

Bestimmung der Einsatzgrenzen im Fels für die Verspannung von Gripper-Tunnelbohrmaschinen

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt
Hochschule Darmstadt

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Edelmann
Herrenknecht AG, Schwanau

Zusammenfassung

Bei einem Vortrieb mit einer einfach verspannten Tunnelbohrmaschine ohne Schild (Gripper-TBM) werden im Bereich der Gripperverspannung hohe Kräfte in das Gebirge eingeleitet, um die Vortriebskräfte der TBM zu ermöglichen, die dazu benötigt werden, den Fels an der Ortsbrust zu lösen. Durch zu hohe Verspannkräfte kann es zum Plastifizieren des Gebirges bzw. Brucherscheinungen im Gebirge kommen. Durch diese Schädigung des Gebirges unterhalb der Gripperplatten werden der Tunnelvortrieb und der nachträgliche Ausbau erschwert. Im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für die Praxis“ wird derzeit das Forschungsvorhaben PlastTBMGripp durchgeföhrt. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mittels numerischer Sensitivitätsstudien die Einsatzgrenzen von einfach verspannten Gripper-TBM hinsichtlich der Plastifizierung des Gebirges im Bereich der Gripper-Verspannung zu analysieren und praxistaugliche Bemessungshilfen für einen sicheren und wirtschaftlichen Tunnelvortrieb zu entwickeln. Im Rahmen des Beitrages werden erste Ergebnisse des Forschungsprojektes PlastTBMGripp vorgestellt und erläutert.

1. Einführung

Der Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM ist geprägt durch die unterschiedlichen Bereiche, in denen das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges durch den Vortrieb beeinflusst wird.

Im Bereich des Bohrkopfes wird die Struktur des Gebirges durch den Ausbruch der Tunnelröhre gestört. Im Bereich der Gripperverspannung werden hohe Kräfte in das Gebirge eingeleitet, die notwendig sind, damit der Bohrkopf in der Lage ist, den Fels an der Ortsbrust zu lösen. Hierbei kann es durch zu hohe Verspannkräfte zum Plastifizieren des Gebirges bzw. Brucherscheinungen im Gebirge kommen (s. Bild 1), wodurch ein sicheres Einleiten der Verspannkräfte im Gebirge nicht mehr gewährleistet ist und somit ein erhöhtes Risiko für das Personal und die Maschine des Tunnelvortriebs existiert. Die endgültige Sicherung des Hohlraums mit Spritzbeton erfolgt erst relativ spät im hinteren Bereich der Gripper-TBM, so dass sich bereits vor dem Einbau der Spritzbetonsicherung die Spannungen im Gebirge umlagern können und es so zu einer verringerten Belastung der Spritzbetonschale kommt.

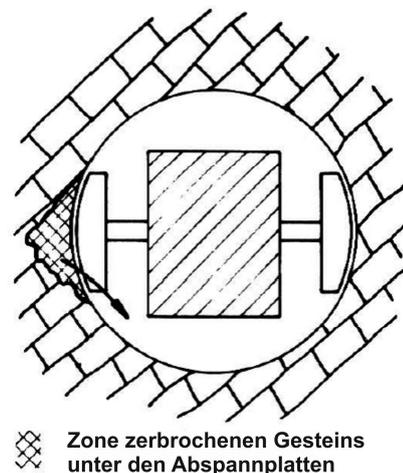


Bild 1: Horizontale Verspannung von Vollschnittmaschinen / Zone zerbrochenen Gesteins unter den Abspannplatten [10]

Bei der Gripperverspannung einer Gripper-TBM treten entsprechend [1] drei grundsätzlich zu unterscheidende Probleme bzw. Risiken (s. a. Bild 2 und Bild 3) auf:



Bild 2: Niederbruch aufgrund Spannungsumlagerungen durch die Gripperverspannung beim Vortrieb des Druckstollen Amsteg (jeweils Blick in Richtung Bohrkopf der Gripper-TBM: links: Ausbruchstelle mit Felssicherung im Vortriebsbereich der Maschine / rechts: Detail der Ausbruchstelle, $t_{\max} \approx 0,7 \text{ m}$) [9]

- In Gebirgen mit zu geringer Gesteinsfestigkeit bieten die weichen Gesteine kein Widerlager für die Gripperverspannung, so dass hier konstruktive Maßnahmen, z. B. eine Vergrößerung der Verspannungsfläche, ergriffen werden müssen.
- In sehr harten, als schwer bohrbar einzustufenden Gebirgen führen hohe Verspannkräfte zu Spannungsumlagerungen im Gebirge, die Bergschläge auslösen oder wesentlich verstärken können.
- Durch wechselnde Belastung der Hohraumlaibung durch die schrittweise verschobene Verspanneinheit ergeben sich im klüftigen Gebirge Verschiebungen der Klüftkörper, die zu Verbrüchen im Maschinenbereich führen können.

unter Berücksichtigung des Spannungsverformungsverhaltens des Gebirges wurden bereits umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. [4]). Ebenso wurden Analysen zur Umlagerung der Spannungen im Gebirge bzgl. der verringerten Belastung der endgültigen Spritzbetonschale ausgeführt (vgl. [3]). Für die Kräfteinleitungsbereiche der Gripperverspannung, bei denen die zuvor genannten Probleme bzw. Risiken a) bis c) auftreten, stehen solche Untersuchungen noch aus bzw. ist zu klären, wie hierfür die Einsatzgrenzen für einen sicheren und wirtschaftlichen Vortrieb definiert werden können. Dafür ist neben der lokalen Betrachtung der Gripperverspannung insbesondere für die Punkte b) und c) eine großmaßstäbliche Betrachtung der Einflüsse auf das Gebirge notwendig.

