

15. CAD-FEM USERS ' MEETING

FEM-Technologietage

15. - 17. Oktober 1997 in Fulda

CADFEM

Herausgeber

CAD-FEM GmbH
Marktplatz 2
D-85567 Grafing bei München
Telefon 0 80 92 - 70 05 - 0
Fax 0 80 92 - 70 05 - 77
e-mail: info@cadfem.de
<http://www.cadfem.de>

Auflage

300 Exemplare

© 1997 by CAD-FEM GmbH, 85567 Grafing bei München
Alle Rechte vorbehalten.
Printed in Germany

Das Werk, einschließlich aller seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechts ist ohne Zustimmung der Autoren unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die CAD-FEM GmbH übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler in den Aufsätzen des Tagungsbandes. Verantwortlich für den Inhalt sind ausschließlich die jeweiligen Autoren.

Programmentwicklungen im ANSYS-Open-System für Anwendungen in der Geotechnik

T. Vittinghoff, B. Pläßmann, J. Schmitt

Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig

Zusammenfassung: Das FE-Programm ANSYS bietet für die Bearbeitung von Aufgabenstellungen aus dem Bereich der Geotechnik standardmäßig das Stoffgesetz nach Drucker-Prager an, um physikalische Nichtlinearitäten berücksichtigen zu können. Da damit das Stoffverhalten des Materials Boden in den meisten Fällen nicht ausreichend abgebildet werden kann, besteht die Notwendigkeit weitere Stoffgesetze in ANSYS zu implementieren. Dies ist für den Anwender über die Schnittstelle UPF mit der Datei USERPL möglich. Anhand eines Vergleiches mit den selbst programmierten Stoffgesetzen wird gezeigt, daß die in ANSYS standardmäßig implementierten Fließregel des Kompressionskegels nach Drucker-Prager unter der Option DP zu unrealistischen Ergebnissen führt und somit nur begrenzt anwendbar ist.

Die Erstellung geometrischer Modelle umfaßt häufig nicht nur die Generierung der geotechnischen Bauteile sondern auch die des sie umgebenden Kontinuums. Zur vereinfachten Erstellung dieser Netzstrukturen wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig das Geometrische Modellierungsmodul PILE-SOLID entwickelt und über die User-Interface-Design-Language UIDL in die grafische Oberfläche GUI integriert. Nachfolgend wird anhand eines Beispiels die Anwendung der beschriebenen Programmentwicklung im ANSYS-Open-System dargestellt.

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 Berechnung mit der Finite-Element-Methode (FEM). Bei Verwendung von FE-Programmen läßt sich durch Wahl eines geeigneten Stoffgesetzes und der dazugehörenden Kenngrößen das Materialverhalten des Bodens in geeigneter Form modellieren. Für nicht zeitabhängige Aufgabenstellungen in der Geotechnik steht in ANSYS z.Z. nur das elastoplastische Stoffgesetz nach Drucker-Prager zur Verfügung. Dieses Stoffgesetz eignet sich jedoch nicht für alle Problemstellungen. Zur Berücksichtigung anderer plastischen Eigenschaften kann die UPF Schnittstelle USERPL zur Implementierung user-programmierter StoffgesetZRoutinen genutzt werden. Zeitabhängige Materialeigenschaften des Bodens können dabei über die Schnittstelle USERCR beschrieben werden.

Eine weitere Aufgabe in der Geotechnik stellt die häufig auftretende Generierung eines geotechnischen Bauteiles im Kontinuum dar. Dies ist notwendig, um die Interaktion von Boden und Bauwerk beschreiben zu können. Zum Teil lassen sich diese geometrischen Modelle nur mit sehr großem Zeitaufwand und ohne die Anwendung des SOLID-MODELLINGS realisieren. Zur Minimierung des Zeitaufwandes zur Erstellung solcher Netzstrukturen wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technische Universität Braunschweig (IGB-TUBS) das Geometrische Modellierungsmodul PILE-SOLID 1.0v entwickelt. Dieses Modul bietet neben der Wahl unterschiedlicher Querschnittsformen die Möglichkeit einer parametrisierten Vernetzung mittels der Ansys-Parameter-Design-Language APDL. Zur benutzerfreundlicheren Anwendung wurde das Modellierungsmodul als PILE-SOLID 2.0v mit Menusteuerung in die grafische Oberfläche GUI mittels der User-Interface-Design-Language UIDL integriert.

2 User-Programable-Features (UPF)

2.1 USERPL

Für die stoffliche Modellierung von Problemstellungen aus der Geotechnik steht z.Z. in ANSYS Vers. 5.3 nur das Drucker-Prager Kriterium mit den Koeffizienten des Kompressionskegels zur Verfügung (Abb.1c). Das User-Programable-Features (UPF) USERPL ermöglicht dem Anwender von ANSYS eigene elastoplastische Stoffgesetze zu implementieren.

Trotz dieser Möglichkeit, 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 die FE-Berechnung. Bei der Erstellung des dafür notwendigen Strukturmodells müssen folgende Punkte berücksichtigt werden [20]:

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

2.1.1 Invarianten

Die Formulierung von elastoplastischen Stoffgesetzen erfolgt üblicherweise in Invarianten, um eine Unabhängigkeit vom gewählten Koordinatensystem zu erhalten. Nachfolgend werden die gebräuchlichsten Invarianten in der Geotechnik aufgeführt.

