

# FE-Berechnungen zur Ermittlung der Erdwiderstandsverteilung bei Wahl unterschiedlicher Stoffgesetze

T. Vittinghoff

W. Rodatz

J. Schmitt

*Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig*

## 1 Einleitung

Für weiterführende Berechnungen von Fragestellungen aus dem Bereich der Geotechnik lassen sich in den meisten Fällen die klassischen elastostatischen Verfahren aufgrund vorhandener Nichtlinearitäten nur eingeschränkt verwenden. Um das häufig auftretende nichtlineare Verhalten des Materials Bodens zu beschreiben, besteht jedoch die Möglichkeit einer numerischen Näherungsberechnung z.B. mit der Finite-Element-Methode (FEM). Bei Verwendung von FE-Programmen läßt sich durch Wahl eines geeigneten Stoffgesetzes und der dazugehörigen Kenngrößen das Materialverhalten des Bodens in geeigneter Form modellieren.

Trotz der Möglichkeit dieses Berechnungsverfahrens, nichtlineares Materialverhalten zu berücksichtigen, gilt wie schon im Jahr 1950 von Ohde formuliert, daß *man bei jeder erdstatischen Untersuchung - ähnlich wie auch sonst im Bauwesen - zwei grundlegende Bedingungen erfüllen muß:*

- 1. Es muß von den örtlichen Gegebenheiten ausgegangen werden (Erdschichtung, Grundwasser), insbesondere müssen zuverlässige Mittelwerte für die Eigenschaften des Materials (Erdstoff-Grundwerte) bekannt sein.*
- 2. Das Berechnungsverfahren selbst muß den wirklichen Verhältnissen möglichst nahekommen.[14]*

Die Bedingungen, die Ohde für eine erdstatische Berechnung aufgestellt hat, gelten in gleicher

Weise für eine FE-Berechnung. Bei der Erstellung des dafür notwendigen Strukturmodells müssen folgende Punkte berücksichtigt werden [17]:

- Geometrische Modellierung,
- Stoffliche Modellierung mit der Wahl der geeigneten Materialparameter,
- Step-by-step Analysis zur Berücksichtigung der numerischen Simulation.

In diesem Zusammenhang wird nachfolgend aufgezeigt, inwieweit sich die Verwendung unterschiedlicher Stoffgesetze auf die Ergebnisse einer erdstatischen Berechnung auswirken. Im Rahmen des zu simulierenden Beispiels sollte die Interaktion von Boden und Bauwerk, die Entwicklung von Versagenszonen sowie die Ermittlung von verformungsabhängigen Spannungswerten untersucht werden können. All diesen Punkten genügt die Simulation des Erdwiderstandsversuches zur Bestimmung der Erdwiderstandsverteilung in Abhängigkeit unterschiedlicher Wandbewegungen.

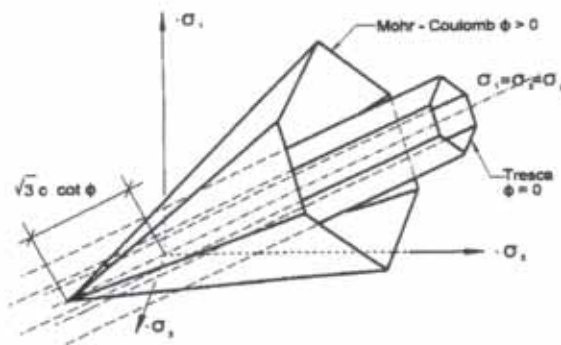
Zur Verifikation der programmierten Stoffgesetze werden die Ergebnisse der Erddruckberechnungen nach Schweiger [16] verwendet. Die Beurteilung der verwendeten Stoffgesetze und Materialparameter sowie deren Realitätsbezug erfolgt durch Vergleiche mit Ergebnissen von Erdwiderstandsversuchen nach Bartl [4] sowie Narain et al.[12].

## 2 Stoffgesetze

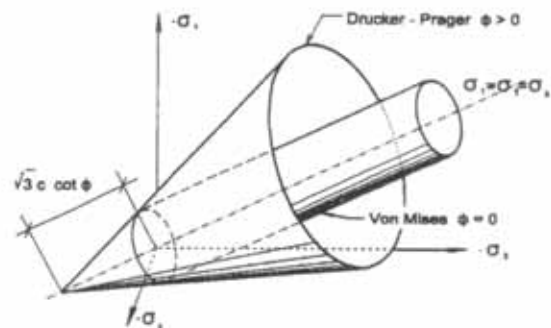
In der Geotechnik werden häufig zeitunabhängige Stoffgesetze aus der Gruppe der elastoplastischen Stoffgesetze verwendet, um das nichtlineare Verhalten des Bodens abzubilden. Diese werden durch folgende Punkte charakterisiert.

- Fließkriterium,
- Fließregel,
- Ver- und Entfestigungsregel.

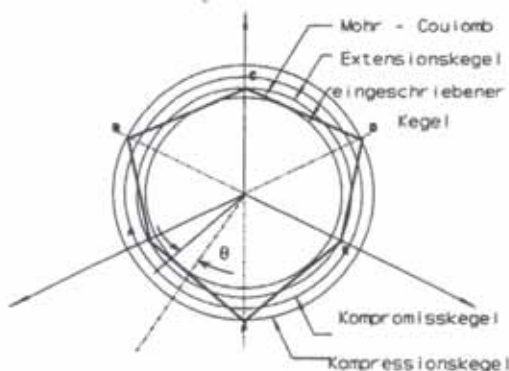
Mit Hilfe des Fließkriteriums wird dabei der Spannungszustand definiert, bei dem ein Fließen einsetzt. Zur Bestimmung der beim Fließen auftretenden plastischen Dehnungsanteile wird die Fließregel verwendet. Nachfolgend sind in Abb.1 Fließkriterien von Stoffgesetzen ohne eine Ver- oder Entfestigungsregel dargestellt. Diese Gesetze werden als linearelastisch-idealplastische Stoffgesetze bezeichnet, da sie ein entsprechendes Spannungs-Dehnungsverhalten beschreiben.



