

Numerische Studien zum dreidimensionalen Tragverhalten des Gebirges bei Ulmenstollenvortrieben

Giannis Kapouranis, M. Eng., und Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt, Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt, Deutschland

Im Beitrag werden die Erkenntnisse aus FE-Studien dargestellt, die im Rahmen von Simulationen von Ulmenstollenvortrieben erlangt wurden.

Tunnelbau • Ulmenstollenvortrieb • Gebirge • Simulation • Numerische Berechnung • Studie

1 Einführung

Um das räumliche Spannungsverformungsverhalten des Gebirges im Tunnelbau erfassen zu können, sind aufwendige dreidimensionale numerische Berechnungen erforderlich. Werden die Bauzustände eines im Ulmenstollenvortrieb aufgefahrenen Tunnels in zweidimensionalen Berechnungen simuliert, muss die räumliche Tragwirkung durch den Ansatz einer Vorentspannung des Gebirges abgeschätzt werden. Der sogenannte Vorentspannungsfaktor kann durch vergleichende dreidimensionale Berechnungen ermittelt oder anhand von Messungen aus bereits ausgeführten vergleichbaren Projekten abgeleitet werden.

In Sensitivitätsuntersuchungen wurden in einer Studie verschiedene Gebirgskennwerte sowie weitere Einflussgrößen, wie die Überlagerungshöhe und die Abschlaglänge, variiert. In diesem Artikel werden die Einflüsse der variierten Parameter auf den Vorentspannungsfaktor dargestellt und ausgewertet.

2 Stützlastverfahren

Für den Ansatz der Vorentspannung des Gebirges wird in ebenen Berechnungsmodellen sehr häufig das Stützlastverfahren eingesetzt. In diesem Verfahren wird die Vorentspannung des Gebirges durch die Verminderung der Stützkraften am Rand des Ausbruchbereichs realisiert [1]. Die Rechenschritte zur Simulation des Ausbruchs und der Sicherung eines im Ulmenstollenvortrieb aufgefahrenen Tunnels erfolgen gemäß **Bild 1**:

- ▶ Für die Simulation der Bauzustände werden im ersten Schritt (Primärzustand) die Knotenkräfte entlang des späteren Ulmenstollenausbruchs ermittelt.
- ▶ Es folgt ein Zwischenschritt, in dem die Knotenkräfte um einen Vorentspannungsfaktor reduziert werden. Gleichzeitig werden die Elemente im Bereich des Ausbruchs deaktiviert.
- ▶ Im darauffolgenden Berechnungsschritt werden die Elemente der Ulmenstollensicherung aktiviert und die Stützkraften des Ulmenstollenausbruchs vollständig abgebaut.

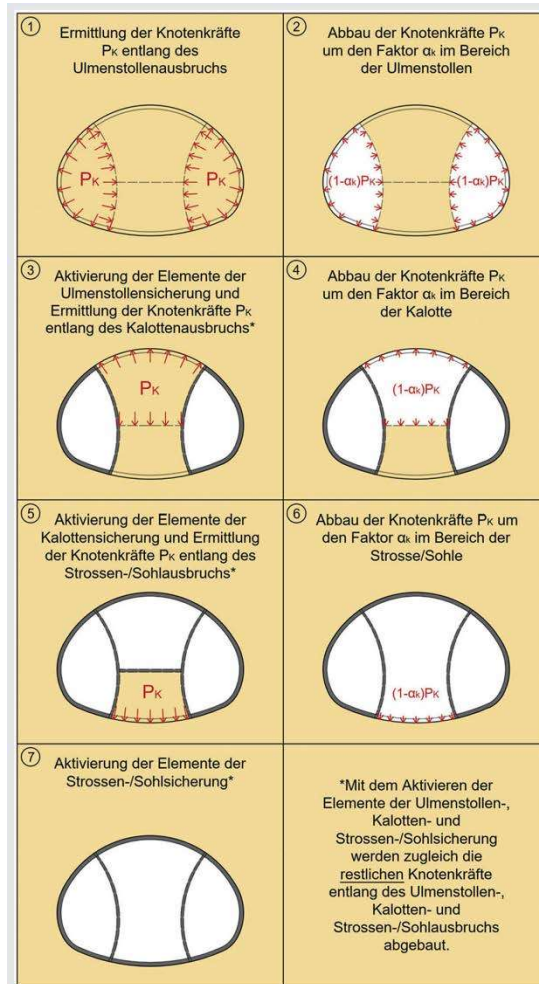


Bild 1: Stützlastverfahren - Beispiel Ulmenstollenvortrieb in Anlehnung an [1]

- ▶ Die weiteren Rechenschritte zur Simulation des Ausbruchs und der Sicherung der Kalotte und der Strosse/Sohle erfolgen ebenfalls gemäß **Bild 1**.