Die Invarianten des Spannungstensors $\underline{\sigma}$ lauten nach [19]:

1. Invariante:

$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

2. Invariante:

$$I_2 = \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1 = \sigma_x\sigma_y + \sigma_y\sigma_z + \sigma_z\sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2$$

3. Invariante:

$$I_3 = \sigma_1\sigma_2\sigma_3 = \sigma_x\sigma_y\sigma_z + 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{zx} - \sigma_x\tau_{yz}^2 - \sigma_y\tau_{xz}^2 - \sigma_z\tau_{xy}^2$$

Die Invarianten des deviatorischen Spannungstensors \underline{S} lauten nach [19]:

1. Invariante:

$$J_1 = 0$$

2. Invariante:

$$J_2 = \frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_M)^2 + (\sigma_2 - \sigma_M)^2 + (\sigma_3 - \sigma_M)^2]$$

3. Invariante:

$$J_3 = (\sigma_1 - \sigma_M)(\sigma_2 - \sigma_M)(\sigma_3 - \sigma_M)$$

Die Invariante σ_M beschreibt die hydrostatische Spannung und gibt nach [19] den Abstand des Spannungspunktes vom Koordinatenursprung auf der Raumdiagonalen an.

$$\sigma_M = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$$

Mit der Invariante $\bar{\sigma}$ wird nach [19] der Abstand des aktuellen Spannungspunktes zur Raumdiagonalen auf der Deviatorebene bestimmt.

$$\bar{\sigma} = \sqrt{I_2}$$

Der Lode Winkel θ bezeichnet nach [19] die Lage des Spannungspunktes in der Deviatorebene. Die Deviatorebene wird in sechs Sektoren aufgeteilt, so daß gilt $-30^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$. Eine reine Schubbeanspruchung ergibt sich für $\theta = 0$. Für $\theta = 30^\circ$ erhält man den Spannungszustand $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, der einem triaxialen Kompressionsversuch entspricht. Aus $\theta = -30^\circ$ resultiert der Spannungszustand eines triaxialen Zugversuchs mit $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$.

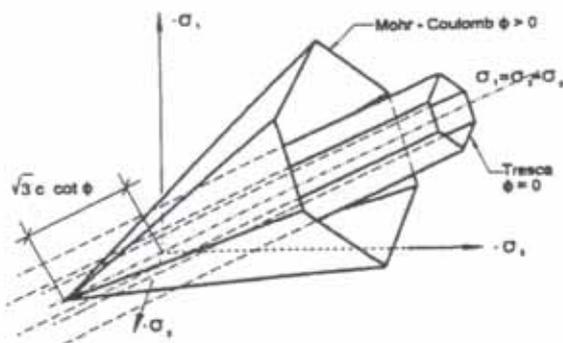
$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin\left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{I_3}{\sigma^3}\right)$$

2.1.2 Stoffgesetze

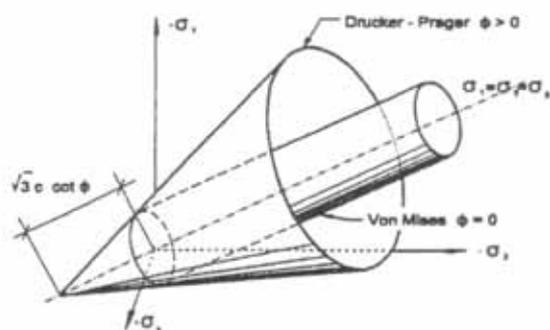
In der Geotechnik werden häufig zeitunabhängige Stoffgesetze aus der Gruppe der elastoplastischen Stoffgesetze verwendet, um das nichtlineare Verhalten des Bodens abzubilden. Diese werden durch folgende Punkte charakterisiert.

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

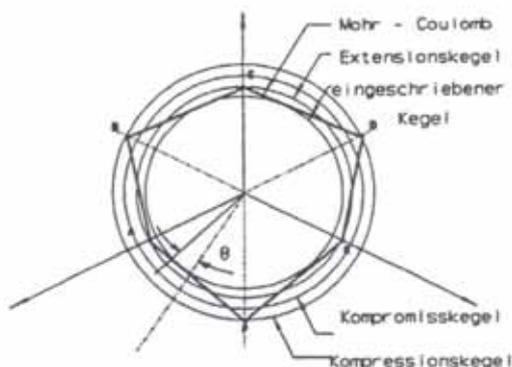
Mit Hilfe des Fließkriteriums wird dabei der Spannungszustand definiert, bei dem ein Fließen einsetzt. Zur Bestimmung der beim Fließen auftretenden plastischen Dehnungsanteile wird die Fließregel verwendet.



a) Mohr-Coulomb (MC), Tresca



b) Drucker-Prager (DP), von Mises



c) Schnitt in der Deviatorebene

Abb.1 Fließkriterien [18]

In Abb.1 sind Fließkriterien von Stoffgesetzen ohne eine Ver- oder Entfestigungsregel dargestellt. Diese Gesetze werden als linearelastisch-idealplastische Stoffgesetze bezeichnet, da sie ein entsprechendes Spannungs-Dehnungsverhalten beschreiben.

Bei dem Kriterium von Mohr-Coulomb handelt es sich um ein ebenes Bruchkriterium, dessen übliche Schreibweise lautet [19]:

$$|\tau| = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c$$

φ innerer Reibungswinkel

c Kohäsion

σ_n normal auf die Bruchfläche wirkende Scherspannung

τ in der Bruchfläche wirkende Scherspannung

Mittels der Invarianten läßt sich diese Gleichung nach [19], wie folgt formulieren:

$$F = \sigma_M \cdot \sin \varphi + \bar{\sigma} \cdot \cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \bar{\sigma} \cdot \sin \varphi \cdot \sin \theta - c \cdot \cos \varphi = 0$$

Der Reibungswinkel φ kann aus einfachen Triaxial- oder Scherversuchen ermittelt werden und wird nach [19] als konstant vorausgesetzt. Plastische Verformungen werden bei allseitig gleichem Druck nicht berechnet.

