

Jürgen Schmitt

Anwendung numerischer Methoden zur
Bestimmung der Erddruckverteilung bei
Ansatz nichtlinearer Materialgesetze

Diplomarbeit

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de/> abrufbar.

Dieses Werk sowie alle darin enthaltenen einzelnen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsschutz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlanges. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen, Auswertungen durch Datenbanken und für die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronische Systeme. Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der fotomechanischen Wiedergabe (einschließlich Mikrokopie) sowie der Auswertung durch Datenbanken oder ähnliche Einrichtungen, vorbehalten.

Copyright © 1997 Diplomica Verlag GmbH
ISBN: 9783836612678

Jürgen Schmitt

**Anwendung numerischer Methoden zur Bestimmung
der Erddruckverteilung bei Ansatz nichtlinearer Materi-
algesetze**

Jürgen Schmitt

Anwendung numerischer Methoden zur Bestimmung der Erddruckverteilung bei Ansatz nichtlinearer Materialgesetze

Diplomarbeit

Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

Fachbereich Bauingenieurwesen

Institut für Grundbau und Bodenmechanik

August 1997



Diplom.de

Diplomica Verlag GmbH

Hermannstal 119k

22119 Hamburg

Fon: 040 / 655 99 20

Fax: 040 / 655 99 222

agentur@diplom.de

www.diplom.de

Jürgen Schmitt

Anwendung numerischer Methoden zur Bestimmung der Erddruckverteilung bei Ansatz nichtlinearer Materialgesetze

ISBN: 978-3-8366-1267-8

Druck Diplomica® Verlag GmbH, Hamburg, 2008

Zugl. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Braunschweig, Deutschland, Diplomarbeit, 1997

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, des Vortrags, der Entnahme von Abbildungen und Tabellen, der Funksendung, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwertung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung dieses Werkes oder von Teilen dieses Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechtsgesetzes der Bundesrepublik Deutschland in der jeweils geltenden Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechtes.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Die Informationen in diesem Werk wurden mit Sorgfalt erarbeitet. Dennoch können Fehler nicht vollständig ausgeschlossen werden, und die Diplomarbeiten Agentur, die Autoren oder Übersetzer übernehmen keine juristische Verantwortung oder irgendeine Haftung für evtl. verbliebene fehlerhafte Angaben und deren Folgen.

© Diplomica Verlag GmbH

<http://www.diplom.de>, Hamburg 2008

Printed in Germany

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Analytische Methoden zur Bestimmung des Erdwiderstandes	4
2.1	Mohr-Coulomb (1773)	4
2.2	Krey (1936)	4
2.3	Ohde (1938)	5
2.4	Caquot-Kerisel (1956)	5
3	Erddruckversuche	7
3.1	Franzius (1928)	7
3.2	Narain, Saran, Nandakumaran (1969)	8
3.3	Roscoe (1970)	11
3.4	Laumans (1977)	12
3.5	Vogt (1984)	14
3.6	Mao (1993)	16
3.7	Wittlinger (1994)	18
3.8	Bartl (1997)	20
3.9	Zusammenstellung Erddruckversuche	23
4	Elastoplastische Stoffgesetze der Boden- und Felsmechanik	24
4.1	Grundlagen	24
4.1.1	Fließkriterium	24
4.1.2	Fließregel	24
4.1.3	Verfestigungs- und Entfestigungsregel	26
4.2	Invarianten	29
4.3	Mohr-Coulomb Kriterium	32
4.4	Drucker-Prager Kriterium	36
4.5	Braunschweiger Kappenmodell	39
4.6	Zusammenstellung elastoplastischer Stoffgesetze	43

5 Implementierung elastoplastischer Stoffgesetze in das FE-Programm ANSYS	44
5.1 Einführung	44
5.2 Analyse des Fortranquellcodes USERPL.F	45
5.3 Programmierung elastoplastischer Stoffgesetze über die Benutzerschnittstelle UPF	46
5.3.1 Flußdiagramm für die Umsetzung der elastoplastischen Stoffgesetze über die Benutzerschnittstelle UPF	46
5.3.2 Beschreibung der Eingabedaten für die Anwendung der elastoplastischen Stoffgesetze	47
5.3.3 Berechnung der TRIAL-Spannungen	48
5.3.4 Abprüfung des 1. Fließkriteriums und Berechnung der Dehnungsinkremente	49
5.3.5 Umformung der Tangentensteifigkeitsmatrix	50
5.3.6 Abprüfung des 2. Fließkriteriums bei Anwendung des entwickelten Braunschweiger Kappenmodells mit einer volumetrischen Fließbedingung und Berechnung der Dehnungen	51
5.4 Einbinden des Fortranquellcodes in das FE-Programm ANSYS	53
5.5 Verifikation der programmierten elastoplastischen Stoffgesetze anhand eines FE-Modells	54
6 Vergleichsberechnungen FE-Erddruckmodell nach Schweiger	58
6.1 Modellaufbau und Materialkennwerte	58
6.2 Vergleich und Beurteilung der Berechnungsergebnisse	59
6.3 Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse	62
7 Umsetzung von Erddruckversuchen in ein FE-Modell	74
7.1 Erddruckversuche von Narain, Saran und Nandakumaran	74
7.1.1 Zusammenstellung von Bodenkennwerten und Materialparametern	74
7.1.2 Aufbau des FE-Modells	76
7.1.3 Vergleich und Beurteilung der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen	77
7.1.3.1 Parallelverschiebung	77
7.1.3.2 Kopfpunktverschiebung	78
7.1.3.3 Fußpunktverschiebung	79