3 Modellerstellung

3.1 Tunnelquerschnitt

Die Dimensionierung des numerisch modellierten Tunnelquerschnitts orientiert sich an der üblichen Querschnittsgröße von Straßentunneln entlang von Bundesstraßen. Der Tunnelquerschnitt wurde als Maulprofil mit geschlossener Sohle mit einer numerisch modellierten Querschnittsfläche von etwa 109 m^2 ausgebildet (**Bild 2**). Mit der gewählten Dimensionierung der einzelnen Teilsegmente können sowohl die Kalotte

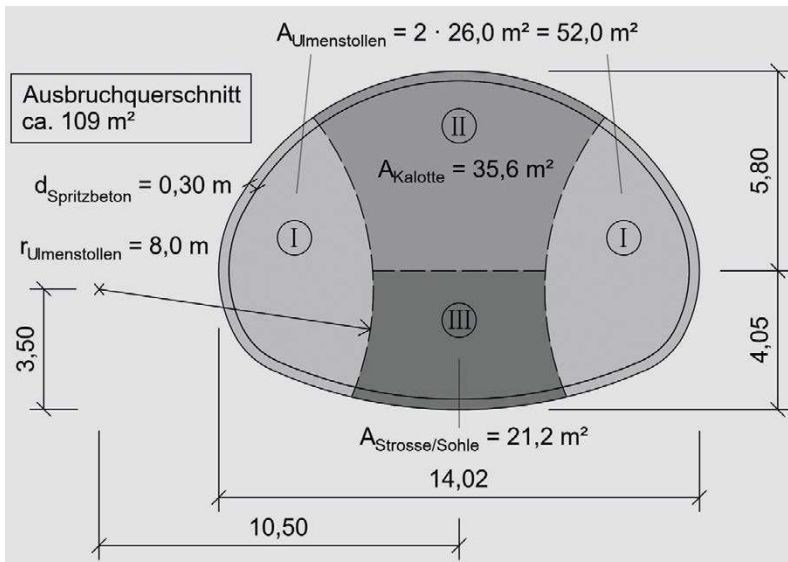


Bild 2: Unterteilung des Ausbruchquerschnitts

Tabelle 1: Spritzbetoneigenschaften der Tunnelaußenschale und der temporären Sicherung

Spritzbetoneigenschaften		Tunnelaußenschale	Innere Ulmenstollenwände und Kalottensohle
Druckfestigkeitsklasse		C25/30	C25/30
Elastizitätsmodul [MN/m ²]	Spritzbeton jung	7.500	7.500
	Spritzbeton alt	31.000	31.000
	50%-Reduktion	15.500	15.500
Dicke d [m]		0,30	0,20
Dehnsteifigkeit EA* [MN/m]		4.650	3.100
Biegesteifigkeit EI* [MNm ² /m]		34,875	10,333
Wichte γ [kN/m ³]		24	24
Querdehnzahl ν [-]		0,20	0,20

*Ansatz E-Modul: Spritzbeton alt mit 50% Reduktion

als auch die Ulmenstollen mit den für das Lösen und Schüttern des Ausbruchmaterials erforderlichen Geräten befahren werden. In den numerischen Berechnungen wurde ein zeitlich paralleler Vortrieb beider Ulmenstollen vorausgesetzt.

Neben der Tunnelaußenschale wurden temporäre Sicherungen der inneren Ulmenstollenwände und der Kalottensohle berücksichtigt (Tabelle 1). Dem Spritzbeton wurde in den tunnelstatischen Berechnungen ein elastisches Materialverhalten zugewiesen. Die Erfassung der Einflüsse aus dem Kriechen und der Relaxation erfolgte entsprechend [1] durch eine 50-prozentige Reduktion des Elastizitätsmoduls im ausgehärteten Zustand. Da der Spritzbeton nach dem Einbringen zu Beginn noch keine volle Steifigkeit aufweist, wurde zusätzlich zwischen „jungem“ und „altem“ Spritzbeton unterschieden. In Tabelle 1 sind die Spritzbetoneigenschaften der Tunnelaußenschale und der temporären Sicherungen zusammengefasst.