Zum Risiko des Verklemmens des Bohrkopfes beim Vortrieb mit einer einfach verspannten Gripper-TBM

Untersuchungen zur Verspannung offener Tunnel-

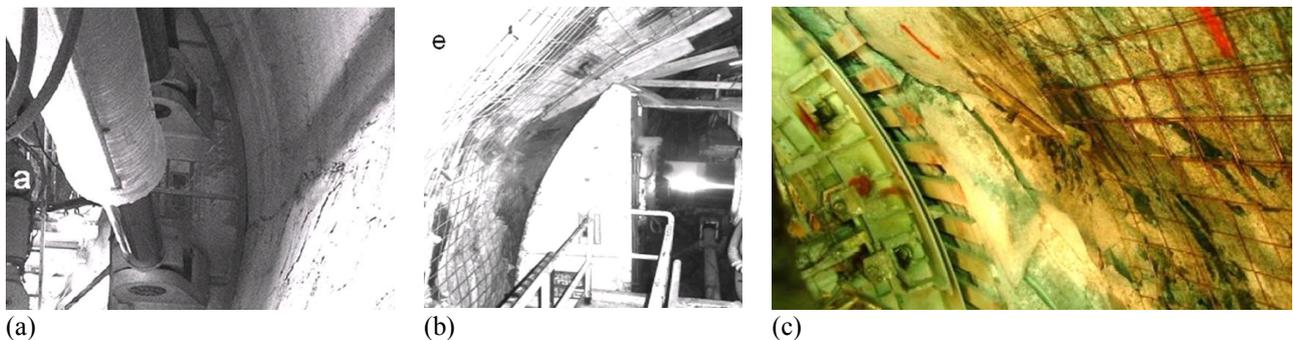


Bild 3: (a) Increasing levels of brittle spalling and operational difficulty / (b) severe operational issues (gripping) associated with metre scale overbreak / (c) Spalling and energetic slab generation in gneiss behind TBM shield. Löttschberg Base Tunnel [15]

Kenngröße	Variante a	Variante b	Variante c	Variante d
Wichte Gebirge γ [kN/m ³]	26	26	26	26
E-Modul Gebirge E_{Gebirge} [MN/m ²]	1.000	1.000	1.000	500
Querdehnzahl μ [-]	0,2	0,2	0,2	0,2
Reibungswinkel Gebirge φ_{Gebirge} [°]	35	35	35	35
Kohäsion Gebirge c_{Gebirge} [kN/m ²]	100	500	1.000	500
Überlagerungshöhe $h_{\text{Ü}}$ [m]	400	400	400	400
Spritzbetondicke d_s [cm]	15	15	15	15

Tab. 1: Übersicht Kenngrößen Variante a bis d

nen ein isotropes Materialverhalten des Gebirges berücksichtigt wurde, vereinfacht. Als Tunneldurchmesser wurde ein Ausbruchsdurchmesser von $d = 9,5$ m angesetzt. Die Abmessungen des Berechnungsmodells wurden anhand von Voruntersuchungen mit einem seitlichen Abstand von ca. 77 m entsprechend $8d$, einem Abstand von ca. 48 m entsprechend $5d$ vom unteren Rand und einem Abstand von ca. 57,5 m entsprechend $6d$ vom oberen Rand gewählt. Die Gesamtlänge des Berechnungsmodells beträgt 230 m, in dem eine Vortriebsstrecke von 190 m abgebildet wurde. Im Kopfbereich der Gripper-TBM wurden der Bohrkopf, der Bohrkopftrieb sowie der Firstschild/ Teil-

schild/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 Kontaktelementen gesteuert. Die Spritzbetonsicherung wurde mit einer Dicke von $d = 15$ cm

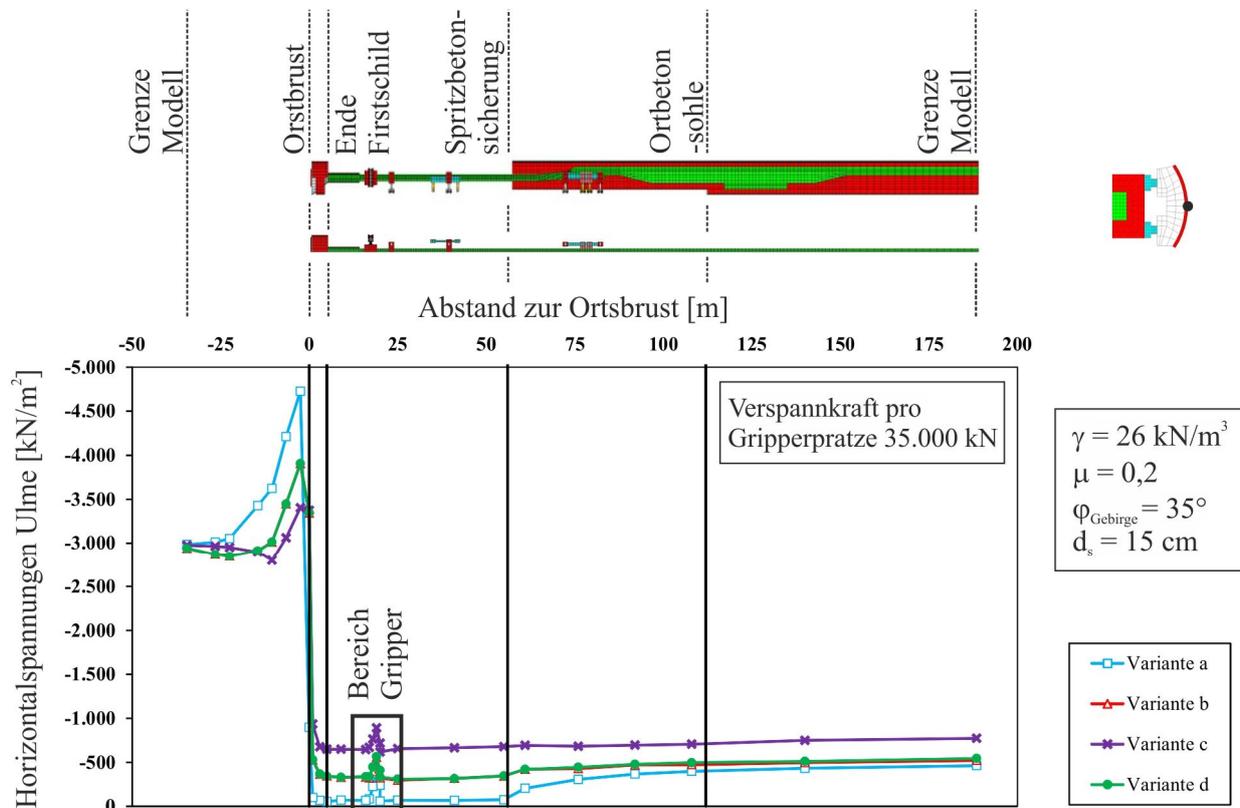


Bild 5: Horizontalspannungen im Ulmenbereich bezogen auf den Abstand zur Ortsbrust für die Varianten a bis d

