

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Nagek, Felix; Meschke, Günther

Transiente Simulation der Ortsbruststützung durch Druckluft im maschinellen Tunnelbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/105322>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

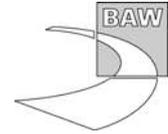
Nagek, Felix; Meschke, Günther (2009): Transiente Simulation der Ortsbruststützung durch Druckluft im maschinellen Tunnelbau. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Entwicklungen bei der Anwendung numerischer Verfahren in der Geotechnik. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 3-10.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.





TRANSIENTE SIMULATION DER ORTSBRUSTSTÜTZUNG DURCH DRUCKLUFT IM MASCHINELLEN TUNNELBAU

FELIX NAGEL & GÜNTHER MESCHKE

*Lehrstuhl für Statik und Dynamik, Ruhr-Universität Bochum, Universitätsstr. 150, 44780 Bochum,
Email: [felix.nagel;guenther.meschke]@rub.de*

Kurzfassung: Im vorliegenden Artikel wird die numerische Simulation der Ortsbruststützung durch Druckluft im maschinellen Tunnelbau mittels eines dreidimensionalen und zeitabhängigen Berechnungsmodells vorgestellt. Dieses Berechnungsmodell bildet den durch die Anwendung von Druckluft initiierten Zweiphasenfluss von Wasser und Luft im Porenraum des deformierbaren Korngerüsts unter Berücksichtigung der dabei beteiligten Bestandteile des Baugrundes - Wasser, Luft und Bodenskelett - ab. Basis der Berechnung bildet dabei die Finite Element Methode (FEM), wobei die zu lösenden Bilanzgleichungen als voll gekoppelt und zeitabhängig behandelt werden. Die hydraulischen Eigenschaften des Baugrundes werden durch das Darcy'sche Fließgesetz und die *Soil Water Characteristic Curve* (SWCC) NACH van Genuchten (1985) beschrieben. Das Spannungs-Verformungs Verhalten des Baugrundes wird mittels effektiver Spannungen nach Bishop (1959) und dem Kapillardruck als optionaler und unabhängiger Spannungsgröße beschrieben. Als Konstitutivgesetze finden dabei sowohl ein Critical State Modell, als auch dessen Erweiterung auf Teilsättigung Anwendung. Die Anwendbarkeit des vorgestellten Simulationmodells soll durch ausgewählte Berechnungsergebnisse der Simulation einer Druckluftintervention demonstriert werden.

1. Einleitung

Der schildgestützte Tunnelvortrieb ist, durch seine hohe Zuverlässigkeit und die geringen mit dieser Vortriebsmethode verbundenen Oberflächensetzungen, in den letzten Jahrzehnten zur verbreitetsten Baumethode im innerstädtischen Tunnelbau geworden. Die Prognose eintretender Setzungen sowie möglicher Belastungsszenarien, die die Stabilität des Baugrundes gefährden, ist vor dem Hintergrund zumeist sensitiver Bebauung die Hauptaufgabe der während Planung und Ausführung eingesetzten Berechnungsverfahren. Erfolgt der Tunnelvortrieb im voll- oder teilgesättigten Baugrund, so ist die Reaktion des Baugrundes ein Ergebnis der Interaktionen des Bauprozesses und der Bestandteile des Baugrundes – Wasser, Luft und Korngerüst. Thema des vorliegenden Beitrages ist dabei die Interaktion von Prozess und Baugrund über die Ortsbruststützung durch Druckluft. Diese Bauhilfsmaßnahme ist gekennzeichnet durch die Initiierung eines Zweiphasenflusses und das Entstehen einer teilgesättigten Zone im angrenzenden Baugrund durch das Abströmen von Druckluft aus der Abbaukammer in den Porenraum des Bodens. Dabei variieren sowohl Form und Ausdehnung der teilgesättigten Zone, sowie die Spannungen im Korngerüst und die Drücke in den Bodenfluiden über die Dauer der Druckluftapplikation. Für die Berechnung der damit verbundenen Baugrundreaktionen wird daher nicht nur ein adäquates Modell des Bauprozesses benötigt, sondern auch ein Baugrundmodell, welches die einzelnen Phasen des Bodens – Wasser, Luft und Korngerüst – als unabhängige Konstituierende mit eigenen Eigenschaften und Zuständen erfasst.

