

# Effiziente und benutzerfreundliche 3-D Simulation des Tunnelvortriebs

Von Gernot Beer und Christian Duenser

## Einführung

Die Numerische Simulation spielt eine wichtige Rolle im Tunnelbau. Sie erlaubt es verschiedene Vortriebsmethoden zu untersuchen und die wirtschaftlichste und sicherste zu bestimmen.

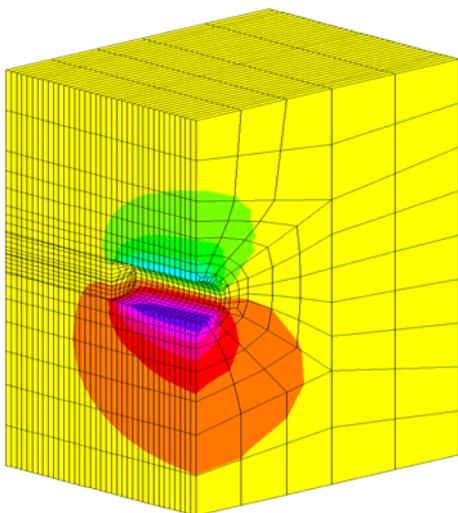


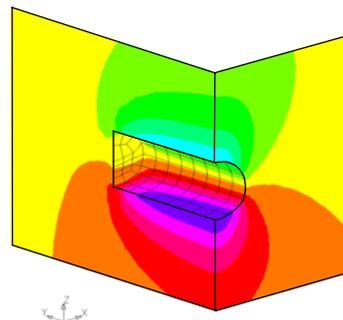
Bild 1: Vergleich zwischen der Methode der finiten Elemente und Randelemente

*Figure 1: Comparison between the finite and boundary element method*

Im Rahmen des Europäischen Forschungsprojektes „Technology Innovation in underground construction“ wird eine integrierte Optimierungplattform (IOPT) entwickelt.

Mit Hilfe moderner Informationstechnologie

ermöglicht IOPT die bestmögliche Methode des Tunnelvortriebs sowie die optimale Auslegung der Stützmittel zu bestimmen. Ein wichtiger Bestandteil von IOPT ist ein Simulationsprogramm. Die Anforderungen an dieses Programm sind sehr



anspruchsvoll:

- 3-D Simulation
- Extrem benutzerfreundliche Eingabe
- Selbständiger Ablauf des Programms
- Kurze Rechenzeiten

Derzeit gibt es kein Simulationsprogramm welches alle diese Vorgaben erfüllt. Ziel ist es, ein solches im Rahmen des Forschungsprojektes zu entwickeln.

## Efficient and user friendly 3-D simulation in tunneling

*A novel simulation program for the simulation of tunnel construction is presented, that is being developed within the European project “Technology Innovation in Underground Construction”. It is demonstrated that the program has significant advantages over currently used software.*

Im Beitrag wird ein Prototyp eines neuen Simulationsprogramms (BEFE++) für den Tunnelbau vorgestellt, welches im Rahmen des EU Projektes „Technology Innovation in Underground Construction“ entwickelt wird. Die Vorteile des Programms gegenüber derzeit gebräuchlichen Simulationen werden gezeigt.

## Methodik

In Hinblick auf die Anforderungen wie z.B. Benutzerfreundlichkeit und kurze Rechenzeiten, ist ein Erfolg nur mit einer grundsätzlichen Änderung der Simulationsmethode möglich. Derzeit verwendete Methoden, welche auf einer Gebietszerlegung basieren, sind nicht anwendbar, da der Aufwand für die Erstellung des Netzes und für die Berechnung zu hoch ist. Eine Alternative zu bekannten gebietsbasierten Methoden, wie z.B. der Finiten Elemente, Finiten Differenzen oder Diskreten Elemente, ist die Methode der Randelemente.

