidend von den Felsicherungsmaßnahmen ab. Aufgrund des Gebirgs-, Quell- oder Auflockerungsdrucks können auch in solidem Fels Gesteinsniederbrüche nicht ausgeschlossen werden. Der Unterschied zum Sprengvortrieb liegt neben der höheren Vortriebsleistung der TBM im schnellen Ausbau. Gemäß der SIA-Norm 198 werden in Bezug auf die jeweils vorliegende Ausbruchsklasse Sicherungsmaßnahmen definiert, die entsprechend der einzelnen Arbeitsbereiche folgendermaßen zu gliedern sind:

- L1 Maschinenbereich
- L2 Nachläuferbereich
- L3 Rückwärtiger Bereich

Innerhalb dieser Bereiche (Abb. 3) werden die Zonen L1, L2 und L3 festgesetzt, in denen die Sicherungsmaßnahmen projektspezifisch erfolgen. Die Vortriebsleistung einer Gripper-TBM hängt entscheidend vom Zeitbedarf für die Felsicherungsmaßnahmen ab. Zur Sicherung werden die aus dem konventionellen Tunnelbau stammenden Sicherungsmittel Felsanker, Netze und Spritzbeton sowie evtl. Sohlübbinge und besondere Stahleinbauten verwendet.

Die einfach verspannte Gripper-TBM ermöglicht bereits kurz hinter dem Bohrkopf im Arbeitsbereich L1 umfassende Felsicherungsmaßnahmen. Für den Stützmitteleinbau werden ein Ringektor, Ankerbohrgeräte und eine Netzversetzereinrichtung vorgesehen. Der Einbau des Spritzbetons erfolgt in Abhängigkeit der Gebirgsqualität entweder im L1-Maschinen oder L2-Nachläuferbereich.



**Abb. 3:** Darstellung der Arbeitsbereiche L1 und L2 (Gotthard-Basistunnel) [2]

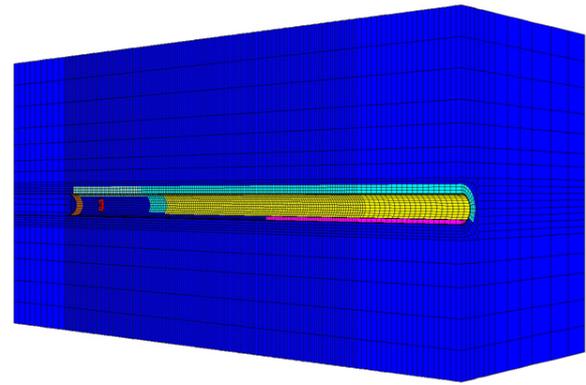
Der Bohrprozess wird darüber hinaus durch eine leistungsfähige Logistik, Entstaubung, Lüftung, Ver- und Entsorgung sowie Messtechnik unterstützt. Des Weiteren sind im Nachläuferbereich ergänzende Felssicherungsmaßnahmen und der Einbau von vorgefertigten Sohlübbingen bzw. einer Ortbetonsohle möglich. Die Nachläufereinheiten können projektspezifisch während eines Bohrhubs abgekoppelt und somit nur beim Umsetzen der TBM nachgezogen werden, um die während des Bohrvorgangs auftretenden Vibrationen nicht auf den Nachläuferbereich zu übertragen.

Beim Konstruktionsprinzip der Auskleidung des Tunnels handelt es sich beim Gotthard-Basistunnel um eine zweischalige Konstruktion mit einer Außenschale aus Spritzbeton, einem Abdichtungssystem und einer Ortbetoninnenschale. Letztere wird als endgültige Sicherungsmaßnahme biegesteifer als die primär zur vorübergehenden Sicherung aufgebraachte, biegeweiche Spritzbetonschale ausgebildet. Daher erfolgt der Einbau erst nach dem weitgehenden Abklingen der mit dem Vortrieb einhergehenden Spannungsumlagerungen mit Hilfe einer Gewölbeschalung, welche auf einem Schalwagen installiert ist.

### 3 Numerisches 3D-Modell

Für die numerischen Berechnungen wurde das explizite Finite Differenzen Programm FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions) verwendet.