Während die numerische Modellierung des gekoppelten Einphasenflusses von Porenwasser in einem vollgesättigten deformierbaren Korngerüst eine etablierte Berechnungsmethode darstellt (Sheng et al., 2003), ist die vollgekoppelte Beschreibung eines Zweiphasenflusses Gegenstand aktueller Forschung (Loret und Khalili, 2000; Ehlers et al., 2004). Im Gegensatz zu schwach gekoppelten Beschreibungen, bei denen zunächst das hydraulische Problem gelöst wird und in einer nachfolgenden statischen Analyse die zuvor berechneten Fluiddrücke berücksichtigt werden, erlauben vollgekoppelte Modelle die konsistente

Formulierung der Problemstellung unter Berücksichtigung wechselseitiger Interaktionen zwischen Deformationen und Fluidflüssen. Zur numerischen Berechnung des Einsatzes von Druckluft im Tunnelbau wurden bisher nur wenige Ansätze publiziert. Für die Berechnung der sich vor der druckluftgestützten Ortsbrust einstellenden Zweiphasenströmung entwickelte Gülzow (1994) ein numerisches Modell, welches die Zweiphasenströmung im unverformbaren Festkörperskelett mittels sättigungsabhängiger Permeabilitäten und einer kapillardruckabhängigen Wassersättigung beschreibt. Im von Hochgürtel (1998), aufbauend auf diesem Modell, vorgestellten Modell zur Verformungsberechnung werden die auf diese Weise berechneten Fluiddrücke und Sättigungen auf ein statisches FE-Modell übertragen, mit welchem die Deformationen und Spannungen des Korngerüsts berechnet werden. Erst kürzlich präsentierte Öttl (2003) ein FE-Modell zur Analyse des Drucklufteinsatzes im in Spritzbetonbauweise vorgetriebenen Tunnel, in dem der Strömungsprozess sowie die Verformungen des Baugrundes als gekoppeltes Problem gelöst werden.

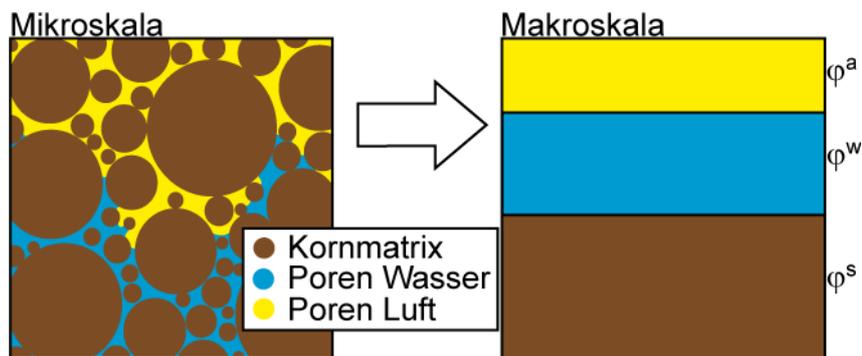


Abbildung 1: Überführung der Zustände und Interaktionen von der Mikro- auf die Makroskala durch Anwendung der Theorie Poröser Medien

Die in diesem Artikel vorgeschlagene Berechnungsmethode wurde als Bestandteil eines ganzheitlichen Simulationsmodells für den maschinellen Tunnelbau entwickelt (Nagel et al., 2008). Im vorliegenden Beitrag sollen die zugrundeliegende mechanische Formulierung, sowie die angewendeten konstitutiven Gleichungen kurz vorgestellt werden. Abschließend wird näher auf die Modellierung der Druckluftstützung mit dem vorgestellten Modell eingegangen und die Berechnungsmethodik anhand eines Beispiels verdeutlicht.