bzw. 20 cm berücksichtigt. Ebenso wurde die Ortbetonsole 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.

Der Untergrund wurde mit einem linearelastisch-idealplastischen Stoffgesetz mit dem Fließkriterium nach Mohr-Coulomb mit nicht assoziierter Fließregel simuliert. Die Stahlbauteile der Gripper-TBM wurden mit linearelastischen Materialverhalten sowie bereichsweise angesetzten Ersatzsteifigkeiten und Ersatzwichten erfasst. Ebenso wurden der Spritzbeton und die Ortbetonsole durch ein linearelastisches Materialverhalten beschrieben. Der Elastizitätsmodul des Spritzbetons und der Ortbetonsole wurde in Abhängigkeit des Baufortschritts und einer vorgegebenen Vortriebsgeschwindigkeit für die Simulation des Baufortschritts angepasst, um so die zeitliche Erhärtung des Betons zu simulieren. Für den Erhärtungsvorgang wurde von einer durchschnittlichen Vortriebsleistung von 13 m/Tag in den ersten Studien ausgegangen. Die Spritzbetonschale und die Ortbetonsole wurden mit einer Querdehnzahl von $\nu = 0,2$ und einer Wichte von $\gamma = 24 \text{ kN/m}^2$ berücksichtigt.

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

Im Rahmen des Beitrags werden anhand von vier Variationsberechnungen auszugsweise erste Ergebnisse dargestellt und erläutert. In Tabelle 1 sind für die vier Varianten a bis d die angesetzten Kenngrößen aufgeführt, die im Rahmen des Forschungsprojektes PlastTBMGripp variert wurden. Variante a bis c sind hierbei untereinander vergleichbar. Bei diesen Varianten wurde die Größe der Kohäsion des Gebirges variiert, um daraus den Einfluss der Kohäsion bzw. der Scherfestigkeiten des Gebirges auf das Spannungsverformungsverhalten des Gebirges durch die Einleitung der Verspannkräfte in das Gebirge zu beurteilen. Die Variante d ist mit der Variante b vergleichbar. Hier unterscheiden sich die beiden Varianten hinsichtlich der Größe des E-Moduls des Gebirges.

In den Sensitivitätsstudien wurden ebenso die Verspannkräfte sowie die Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen, die im Bereich der Gripperverspannung ins Gebirge eingeleitet werden, variiert bzw. deren Einfluss untersucht. Im Vorfeld wurden hierzu verschiedene bereits aufgeführte Tunnelbauprojekte

hinsichtlich der zuvor genannten Kraftgrößen ausgewertet und analysiert. Für die Verspannkräfte 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. Für die hier vorgestellten Varianten a bis d wurden auf Grundlage dieses Wertes die Verspannkräfte variiert. Der Einfluss der Vortriebskräfte aus den Vorschubpressen wurde bei den Varianten a bis d nicht variiert bzw. nicht berücksichtigt und werden daher im vorliegenden Beitrag nicht weiter erläutert.

In Bild 5 sind die Horizontalspannungen des simulierten Gebirges, die in Vortriebsrichtung im Bereich der Ulme berechnet wurden für die Varianten a bis d abgebildet. Hier 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 auf einen fast konstanten Wert. Im Bereich der Gripperverspannung, in dem die Verspannkräfte ins Gebirge eingetragen werden, kommt es dann zu einer entsprechenden Vergrößerung der Horizontalspannungen. Nach dem Umsetzen der Gripperverspannung ist im nachfolgenden Bereich wieder eine Reduktion der Horizontalspannungen in der Ulme feststellbar. Beim Einbau der Spritzbetonsicherung und der Ortbetonsole erhöhen sich die Horizontalspannungen in der Ulme wieder leicht. Sehr deutlich wird im Bild 5, dass der Spannungszustand, der im Bereich der Gripperverspannung wirkt, davon abhängig ist, wie sich die Spannungen im Gebirge durch den Vortrieb umlagern. Daraus kann geschlossen 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 6 zeigt die Spannungsverteilung der Horizontalspannungen im simulierten Gebirge in einer räumlichen sowie in einem Schnitt quer zur Vortriebsrichtung im Bereich der Gripperverspannung für die Variante a und b für eine Verspannkraft von 35.000 kN und 300.000 kN. 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