a) Mohr-Coulomb (MC), Tresca



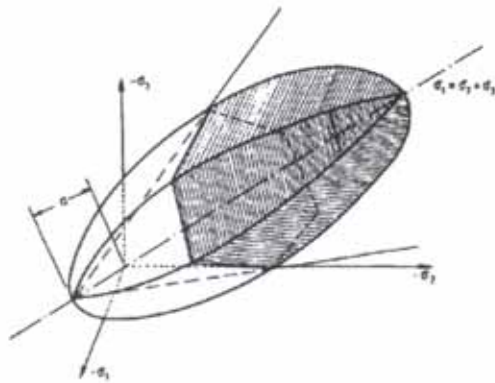
b) Drucker-Prager (DP), von Mises



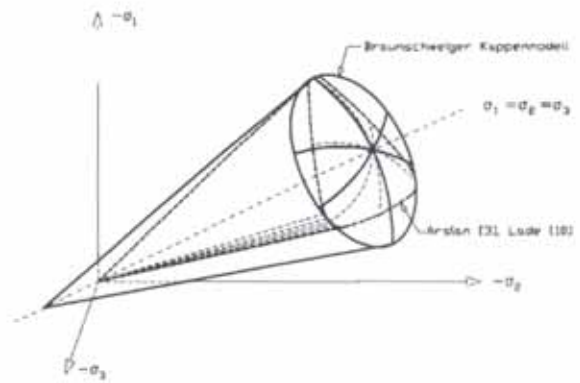
c) Schnitt in der Deviatorebene

Abb.1 Fließkriterien [16]

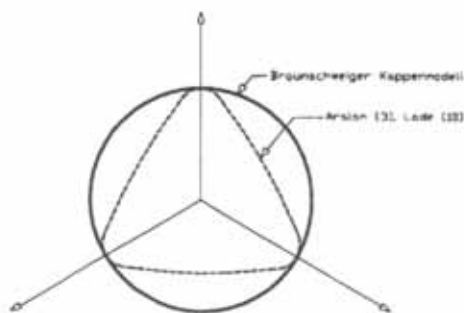
Um ein kontraktantes oder dilatantes Verhalten des Materials Boden in Verbindung mit einer Ver- oder Entfestigung zu berücksichtigen, können elastoplastische Stoffgesetze mit volumetrischer Verfestigung verwendet werden. Zu dieser Gruppe gehören die Stoffgesetze mit den nachfolgend in Abb.2 dargestellten Fließkriterien.



a) Modifiziertes Cam-Clay-Modell mit MC-Bruchbedingung [5]



b) Modell nach Arslan [3] und Braunschweiger Kappenmodell



c) Schnitt in der Deviatorebene

Abb.2 Fließkriterien mit volumetrischer Verfestigung

Über eine FORTRAN-Schnittstelle [2] wurden die aufgeführten Fließkriterien in das kommerzielle FE-Programm ANSYS 5.3 [1] implementiert. Das Konvergenzverhalten des verwendeten iterativen Lösungsverfahrens nach Newton-Raphson wurde mittels der Simulation eines Triaxialversuches [15] überprüft.

Die Verifizierung der programmierten StoffgesetZRoutinen erfolgte lokal durch analytische Nachrechnungen einzelner Funktionsterme und global durch den im folgenden Abschnitt dargestellten Vergleich von Ergebnissen einer Erddruckberechnung nach dem Modell von Schweiger [16].



### 3 Verifizierung der programmierten StoffgesetZRoutinen

Wie in Abschnitt 2 erlauert, werden nachfolgend die programmierten StoffgesetZRoutinen anhand des aktiven Erddruckmodells nach Schweiger verifiziert. Die geometrischen Randbedingungen sowie die Materialparameter konnen Abb.3 entnommen werden. Es wurden parallele Wandverschiebungen von maximal 7 mm beim Kriterium nach Mohr-Coulomb und 25 mm fur das Kriterium nach Drucker-Prager vorgegeben. Durch Ansatz einer assoziierten Fließregel wurde der Dilatanzwinkel  $\psi$  gleich dem Reibungswinkel  $\phi$  gesetzt.

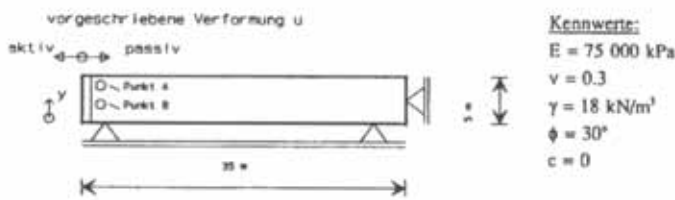


Abb.3 FE-Modell nach Schweiger [16]

Eine Angabe der Modellbreite konnte der Arbeit von Schweiger [16] nicht entnommen werden, so daß von einem ebenen Verzerrungszustand ausgegangen werden mußte. Durch Variation der Kastenbreite von 0,50 bis 5,00 m (s. Abb.4) konnte ein Einfluß der Modellbreite auf die Berechnungsergebnisse ausgeschlossen werden. Die nachfolgenden Berechnungen erfolgten fur das Einschichtenmodell der Abb.4a. Es wurden Elemente mit 20 Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz verwendet.