2. Gekoppeltes FE-Modell für teilgesättigten Baugrund

2.1. MULTIPHASEN-FORMULIERUNG

Die Modellierung des umgebenden Baugrunds erfolgt als dreiphasiges, poröses Material, wobei zur (makroskopischen) Beschreibung seiner Mikrostruktur die *Theorie Poröser Medien* (TPM) (Ehlers and Bluhm, 2002) herangezogen wird. Teilgesättigter Baugrund setzt sich aus der Kornmatrix, dem Porenwasser und der Porenluft zusammen. Gemäß der TPM besitzt jede Phase ihren eigenen Bewegungszustand und die Zusammensetzung der Mischung wird durch die Volumenfraktionen (n^a) ihrer Phasen (φ^a) erfasst (siehe Abb. 1). Dabei können die Volumenfraktionen in die Wassersättigung des Porenraumes (S^w) und das zugängliche Porenvolumen (n) überführt werden, und somit ergibt sich für die Zusammensetzung des Bodens:

$$n^s = 1 - n \vee n^w = nS^w \vee n^a = n(1 - S^w)$$

Der Bewegungszustand der Fluide wird durch ihre relativen Geschwindigkeiten $\mathbf{v}^{\beta s}$ in Abhängigkeit zur Bewegung des Festkörperskeletts ausgedrückt.

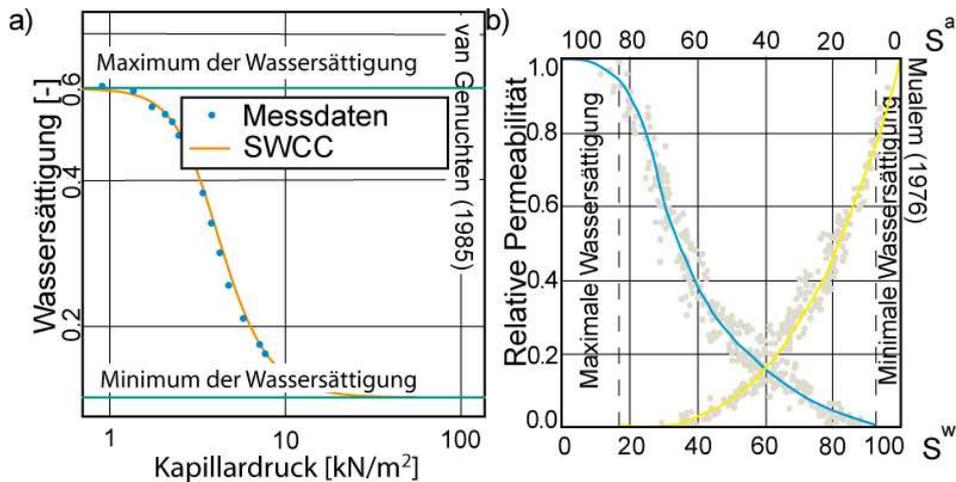


Abbildung 2: a) Vergleich gemessener Werte mit der Soil Water Characteristic Curve (van Genuchten und Nielsen, 1985) und b) Vergleich gemessener Werte und relativer Permeabilitäten nach Mualem (1976)

Gemittelt führen diese zur in der Bodenmechanik gebräuchlichen Darstellung als DARCY-Geschwindigkeiten:

$$\tilde{\mathbf{v}}^{\beta s} = n S^{\beta} \mathbf{v}^{\beta s}$$

Durch die Überführung der mikroskopischen Zustandsgrößen von Mischung und Phasen auf gemittelte Größen auf der Makroskala kann das Problem des Zweiphasenflusses von Luft und Wasser im teilgesättigten Baugrund über makroskopische Bilanzgleichungen erfasst werden. Im vorliegenden Modell sind dies: die Massenbilanz des inkompressiblen Porenwassers

$$n \frac{\partial S^w}{\partial t} + \operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}}^{ws} + S^w \operatorname{div} \mathbf{u}^s = 0$$