Im Hauptspannungsraum stellt sich das Mohr-Coulomb Bruchkriterium als eine Pyramide dar, die als Grundfläche ein Sechseck besitzt (Abb.1a). In der π - bzw. Deviatorebene läßt sich die Grundfläche der Pyramide erkennen (Abb.1c).

Das Drucker-Prager Kriterium (Abb.1b) ergibt sich durch Approximation der sechseckigen Schnittfläche des Mohr-Coulomb Kriteriums durch einen Kreis in der Deviatorebene (Abb.1c). Für die Annäherung gibt es nach [19] verschiedene Möglichkeiten:

- Kompressionskegel (entspricht dem Spannungszustand eines „triaxialen Druckversuchs“),
- Extensionskegel (entspricht dem Spannungszustand eines „triaxialen Zugversuchs“),
- eingeschriebener Kegel (Kreis, der durch das Sechseck eingeschrieben wird),
- Kompromißkegel (Kreis zwischen Kompressions- und Extensionskegel).

Für das Fließkriterium erhält man in invarianter Darstellungsweise nach [19]:

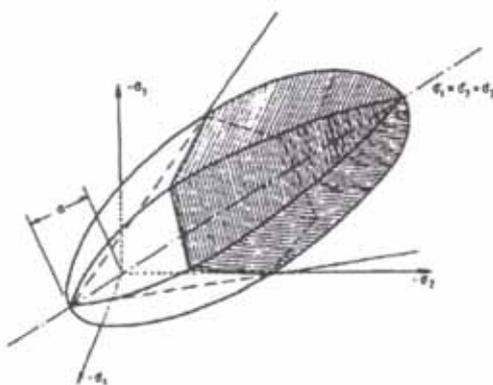
$$F = \alpha \cdot I_1 + \sqrt{J_2} - k$$

Die Parameter α und k werden aus einem Koeffizientenabgleich mit dem Mohr-Coulomb Kriterium ermittelt. Der Koeffizient α gibt dabei den Öffnungswinkel des Drucker-Prager Kegels an. Der Koeffizient k beschreibt die Durchmesserergrößerung infolge Kohäsion.

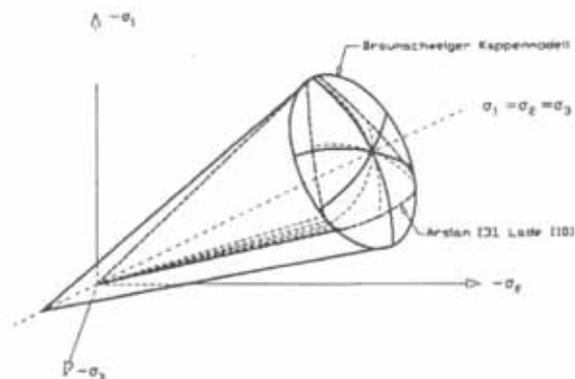
Option	k	α
Drucker-Prager (äußerer Kegel) Kompressionskegel, [18]	$\frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$	$\frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}$
Drucker-Prager (innerer Kegel) Extensionskegel, [18]	$\frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}$	$\frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}$
Drucker-Prager eingeschriebener Kegel, [18]	$\frac{3c \cos \varphi}{\sqrt{3}\sqrt{3 + \sin^2 \varphi}}$	$\frac{\sin \varphi}{\sqrt{9 + 3 \sin^2 \varphi}}$
Drucker-Prager Kompromißkegel, [18]	$\frac{2 \sin \varphi}{3\sqrt{3}}$	$\frac{2c \cos \varphi}{\sqrt{3}}$

Abb. 2 Koeffizienten Öffnungswinkel α und Durchmesservergrößerung k infolge Kohäsion

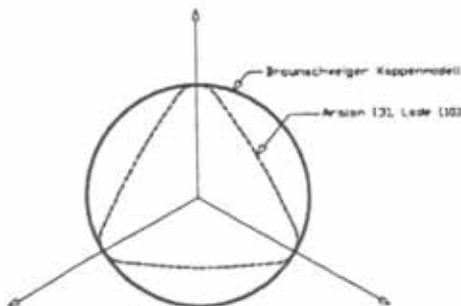
Um ein kontraktantes oder dilatantes Verhalten des Materials Boden in Verbindung mit einer Ver- oder Entfestigung zu berücksichtigen, können elastoplastische Stoffgesetze mit volumetrischer Verfestigung verwendet werden. Zu dieser Gruppe gehören die Stoffgesetze mit den nachfolgend in Abb.3 dargestellten Fließkriterien.



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



b) Modell nach Arslan [3] und Braunschweiger Kappenmodell



c) Schnitt in der Deviatororebene

Abb.3 Fließkriterien mit volumetrischer Verfestigung

Das Fließkriterium des Cam-Clay-Modells wird nach [21] definiert zu:

$$F = (\lambda - \kappa) \left(\ln \frac{\sigma_M}{p_c} + \frac{\sigma_M}{M} - \frac{\bar{\sigma}}{M} \right)$$

Neigung Kompressionskurve λ

Neigung Schwellkurve κ

Konsolidierungsspannung $|p_c|$

Neigung der Critical State - Line M

Die Eingabe der Materialparameter, die für die Anwendung der programmierten elastoplastischen Stoffgesetze benötigt werden, geschieht auf der interaktiven ANSYS-Benutzeroberfläche oder im Batchmodus über die Kommandos:

```
TB,USER,MAT,13
```

Die Option *USER* aktiviert das UPF (User-Programmable-Feature) und damit eines der programmierten elastoplastischen Stoffgesetze, wobei die Option *MAT* die entsprechende Materialreferenznummer zuweist.

```
TBDATA,1,C1,C2,C3,C4,C5,C6
```

```
TBDATA,2,C7,C8,C9,C10,C11,C12
```

```
TBDATA,3,C13
```

Mit dem Kommando **TBDATA** werden die Materialparameter eingelesen. Die Wahl des Stoffgesetzes erfolgt durch setzen des Parameters *C1*.