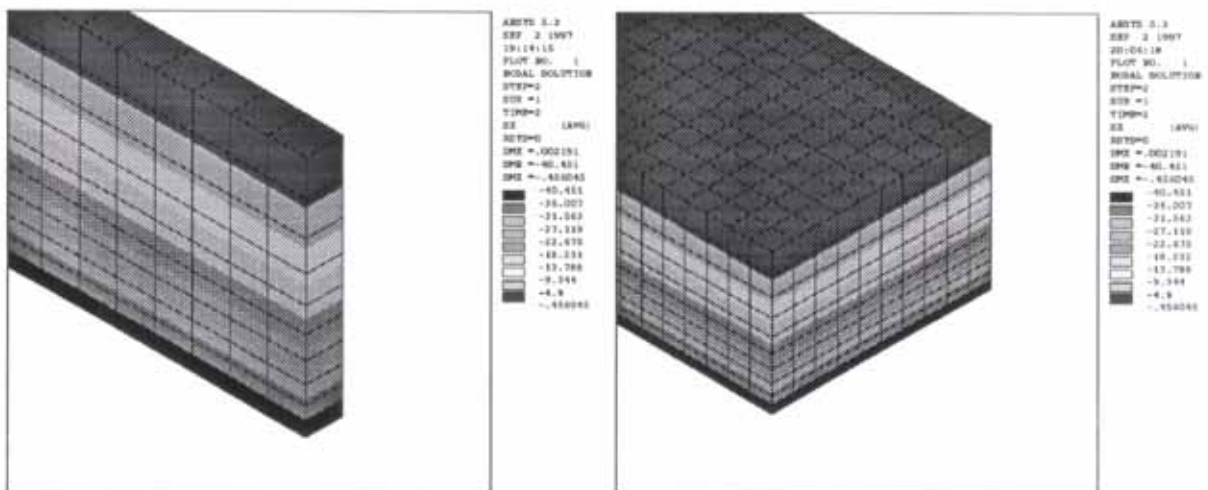


Abb.4 a) Einschichtenmodell

b) Mehrschichtenmodell

Um bei den Vergleichsberechnungen den Einfluß einer volumetrischen Verfestigung zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Variante mit Braunschweiger Kappenmodell (Abb.3) berechnet. Das Braunschweiger Kappenmodell resultiert aus einer deviatorischen Fließbedingung nach Drucker-Prager [16] sowie einer volumetrischen Fließbedingung nach Lade [10]. Die für die FE-Berechnung benötigten zusätzlichen Materialkennwerte M und L der Abb.5 wurden den Arbeiten von Arslan [3] und Früchtenicht [8] entnommen.

Kennwert	Einheit	FE-Berechnung
E-Modul E	[kN/m <sup>2</sup> ]	75.000
Querdehnzahl $\mu$	[-]	0,3
Wichte $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	18
Reibungswinkel $\phi$	[°]	30
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	30
Kohäsion c	[kN/m <sup>2</sup> ]	0,1
Achsenabschnitt M	[-]	27.320 \ 18.300
Neigung L	[-]	242,7 \ 13,6

Abb.5 Materialkennwerte

Exemplarisch ist in Abb.6 die Entwicklung der Erddruckkraft  $E_{ah}$  infolge paralleler Wandverschiebung u bei Wahl unterschiedlicher Stoffgesetze dargestellt.

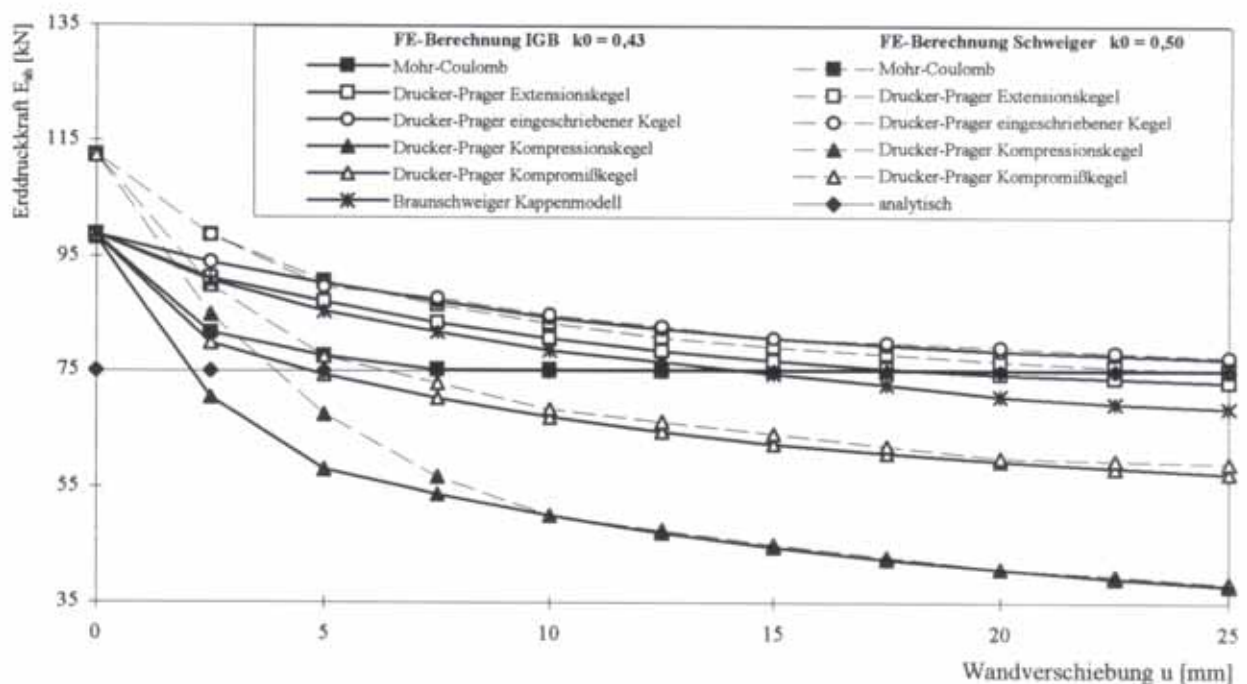


Abb.6 Entwicklung der aktiven Erddruckkraft  $E_{ah}$  bei paralleler Wandverschiebung

Die programmierten StoffgesetZRoutinen liefern qualitativ und quantitativ übereinstimmende Ergebnisse mit denen des FE-Modells nach Schweiger mit Abweichungen im Grenzbereich der Wandverschiebung von max. 3,9 %. Im Verschiebungsbereich bis 10 mm lassen sich Abweichungen feststellen, welche aus unterschiedlich ermittelten Horizontalbelastungen mit Verhältniswerten von  $k_0 = 0,5$  und  $k_0 = 0,43$  zum vertikalen Eigenspannungszustand resultieren. Weiterhin konnte die Aussage von Schweiger [16] bestätigt werden, daß Berechnungen mit dem Kompressions- und Kompromißkegel nach Drucker-Prager zu erheblichen Festigkeitsüberschätzungen führen. Dies läßt sich aus Abb.6 anhand der Kurven, welche unterhalb der analytisch ermittelten Lösung liegen, ableiten.

## 4 Ermittlung der Erdwiderstandsverteilung

Um zu überprüfen, wie nahe FE-Berechnungen bei Verwendung der programmierten StoffgesetZRoutinen den wirklichen Verhältnissen kommen, werden nachfolgend gemessene Ergebnisse von Erddruckversuchen mit denen einer Berechnung verglichen. Im Versuch wurde die Erdwiderstandsverteilung infolge einer Fußpunktverschiebung bestimmt.