Für den ausgebrochenen Tunnelquerschnitt wurde neben der Spritzbetonauskleidung eine Verankerung des

Gebirges berücksichtigt. Die Anker im Gebirge wurden in den FE-Berechnungen durch eine fiktive Kohäsionserhöhung entsprechend [2] in den relevanten Gebirgsbereichen erfasst (Bild 3). Auf die Nachbildung von Ausbaubögen und die Erfassung der Spieße wurde in den FE-Berechnungen auf der sicheren Seite liegend verzichtet.

3.2 FE-Netzgenerierung

In den Untersuchungen wurde das zweidimensionale FE-Netz aus 15-knotigen Dreieckselementen gebildet. Für das 3D-FE-Netz wurden 10-knotige Tetraederelemente verwendet. Im Bild 4 sind die beiden numerischen Berechnungsmodelle inklusive der Lagerbedingungen dargestellt. Um möglichst hinreichend genaue Berechnungsergebnisse in vertretbarer Rechenzeit zu erreichen, kann die Netzfeinheit lokal erhöht werden. In der Nähe des Hohlraums, in dem große Spannungsänderungen auftreten, wurde die Diskretisierung für das zwei- und das dreidimensionale Modell verfeinert.

Die korrekte Erfassung der geplanten Bauphasen in den numerischen Untersuchungen ist eine Voraussetzung für realistische Berechnungsergebnisse. Die Simulation der Bauzustände sollte näherungsweise dem Aufahren und Sichern des Tunnels entsprechen (Bild 5). In den dreidimensionalen FE-Berechnungen wird der Vor-

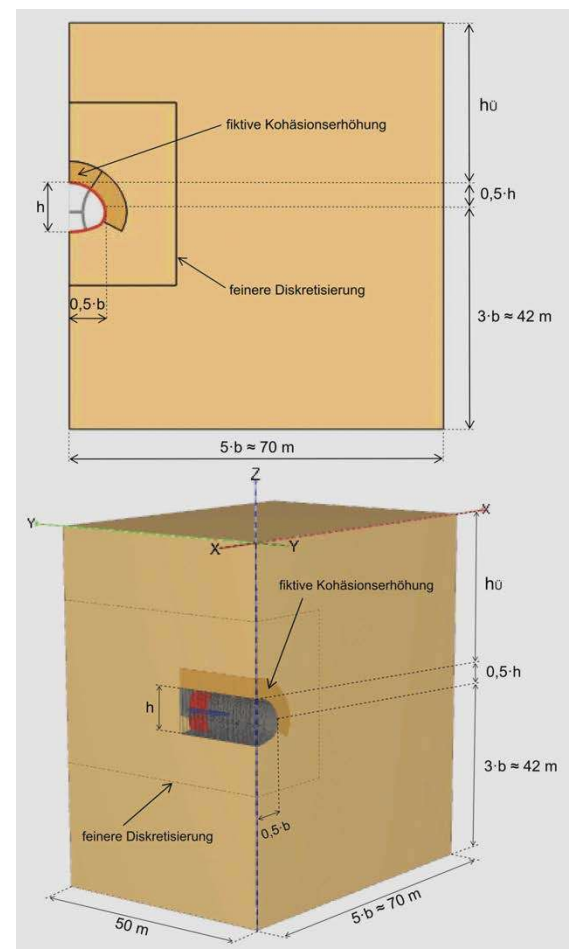


Bild 3: Größe des Berechnungsausschnitts des 2D-Modells (oben) und des 3D-Modells (unten)