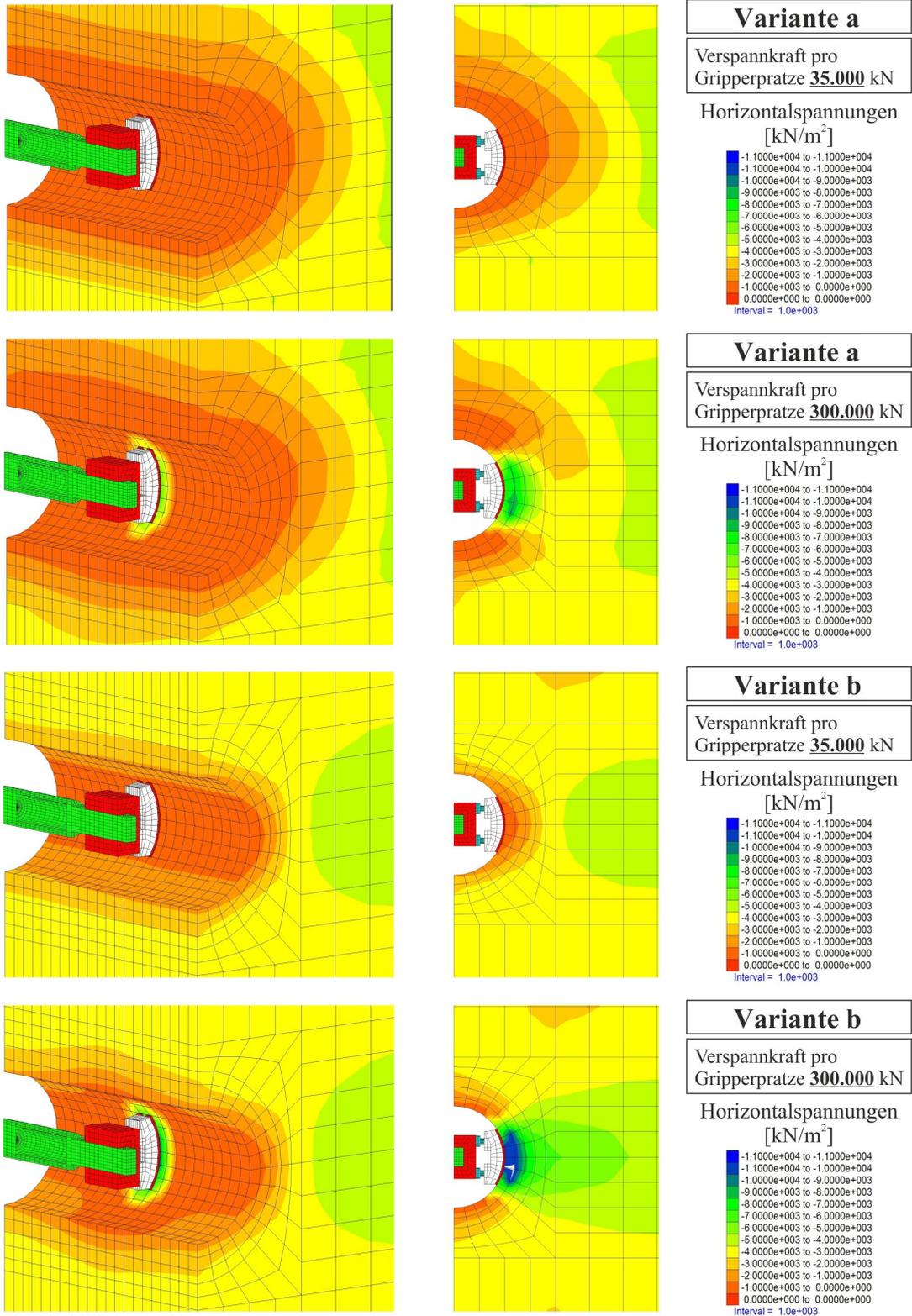
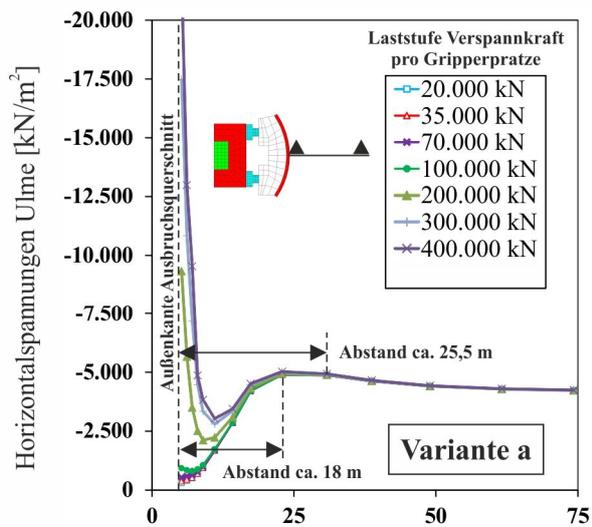


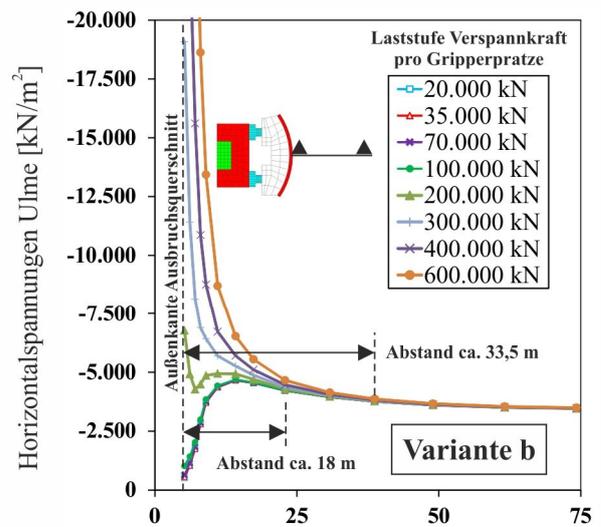
Bild 6: Horizontalspannungsverlauf im Bereich der Gripperverspannung

die Variante b bei einer Verspannkraft von 300.000 kN zeigt sich in Bild 6, dass die Einleitung der Verspannkraft einen lokal beschränkten Bereich im Gebirge aktiviert.