7.1.4	Zusammenstellung des Berechnungsergebnisse	81
7.1.4.1	Parallelverschiebung	81
7.1.4.2	Kopfpunktverschiebung	88
7.1.4.3	Fußpunktverschiebung	98
7.2	1g-Modellversuch von Bartl	108
7.2.1	Zusammenstellung von Bodenkennwerten und Materialparametern	108
7.2.2	Aufbau des FE-Modells	109
7.2.3	Vergleich und Beurteilung der Berechnungsergebnisse mit den Versuchsergebnissen	110
7.2.4	Zusammenstellung der Berechnungsergebnisse	111
8	Analytische Berechnung des Erdwiderstandes	113
8.1	Erddruckversuche von Narain, Saran und Nandakumaran	113
8.2	1g-Modellversuch von Bartl	114
9	Gegenüberstellung und Beurteilung der bestimmten Erddruckverteilungen	116
10	Zusammenfassung	125
11	Literaturverzeichnis	128

Bezeichnungen

E_0	Resultierende des Erddruehdruks
E_a	Resultierende des aktiven Erddrucks
E_{ah}	horizontaler Anteil der Resultierende des aktiven Erddrucks
E_p	Resultierende des passiven Erddrucks
E_{ph}	horizontaler Anteil der Resultierende des passiven Erddrucks
k_0	Beiwert für den Erdruehdruks
k_{ah}	Beiwert für den aktiven horizontalen Erddruks
k_{ph}	Beiwert für den passiven horizontalen Erddruks
δ	Wandreibungswinkel
G	Schubmodul
K	Kompressionsmodul
E	Elastizitätsmodul
E_s	Steifemodul
μ	Querdehnzahl
γ	Wichte
p_a	atmosphärischer Drueks
c'	effektive Kohäsion
φ'	effektiver Reibungswinkel
ψ'	effektiver Dilatanzwinkel

In dieser Arbeit werden die effektive Spannungen untersucht. Zur Vereinfachung wird für c' nur c , für φ' nur φ und für ψ' nur ψ geschrieben.

F	Fließkriterium
Q	plastisches Potential
$d\lambda$	plastischer Proportionalitätsfaktor
θ	Lode Winkel
I_1	1. Invariante des Spannungstensors $\underline{\sigma}$
I_2	2. Invariante des Spannungstensors $\underline{\sigma}$
I_3	3. Invariante des Spannungstensors $\underline{\sigma}$
J_1	1. Invariante des deviatorischen Spannungstensors \underline{S}

J_2	2. Invariante des deviatorischen Spannungstensors \underline{S}
J_3	3. Invariante des deviatorischen Spannungstensors \underline{S}
$\underline{\sigma}$	Spannungstensor
\underline{S}	deviatorischen Spannungstensors
$\underline{\sigma}^{\text{trial}}$	fiktiver Spannungstensor
$\underline{\varepsilon}^e$	elastische Dehnungen
$\underline{\varepsilon}^p$	plastische Dehnungen
$d\underline{\varepsilon}^e$	Inkrement der elastischen Dehnung
$d\underline{\varepsilon}^p$	Inkrement der plastischen Dehnung
$[D]$	Tangentensteifigkeitsmatrix (Spannungsdehnungsmatrix)
w_{p2}	plastische Arbeit
dw_{p2}	Inkrement der plastischen Arbeit

$\underline{A} \times \underline{B}$ tensorielle Verknüpfung zweier Tensoren

ABC Kommandos und Begriffe des FE-Programms ANSYS werden im Schriftgrad **FETT** dargestellt.