In dem numerischen dreidimensionalen Modell wurde der komplette Bauablauf einer einfachverspannten Gripper-TBM mit den Arbeitsbereichen L1 und L2 abgebildet. Die geometrischen Abmessungen, die Material- und Untergrundkennwerte und der Bauablauf entsprechen denen der Gripper-TBM, wie sie derzeit am Südlos Bodio des Gotthard-Basistunnel im Einsatz ist.



**Abb. 4:** Dreidimensionales numerisches Modell eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM

Das numerische Modell (Abb. 4) wurde durch die Annahme einer Spiegelsymmetrie im Tunnelquerschnitt und eines homogenen Untergrundaufbaus zur Reduzierung des Rechenaufwands hinsichtlich der Dauer und Datenauswertung vereinfacht. Der Tunneldurchmesser wurde mit einem Ausbruchsdurchmesser von  $d = 9,58$  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.

Des Weiteren wurde zur Vereinfachung des Modells eine konstante Druckflächenlast auf die gesamte obere Fläche des simulierten Berechnungsausschnitts zur Berücksichtigung einer Überlagerungshöhe von 800 m aufgebracht.

Vom Kopfbereich der Gripper-TBM, der sich aus dem Bohrkopf, Bohrkopfantrieb sowie Schildmantel zusammensetzt, wurde vereinfacht nur der Schildmantel diskret abgebildet (Abb. 5). Die Steifigkeiten und die Wichten des Gesamtsystems Kopfbereich wurden durch den Ansatz einer Ersatzsteifigkeit und einer Ersatzwichte berücksichtigt. Der Anpressdruck an der Ortsbrust wurde durch eine rechteckig verteilte Flächenlast im Modell in entsprechender Größenordnung aus den erfassten Vortriebsdaten angesetzt. Des Weiteren wurde im Kopfbereich der Gripper-TBM in der Modellierung ein Überschneidung von 5 cm abgebildet.

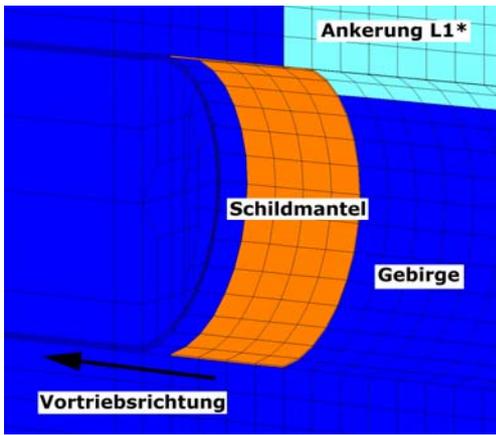


Abb. 5: Abbildung des Kopfbereiches der Gripper-TBM im numerischen Modell

Im Bereich der Gripperverspannung wurden die Gripperpratzen diskret modelliert (Abb. 6) und die Vortriebspresenkräfte sowie die Verspannkräfte durch Ansatz von Flächenlasten in den Einleitungsbereichen im numerischen Modell simuliert (Abb. 7).

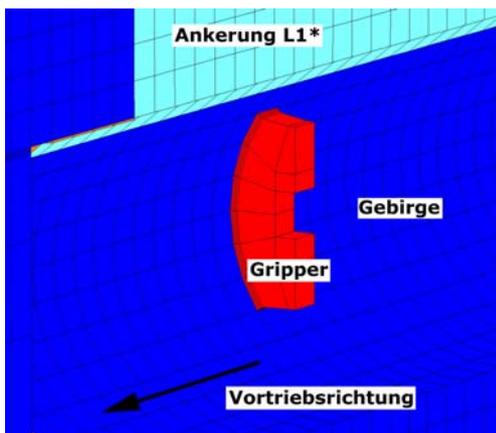


Abb. 6: Abbildung Bereich Gripper im numerischen Modell

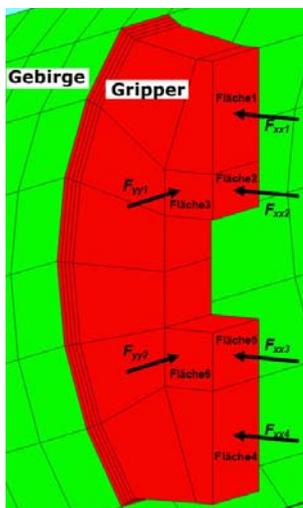


Abb. 7: Ansatz der Vortriebspresenkräfte sowie der Verspannkräfte im numerischen Modell

Im Arbeitsbereich L1 wurde davon ausgegangen, dass nur eine Ankerung zur Sicherung notwendig ist. Die Ankerung in den Arbeitsbereichen L1 und L2 wurde durch eine Ersatzkohäsion nach dem Ansatz von [3] bzw. [4] berücksichtigt (Abb. 8).