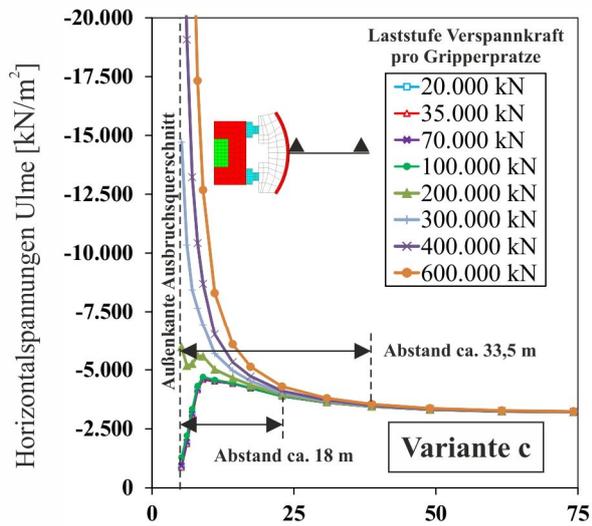
In Bild 7 ist die Entwicklung der Horizontalspannungen im Bereich der Ulme als Schnitt quer zur Vortriebsrichtung in Abhängigkeit von verschiedenen Laststufen für die Verspannkraft veranschaulicht. Für die Variante a ist hierbei nur eine Laststufe von



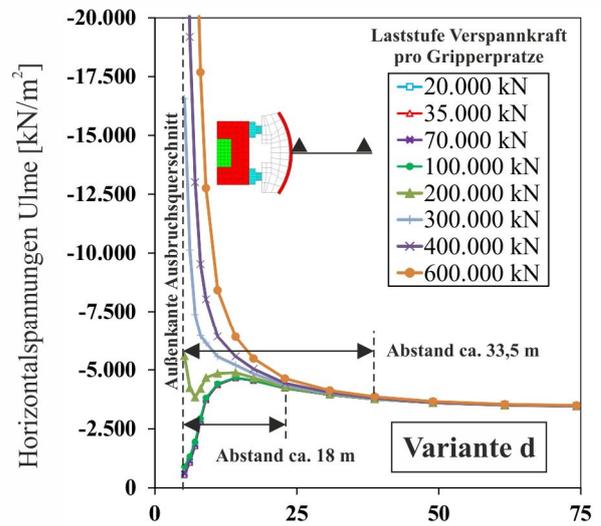
Abstand quer zur Vortriebsrichtung bezogen auf den Mittelpunkt Ausbruchquerschnitt [m]



Abstand quer zur Vortriebsrichtung bezogen auf den Mittelpunkt Ausbruchquerschnitt [m]



Abstand quer zur Vortriebsrichtung bezogen auf den Mittelpunkt Ausbruchquerschnitt [m]



Abstand quer zur Vortriebsrichtung bezogen auf den Mittelpunkt Ausbruchquerschnitt [m]

Bild 7: Horizontalspannungsverteilung im Bereich der Ulme quer zur Vortriebsrichtung in Abhängigkeit von der Verspannkraft

400.000 kN als Verspannkraft abbildbar, da bei einer höheren Verspannkraft die numerischen Berechnungen nicht mehr konvergieren bzw. das System im Vergleich zu den anderen Varianten aufgrund des geringen Ansatzes der Kohäsion für das Gebirge kollabiert. In allen vier Varianten zeigt sich ein ähnliches Bild. Mit zunehmender Verspannkraft vergrößern sich die Horizontalspannungen am Ausbruchrand. Dabei ist auffällig, dass für die Variante a der Verlauf der Horizontalspannungen quer zur Vortriebsrichtung deutlich abweicht von dem Verlauf der Horizontalspannungen der Variante b bis d. Ebenso ist auffällig, dass sich für die Laststufen bis 100.000 kN die

Horizontalspannungen nur in einem geringen Abstand zum Ausbruchrand verändern. Bei höheren Laststufen vergrößert sich der Bereich des Gebirges, der von der Einleitung der Verspannkraft beeinflusst wird. Hierbei zeigt sich, dass dieser beeinflusste Bereich quer zur Vortriebsrichtung ab einer Verspannkraft von 300.000 kN wiederum nicht weiter anwächst sondern konstant bleibt (vgl. Bild 7). Dabei wird ein Bereich von ca. 25,5 m (ca. 2,7-facher Ausbruchsdurchmesser) für die Variante a und von ca. 33,5 m (ca. 3,5-facher Ausbruchsdurchmesser) für die Varianten b bis d im Gebirge quer zur Vortriebsrichtung aktiviert.