### 4.1 Erdwiderstandsversuch nach Bartl

Die Versuchsanlage besitzt die Abmessungen von 1,80 m Länge x 1,00 m Breite x 0,86 m Höhe [4]. Zur Eliminierung des Einflusses der Seitenwandreibung befinden sich die Kraftaufnehmer für den Erdwiderstand nur im Mittelbereich der Kopfwand. Es konnten sowohl die vertikalen als auch die horizontalen Anteile der Erdwiderstandsverteilung ermittelt werden. Trotz unterschiedlich rauher Beschichtung der Kopfwand ließ sich kein Einfluß auf die Erdwiderstandsverteilung sowie die Neigung der Resultierenden des Erdwiderstandes feststellen. Aus diesem Grund wird der gemessene Wandreibungswinkel von  $\delta_{pR} = -0,7^\circ$  bei den weiteren Betrachtungen vernachlässigt, so daß die Wandverschiebung mit horizontal verschiebaren einwertigen Auflagern simuliert werden kann. Bei dem in Abb.7 dargestellten FE-Modell des Erdwiderstandsversuches sind die Lagerbedingungen entsprechend gekennzeichnet. Die Versuche erfolgten mit dem Dresdener Hellersand, dessen Materialparameter Abb.8 entnommen werden können.

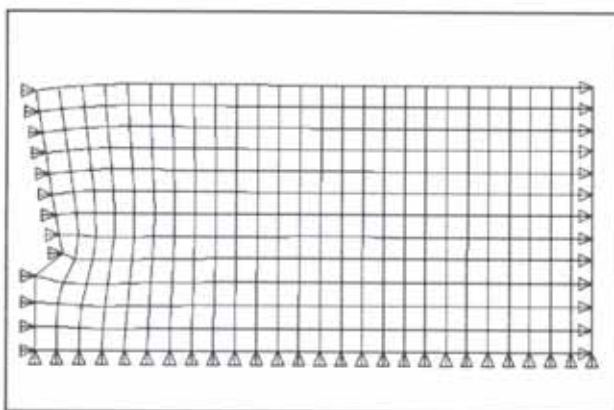


Abb.7 FE-Modell des Erddruckkastens nach Bartl [4]

Die Versuchsergebnisse der Erdwiderstandsverteilung wurden für eine Grenzverschiebung von  $0,037 h = 21 \text{ mm}$  angegeben.



## 4.2 FE-Berechnungen zur Erdwiderstandsverteilung

Wie in Abschnitt 4.1 erläutert, wurde die Wandreibung vernachlässigt, so daß bei Ansatz einer Grenzverschiebung von 0,037 h horizontale Knotenverschiebungen von max. 21 mm vorgegeben wurden. Aus diesem Grund erfolgt keine Angabe der Erdwiderstandsentwicklung für den Versuch nach Bartl. Exemplarisch kann jedoch eine Darstellung dem Abschnitt 5.2 für die Versuche nach Narain et al. [13] entnommen werden.

Die für die FE-Berechnung notwendigen Materialparameter sind in Abb.8 zusammengestellt.

Kennwert	Einheit	Versuch	EAU bzw. Literatur	FE-Berechnung
Abszisse bei 50 Gew.-% $d_{50}$	[mm]	0,4	-	-
Ungleichförmigkeitszahl U	[-]	3,0	-	-
Bodengruppe nach DIN 18 196	[-]	SE	-	-
Korndichte $\rho_s$	[g/m <sup>3</sup> ]	2,65	-	-
Trockendichte min $\rho_d$	[g/m <sup>3</sup> ]	1,501	-	-
Trockendichte max $\rho_d$	[g/m <sup>3</sup> ]	1,813	-	-
Lagerungsdichte D	[-]	0,61	-	-
Bezeichnung der Lagerung	[-]	dicht	-	-
E-Modul E	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	15.000-112.000	52.000
Querdehnzahl $\mu$	[-]	-	0,3	0,3
Wichte $\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	17,0	18-19	17,0
Reibungswinkel $\varphi$	[°]	40,8	30-35	40,8
Dilatanzwinkel $\psi$	[°]	-	-	40,8
Wandreibungswinkel $\delta_{pR}$	[°]	-0,7	-	0,0
Kohäsion c	[kN/m <sup>2</sup> ]	-	0	0,1
Achsenabschnitt M	[-]	-	27.320 \ 18.300	2.7320,0
Neigung L	[-]	-	242,7 \ 13,6	242,7

Abb.8 Materialparameter

Da keine Steifeziffer bei den dokumentierten Versuchsergebnissen [4] angegeben war, wurde

zur Wahl des E-Moduls eine Variationsrechnung mit der Steifeziffer  $E_s$  nach EAU [7] und einer Umrechnung über die Querkontraktion durchgeführt.