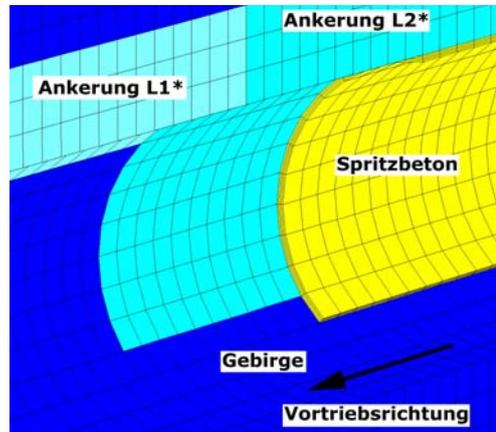


Abb. 8: Abbildung des Kopfbereiches der Gripper-TBM im numerischen Modell

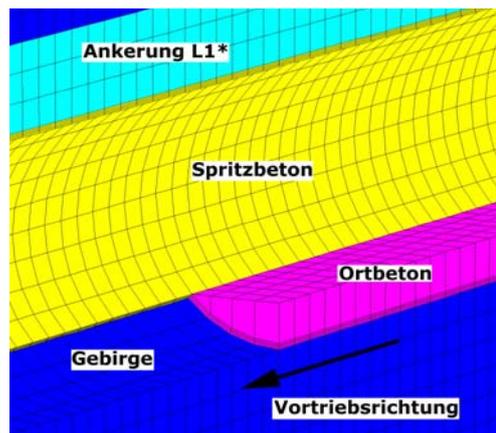


Abb. 9: Abbildung des Kopfbereiches der Gripper-TBM im numerischen Modell

Die Spritzbetonsicherung wurde mit einer Dicke von  $d = 15 \text{ cm}$  berücksichtigt (Abb. 8). Ebenso wurde die Ortbetonsohle im numerischen Modell abgebildet (Abb. 9).

Der Untergrund wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb mit nicht assoziierter Fließregel simuliert. In Tab. 1a und Tab. 1b sind die verwendeten Materialparameter für den Untergrund dargestellt, die für eine Variantenuntersuchung verwendet wurden. Dabei stehen die Kennwerte in Tab. 1a für einen sehr steifen und standfesten Fels. Dagegen sind in Tab. 1b die Kennwerte für einen weichen und gering standfesten Fels angegeben.

**Tab. 1a:** Materialparameter Untergrund Variante 1a (steifer und standfester Fels)

Elastizitätsmodul [MN/m <sup>2</sup> ]	E = 10.000
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,2$
Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma = 26$
Reibungswinkel [°]	$\varphi' = 34$
Dilatanzwinkel [°]	$\psi' = 0$
Kohäsion [MN/m <sup>2</sup> ]	$c' = 2$

**Tab. 1b:** Materialparameter Untergrund Variante 1b (weicher und gering standfester Fels)

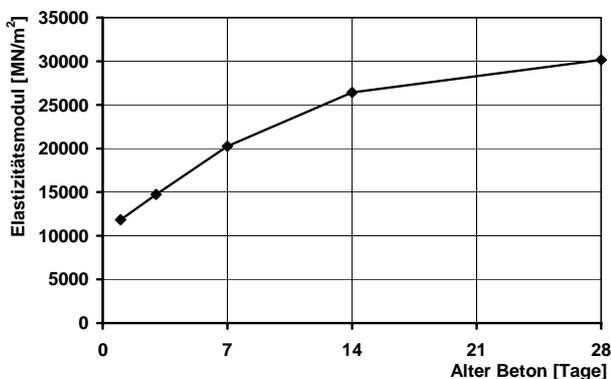
Elastizitätsmodul [MN/m <sup>2</sup> ]	E = 4.000
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,2$
Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma = 26$
Reibungswinkel [°]	$\varphi' = 30$
Dilatanzwinkel [°]	$\psi' = 0$
Kohäsion [MN/m <sup>2</sup> ]	$c' = 0,5$

**Tab. 2:** Schildmantel (Stahl)

Elastizitätsmodul [MN/m <sup>2</sup> ]	E = 210.000
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,3$
Ersatzwichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{\text{Ersatz}} = 650$

**Tab. 3:** Gripper (Stahl)

Elastizitätsmodul [MN/m <sup>2</sup> ]	E = 210.000
Querdehnzahl [-]	$\nu = 0,3$
Wichte [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma = 0$



**Abb. 10:** Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls für einen Beton B25

Der Schildmantel und die Gripper wurden mit linearelastischen Materialverhalten, mit den in Tab. 2 und Tab. 3 angegebenen Materialkennwerten, angesetzt.