Die Methode der Randelemente (BEM) hat anderen Methoden gegenüber den wesentlichen Vorteil, dass das Netz nur die Ausbruchfläche und nicht den Boden beschreibt. Dadurch ergibt sich eine Reduktion der Dimension des Systems und ein drastisch kleinerer Aufwand für die Netzerstellung und die Berechnung. Bild 1 zeigt den Unterschied des Aufwandes zwischen einer Berechnung mit der Methode der finiten Elemente und der Randelementmethode. Das FEM Netz hat 10.000 Elemente, 110.000 Unbekannte und braucht einen Speicherplatz von 220 MB für die Resultate. Das BEM Netz hat nur 120 Elemente (1,2 % der FEM), 1203 Unbekannte (1,1 % der FEM) und verwendet 0.4 MB für die Speicherung der Resultate.

Man sieht, die wesentlich vereinfachte Netzgenerierung, und dass die Anzahl der Unbekannten drastisch reduziert wird. Die Resultate werden zunächst nur am Rand bestimmt, was ein weiterer Vorteil ist. Ergebnisse an beliebigen Punkten im Boden (Kontinuum) können jederzeit in einem Nachlauf berechnet werden und sind genauer als die der FEM. Ein unendlich ausgedehnter Raum bzw. Halbraum wird implizit berücksichtigt, d.h. künstliche Randbedingungen sind nicht notwendig.

Diese Methode wird derzeit im Tunnelbau wenig bis gar nicht eingesetzt. Der Grund hierfür ist der gegenwärtige Stand der Entwicklung, welcher weit hinter den derzeit gebräuchlichen Methoden liegt. So gibt es derzeit keine Software welche eine realistische Simulation im Tunnelbau durchführen kann.

## Stand der Entwicklung

Zu Beginn unserer Forschungsarbeit war der Stand der Entwicklung der BEM folgender:

- Simulation eines sequentiellen Vortriebs nicht möglich
- Nicht-lineares Materialverhalten möglich, aber aufwendig und benutzerunfreundlich
- Berücksichtigung der Heterogenität des Bodens nur gebietsweise möglich und mit zusätzlichem Aufwand verbunden
- Berücksichtigung von Stützmittel (Spritzbeton, Felsanker) grundsätzlich möglich, aber nicht sehr effizient.

## Neuentwicklungen

### Sequentieller Aushub

#### *Multiregion Methode*

Die Forschungsarbeiten zur Verbesserung der Situation begannen schon 2001 mit neuen Ideen zur Simulation des Tunnelvortriebs (Duenser, 2001). Der sequentielle Vortrieb wurde mit Hilfe einer Gebietszerlegungsmethode (Multiple Region Boundary Element Method (MRBEM)) modelliert, bei der die Volumina des auszuhebenden Bodens/Fels mit Randelementregionen beschrieben werden. Im Zuge des Berechnungsablaufes werden auf Basis dieser Regionen Steifigkeitsmatrizen berechnet. Auf der Grundlage von Gleichgewicht und Kompatibilität werden diese an den Trennflächen (Interfaces) der unterschiedlichen Regionen gekoppelt. Es wird ein Modell erstellt, bei dem alle zukünftigen Aushubschritte von Beginn der Berechnung an berücksichtigt sind. Dies bedeutet, dass die Größe des Gleichungssystems zu Beginn ein Maximum erreicht und während der Berechnung (Aushub bzw. Deaktivierung von Regionen) um die wegfallenden Kopplungsfreiheitsgrade reduziert wird.

Bild 2 zeigt die Diskretisierung eines Simulationsmodells für den sequentiellen Tunnelvortrieb mit einem in Kalotte und Strosse unterteilten Vortrieb. Die einzelnen Regionen, die für die Diskretisierung eines solchen Tunnelvortriebs notwendig sind, werden gezeigt. Das Lösungsverfahren dieser Methode ist mit einem nicht unbeträchtlichen Aufwand verbunden. Daher werden derzeit wesentlich effizientere Alternativen untersucht, die anschließend kurz beschrieben werden (siehe auch Duenser und Beer, 2007).