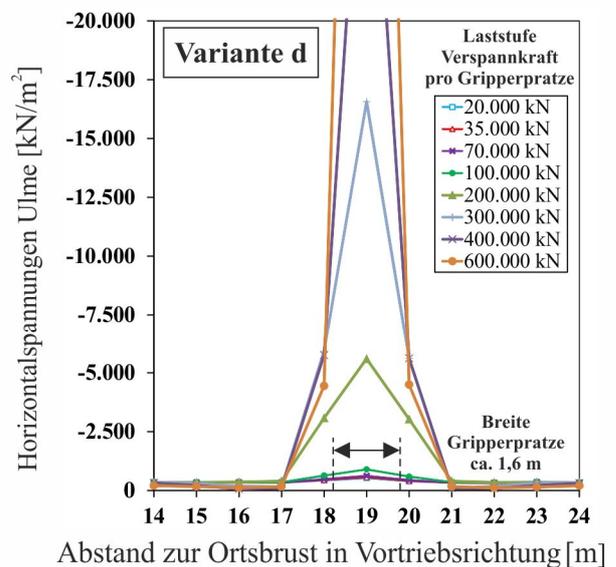
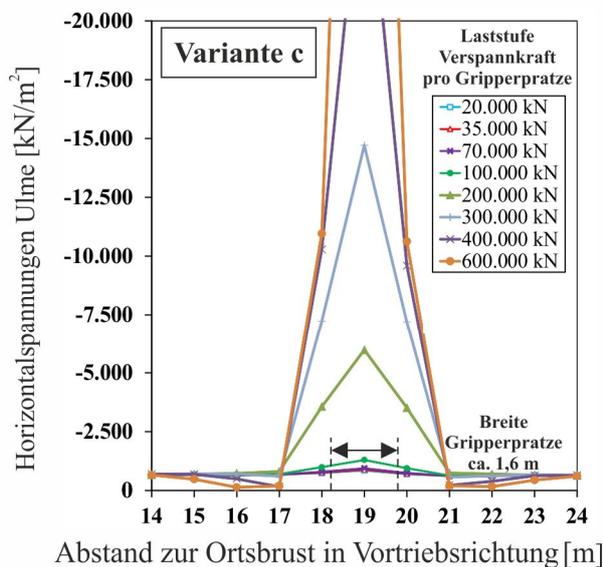
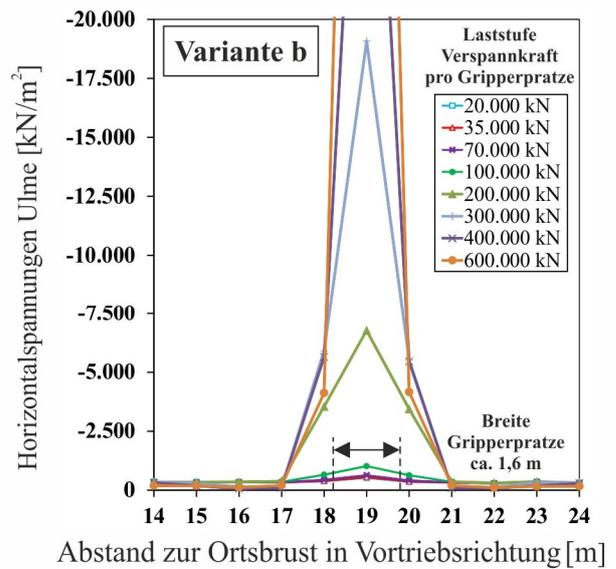
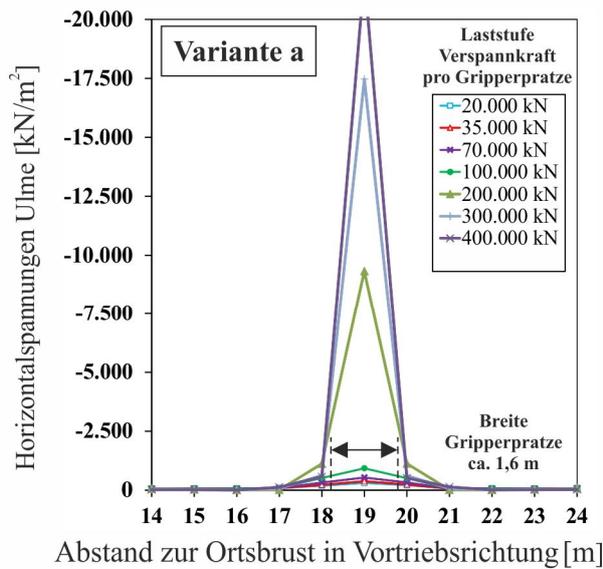


Bild 8: Horizontalspannungsverteilung im Bereich der Ulme im Ausbruchsbereich in Vortriebsrichtung in Abhängigkeit von der Verspannkraft

Dies ist ebenso festzustellen, wenn der Verlauf der Horizontalspannungen in der Ulme am Ausbruchrand bezogen auf die Vortriebsrichtung betrachtet wird (vgl. Bild 8). Auch hier wird ein lokal beschränkter Bereich des Gebirges aktiviert. Für die Variante a hat dieser Bereich in Vortriebsrichtung eine Ausdehnung von ca. 6 m (ca. 0,6-facher Ausbruchsdurchmesser) und für die Varianten b bis d von ca. 10 m (ca. 1,0-facher Ausbruchsdurchmesser).

Die Differenz in der Reichweite bzw. Ausdehnung des aktivierten Gebirgsbereichs für die Variante a und für die Varianten b bis d lässt sich auf die geringen Gebirgsscherfestigkeiten bzw. auf die Kohäsion des Gebirges, die für die Variante angesetzt wurde, zurück-

führen. Durch die geringen Scherfestigkeiten des Gebirges versagt das simulierte Gebirge frühzeitig, so dass die Kräfte aus der Gripper-verspannung nicht weiträumiger ins Gebirge eingeleitet werden können.

In Bild 9 sind die maximalen Horizontalspannungen und die maximalen Horizontalverschiebungen, die sich in der Ulme im Bereich der Gripper-verspannung im direkt anliegenden Gebirge ergeben, in Abhängigkeit von der Verspannkraft für die Varianten a bis d aufgetragen. Im linken Bereich des Bildes 9 ist für eine Bandbreite von 0 kN bis 350.000 kN die Verspannkraft dargestellt. Für die Variante b bis d zeigt sich für die Horizontalspannungen und für die Horizontalverschiebungen in der Ulme ein annähernd