Ebenso wie der Schildmantel und die Gripper wurden der Spritzbeton und die Ortbetonsohle durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. Der Elastizitätsmodul des Spritzbetons und der Ortbetonsohle wurde in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die einzelnen Berechnungslastfälle angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Betons zu simulieren. Dazu wurde die Druckfestigkeit in den Elastizitätsmodul (Abb. 10) entsprechend [5] umgerechnet und in den Berechnungen angesetzt. Für den Erhärtungsvorgang wurde von einer durchschnittlichen Vortriebsleistung von 13 m/Tag 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.

Die räumlichen Berechnungen wurden als step-by-step Analyse durchgeführt. Dazu wurden 139 Lastfälle bzw. Bauzustände abgebildet. Der Primärzustand wurde in zwei Bauzustände unterteilt. Im ersten Lastfall wurde der Primärspannungszustand mit einer Überdeckung von 57,5 m, die sich aus den gewählten Modellabmessungen ergibt, berechnet. In dem darauf folgenden Lastfall wurde dann eine gleichmäßig verteilte Flächenlast auf die Oberkante des numerischen Modells aufgebracht, um eine Überdeckung von 800 m zu simulieren. Um die Berechnungsdauer zu verkürzen wurde im dritten Lastfall ein Bauzustand abgebildet, in dem der Tunnelvortrieb sich bereits in einem fortgeschrittenen Zustand befindet, das heißt alle innerhalb des Tunnelquerschnitts liegenden Zonen werden bis zur aktuellen Position der Ortsbrust entfernt bzw. es hat ein Vortrieb von 58 m stattgefunden. Dementsprechend sind alle bereits eingebauten Stützmittel der Ankerungsbereiche L1 sowie L2 und der Schildmantel durch Zuweisung der Materialeigenschaften aktiviert. In den anschließenden Bauzuständen wurden danach insgesamt 68 Bohrhübe berechnet. Dabei wurde jeder Bohrhub in zwei Bauzustände bzw. Lastfälle unterteilt. Im ersten Bauzustand für einen Bohrhub werden die Zonen für den abgebildeten Gripper aktiviert und die Vorschub- und Verspanndrucke angesetzt. Des Weiteren wird mit jedem Bohrhub der Einbau der Ankerung in den Bereichen L1 und L2 abgebildet. Im zweiten Bauzustand für einen Bohrhub wird das Umsetzen der Gripper simuliert, indem die Zonen des Grippers sowie der Verspann- und Vorschubdruck deaktiviert wird. Nach jeweils vier