C1 = 12 Mohr-Coulomb Kriterium

C1 = 13 Drucker-Prager Kriterium, Kompressionskegel (standardmäßig in ANSYS implementiert)

C1 = 14 Drucker-Prager Kriterium, Extensionskegel

C1 = 15 Drucker-Prager Kriterium, eingeschriebener Kegel

C1 = 16 Drucker-Prager Kriterium, Kompromißkegel

C1 = 17 Braunschweiger Kappenmodell

C1 = 18 Cam-Clay-Modell [21]

C1 = 19 modifiziertes Cam-Clay-Modell [21]

C1 = 20 modifiziertes Cam-Clay-Modell mit Mohr-Coulomb Versagensfläche in der Deviatorebene [5]

Die elastoplastischen Stoffgesetze wurden für *C1* = 12 bis 17 als UPF programmiert und in die kommerzielle Version ANSYS 5.3 implementiert. Die Programmierung der Cam-Clay Stoffmodelle ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht verifiziert.

2.1.3 Verifikation der programmierten Stoffgesetze

Das Konvergenzverhalten des verwendeten iterativen Lösungsverfahrens nach Newton-Raphson wurde mittels der Simulation eines Triaxialversuches [16] überprüft.

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

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 Erdwiderstandversuches zur Bestimmung der Erdwiderstandsverteilung in Abhängigkeit unterschiedlicher Wandbewegungen.

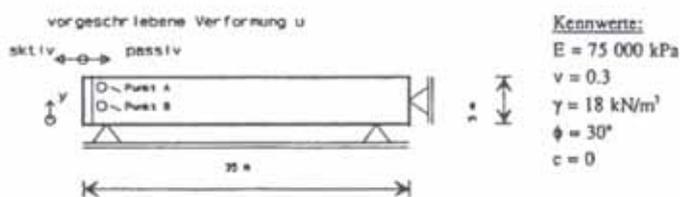
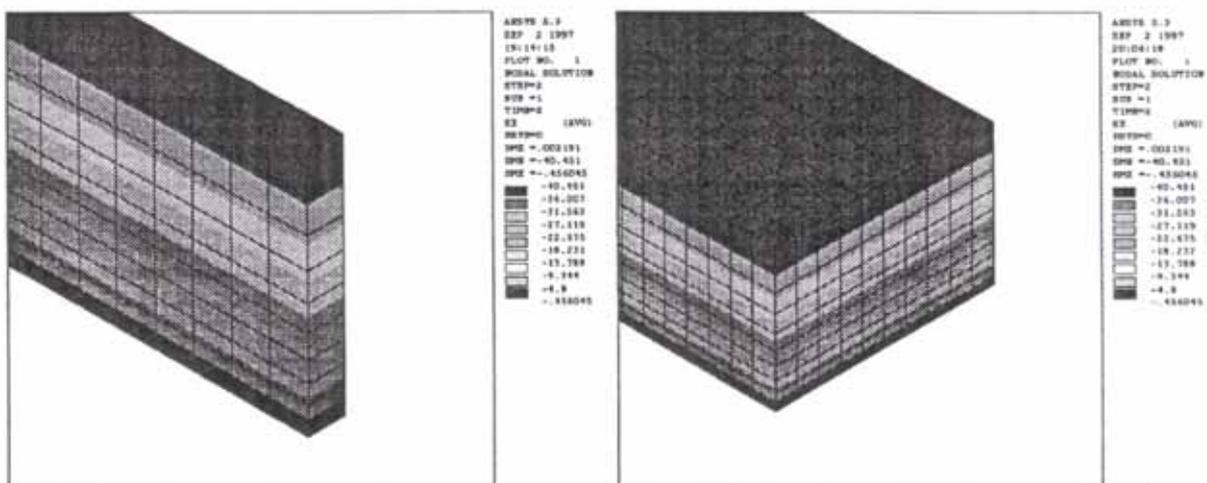


Abb.4 FE-Modell nach Schweiger [16]

Zur Verifikation der programmierten Stoffgesetze wurden die Ergebnisse der Erddruckberechnungen nach Schweiger [18] verwendet. Die geometrischen Randbedingungen sowie die Materialparameter können Abb.4 entnommen werden. Es wurden parallele Wandverschiebungen von maximal 7 mm beim Kriterium nach Mohr-Coulomb und 25 mm für das Kriterium nach Drucker-Prager vorgegeben. Durch Ansatz einer assoziierten Fließregel wurde der Dilatanzwinkel ψ gleich dem Reibungswinkel ϕ gesetzt.



Eine Angabe der Modellbreite konnte der Arbeit von Schweiger [18] 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.5) konnte ein Einfluß der Modellbreite auf die Berechnungsergebnisse ausgeschlossen werden. Die nachfolgenden Berechnungen erfolgten für das Einschichtenmodell der Abb.5a. Es wurden Elemente mit 20 Knoten und quadratischem Verschiebungsansatz verwendet.