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden effizientere Methoden für den Vortrieb entwickelt. Diese ermöglichen es größere Tunnelabschnitte mit einem Minimum an Aufwand zu berechnen.

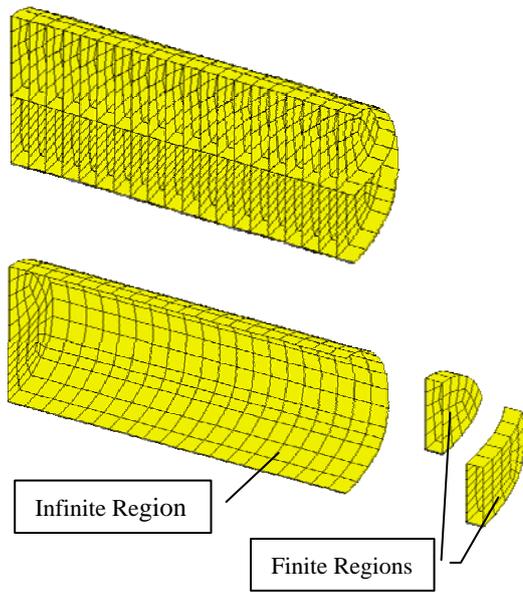


Bild 2: Diskretisierung des sequenziellen Tunnelaushubes mit der MRBEM

Figure 2: Discretisation of sequential tunnel excavation with the MRBEM

*Singleregion Methode 1*

Mit der Methode der Randelemente ist es möglich nach der Lösung der unbekannt Randwerte (Verformungen und Spannungen am Rand) Verformungen und Spannungen im Inneren des Kontinuums zu berechnen. In Bild 3, welches einen Längsschnitt durch die Tunnelachse darstellt, ist dies für den Lastfall n skizziert.

Um die Belastung (Aushubsspannungen) für den nächsten Aushubschritt zu erhalten, berechnet man nun zunächst die Verformung an jenen Punkten im Inneren, welche den nächstfolgenden Aushubzustand beschreiben (siehe Bild 3 oben, Punkte entlang den gestrichelten Linien). Man führt nun eine Zwischenrechnung an einer finiten Region durch, welche das Volumen des nächstfolgenden Aushubes beschreibt (siehe Bild 3, Mitte). Die Belastung hierfür ist die zuvor berechnete Verformung an der Oberfläche des nächstfolgenden Aushubes. Aus dieser Berechnung erhält man Randspannungen die als Belastung für den Lastfall n+1 aufgebracht werden (siehe Bild 3, unten).

*Singleregion Methode 2*

Hier wird statt der Verformung die Spannung an allen Punkten, welche das Volumen des nächstfolgenden Aushubzustandes beschreiben, ausgerechnet (siehe Bild 4 oben, entlang den gestrichel-

ten Linien). Von den Spannungswerten an diesen Punkten kann die Randspannung (Belastung für

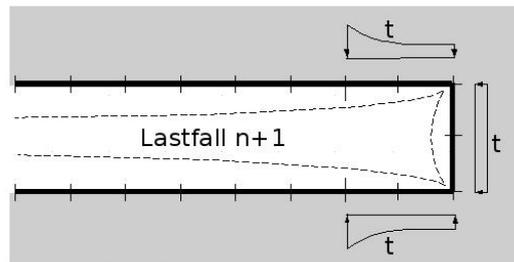
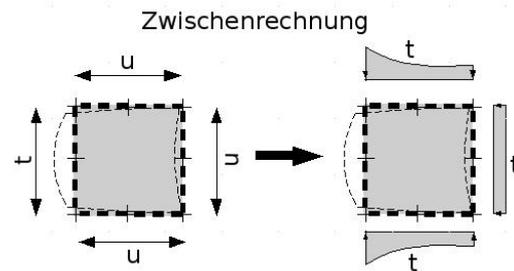
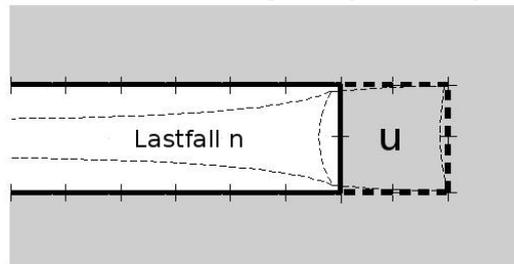