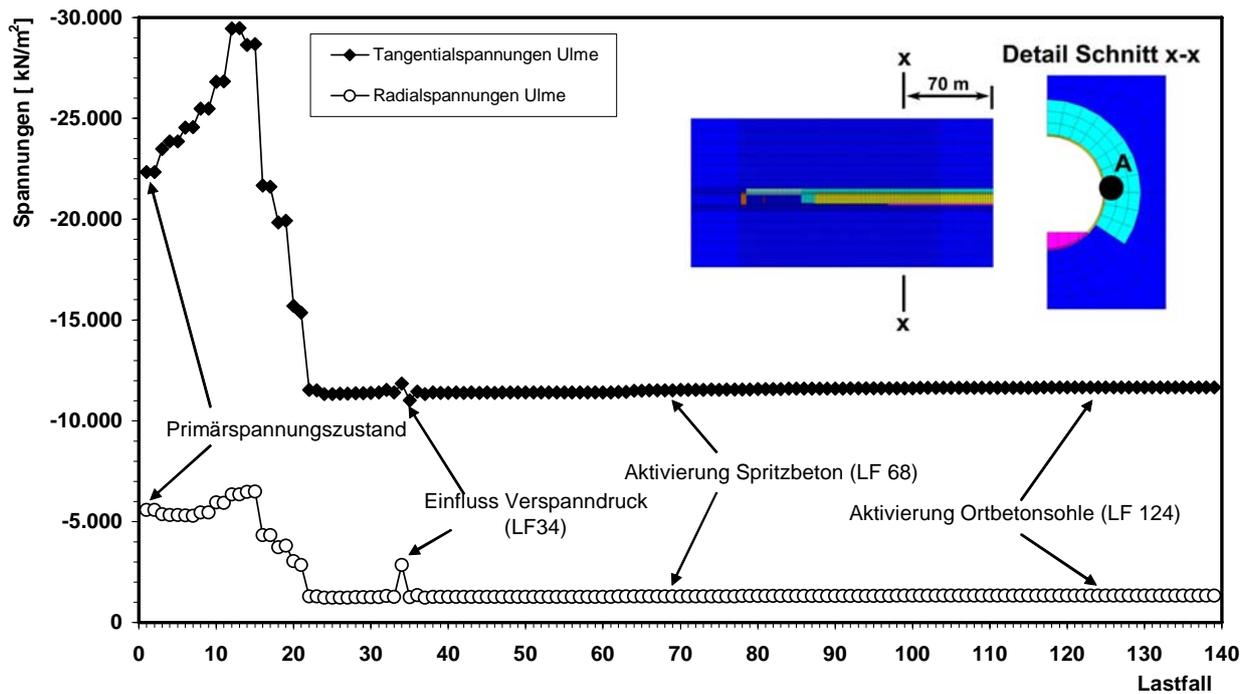


Abb. 11: Tangential- und Radialspannungen im Bereich der Ulme in Abhängigkeit vom Baufortschritt für den Schnitt x-x und Materialparameter Untergrund Variante 1a

Bohrhüben wurde ein 8 m langer Spritzbetonabschnitt aktiviert, so dass 17 Spritzbetonabschnitte simuliert wurden. Im 29. Bohrhüben wurde der erste Ortbetonabschnitt im Sohlbereich eingebaut, so dass damit insgesamt 10 Abschnitte mit Ortbetonsohle berücksichtigt wurden.

## 6 Ergebnisse

Bei den bisherigen Simulationen wurde der Verspanndruck, der durch die Gripper auf das Gebirge wirkt, variiert. Dabei wurden Verspanndrucke angesetzt, die zwischen 25.820 bis 33.580 kN/m<sup>2</sup> lagen. Im Rahmen des Beitrags werden nur die Ergebnisse für einen angesetzten Verspanndruck von 29.700 kN/m<sup>2</sup> dargestellt. Ebenso wurden Variationsberechnungen durchgeführt, in denen der Einfluss durch die Abbildung bzw. Kennwerte des Untergrundes untersucht wurde.

### 6.1 Spannungen

Zur Analyse der Umlagerung der Gebirgsspannungen bei einem Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM wurden die Radial- und Tangentialspannungen im Bereich der Ulme in einem Schnitt x-x betrachtet (Abb. 11). In dem Diagramm der Tangential- und Radialspannungen aufgetragen über dem Baufortschritt, ist zunächst

zu erkennen, dass die Spannungen bis Lastfall 15 ansteigen.

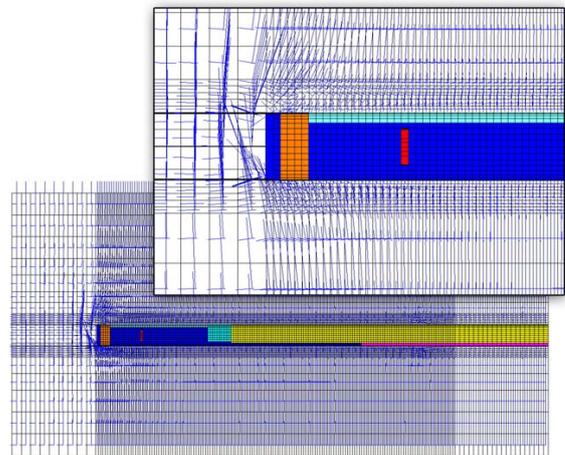


Abb. 12: Spannungstrajektorien im Längsschnitt zum Tunnelvortrieb

Danach fallen die Spannungen sehr stark bis Lastfall 22 ab und bleiben dann relativ konstant auf einem Spannungsniveau, welches nur kurz durch den Verspanndruck der Gripper im Lastfall 34 gestört wird. Dies bedeutet, dass die Spannungsumlagerungen im Gebirge bereits vor dem Ansatz der Gripper und vor dem Einbau der Spritzbetonsicherung stattgefunden und daher keinen nennens-

werten Einfluss auf die Spritzbetonschale und die Gripper haben.