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

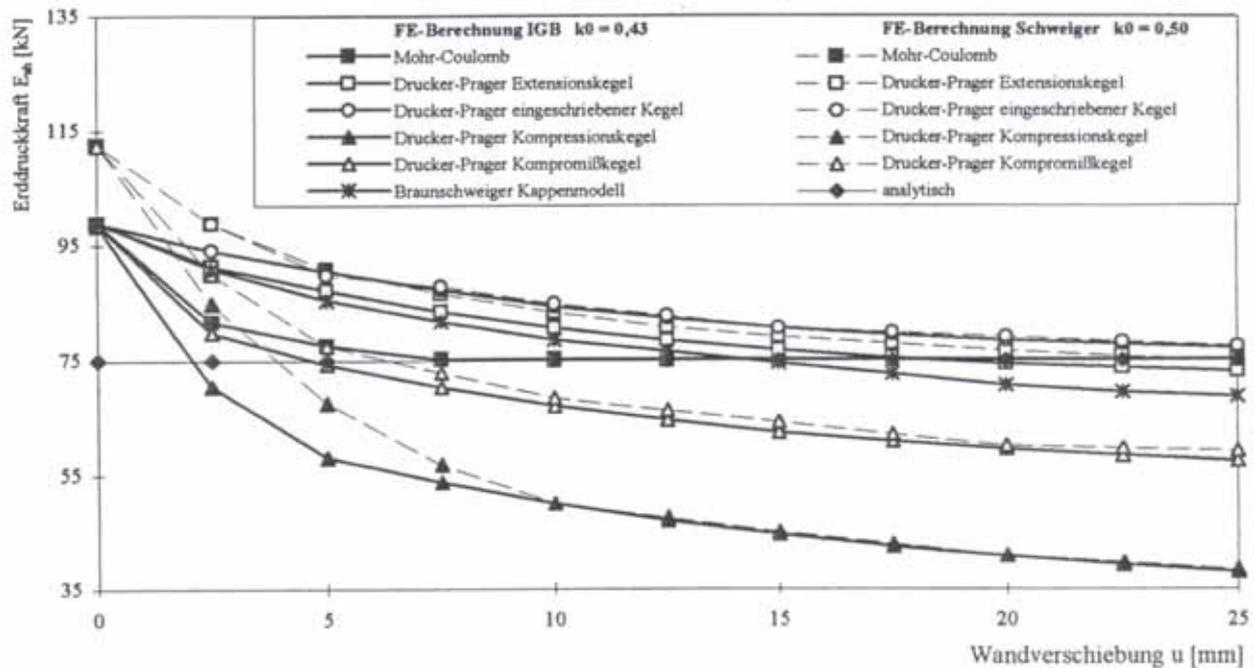


Abb.6 Entwicklung der aktiven Erddruckkraft E_{ah} bei paralleler Wandverschiebung

Um bei den Vergleichsberechnungen den Einfluß einer volumetrischen Verfestigung zu untersuchen, wurde zusätzlich eine Variante mit de Braunschweiger Kappenmodell (Abb.3) berechnet. Das Braunschweiger Kappenmodell resultiert aus einer deviatorischen Fließbedingung nach DP sowie einer volumetrischen Fließbedingung nach Lade [10].

Kennwert	Einheit	FE-Berechnung
E-Modul E	[kN/m ²]	75.000
Querdehnzahl μ	[-]	0,3
Wichte γ	[kN/m ³]	18
Reibungswinkel φ	[°]	30
Dilatanzwinkel ψ	[°]	30
Kohäsion c	[kN/m ²]	0,1
Achsenabschnitt M	[-]	27.320 \ 18.300
Neigung L	[-]	242,7 \ 13,6

Abb.7 Materialkennwerte

Die für die FE-Berechnung benötigten zusätzlichen Materialkennwerte M und L der Abb.7 wurden den Arbeiten von Arslan [3] und Früchtenicht [8] entnommen.

2.1.4 Beurteilung der programmierten Stoffgesetze

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. Die Aussage von Schweiger [18] konnte bestätigt werden, daß Berechnungen mit dem Kompressions- und Kompromißkegel nach Drucker-Prager zu erheblichen Festigkeitsüberschätzungen führen. Dies läßt sich aus Abb.7 anhand der Kurven, welche unterhalb der analytisch ermittelten Lösung liegen, ableiten.

Die elastoplastischen Stoffgesetze Mohr-Coulomb Kriterium, Drucker-Prager Kriterium mit den Koeffizienten des Extensionskegels und des eingeschriebenen Kegels sind für die Simulation des untersuchten Erddruckmodells am besten geeignet. Das Braunschweiger Kappenmodell wurde nur für den qualitativen Verlauf überprüft und bedarf noch einer weiteren Anpassung mittels entsprechender Laborversuche, mit deren Hilfe die hier anhand der Literatur angenommenen Materialkennwerte genauer bestimmt werden können.

Der Vergleich der programmierten Stoffgesetze mit der in ANSYS standardmäßig implementierten Fließregel des Kompressionskegels nach Drucker-Prager zeigt, daß das in ANSYS fest vorgegebene Fließkriterium mit der Option DP zu unrealistischen Ergebnissen führt und somit nur begrenzt anwendbar ist.

2.2 USERCR

Neben der Möglichkeit elastoplastische Stoffgesetze in ANSYS zu implementieren, kann mit Hilfe des UPF USERCR eine zeitabhängige Materialeigenschaft beschrieben werden. Als Beispiel für eine solche Anwendung wurde hier die Ankereignungsprüfung nach DIN 4125 simuliert. Im Rahmen der Eignungsprüfung ist nachzuweisen, daß der in Abb.8a dargestellte Verpreßkörper mit der Länge l_v unter 1,5-facher Gebrauchslast eine maximal zulässige Kriechgeschwindigkeit nicht überschreitet. Dem Versuchsaufbau der Prüfung ist das geometrische Modell in Abb.8 gegenübergestellt.