die Massenbilanz der kompressiblen Porenluft modelliert als ideales Gas nach Boyle-Mariotte

$$\frac{n S^a}{\rho_a} \frac{\partial \rho_a}{\partial t} + n \frac{\partial S^a}{\partial t} + \frac{1}{\rho_a} \operatorname{grad} \rho_a \cdot \tilde{\mathbf{v}}^{as} + \operatorname{div} \tilde{\mathbf{v}}^{as} + S^a \operatorname{div} \mathbf{u}^s = 0$$

sowie über die Impulsbilanz der Mischung aller drei Phasen:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \rho \mathbf{g} = \mathbf{0}$$

Mit ρ als gemittelter Dichte und $\boldsymbol{\sigma}$ als gemitteltem CAUCHY Spannungstensor:

$$\boldsymbol{\sigma} = n \boldsymbol{\sigma}^s - (1 - n) (S^a p^a + S^w p^w) \mathbf{I}$$

Die somit eingeführten Bilanzgleichungen formen ein System aus vollgekoppelten, partiellen Differentialgleichungen, welches durch die Felder seiner primären Variablen, hier die Porenskelettverschiebungen und die Drücke in den fluiden Phasen (\mathbf{u}^s, p^w und p^a), gelöst wird.

2.2. KONSTITUTIVE GLEICHUNGEN

Um das Materialverhalten des teilgesättigten Baugrundes zu beschreiben, werden nun konstitutive Beziehungen zwischen den primären Variablen (\mathbf{u}^s, p^w und p^a) sowie den abhängigen Systemgrößen ($\rho^a, S^w, \tilde{\mathbf{v}}^{as}$ und $\tilde{\mathbf{v}}^{ws}$) formuliert. Die Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften des Bodens erfolgt über die *Soil Water Characteristic Curve*, die einen Zusammenhang zwischen Kapillardruck und Porensättigung etabliert, und die Beschreibung der Fluidströmungen. Dabei ist die Sättigung des Porenraumes mit Wasser (S^w) abhängig vom Druckunterschied zwischen Porenluft und Porenwasser (van Genuchten und Nielsen, 1985):

$$S^w = S_{\min}^w + (S_{\max}^w - S_{\min}^w) \left[1 + \left(\frac{p^c}{p_b} \right)^n \right]^{-m}$$

Hier beschreiben S_{\max}^w (S_{\min}^w), die obere und untere Grenze der Wassersättigung und n , m und p_b sind Materialparameter des Bodens. Der Fluss der fluiden Phasen durch den Porenraum ist nach DARCY's Gesetz abhängig von ihrem Druckgradienten:

$$\tilde{\mathbf{v}}^{\beta s} = -\frac{k^{\beta}}{\gamma^{\beta}} (\text{grad} p^{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g})$$

Die Permeabilitäten (k^{β}) hängen im Falle eines Zweiphasenflusses als Produkt ihrer intrinsischen Werte (k_0) und der relativen Permeabilitäten (k_{rel}^{β}) von der Wassersättigung ab. Die relativen Permeabilitäten sind dabei gleich 1 für den Fall der Vollsättigung und ergeben sich für die Teilsättigung nach (Mualem, 1976) zu:

$$k_{rel}^w = \sqrt{S^e} \left[1 - \left(1 - (S^e)^{1/m} \right)^m \right]^2$$

mit: $S^e = \frac{S^w - S_{\min}^w}{S_{\max}^w - S_{\min}^w}$

Die Beschreibung des Spannungs-Verformungs-Verhaltens des teilgesättigten Baugrundes ist unabhängig von der vorgestellten Mehrphasenformulierung. Im vorliegenden Modell wurden das *Clay And Sand* Modell (Yu, 1998), sowie eine Erweiterung dieses Modell auf Teilsättigung nach den Konzepten des *Barcelona Basic* Modells (Alonso et al., 1990) verwendet. Für beide Materialmodelle konnte dabei auf eine FORTRAN-Bibliothek zurückgegriffen werden, die im Rahmen des EU Forschungsprojektes TUNCONSTRUCT von Prof. A. Gens (Universität Politècnica de Catalunya, Spanien) bereitgestellt wurde. Das CAS-Modell ist ein Critical State Modell und stellt mit seiner logarithmischen Fließfläche in der p - q -Ebene und dem Vorkonsolidierungsdruck (p'_0), eine Erweiterung des *Original Cam Clay* Modells (Roscoe und Schofield, 1963) dar (siehe Abb.3a):

