

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN  
Fakultät Bauingenieurwesen

**An extended bounding surface model  
for the application to  
general stress paths in sand**

Ein erweitertes Bounding Surface Modell  
für die Anwendung auf allgemeine Spannungspfade im Sand

An der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Dresden  
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) eingereichte

DISSERTATION

vorgelegt von

DIPL.-ING. KATHARINA BERGHOLZ

geboren am 2. Januar 1984 in Jena

Hauptgutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle  
Nebengutachter: Prof. Dr.-Ing. Thomas Benz  
Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolfersdorff

Tag der Einreichung: 11.02.2019  
Tag der Verteidigung: 03.06.2019

# Abstract

The prediction of settlements in infrastructural design puts high demands on the numerical analysis of the subsoil and the associated constitutive model: complex installation processes and the repetitive character of live loads pose considerable challenges. Although in this context the main focus is on the analytical requirements of a geotechnical problem in order to realistically capture soil behaviour, the needs of engineering practice should not be neglected in constitutive modelling. Along these lines, a new soil model for non-cohesive soils has been developed in the theoretical framework of elastoplasticity.

Based on the concept of bounding surface plasticity according to Manzari and Dafalias [MD97], soil properties such as strength, stiffness and dilatancy depend on the distance between the current stress state and a corresponding model surface in stress space. This way the multi surface model correctly reproduces elementary behavioural patterns of soil, including for example shear related phenomena such as hardening/softening, contraction/dilation and attainment of critical state (constant volume shear strength). Moreover, the model captures the state dependence of soil behaviour (barotropy and pycnotropy). Thus, with only one set of material parameters, the mechanical behaviour of a wide range of initial soil states with respect to stress and void ratio can be simulated (unified modelling). The kinematic hardening mechanism of the conical yield surface contributes to a realistic stiffness evolution in un- and reloading and is hence essential for stress or strain accumulation due to load reversals.

Since the chosen modelling framework is suitable for further development, the original formulation has been extended to adapt the model to the defined needs. In order to adequately simulate geotechnically relevant stress paths of low and higher complexity, first of all, a cap shaped yield surface was added to allow for plastic straining not only in shear, but also in constant stress ratio loading (e.g. isotropic or oedometric compression). When it comes to stress paths of unconventional orientation, to load reversals or composed stress paths with changes in loading direction, a supplementary stiffness increase at small strains and its subsequent strain dependent degradation have proven valuable. Furthermore, an additional mechanism accounts for a regressive accumulation of stresses or strains with increasing number of load cycles (in terms of dissipated energy).

In view of its suitability for practical use, all model extensions are structured in a modular fashion, so that the complexity of the model (and hence the amount of parameters) can be adapted to the complexity of the geotechnical problem by activating or deactivating certain features. Most model parameters can be determined by conventional laboratory testing. An internal routine optionally facilitates the parameter choice by calibrating certain bounding surface related parameters from an alternative user input, which is more oriented towards experimental outcome.

Since a good understanding of a material model is crucial for its reasonable and responsible use, the present thesis aims at offering a sound documentation. Thus, the first part gives an outline

of the underlying bounding surface concept and describes the innovations on the constitutive level with reference to theoretical considerations. It is followed by a detailed analysis of capabilities and limitations of the extended model. The next part is dedicated to the numerical implementation of the soil model and its calibration procedure on the basis of laboratory test results. Moreover, the embedded calibration routine including the applied optimisation algorithm is presented. The subsequent section serves model validation: by means of element test simulations, generation of response envelopes as well as the reproduction of more general (e.g. composed) stress paths the performance of the extended bounding surface model is demonstrated. Finally, the last chapter draws conclusions and discloses potential future perspectives.

# Zusammenfassung

Die Prognose von Setzungen für die Bemessung von Infrastrukturbauwerken stellt hohe Anforderungen an die numerische Untersuchung des Baugrunds und das damit verbundene Stoffgesetz: komplexe Herstellungsprozesse und zyklisch wiederkehrende Verkehrslasten stellen beachtliche Herausforderungen dar. Während das Hauptaugenmerk zumeist auf der realitätsnahen Abbildung des Bodenverhaltens liegt und damit die analytischen Anforderungen des geotechnischen Problems im Fokus stehen, sollten die Bedürfnisse der Ingenieurspraxis in der Stoffgesetzmodellierung nicht außer Acht gelassen werden. In diesem Sinne wurde im Rahmen der Elastoplastizität ein neues Materialmodell für nichtbindige Böden entwickelt.