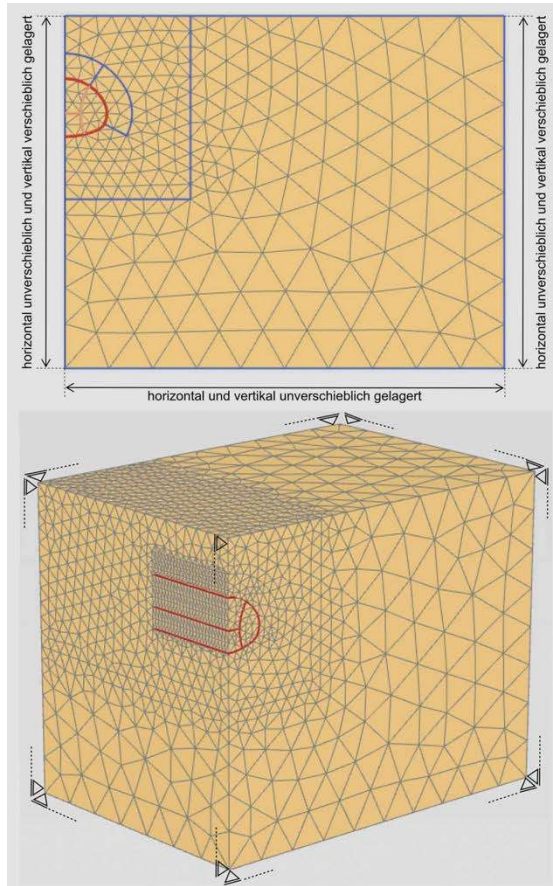


Bild 4: Verwendete FE-Netze – zweidimensional mit Dreieckselementen (oben) und dreidimensional mit Tetraederelementen (unten)

trieb durch Deaktivieren der entsprechenden Volumenelemente simuliert. Die Stützung der Ortsbrust mittels Spritzbeton wurde durch eine Flächenlast von 40 kN/m² berücksichtigt. Neben dem Ausbruch wurde in einem Rechenschritt zugleich der um eine Abschlagtiefe zurückbleibende Einbau der Tunnelaußenschale, der inneren Ulmenstollenwände und der temporären Kalottensohle simuliert. In den Berechnungsphasen, in denen eine Erhöhung des Elastizitätsmoduls des Spritzbetons erfolgte, wurde die Verankerung des Gebirges durch eine fiktive Kohäsionserhöhung abgebildet (**Bild 5**).

4 Ermittlung der Vorentspannungsfaktoren

Die numerischen Berechnungen wurden mit einem linear-elastisch ideal-plastischen Stoffmodell für das Gebirge durchgeführt. Der Betrachtungsquerschnitt in den 3D-Modellen wurde unmittelbar hinter der noch vorhandenen inneren Ulmenstollenwand gewählt. Im **Bild 6** sind exemplarisch für eine Variante die Normalkraftverläufe und die Vertikalverschiebungen über den Umfang des halben Tunnelquerschnitts dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in der 2D-FE-Berechnung mit dem über das Verhältnis der maximalen Normalkräfte kalibrierten Vorentspannungsfaktor α_k deutlich höhere Verschiebungen ermittelt werden. Für die Ermittlung

