



# Finite Elemente Simulation maschineller Tunnelvortriebe in wassergesättigtem Lockergestein

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen  
der Ruhr-Universität Bochum zur Erlangung  
des Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte

**Dissertation**

von

**Thomas Kasper**

Lehrstuhl für Statik und Dynamik  
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum  
November 2004



Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:  
Geschäftsführender Direktor des  
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau  
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2005-1

**Thomas Kasper**

**Finite Elemente Simulation maschineller  
Tunnelvortriebe in wassergesättigtem Lockergestein**

Shaker Verlag  
Aachen 2005

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2004

Copyright Shaker Verlag 2005

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-3665-1

ISSN 1614-4384

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

---

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand in den Jahren 1999–2004 im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Statik und Dynamik der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation angenommen.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen herzlich bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. techn. Günther Meschke für die Anregung und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Ferner bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. techn. Gernot Beer und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dietrich Stein für das Interesse an meiner Arbeit und die freundliche Übernahme des zweiten und dritten Berichts. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft danke ich für die finanzielle Förderung meiner Forschungstätigkeit.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Statik und Dynamik für ihre Hilfsbereitschaft, die gute Zusammenarbeit und die freundschaftlichen Kontakte.

Schließlich gilt mein herzlicher Dank meiner Familie für die Unterstützung im Vorfeld und speziell in den vergangenen Jahren.

Bochum, im November 2004

Thomas Kasper

Referenten:

Prof. Dr. techn. Günther Meschke  
Lehrstuhl für Statik und Dynamik  
Ruhr-Universität Bochum

Prof. Dr. techn. Gernot Beer  
Institut für Baustatik  
Technische Universität Graz

Prof. Dr.-Ing. Dietrich Stein  
Arbeitsgruppe Leitungsbau und  
Leitungsinstandhaltung  
Ruhr-Universität Bochum

Tag der Einreichung: 26. Mai 2004

Tag der mündlichen Prüfung: 21. Juli 2004

## Kurzfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines dreidimensionalen Finite Elemente Simulationsmodells für den Tunnelbau im Schildvortrieb, das alle wesentlichen, vortriebsrelevanten Komponenten und Prozesse berücksichtigt und den schrittweisen Vortriebsprozess realitätsnah abbildet. Mit Hilfe eines solchen Modells lassen sich die zu erwartenden Setzungen an der Geländeoberfläche sowie die Beanspruchungen und Verformungen des Tunnelausbaus prognostizieren und die komplexen Wechselwirkungen zwischen Boden, Vortriebsmaschine, Tunnelausbau, Vortriebspresen und Verpressung des Ringspalts detailliert analysieren.

Durch die Modellierung des Bodens und des Ringspaltverpreßmörtels als gesättigte, poröse Materialien mit Hilfe einer Zweifeldformulierung wird einerseits die Simulation von Vortrieben im Grundwasser ermöglicht, andererseits erlaubt dies eine adäquate Berücksichtigung einer Flüssigkeitsstützung an der Ortsbrust sowie der Verpressung des Ringspalts. Der Verpreßmörtel wird vereinfacht als elastisches Material modelliert, dessen Erhärtung durch eine zeitabhängige Steifigkeit und Permeabilität Berücksichtigung findet. Zur Beschreibung des Materialverhaltens weicher, bindiger Böden wird ein elastoplastisches Cam-Clay Modell verwendet. Der Simulationsablauf wird durch ein eigenes Programm automatisiert, um eine benutzerfreundliche, automatische Simulation beliebig langer, auch gekrümmter Vortriebsstrecken zu ermöglichen.

Anhand einer prototypischen Simulation eines oberflächennahen Hydroschildvortriebs in homogenem, weichem und bindigem Boden wird das Modell auf seine Aussagekraft getestet und durch einen Vergleich der Ergebnisse mit Meßdaten verifiziert. Ausgehend von der untersuchten Situation werden umfangreiche, systematische Parameterstudien durchgeführt, deren Ergebnisse Aufschluß über den qualitativen und quantitativen Einfluß der verschiedenen Parameter speziell auf die vortriebsbedingten Setzungen der Geländeoberfläche und die Beanspruchungen des Tunnelausbaus geben.

## Abstract

This thesis is concerned with the development of a three-dimensional finite element simulation model for shield tunnelling, which takes into account all relevant components and processes and realistically models the step-by-step process of the tunnel advance. This model can be used for the prediction of the tunnelling induced surface settlements and the loading and deformation of the tunnel lining. Furthermore, the complex interactions between the soil, the shield machine, the tunnel lining, the hydraulic jacks and the grouting of the tail void can be analysed in detail.

The soil and the tail void grout are modelled as saturated, porous materials using a two-field finite element formulation in order to allow for the simulation of tunnel advances below the ground water table and to allow for an adequate representation of slurry face support and the grouting of the tail void. The tail void grout is modelled in a simplified manner as an elastic material. Its hydration is considered by means of a time-dependent stiffness and permeability. An elasto-plastic Cam-Clay model is used to describe the material behaviour of soft, cohesive soils. The simulation procedure has been automated by means of a supplementary program in order to allow for a user-friendly, automatic simulation of arbitrarily long, also curved tunnelling sections.