$$F = \left(\frac{\sqrt{3}J}{M_s p'} \right)^m + \frac{1}{\ln r} \ln \frac{p'}{p'_0} = 0$$

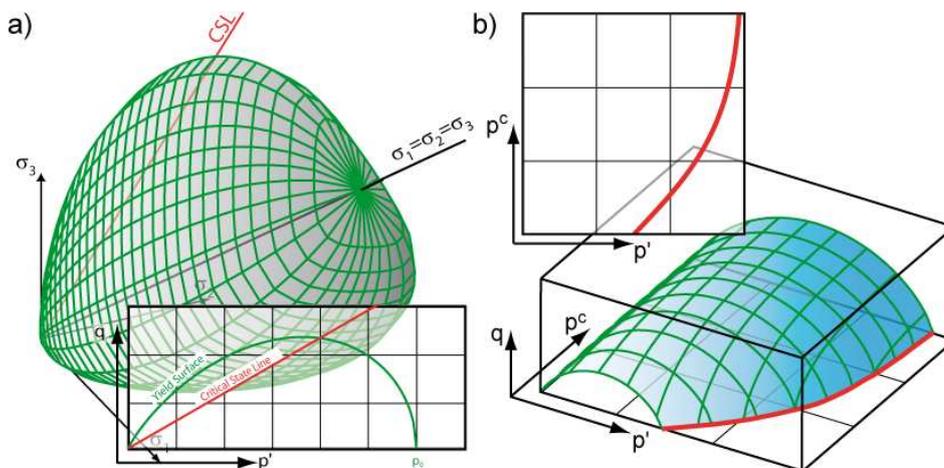
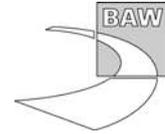


Abbildung 3: a) Fließfläche des Clay And Sand Modells (Yu, 1998) und b) Loading Collapse Curve und resultierende Fließfläche für Teilsättigung (Alonso et al., 1990)



Die Erweiterung des Modells auf Teilsättigung erfolgt über den Ausdruck des Kompressionsindex (λ) als Abhängige des Kapillardrucks (p^c) (Alonso et al., 1990) gemäß:

$$\lambda(p^c) = \lambda(0) \left[(1 - r^*) e^{-\beta p^c} + r^* \right]$$

Hierbei ist $\lambda(0)$ der Kompressionsindex für Vollsättigung, r^* das Verhältnis von Kompressionsindex für Vollsättigung und infiniten Kapillardruck und β kontrolliert die Krümmung der *Loading Collapse Curve* (LCC) (siehe Abb.3b). Die Verringerung des Kompressionsindex ist dabei gleichbedeutend mit einer Erhöhung des Vorkonsolidierungsdruckes mit steigendem Kapillardruck:

$$p'_0(p^c) = p_r \left[\frac{p'_0(0)}{p_r} \right]^{(\lambda - \kappa)/(\lambda_s - \kappa)}$$

Dabei kennzeichnet p_r die volumetrischen effektiven Spannungen kennzeichnet für die der Übergang zwischen den Kompressionskurven des teil- und vollsättigten Zustandes allein durch elastisches Schwellen möglich ist.