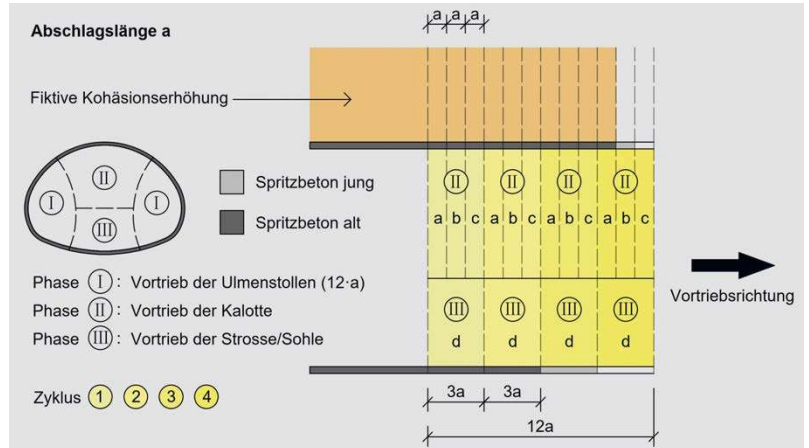


Bild 5: Simulation des Vortriebs durch räumliche Berechnungen

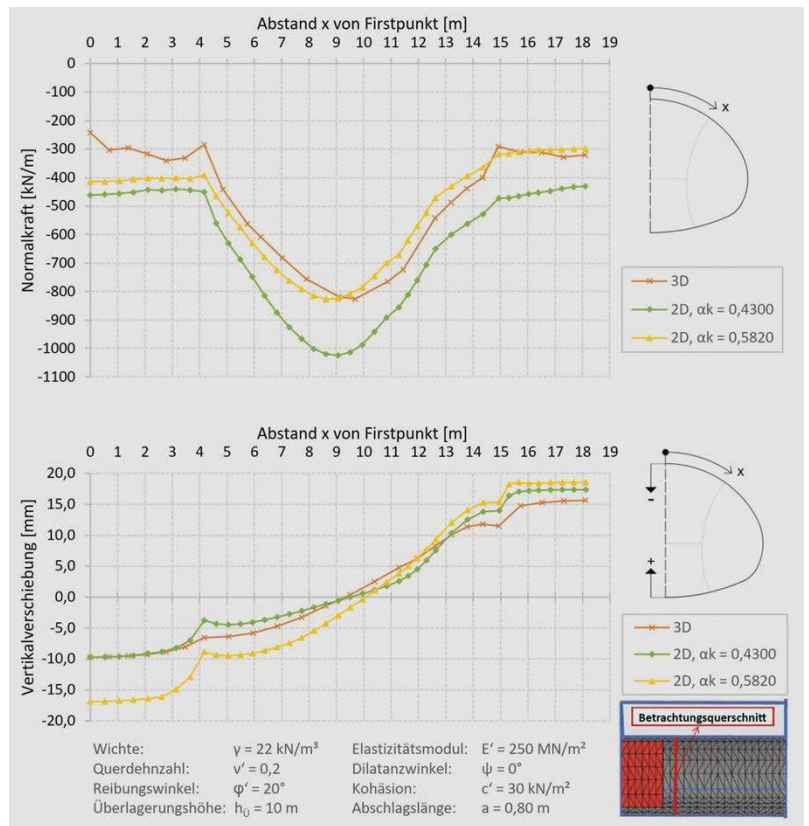


Bild 6: Normalkraftverläufe und Vertikalverschiebungen über den Umfang des halben Tunnelquerschnitts

der Verformungen und Schnittgrößen sind in den zweidimensionalen Berechnungen unterschiedliche Vorentspannungsfaktoren α_k anzusetzen. Zudem kann eine über den gesamten Umfang des Tunnelquerschnitts annähernd übereinstimmende Abbildung der Verschiebungen und Normalkräfte in der Tunnelenschale nur durch unterschiedliche Vorentspannungsfaktoren α_k für die einzelnen Teilausbrüche erzielt werden.

5 Auswertung der numerischen Untersuchung

In den **Bildern 7 bis 10** ist der maßgebliche Teil der Auswertung der numerischen Untersuchung aufberei-

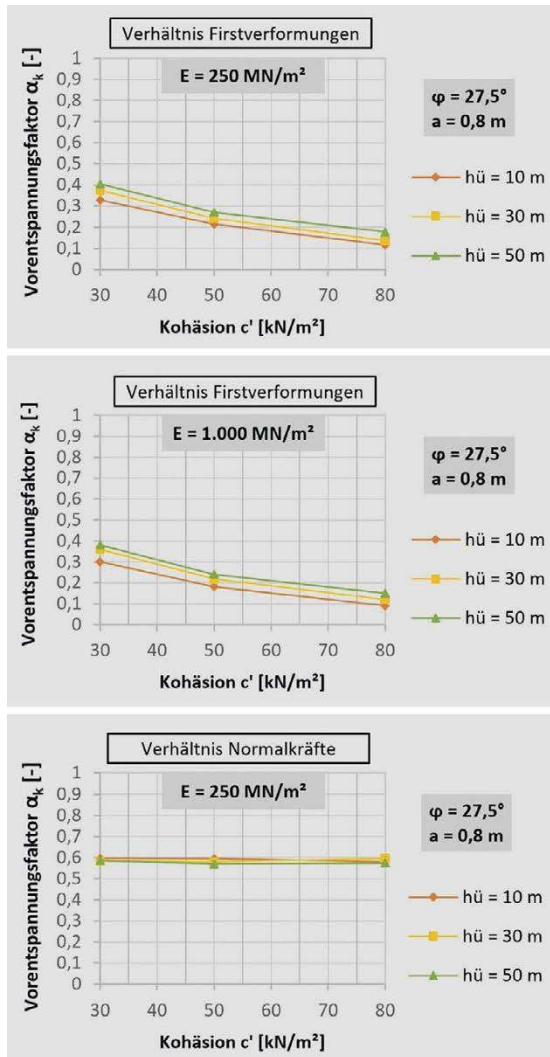


Bild 7: Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion c' für variierte Überlagerungshöhen h_u