Vorzeichendefinition: Die in den Bildern dargestellten Erddruckspannungen sind mit den in der Bodenmechanik üblichen Vorzeichen definiert. Die Druckspannungen besitzen ein positives bzw. die Zugspannungen ein negatives Vorzeichen. Abweichend davon werden die Spannungen und Dehnungen in den FE-Plots (Bilder 7.25 bis 7.26, 7.45 bis 7.52 und 7.72 bis 7.78) für Druckbeanspruchungen negativ bzw. für Zugbeanspruchungen positiv dargestellt, da die Methode der Finiten Elemente nach [39] ursprünglich zum Einsatz bei statischen und dynamischen Berechnungen in der Strukturmechanik entwickelt wurde und auch heute dort noch am häufigsten angewendet wird.

1 Einleitung

Der Erddruck ist eine der wichtigsten Größen für den Nachweis der Standsicherheit und der Bemessung von Bauwerken des Grundbaus. Seit annähernd zwei Jahrhunderten beschäftigt sich die Forschung mit Methoden zur Bestimmung des Erddrucks.

Eine der ersten Erddrucktheorien wurde 1773 von Coulomb [18] veröffentlicht. Coulomb stellte fest, daß für die Erddruckkraft auf eine Wand zwei Grenzwerte existieren (Bild 1.1). Infolge der Verschiebung vom Erdreich weg erhält man den Kleinstwert, der als die aktive Erddruckkraft E_a bezeichnet wird. Der Größtwert, die passive Erddruckkraft E_p , ergibt sich durch die Verschiebung der Wand gegen das Erdreich. Die entsprechenden Grenzwerte erhielt Coulomb aus Extremwertbetrachtungen an Bruchmodellen. Die Größe der Wandbewegung zum Erreichen des Grenzgleichgewichtes blieb dabei unberücksichtigt. Neuere Erkenntnisse zeigten jedoch, daß sich bei einer Annahme von ebenen Gleitflächen und großer Reibungswinkel unzutreffend große Erdwiderstandsbeiwerte ermitteln lassen [52].

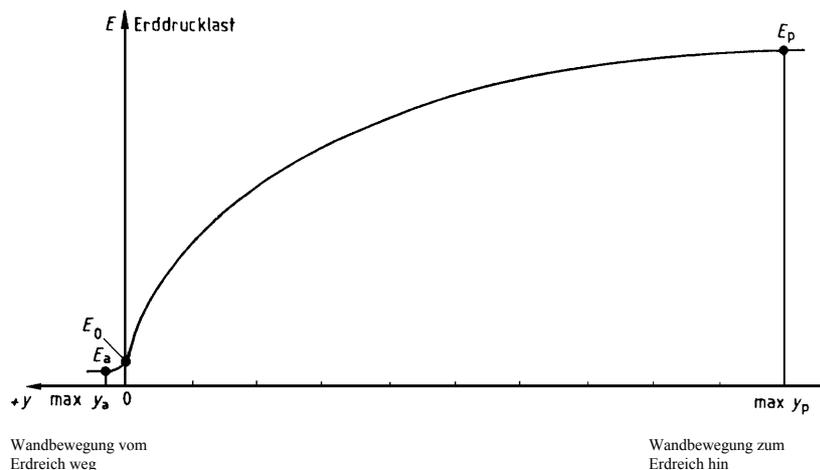


Bild 1.1 Zusammenhang zwischen Erddrucklast und Wandbewegung, [25]

Die gegenwärtig verwendeten Erddrucktheorien werden eingesetzt, um die Standsicherheit eines Bauwerkes durch den Ausschluß des Auftretens bestimmter Bruchmechanismen nachzuweisen. Die dabei angesetzten Erddruckkräfte, die für die Standsicherheitsnachweise ausreichend sind, eignen sich aber im allgemeinen nicht für die Bemessung im Gebrauchszustand, bei der die auftretenden Verformungszustände berücksichtigt werden müssen [31]. Ein gestiegenes Anforderungsprofil an Grundbauwerken durch wirtschaftliche und funktionale Aspekte erfordert eine Untersuchung des Erddrucks im Gebrauchszustand, bei der die wichtigen Einflußgrößen erfaßt werden müssen.

Eine Möglichkeit, die aufgestellten Erddrucktheorien zu überprüfen bzw. neue Erddrucktheorien zu entwickeln, besteht in der Durchführung von Modellversuchen. Dabei wurde und wird der Einfluß folgender Faktoren untersucht :

- Abhängigkeit von der Wandbewegungsart
- Einfluß des Wandreibungswinkels
- Einbindetiefe der Wand
- Abhängigkeit vom Reibungswinkel φ
- Einfluß der Lagerungsdichte D bei Untersuchung von Sand als Bodenmaterial
- Verformungsverhalten
- Bruchmechanismen

Eine weitere Möglichkeit besteht in der Anwendung der Methode der Finiten Elemente. Die ständige Verbesserung von Hard- und Software läßt die Methode der Finiten Elemente als praxistaugliche Alternative heranwachsen.