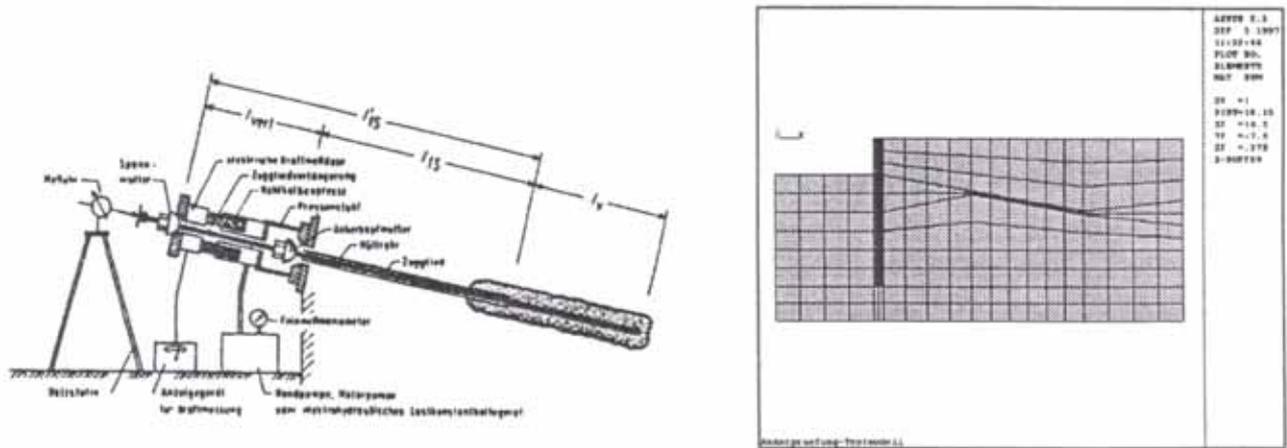


Abb.8 a) Aufbau der Ankereignungsprüfung nach DIN 4125

b) Geometrisches Modell der Prüfung

Die 1,5-fache Gebrauchskraft wird in 5 Laststufen aufgebracht, wobei nach jeder Laststufe entlastet wird. Dieses Verhalten wurde mittels einer MACRO-Programmierung simuliert, wobei die Lastkonstanthaltung über eine Grenzwertabfragung sowie eine Schleifensteuerung erfolgte. Unter der Maximallast jeder einzelnen Laststufe wird die Kriechgeschwindigkeit bestimmt. Der Abb.9 können die Kraft-Verschiebungslinien von Versuch und FE-Berechnung entnommen werden. Die bleibenden plastischen Verformungen infolge des Herausziehens des Ankers sowie des jeweiligen Kriechanteiles bei konstanter Last lassen sich in beiden Abbildungen erkennen.

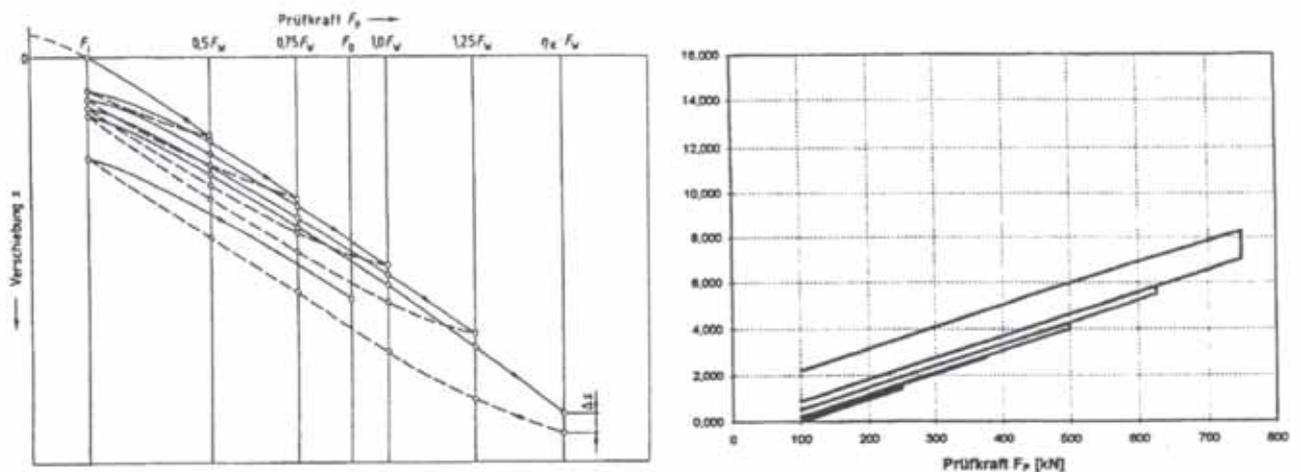


Abb.9 a) Kraft-Verschiebungslinie nach DIN 4125

b) Kraft-Verschiebungslinie der FE-Berechnung

Im Gegensatz zum Materialverhalten des Ankerstahls mit einer Hysterese als Kraft-Verschiebungskurve wurde der Stahl in der FE-Analyse mit einem konstanten E-Modul modelliert (s. Abb.9).

Die Auswertung der Kriechuntersuchung kann der Abb.10 in Form der Zeit-Verschiebungslinien entnommen werden. Man kann die Zunahme der Kriechgeschwindigkeit infolge der Steigerung der Gebrauchslast F_W erkennen.