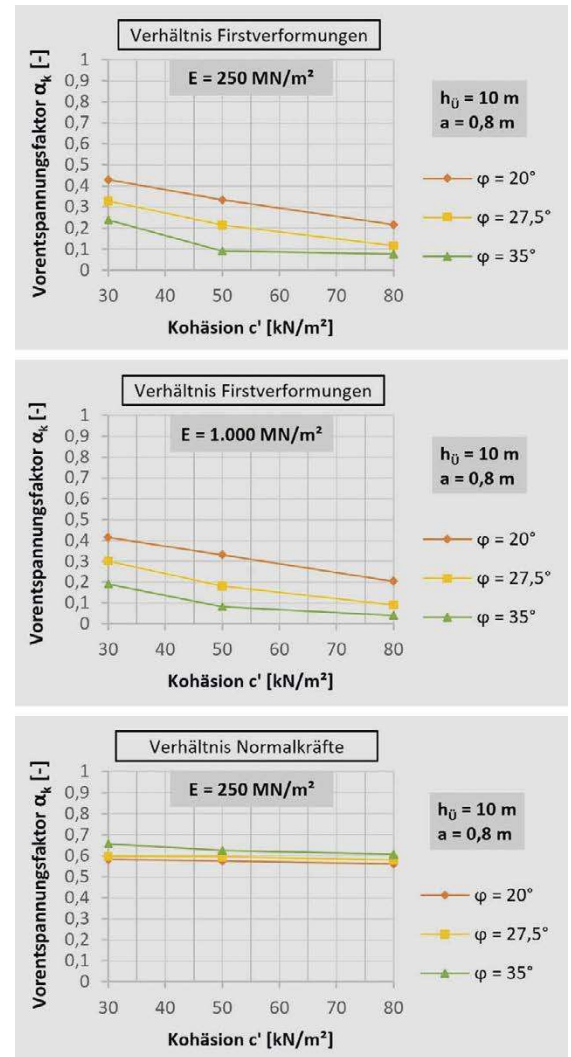


Bild 8: Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion c' für variierte Reibungswinkel φ des Gebirges

tet. Die Variation der Überlagerungshöhe h_u zeigt, dass sowohl die Firstverformungen als auch die Normalkräfte in der Tunnelschale mit zunehmender Überlagerungshöhe erwartungsgemäß ansteigen (Bild 7). Für die Abbildung der im räumlichen Modell ermittelten Firstverformungen sind bei größeren Überlagerungshöhen geringfügig höhere Vorentspannungsfaktoren α_k anzusetzen. Bei den über das Verhältnis der maximalen Normalkräfte ermittelten Faktoren ist dagegen kein relevanter Einfluss der Überlagerungshöhe auf die Größe des Vorentspannungsfaktors erkennbar (Bild 7).

Die Größe der Vorentspannungsfaktoren α_k , die über das Verhältnis der Vertikalverschiebungen in der Firne ermittelt wurden, wird durch den Reibungswinkel des Gebirges am stärksten beeinflusst (Bild 8). Mit zunehmendem Reibungswinkel resultieren auch bei einem hohen Elastizitätsmodul des Gebirges kleinere Vorentspannungsfaktoren, wodurch in den 2D-FE-Berechnungen kleinere Vorverformungen im Bereich des ungesicherten Hohlraums ermittelt werden. Aufgrund der fast deckungsgleichen und horizontalen Kur-

venverläufe ist im Bild 8 ebenso zu erkennen, dass der Reibungswinkel des Gebirges keine Auswirkung auf die Größe der über das Verhältnis der maximalen Normalkräfte ermittelten Faktoren besitzt.

Mit zunehmender Abschlaglänge a nimmt die Zeit zwischen dem Ausbruch des Tunnelquerschnitts und dem Einbau der Sicherungsmittel zu (Bild 9). Infolgedessen resultieren größere Verformungen, die in den 2D-FE-Berechnungen durch größere Vorentspannungsfaktoren erfasst werden. Im Bild 9 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Abschlaglänge, unabhängig von der Kohäsion und dem Elastizitätsmodul des Gebirges, größere Vorentspannungsfaktoren anzusetzen sind, um die im räumlichen Modell ermittelten Firstverformungen in den 2D-Berechnungen abbilden zu können. Bei der Betrachtung der über das Verhältnis der maximalen Normalkräfte ermittelten Vorentspannungsfaktoren ist zu erkennen, dass mit zunehmender Abschlaglänge kleinere Vorentspannungsfaktoren anzusetzen sind und somit größere Schnittkräfte resultieren. Theoretisch sollten jedoch mit zunehmender Vorverformung die