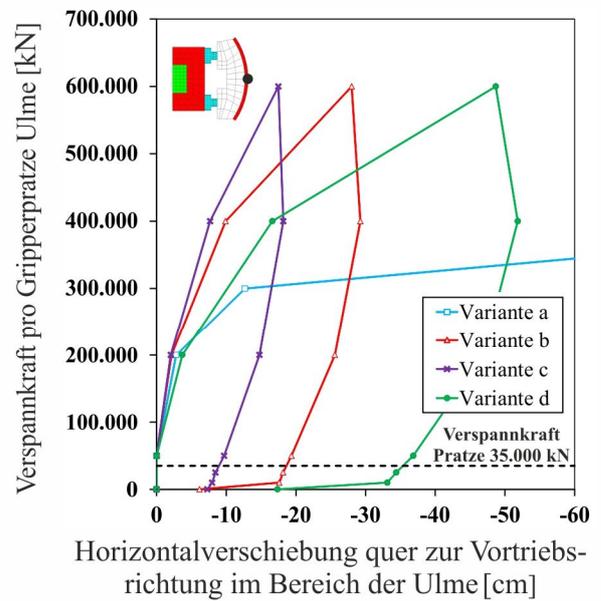
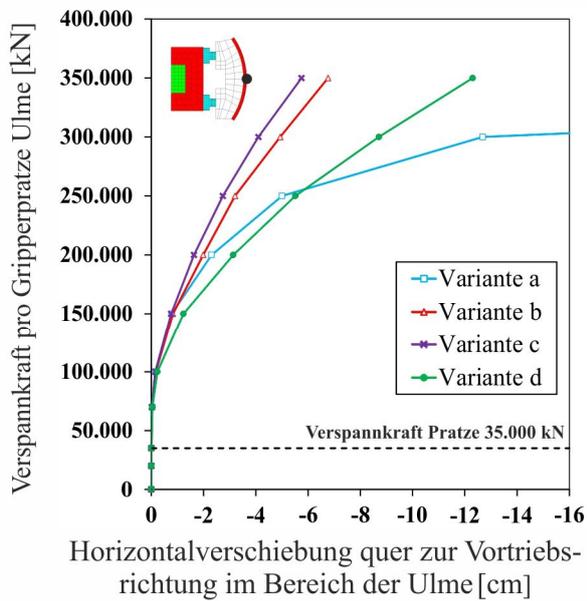
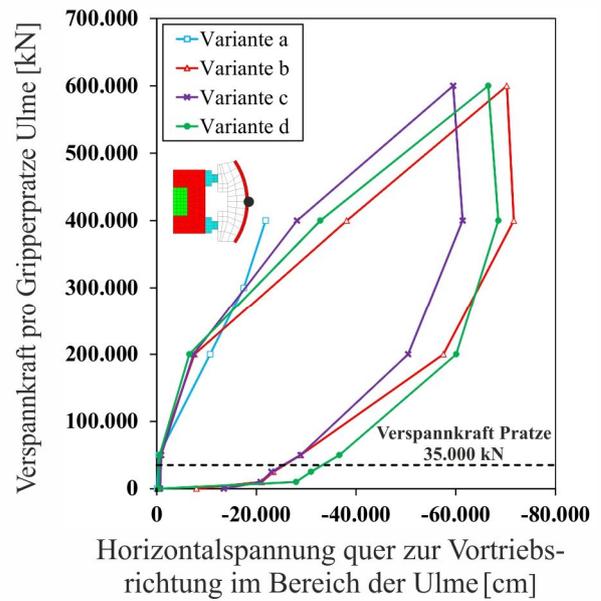
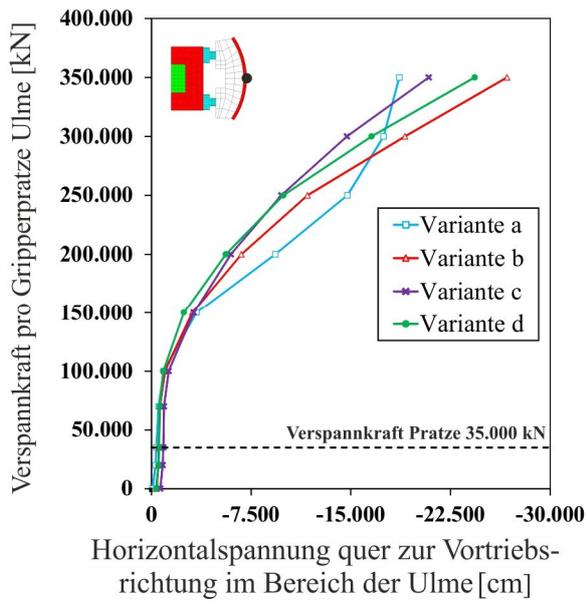


Bild 9: Horizontalspannung / Horizontalverschiebung quer zur Vortriebsrichtung im Bereich der Ulme in Abhängigkeit von der Verspannkraft

gleicher Kurvenverlauf. Mit zunehmender Verspannkraft ergeben sich überproportional größere Horizontalspannungen und Horizontalverschiebungen in der Ulme. Dagegen ergeben sich für die Variante a mit zunehmender Verspannkraft deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf im Vergleich mit den Varianten b bis d. Ab einer Verspannkraft von 150.000 kN stellt sich ein linearer Zusammenhang von Verspannkraft und Horizontalspannung im Gebirge für die Variante a ein. Ab einer Verspannkraft von 250.000 kN zeigt sich, dass die Horizontalspannungen im Gebirge bei der Varianten a bei zunehmender Verspannkraft nur noch schwach anwachsen. Die Horizontalverschiebungen in der Ulme für Variante a nehmen im Vergleich zu den Varianten b bis d sehr stark überproportional

zu und zeigen den Kollaps des simulierten Gebirges bei einer Verspannkraft von 400.000 kN an. Für die Varianten a bis d ergeben sich erst deutliche Unterschiede in der Größe der Horizontalspannungen und Horizontalverschiebung ab einer Verspannkraft von 100.000 kN. Erst ab dieser Verspannkraft wirkt sich der Unterschied im Ansatz der Höhe der Kohäsion des Gebirges aus. Ebenso wirkt sich erst ab einer Verspannkraft von 100.000 kN der Unterschied im Ansatz des Wertes für den E-Modul des Gebirges im Vergleich Variante d ($E_{\text{Gebirge}} = 500 \text{ MN/m}^2$) mit den Varianten a bis c ($E_{\text{Gebirge}} = 1.000 \text{ MN/m}^2$) aus. Von besonderer Bedeutung für die Bewertung der Berechnungsergebnisse der Varianten a bis d ist, dass die kritischen Beanspruchungen des Gebirges durch die

Einleitung der Verspannkräfte der Gripper-TBM deutlich über den maximalen Verspannkräften liegen, für die die Gripper-TBM in ausgeführten Projekten ausgelegt waren.

Im rechten Bereich des Bildes 9 ist eine Zunahme der Verspannkräfte von 0 kN auf 600.000 kN und eine darauffolgende Reduktion der Verspannkräfte von 600.000 kN auf 0 kN visualisiert. Bei der Reduktion der Verspannkräfte zeigt sich für die Varianten b bis d, dass sich die Horizontalspannungen und die Horizontalverschiebungen in der Ulme entsprechend reduzieren. Dabei ergeben sich allerdings im Entlastungsbereich für die Horizontalspannungen und Horizontalverschiebungen größere bzw. bleibende Spannungen und Verschiebungen in der Ulme.