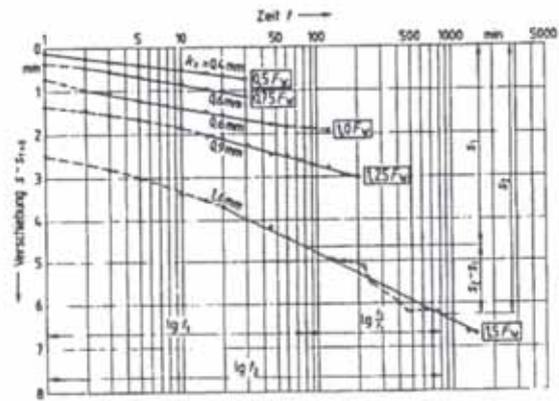
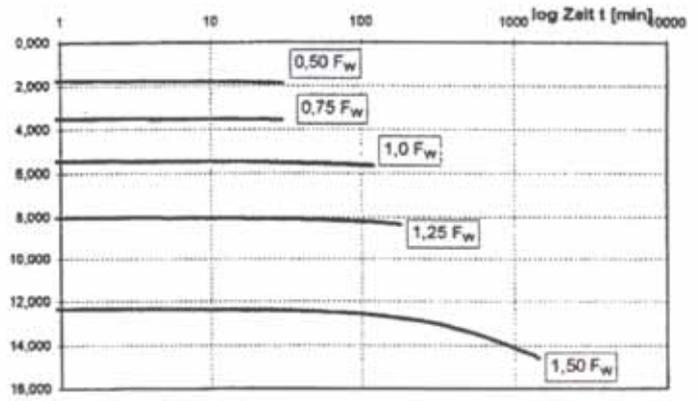


Abb.10 a) Zeit-Verschiebungslinie nach DIN 4125



b) Zeit-Verschiebungslinie der FE-Berechnung

3 Modellierungsmodul PILE-SOLID mittels UIDL

Aus der Notwendigkeit die Interaktion von Boden und Bauwerk in der Geotechnik beschreiben zu müssen, ergibt sich die Aufgabe, daß geotechnische Bauteile gemeinsam mit dem umgebenden Kontinuum zu generieren. Zum Teil lassen sich diese geometrischen Modelle nur mit sehr großem Zeitaufwand ohne Anwendung des **solid-modellings** realisieren. Zur Minimierung des Zeitaufwandes bei der Erstellung solcher Netzstrukturen wurde am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technische Universität Braunschweig (IGB-TUBS) das Geometrische Modellierungsmodul **PILE-SOLID 1.0v** entwickelt.

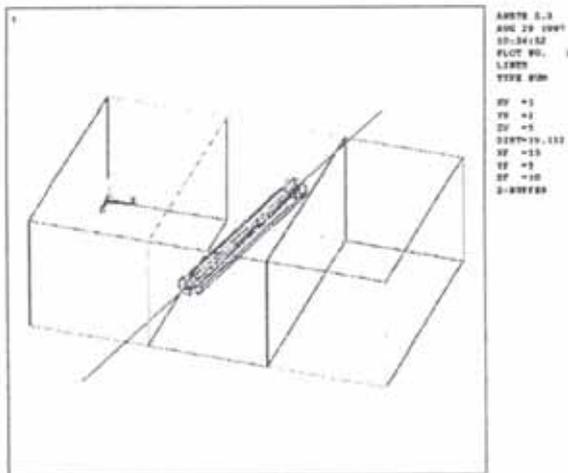


Abb.11 Linienstruktur eines Modellierungsbeispiels mit PILE-SOLID

Als Eingabedaten werden lediglich Keypoint-Koordinaten des Kontinuums und der Bauteilachse (s. Abb.11) sowie eine Kennziffer für die Vernetzungsart des Bauteils benötigt. Das Bauteil kann das Kontinuum durchdringen oder auch von ihm umschlossen werden. Das Beispiel in Abb.12 zeigt die Generierung eines Ankerverpreßkörpers.

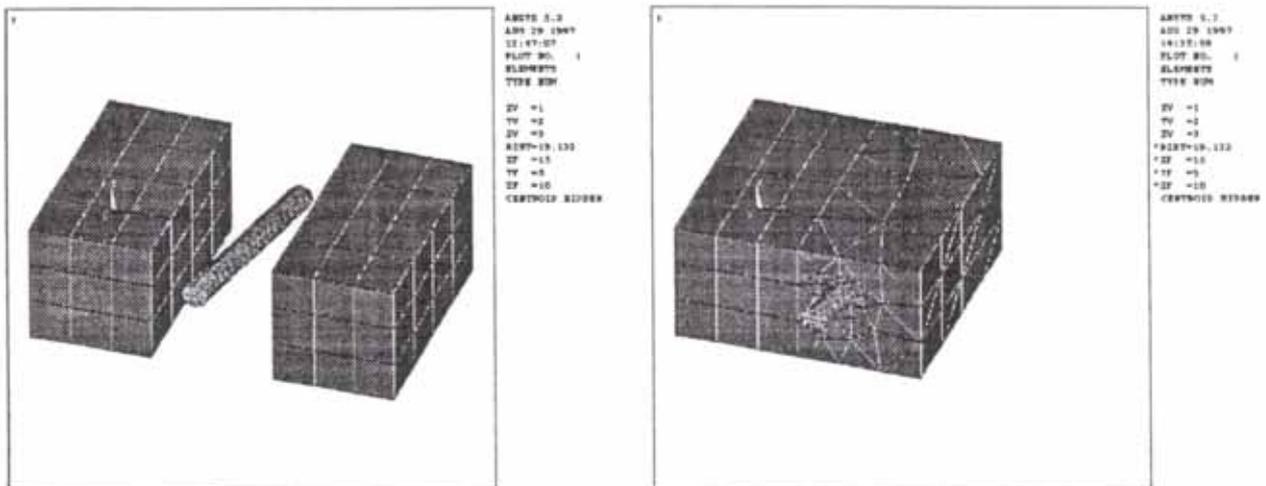


Abb.12 Vernetzungsbeispiel eines Verpreßankers im Kontinuum mit PILE-SOLID

Das beschriebene Modul bietet neben der Wahl unterschiedliche Einbauquerschnitte die Möglichkeit einer parametrisierten Vernetzung mittels der Ansys-Parameter-Design-Language APDL. Zur benutzerfreundlicheren Anwendung wurde das Modellierungsmodul als PILE-SOLID 2.0v mit Menuesteuerung in die grafische Oberfläche GUI integriert. Dies erfolgte mittels der User-Interface-Design-Language UIDL in Abb.13.

