



**INSTITUT FÜR GEOTECHNIK  
STUTT GART**

**1990  
MITTEILUNG 32**

**Peter Gußmann, Tom Schanz,  
Ulrich Smolczyk, Ernst Willand**

**BEITRÄGE  
ZUR ANWENDUNG DER KEM**

**Erddruck, Grundbruch,  
Standsicherheit von Böschungen**

Universität Stuttgart/70509/

Institut für Geotechnik  
Ulrich Smolczyk, Ernst Willand  
Postfach 55 01 49  
D-70509 Stuttgart



**INSTITUT FÜR GEOTECHNIK  
STUTT GART**

**1990  
MITTEILUNG 32**

**Peter Gußmann, Tom Schanz,  
Ulrich Smolczyk, Ernst Willand**

**BEITRÄGE  
ZUR ANWENDUNG DER KEM**

**Erddruck, Grundbruch,  
Standicherheit von Böschungen**

## Vorwort des Herausgebers

Unter dem Zwang, eine Abstimmung der Sicherheitsnachweise mit dem Konstruktiven Ingenieurbau vorzunehmen, sah sich der Grundbau veranlaßt, auch seine eigenen Sicherheitsanforderungen zu überprüfen, was insbesondere in der Bundesrepublik Deutschland zu einer ganzen Reihe von Untersuchungen führte. Vor allem der „*Grenzzustand 1*“, der das Versagen einer Gründung bezeichnet, machte es erforderlich, ein einheitliches Nachweiskonzept zu entwickeln.

Auf die Unvereinbarkeit der bisher verwendeten globalen Sicherheitswerte beim Grund- und Böschungsbruch wies GUSSMANN bereits 1975 im Heft 2 dieser Reihe hin. Die verschiedenen Untersuchungen, die sich in unserem Institut daran anschlossen, führten schließlich zur Verallgemeinerung des Grundgedankens, der beim klassischen Lamellenverfahren verwendet wird, und der heute in der Praxis als die „*Methode der kinematischen Elemente*“ bekannt ist. Parallel zu den Untersuchungen der Karlsruher Gruppe, die sich auf die graphische Lösung mit wenigen Elementen bezog, wurde von GUSSMANN – siehe Heft 25 (1985) dieser Reihe – eine computergerechte numerische Lösung mit Bildschirm-Interaktion entwickelt. Das vorliegende Heft stellt Anwendungen dieses Algorithmus in einer für die Praxis verwendbaren Form zusammen. Damit steht ein einheitlicher Traglastnachweis für alle erdstatischen Aufgabenstellungen zur Verfügung.

Smolczyk

---

Das Institut für Geotechnik ist eine Einrichtung der Universität Stuttgart

ISBN 3-92 18 37-32-4

Gegen eine Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 1990 im Eigenverlag des Instituts für Geotechnik

## Kurzfassung

Die vorliegenden, von GUSSMANN betreuten Arbeiten von WILLAND 1987 und SCHANZ 1989 zeigen die Anwendbarkeit der **Kinematischen Elemente Methode** auf drei klassische Aufgaben des Grundbaus: die Böschungsstand-sicherheit, das Grundbruchproblem und die Ermittlung des aktiven Erddrucks. Das gemeinsame Ziel der Untersuchungen war ein intensiver Test der Programme KOM (OCHMANN 1987) und KEM2D (GUSSMANN 1986) bei einfachen Randbedingungen und der Vergleich der KEM-Berechnungen mit Ergebnissen anderer Rechenverfahren.

Für die untersuchten Problemstellungen zeigte sich die KEM gut geeignet. In Verbindung mit einem Personal Computer bietet ihr Einsatz in der Praxis eine gute Möglichkeit zur Ermittlung des maßgeblichen Bruchverhaltens.

**Teil A** beschreibt die Ausarbeitung einer **normierten Standsicherheitstafel für homogene Böschungen** ohne Wasser und mit Grundwasser in halber Böschungshöhe mit KEM.

Aus Untersuchungen des Variationsverhaltens und der optimierten Endgeometrien werden dabei Strategien zur Reduzierung des Rechenaufwandes abgeleitet.

Anschließend werden die entsprechenden Tafeln von MORGENSTERN/PRICE, COUSINS, KREY/BISHOP, HOEK/BRAY und TAYLOR in einer einheitlichen Auf-tragung wiedergegeben und den Ergebnissen der KEM gegenübergestellt.

**Teil B** gibt zunächst eine Einführung in die theoretischen Grundlagen der Kinematischen Elemente Methode nach GUSSMANN .

Dann wird die Anwendung der KEM zur Berechnung des **aktiven Erddruckes hinter einer geneigten Stützwand bei Böden mit Kohäsion und Reibung** gezeigt. Die resultierenden Erddruckbeiwerte  $K_a$  werden für Wandneigungswinkel, Böschungswinkel, Wandreibungswinkel und Scherparameter in Dia-grammen zusammengestellt.

Anschließend werden exemplarisch die Last- und Neigungsbeiwerte der Grund-bruchgleichung zur Bestimmung der **Traglast von schräg belasteten Flach-gründungen** nach DIN 4017 berechnet und mit den Empfehlungen der DIN verglichen.

## Summary

The present investigations of WILLAND 1987 and SCHANZ 1989 supervised by GUSSMANN demonstrate the applicability of the **Kinematical Element Method** to three classical soil mechanics problems, i.e. slope stability, base failure and the evaluation of the active earth pressure.

The common objective was to test the programmes KOM (OCHMANN 1987) and KEM2D (GUSSMANN 1986) thoroughly with simple boundary conditions and to compare the results with those obtained by other calculation methods.

The KEM proved itself as suitable with the problems investigated and its application on a personal computer provides a good means to ascertain the appropriate yield mechanism.

**Part A** describes the development of a **standardized stability chart for homogeneous slopes** without water and with a groundwater table at half of the slope height by means of the KEM.

A sensitivity analysis and an investigation of the optimized yield geometries lead to strategies that reduce the computational effort.

Finally the corresponding diagrams of MORGENSTERN/PRICE, KREY/BISHOP, COUSINS, HOEK/BRAY and TAYLOR are compared with the KEM-results after transforming them into an uniform format.

**Part B** introduces the theoretical fundamentals of the **Kinematical Element Method** after GUSSMANN.

Then, the application of the KEM to calculate the **active earth pressure behind an inclined retaining wall with cohesion and friction** is outlined. The resultant earth pressure coefficients  $K_a$  are presented as diagrams for various angles of wall inclination, ground surface slope and wall friction.

Finally the coefficients used in the German standard DIN 4017 to calculate the **bearing capacity of shallow foundations with inclined loads** are determined by the KEM and compared with the DIN recommendations.

# Inhaltsverzeichnis

<b>A</b>	<b>Standsicherheitstabeln für homogene Böschungen berechnet mit der KEM</b>	<b>5</b>
<b>1</b>	<b>Grundlagen in Kürze</b>	<b>5</b>
1.1	Die Kinematische Element Methode (KEM) . . . . .	5
1.2	Merkmale des verwendeten Rechenprogramms . . . . .	6
1.3	Verwendete Numerierung . . . . .	8
1.4	Variations- und Darstellungsmöglichkeiten . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Vorbereitende Untersuchungen</b>	<b>11</b>
2.1	Untersuchung der Normierung . . . . .	11
2.2	Mitziehen der kritischen Geometrie . . . . .	12
2.3	Untersuchung des Konvergenzverhaltens . . . . .	15
2.3.1	Verhalten in der Anlaufphase der Iteration . . . . .	15
2.3.2	Verhalten in der Zielphase der Variation . . . . .	17
2.3.3	Zusammenfassung . . . . .	19
2.3.4	Erkennungsmerkmale von Bruchgeometrien . . . . .	19
2.4	Analyse der Bruchgeometrien . . . . .	19
2.4.1	Lokale Sicherheitsbetrachtung . . . . .	21
2.4.2	Verzerrung der Bruchgeometrie . . . . .	23
2.4.3	Versuch einer graphischen Lösung . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Praktische Umsetzung der Erfahrungen</b>	<b>27</b>
3.1	Entwicklung von Serviceprogrammen . . . . .	27
3.1.1	Kanalieren der Datenflut . . . . .	28
3.1.2	Visualisieren der Ergebnisse . . . . .	29
3.1.3	Aufbereiten der Ergebnisse in Diagrammform . . . . .	30
3.2	Manipulationen zur Beschleunigung der Rechnung . . . . .	30
3.2.1	Verdopplung und Umbau der Elementtrennflächen . . . . .	31
3.2.2	Vermeiden von Zusammenbrüchen am Anfang der Iteration . . . . .	33
3.2.3	Vermeiden von Abstürzen gegen Ende der Iteration . . . . .	34

<b>4 Ausarbeitung der Böschungstafel</b>	<b>35</b>
4.1 Beschreibung der Arbeitsweise . . . . .	35
4.2 Kommentierung der Ergebnisse . . . . .	37
4.2.1 Verwendete Einstellungen . . . . .	37
4.2.2 Flache Böschungen . . . . .	37
4.2.3 Steile Böschungen . . . . .	39
4.2.4 Bemerkungen zur Auftragung $1/\lambda = const.$ . . . . .	40
4.2.5 Anwendung der Standsicherheitstafel bei Schichtung	42
<b>5 Vergleiche mit anderen Verfahren</b>	<b>45</b>
5.1 Vergleich mit allgemeinem Lamellenverfahren . . . . .	46
5.2 Vergleich mit den Ergebnissen von Cousins . . . . .	48
5.3 Vergleich mit dem Krey/Bishop-Verfahren . . . . .	50
5.4 Vergleich mit den Circular Failure Charts . . . . .	52
5.4.1 Nachrechnung einzelner Geometrien mit KEM . . . . .	54
<b>6 Berechnungen mit Grundwasser</b>	<b>57</b>
6.1 Freie Variation aller Bodenkenngößen . . . . .	58
6.2 Berechnungen mit konstanter Wichte . . . . .	60
6.2.1 Austritt des Bruchpolygons im Hang . . . . .	62
6.3 Standsicherheitstafel mit Wasser . . . . .	63
<b>7 ANHANG</b>	<b>69</b>
7.1 Ergebnisse der Rechnungen in Tabellenform . . . . .	69
7.2 Zugehörige Endgeometrien . . . . .	72

<b>B KEM - Nachweise im Grundbau<sup>1</sup></b>	<b>79</b>
<b>1 Einführung, Ziel des Forschungsauftrages</b>	<b>83</b>
1.1 Die Methode der kinematischen Elemente . . . . .	83
1.2 Geometrie . . . . .	85
1.3 Bruchmechanismus und Kinematik . . . . .	87
1.4 Statik . . . . .	91
<b>2 Zielfunktion und Optimierung</b>	<b>95</b>
<b>3 Das verwendete Programm KEM2D</b>	<b>97</b>
<b>4 KEM zur Berechnung des aktiven Erddruckes</b>	<b>99</b>
<b>5 Traglast von Flächengründungen mit KEM</b>	<b>105</b>
<b>6 Zusammenfassung</b>	<b>113</b>
<b>7 Tafeln</b>	<b>115</b>

<sup>1</sup> Schlußbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart

## Bildverzeichnis

1.1	KEM-Plotausgabe mit verwendeter Numerierung . . . . .	10
2.1	Untersuchung der Normierung . . . . .	13
2.2	Verhalten in der Anlaufphase der Iteration . . . . .	16
2.3	Iterationsverhalten in der Nähe der Bruchgeometrie . . . . .	18
2.4	Gleichgewicht am obersten Element . . . . .	22
2.5	Zugseilanalogie, graphische Lösung . . . . .	24
2.6	Schnittmuster der Trennflächen, Winkelhalbierenden . . . . .	25
3.1	Verdopplung der Elemente durch Streckenhalbierung . . . . .	31
3.2	Zurücksetzen inaktiver Elementtrennflächen . . . . .	32
4.1	Alle berechneten Punkte im CFC-Diagramm . . . . .	36
4.2	Endgeometrien am Beispiel einer flachen Böschung . . . . .	38
4.3	Bruchformen steiler Böschungen . . . . .	40
4.4	Standsicherheitsdiagramm mit Linien $1/\lambda = const.$ . . . . .	41
4.5	Zonen qualitativ gleicher Bruchformen . . . . .	43
5.1	Vergleich von KEM mit dem allgemeinen Lamellenverfahren . . . . .	47
5.2	Vergleich von KEM mit den Ergebnissen von Cousins . . . . .	49
5.3	Vergleich von KEM mit dem Verfahren nach Krey/Bishop . . . . .	51
5.4	Vergleich von KEM mit den Circular Failure Charts . . . . .	53
5.5	Vergleich einer flachen Böschung mit und ohne Zugriß . . . . .	54
5.6	Verschiedene Zugrißlagen der Circular Failure Charts . . . . .	55
5.7	Möglichkeiten KEM mit Zugrissen zu rechnen . . . . .	56
6.1	Einfluß der Wichte auf die Bruchform bei Grundwasser . . . . .	58
6.2	Kontrolldiagramm nach der Berechnung mit Wasser . . . . .	59
6.3	Endgeometrien im Verlauf der Rechnung mit Wasser . . . . .	60
6.4	Standsicherheit für verschiedenen Wichten und Wasser . . . . .	61
6.5	Vergleich von Endgeometrien mit und ohne Wasser . . . . .	62
6.6	Eintritt des Bruchpolygons im Hang . . . . .	63
6.7	Standsicherheitstafel mit Wasser ( $H_W/H = 0.5$ ) . . . . .	64
6.8	Standsicherheitstafel ohne Wasser . . . . .	65
6.9	Vergleich von KEM mit der Taylor-Tafel . . . . .	66

1.1	Kinematisches Element . . . . .	86
1.2	Elementrand und Normale . . . . .	87
1.3	Relativverschiebung zweier Elemente (Gleiten) . . . . .	88
1.4	Kinematik . . . . .	89
1.5	Vorzeichendefinition . . . . .	91
1.6	Statik . . . . .	92
3.1	Programm KEM2D . . . . .	98
4.1	Bezeichnungen und Vorzeichenregeln . . . . .	100
4.2	Elementnetz KEM-3 . . . . .	101
4.3	Bemessungsdiagramm . . . . .	102
5.1	Elementnetze KEM-5 / KEM-11 . . . . .	106
5.2	Tragfähigkeitsbeiwerte $N_b$ nach verschiedenen Verfassern . .	107

## Teil A

# Standstabilitätstabellen für homogene Böschungen berechnet mit der Kinematischen Element Methode KEM

## Vorwort des Authors

Teil A dieses Mitteilungsheftes ist meine Diplomarbeit am Institut für Geotechnik, die am 15.6.1987 mein Bauingenieurstudium an der Universität Stuttgart abschloß.

Dieser Arbeit wurde auf der Grundbau-Tagung in Hamburg 1988 von der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau der dritte Preis zuerkannt. Wegen der dadurch entstandenen Nachfrage, soll sie an dieser Stelle in unveränderter Form veröffentlicht werden. Ich habe lediglich orthografische Fehler beseitigt und Anpassungen vorgenommen, die durch die Umstellung des Textsystems von DCF auf  $\text{\LaTeX}$  erforderlich wurden, sowie der Anhang stark gekürzt.

Auf den Abdruck des Anhangs wurde aus Platzgründen verzichtet. Er enthält die entwickelten FORTRAN-Serviceprogramme, mit deren Hilfe die anfallenden Daten verwaltet, und die aufgeführten Diagramme gezeichnet wurden, sowie alle den Diagrammen zugrunde liegenden Geometriedaten und Zahlenwerte.

Als ein Beispiel wurden nur die Dateien der berechneten Kurvenpunkte für eine trockene Böschung mit  $\beta = 40^\circ$  wiedergegeben.

Im Rahmen einer Assistentenstelle am Institut für Geotechnik gab mir Herr Prof. Dr. Smolczyk Gelegenheit, meine Studien fortzuführen und einige der im folgenden vorgeschlagenen Verbesserungen in das Programm KEM von Herrn Dr.-Ing. Ochmann einzubauen.

Willand

## Verwendete Bezeichnungen

- TETA,  $\vartheta, \beta$  : Winkel der Böschungsneigung gegen die Horizontale  
 PHI,  $\Phi, \varphi$  : Winkel der inneren Reibung des Bodens  
 COH,  $c$  : Kohäsion des Bodens, Scherspannung  
 GAM,  $\gamma$  : Wichte des Bodens  
 GAMF,  $\gamma_f$  : Wichte des feuchten Bodens  
 GAMR,  $\gamma_r$  : Wichte des wassergesättigten Bodens, hier  $\gamma = \gamma_f = \gamma_r$   
 HOEH,  $H$  : Höhe der Böschung  
 F,  $F, \eta$  : Standsicherheitszahl der Böschung, entsprechend DIN 4084  
 $1/N$  : Stabilitätszahl  $1/N = \frac{c}{H \cdot \gamma \cdot F}$   
 $1/\text{LAMDA}, 1/\lambda$ : dimensionslose Kennziffer  $1/\lambda = \frac{c}{H \cdot \gamma \cdot \tan \varphi}$   
 GEO : Anzahl der erfolgten Geometrievariationen  
 $\Delta F/\text{GEO}$  : Änderung der Sicherheit je Geometrievariation in ‰

## Begriffserläuterungen

- KEM Methode der Kinematischen Elemente GUSSMANN 86  
 CFC Circular Failure Charts: Tafelwerk aus HOEK 77, kreisförmige Bruchfuge mit Zugriß, mit und ohne Wasser. In dieser Arbeit wurde dieselbe Auftragsart gewählt und als CFC-Diagramm bezeichnet.  
 GEO Name der Subroutine, welche nach jedem Variationsschritt die KEM-Rechnung durchführt, die Anzahl ihrer Aufrufe wird im folgenden als natürliche Kenngröße des Rechenaufwandes, bei gleicher Elementzahl auch der Rechenkosten, verstanden.

- Anfangsgeometrie Koordinaten der Elementknoten im Eingabefile des KEM-Programms.  
 Endgeometrie Ergebnis eines KEM-Rechenlaufs.  
 Bruchgeometrie Der Wirklichkeit am besten angenäherte Elemententeilung, für die eine KEM-Rechnung das absolute Minimum der Standsicherheit ergibt.  
 Startgeometrie Endgeometrie, die durch Handeingabe von Geometriepunkten und gründlicher Optimierung mit KEM erreicht wurde, der Bruchgeometrie somit vermutlich sehr nahe kommt. Durch geringe Änderung von  $\varphi, \gamma$ , oder  $c$  bei unveränderter Böschungsoberfläche wurde von einer solchen Geometrie ausgehend, jeweils eine Linie der Standsicherheitstafel ermittelt.  
 Restart Neuerliche KEM-Rechnung mit derselben Eingabe, lediglich mit der ermittelten Endgeometrie der vorangegangenen Rechnung als neue Anfangsgeometrie. Die Schrittweite wird dabei wieder auf den Anfangswert hochgesetzt, und die Iteration mit neuen Zufallszahlen fortgesetzt.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden mit einem am Institut entwickelten Rechenprogramm, basierend auf der Methode der kinematischen Elemente KEM, die Standsicherheiten von unterschiedlich steilen Böschungen aus homogenem Boden ermittelt.

Die Ergebnisse wurden als **dimensionsloses Standsicherheitsdiagramm** aufbereitet, und mit ähnlichen Diagrammen auf anderer Berechnungsgrundlage verglichen.

In umfangreichen Voruntersuchungen wurden die Systematik der vom Programm ermittelten kritischen Geometrien untersucht und daraus Beurteilungskriterien und Strategien abgeleitet, die sich im Verlauf der erforderlichen ca. 400 Rechenläufe sehr gut bewährt haben. Für eine automatisierte Ergebnisverwaltung wurden FORTRAN-Programme<sup>1</sup> entwickelt, die eine weitere Rechenkosten- und Arbeitersparnis bewirkten.

Die Ausweitung der Untersuchung auf einen Grundwasserstand in halber Böschungshöhe zeigte ein Versagen der Normierung auf. Die Ergebnisse wurden in hohem Maße von der Wichte des Bodens  $\gamma$  abhängig.