4. Zusammenfassende Bewertung und Ausblick

Der vorliegende Beitrag stellt erste Ergebnisse des Forschungsprojektes PlastTBMGripp dar. Derzeit laufen noch zahlreiche Berechnungen, die anschließend noch auszuwerten und dann zu beurteilen sind. Insofern lassen sich zum derzeitigen Zeitpunkt nur sehr eingeschränkte Aussagen treffen.

Auf der einen Seite zeigt sich, dass es erforderlich ist den Spannungszustand abzubilden, der durch die großräumige Spannungsumlagerung infolge des Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM im simulierten Gebirge entsteht. Auf der anderen Seite zeigt sich, dass die Einleitung der Verspannkräfte der Gripper- verspannung nur in einem lokal beschränkten Bereich die Spannungen und Verschiebungen im Gebirge beeinflusst bzw. aktiviert.

Ebenso zeigt sich bei den vier betrachteten Varianten, 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.

Maßgebend für die Beurteilung zur Verspannbarkeit einer Gripper-TBM im Fels ist, wie anzunehmen war, die Scherfestigkeit des Gebirges. Wobei auch hier festzuhalten ist, dass die Verspannkraft, die notwendig ist, dass das Gebirge kollabiert, wie bereits zuvor ausgeführt, über dem üblichen Maß liegt, für welches die Gripper-TBM in der Regel dimensioniert werden. Hier bleibt abzuwarten, welche Ergebnisse sich für die anderen Variationsberechnungen mit geringeren Ansätzen für die Gebirgsscherfestigkeiten ergeben.

Die Kräfte bzw. Reaktionskräfte, die sich aus den Vorschubpressen ergeben und die quer sowie längs zu einer Belastung des Gebirges führen, wurden in den dargestellten Varianten noch nicht berücksichtigt

Auch hier bleibt abzuwarten, welche neuen Ergebnisse sich ergeben, da es hier zu einer zusätzlichen Schub- und Scherbeanspruchung des Gebirges kommt.

5. Danksagung

Dieser Aufsatz entstand im Rahmen des Förderprogramms „Forschung für die Praxis“ (Förderperiode 2015) des Hessischen Ministeriums für Wissenschaft und Kunst. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung.

Literatur

- [1] Maidl, B.; Schmid, L.; Ritz, W.; Herrenknecht, M.: Tunnelbohrmaschinen im Hartgestein, Ernst & Sohn Verlag, 2001
- [2] DGGT: Empfehlungen des Arbeitskreises "Numerik in der Geotechnik" – EANG, 2014
- [3] Schmitt, J.; Stahlmann, J.; Gattermann, J.; Herrenknecht, M.; Rehm, U.: Numerische Simulation eines maschinellen Tunnelvortriebs mit einer Gripper-TBM, Tagungsband des 5. Kolloquium 'Bauen in Boden und Fels', Technische Akademie Esslingen, 24.-25.01.2006, ISBN 3-924813-63-9, S. 269-278, 2006
- [4] Schmitt, J.; 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, 2014
- [5] Galler, R.: Impulse zur Weiterentwicklung des Tunnelbohrmaschinenvortriebs, Österreichischer Tunneltag 2000, 11. Oktober 2000, Salzburg, S. 139-144, 2000
- [6] Eisenstein, Z. D.; Rössler, K.: Geotechnical Criteria for Double Shield Tunnel Boring Machines, Studiengesellschaft für unterirdische Verkehrsanlagen (STUVA), Forschung + Praxis, U-Verkehr und Unterirdisches Bauen, Band 36, S. 192-201, 1995
- [7] Gollegger, J.; Priller, A.; Rausch, M.: Einsatz von offenen Tunnelbohrmaschinen bei druckhaftem Gebirge im Gotthard Basistunnel, Geomechanics and Tunneling 2 (2009), No. 5, S. 591-600, 2009
- [8] Galler, R.: Geotechnische Untersuchungen zur Verspannungen offener Tunnelbohrmaschinen, Institut für Geomechanik, Tunnelbau und Kon-

struktiven Tiefbau, Montanuniversität Leoben,
1997

- [9] Schneider, A. H.: Sicherheit gegen Niederbruch im Untertagebau, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, DISS. ETH Nr. 14556, 2002
- [10] Gehring, K.: Einsatz von Vortriebsverfahren, Teil 1, Tunnel 1 (1981), S. 206-214
- [11] Stroh, D.; Huchfeld, J.; Egger, P.: Vergleich von NÖT-Vortriebstechniken beim Großtunnelbau. Baugrundtagung, Berlin, 1996.
- [12] Spang, K.; Egger, P.: Tragverhalten und Bemessung vollvermörtelter, schlaffer Anker im Diskontinuum. Felsbau, Nr. 4, 1998
- [13] Grübl, P.; Weigler, H.; Karl, S.: Beton - Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage, Ernst & Sohn Verlag, 2001, S. 326 ff., S 393 ff.
- [14] Barla, G.: TBM Tunneling in deep underground excavation in hard rock with spalling behavior, 43. Geomechanik-Kolloquium 14.11.2014, Veröffentlichungen des Institutes für Geotechnik der TU Bergakademie Freiberg, Heft 2014-2, S. 25-39
- [15] Loew, S.; Barla, G.; Diedrichs, M.: Engineering Geology of Alpine Tunnels: Past, Present and Future, Keynote lecture, 11th IAEG Congress, Auckland, Neuseeland, 2010

Autoren:

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

Dipl.-Ing. (FH) Thomas Edelmann
Herrenknecht AG
Schlehenweg 2
77963 Schwanau
Tel. +49 (0) 7824 / 302-6522
Fax +49 (0) 7824 / 302-302 8408
E-Mail: edelmann.thomas@herrenknecht.de