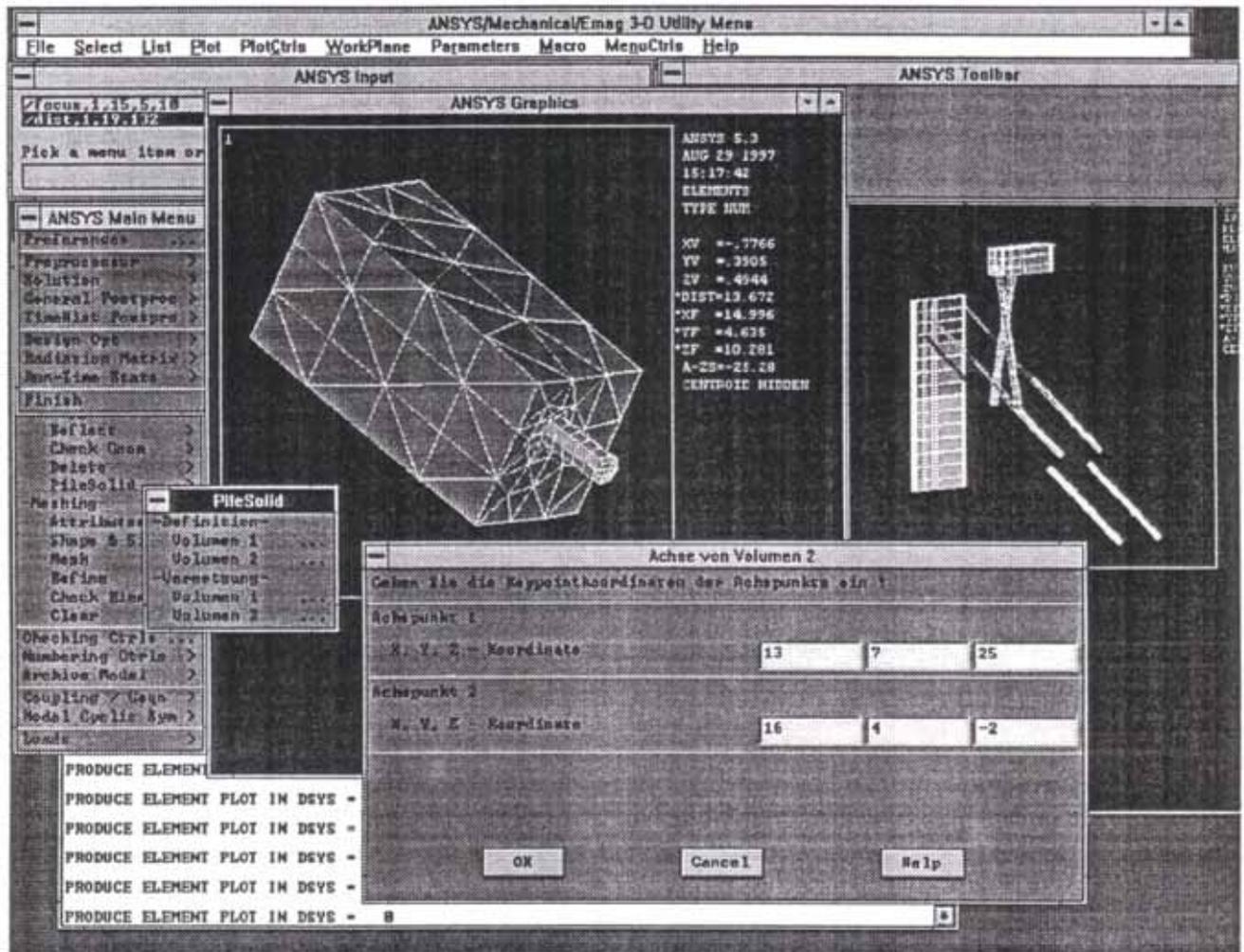


Abb.13 Grafische Oberfläche GUI des Modellierungsmoduls PILE-SOLID 2.0v

5 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-Modell-versuchen mit Kopfpunktdrehungen, Institut für Geotechnik der Technischen Universität Dresden, Heft 3 (60. Geburtstag von 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] Ortigao, J.A.R.: Soil Mechanics in the Light of Critical State Theories, A.A.Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1995
- [16] Schmitt, J.: Simulation eines Triaxialversuches mittels der FEM bei Variation des Stoffgesetzes, Entwurf am Institut für Grundbau und Bodenmechanik, TU Braunschweig, 1996, unveröffentlicht

-
- [17] Schofield, A. N., Worth, C. P. : Critical State Soil Mechanics, McGraw Hill, London, 1968
 - [18] 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
 - [19] Schweiger, H. F. : Nichtlineare Berechnungsmethoden in der Geomechanik, Vorlesungsunterlagen, Version 1.1 WS 94/95, Institut für Bodenmechanik und Grundbau, Technische Universität Graz
 - [20] 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-Gesell. Mess- und Automatisierungstechnik, VDI Berichte 1196, VDI Verlag, Düsseldorf, 1995, S. 25 - 34
 - [21] Zienkiewicz, O. C., Naylor, D. J.: The adaptation of critical state soil mechanics for use in finite elements, Stress-strain behaviour of soils, Proceedings of the Roscoe Memorial Symposium, Cambridge University, 29-31 March 1971, G.T. Foulis & Co. LTD, pp. 537-547