Vorteile sind in der Anwendung von Berechnungsmodellen zu sehen, die eine Interaktion zwischen Bauwerk und Baugrund widerspiegeln. Dabei lassen sich eindeutige Erkenntnisse über das Tragverhalten und die Verformungskinetik gewinnen. Durch Variationsrechnungen können Konstruktionsalternativen entworfen werden, die durch Vergleich zu einem optimierten Entwurf führen.

Der Nachteil besteht durch den Einfluß von Randbedingungen und der Wahl des geeigneten Stoffgesetzes. Das Kontinuum des Bodens wird als halbbunendlich ausgedehnt angenommen. Für die Berechnung mit der Methode der Finiten Elemente ist ein endlicher Berechnungsausschnitt notwendig. Die Wahl des Berechnungsausschnittes bzw. das Setzen der Randbedingungen muß so gewählt werden, daß der Bereich in dem keine Spannungs- bzw. Verformungsveränderungen auftreten, mit dem FE-Modell erfaßt werden können.

Für die Beschreibung des nichtlinearen Spannungsdehnungsverhaltens des Bodens muß ein geeignetes Stoffgesetz gewählt werden. In der Bodenmechanik kommen dabei hauptsächlich elastoplastische Stoffgesetze zum Einsatz.

In dieser Arbeit werden zunächst in einer kurzen Zusammenfassung analytische Methoden zur Ermittlung der Erdwiderstandes beschrieben. Das darauffolgende Kapitel stellt Modellversuche zur Bestimmung des Erddrucks und Versagensbilder chronologisch mit Versuchsaufbau und Versuchsergebnis dar. Darauf folgt eine Darstellung elastoplastischer Stoffgesetze, die für eine FE-Berechnung von Erddruckversuchen verwendet werden. Im nächsten Schritt werden die zuvor beschriebenen elastoplastischen Stoffgesetze programmiert und in das kommerzielle FE-Programm ANSYS implementiert. Mit Testbeispielen werden die elastoplastischen Stoffgesetze verifiziert. Durch

die Umsetzung von Erddruckversuchen in ein FE-Modell wird die Übertragbarkeit von Versuchsergebnissen auf ein FE-Modell in Abhängigkeit der Wahl des Stoffgesetzes analysiert. Abschließend werden die Ergebnisse aus analytischer Berechnungsmethode, Erddruckversuch und FE-Berechnung gegenübergestellt und beurteilt.

2 Analytische Methoden zur Bestimmung des Erdwiderstandes

2.1 Mohr-Coulomb (1773)

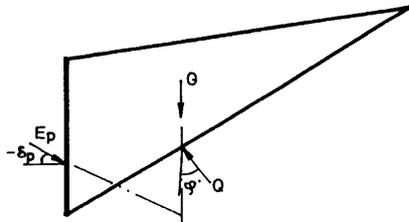


Bild 2.1 Ebene Gleitfläche von Coulomb, [52]

In der Erddrucktheorie von Coulomb erhält man durch die Annahme einer ebenen Gleitfläche und daß die Resultierende im unteren Drittelpunkt der Wandhöhe angreift (Bild 2.1), den maßgebenden Erdwiderstandsbeiwert k_p . Der Erdwiderstand ist ein Extremalwert und wird als Minimalwert der möglichen Erdwiderstände in Abhängigkeit vom Gleitflächenwinkel bestimmt.

2.2 Krey (1936)

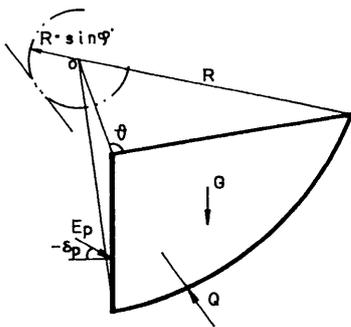


Bild 2.2 Kreisgleitflächen nach Krey, [52]

Krey verwendete 1936 einen durchgehenden Kreis als Gleitfläche (Bild 2.2). Die Resultierende greift dabei im unteren Drittelpunkt der Wand an. Unter Berücksichtigung der Gleichgewichtsbedingungen wird mit den getroffenen Annahmen der kleinste Erdwiderstand gesucht. Eine Übereinstimmung ergibt sich, wenn die Wand sich über einen Punkt über der Wand dreht (Bild 2.2).