Bild 3: Sequenzieller Vortrieb mit Belastung aus inneren Verformungen

Figure 3: Sequential excavation with internal displacement calculation

den nächstfolgenden Aushubschritt) einfach durch Multiplikation mit der Normalen zur Aushubsfläche berechnet werden (siehe Bild 4, unten).

Bei diesem Verfahren ist die Zwischenrechnung, wie bei der zuvor beschriebenen Methode, nicht erforderlich. Die Schwierigkeit, die sich jedoch einstellt, ist die korrekte Berechnung der Randspannungen nahe an der Ecke. Bei diesem Punkt am Rand handelt sich um einen singulären Punkt, d.h. die Spannungen sind theoretisch infinite und können daher nicht berechnet werden. Eine erste Näherung der Randspannung in diesem Punkt, durch Extrapolation vom Inneren des Kontinuums her, brachten recht gute Ergebnisse, welche jedoch noch weiterer Verifizierung bedürfen.

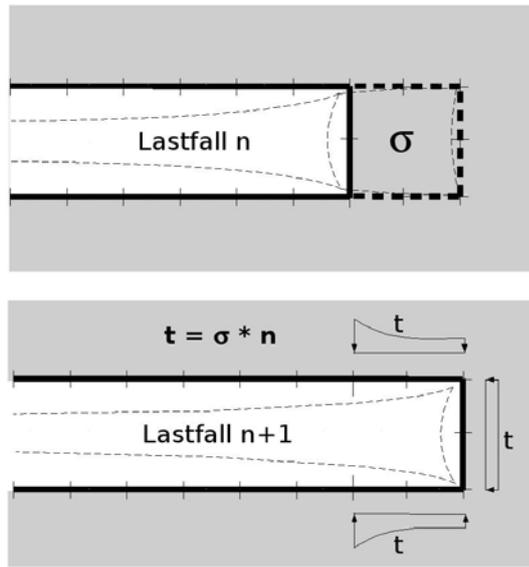


Bild 4: Sequenzieller Vortrieb mit Belastung aus inneren Spannungen

Figure 4: Sequential excavation with internal stress calculation

Beide Verfahren haben jedoch den Vorteil gegenüber der Methode der Gebietszerlegung (MRBEM), dass immer nur eine Region notwendig ist ("single region problem"), um den nächsten Aushubzustand zu berechnen. Das Randelementenetz wächst mit jedem Aushubschritt, d.h. der Aufwand zur Berechnung ist am Anfang der Berechnung sehr gering und nimmt dann stetig zu. Dies ist zudem ein Unterschied zur Methode der Gebietszerlegung (MRBEM), bei welcher das Netz zu Beginn die größte Anzahl an Freiheitsgraden besitzt. Durch die Reduzierung an Freiheitsgraden an ausgehobenen/deaktivierten Regionen wird im Zuge des sequentiellen Aushubes der Aufwand der Berechnung nur minimal kleiner.

*Bisherige Ergebnisse*

Für beide Methoden wurde eine Studie erstellt in der ein sequenzieller Vortrieb in 2D berechnet wird.

Bild 5 beschreibt einen Vortrieb in 2D bei dem fünf Abschlüsse sequenziell ausgehoben werden. Diese Art der Modellierung beschreibt einen Aushub der in z- Koordinatenrichtung (aus der Blattebene) unendlich ausgedehnt ist, es handelt sich hierbei also um keinen Tunnel. Für die Verifizierung der Ergebnisse dieser beiden Methoden ist dieses Modell aber sehr wohl geeignet.

