



# Neue Software für die numerische Simulation des Tunnelvortriebes mit der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM)

## *New Software for the Numerical Simulation of Tunnel Advance with the New Austrian Tunnelling Method*

Am 1.9.2002 hat am Institut für Baustatik an der TU Graz ein Forschungsprojekt zur Numerischen Simulation des Tunnelvortriebes mit Randelementen begonnen. Die Arbeiten werden durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) gefördert. Der Schwerpunkt liegt in der Entwicklung eines Computerprogramms zur Berechnung des sequentiellen Tunnelvortriebes unter Berücksichtigung von heterogenem, nichtlinearem und anisotropem Materialverhalten (Boden, Fels) und dem Einbau von Stützmitteln wie Spritzbeton und Anker gemäß der Neuen Österreichischen Tunnelbaumethode (NATM). Am Forschungsprojekt sind gegenwärtig ein Post-Doc, Dr. Marcos Noronha aus Brasilien, beschäftigt, und mit 1. April dieses Jahres wird Tatiana Ribeiro, ebenso aus Brasilien, als Doktorandin das Team vervollständigen. Forschungspartner ist Dr. T. G. Davies von der Universität Glasgow.

### Stand der Technik

Bis dato kommt in den meisten Fällen die Finite Elemente Methode (FEM) für die Berechnung des Tunnelaushubes zur Anwendung. Die Grenzen dieser Methode sind aber, wenn man sich in den dreidimensionalen Bereich vorwagt, bald erreicht. Der Aufwand zur Lösung eines 3-D Systems ist enorm. FE Netze in der Größenordnung von 100.000 Freiheitsgraden sind keine Seltenheit. Um mit der FEM eine ausreichende Genauigkeit zu erzielen bzw. einen ausreichend langen Tunnelabschnitt berechnen zu können, wäre oft die Lösung von Gleichungssystemen bis zu 1 Million Freiheitsgraden notwendig. Dieser enorme Aufwand betrifft nicht nur die Lösung von Gleichungssystemen in zeitlicher Hinsicht, sondern auch die Speicherung der anfallenden Daten und die Visualisierung dieser riesigen Datenmengen. Dies ist auch der Grund, weshalb oft nur zweidimensionale Berechnungen durchgeführt werden, und auf eine 3-D Analyse vollkommen verzichtet wird. Der Tunnelaushub, im Speziellen im Bereich der Ortsbrust, ist auf jeden Fall ein dreidimensionales Problem. Auftretende Verformungen und Spannungen in diesem Bereich können mit 2-D Berechnungen nicht mit ausreichender Genauigkeit ermittelt werden. An der Baustelle wäre es wünschenswert ein Berechnungswerkzeug zur Verfügung zu haben, um gemessene Verformungen mit berechneten zu vergleichen, Materialparameter zu eichen, um Voraussagen zu treffen oder einen Trend über das Verhalten in der Zukunft abzuleiten.

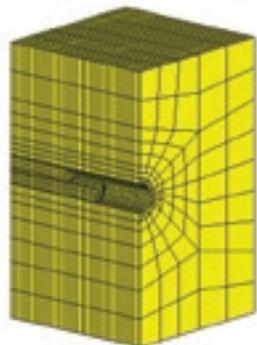


Abb. 1: FE Netz

Im Gegensatz zur FEM, bei welcher das Kontinuum durch eine so genannte "Box" angenähert wird und das gesamte Volumen in kleinere Volumina aufgeteilt werden muss (Diskretisierung), ist bei der Randelementemethode (Boundary Element Method, BEM), wie der Name schon besagt, nur der Rand zu beschreiben. Beim Tunnel bedeutet dies lediglich eine Diskretisierung der Tunneloberfläche.

Der infinite oder semi-infinite Boden/Fels ist in der Lösung implizit enthalten. Dies bedeutet eine Reduzierung des Aufwandes um eine Größenordnung, d.h. Reduzierung auf einige 1000 Freiheitsgrade. Wie sich durch Vergleichsrechnungen gezeigt hat, ist auch die Genauigkeit der Lösung höher als bei der FEM. Bei der FEM werden durch die notwendige Beschränkung des infiniten Kontinuums auf eine "Box" künstliche Randbedingungen eingeführt, welche schließlich das Ergebnis verfälschen.