<sup>1</sup> OUTIN: Arbeitsprotokoll, Auswerten des Eingabe- und Ausgabefiles, Normieren und Abspeichern der Ergebnisse, Zurückschreiben der Endgeometrie in den Eingabefile. PABLO: Diagramm zeichnen, Auftragen der Ergebnisse. PLODIA: alternative Darstellungsweise.

## Kapitel 1

### Grundlagen in Kürze

#### 1.1 Die Kinematische Element Methode (KEM)

KEM wurde von Prof. Dr.-Ing. P. Gußmann am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Universität Stuttgart aus den Anfangsgründen kinematischer Verfahren heraus zur Anwendungsreife entwickelt und bietet einen eigenständigen Lösungsweg, der sich besonders vorteilhaft auf komplexe Bruchprobleme der Boden- und Felsmechanik anwenden läßt. Interessant ist dieses Verfahren sicher auch zur Untersuchung lokaler Plastifizierungserscheinungen im Massivbau.

Bei diesem Verfahren werden ebene Gleitflächen im Boden zunächst willkürlich so angenommen, daß sie aus dem Halbraum ein System starrer Blöcke (Elemente) herausschälen. Dabei darf eine virtuelle Verschiebung des Systems nur zu lokalen Überschneidungen führen, d.h. die Verträglichkeit der Kinematik muß sichergestellt sein. Mit diesen Annahmen wird nun die innere Arbeit, welche in den angenommenen Scherfugen geleistet wird, berechnet<sup>1</sup> und vermittels einer systematischen Variation der Anfangsgeometrie minimiert. Die auf diese Weise berechnete Sicherheit ist immer größer, oder bei „sinnvollem Anfangssystem und ausreichender Variation“ gleich der realen Sicherheit<sup>2</sup>. Das Verfahren nähert sich der wahren Lösung also von der unsicheren Seite kommend.

Ein besonderes Augenmerk ist demnach auf die Variationsstrategien zu richten und auf die Frage, wann die Suche nach dem absoluten Minimum abgebrochen werden kann. Die Konvergenz auf ein Subminimum ist zumindest bei inhomogenen Problemen nie ganz auszuschließen.

<sup>1</sup> Coulombsche Bruchbedingung, Fellenius Regel.

<sup>2</sup> gemäß dem Kinematischen Satz, wonach — salopp gesagt — in der Natur alles mit geringstem möglichem Energieaufwand versagt.

Eine herausragend neue Qualität von KEM sehe ich in der Tatsache, daß neben den Ergebniswerten der gewünschten Zielfunktion, quasi als Abfallprodukt, die in natura zu erwartende Bruchfigur mitgeliefert wird, vergleichbar einer Computersimulation der Natur (Eine detaillierte Beschreibung von KEM ist in GUSSMANN 85 zu finden).

## 1.2 Merkmale und Möglichkeiten des verwendeten Rechenprogramms

Alle Untersuchungen wurden mit einer Neuprogrammierung von Herrn Dipl.-Ing. H. Ochmann am Rechenzentrum der Universität Stuttgart durchgeführt. Durch Steuergrößen im Eingabefeld des Programms ist aus der Fülle der möglichen Rechenverfahren und Randbedingungen zunächst ein dem Problem angemessenes Ablaufschema einzustellen. Dabei ist im Falle von KEM zusätzlich unter mehreren Variationsstrategien zu wählen und durch Einstellung von Schrittweiten, Restriktionen und Abbruchkriterien die Rechnung geschickt zu kanalisieren, damit die einzelnen Verfahren effektiv arbeiten.

- Folgende Variationsverfahren<sup>3</sup> konnten nacheinander aktiviert werden:
  1. Evolutionsstrategie nach Rechenberg
  2. Komplexalgorithmus nach Box
  3. Simplexalgorithmus nach Nelder/Mead
  4. Ein Quasi-Newton-Verfahren nach Davidon
- Folgende Restriktionen für die Knotenpunkte waren möglich:
  1. Punkt fest, wird nicht variiert
  2. Punkt wahlweise beweglich in der horizontalen, vertikalen oder beiden Richtungen
  3. Oberflächenpunkt, wandert beliebig an der Oberfläche
  4. Punkt bewegt sich auf einem frei wählbaren Polygonzug, bzw. entlang einer Schichtgrenze

Da die Verfahren mit Zufallszahlen operieren, sind Rechenläufe nicht in derselben Weise reproduzierbar, und ein ungünstiger Start kann, bei gleicher erreichter Genauigkeit und denselben Abbruchschranken, ein Vielfaches der mindest erforderlichen Rechenzeit kosten, wie sich in meinen Voruntersuchungen zeigte.

Diesem Sachverhalt wird durch eine fortlaufende Anzeige der wichtigsten

<sup>3</sup> Eine gute Darstellung der erwähnten Verfahren findet sich in SCHWEFEL 77.

Kontrolldaten am Bildschirm während der Rechnung Sorge getragen, wodurch ein Programmabbruch frühzeitig veranlaßt werden kann. Leider geht durch einen solchen Abbruch die bis dahin ermittelte Endgeometrie verloren, und um die Meldungen am Bildschirm richtig zu deuten, ist viel Erfahrung erforderlich.

Ein graphisches Unterprogramm, durch welches die laufenden Geometriebewegungen synchron am Bildschirm verfolgt werden können, hätte in diesem Zusammenhang unschätzbare Vorteile, sowohl für die Handhabung, als auch für die weitere Programmentwicklung.

Auf Empfehlung von Herrn Ochmann wurde nur mit dem Komplex- und dem Davidon-Algorithmus gearbeitet. In den Voruntersuchungen erschien mir jedoch der Komplex- dem Davidon-Verfahren eindeutig überlegen, weil er in den ersten 200 Aufrufen die Geometrie wirkungsvoller verändert und von ihm ermittelte Endgeometrien durch den anschließend aufgerufenen Davidon nicht mehr verbessert werden konnten, obgleich dabei die geforderte Genauigkeit auf das Zehnfache erhöht wurde. Die Berechnung der Tafelwerte erfolgte daher ausschließlich mit dem Komplex-Algorithmus.

Diese Konzentration auf ein einziges Verfahren erleichterte es mir zugleich, den Einfluß der im folgenden beschriebenen Steuergrößen<sup>4</sup> im Einzelfall abzuschätzen:

**Maximale Anzahl der Iterationen:** Überschreitet die Anzahl der GEO-Aufrufe diesen Wert, bricht das Programm ab und gibt die Bestwerte aus. Empfehlenswert sind meines Erachtens Werte zwischen 500 und 1500. Reicht dann die erreichte Genauigkeit immer noch nicht, sind Restarts sinnvoller.

**Konvergenzparameter Beta:** (Genauigkeitsanforderung) Ist die Differenz von nacheinander berechneten Zielfunktionswerten (hier die Standsicherheit) kleiner als dieser Wert, wird die Rechnung in gleicher Weise abgeschlossen.

**Konvergenzparameter Gamma:** Für alle Gamma Iterationen wird die erreichte Genauigkeit geprüft, d.h. es wird frühestens nach Gamma GEO-Aufrufen abgebrochen.<sup>5</sup>

**Reflexionsparameter Alpha:** Regelt, in welchem Maß die Variationsschrittweite wieder heraufgesetzt werden soll, für den Fall, daß sich eine Suchrichtung als Sackgasse erwiesen hat. Zu empfehlen ist ein Alpha von 1.5 bis 2.0, wenn mit Restarts gearbeitet wird auch darunter, keinesfalls aber sollten hier Werte kleiner eins eingesetzt werden.

<sup>4</sup> Genauere Angaben finden sich in der Programmbeschreibung OCHMANN 87.

**Schrittweite zum Aufbau des Startkomplexes:** Bestimmt die maximale Verschiebung des einzelnen Punktes am Anfang der Rechnung. Richtung und wirklicher Wert ist von Zufallszahlen abhängig. Werte von 0.25 bis 0.5 mal kleinster Elementkantenlänge sind sinnvoll, in schwierigen Fällen und wenn zudem das Minimum „mitgezogen“ werden soll, ist dieser Wert drastisch zu reduzieren. Das bedingt dann aber auch eine höhere Iterationszahl.

Die verwendeten Einstellungen werden in Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

### 1.3 Numerierung der Elemente, Knoten und Strecken

Nach ersten Untersuchungen mit unterschiedlicher Elementzahl wurde ein Bruchmechanismus mit fünf Elementen für die weiteren Rechnungen beibehalten. Damit ist in den meisten Fällen eine Genauigkeit der Sicherheit auf drei Stellen nach dem Komma erreichbar. Bild 1.1 zeigt eine typische Ausgabe des KEM-Programms mit der allgemein verwendeten Numerierung von Strecken, Elementen und Knoten, auf die sich alle weiteren Angaben beziehen.

### 1.4 Möglichkeiten der Ergebnisdarstellung und Variation

Für normierte Standsicherheitsstafeln ist keine einheitliche Art der Auftragung gebräuchlich, was einen direkten Vergleich mit Ergebnissen anderer Rechenverfahren erschwert. Mir sind folgende Möglichkeiten bekannt:

**$\tan\varphi/F$  über  $1/N$  für unterschiedliche  $\beta$ ,**  
verwendet von Hoek und Bray in HOEK 77, hier CFC-Auftragung genannt.

- ⊕ Es wird der gesamte Bereich von  $c = 0$  bis  $\varphi = 0$  übersichtlich dargestellt. An einer radialen Teilung läßt sich zusätzlich der Wert  $1/\lambda$  ablesen. Mit ein und derselben Geometrie lassen sich bei Variation von  $\gamma, \varphi$  und  $c$  alle Kurvenpunkte ermitteln.
- ⊖ Im Bereich kleiner  $\varphi$  liegen die Kurven dicht beieinander. Die Ablesegenauigkeit sinkt mit abnehmendem  $\beta$ .

<sup>5</sup> Mir erscheint es zweckmäßiger, nicht zwei aufeinander folgende Zielfunktionswerte, sondern den jeweils letzten mit dem von vor Gamma Iterationen, zu vergleichen, damit die Iteration bei vorübergehender Stagnation des Sucherfolgs nicht gleich eingestellt wird.

**$1/N$  über  $\cot\beta$  für verschiedene  $\lambda$ ,**  
verwendet von TOMPOULIDIS 83 und GUSSMANN 78.

- ⊕ Sehr gute Auflösung im Bereich kleiner  $\beta$  und  $\varphi$ .
- ⊖ Um eine gute Ablesbarkeit zu ermöglichen, müssen viele Kurven berechnet werden. (Höherer Aufwand)  
Bei der Ausarbeitung muß der Böschungswinkel variiert werden, um die Punkte einer Kurve zu erhalten, was nur durch Änderung von Oberflächenpunkten möglich ist. In dem verwendeten Programm ist diese Änderung jedoch vergleichsweise mühsam, und es steht zu befürchten, daß das Minimum der Sicherheit bei der Variation verloren geht.

**$N$  logarithmisch über  $\beta$  für verschiedene  $\lambda$ ,**  
verwendet von Cousins in MC. CARTHY 78.

- ⊕ Gegenüber der  $\cot\beta$ -Auftragung lassen sich auch Werte für steile Böschungen gut ablesen,
- ⊖ aber Ablesungen sind durch die logarithmische Teilung schwieriger.

**$N$  über  $\beta$  für unterschiedliche  $\varphi$ ,** verwendet in TAYLOR 48.

- ⊖ Diese Darstellung ist nicht zu empfehlen, da sie nur für  $F = 1$  gilt, und anderenfalls Umrechnungen erforderlich sind.

Weil mir die Variation entlang einer  $\beta = \text{const.}$ -Linie am einfachsten in der Handhabung und am günstigsten für ein „Mitziehen“ des absoluten Minimums der Sicherheit erschien, wählte ich auch zunächst die als erstes aufgeführte Darstellungsweise der CFC.

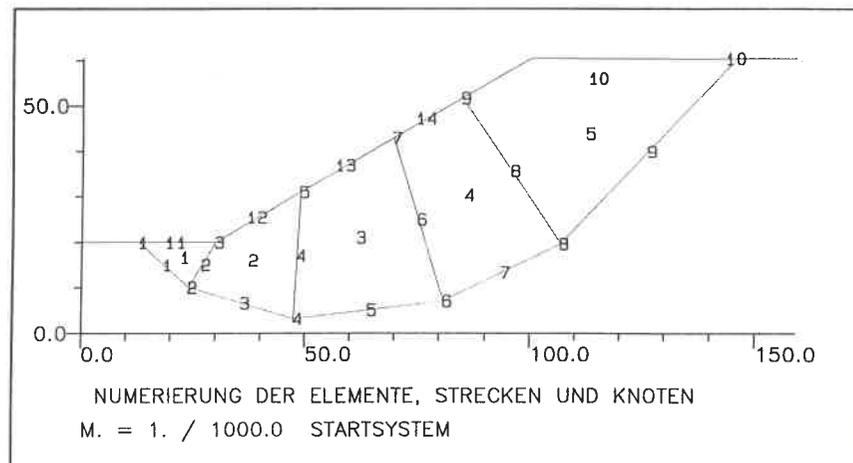


Bild 1.1: KEM-Plotausgabe mit verwendeter Numerierung

## Kapitel 2

### Vorbereitende Untersuchungen

Von grundlegender Bedeutung für die erfolgreiche Abwicklung der Untersuchung erschienen mir folgende Voraussetzungen:

- Die Normierung der Ergebnisse, wie sie für senkrechte Lamellen üblich ist, muß auch für KEM anwendbar sein, um die Zahl der erforderlichen Rechnungen in Grenzen zu halten.
- Aus demselben Grund muß auch untersucht werden, ob ein „Mitziehen“ des Minimums der Sicherheit möglich ist.
- Angesichts der hohen Anzahl erforderlicher Rechenläufe kommt der Wahl einer günstigen Elementeinteilung, der Bestimmung zweckmäßiger Abbruchschranken, sowie der Vermeidung von Fehlläufen und Fehlern allgemein besondere Bedeutung zu.

In den folgenden Ausführungen wurden der besseren Übersicht halber auch Erfahrungen übernommen, welche bei der eigentlichen Ausarbeitung gewonnen wurden.

#### 2.1 Untersuchung der Normierung

Weil die von KEM berechneten Bruchfiguren gewöhnlich weder eine näherungsweise kreisförmige Bruchsohle noch senkrechte Lamellen aufweisen und die üblichen Vernachlässigungen innerer Kräfte unterbleiben, erschien es mir nicht selbstverständlich, daß sich die Ergebnisse in üblicher Weise normieren lassen. Gilt diese Normierung, läßt sich die Sicherheit vertafeln als<sup>1</sup>:

<sup>1</sup> Bei der zweiten Gleichung handelt es sich um die ohnehin im Programm installierte Felleniusregel, die damit implizit erfüllt ist.

$$F = \frac{N_\varphi \cdot c}{H \cdot \gamma} \quad \text{und} \quad F = \frac{\tan \varphi}{\tan \varphi_{mob}} \quad . \quad \text{Das heißt, mit} \quad 1/N = \frac{\gamma \cdot c}{H \cdot \tan^2 \varphi}$$

müssen sich die Ergebnisse für jeden Böschungswinkel  $\beta$  als eindeutige Funktion auftragen lassen, und jede Kennzahl

$$1/\lambda = \frac{c}{\gamma \cdot H \cdot \tan \varphi} \quad \text{muß genau einen Punkt dieser Kurve beschreiben.}$$

Um die Richtigkeit dieser Aussage zu überprüfen, wurden in einer Voruntersuchung  $\gamma$ ,  $H$  und  $c$  so variiert, daß sich der Ausdruck  $\gamma \cdot H/c$  konstant zu 28, 9 und 50 ergab. Als Startgeometrien wurden kreisförmige Bruchsohlen und senkrechte Lamellen in Anlehnung an die Tabellen von JANBU 54 verwendet, um vergleichbare Ausgangsbedingungen zu schaffen. Dabei zeigten sich im Rahmen der geforderten Genauigkeit gleiche Endgeometrien und Standsicherheiten. Auch physikalisch unsinnige Kombinationen führten zu denselben Ergebnissen. Somit können die Bodenkenngrößen im Rahmen dieser Untersuchungen wie reine Rechengrößen behandelt und im Hinblick auf eine günstige Beeinflussung der Rechenläufe frei gewählt werden. Ein Beispiel dieser Untersuchung zeigt das Bild 2.1.

## 2.2 Mitziehen der kritischen Geometrie

Alle verwendeten Suchstrategien verschieben die als frei definierten Geometriepunkte solange in die bezüglich der Zielfunktion erfolgreichste Richtung, bis mit der jetzt gültigen Schrittweite keine weitere Verbesserung erreicht werden kann. Dieses Einrasten an einem Talpunkt der Zielfunktion schließt jedoch nicht aus, daß es einen weiteren, womöglich noch tieferen Punkt in einem Nachbartal gibt.

Um sich dessen zu vergewissern, muß von mehreren möglichst unterschiedlichen Anfangsgeometrien ausgegangen werden oder die Schrittweite wieder vergrößert werden, damit ein Abprüfen der weiteren Umgebung des gefundenen Minimums ermöglicht wird. Konvergiert die Suche immer zum selben Zielpunkt, bzw. wird auch in größerer Umgebung kein geringeres Sicherheitsniveau gefunden, kann man davon ausgehen, das absolute Minimum erreicht zu haben. Die zugehörige Geometrie wird im folgenden Startgeometrie genannt. Diese Zusatzüberprüfung ist sehr aufwendig<sup>2</sup>. Daher ist es ein bedeu-

<sup>2</sup> Bei der Ausarbeitung der Diagramme hat das Erreichen der Startgeometrie mehr Rechenzeit gekostet, als die nachfolgende Berechnung der eigentlichen Kurvenpunkte.

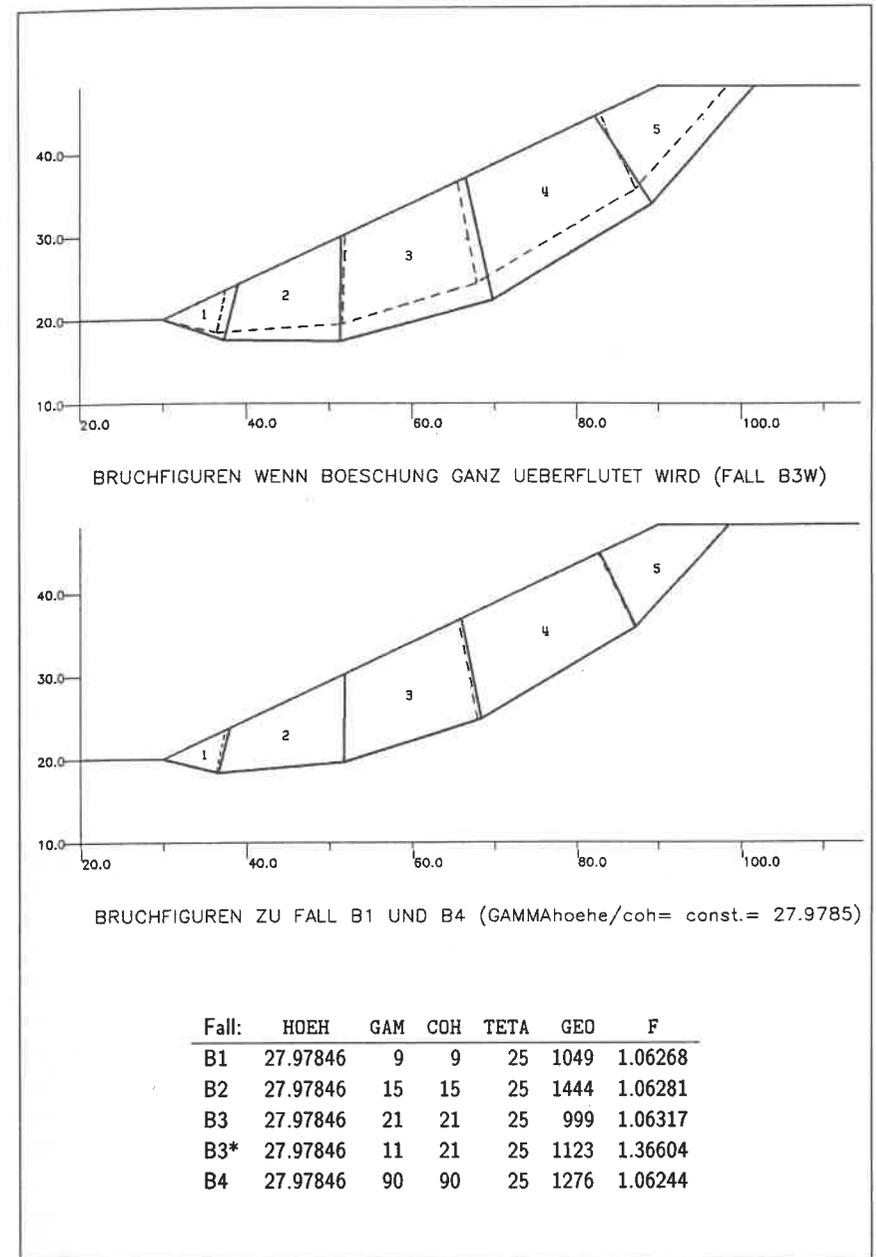


Bild 2.1: Untersuchung der Normierung

tender Vorteil, wenn es gelingt, die Bodenkenngrößen  $\varphi, \gamma$  und  $c$  ausgehend von der Startgeometrie so zu variieren, daß der Talrand der Zielfunktion nicht übersprungen und so das absolute Minimum „mitgezogen“ wird.