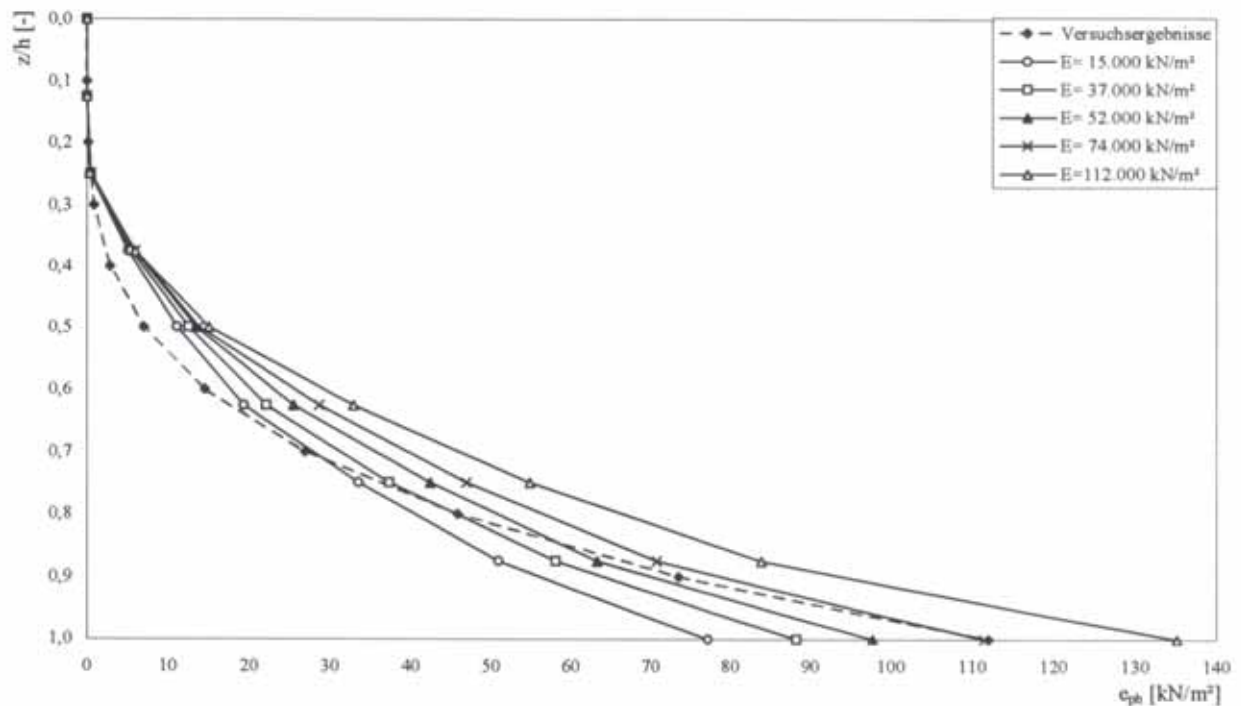


Abb.9 Einfluß des E-Moduls auf die Erdwiderstandsverteilung (DP, Extensionskegel)

Bei zahlenmäßig gleichem Ansatz der Erwidernskraft des Versuches und der FE-Berechnung ergab sich für die weiteren Berechnungen ein E-Modul von 52.000 kN/m<sup>2</sup> (Abb.9).

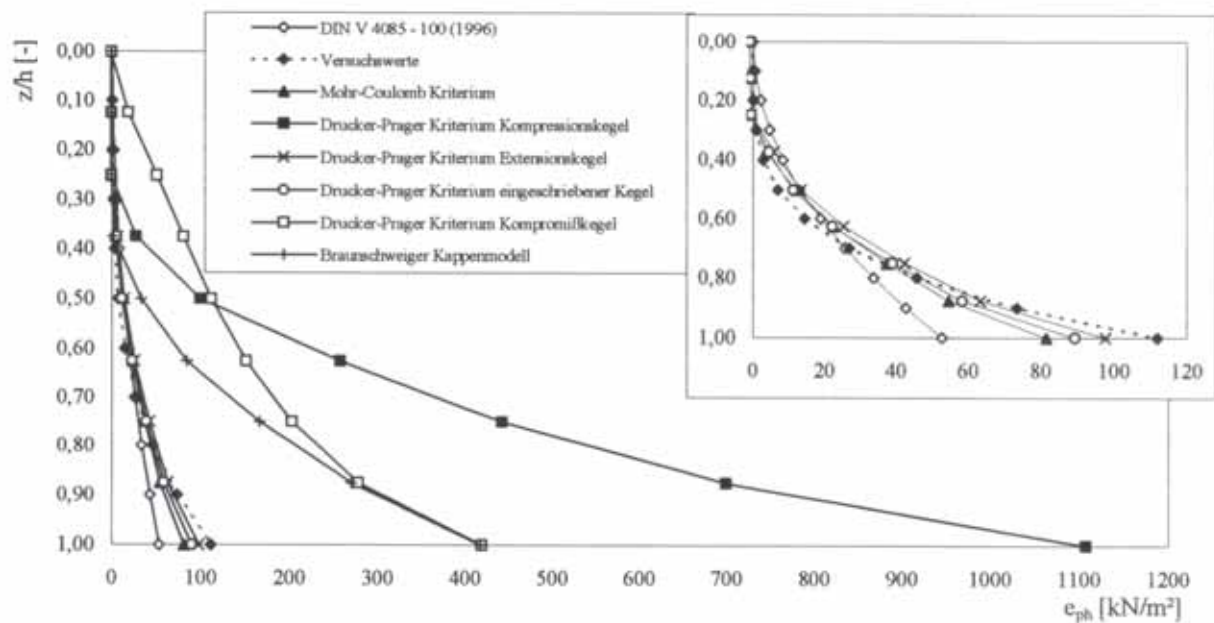


Abb.10 Erdwiderstandsverteilung  $e_{ph}$  bei Wahl unterschiedlicher Stoffgesetze

Der Vergleich der mittels der FEM berechneten Erdwiderstandsverteilungen bei Ansatz unterschiedlicher Stoffgesetze und den Versuchsergebnissen nach Bartl sowie der analytischen Lösung nach DIN V 4085-100 (1996) erfolgt in Abb.10 für eine normierte Tiefenangabe. Die sich ergebenden Erdwiderstandsbeiwerte  $k_{ph}$  sowie die normierte Angriffshöhe  $z_R$  des Erdwiderstandes  $E_{ph}$  können in Abhängigkeit des verwendeten Stoffgesetzes den folgenden Abbildungen entnommen werden.