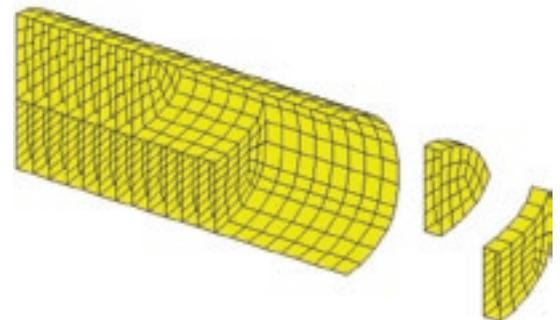


Abb. 2: BE Netz

### Schwerpunkte des Forschungsprojektes

Die Anwendbarkeit der BEM beschränkt sich in ihrer ursprünglichen Formulierung auf homogenes elastisches Material und ist noch nicht geeignet, den sequentiellen Aushub mit mehreren Regionen zu berechnen. Für die Berechnung des sequentiellen Tunnelvortriebes ist die BEM dahingehend zu erweitern, dass jedes Volumen, welches einen Abschlag darstellt, durch eine weitere Region diskretisiert wird. Dabei handelt es sich um die so genannte "Multiple Region Boundary Element Method (MRBEM)". Mit diesem Verfahren werden von den einzelnen Regionen, ähnlich wie bei der FEM, Steifigkeitsmatrizen ermittelt, wobei jede Region ein Superelement darstellt. Diese werden anschließend unter Anwendung von Gleichgewicht und Kompatibilität zu einem globalen Gleichungssystem assembliert.

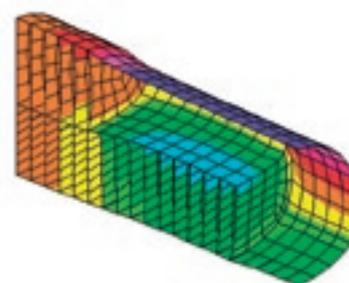


Abb. 3: Verformtes BE Netz

Als Lösung dieses Gleichungssystems erhält man die Verformungen an den Knoten der Kopplungsflächen der Regionen. Das Gleichungssystem ist im Vergleich zur FEM um eine Ordnung kleiner, ebenso der Aufwand zur Speicherung der Ergebnisse. Die beschriebene Methode erlaubt es, auch inhomogenes Material wie verschiedene Bodenschichten oder Klüfte im Fels zu modellieren.

Die Berücksichtigung von nichtlinearem, inelastischen Materialverhalten erfolgt durch die Lösung eines Integrals über das Volumen der entstehenden plastischen Zone. Die Größe dieser Zone ist im

Voraus nicht bekannt. Ein Ziel dieser Forschungsarbeit ist es daher, einen Algorithmus zu entwickeln, welcher die plastische Zone vom Rand des Tunnels sukzessive anwachsen lässt. Bei diesem Algorithmus werden am Rand, nach erfolgter Überprüfung der Fließbedingung, Zellen generiert. In einem iterativen Prozess werden nun diese Zellen in der plastischen Zone automatisch angeordnet. Der Benutzer dieses Rechenprogramms muss sich daher weder im vorhinein Gedanken über die zu erwartende Größe der plastischen Zone machen, noch muss er diese Zone durch Zellen diskretisieren. Durch einen nichtlinearen iterativen Prozess entsteht dann der endgültige plastische Bereich. Durch Lösung des Integrals über das Volumen kommt es zu keiner Änderung der Größe des Gleichungssystems, wodurch der Vorteil des kleinen Gleichungssystems in der BEM gegenüber der FEM erhalten bleibt. Dieser Algorithmus ist einer der Schwerpunkte dieser Forschungsarbeit.

In der NATM sind Stützmittel wie Spritzbeton und Felsanker ein wesentliches Element der Bauabfolge. Sie werden nachlaufend zu den Abschlüssen sequentiell eingebaut. Um die NATM rechnerisch simulieren zu können, müssen diese wesentlichen Konstruktionselemente im Modell inkludiert werden. Es ist vorgesehen, den Einbau von Spritzbeton durch eine Koppelung mit finiten Elementen zu modellieren. Dabei werden Schalenelemente mit der Randelemente-region gekoppelt. Da Schalenelemente in 3-D in der FEM Flächenelemente sind, müssen diese nicht gesondert diskretisiert werden. Es werden die Randelemente, welche die Tunneloberfläche bilden, bezüglich ihrer Geometrie als Schalenelemente verwendet. Die Randelementeregionen sind, wie schon erwähnt, in Form von Steifigkeitsmatrizen vorhanden. Aus diesem Grund ist eine Koppelung mit Finiten Elementen möglich.