Eine mehrfache Berechnung der Kurvenpunkte der Linie  $\beta = 25^\circ$ , und spätere Erfahrungen zeigten, daß dieses „Mitschleppen“ immer möglich ist, ja daß es im Falle der flachen, homogenen Böschung offenbar gar keine Subminima gibt<sup>3</sup>. (Vergleiche Abschnitt 4.2.3)

Dazu folgende Empfehlungen:

- Startgeometrie in den unkritischen Bereich von  $1/\lambda = 0.08$  bis  $0.25$  legen und hohe Werte für  $\varphi$  und  $c$  ansetzen.
- In jedem Schritt ist  $1/\lambda$  so zu ändern, daß sich die zu diesem Wert gehörige Ursprungsgerade in der CFC-Auftragung um maximal  $5^\circ$  ändert.
- Die Rechnung konvergiert schneller und besser, wenn  $\varphi, \gamma$  oder  $c$  gesenkt werden, als wenn eine der Größen erhöht wird. Sehr flache Bruchgeometrien kann man überhaupt nur durch Senken der Kohäsion erreichen. Dazu ist zunächst  $\varphi$  etwa auf den Wert von  $\beta$  zu steigern, was bei steilen Böschungen nur mühsam in kleinen Schritten geht, worauf dann die Kohäsion schnell gesenkt werden kann (z.B.  $c$  in jedem Schritt halbiert).
- Um das Minimum nicht zu verlieren, muß eine sehr geringe Anfangsschrittweite gewählt und eine große Iterationszahl „erzwungen“ werden<sup>4</sup> (siehe nächster Abschnitt).
- Im Zweifelsfall ist zu kontrollieren, welche Verbesserung ein weiterer Restart bringt, ob die Endgeometrie plausibel ist und ob die CFC-Auftragung keinen Knick zeigt.
- Erhöhter Aufwand ist im unteren Kurvenbereich zu treiben, wenn  $1/\lambda$  gegen  $\infty$  geht. Bei kleinen Böschungsneigungen „explodiert“ hier das Volumen des Bruchkörpers bei fast gleichbleibender Sicherheit. In diesem Fall ist die bei einem Restart erreichte Geometrieänderung der einzige Anhaltspunkt zur Beurteilung der erreichten Genauigkeit. Eine vergrößerte Anfangsschrittweite führt meist zu einem Zusammenbruch der Geometrie, ebenso wie Versuche, Startgeometrien in diesem Bereich direkt zu finden.

<sup>3</sup> Die auftretenden Subminima anderer Rechenverfahren könnten ihre Ursachen in statischen Ungenauigkeiten (senkrechte Lamellen), eher aber in der Annahme kreisförmiger Bruchsohlen haben.

<sup>4</sup> Die erreichte Sicherheit ist in erster Linie von der Bruchsohlenform abhängig, für das Mitziehen des Minimums ist aber auch die richtige Lage der senkrechten Elementtrennflächen wichtig.

## 2.3 Untersuchung von Konvergenzverhalten, Abbruchkriterien und Effektivität

Nachdem der Benutzer des KEM-Programms seinen Eingabedatensatz erstellt, das Programm gestartet und eine geschätzte Anfangssicherheit eingegeben hat, erscheinen nach einem kurzen Protokoll der eingestellten Konfiguration zu jedem Iterationsschritt folgende Informationen:

- Sicherheit der gerade berechneten Geometrie und, falls es sich dabei um das neue Minimum handelt, auch die Anzahl der bis jetzt erfolgten GEO-Aufrufe.
- Wert und Nummer des geänderten Komplexpunktes sowie
- die Warnmeldungen:  
negative Fläche, Fehlflächen in Element, mit Zug.

Die Warnungen deuten darauf hin, daß das zugehörige Ergebnis auf unzulässigen Berechnungsgrundlagen basiert, bzw. die Rechnung mit Korrekturen und Straffunktionen fortgesetzt wurde. Weitergehende Einblicke sind während des Programmablaufs nicht möglich. Um dennoch ein Gefühl dafür zu bekommen, was unterdessen mit der Geometrie passiert, wollte ich mit zahlreichen Restarts und geringer Iterationszahl Momentaufnahmen erhalten. Die erforderliche Geometrieänderung von der ersten Startgeometrie bis zur Bruchgeometrie wurde bewußt groß gewählt.

Um einen Maßstab zur Beurteilung der erreichten Genauigkeit zu erhalten, sollte mit unterschiedlichen Starts exemplarisch solange weitergerechnet werden, bis sie auf dieselbe Standsicherheit führten. Ich erhoffte mir davon Aufschluß, welche Abbruchschranken einzustellen sind, um eine Genauigkeit der Zielfunktion auf zwei Kommastellen sicherzustellen.

### 2.3.1 Verhalten in der Anlaufphase der Iteration

Die ersten etwa 200 Iterationsschritte haben einen entscheidenden Einfluß auf die insgesamt benötigte Rechenzeit.

Ausgehend von einem weitgehend zufälligen Anfang bewegt sich die Iteration im Idealfall in die Richtung des größten Sicherheitsgefälles, wenn sich alle Knoten genau in die Richtung ihrer Bestlage bewegen. Da jedoch nur die Wirkung der Summe aller Änderungen bewertet wird, können sich einzelne Punkte durchaus in unglücklicher Weise verschieben und den weiteren Verlauf der Rechnung behindern (siehe Bild 2.2, Fall 3).

Um den Einfluß des Zufalls auf den Ablauf der Iteration zu verdeutlichen,

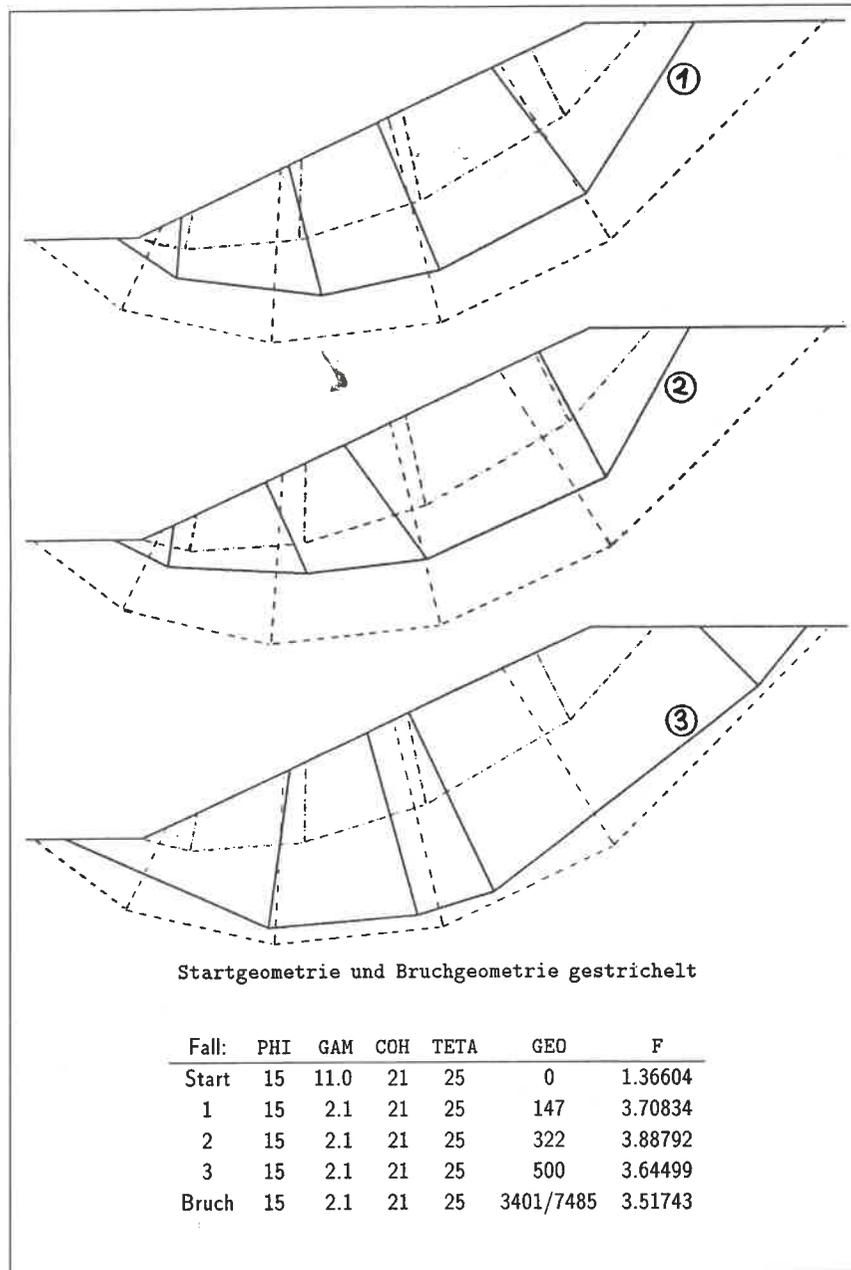


Bild 2.2: Verhalten in der Anlaufphase der Iteration

sind in Bild 2.2 die Endgeometrien von drei Rechenläufen dargestellt, welche mit identischen Eingaben gestartet wurden. Als Anfangsgeometrie diente ein gut optimiertes Endsystem, welchem die physikalischen Kenngrößen  $\beta = 25^\circ$ ,  $\gamma = 11 [kN/m^3]$ ,  $\varphi = 15^\circ$ ,  $c = 21 [kN/m^2]$  zugrunde lagen. Für die Untersuchung wurde dann  $\gamma$  auf 2, 10  $[kN/m^3]$  gesenkt, und eine Genauigkeit auf zwei Stellen nach dem Komma gefordert.

Dabei ist deutlich zu erkennen, wie orientierungslos die ersten Änderungen durchgeführt werden, weil jeweils nur eine variierte Geometrie untersucht und als neue Anfangsgeometrie weiterverwendet wird, auch wenn sich die Sicherheit auf diesem Variationspfad nur ganz geringfügig verschlechtert. Nur so kann ich mir erklären, daß sich im Fall 2 trotz doppeltem Rechenaufwand eine deutlich größere Standsicherheit ergab als im günstigsten Fall 1.

Außerdem zeigte sich, daß eine Genauigkeit auf zwei Stellen nach dem Komma nicht allein dadurch sichergestellt werden kann, daß der Konvergenzparameter Beta auf 0.001 gesetzt wird.

### 2.3.2 Verhalten in der Zielphase der Variation

Aus den so erzeugten Endgeometrien wurden eine effektiv und eine ungünstig verlaufene Iteration im Wechsel mit Restarts solange fortgeführt, bis sich eine Übereinstimmung der Endsicherheiten auf drei Stellen nach dem Komma ergab.

Dazu wurden die Konvergenzparameter Gamma auf 200, und Beta auf 0.0001 verschärft. Die maximale Iterationszahl wurde auf 2000 gesetzt, und spielte daher keine Rolle.

Der ungünstigere Anfang (Fall 3) wirkte sich dabei bis zum Abbruch der Rechnung in einem langsameren Konvergenzverhalten aus.

Um ein Maß für die Effektivität des Iterationsverlaufs zu erhalten, wurde die Veränderung der Sicherheit je 1000 GEO-Aufrufe bestimmt. Dieser Kennwert sinkt am Anfang der Rechnung sehr rasch und stagniert bei ungünstigem Verlauf. Wird ein Wert von  $\Delta F/GEO = 0.002 \text{ ‰}$  unterschritten, kann man eine Genauigkeit auf drei Stellen nach dem Komma annehmen. Auf dem Bildschirm ist das daran zu erkennen, daß sich die Sicherheit etwa noch alle 10 Iterationen in der vierten Kommastelle ändert.

Bild 2.3 zeigt zwei unterschiedliche Iterationspfade, wie sie sich bei der Fortsetzung der Rechnung von Fall 1 und 3 (gemäß Bild 2.2) durch mehrere Restarts ergaben. Die Verschiebungen der Knotenpunkte nach jedem Restart sind durch Pfeile und Polygonzüge wiedergegeben.

Die so gewonnenen Endgeometrien zeigten eine sehr gute Übereinstimmung.

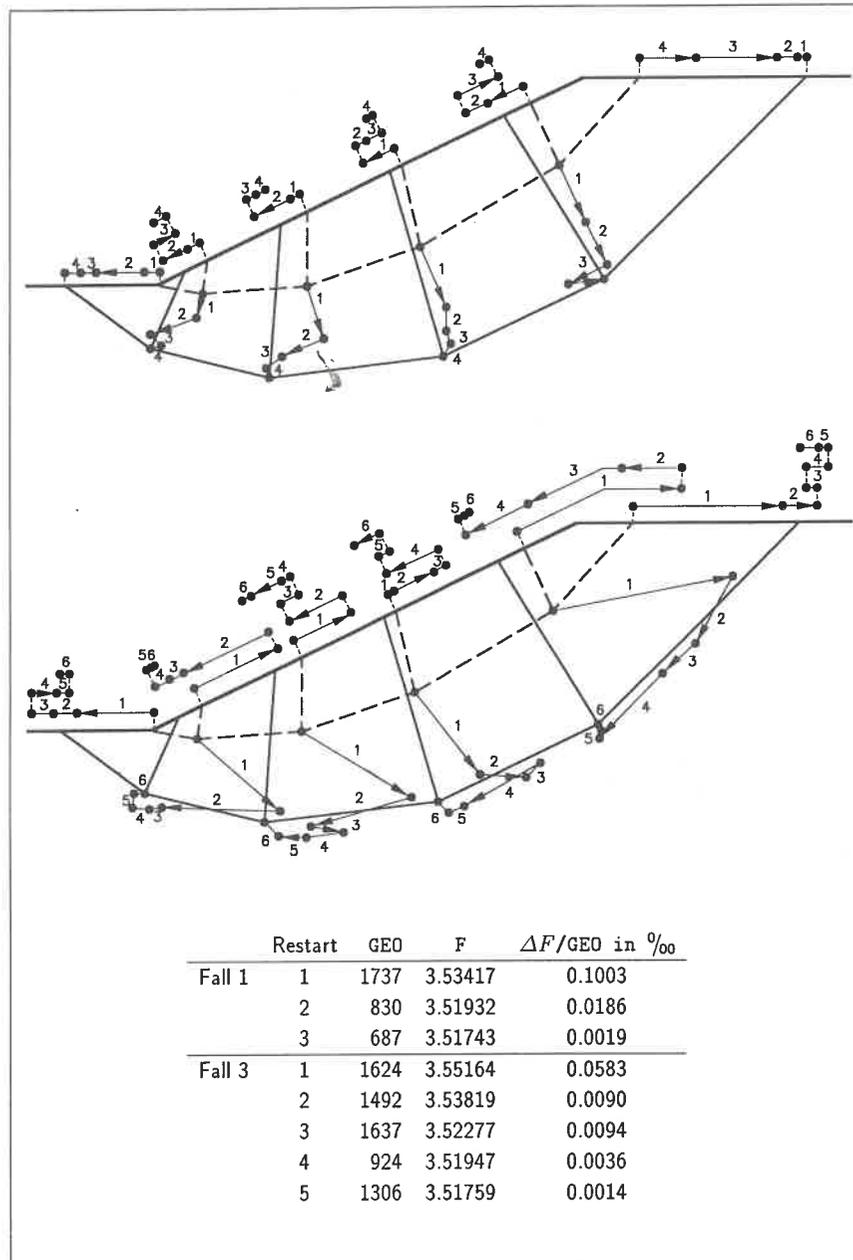


Bild 2.3: Iterationsverhalten in der Nähe der Bruchgeometrie

### 2.3.3 Zusammenfassung

Gewöhnlich ändert sich in der Anfangsphase in erster Linie das Volumen des Bruchkörpers, indem die Knoten des Bruchpolygons sich in die Nähe einer fiktiven Bruchkurve bewegen. Dabei scheinen die Bewegungen der einzelnen Knoten unabhängig voneinander zu sein.

Als nächstes richten sich die Elementtrennflächen etwa auf einen gemeinsamen Schnittpunkt oberhalb der Böschung aus, und die Knoten verschieben sich auf dieser fiktiven Bruchkurve in einer pendelnden Bewegung, welche auf eine Abhängigkeit derjenigen Knoten schließen läßt, die eine Elementtrennfläche definieren.

In einer besonders rechenzeitintensiven Endphase verschieben sich die Elementtrennflächen nahezu parallel, und die Bruchpolygonpunkte nehmen ihre Ideallage ein.

**Bei ausreichender Iterationsdauer konvergieren unterschiedliche Anfangsgeometrien eindeutig zu identischen Endgeometrien!**

### 2.3.4 Erkennungsmerkmale von Bruchgeometrien

1. Die nach oben verlängerten gemeinsamen Strecken benachbarter Elemente (Elementtrennflächen) „scheinen“ sich in einem Punkt zu schneiden.
2. Die Bruchfläche des obersten Elements tritt etwa unter dem Winkel  $45^\circ - \varphi/2$  aus, daher kann dieses Element wesentlich größer als die übrigen sein<sup>5</sup>.
3. Die Abstände zum jeweils nächsten Bruchpolygonpunkt ändern sich kontinuierlich.
4. Diese Abstände werden mit zunehmenden Knickwinkeln kleiner.

## 2.4 Analyse der Bruchgeometrien

Die folgenden Überlegungen haben mich veranlaßt, nach Bildungsgesetzen in den von KEM berechneten Bruchgeometrien zu suchen:

1. Mit einfachen Regeln könnte es möglich sein, allein an den Plots der Endgeometrien zu erkennen, ob das Minimum gefunden wurde, zumindest aber, ob die gefundenen Ergebnisse noch weit davon entfernt sind.

<sup>5</sup> Vergleiche Rechenannahmen für aktiven Erddruck.

2. Gezielte Eingriffe und Handkorrekturen der Geometrie könnten unter Berücksichtigung erkannter Regeln die Konvergenz der Rechnung beschleunigen und damit auch Kosten sparen.
3. Im Idealfall könnten solche Bildungsgesetze Eingang ins Programm finden und durch eine Reduzierung der geometrischen Freiheitsgrade auch Berechnungen mit sehr großer Elementanzahl ermöglichen.

Die Existenz solcher Regeln wird nicht allein durch den Vergleich der Bruchgeometrien einer Linie mit  $\beta = \text{const.}$  augenfällig, sondern kann auch mit einem theoretischen Vergleich begründet werden:

Bei Rechenverfahren, die eine kreisförmige Bruchzone zugrunde legen, läßt sich die Geometrie durch den Kreismittelpunkt und einen weiteren Zwangspunkt an der Geländeoberfläche, welcher in den allermeisten Fällen mit dem Böschungsfußpunkt zusammenfällt, eindeutig beschreiben. Bei gegebener Böschungsneigung stehen diesen drei „äußeren“ Freiheitsgraden nur die drei physikalischen Parameter  $\varphi$ ,  $\gamma$  und  $c$  gegenüber, weil es möglich ist, ähnliche Geometrien durch die Normierung mit  $H$ , und physikalisch ähnliche Bedingungen durch die Normierung mit  $\frac{c}{\gamma \cdot H}$  einzuschließen<sup>6</sup>.