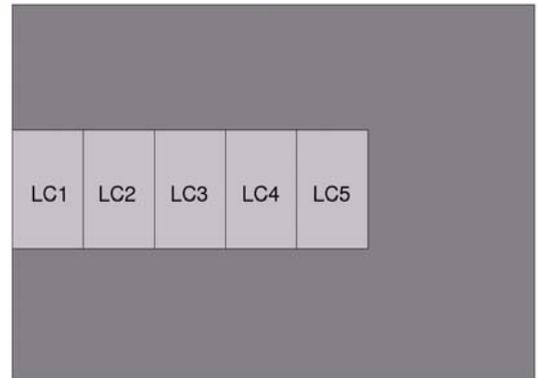


Bild 5: Vortrieb in fünf Aushubschritten

Figure 5: Excavation in 5 steps

In den Diagrammen von Bild 6 und 7 ist die vertikale Verformung entlang der Firste aufgetragen. Für die Methode 1 (Bild 6) ergeben sich ausgezeichnete Ergebnisse, die Verformungskurven der einzelnen Lastfälle (LC?\_NEW) stimmen mit der Referenzlösung (LC?\_REF) sehr gut überein.

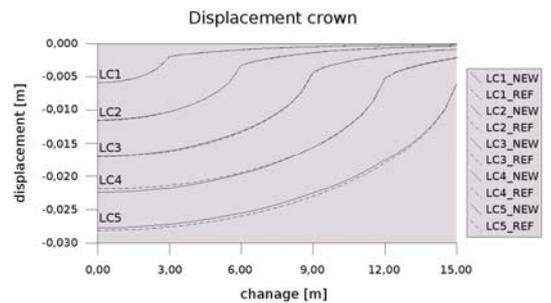


Bild 6: Vertikale Verformung an der Firste – Methode 1

Figure 6: Vertical displacements at crown – Method 1

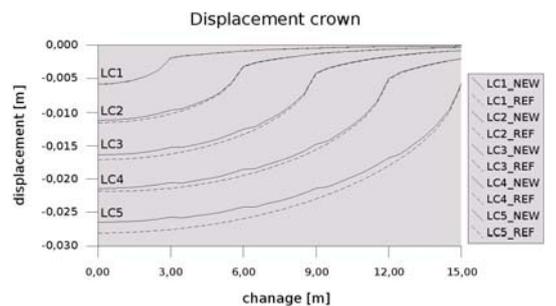


Bild 7: Vertikale Verformung an der Firste – Methode 2

Figure 7: Vertical displacements at crown – Method 2

Bei der Methode 2 (Bild 7) ergeben sich von Lastfall zu Lastfall größere Differenzen zur Referenzlösung. Dies ist auf die erwähnte Näherung der Randspannung an den singulären Punkten zurückzuführen.

## Nichtlineares Materialverhalten

Derzeit verwendete Methoden für die Simulation des nichtlinearen Materialverhaltens haben den Nachteil, dass in den Bereichen wo nichtlineares Materialverhalten erwartet wird, Zellen generiert werden müssen. Diese Zellen sehen den finiten Elementen sehr ähnlich. Der wesentliche Unterschied ist jedoch, dass keine zusätzlichen Freiheitsgrade generiert werden, da die Zellen nur für die Berechnung von Volumsintegralen verwendet werden. Da es einerseits für den Benutzer schwierig ist zu bestimmen, wo plastische Zonen zu erwarten sind, andererseits der Aufwand der Zellgenerierung nicht unbeträchtlich ist, wurde nach Alternativen gesucht.