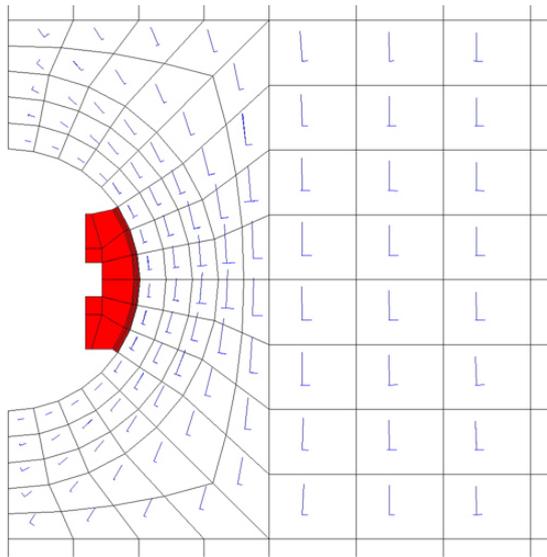


Abb. 13: Spannungstrajektorien im Schnitt x-x für den Lastfall 34

Betrachtet man die Verteilung der Spannungstrajektorien im Längsschnitt zum Tunnelvortrieb ist auch hier zu erkennen, dass die Spannungen nur im Bereich des Schildmantels und kurz dahinter gestört und im Bereich der Gripper nicht mehr nennenswert beeinflusst werden (Abb. 12). Im Bereich

der Gripper hat sich dann bereits ein Gebirgstragring ausgebildet (Abb. 13).

## 6.2 Verschiebungen

Für die Beurteilung der Verschiebungen im Gebirge wurden ebenso wie für die Spannungen die Verschiebungen im Bereich der Ulme für den Schnitt x-x in Abhängigkeit von Baufortschritt in einem Diagramm aufgetragen (Abb. 14). Bei den Horizontalverschiebungen im Gebirge ist zu erkennen, dass bis zum Lastfall 15 der Bereich der Ulme ins Gebirge gepresst wird. Danach verschiebt sich die Ulme, nachdem sie nicht mehr durch den Schildmantel gestützt ist, in den Tunnelquerschnitt. Analog zu den Spannungen ist auch hier zu beobachten, dass die Horizontalverschiebungen in der Ulme mit Lastfall 22 abgeklungen sind und eine kurzzeitige Veränderung nur im Bereich des Lastfall 34, in dem der Verspanndruck der Gripper aufgebracht wird, stattfindet. Für die Vertikalverschiebungen im Bereich der Ulme ist festzustellen, dass dort Setzungen auftreten, die mit zunehmendem Baufortschritt in kleinen Raten anwachsen. Vergleicht man die Verschiebungen für die Variation der Kennwerte für den Untergrund, so ergibt sich für den steifen und standfesten Fels eine maximale horizontale Ulmenverschiebung von ca. 7 mm. Dagegen beträgt die horizontale Ulmenverschiebung für den weichen und gering standfesten Fels maximal ca. 200 mm. Dies