Es ist mit Sicherheit anzunehmen, daß es in Wirklichkeit ebenfalls nur eine einzige Bruchgeometrie mit minimaler Sicherheit gibt, welche im Programm KEM durch einen Polygonzug möglichst genau angenähert wird. Möglichst genau heißt, daß auch die Lage der Knickpunkte nicht willkürlich sein kann, sondern daß abhängig von der Elementanzahl, genau ein idealer Ort für jeden Punkt existiert, an dem die Gesamtabweichung des Polygons von der realen Bruchkurve minimal wird<sup>7</sup>.

Da nun in beiden Fällen dieselbe Normierung greift, ist die Vermutung naheliegend, daß sich die KEM-Bruchfiguren ebenfalls mit drei<sup>8</sup> Parametern beschreiben lassen müssen. (Arbeitshypothese). Es ist nicht zu erwarten, daß es gelingt, die Bruchform mit  $\varphi$ ,  $\gamma$  und  $c$  explizit zu formulieren, kann jedoch ein Bruchfigurengenerator programmiert werden, der einige oder alle Bildungsgesetze berücksichtigt, ließe sich, infolge der deutlich verminderten Anzahl zu variierender Freiheitsgrade, viel Rechenzeit einsparen. Die so erzeugte Geometrie könnte dem bestehenden Programm zur anschließenden Variation aller Punkte übergeben werden.

<sup>6</sup> Entspricht einer Kenngröße in der Modellstatik.

<sup>7</sup> Abhängig von der jeweiligen Krümmung, bei einem Kreis etwa sind alle Knickpunktabstände gleich.

<sup>8</sup> Die Anzahl der Elemente (Polygonpunkte) als vierter Parameter ist von untergeordneter Bedeutung. Die Neigung der Elementtrennflächen liegt allen Beobachtungen zufolge bei gegebenem Bruchpolygon ebenfalls fest.

Wird in einer derartigen Vorstufe ein Raster gerechnet, ist auch die Überprüfung auf Subminima einfach und flächendeckend. Vermutlich blieben die Einsatzmöglichkeiten allerdings auf homogene Grundbruchprobleme beschränkt. Die folgenden Punkte sind nur als bruchstückhafte Anregungen für genauere Untersuchungen zu werten. Sie wurden mit dem Auftreten erster Schwierigkeiten abgebrochen, um das eigentliche Ziel der Arbeit sicher zu erreichen.

### 2.4.1 Lokale Sicherheitsbetrachtung

Beobachtungen zeigten, daß die Bruchfläche am obersten Element immer etwa unter dem Winkel  $45^\circ - \varphi/2$  gegen die Normalenrichtung in die Böschung eintritt. Um dieses zu überprüfen und eine Beziehung für die Trennflächenneigung zu finden, versuchte ich die Sicherheit des obersten Elements für sich allein zu betrachten.

Trägt man an diesem obersten Element alle unbekanntenen Längen, Winkel und Kräfte an, ergibt sich für den homogenen Boden die in Bild 2.4 dargestellte Situation.

Den drei geometrischen Unbekannten  $\alpha$ ,  $\delta$  und  $L$ , sowie den unbekanntenen Kräften  $Q$  und  $q$  stehen die Gleichgewichtsbedingungen in horizontaler und vertikaler Richtung gegenüber<sup>9</sup>:

$$\sum H: \quad q = \frac{c \cdot L \cdot (1 - \cot \alpha \cdot \tan \delta) - Q \cdot \cos(\alpha + \varphi)}{\cos(\delta + \varphi)}$$

$$\sum V: \quad Q = \frac{L^2 \cot \alpha (\cot \alpha + \tan \delta)}{2 \cdot \sin(\alpha + \varphi)} - q \frac{\sin(\delta + \varphi)}{\sin(\alpha + \varphi)} - \frac{2 \cdot c \cdot L \cdot \cot \alpha}{\sin(\alpha + \varphi)}$$

Nach einer Elimination von  $Q$  läßt sich die erforderliche Stützkraft  $q$  als Funktion von  $\alpha$ ,  $\delta$  und  $L$  so formulieren:

$$q = A \left\{ c \cdot [1 - \cot \alpha \cdot \tan \delta + 2 \cdot \cot \alpha \cdot \cot(\alpha + \varphi)] - \frac{L}{2 \cdot (\cot^2 \alpha + \cot \alpha \cdot \tan \delta) \cdot \cot(\alpha + \varphi)} \right\}$$

$$\text{mit: } A = \frac{L \cdot \tan(\alpha + \varphi)}{[\tan(\alpha + \varphi) - \tan(\delta + \varphi)] \cos(\delta + \varphi)}$$

<sup>9</sup> Hierbei wird angenommen, daß die Sicherheit kleiner oder gleich eins ist,  $\varphi$  und  $c$  also voll aktiviert werden.



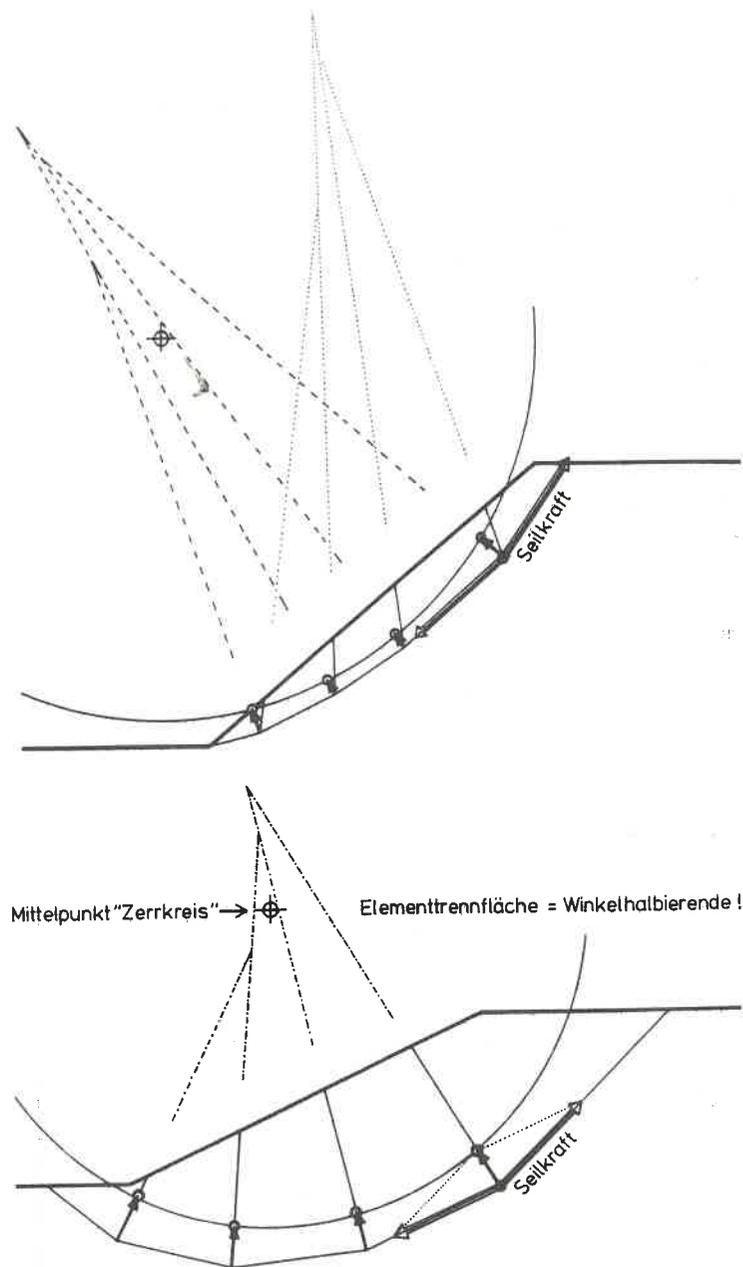


Bild 2.5: Zugseilanalyse, graphische Lösung

charakteristischen Punkte, läßt sich die Bruchform am Zeichenbrett in gleicher Weise konstruieren. Der Eintrittswinkel am Zwangspunkt (zumeist der Böschungfußpunkt) bestimmt dabei die Anzahl der Knicke und damit die Elementzahl.

Die Pfeillängen stellen dabei ein Maß für die Krümmung der wirklichen Bruchkurve dar. Diese Darstellung zeigt also auch den Krümmungsverlauf. Im Normalfall ( $\varphi$  und  $c$ ) liegt ein flacherer Bereich zwischen zwei Bereichen mit stärkerer Krümmung, während die Krümmung stetig ansteigt, wenn  $\varphi$  gegen Null geht.

Werden die Polygonknicke sehr flach, treten bei der Konstruktion der Umlenkkräfte schleifende Schnitte auf, welche sich sicher auch für den Fall der Umsetzung in einen Algorithmus nachteilig bemerkbar machen können. Beispiele dieser Konstruktion zeigt Bild 2.5.

Für die Trennflächenneigungen fand ich keine Konstruktionsregel. Es deutete sich aber auch hier eine Abhängigkeit von den Polygonknicken an, denn bringt man die Knickwinkelhalbierenden oder die verlängerten Trennflächen zum Schnitt, zeigt sich in beiden Fällen ein ähnliches „Schnittmuster“ (siehe Bild 2.6).

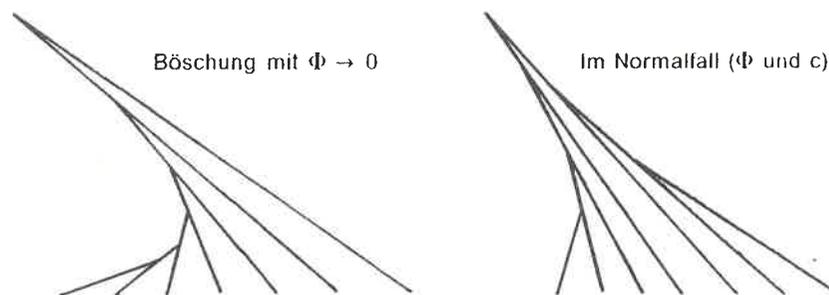


Bild 2.6: Schnittmuster der Trennflächen, Winkelhalbierenden

Bei der am genauesten untersuchte Bruchgeometrie nach Bild 2.5 liegen die beiden „Schnittmuster“ sogar übereinander, d.h. die Elementtrennflächen liegen in den Winkelhalbierenden.

Bei den nachfolgenden Rechenläufen zeigte sich, daß sich die berechnete Sicherheit durch einen Restart in jedem Fall weiter erniedrigen ließ, solange die Endgeometrie von diesen Regeln merklich abwich.

## Kapitel 3

### Praktische Umsetzung der Erfahrungen

In diesem Abschnitt werden alle Gegebenheiten aufgeführt, die sich in den vorangegangenen Untersuchungen als hinderlich erwiesen haben, und die Wege beschrieben, welche beschritten wurden, um dennoch einen zügigen Arbeitsfortschritt zu gewährleisten.

#### 3.1 Entwicklung von Serviceprogrammen

Die Untersuchungen ob ein „Mitziehen“ des Minimums möglich ist, zeigten sehr bald, daß ein Aufarbeiten der gewonnenen Ergebnisse als normiertes Standsicherheitsdiagramm von Hand sehr aufwendig und fehleranfällig ist. Außerdem sollte die Visualisierung der Ergebnisse in Form von Geometrieplots, normierten Kenngrößen und Diagrammen einfach und schnell möglich sein, um die erreichte Genauigkeit beurteilen zu können und einer Fehlerfortpflanzung beim Mitziehen des Minimums zu begegnen.

Die Rechnungen sollten so protokolliert werden, daß eine Überprüfung der wichtigsten Eingaben zu einem späteren Zeitpunkt möglich ist, und einzelne Rechenläufe korrigiert oder durch einen Restart verbessert werden können für *den* Fall, daß sich in der Diagrammauftragung Knicke zeigen. Dazu müssen auch die Geometrien geordnet abgelegt werden.

Da der größte Teil der Rechnungen, um die höhere Rechengeschwindigkeit zu nutzen, in Nachtsitzungen erfolgen mußte, sollten auch die Folgen von Bedienungsfehlern begrenzt werden.

Für diese Aufgaben schienen mir kleine Programme, welche nur die Eingabe- und Ausgabefiles bearbeiten, die beste Lösung (Pre- & Postprocessor).

### 3.1.1 Kanalisieren der Datenflut

Sowohl der Eingabe- als auch der Ausgabefile des KEM-Programms enthielt weitaus mehr Angaben, als für meine spezielle Aufgabenstellung erforderlich war.

#### Eingabe

Es mußten der Eingabefile editiert und folgende Daten eingetragen werden:

1. Konvergenzparameter, Abbruchkriterien und Restriktionen
2. Physikalische Parameter PHI, COH, GAMF, GAMR
3. Koordinaten der Oberfläche und Elementknoten (mit den zugehörigen Freiheitsgraden)
4. Steuergrößen für die Bildaufteilung des Plots, und die BLOCKID der gewünschten Endgeometrie
5. Steuergrößen für Rechenverfahren und Variationsstrategien
6. Zuordnungsdaten für Strecken, Knoten und Elemente (mühsam zu ermitteln)
7. Verschobene Strecken und Verschiebungsrichtung

Die letzten drei Punkte mußten nur einmal ermittelt und eingegeben werden, weil das Rechenverfahren und die Elementzahl immer dieselben blieben. Automatisiert wurde hier das Zurückschreiben der Endgeometrie aus dem Ausgabefile als Anfangsgeometrie in den Eingabefile. (Die Endgeometrie wird dabei ebenfalls am Bildschirm aufgelistet)

Dadurch entfielen die Aktionen:

- Editieren der Ausgabe, Suchen der Endgeometrie, Kopieren der Endgeometrie ans Ende des Eingabefiles, Verlassen der Ausgabe
- Editieren der Eingabe, Aufsuchen der kopierten Zeilen, Suchen und Löschen der Eingabegeometrie, Verschieben der kopierten Zeilen als neue Eingabegeometrie, Verlassen der Eingabe

#### Ausgabe

Im Ausgabefile werden die wichtigsten Eingaben, der Rechenverlauf, Rechenzeit, Kräfte, Gewichte, Verschiebungen, Endgeometrie und die letzten Werte der Zielfunktion protokolliert. Auch hier waren für mich die meisten Daten nur in Sonderfällen von Bedeutung, wie etwa die Informationen über die Ursache des Iterationsabbruchs oder die kleinste Verschiebung, wenn ein stetiger Verschiebungsübergang in der KEM-Rechnung gewählt wurde.

Um die Ergebnisse ohne viel Schreibarbeit schnell und fehlerfrei auszuwerten und für die Weiterverarbeitung geordnet zu sichern, wurde ebenfalls ein kleines Programm geschrieben, welches folgende Aktionen ersetzt:

- Editieren der Ausgabe, Suchen der Endgeometrie, Oberfläche, Wasserspiegel und jeweiliges Kopieren in eine Ergebnisdatei
- Berechnen des Böschungswinkels aus den Oberflächenpunkten (zur Kontrolle)
- Suchen und Abschreiben der Standsicherheit und der physikalischen Kenngrößen
- Berechnen der normierten Tafeleingangswerte mit dem Taschenrechner
- Editieren der Ergebnisdatei und Eingeben der Ergebnisse oder einer Kennzeichnung zur Geometriezuordnung und Abschreiben der Ergebnisse unter demselben Kennzeichen

Weil diese Vorgänge einige hundert mal erforderlich waren, war zumindest die Automatisierung dieser Aktionen dringend geboten.

### 3.1.2 Visualisieren der Ergebnisse

Der Weg zu einem brauchbaren Plot der Eingabe- und Ausgabegeometrie war sehr umständlich, und dauerte in etwa so lange wie drei Rechenläufe mit je 1800 Iterationen!

Das war auch darauf zurückzuführen, das kein graphikfähiges Terminal zur Verfügung stand.

Folgende Aktionen waren dazu erforderlich:

- Umbenennen von FILE AUSGABE in FILE AUSGABA
- Editieren der Eingabe, Aufsuchen des Plotdatenblocks, Plotsteuergröße gleich 1 setzen, Titel eingeben; Steuergrößen für Achsen, Maßstab, Skalierung und Schriftgrößen den Maximalwerten der Endgeometrie anpassen; Editor verlassen
- Programm KEM starten und damit einen file TAPE13 PICASSO erzeugen
- Aufruf des Metafileprozessors MFPROZ, wenn der Versatec-Plotter angesprochen werden soll (Bild erst am folgenden Tag verfügbar); oder Aufruf des Metafileprozessors GD13, der den file TAPE13 PICASSO für den graphikfähigen Drucker IBM 3268 formatiert. Nach einer Bearbeitungsdauer von 4 Minuten kann dann die Ausgabe abgeholt werden.

- Editieren des Eingabefiles und Zurücksetzen der Steuergröße oder aber Verändern der Plotsteuergrößen und Wiederholen der ganzen Prozedur.

Um nicht nach jeder Rechnung ein Plot erzeugen zu müssen, werden in dem Programm zur Ergebnisverwaltung OUTIN weitere Geometrieckenngößen berechnet. Diese werden zusammen mit den physikalischen Kenngrößen und den normierten Tabellenwerten am Bildschirm ausgegeben und erlauben Aussagen über die Bruchkreistiefe, Fußpunkt- und Wasserspiegellage.

Es empfiehlt sich, die ausgegebenen Tabellenwerte direkt in ein leeres Diagramm einzutragen, um grobe Fehler sofort zu entdecken und die Wirkung eines Restarts abschätzen zu können.

Eine Umbenennung des Ausgabefiles ist nicht mehr nötig, weil die jeweils zuletzt ermittelte Endgeometrie auf dem FILE AUSGABA unter der BLOCKID 0 zur Verfügung gestellt wird.

Alle abgedruckten Standsicherheitstafeln wurden in der dargestellten Form durch die Programme PABLO und PLODIA erzeugt.

### 3.1.3 Aufbereiten der Ergebnisse in Diagrammform

Da nun die Ergebnisse schon in geordneter Weise auf Dateien gespeichert vorlagen, wurden auch zwei Zeichenprogramme für die Aufbereitung der Ergebnisse zu den eigentlichen Standsicherheitstafeln geschrieben.

Dadurch wurden alle Auftragsfehler ausgeschlossen. Es konnten verschiedene Achsmaßstäbe versucht werden. Im Falle der Linien mit  $1/\lambda = \text{const.}$  übernimmt das Programm auch die erforderliche Interpolationsarbeit. Auch geringfügige Knicke sind in der Auftragung sofort sichtbar.

Weiterhin wurde dadurch der direkte Vergleich mit anderen Auftragsarten erleichtert, indem diese digitalisiert in derselben Diagrammform geplottet werden konnten.

## 3.2 Manipulationen zur Beschleunigung der Rechnung

Wie sich bei der Ausarbeitung der Tabellen zeigte, kann auch durch geschickten Einsatz der vorhandenen Möglichkeiten des KEM-Programms Rechenzeit eingespart werden.

Meine Erfahrungen hierzu möchte ich im folgenden zusammenfassen.

### 3.2.1 Verdopplung und Umbau der Elementtrennflächen

Als eine andere Möglichkeit, die Rechnung zu beschleunigen, wurde untersucht, ob es zweckmäßig ist, ein kleines Programm zu schreiben, welches die Elementzahl im Eingabefile verdoppelt. Wird jeweils in der Grund- und Oberflächenstreckenmitte ein weiterer Punkt eingefügt, paßt sich die neue Elementtrennfläche in ihrer Neigung zudem der allgemeinen Tendenz in günstiger Weise an. Für die Abschlußrechnung mit der erhöhten Elementzahl sollten demnach wenige Iterationen genügen. Zwei Beispiele einer derart durchgeführten Verdopplung von 5 auf 10 Elemente zeigt Bild 3.1.