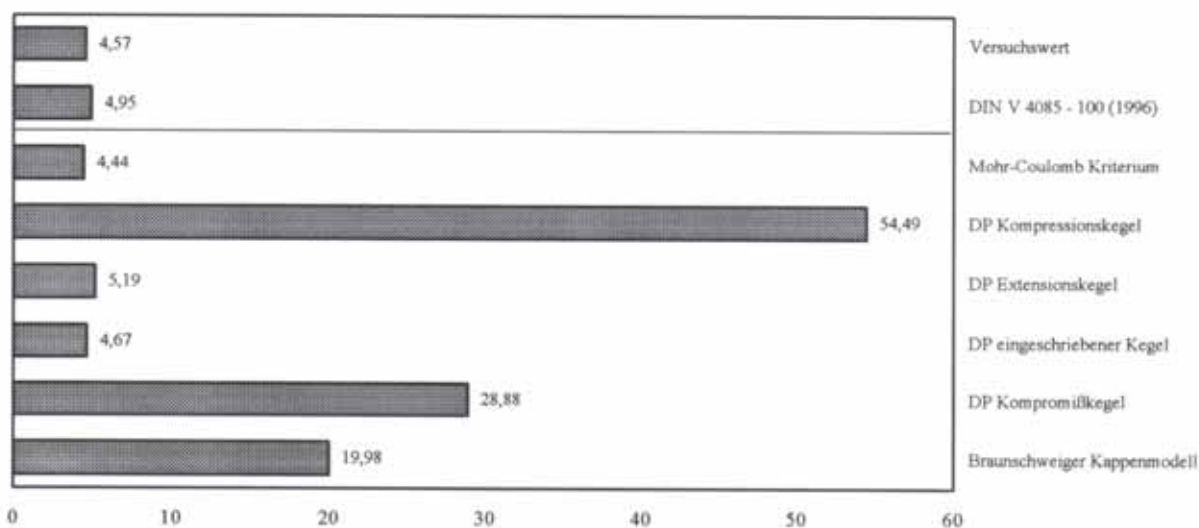


Abb.11 Erdwiderstandsbeiwert  $k_{ph}$

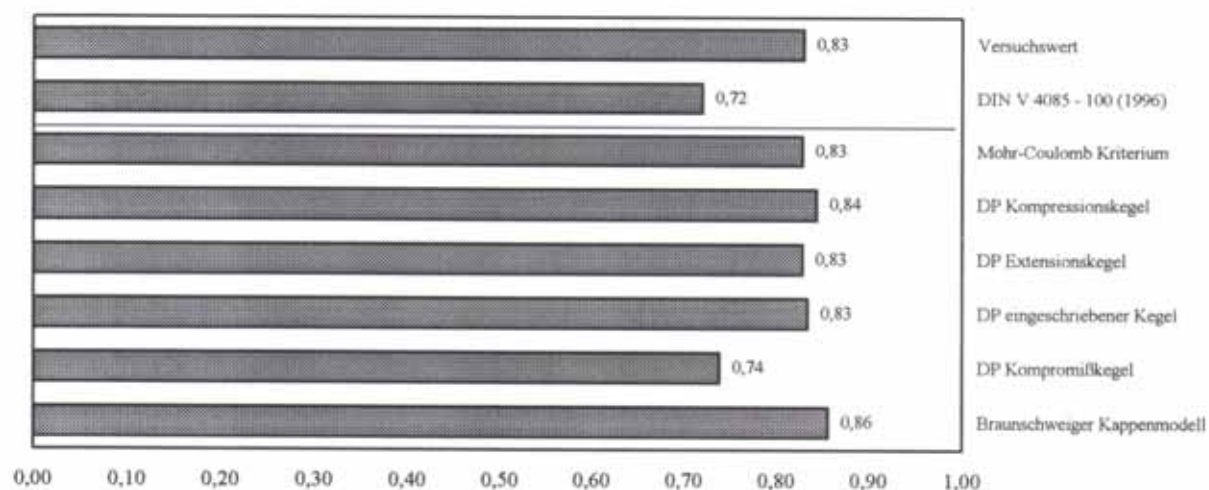


Abb.12 Normierte Angriffshöhe  $z_R$  des Erdwiderstandes  $E_{ph}$

Für das Mohr-Coulomb Kriterium, den Extensionskegel und den eingeschriebenen Kegel erhält man Erddruckspannungen, die denen des Versuches entsprechen. Der Spannungsverlauf (s. Abb.10), der Beiwert des passiven Erddrucks (s. Abb.11) und die Lage des resultierenden Erdwiderstandes (s. Abb.12) weisen dabei vernachlässigbare Abweichungen auf.

Im Gegensatz dazu sind die Erddruckspannungen des Kompressionskegels, des Kompromißkegels und des Braunschweiger Kappenmodells zu groß (s Abb.10). Betrachtet man den Erdwiderstandsbeiwert in Abb.11, so beträgt dieser das 3-fache des im Versuch gewonnenen Wertes bei Anwendung des Braunschweiger Kappenmodelles und das 10-fache beim Kompressionskegel nach Drucker-Prager. Die Lage des Erdwiderstandes  $E_{ph}$  (s. Abb.12) entspricht im wesentlichen der im Versuch bestimmten Angriffshöhe. Eine Ausnahme dazu bildet der Kompromißkegel.

Für die Berechnung des Erdwiderstandversuches nach Bartl [4] sind der Extensionskegel, der eingeschriebene Kegel und das Mohr-Coulomb Kriterium die geeigneten elastoplastischen Stoffgesetze. Die beiden Kegel geben die Versuchsergebnisse der Erdwiderstandsverteilung am besten wieder.



## 5 Diskussion weiterer Berechnungsergebnisse

Zur weiteren Beurteilung der verwendeten Stoffgesetze werden die bisher aufgeführten Ergebnisse der Erdwiderstandsverteilung infolge Fußverschiebung nach dem Versuch von Bartl [4] den Ergebnissen nach dem Versuch von Narain et al. [12] gegenübergestellt. Der Einfluß des Braunschweiger Kappenmodells auf die Entwicklung des Erdwiderstandes sowie die Ausbildung von Versagenszonen wird am Erdwiderstandsversuch mit Kopfpunktverschiebung von Narain et al. [12] aufgezeigt.

### 5.1 Ergebnisse infolge einer Fußpunktverschiebung

In Abb.13 werden die berechnete Angriffshöhe  $z_R$  sowie die Erdwiderstandsbeiwerte  $E_{ph}$  der Erdwiderstandsversuche von Bartl und Narain et al. mit den jeweiligen Meßergebnissen verglichen. Für die Ermittlung der Berechnungsergebnisse wurden die mit den Stoffgesetzen Mohr-Coulomb sowie eingeschriebener Kegel und Extensionskegel nach Drucker-Prager bestimmten Werte arithmetisch gemittelt.