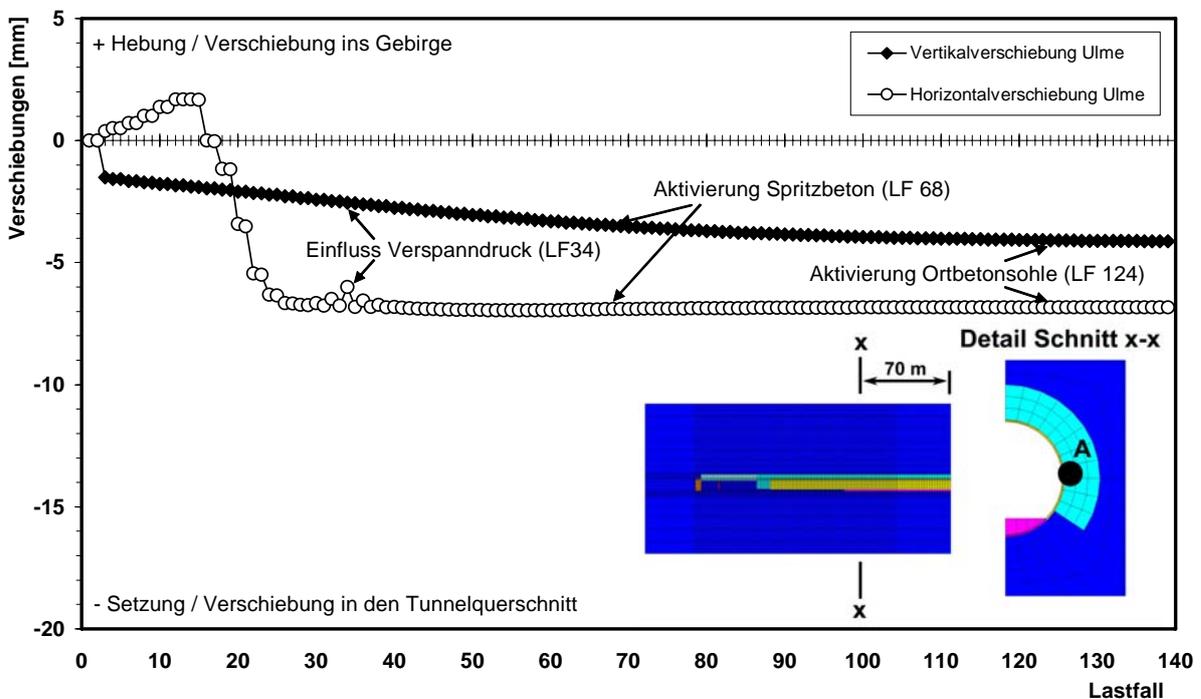


Abb. 14: Vertikal- und Horizontalverschiebungen im Bereich der Ulme in Abhängigkeit vom Baufortschritt für den Schnitt x-x und Materialparameter Untergrund Variante 1a

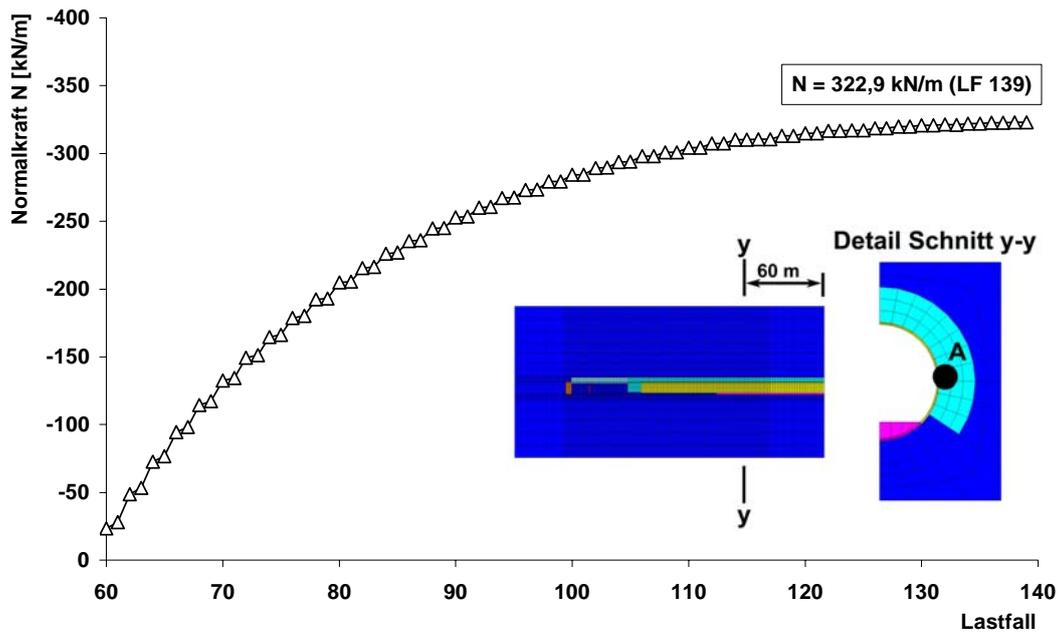


Abb. 15: Entwicklung der Normalkraft im Bereich der Ulme für den Schnitt y-y und Materialparameter Untergrund Variante 1a

ist natürlich zum einen auf den geringeren bzw. weicheren E-Modul zurückzuführen und zum anderen ergeben sich durch die geringere Scherfestigkeit wesentlich größere plastische Verschiebungsanteile.