Ein weiterer Punkt in diesem Forschungsprojekt ist die Adaptierung von bestehenden Prä- und Postprozessoren auf die oben erwähnten Modellierungsschwerpunkte. Eine Auslegung des Computercodes auf Parallelrechner wird angestrebt.

### **Numerical Simulation of Tunnel Advance using the Boundary Element Method (BEM)**

*In September 2002 the research project "Numerical Simulation of Tunnel Advance using the Boundary element method" has started at the institute for structural analysis, TU Graz. The Project is supported by the Austrian Science Fund (FWF). The aim is the development of a computer program which can deal with the numerical simulation of tunnel advance in heterogeneous, viscoplastic and anisotropic ground using the New Austrian Tunnelling Method (NATM), which involves sequential excavation and the installation of ground support in the form of shotcrete and rock anchors. At present two post-docs are employed and in April a PhD student will join the team. A cooperation with the University of Glasgow (Dr. T. G. Davies) exists.*

#### **State of the art**

*The Finite Element Method (FEM) has been used extensively in the past for the simulation of tunnel advance and has been found to give results which compare well with observation. However, one of the drawbacks of the method especially for the 3-D simulation is that the amount of effort to obtain a solution is considerable. Experience with applying the FEM to NATM tunnels has shown that meshes in the excess of 100 000 degrees of freedom and up to 50 excavation/construction stages have to be used to obtain*

*meaningful results. Even with modern mesh generation methods and solvers the effort in performing such an analysis is still considerable. For more complex tunnel/cavern systems the computing effort is even more pronounced and meshes with 800 000 Elements have been reported. It is appropriate therefore to look for cheaper, more user friendly and effective analysis methods. The reason for the large number of elements that are required is due to the fact, that the domain that has to be modelled, is for all practical purposes of infinite extent. Therefore with the FEM a box of elements has to be generated with artificial boundary conditions applied at the edges (also referred to as mesh truncation). Tests have shown that unless these artificial boundaries are sufficiently far enough away, the results will be influenced by their presence and be in error.*

#### **Aims of the research project**

*The single region BEM using surface discretisation, can only deal with homogeneous, elastic domains and is not suitable for the analysis of sequential tunnel excavation. Extension of the method to multiple regions makes it possible to consider piecewise inhomogeneous domains and also allows the consideration of sequential excavation. This approach utilises a philosophy similar to that used by the finite element method. The idea is to compute a "stiffness matrix" for each region. This stiffness matrices are assembled to a global set of equations and solved for the unknown displacements at the coupled nodes at region interfaces. Geological features such as different rock types can be considered well with the multi-region concept and with not too much effort joints and faults can be modelled also. To be able to use the program for realistic tunnelling simulation, elasto-plastic or visco-plastic material behaviour needs to be implemented. To implement this facility in a multi-region method, plasticity will have to be checked and internal cells generated in each region separately.*

*We therefore propose a novel method for dealing with plasticity in the BEM. We suggest to automatically and adaptively generate a mesh of cells as the plastic zone grows. The premise of this method is that plasticity starts at a boundary where boundary elements exist, for example the excavation surface, and then moves inside regions. From our experience with the numerical simulation of tunnel excavation we believe this to be a reasonable assumption. The cells do not add to the number of unknowns of the system of equations. During the non-linear iterations the mesh of internal cells will grow with the zone of plastic straining. The advantage of the proposed method is therefore a drastic increase in efficiency as compared with conventional methods, because cells are only generated where needed. The method is also more user friendly, because the user of the program need not even be aware of the internal cells and these do not have to be generated prior to the analysis being carried out. This adaptive internal cell generation is the main innovation of this project. The challenge will be to develop a robust algorithm for cell generation that works in all cases. The next objective of the project will be to include the effect of ground support. For modelling the thin shotcrete lining we propose to couple the boundary element regions with shell elements. As mentioned above, this can be easily achieved with the proposed multi-region implementation because the shell elements are treated in the same way as the other regions, i.e. their stiffness matrix is assembled into the global system of equations. Since the boundary elements already exist where shotcrete elements are applied they need not to be generated separately. The final work in the project will be to optimise the program. This includes taking advantage of the fact that regions which are geometrically identical (slice regions) have the same stiffness matrix, which only needs to be calculated once, and the modification of the software to run on hardware with more than one processor.*