By means of a prototype simulation of a shallow, hydroshield-driven tunnel advance in homogeneous, soft, cohesive soil the prognosis capabilities of the model are tested and the results of the model are verified by comparison with measurement data. Starting from the analysed situation, extensive and systematic parametric studies are performed in order to investigate the qualitative and quantitative influence of the different parameters especially on the surface settlements and the loading of the tunnel lining.

# Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis . . . . .	vii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Die Technik des Schildvortriebs . . . . .	3
1.3 Stand der Forschung . . . . .	7
1.4 Ziele und Umfang der Arbeit . . . . .	14
1.5 Gliederung der Arbeit . . . . .	15
<b>2 Modellierung des Tunnelvortriebs</b>	<b>17</b>
2.1 Modellierung des Bodens . . . . .	17
2.2 Modellierung der Ortsbrust . . . . .	18
2.2.1 Modellierung der Ortsbruststützung . . . . .	18
2.2.2 Umsetzung der Ortsbruststützung im Simulationsmodell . . . . .	24
2.2.3 Modellierung des Bodenabbaus . . . . .	26
2.3 Modellierung der Schildmaschine . . . . .	29
2.4 Modellierung der Vortriebspresen und Schildsteuerung . . . . .	31
2.5 Modellierung der Ringspaltverpressung . . . . .	34
2.6 Modellierung des Tübbingausbaus . . . . .	39
2.7 Modellierung des Nachläufers . . . . .	40
2.8 Simulationsablauf . . . . .	40
2.8.1 Primärzustand . . . . .	40
2.8.2 Vortriebssimulation . . . . .	41
2.8.3 Konsolidierung . . . . .	44
2.9 Automatisierung der Simulation . . . . .	44
2.10 Ergebnisauswertung . . . . .	45



---

<b>3</b>	<b>Zweiphasenformulierung für Boden und Ringspaltverpreßmörtel</b>	<b>51</b>
3.1	Grundgleichungen . . . . .	51
3.2	Numerische Umsetzung . . . . .	54
3.2.1	Anfangs- und Randbedingungen . . . . .	54
3.2.2	Schwache Form des Anfangsrandwertproblems . . . . .	55
3.2.3	Zeitliche Diskretisierung . . . . .	55
3.2.4	Linearisierung . . . . .	56
3.2.5	Räumliche Diskretisierung . . . . .	56
3.2.6	Iterative Lösung . . . . .	59
3.3	Verifikation: eindimensionale Konsolidierung . . . . .	59
<b>4</b>	<b>Materialmodelle für den Boden</b>	<b>63</b>
4.1	Volumetrisch-deviatorische Aufspaltung von Spannungen und Verzerrungen	63
4.2	Das Drucker-Prager Modell . . . . .	64
4.3	Das Cam-Clay Modell für bindige Böden . . . . .	65
4.3.1	Kompressionsverhalten toniger Böden . . . . .	66
4.3.2	Nichtlinear elastisches Gesetz . . . . .	67
4.3.3	Elastoplastizität . . . . .	69
4.3.4	Cam-Clay Modellverhalten . . . . .	76
4.3.5	Konvergenzstabilität des Return-Mapping Algorithmus . . . . .	79
<b>5</b>	<b>Materialmodell für den Ringspaltverpreßmörtel</b>	<b>84</b>
5.1	Grundlagen . . . . .	84
5.2	Zeitabhängige Elastizität . . . . .	88
5.3	Zeitabhängige Permeabilität . . . . .	90
<b>6</b>	<b>Beispiel und Verifikation</b>	<b>91</b>
6.1	Beispiel: oberflächennaher Tunnelvortrieb in weichem, bindigem Boden . .	91
6.2	Berechnungsergebnisse . . . . .	97
<b>7</b>	<b>Parameterstudien</b>	<b>111</b>
7.1	Übersicht . . . . .	111
7.2	Filterkuchenbildung und Stützdruck an der Ortsbrust . . . . .	113
7.3	Verpreßdruck im Ringspalt . . . . .	121
7.4	Nachläufergewicht . . . . .	124

7.5	Gewicht der Schildmaschine . . . . .	127
7.6	Länge der Schildmaschine . . . . .	130
7.7	Schildkonizität . . . . .	133
7.8	Biegesteifigkeit der Pressen . . . . .	136
7.9	Nachgiebigkeiten des Bodens . . . . .	141
7.10	Reibungswinkel des Bodens . . . . .	145
7.11	Vorkonsolidierung des Bodens . . . . .	148
7.12	Permeabilität des Bodens . . . . .	152
7.13	Permeabilität des Verpreßmörtels . . . . .	156
7.14	Ansteifverhalten des Verpreßmörtels . . . . .	158
7.15	Tiefenlage des Tunnels . . . . .	161
7.16	Schildmantelreibung . . . . .	165
7.17	Zusammenfassung der Parameterstudien . . . . .	169
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>171</b>
8.1	Zusammenfassung . . . . .	171
8.2	Ergebnisse der Arbeit . . . . .	172
8.3	Ausblick . . . . .	174