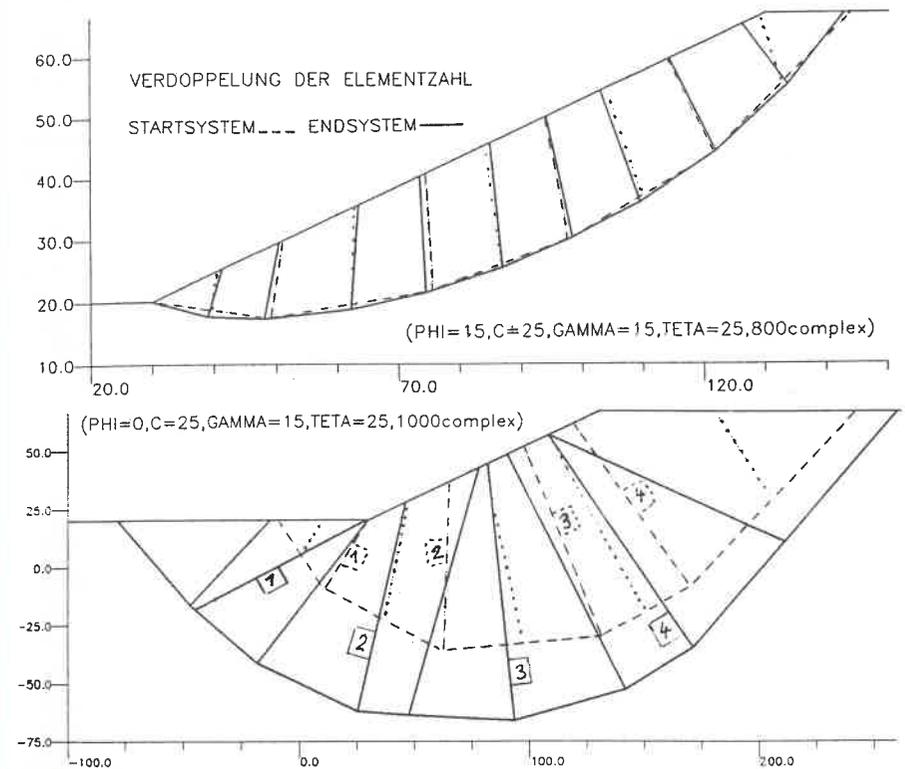


Bild 3.1: Verdopplung der Elemente durch Streckenhalbierung

Im unkritischen Bereich kleinerer Bruchvolumina zeigte sich diese Vermutung zwar bestätigt, aber die so erzielte Genauigkeitssteigerung schien mir den Aufwand nicht zu rechtfertigen.

Im kritischen Bereich „knickten“ einzelne Elementtrennflächen aus, und die

Bruchfigur, welche als 5-Element-System schon zum Stehen gekommen war, blähte sich schlagartig weiter auf. Das kann bedeuten, daß selbst eine mittige Teilung in kritischen Fällen nicht genau genug ist. Beachtenswert ist jedoch die weitere Expansion, die den Schluß nahe legt, daß KEM-Bruchfiguren für reine Kohäsionsböden ( $\varphi = 0$ ) nur aufgrund ihrer Kantigkeit endliche Ausdehnung behalten.

Sehr viel zweckmäßiger läßt sich dieser Einbau von Strecken in Elementmitte auf degenerierte Geometrien anwenden.

Darunter verstehe ich eine Kinematik, in welcher zwei Nachbar-elemente als Monolith abrutschen, die gemeinsame Trennfläche also keine Funktion mehr hat, außer das Gleichungssystem zu vergrößern.

Erkennbar ist dieses Phänomen daran, daß der zugehörige Knick im Bruchpolygon verschwunden ist, und häufig zusätzlich zwei Elementknoten zusammenfallen<sup>1</sup>.

In einem solchen Fall genügt es, die inaktive Strecke in die Elementmitte zurückzurechnen<sup>2</sup>, und nach einem Restart sind wieder alle Elemente in Dienst gestellt (Bild 3.2 zeigt ein solches Beispiel).

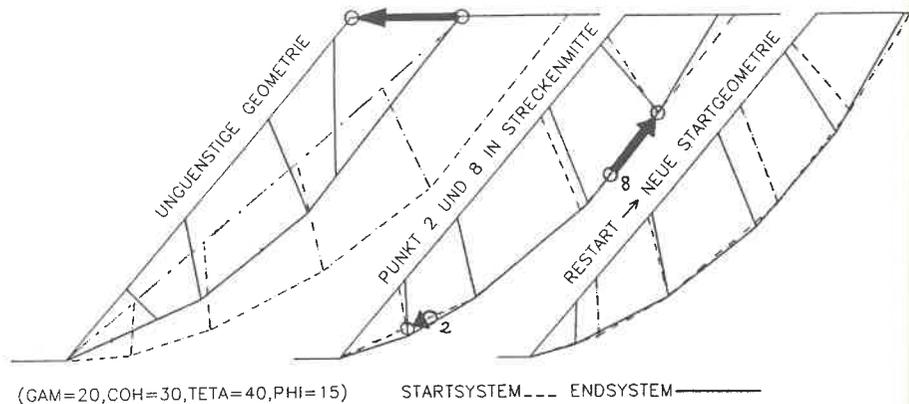


Bild 3.2: Zurücksetzen inaktiver Elementtrennflächen

In gleicher Weise kann eine Strecke „ausgebaut“ werden, also zwei Nachbar-elemente vereinigt werden, und diese kann dann ein zu groß geratenes Element feiner unterteilen (In diesem Fall müssen einige Punkte umbenannt

<sup>1</sup> Dabei erscheint die Warnung negative Fläche auf dem Bildschirm.

<sup>2</sup> Handrechnung im Eingabefile, verbesserte Koordinaten aus den Mittelwerten der Nachbarpunktkoordinaten, ohne Änderung der Zuordnungsdaten.

werden, damit die Zuordnungsdaten gültig bleiben). Diese Aktionen haben sich auf der Suche nach Startgeometrien als besonders hilfreich erwiesen.

### 3.2.2 Vermeiden von Zusammenbrüchen am Anfang der Iteration

In den ersten etwa 200 GEO-Aufrufen können sich konfuse Geometrieänderungen ereignen. Insbesondere wenn große Änderungen der Anfangsgeometrie nötig sind oder die Schrittweite „zu groß“ gewählt wurde, verliert die Variationsstrategie ihre Orientierung, denn in diesen Fällen können auch Änderungen einzelner Punkte in eine Richtung vorkommen, die global gesehen unsinnig sind, aber zu einer geringfügigen Verringerung der Sicherheit führen. Da das Problem aber nicht ebensoviele Freiheitsgrade wie Knotenpunkte besitzt, werden dadurch auch weitere Punkte ungünstig beeinflusst. Die Knotenpunkte scheinen wie ein System mittels Federn gekoppelter Massen um die Ideallage zu schwingen, wobei einzelne Punkte auch aus einer guten Lage wieder herausgerissen werden können. Eine besondere Rolle in diesem Zusammenhang scheint der richtigen Trennflächenneigung und den Endpunkten des Bruchpolygons zuzukommen.

**Eine Dämpfung kann offenbar durch wechselseitiges Festsetzen einzelner Punkte erreicht werden.**

Sehr effektiv ist es beispielsweise, zunächst alle Oberflächenpunkte als fest zu definieren, um dann die Endpunkte des Bruchpolygons und schließlich alle Punkte in die Variation einzuschließen. Durch dieses Vorgehen wird zusätzlich weitgehend verhindert, daß zwei Nachbarpunkte im Verlauf der Iteration zusammenfallen. Es muß dabei erst im letzten Schritt bis zur gewünschten Genauigkeit iteriert werden.

Mit diesem Trick ist auch eine Änderung der Böschungsneigung auf einfache Weise möglich, indem alle Punkte, welche nicht an der Oberfläche liegen, festgesetzt werden und lediglich der obere Knickpunkt des Oberflächenpolygons horizontal verschoben wird. Nach Programmstart werden die Z-Koordinaten jener Punkte, die mit der Kennung für freie Beweglichkeit an der Oberfläche versehen sind, automatisch auf die Oberfläche zurückgerechnet, und die Elementtrennflächen richten sich nach wenigen Iterationsschritten optimal aus. Werden jetzt in einer weiteren Rechnung auch die Bruchpolygonpunkte freigelassen, kommt es gewöhnlich nicht zu Zusammenbruchsreaktionen.

### 3.2.3 Vermeiden von Abstürzen gegen Ende der Iteration

Bei steilen Böschungsneigungen tritt häufig folgendes Phänomen auf: Nach einem insgesamt günstigen Iterationsverlauf ändern sich die Bestwerte der Zielfunktion nur noch alle 50 bis 100 Iterationen in der fünften Komma-stelle, die bearbeitete Geometrie entspricht also weitgehend der Bruchgeo-metrie. Doch dann wächst die berechnete Sicherheit schlagartig über alle Grenzen oder bleibt in der Größenordnung von 1000 bis 50 000 stecken. (Es greift also offenbar eine Straffunktion.) Die Iteration wird normal nach Über-schreiten der Abbruchschranken beendet, die Endgeometrie und die kleinste Sicherheit (vor diesem „Absturz“) erscheinen im Ausgabefile mit plausiblen Werten. Wird jedoch ein Restart mit dieser Endgeometrie versucht, errech-net das Programm wieder dieselbe unsinnig hohe Sicherheit und bewertet diese an sich gute Geometrie falsch. Die Rechnung irrt jetzt solange um-her, bis sie wieder eine Sicherheit der richtigen Größenordnung einfängt und normal fortführt. Dabei kann die Rechnung wieder abstürzen oder ordnungs-gemäß abgeschlossen werden. Die dabei ermittelte Sicherheit kann sowohl kleiner als auch größer als in der vorangegangenen Rechnung sein, was dann besonders ärgerlich ist.

Begegnet kann diesem Verhalten nur werden, indem die geforderte Genau-igkeit gesenkt wird, womit das Absturzrisiko geringer wird. Durch mehrere Restarts kann dieselbe Genauigkeit schrittweise erreicht werden, und bei ei-nem Absturz kann auf die vorige Endgeometrie zurückgegriffen werden. Die Schrittweite zum Aufbau des Startkomplexes wird dabei zweckmäßigerweise auf etwa 1/10 des vorigen Wertes reduziert.

Ich führe dieses Verhalten auf das Auftreten von schleifenden Schnitten im Krafteck zurück. Wenn die Resultierende in der Bruchsohle nahezu dieselbe Richtung hat wie diejenige in der anschließenden Elementtrennfläche, reicht auch die Berechnung auf 16 Stellen genau im Programm nicht mehr aus. In diesem Fall könnte ein einfacher Zeilentausch eventuell Abhilfe schaffen, da der installierte Gleichungslöser ohnehin das Gleichungssystem komplett löst.

## Kapitel 4

### Ausarbeitung der Böschungstafel

Aufgrund der beschriebenen Vorarbeiten konnte die eigentliche Ausarbeitung und Dokumentation der KEM-Standsicherheitstafeln innerhalb eines Monats abgeschlossen werden. Für den Bereich von  $\beta = 30^\circ$  bis  $\beta = 60^\circ$  war das Konvergenzverhalten in allen Bereichen gutmütig, während in den Randberei-chen der übrigen Linien mit  $\beta = const.$  teilweise erhebliche Schwierigkeiten auftraten.

#### 4.1 Beschreibung der Arbeitsweise

Die Startgeometrien wurden gewöhnlich so erzeugt, daß ausgehend von einer Endgeometrie der zuvor ermittelten Nachbarlinie ein Restart mit verändertem oberen Knickpunkt des Oberflächenpolygons durchgeführt wurde (siehe Ab-schnitt 3.2.2, letzter Absatz). Von diesen Startpunkten ausgehend wurden alle weiteren Punkte nacheinander durch Variation der Bodenkenngößen be-rechnet. In Bild 4.1 sind alle berechneten Punkte rautenförmig markiert und die Startpunkte zusätzlich mit Kreisen versehen.

Dabei wurde nach jeder dritten Rechnung ein Geometrieplot mit den letzten beiden Endgeometrien erzeugt, um im Falle von Degenerationerscheinin-gen die weiteren Rechnungen mit der letzten echten 5-Elementgeometrie und Restarts fortzuführen oder die erste degenerierte Geometrie durch Handkor-rekturen zu verbessern. Im Plot werden alle berechneten Punkte mit einer Spline-Funktion verbunden.

Alle Ergebnisse wurden zunächst in einem kommentierten Arbeitsprotokoll abgelegt und der führende Stern gelöscht, wenn sich im Verlauf weiterer Rechnungen Verbesserungen ergaben. Am Ende der Ausarbeitung für einen Böschungswinkel konnte das von dem Programm PABLO als Diagramm aufbe-

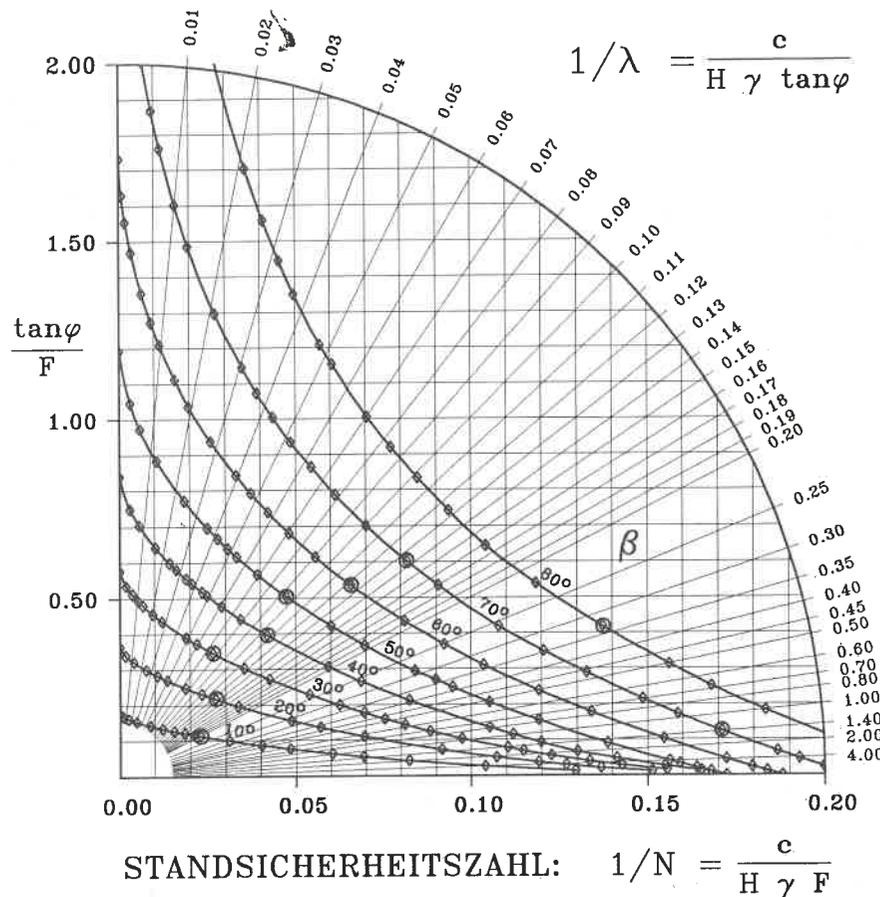
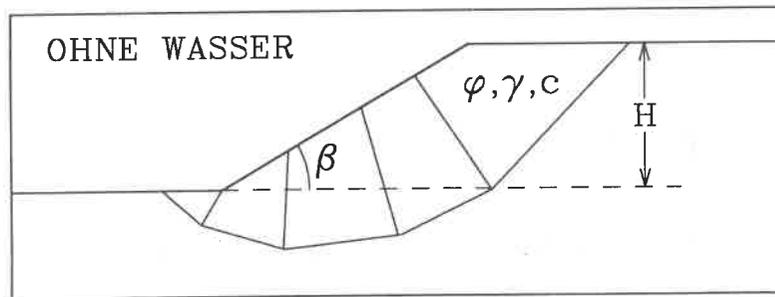


Bild 4.1: Alle berechneten Punkte im CFC-Diagramm

reitere Arbeitsprotokoll Aufschluß darüber geben, ob weitere Verbesserungen erforderlich sind. Aus dem Arbeitsprotokoll kopierte ich dann die gültigen Werte in die files FILE TABELLE und FILE GEO.

## 4.2 Kommentierung der Ergebnisse

Obgleich die Kurven den Erwartungen insgesamt gut entsprechen und im Vergleich mit anderen Rechenverfahren plausibel sind, sind für die Randbereiche, an welchen auch die Rechnungen problematisch verliefen, einige kritische Bemerkungen angebracht.

### 4.2.1 Verwendete Einstellungen

Im Normalfall wurden beim Mitziehen des Minimums folgende Einstellungen verwendet:

- Komplexalgorithmus nach Box
- maximal 2000 Iterationen
- Beta = 0.0001 (Genauigkeit, Abbruchkriterium)
- Gamma = 200 (Die Genauigkeit wird alle 200 Iterationen abgeprüft)
- Alpha = 1.500 (Reflexionsparameter)
- Schrittweite 0.02 bis 2.5 m (je nach Elementgröße und Problemstellung)
- geglätteter Verschiebungsübergang auf 0.2 m (siehe OCHMANN 87) die Verschiebungen in der Endgeometrie waren jedoch immer größer
- Verschiebung von Element Nr.5 um 1.0 m nach unten
- Keine Restriktionen und äußeren Belastungen

Bei dieser Einstellung wurde ein Ergebnis als genau genug gewertet, wenn ein Restart Verbesserungen frühestens nach 200 Iterationen erreichte, und der Abbruch der Iteration nach spätestens 1700 Iterationen erfolgte.

Bis zuletzt zeigten sich Verbesserungen der Zielfunktion nach jeweils 10 bis 20 Iterationen in der 5. Dezimalen.

### 4.2.2 Flache Böschungen

Im Bild 4.2 sind einige Endgeometrien mit ihrer Zuordnung zur Ergebniskurve  $\beta = 20^\circ$  in der CFC-Auftragung dargestellt, um zu verdeutlichen, in welchem

Ausmaß sich das Bruchvolumen vergrößert, wenn man sich dem Fall des rein kohäsiven Bodens nähert.

Daß die erreichten Werte für  $1/N$  dennoch endlich bleiben, kann in der ungenügenden Annäherung des Bruchpolygons an die reale Bruchkurve begründet liegen. Denn mit der Aufweitung werden auch die Knicke im Bruchpolygon schärfer.

Streng genommen müßte demnach die Elementanzahl der Summe der Richtungsänderungen des Bruchpolygons angepaßt werden, wenn für alle Tafelwerte dieselbe Genauigkeit gelten soll. Die Tafelwerte für kleine  $\lambda$  und kleine  $\beta$  sind also prinzipiell ungenauer, obgleich zur Berechnung der letzten Kurvenpunkte bei flacher Böschungsneigung bis zu 10 000 Iterationen erfolgten.

### 4.2.3 Steile Böschungen

Würde die Berechnung einer flachen Böschung mit  $\varphi \rightarrow 0$  und größerer Elementzahl fortgesetzt, wäre gemäß dem im vorigen Abschnitt Gesagten, ein Schnitt der Kurven steiler und flacher Böschungen in der CFC-Auftragung zu erwarten. Damit wäre die Standsicherheit einer Flachböschung geringer, als diejenige einer Steilböschung mit denselben Bodenparametern.

Aufgrund dieser Überlegungen nehme ich an, daß es sich in den Fällen steiler Böschungen und  $\lambda \rightarrow 0$  um Subminima handeln muß.

Da sich das absolute Minimum jedoch erst für riesige Bruchvolumina ergibt, dürfte dieser Fall ohne praktische Bedeutung sein.

Versuche, auch solch große Bruchgeometrien zu rechnen, scheiterten, bzw. ergaben keine niedrigeren Standsicherheiten. Die Variationsstrategien scheinen in diesen kritischen Bereichen überfordert zu sein.

Betrachtet man dazu die in Bild 4.3 dargestellten Endgeometrien für eine steile Böschung, fällt auf, daß der Böschungsfußpunkt immer der tiefste Punkt des Bruchpolygons bleibt. Der Fußpunkt kann also nicht wie bei flachen Böschungen nach links wandern, ohne negative Flächenanteile im ersten Element zu bewirken. Deshalb bleibt der Fußpunkt „hängen“.