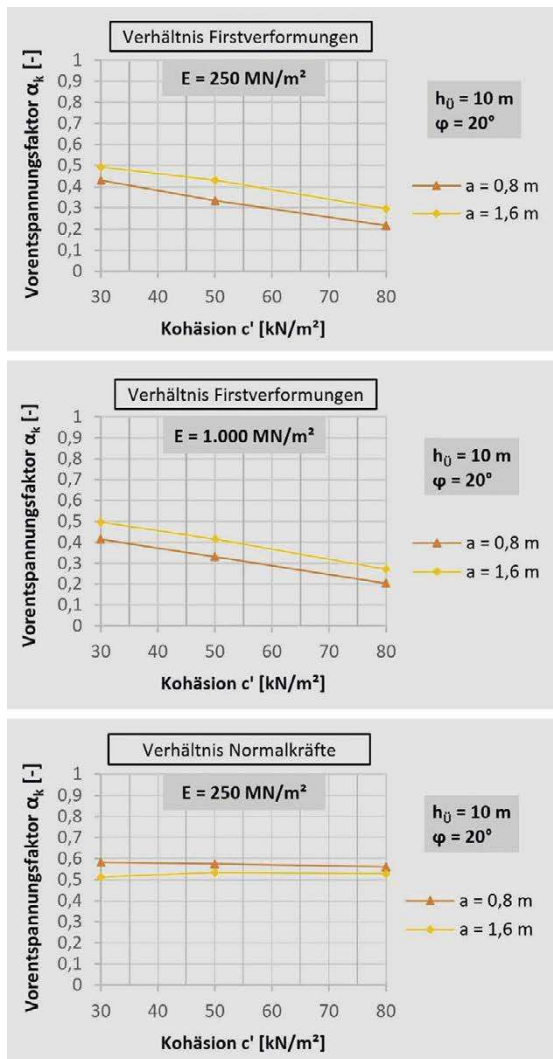


Bild 9: Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion c' für variierte Abschlaglängen a

Schnittgrößen abnehmen, da das umgebende Gebirge vor Einbau der Tunnelschale stärker zum Mittragen herangezogen wird. Die mit zunehmender Abschlaglänge größer werdenden Schnittkräfte sind auf die gewählte Stationierung des Betrachtungsquerschnitts im 3D-Modell zurückzuführen. Bei der Betrachtung des Tunnelquerschnitts unmittelbar hinter der temporären Ortsbrust nimmt die maximale Normalkraft im Bereich der Ulme mit zunehmender Abschlaglänge stark ab. Bei einer größeren Entfernung zur temporären Ortsbrust resultieren größere Normalkräfte, da sich mit zunehmender Abschlaglänge das Gewölbe in Längsrichtung viel stärker auf die bereits errichtete Tunnelschale abstützt. Die Größe der Vorentspannungsfaktoren hängt somit von der Lage des Betrachtungsquerschnitts bzw. von der Entfernung zur temporären Ortsbrust ab.

Die unter Variation des Elastizitätsmoduls E ermittelten Firstverformungen verdeutlichen, dass die Vertikalverschiebungen sehr stark vom E -Modul des Gebirges abhängig sind (**Bild 10**). Wird der Elastizitätsmodul des Gebirges von 250 auf 1.000 MN/m^2 erhöht,

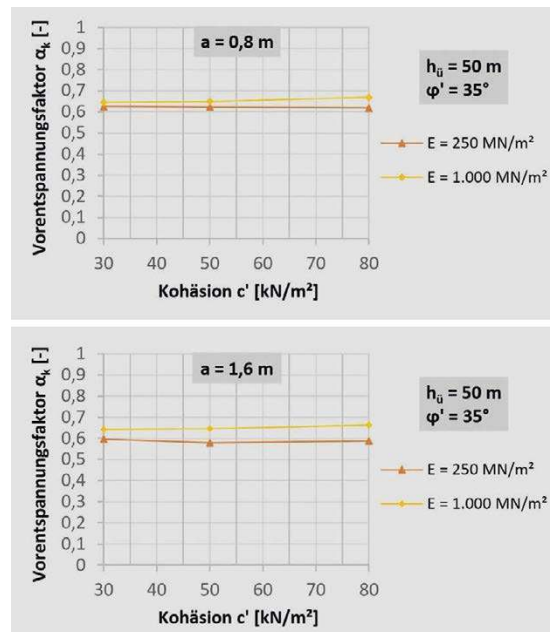


Bild 10: Vorentspannungsfaktor α_k abhängig von der Kohäsion c' für variierte Elastizitätsmoduli E des Gebirges