Für beide Modelle werden effektive Spannungen nach Bishop (1959) verwendet, unter der Annahme, dass der BISHOP-Parameter gleich der Wassersättigung des Porenraumes ist

$$\sigma^{ts} = \sigma + (S^w p^w + S^a p^a) \mathbf{I}$$

Während BISHOPs Spannungen als alleinige Spannungsvariable verwendet werden, wenn das Verformungsverhalten der Kornmatrix durch das CAS-Modell beschrieben wird, erfolgt die Anwendung von dessen Erweiterung auf teilgesättigte Zustände unter Berücksichtigung des Kapillardruckes als zusätzlicher Spannungsvariable. Diese Wahl von Spannungsparametern erlaubt zum einen die Simulation des Überganges von Teilsättigung zu Vollsättigung in einfacher Weise sowie zum anderen die Verwendung von Konstitutivgleichungen mit einem und zwei Spannungsparametern unter Beibehaltung der FE-Formulierung.

2.3. NUMERISCHE UMSETZUNG

Für die Implementierung des Modells im Rahmen der FE-Methode werden die Bilanzgleichungen in ihrer schwachen Form räumlich und zeitlich diskretisiert. Die räumliche Diskretisierung erfolgt unter Verwendung unterschiedlicher Approximationsgrade für die Fluiddrücke und die Festkörperdeformationen, während für die zeitliche Diskretisierung ein implizites Zeitintegrationsverfahren angewandt wird.

Zur Lösung der stark nichtlinearen, diskretisierten Systemgleichungen wird der Newton-Algorithmus auf Basis konsistenter Linearisierung der diskretisierten Bilanzgleichungen herangezogen. Weitere Details zum Bodenmodell und seiner Implementierung können (Nagel et al., 2007) entnommen werden.

3. Strukturbeispiel

Die Anwendbarkeit des dreiphasigen Bodenmodells für den Baugrund wird anhand ausgewählter Ergebnisse der Simulation einer Druckluftintervention an einem Hydroschild mit einem Durchmesser von 10 m und einer Überdeckungshöhe von 15 m gezeigt. Solch eine Intervention kann in voll- oder teilgesättigtem Baugrund erforderlich sein, wenn die Abbaukammer zur Wartung oder zum Austausch der Schneidwerkzeuge betreten werden muss. In diesem Fall wird das sich in der Abbaukammer befindliche Stützmedium (Erdbeim oder Betonitsuspension) durch Druckluft verdrängt um dadurch temporär die Stabilität der Ortsbrust sicherzustellen und das Eindringen von Grundwasser in die Abbaukammer zu verhindern. Hierbei können hinsichtlich der Wirkmechanismen der Ortsbruststützung zwei Szenarien unterschieden werden. Wird die Ortsbrust durch einen undurchlässigen (perfekten) Filterkuchen bedeckt, so wirkt dieser wie eine undurchlässige Membran und überträgt den Luftdruck direkt auf die Kornmatrix. Ist der Filterkuchen jedoch durchlässig, oder ist kein Filterkuchen vorhanden, so dringt die in der Abbaukammer befindliche Druckluft in den Boden ein. Der sich dabei ausbildende Druckgradient in der

Porenluft, welcher zu einem stetigen Abfluss der Druckluft führt, sowie die Erhöhung der Standfestigkeit des Baugrundes durch Austrocknung und das Zurückhalten des Porenwasser durch einströmende Druckluft gewährleistet die Stabilität der Ortsbrust (Javadi und Snee, 2002). Diese Situation ist Gegenstand des vorgestellten Strukturbeispiels.

In der vorliegenden Simulation wurde der Baugrund vereinfacht als für Wasser und Luft durchlässiges, elastisches Material modelliert. Grundwasser wurde als an der Geländeoberkante anstehend angenommen. Die folgenden Materialparameter wurden für die Modellierung des Bodens verwendet: Dichte $\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$, Elastizitätsmodul $E = 5250 \text{ kN/m}^2$, Querdehnzahl $n = 0.45$ und Porosität 20%. Die initialen Permeabilitäten des Bodens gegenüber dem Transport von Luft und Wasser wurden zu $k_0 = 14.4 \text{ cm/h}$, bzw. 144.0 cm/h angenommen.