Deutlich sind in Bild 4.3 auch die verschwindend kleinen Knickwinkel für den Fall überwiegender Reibung im Bruchpolygon zu erkennen. Bei der besonders schwierigen Rechnung für  $\beta = 80^\circ$  drängten sich zudem die Elementtrennflächen in der Nähe des Böschungsfußes dicht zusammen. Neben dem Auftreten schleifender Schnitte im Krafteck können auch die geringen Knickwinkel des Bruchpolygons für die „Abstürze“ der Rechnung in diesem Bereich verantwortlich sein.

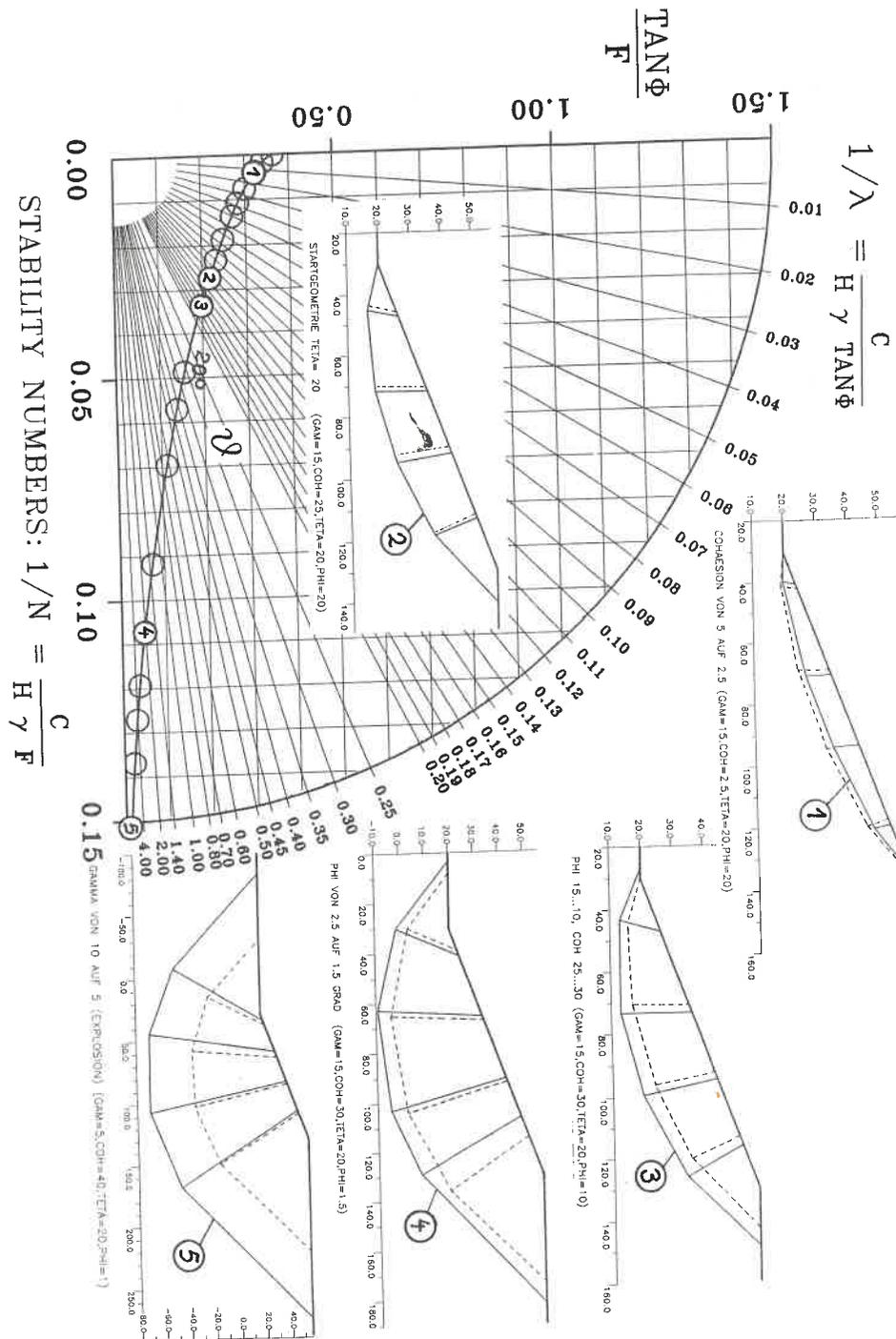


Bild 4.2: Endgeometrien am Beispiel einer flachen Böschung

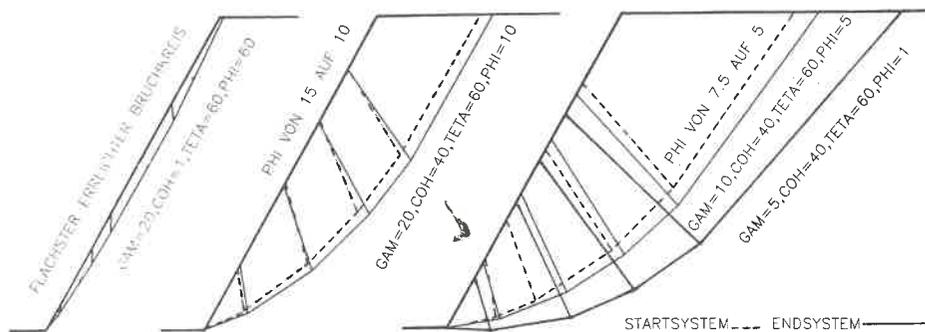


Bild 4.3: Bruchformen steiler Böschungen

Die Ergebnisse in diesem kritischen Bereich für  $c \rightarrow 0$  münden genau in den theoretischen Wert  $\frac{\tan \varphi}{F} = \tan \beta$ .

4.2.4 Bemerkungen zur Auftragung  $1/\lambda = const.$

Die in Bild 4.4 dargestellte Auftragung der Ergebnisse erfolgte mit dem Programm PLODIA aus denselben, in der Anlage aufgeführten Dateien. Für jede  $1/\lambda$ -Linie wurden acht Punkte<sup>1</sup> zwischen den in Bild 4.1 raufenförmig markierten Ergebnissen linear interpoliert und wieder mit einer Spline-Funktion verbunden. Auf diese Weise können Kurven für beliebige  $\lambda$  erzeugt werden.

Die Abstände der so erzeugten Stützstellen sind jedoch sehr unterschiedlich, weil die  $\beta$ -Achse durch den Cotangens verzerrt wird. Die höhere Auflösung im Bereich kleiner Böschungswinkel steht also in keinem Verhältnis zu dem dort getriebenen Rechenaufwand.

Für den Bereich größerer  $\beta$  läßt sich das CFC-Diagramm besser ablesen, und auch für die im folgenden Abschnitt gezeigten Vergleiche ist die CFC-Auftragung aussagekräftiger.

Der Knick in der obersten Linie deutet wieder auf den bereits erläuterten Subminima-Charakter der Endgeometrien hin, welche sich für große  $\beta$  und

<sup>1</sup> Aus jeder Linie gleicher Böschungsneigung kann nur ein Wert gewonnen werden.

STANDSICHERHEITSAHLE:  $1/N = \frac{c}{H \gamma F}$

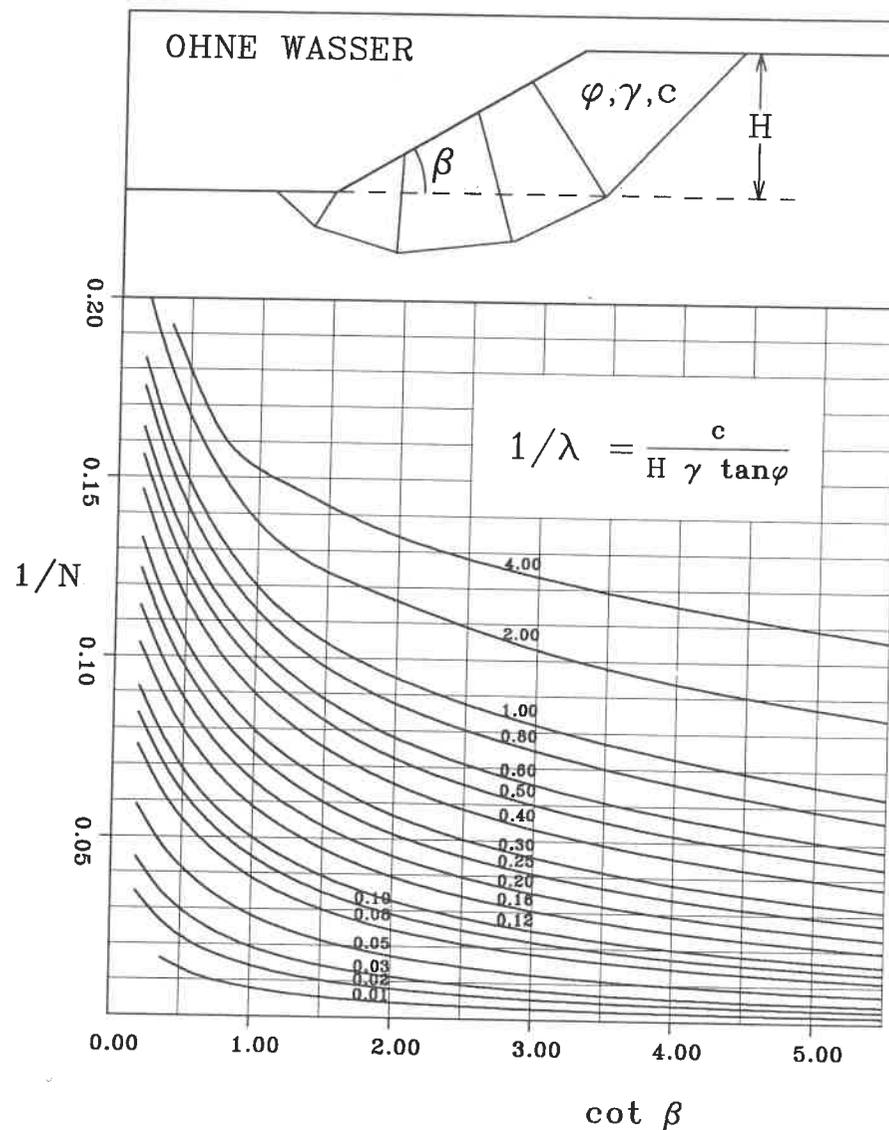


Bild 4.4: Stand sicherheitsdiagramm mit Linien  $1/\lambda = const.$

$\varphi \rightarrow 0$  ergaben

Aus den im Abschnitt 4.2.2 erläuterten Gründen sind die oberen Kurven prinzipiell ungenauer als die tiefer liegenden Kurven für geringeren Kohäsionseinfluß.

#### 4.2.5 Anwendung der Standsicherheitstafel bei Schichtung

Die Ergebnisse sind auch auf Böschungen anwendbar, bei welchen sich unterhalb des unteren Geländeniveaus eine waagrechte Bodenschicht größerer Festigkeit befindet, solange das ermittelte Bruchpolygon diese Schicht nicht durchschneidet<sup>2</sup>. Dies kann etwa bei Abraumhalden der Fall sein.

Um für diesen Fall die Anwendungsgrenzen zu verdeutlichen, sind in Bild 4.5 auf jeder Standsicherheitskurve zwei Punkte markiert, die folgende Bedeutung haben:

- Am oberen Punkt ging die ermittelte Endgeometrie durch den Böschungsfußpunkt, und dieser war zugleich auch gerade noch tiefster Punkt des Bruchpolygons. Der Kurvenbereich oberhalb dieses Punktes ist also auch für den oben bezeichneten Fall gültig.
- Am unteren Punkt ging das ermittelte Bruchpolygon gerade noch durch den Fußpunkt, das Bruchpolygon reicht jedoch schon tiefer. Auflasten, die auf das untere Böschungsniveau aufgebracht werden, verbessern die Standsicherheit also erst, wenn man sich auf dem Kurvenast unterhalb dieses Punktes bewegt.

Die Übergangsstellen wurden aus den zuvor berechneten Werten entnommen, also nicht genau ermittelt. Die mit einer Bezier-Funktion eingeschalteten gestrichelten Kurven sollen ihre wahrscheinliche Lage angeben. Das Bruchpolygon trat in keinem Fall innerhalb der Böschung aus.

<sup>2</sup> In diesem Fall geben auch die Linien großer Böschungswinkel in allen Bereichen mit Sicherheit das absolute Minimum der Standsicherheit wieder.

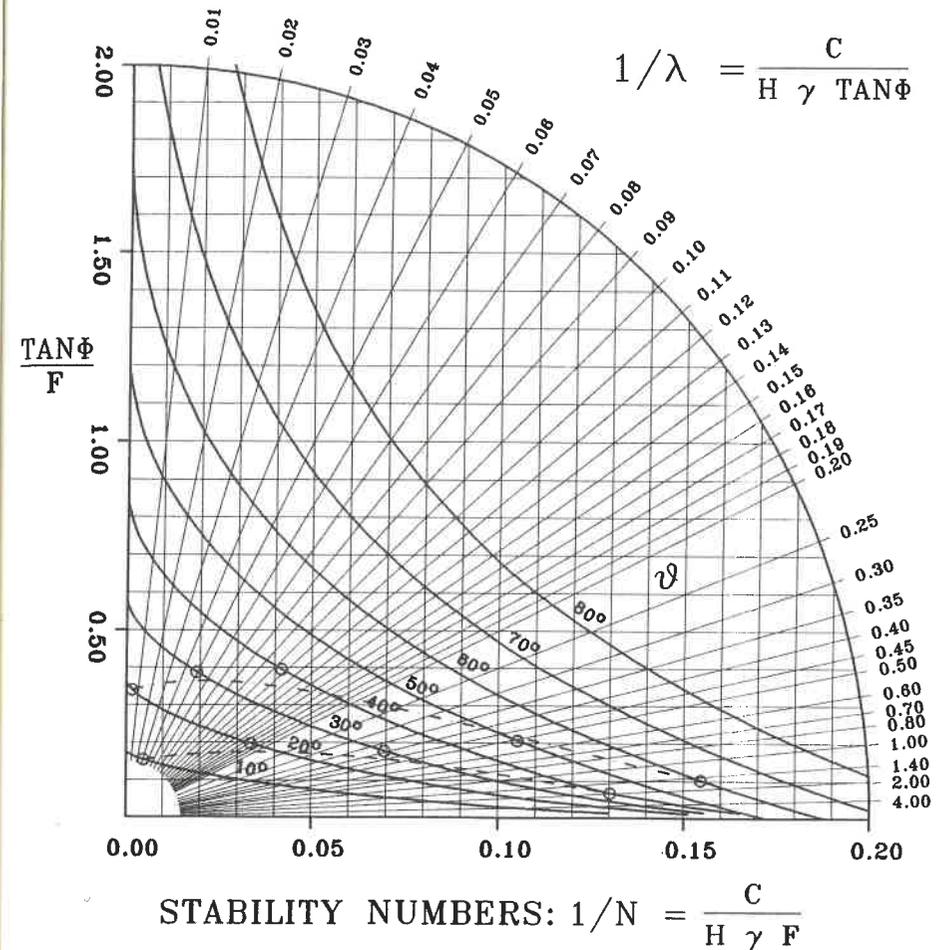
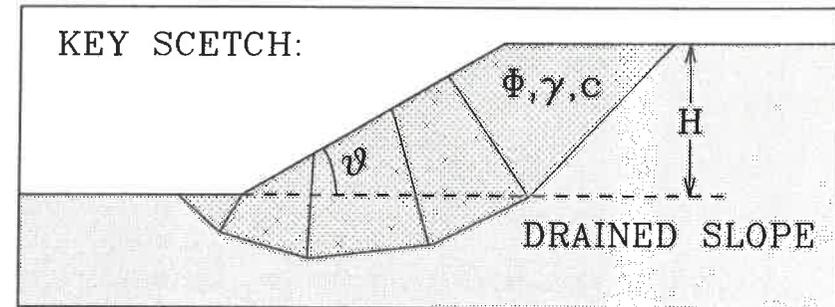


Bild 4.5: Zonen qualitativ gleicher Bruchformen

## Kapitel 5

### Vergleiche mit Ergebnissen anderer Berechnungsverfahren

Wie bereits im ersten Abschnitt erwähnt, gibt es keine allgemein gebräuchliche Form für die Auftragung der Ergebnisse. Ein einfacher Vergleich ohne Umrechnungen ist nicht möglich.

Deshalb wurde folgender Weg beschritten:

- Aus den in der Literatur gefundenen Tafeln wurden alle verfügbaren Werte für die Böschungswinkel  $\beta = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, \dots, 80^\circ$  abgelesen und in dem Format der eigenen Ergebnisse abgespeichert (digitalisiert).
- Dadurch standen die Ablesungen den Plotprogrammen ebenfalls zur Verfügung und konnten den Ergebnissen der KEM als gestrichelte Kurvenschar unterlegt werden.

Die so entstandenen Plots werden im folgenden kommentiert.

### 5.1 Vergleich mit dem allgemeinen Lamellenverfahren

Dem ersten Vergleich liegen die Ergebnisse von TOMPOULIDIS 83 zugrunde, welche auf der Grundlage der Standsicherheitsformeln nach GUSSMANN 78 erarbeitet wurden.

Dieses Verfahren basiert, wie das Verfahren von Krey/Bishop, auf einer kreisförmigen Bruchfuge und senkrechten Elementtrennflächen, es werden jedoch alle inneren Kräfte berücksichtigt und alle drei Gleichgewichtsbedingungen erfüllt.

In dieser Ausarbeitung wurde ein einfaches Raster gerechnet, und die gefundenen Minima der Standsicherheit als  $\varphi/F$  über  $\cot \beta$  vertafelt.

In das Bild 5.1 sind alle möglichen Ablesungen aus diesem Diagramm eingegangen. Genauso wie bei den Ergebnissen der KEM-Rechnungen (ausgezogene Linien) wurden die Kurven mit einer Spline-Funktion<sup>1</sup> interpoliert und als gestrichelte Linien eingezeichnet.

Berücksichtigt man bei der Beurteilung, daß bei TOMPOULIDIS 83 die Standsicherheitstafel von Hand aufgetragen wurde, sowie unvermeidliche Ablesefehler, zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung in den Ergebnissen beider Rechenverfahren.

Für  $\beta = 10^\circ$  und  $20^\circ$  sind die Linien nahezu identisch. Bei steileren Böschungen bleibt das allgemeine Lamellenverfahren zumindest für  $\lambda$ -Werte unter 8 auf der sicheren Seite. Mit zunehmendem Reibungseinfluß und steigender Böschungsneigung machen sich die Auswirkungen der Annahme einer kreisförmigen Bruchsohle offenbar stärker bemerkbar, was sich in einer gegenüber KEM größeren Standsicherheit ausdrückt.

<sup>1</sup> Die interpolierte Kurve geht durch alle gegebenen Punkte. Ein „Ausreißer“ unter den eingegebenen Stützstellen erzeugt also Nachbarwellen.