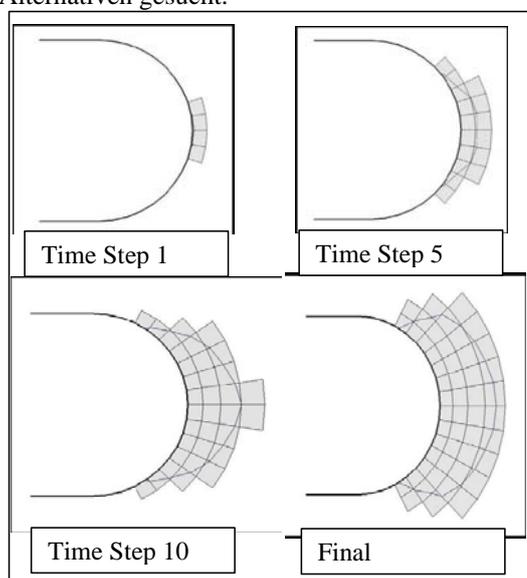


Bild 8: Beispiel einer automatischen Zellgenerierung  
 Figure 8: Example of an automatic cell generation

Eine Möglichkeit (Ribeiro, 2007, Thöni und Hafizi, 2007) ist die Zellen automatisch zu generieren. Da im Tunnelbau die plastischen Zonen meistens am Tunnelrand entstehen, werden die Zellen vom bestehenden Randelementnetz generiert.

Bild 8 zeigt an einem Detail die einzelnen Stufen der Zellgenerierung mit Zunahme der Ausdehnung der plastischen Zone.

## Heterogenität

Um realistische Simulationen zu erhalten, müssen die geologischen Verhältnisse (insbesondere die Steifigkeitsunterschiede) berücksichtigt werden. Dies war bisher nur über die Methode der Gebietszerlegung möglich. Ist die Heterogenität

stark ausgeprägt, dann ist diese Methode sehr aufwendig. Eine Alternative wird derzeit entwickelt. Hierbei werden ähnlich der Methode zur Behandlung von nichtlinearem Materialverhalten Zellen verwendet. Jedem Zellknoten kann ein Materialmodell und Materialparameter zugewiesen werden. Die Zellgenerierung und die Zuweisung der Werte an die Knoten wird vollkommen automatisch ablaufen, sodass für den Benutzer kein Mehraufwand entsteht.

## Stützmittel

Die Modellierung (Prazeres und Riederer 2007) der Spritzbetonschale wird mit Hilfe einer Kopplung mit finiten Schalenelementen realisiert. Für die Modellierung der Felsanker bzw. von Baugrundverbesserungsmaßnahmen (Rohrschirme) wird die Verwendung von Zellen untersucht. Dabei werden die Anker bzw. der Rohrschirm als Heterogenität (ähnlich der Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse) behandelt. Für Felsanker sollen eindimensionale und für den Rohrschirm zweidimensionale Zellen verwendet werden.

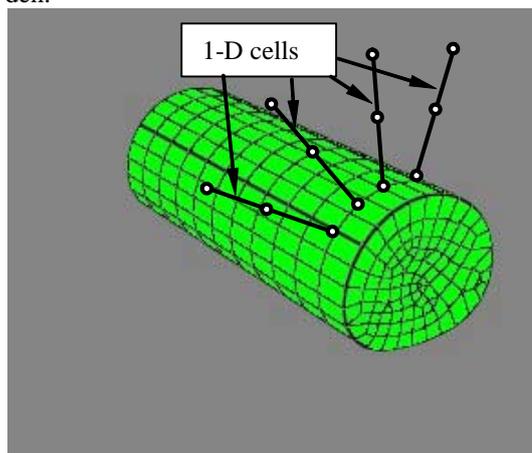


Bild 9: Modellierung von Felsankern mit eindimensionalen Zellen

Figure 9: Modelling of rock bolts with one dimensional cells

## Benutzerfreundlichkeit

Die Verwendung der Randelementmethode an sich bringt schon Wesentliches in Bezug auf Benutzerfreundlichkeit mit sich, da nur die Tunneloberfläche mit Elementen beschrieben werden muss. Zusätzlich ist geplant die Modellierung für den Tunnelbauer noch weiter zu vereinfachen, sodass nur die für die Simulation absolute notwendige Information bereitgestellt werden muss. Die Netzgenerierung und die Zuweisung von Materi-

alwerten aus geologischer Information sollen im Hintergrund vollkommen automatisch ablaufen. Natürlich sind in jeder Phase Möglichkeiten zur Änderung der automatisch generierten Daten vorgesehen.