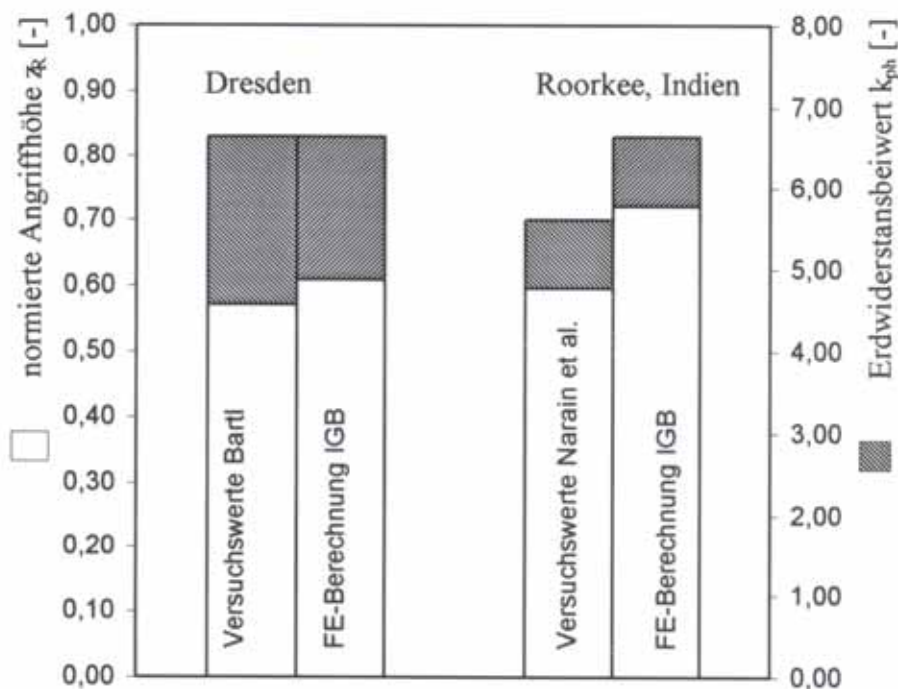


Abb.13 Normierte Angriffshöhe  $z_{R(Eph)}/h$  und Erdwiderstandsbeiwert  $k_{ph}$

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die elastoplastischen Stoffgesetze Mohr-Coulomb Kriterium und Drucker-Prager Kriterium mit den Koeffizienten des Extensionskegels und des eingeschriebenen Kegels geeignet sind, die untersuchten Erdwiderstandsversuche von Bartl [4]

und Narain et al. [12] zu simulieren, da die Ordinate des Erdwiderstandes sowie die Erdwiderstandsverteilung annähernd mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

## 5.2 Ergebnisse infolge einer Kopfpunktverschiebung

Mit den untersuchten elastoplastischen Stoffgesetzen lassen sich die im Versuch von Narain et al. im Jahr 1969 in Roorkee, Indien [12] ermittelten Erdwiderstandsverteilungen infolge Kopfverschiebung nicht in ausreichend genauer Form bestimmen.

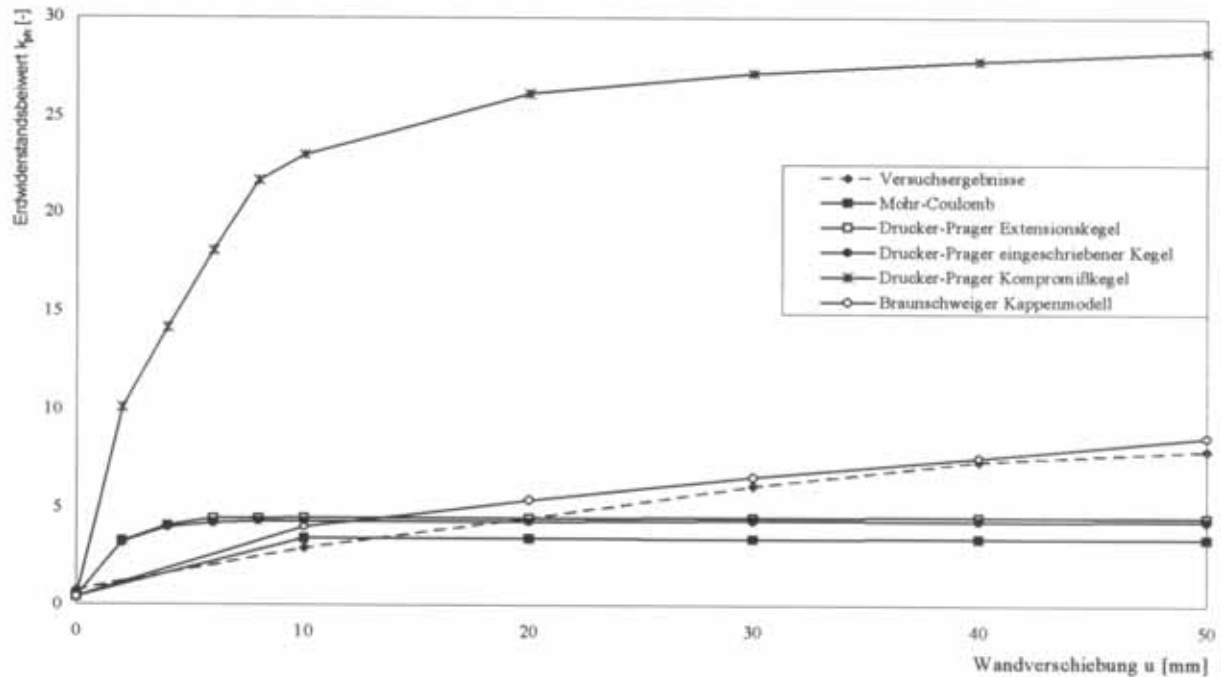


Abb.14 Entwicklung des Erdwiderstandbeiwertes

Bei der Entwicklung des Erdwiderstandbeiwertes infolge Kopfverschiebung zeigte lediglich das Braunschweiger-Kappenmodell eine gute Übereinstimmung von ca. 92 % mit den Versuchsergebnissen in Abb.14. Ähnliches gilt für die Entwicklung potentieller Versagenszonen, welche in Abb.15 für die maximale Kopfverschiebung von 50 mm dargestellt sind.