nehmen die Verschiebungen stark ab. Ebenso resultieren geringere Schnittkräfte in der Tunnelschale. Auf die Größe der über das Verhältnis der Firstverformungen ermittelten Vorentspannungsfaktoren hat jedoch der E -Modul des Gebirges keinen relevanten Einfluss (**Bilder 7 bis 9**). Zur Bestimmung der 3D-Normalkräfte sind jedoch in den 2D-Berechnungen für ein Gebirge mit höherem E -Modul größere Vorentspannungsfaktoren anzusetzen (**Bild 10**). Der zwar geringe, aber vorhandene Einfluss des Elastizitätsmoduls des Gebirges auf den Vorentspannungsfaktor zeigt, dass der elastische Anteil der Verformungen auch nach dem Einbau der Sicherungsmittel nicht abgeklungen ist.

6 Fazit

Die durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass zur Erfassung der im räumlichen Modell ermittelten Firstverformungen und Normalkräfte in der Tunnelschale im ebenen Modell unterschiedliche Vorentspannungsfaktoren anzusetzen sind. Der Vergleich der Normalkräfte verdeutlicht zudem, dass die Größe des Vorentspannungsfaktors für die Abbildung der 3D-Normalkräfte von der Lage des Betrachtungsquerschnitts abhängt. Ebenso haben die Untersuchungen ergeben, dass eine über den gesamten Umfang des Tunnelquerschnitts annähernd übereinstimmende Erfassung der Normalkräfte und Vertikalverschiebungen nur dann erreicht werden kann, wenn für die einzelnen Teilausbrüche unterschiedliche Vorentspannungsfaktoren angesetzt werden. Für einen Ulmenstollenvortrieb lässt sich die Größe des Vorentspannungsfaktors nicht pauschal festlegen, da dieser unter anderem von den Gebirgskennwerten, der Überlagerungshöhe und der Abschlaglänge abhängig ist.

Da die Untersuchungen mit der FEM immer eine Näherung darstellen und der Vorentspannungsfaktor eine große Auswirkung auf die zweidimensionalen Berechnungsergebnisse besitzt, wird empfohlen, die Ermittlung der Verformungen und Schnittkräfte mit einer Bandbreite an Vorentspannungsfaktoren durchzuführen. Vor allem sollten jedoch die ermittelten Verformungen und Schnittkräfte während der Bauphase durch Messungen überprüft werden und gegebenenfalls weitere Berechnungen mit einem neu kalibrierten Vorentspannungsfaktor durchgeführt werden.

Eine große Auswirkung auf die Verformungen besitzt unter anderem der Zeitraum, in dem die Sicherungsmittel eingebaut werden. Um den Einfluss der Vortriebsgeschwindigkeit auf die Sicherungsmittel und

das Tragverhalten des Gebirges untersuchen zu können, sind räumliche Berechnungen in Abhängigkeit von der Zeit durchzuführen.

7 Quellenverzeichnis

- [1] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT): Empfehlungen des Arbeitskreises „Numerik in der Geotechnik“ – EANG. Ernst & Sohn Verlag, 2014.
- [2] Stroh, D.; Huchfeld, J.; Egger, P.: Vergleich von NÖT-Vortriebstechniken beim Großtunnelbau. Baugrundtagung, Berlin, 1996.

Giannis Kapouranis M. Eng.

Absolvent im Masterstudiengang Bauingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt

Kontakt:
janis.kapouranis@hotmail.de



Prof. Dr.-Ing. Jürgen Schmitt

vertritt im Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwesen an der Hochschule für angewandte Wissenschaften Darmstadt die Forschungs- und Lehrgebiete Geotechnik, Tunnelbau, CAD und Umweltgeotechnik.

Kontakt:
juergen.schmitt@h-da.de



Unsere Mission:

Individuelle Transportlösungen - auch für extreme Steigungen bis 50 %

www.smtscharf.com