### 6.3 Schnittkräfte der Spritzbetonschale

Die Umlagerung der Gebirgsspannungen, die größtenteils vor dem Einbau der Spritzbetonschale stattgefunden hat, zeigt sich in der Größe der Schnittkräfte. Diese betragen im Bereich der Ulme für die Variante steifer standfester Fels für die Normalkraft ca. 323 kN/m und für das Moment ca. 0,5 kNm/m (Abb. 15). Führt man zum Vergleich eine zweidimensionale Berechnung durch, so ergibt sich, dass das Gebirge ca. 99 % der Lasten abtragen muss. Dagegen muss die Spritzbetonschale nur ca. 1 % der Gebirgslasten tragen. Ebenso zeigt die Variante mit den Kennwerten des weichen geringstandfesten Fels, dass die Spritzbetonschale nur einen sehr geringen Anteil mit ca. 3 % der Gebirgslasten abtragen muss.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Untersuchung des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges sowie der Beanspruchung und des Ausnutzungsgrads bei einem Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM werden z. Z. am Institut für

Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig (IGB·TUBS) räumliche numerische Berechnungen durchgeführt. Dabei wurde in einem numerischen Modell der komplette Bauablauf bei einer einfach verspannten Gripper-TBM unter realistischen Randbedingungen abgebildet und simuliert. Im Rahmen dieses Beitrages wurden das Berechnungsmodell und erste Berechnungsergebnisse dargestellt.

Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass bei den gewählten Berechnungsparametern ein Großteil der Gebirgsspannungen bereits vor dem Ansatz der Verspanndrücke der Gripper und vor Einbau der Spritzbetonschale umgelagert ist. Ebenso zeigen die Berechnungsergebnisse, dass die Belastung des Gebirges durch den Verspanndruck der Gripper nur lokal begrenzt ist. Durch die schon frühe Umlagerung der Gebirgsspannungen ergibt sich für die Spritzbetonschale nur eine sehr geringe Beanspruchung.

In weiteren Berechnungen sollen die Einflüsse untersucht werden, die sich aus der Variation der stofflichen Parameter zur Beschreibung des Untergrundes z. B. E-Modul, Querdehnzahl, Scherfestigkeiten sowie aus der Variation der geometrischen Parameter z. B. Tunneldurchmesser und Überlagerungshöhe ergeben.

Des Weiteren sollen in einer der nächsten Stufe numerische Simulationen durchgeführt werden, bei denen das anisotrope Materialverhalten von Festgestein durch die Anwendung entsprechender Stoffgesetze berücksichtigt wird.

## Literatur

- [1] Maidl, B.; Schmid, L.; Ritz, W.; Herrenknecht, M.: Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein, Ernst & Sohn Verlag, 2001
- [2] Herrenknecht AG: Firmenunterlagen zur Gripper-TBM des Gotthard-Basistunnels, Firmenpräsentation, Informationsmaterial, (26.02.2005)
- [3] Stroh, D.; Huchfeld, J.; Egger, P.: Vergleich von NÖT-Vortriebstechniken beim Großtunnelbau. Baugrundtagung, Berlin, 1996.
- [4] Spang, K.; Egger, P.: Tragverhalten und Bemessung vollvermörtelter, schlaffer Anker im Diskontinuum. Felsbau, Nr. 4, 1998
- [5] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 326 ff., S 393 ff.
- [6] Schmitt, J.; Fritsch, M.; Kuhn, C.; Stahlmann, J.: 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, 2003
- [7] Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Schmitt, J.: 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, ISBN 3-924813-55-8, S. 305-316, 2004
- [8] Schmitt, J.; Stahlmann, J.; Gattermann, J.: 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, ISBN 3-931396-74-6, 2005

- [9] Schmitt, J.; Fritsch, M.; Gattermann, J.; Stahlmann, J.: 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, ISBN 90 5966 040 4, 2005

## Autoren:

Dipl.-Ing. J. Schmitt  
Prof. Dr.-Ing. J. Stahlmann  
Akad. Oberrat Dr.-Ing. J. Gattermann  
Institut für Grundbau und Bodenmechanik  
Technische Universität Braunschweig  
Gaußstraße 2  
38106 Braunschweig  
Tel.: (0531) 391-2730  
E-Mail: igb@tu-bs.de