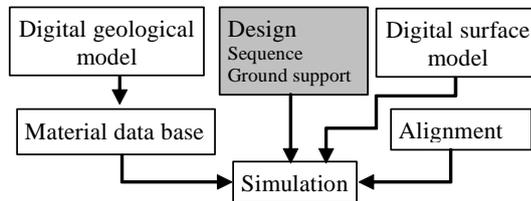


Bild 7: Flussdiagramm der numerischen Simulation  
*Figure 7: Flow diagram of numerical simulation*

Im Projekt TUNCONSTRUCT ist vorgesehen, dass alle Daten eines Projektes in einer Datenbank abgespeichert und automatisch eingelesen werden, sodass nur die Spezifizierung (über eine benutzerfreundliche Oberfläche) der Aushubsequenz und der Stützmittel notwendig ist.

Für die Eingabe der Aushubsequenz und der Stützmittel wird eine benutzerfreundliche graphische Oberfläche entwickelt. Der Tunnelquerschnitt kann entweder über eine Datenbank eingelesen oder mit Hilfe von Graphiktools eingegeben werden. Bild 10 zeigt ein Beispiel für die Darstellung der Ausbruchsequenz. Mit einem Slider kann man die einzelnen Schritte animieren.

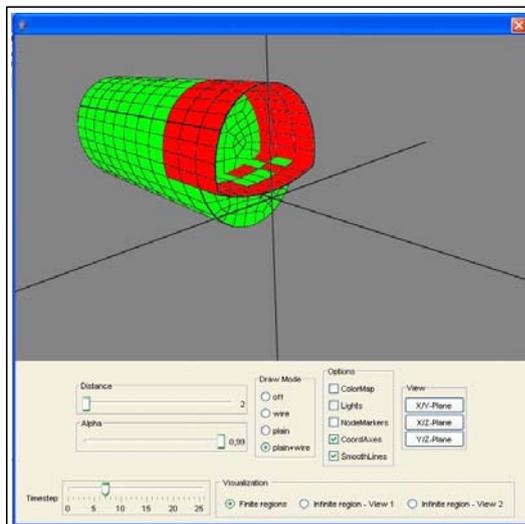


Bild 10: Beispiel einer Benutzeroberfläche für die Darstellung der Aushubsequenz, bzw. Einbau des Spritzbetons  
*Figure 10: Example of a user interface for showing the excavation sequence and application of shotcrete*

## Zusammenfassung

Eine innovative Simulationsmethode wurde vorgestellt. Der Vorteil dieser Methode gegenüber derzeit verwendeten Methoden ist eine wesentliche Verbesserung der Effizienz und der Benutzerfreundlichkeit. Dies ist Voraussetzung für die Einbindung des Programms in eine integrierte Plattform zur Optimierung des Tunnelvortriebs. Das Programmsystem wird im Rahmen eines integrierten EU Forschungsprojekts „Numerical Simulation in Underground Construction“ entwickelt, welches durch das 6. Rahmenprogramm der EU finanziell unterstützt wird.

## Literatur

1. Duenser, Ch.: Simulation of Sequential Tunnel Excavation with the Boundary Element Method. Verlag der Technischen Universität Graz, (2007).
2. Duenser, Ch., Beer, G.: New Algorithms for the Simulation of Sequential Tunnel excavation with the Boundary Element Method. Proceedings of Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), ECCOMAS, (2007).
3. Ribeiro T.: Elastoplastic boundary element method with adaptive cell generation. Verlag der Technischen Universität Graz, 2007
4. Thöni, K., Hafizi R., Beer G.: Efficient Calculation of non-linear Problems in Tunnelling using the Boundary Element Method. Proceedings of Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), ECCOMAS, (2007).
5. Prazeres, P. G. C., Riederer K., Beer G.: Numerical modelling of Ground Support with the Boundary Element Method. Proceedings of Computational Methods in Tunnelling (EURO:TUN 2007), ECCOMAS, (2007).