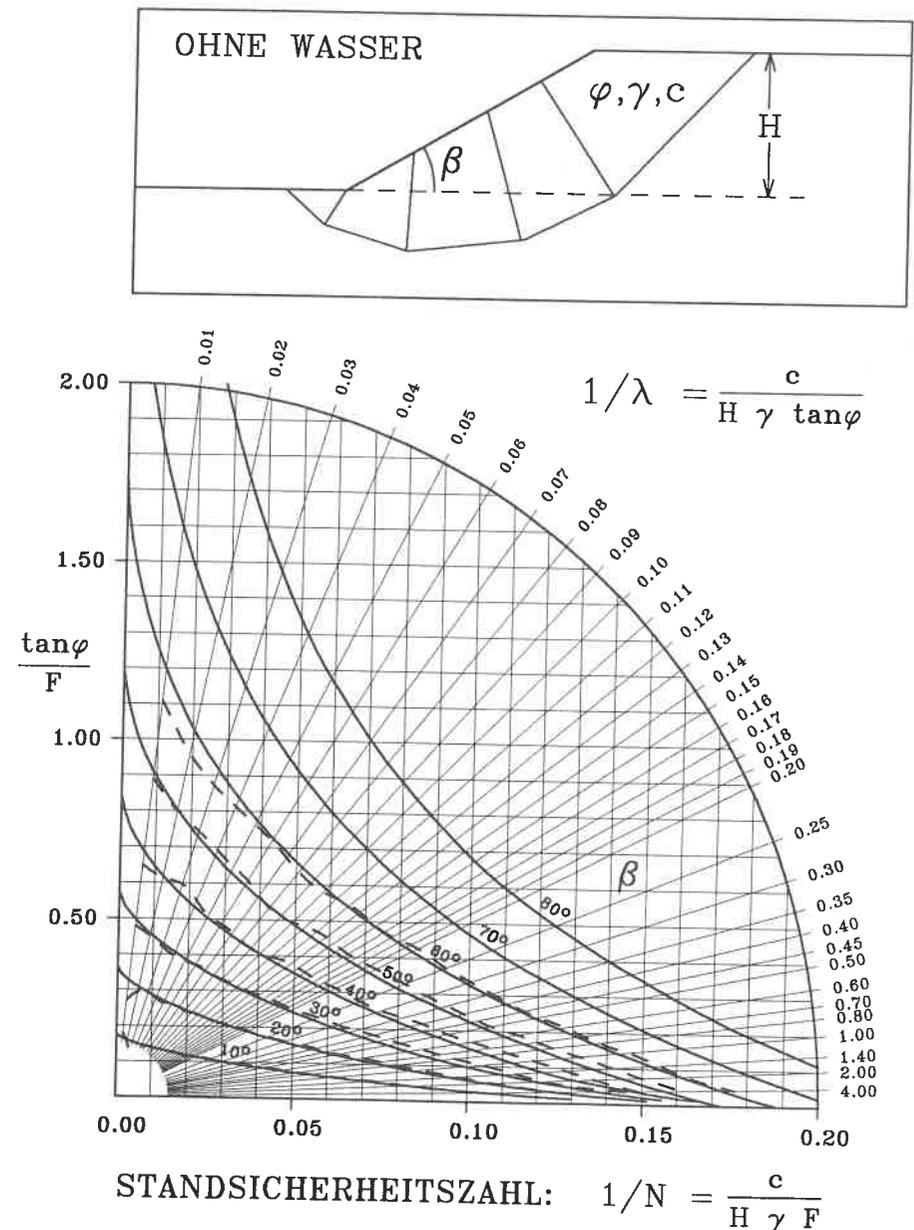


Bild 5.1: Vergleich von KEM mit dem allgemeinen Lamellenverfahren nach GUSSMANN 78 aus TOMPOULIDIS 83

## Vergleich mit der Taylor-Tafel<sup>2</sup>

Das gebräuchlichste Diagramm zur Bestimmung der Böschungsstandsicherheit ist sicherlich die Tafel von TAYLOR 48, wie sie etwa auch im Grundbau-taschenbuch (1982, Band 2, Seite 269) wiedergegeben ist. Auch hier ist die Übereinstimmung mit der KEM-Rechnung noch sehr gut, wie Bild 6.9 auf Seite 66 zeigt.

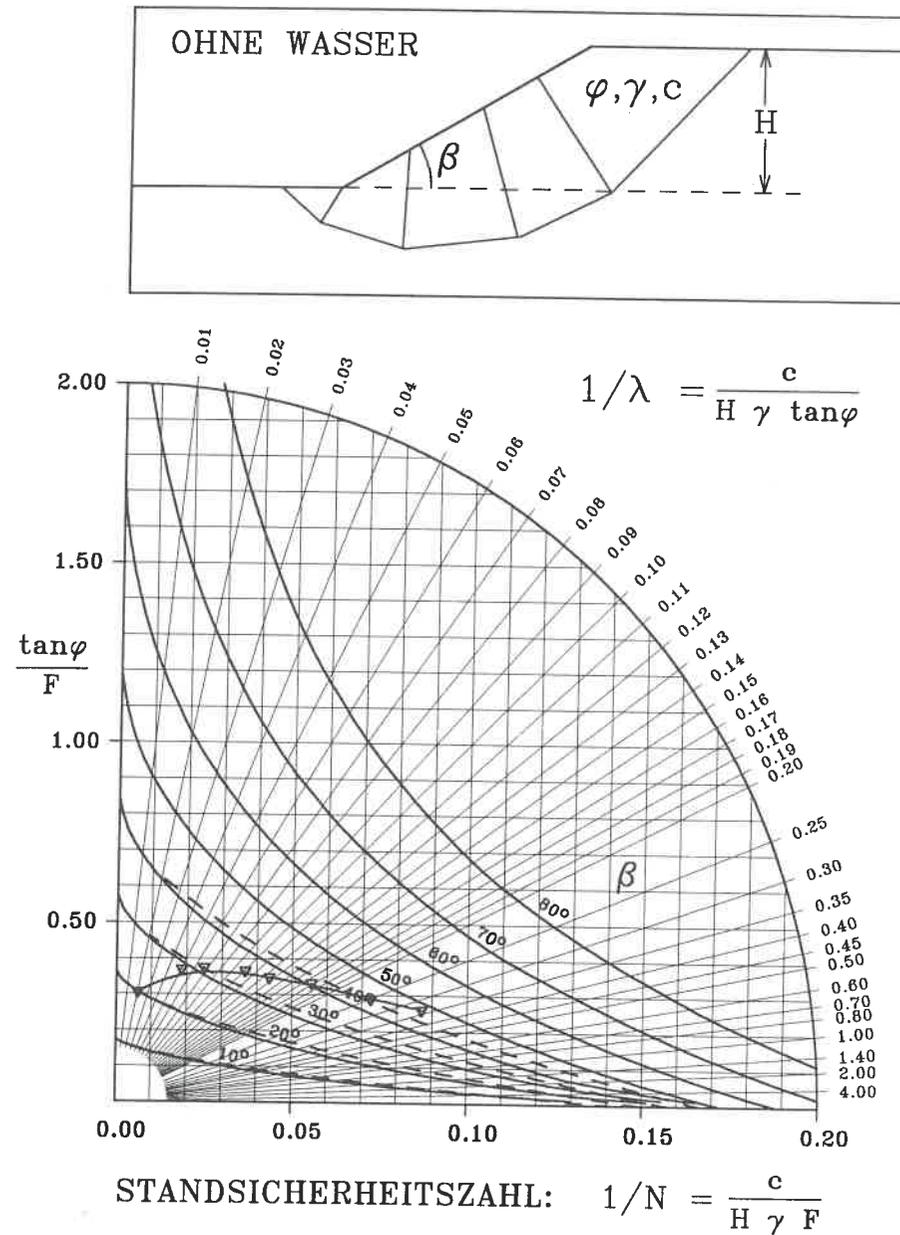
## 5.2 Vergleich mit den Ergebnissen von Cousins

Aus dem umfangreichen Tafelwerk von Cousins (aus MC. CARTHY 78), das auch verschiedene Wasserspiegellagen berücksichtigt, wurden die Ergebnisse für homogenen Boden und kreisförmigen Bruch durch den Fußpunkt gestrichelt in Bild 5.2 geplottet. Die dünne, durch die dreieckförmig markierten Ablesungen mit einer Bezier-Funktion konstruierte Kurve grenzt dabei wieder den Bereich nach oben ab, in welchem die Bruchkreise tiefer als der Böschungsfuß reichen. (Vergleiche Bild 4.5)

Auch die anhand dieser Ablesungen ermittelten Kurven stimmen noch gut mit den Ergebnissen von KEM überein und liegen, abgesehen von dem kritischen Bereich für  $\lambda \leq 0.125$ , auf der sicheren Seite.

Die Ergebnisse für die dünn gezeichnete Kurve mit  $\frac{\text{Bruchtiefe}}{\text{Höhe}} = 1.0$ ; sowie für  $\beta = 10^\circ$ , sind fast identisch.

Für Böschungsneigungen über  $45^\circ$  waren keine Ablesungen möglich.



<sup>2</sup> Dieser Vergleich wurde erst nach Abschluß der Arbeit ergänzt

Bild 5.2: Vergleich von KEM mit den Ergebnissen von Cousins aus MC. CARTHY 78

### 5.3 Vergleich mit dem Krey/Bishop-Verfahren

Den gestrichelten Linien von Bild 5.3 liegen die als Übungsunterlagen der Vorlesungsreihe für Vertiefer ausgegebenen Tafeln GUSSMANN 86 zugrunde, die auf der Grundlage des in DIN 4084 beschriebenen Standsicherheitsnachweises nach Krey/Bishop erarbeitet wurden.

Die Ergebnisse dieses Verfahrens liegen im Vergleich zu den Werten von Cousins noch weiter auf der sicheren Seite und unterschätzen in dem Bereich kleiner  $\varphi$  und steiler Böschungen die Standsicherheit erheblich.

Ein Vergleich der Bruchgeometrien zeigt, daß in diesem Bereich auch die Abweichungen der von KEM ermittelten Bruchpolygone von der Kreisform besonders groß sind. Da jedoch das allgemeine Lamellenverfahren auch in diesem Bereich gute Ergebnisse liefert, ist der größte Teil dieser Abweichungen vermutlich auf die statischen Vereinfachungen dieses Näherungsverfahrens zurückzuführen.

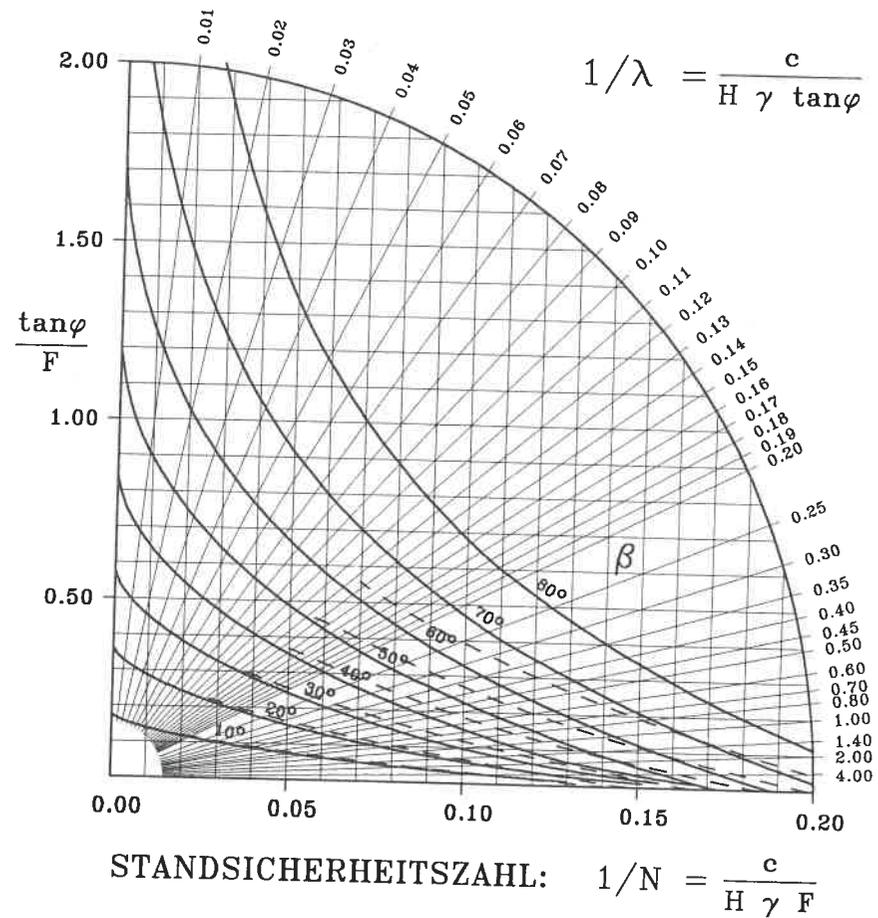
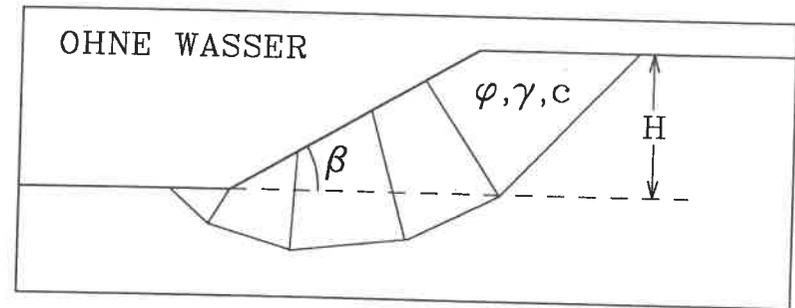


Bild 5.3: Vergleich von KEM mit dem Verfahren nach Krey/Bishop aus GUSSMANN 86

### 5.4 Vergleich mit den Circular Failure Charts (CFC) nach Hoek/Bray

Die Abweichungen der Ergebnisse der KEM-Rechnung von der in HOEK 77 veröffentlichten Standsicherheitstafel, wie sie sich in Bild 5.4 darstellen, sind so groß, daß sie nicht allein mit anderen Rechenansätzen begründet werden können.

Ausgehend von den zwangsläufig gemeinsamen Punkten für  $c = 0$  divergieren die Ergebnisse mit zunehmendem  $\beta$  und  $c$  immer stärker, wobei die CFC in allen Bereichen kleinere Standsicherheiten liefert.

Der Grund dafür ist, daß die geometrischen Annahmen für den Bruch nicht vergleichbar sind. Die CFC legen als Bruchmechanismus einen Monolith zugrunde, der auf einer kreisförmigen Bruchsohle abrutscht und zusätzlich durch einen senkrechten Zugriß beliebiger Lage und Tiefe begrenzt wird. Da in diesem Zugriß keine Kräfte übertragen werden, entsprechen diese Annahmen in etwa einem Krey/Bishop-System mit verringerter Böschungshöhe und zusätzlicher Auflast, vergleiche Bild 5.7.

Wahrscheinlich wurden diese Annahmen getroffen, um den Fall unsinnig steiler Austrittswinkel der Bruchfläche bei steilen Böschungen zu umgehen.

Um auch in diesem Fall vergleichende Aussagen machen zu können, habe ich einzelne Punkte der CFC mit KEM nachgerechnet. Die geometrischen Annahmen über Lage und Ausdehnung des Zugrisses und Bruchkreises können aus skizzenhaften Diagrammen derselben Quelle nur ungenau abgelesen werden.

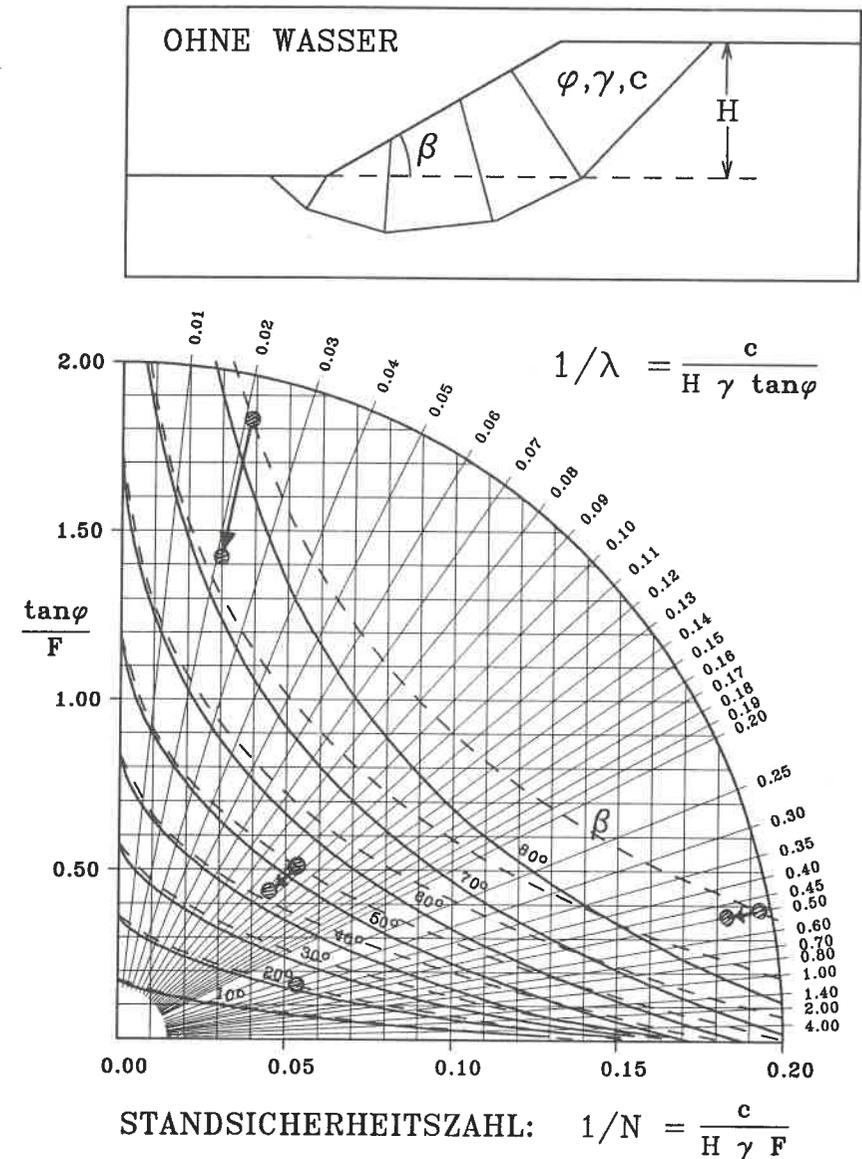


Bild 5.4: Vergleich von KEM mit den Circular Failure Charts aus HOEK 77

5.4.1 Nachrechnung einzelner Geometrien mit KEM

Die vier untersuchten Fälle sind in Bild 5.4 auf den gestrichelten CFC-Linien durch schraffierte Kreise bezeichnet. In den drei Fällen, in denen die Nachrechnung mit KEM auf andere Ergebnisse führte, zeigt ein Pfeil auf den Punkt, der sich aus der Kontrollrechnung der CFC-Geometrie mit KEM ergab.

Im folgenden soll anhand der einzelnen Endgeometrien eine Interpretation dieser in sich widersprüchlichen Ergebnisse versucht werden.

Beispiel 1: TETA = 20 GRD , 1/LAMDA = 0.32

In diesem Fall lieferten beide Verfahren ähnliche Ergebnisse. Aus Bild 5.5 ist ersichtlich, daß der Zugriß in diesem Fall auch keinen nennenswerten Einfluß haben kann.

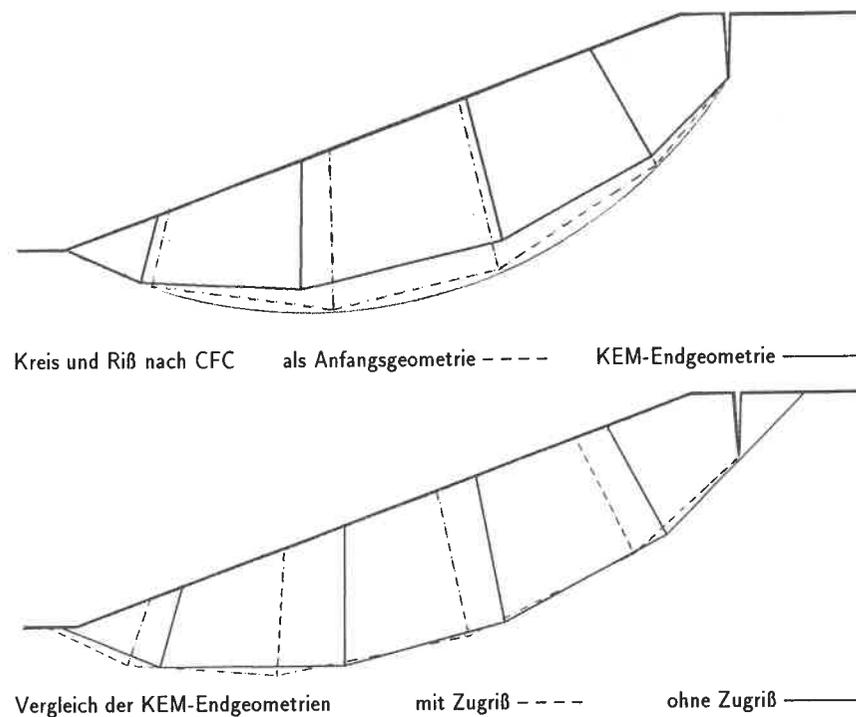


Bild 5.5: Vergleich einer flachen Böschung mit und ohne Zugriß

Beispiel 2: TETA = 50 GRD , 1/LAMDA = 0.15

In diesem Fall ergab eine KEM-Rechnung mit Zugriß eine größere Standsicherheit als eine KEM-Rechnung ohne Zugriß, was eigentlich unsinnig ist. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß die Zugrißgeometrie nicht variiert wurde, und der Rißgrund als Fixpunkt der Geometrievariation definiert wurde. (Vergleiche Beispiel 4).