Auf dem Konzept der Bounding Surface Plastizität nach Manzari und Dafalias [MD97] beruhend, sind Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit und Dilatanz Funktion des Abstands zwischen aktuellem Spannungszustand und einer zugeordneten Modellfläche im Spannungsraum. Auf diese Weise bildet das Mehrflächenmodell fundamentale Verhaltensmuster von Boden korrekt ab, einschließlich beispielsweise scherbezogener Phänomene wie Ver- und Entfestigung, Kontraktanz und Dilatanz oder das Erreichen des kritischen Zustands (Scherfestigkeit bei konstantem Volumen). Des Weiteren erfasst das Modell die Zustandsabhängigkeit des Bodenverhaltens (Barotropie und Pyknotropie). So kann mit nur einem Parametersatz das mechanische Verhalten einer großen Spannweite unterschiedlicher Anfangszustände hinsichtlich Spannung und Lagerungsdichte simuliert werden. Der kinematische Verfestigungsmechanismus der konusförmigen Fließfläche trägt bei Ent- und Wiederbelastungen zu einer realistischeren Steifigkeitsentwicklung bei und ist damit von essenzieller Bedeutung für die Akkumulation von Spannungen oder Verformungen infolge von Lastwechseln.

Da sich der gewählte konstitutive Rahmen für Weiterentwicklungen eignet, wurde die ursprüngliche Formulierung des Stoffgesetzes erweitert, um das Modell an die definierten Anforderungen anzupassen. Um geotechnisch relevante Spannungspfade niedriger und höherer Komplexität adäquat reproduzieren zu können, wurde zunächst eine kappenförmige Fließfläche ergänzt. So können irreversible Verformungen nicht nur bei Scherung, sondern auch bei Belastungen ohne Änderung des Spannungsverhältnisses, wie z. B. bei isotroper oder ödometrischer Kompression, auftreten. Bei Spannungspfaden ungewöhnlicher Orientierung, bei Lastwechseln oder zusammengesetzten Spannungspfaden mit Änderung der Belastungsrichtung hat sich eine erhöhte Steifigkeit bei kleinen Dehnungen mit anschließendem dehnungsabhängigen Abfall als nützlich erwiesen. Darüber hinaus berücksichtigt ein zusätzlicher Mechanismus die rückläufige Akkumulation von Spannung oder Verformung mit zunehmender Zyklenanzahl (in Form von dissipierter Energie).

Im Hinblick auf die Eignung des Stoffgesetzes für die Praxis ist das Modell modular aufgebaut. So kann die Komplexität des Modells (und damit die Anzahl der Parameter) durch Ein- und Ausschalten

bestimmter Erweiterungen an die Komplexität des geotechnischen Problems angepasst werden. Die Mehrzahl der Modellparameter wird mit Hilfe konventioneller Laborversuche bestimmt. Eine interne Routine erleichtert durch die Kalibrierung bestimmter Bounding Surface bezogener Größen anhand eines alternativen, stärker an Versuchsergebnissen orientierten User-Inputs bei Bedarf die Parameterwahl.

Da die Kenntnis eines Stoffgesetzes entscheidend ist für dessen vernünftigen und verantwortungsvollen Einsatz, soll die vorliegende Arbeit eine fundierte und umfassende Dokumentation bieten. Der erste Teil vermittelt daher zunächst einen Überblick über das zugrunde liegende Bounding Surface Konzept und beschreibt die Neuerungen auf konstitutiver Ebene mit Bezug auf theoretische Hintergründe. Er wird gefolgt von einer detaillierten Darlegung von Potenzialen und Einschränkungen für die Nutzung des erweiterten Modells. Der nächste Abschnitt widmet sich der numerischen Implementierung des Stoffgesetzes und seiner Kalibrierung auf Basis von Versuchsergebnissen. Des Weiteren wird die Kalibrierungsroutine einschließlich des verwendeten Optimierungsalgorithmus präsentiert. Der nachfolgende Teil dient der Modellvalidierung: durch die Simulation von Elementversuchen, die Erzeugung von Antwortellipsen sowie die Abbildung allgemeinerer (beispielsweise zusammengesetzter) Spannungspfade wird die Leistungsfähigkeit des erweiterten Bounding Surface Modells demonstriert. Abschließend werden Schlussfolgerungen gezogen und potenzielle Perspektiven aufgezeigt.