Die Kapillardruck-Sättigungsbeziehung mit den Parametern $p_b = 3 \text{ kN/m}^2$, $n = 2.5$ und $m = 0.4$ ist durch einen relativ scharfen Übergang vom vollgesättigten zum ungesättigten Zustand gekennzeichnet. Die initiale Wasserdruckverteilung wurde als hydrostatisch angenommen. Die Druckluftstützung wurde als konstante Randbedingung für den Luftdruck von 253.4 kN/m^2 auf die Ortsbrust aufgebracht.

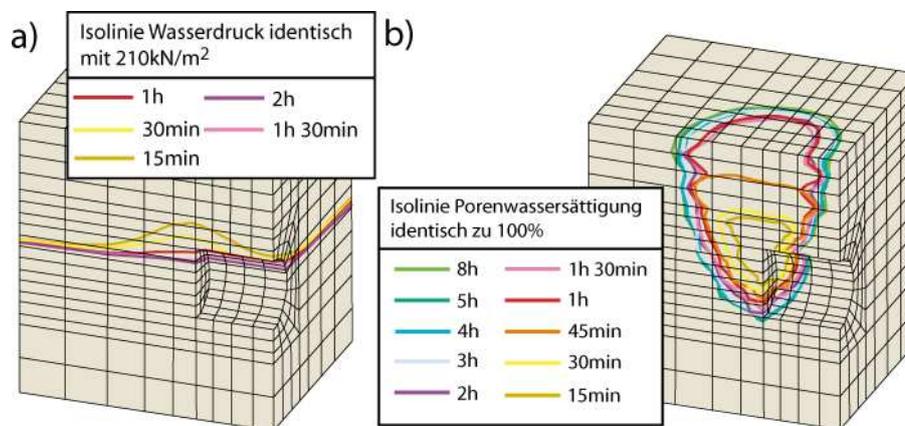


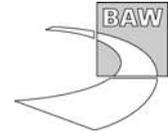
Abbildung 4: Ergebnisse für die Simulation einer Druckluftintervention: a) Isolinien für den Porenwasserdruck für verschiedene Zeitpunkte und b) Ausdehnung der teilgesättigten Zone für verschiedene Zeitpunkte

Gemäß Abb.4b lässt das Abströmen der Druckluft in den angrenzenden Baugrund eine teilgesättigten Zone vor der Ortsbrust entstehen, die sich während der Druckluftintervention sukzessive vergrößert und deren Sättigung nach und nach abnimmt. Mit dem Einströmen von Druckluft verändern sich auch die Drücke in den Porenfluiden (siehe Abb.4a). Für den Porenwasserdruck führt dies zu einem Anstieg des Druckes kurz nachdem Druckluft an der Ortsbrust aufgebracht wurde. Die temporär erhöhten Porenwasserdrücke bilden sich auf den hydrostatischen Druck zurück, nachdem die teilgesättigte Zone eine konstante Ausdehnung erreicht hat und die Druckluft kontinuierlich von der Ortsbrust zur Geländeoberkante abfließt (siehe Abb.4a) (s.a. Nagel et al., 2008b).

4. Diskussion und Ausblick

Zur Analyse der Ortsbruststützung mittels Druckluft wurde ein Simulationsmodell vorgestellt, mit welchem der Fluss von Luft und Wasser im Porenvolumen des Baugrundes als zeitabhängiges und mit den Verformungen des Bodens gekoppeltes Problem unter verschiedenen Randbedingungen beschrieben werden kann. Neben der Einführung in die mechanische und numerische Formulierung des FE-Modells und der konstitutiven Beziehungen wurden anhand eines Berechnungsbeispiels die Möglichkeiten eines solchen Modells erörtert. Die Anwendung eines solchen Modells ermöglicht es Wasserüberdrücke, Kornspannungen und Bodenverformungen zeitabhängig und realistisch zu modellieren, sowie das Abströmen von Druckluft aus der Abbaukammer über die Ortsbrust zu quantifizieren.