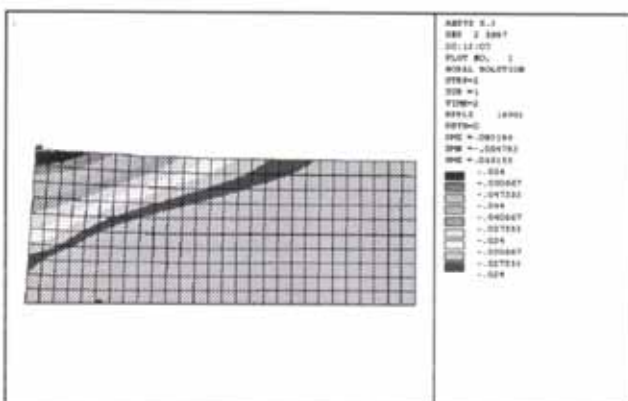


Abb.15 Versagenszonen

## 6 Zusammenfassung

Die elastoplastischen Stoffgesetze Mohr-Coulomb Kriterium, Drucker-Prager Kriterium mit den Koeffizienten des Extensionskegels und des eingeschriebenen Kegels sind für die Simulation der untersuchten Erddruckversuche von Bartl [4] und Narain et al. [12] am besten geeignet, da die passive Erddruckordinate und die passive Erddruckverteilung annähernd mit den Versuchsergebnissen übereinstimmen.

Bei Ansatz des Drucker-Prager Kriteriums mit dem Kompressions- und Kompromißkegel ergeben sich bei der Berechnung des passiven Erdruckes infolge Kopf- bzw. Fußpunktverschiebung zu große Werte. Gleiches wurde von Schweiger [16] bei der Ermittlung des aktiven Erdruckes infolge paralleler Wandbewegung festgestellt.

Das Braunschweiger Kappenmodell zeigt eine qualitative gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Die quantitative Übereinstimmung bedarf jedoch noch einer weiteren Anpassung mittels entsprechender Laborversuche, mit deren Hilfe die hier anhand der Literatur angenommenen Materialkennwerte genauer bestimmt werden können. Diese Einschränkung ist im Sinne von Ohde zu verstehen, der 1950 schrieb, daß *die Genauigkeit der Berechnungsverfahren ihre natürliche Grenze in der Genauigkeit findet, mit der die Erdschichten und ihre physikalischen Stoffwerte ermittelt werden können* [14].

Da im Normalfall die anhand von Versuchen bestimmte Grenzverschiebung nicht vorliegt, sollten zur Berechnung des Erdwiderstandes komplexere Stoffgesetze verwendet werden, da nur mit diesen die Erdwiderstandsentwicklung in ausreichender Form abgebildet werden kann.

Weitere Untersuchungen für die Berechnung der Erddruckverteilung sollten folgende Punkte umfassen:

- Parallele Wandbewegung,
- Fuß- oder Kopfpunktdrehung,
- Berücksichtigung des Wandreibungswinkels,
- Be- und Entlastungsmoduli sowie eine Entfestigungsregel,
- Ansatz von zeitabhängigen Materialgesetzen.



## 7 Literatur

- [1] ANSYS User's Manual, Volume I-IV Procedure, ANSYS Rev. 5.1 Update 0 2nd Revision, Swanson Analysis, Inc. P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, Pennsylvania 15343-0065 (USA), 1994
- [2] ANSYS Programmer's Manual ANSYS Rev. 5.2, Swanson Analysis, Inc. P.O. Box 65, Johnson Road, Houston, Pennsylvania 15343-0065 (USA), 1995
- [3] Arslan, M. U.: Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten der Böden, Zur Frage des elasto-plastischen Verformungsverhaltens von Sand, Heft 23, Mitteilungen der Versuchsanstalt für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Hochschule Darmstadt, 1980
- [4] Bartl, U.: Untersuchungen zum Erdwiderstand auf ebene Wände am Beispiel von 1g-Modellversuchen mit Kopfpunktdrehungen, Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden, Heft 3 (60. Geburtstag Prof. Dr. Franke), 1997
- [5] Desai, C.S., Christian, J.T.: Numerical Methods in Geotechnical Engineering, McGraw Hill, London, 1977
- [6] DIN V 4085-100: Baugrund, Berechnung des Erddrucks - Teil 100, Berechnung nach dem Konzept mit Teilsicherheitsbeiwerten, 1996
- [7] EAU: Empfehlungen des Arbeitskreises „Ufereinfassungen“ der Hafenbautechnischen Gesellschaft und der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V., Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1990
- [8] Früchtenicht, H.: Zum Verhalten nichtbindigen Bodens bei Baugruben mit Schlitzwänden, Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, Heft 15, 1984
- [9] Gudehus, G.: Stoffgesetze, Grundbau-Taschenbuch, 5. Auflage, Teil 1, Kapitel 1.6, Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1996
- [10] Lade, P. V.: Three-Dimensional Stress-Strain Behavior and Modeling of Soils, Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen und Verkehrswesen, Heft 4, Ruhr-Universität Bochum, 1979
- [11] Mao, P.: Erdwiderstand von Sand in Abhängigkeit von Wandbewegungsart und Sättigungsgrad, Schriftenreihe des Fachgebiets Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund, Heft 16, 1993
- [12] Narain, J., Saran, S., Nandakumaran, P.: Model Study of Passive Pressure in Sand, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 95, SM 4, 1969, pp. 969 - 983
- [13] Ohde, J.: Zur Theorie des Erddrucks unter besonderer Berücksichtigung der Erddruckverteilung, Die Bautechnik 16, 1938, Heft 10/11, S. 150-159, Heft 13, S. 176-180, Heft 19, S. 241-245, Heft 25, S. 331-335, Heft 37, S. 480-487, Heft 42, S. 570-571, Heft 53/54, S. 753-761



- [14] Ohde Johann 1950, Neue Erdstoff-Kennwerte, Die Bautechnik 27, 1950, Heft. 11, S. 345-351
- [15] Schmitt, J.: Simulation eines Triaxialversuches mittels der FEM bei Variation des Stoffgesetzes, Entwurf am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig,, 1996, unveröffentlicht
- [16] Schweiger, H. F.: Zur Wahl des Stoffgesetzes für praktische FE-Berechnungen, aus Beiträge des Seminars: Theorie und Praxis numerischer Modelle in der Bodenmechanik, Mitteilungsheft 10, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz, 1993, S. 9 - 32
- [17] Vittinghoff, T., Rodatz, W., Kayser, J.: Entwicklung eines numerischen Tragwerkmodells aufgrund von in situ Messungen nach EC 7 (Beobachtungsmethode), Experimentelle Verfahren zur Lösung bautechnischer Aufgaben, VDI-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Berichte 1196, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 25 - 34