Zielsetzung des vorgestellten Baugrundmodells ist dabei, neben der vorgestellten Simulation von Druckluftstützungen, die Analyse des Baugrundverhaltens, insbesondere im Hinblick auf die sich ergebenden Oberflächensetzungen, unter den wechselnden Randbedingungen während des schildgestützten Tunnelvortriebs.



Danksagung

Die Autoren danken der Europäischen Kommission für die finanzielle Förderung dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojektes TUNCONSTRUCT (IP011817-2). Der Erstautor wurde ebenfalls durch die Ruhr-University Research School, finanziert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzinitiative unterstützt. Auch für diese Unterstützung sprechen die Autoren ihren Dank aus.

Literatur

- Alonso, E., Gens, A., and Josa, A., 1990, Constitutive Model for Partially Saturated Soils, *Geotechnique* 40:405–430.
- Bishop, A., 1959, The Principle of Effective Stress, *Teknisk Ukeblad* 39:859–863.
- Ehlers, W. and Bluhm, J., 2002, Porous Media, Springer.
- Ehlers, W., Graf, T., and Ammann, M., 2004, Deformation and Localization Analysis of Partially Saturated Soil, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.* 193:2885–2910.
- Gülzow, H., 1994, Dreidimensional Berechnung der Zweiphasenströmung beim Tunnelvortrieb unter Druckluft in wassergesättigten Böden, Doktorarbeit, RWTH Aachen.
- Hochgürtel, T., 1998, Numerische Untersuchungen zur Beurteilung der Standsicherheit der Ortsbrust beim Einsatz von Druckluft zur Wasserhaltung im schildvorgetriebenen Tunnelbau, Doktorarbeit, RWTH Aachen.
- Javadi, A. and Snee, C., 2002, Numerical Modeling of Air Losses in Compressed Air Tunneling, *Int. J. Comput. Methods* 2:399–417.
- Kasper, T. and Meschke, G., 2004, A 3D Finite Element Simulation Model for TBM Tunnelling in Soft Ground, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 28:1441–1460.
- Kasper, T. and Meschke, G., 2005, Numerische Untersuchungen zu den Wechselwirkungen bei Schildvortrieben im Lockergestein, *Bauingenieur* 80:413–421.
- Loret, B. and Khalili, N., 2000, A Three-phase Model for Unsaturated Soils, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 24:893–927.
- Mualem, Y., 1976, A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, *Water Resour. Res.* 12:513–521.
- Nagel, F., Stascheit, J., and Meschke, G., 2007, Three-phase Modeling and Numerical Simulation of Shield Tunnelling in Partially Saturated Soils, In J. Eberhardsteiner, G. Beer, C. Hellmich, H.A. Mang, G. Meschke, and W. Schubert (eds.), *Proceedings of the 1th. EURO:TUN (Computational Methods in Tunnelling)*.
- Nagel, F., Stascheit, J., and Meschke, G., 2008, A Numerical Simulation Model for Shield Tunnelling with Compressed Air Support, *Geomechanics and Tunnelling* 1:222–228.
- Nagel, F., Stascheit, J., and Meschke, G., 2008b, 3D Numerical Simulation of Heading Face Support in Partially Saturated Soils for Shield Tunnelling, In *Proc. IACMAG12, Goa (India)*.
- Öttl, G., 2003, Three Phase FE-Model for Dewatering of Soils by Means of Compressed Air, Ph.D.thesis, Universität Innsbruck.
- Roscoe, K. and Schofield, A., 1963, Mechanical Behaviour of an Idealised Wet Clay, In *Second ECSMFE*, Wiesbaden, pp. 47–54.
- Sheng, D., Sloan, S., and Gens, A., 2003, Finite Element Formulation and Algorithms for Unsaturated Soils. Part I: Theory, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 27: 745–765.
- van Genuchten, M. and Nielsen, D., 1985, On Describing and Predicting the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, *Ann. Geophys.* 3:615–628.
- Yu, H., 1998, CASM: A Unified State Parameter Model for Clay and Sands, *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 22:621–653.