Wie Bild 5.6 zeigt, verläuft das Bruchpolygon mit Zugriß flacher als dasjenige ohne Zugriß. Dadurch, und durch die vergrößerten Normalkräfte, wird der haltende Einfluß der Reibung verstärkt. Deshalb ist anzunehmen, daß diese Zugrißlage nicht den ungünstigsten Fall repräsentiert.

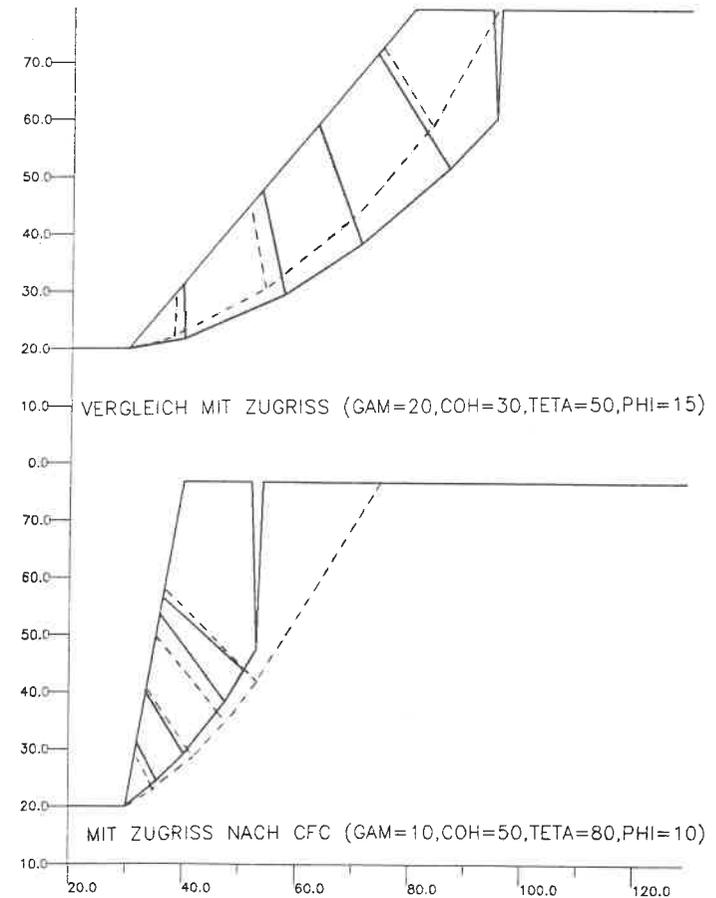


Bild 5.6: Verschiedene Zugrißlagen der Circular Failure Charts

**Beispiel 3:** TETA = 80 GRD , 1/LAMDA = 0.50

In diesem Fall entsprechen die Ergebnisse den Erwartungen. Der angesetzte Zugriß macht sich in einem großen Abfall der Standsicherheit bemerkbar.

Der verbleibende Unterschied zwischen den Tafelwerten der CFC und der mittels KEM neu ausgearbeiteten Standsicherheitstafel entspricht in Betrag und Richtung der bei anderen, statisch ungenauen Verfahren aufgetretenen Abweichung.

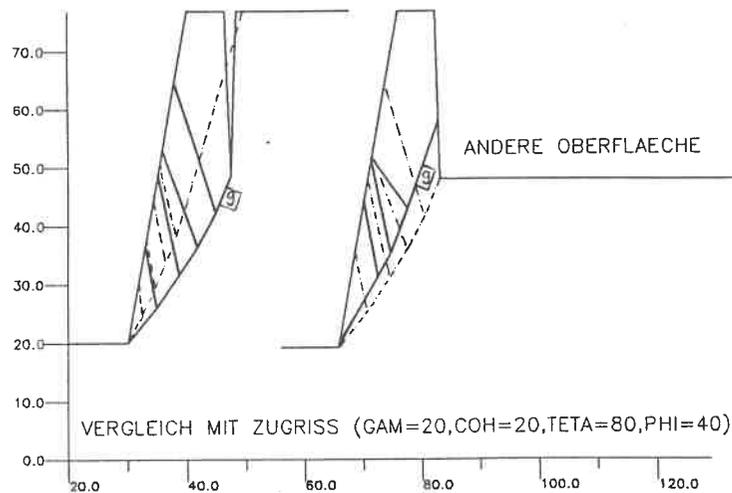
Die Endgeometrie dieser Berechnung zeigt Bild 5.6.

**Beispiel 4:** TETA = 80 GRD , 1/LAMDA = 0.02

Für dieses Beispiel gilt das zu Beispiel 2 Gesagte in gleicher Weise.

Da eine Variation der Zugrißlage sehr mühsam ist, wurde ein anderer Weg gewählt um aufzuzeigen, daß die Angaben in HOEK 77 nicht dem ungünstigsten Zugriß entsprechen:

Wird die Oberfläche gemäß der in Bild 5.7 gezeigten Weise abgeändert, kann auch der Reißpunkt des 5. Elementes zur Variation freigegeben werden, weil dadurch ein Schnitt der Strecke 9 mit dem Reiß im Verlauf der Rechnung ausgeschlossen wird. Das Abwandern des Punktes 10 vom Reißgrund weist eindeutig darauf hin, daß der ungünstigste Reiß nicht so tief reichen kann, und (oder) weiter links liegen muß.



**Bild 5.7:** Möglichkeiten KEM mit Zugrissen zu rechnen

## Kapitel 6

### Berechnungen mit Grundwasser

Um den Einfluß des Grundwassers auf die Standsicherheit abschätzen zu können, müssen zunächst Annahmen über den Verlauf des Grundwasserhorizontes getroffen werden. Von den vorhandenen Tafeln und Tabellen sollte dann diejenige zur Anwendung kommen, welche der gegebenen Grundwassersituation am besten gerecht wird.

Dabei sind grundsätzlich drei verschiedene Ansätze üblich:

1. Ansatz einer **Sickerlinie nach Sichard**, welche am Böschungsfuß austritt und in einem bestimmten Abstand, bezogen auf die Böschungshöhe, das obere Geländeniveau schneidet (Verwendet in HOEK 77).
2. Ansatz so, daß der **Wasserspiegel jede senkrechte Bodenlamelle im selben Verhältnis teilt**, wodurch das mittlere spezifische Gewicht jeder Lamelle gleich bleibt, aber der Spiegelverlauf teilweise sehr unrealistisch wird. Dieser Ansatz bringt für KEM wegen der variablen Elementgeometrie keine Vorteile und müßte ins Programm integriert werden. Beim Lamellenverfahren genügt durch diesen Trick eine Tafel für alle möglichen Wasserstände dieser Art (Siehe TOMPOULDIS 83, SMOLTCZYK 83, MC. CARTHY 78).
3. **Waagrechter Wasserspiegel** so, daß die **Böschung unterhalb eines Niveaus gesättigt** ist. Der Fall tritt in der Praxis z.B. bei schneller Spiegelabsenkung in einem Staubecken als besonders ungünstiger, instationärer Extremfall auf (Einzelne Fälle in JANBU 54, voll gesättigte Böschung in HOEK 77).

Weil eine waagrechte Spiegellinie am einfachsten als Polygon darstellbar ist, wurde als erstes der Versuch unternommen, die Standsicherheit einer bis zu halber Höhe gesättigten, homogenen Böschung für verschiedene Bodenparameter zu berechnen.

### 6.1 Freie Variation aller Bodenkenngrößen

Nach der ersten Berechnung einer Linie mit  $\beta = 50^\circ$  in der gewohnten Weise erhielt ich die gestrichelte Linie in Bild 6.2 als Kontrollplot. Neben leichten Knicken, die auf eine unzureichende Iterationsanzahl hinweisen, zeigt sich ein terrassenförmiger Sprung an der Stelle, an welcher  $\gamma$  von 20 über 15 auf  $10 \text{ kN/m}^2$  gesenkt wurde. Die ausgezogene dicke Linie ( $H = H_w$ ) ergibt sich bei gleicher Böschungsneigung ohne Grundwasser, bzw. bei vollständig gesättigter Böschung.

**Die bislang gültige Normierung greift demnach nicht mehr!**

Wird keine neue Möglichkeit zur Normierung gefunden, muß nicht nur für jede Spiegellage, sondern auch für jede Wichte eine gesonderte Standsicherheitstafel erstellt werden.

Weil die Rechnungen durch die Einführung des Wasserspiegels zudem aufwendiger werden, da bei jedem Iterationsschritt die Schichtungsroutine durchlaufen werden muß, und die Rechnung zudem schlechter konvergiert, weil jetzt auch Subminima in Erscheinung treten, halte ich es für vernünftiger, vor der Ausarbeitung von Standsicherheitstafeln mit Wasser, die das Grundwasser berücksichtigen, nach neuen Möglichkeiten der Normierung zu suchen.

Die Änderungen der Endgeometrien, die diesem Sprung zugrunde liegen, zeigt Bild 6.1.

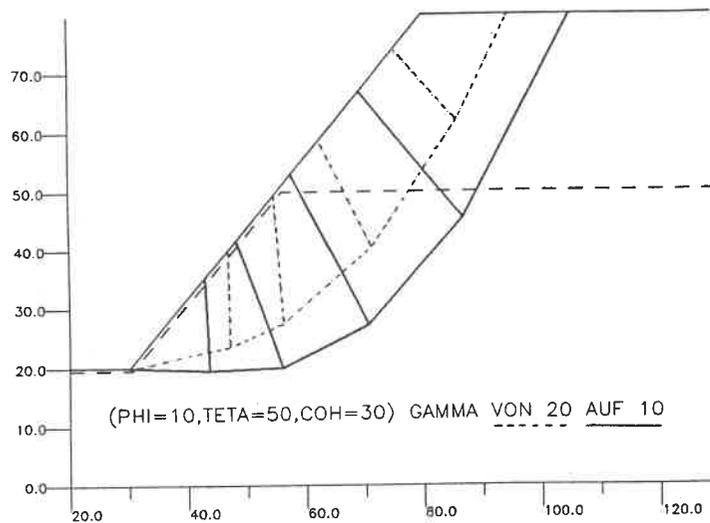


Bild 6.1: Einfluß der Wichte auf die Bruchform bei Grundwasser

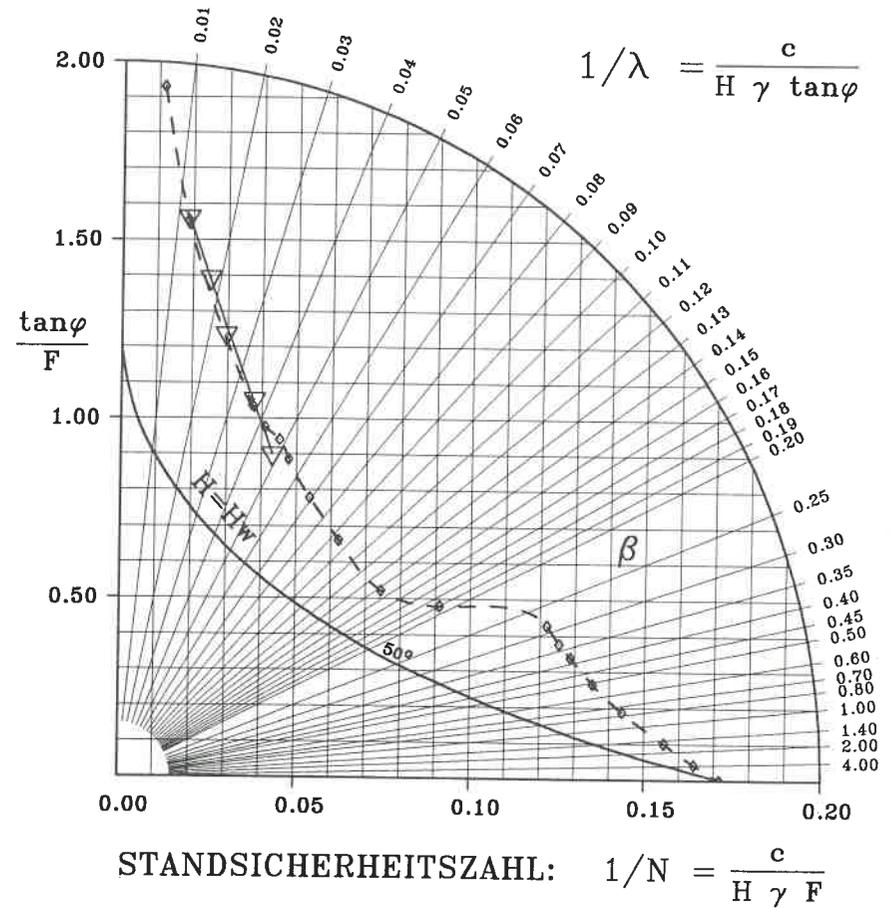
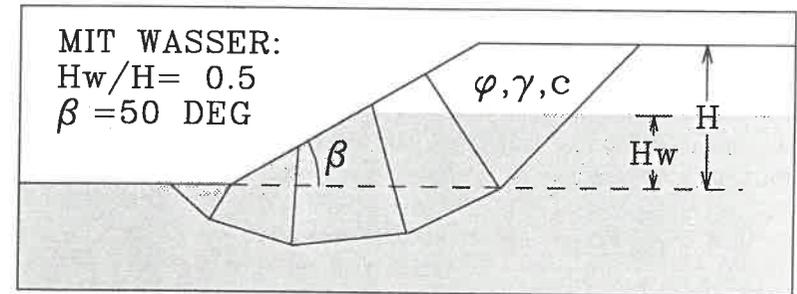


Bild 6.2: Kontrolldiagramm nach der Berechnung mit Wasser

### 6.2 Berechnungen mit konstanter Wichte

Um Anhaltspunkte für eine mögliche Normierung zu finden und die bereits gewonnenen Ergebnisse zu nutzen, führte ich die Rechnung getrennt für  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$  und  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  fort.

In Bild 6.3 sind Endgeometrien zusammengestellt, wie sie sich für die Linie  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  ergaben. Es zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede der Trennflächenneigung über und unter Wasser, was auf ein Subminimum hinweisen könnte.

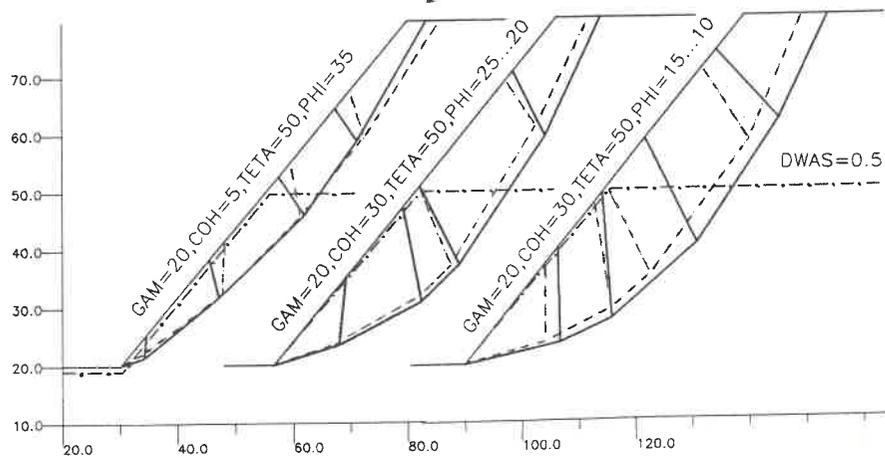
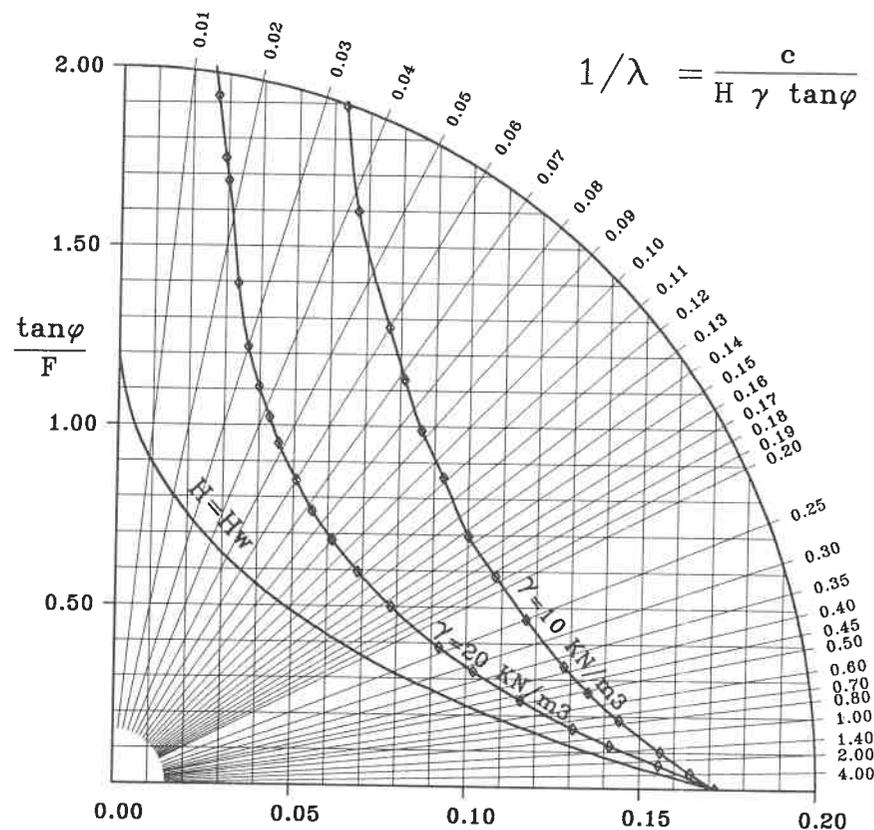
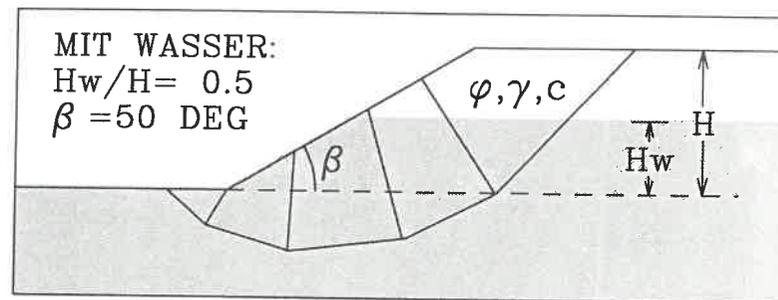


Bild 6.3: Endgeometrien im Verlauf der Rechnung mit Wasser

Die Ergebnisse dieser Rechnungen in Diagrammform zeigt Bild 6.4. Interessanterweise münden alle Linien für  $\varphi \rightarrow 0$  in denselben Punkt. Damit wird die Annahme bestätigt, daß in erster Linie die Reibung für das Auseinanderklaffen der Linien verantwortlich ist, da die Kohäsionskräfte nicht durch das reduzierte Eigengewicht beeinflusst werden.

Die Rechnung erwies sich dabei für  $1/\lambda < 0.12$  und  $\gamma = 10 \text{ kN/m}^3$ , sowie für  $1/\lambda < 0.05$  und  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  als schwierig.

Die Bedeutung der Reibung zeigt auch Bild 6.5, in dem die Änderungen der Endgeometrien unter dem Einfluß des Wassers verdeutlicht werden. Für  $\varphi \rightarrow 0$  ergibt sich auch dieselbe Bruchform, während unter dem Einfluß der Reibung das Bruchpolygon „ins Wasser gezogen“ wird.



STANDSICHERHEITSAHLE:  $1/N = \frac{c}{H \gamma F}$

Bild 6.4: Standsicherheit für verschiedenen Wichten und Wasser

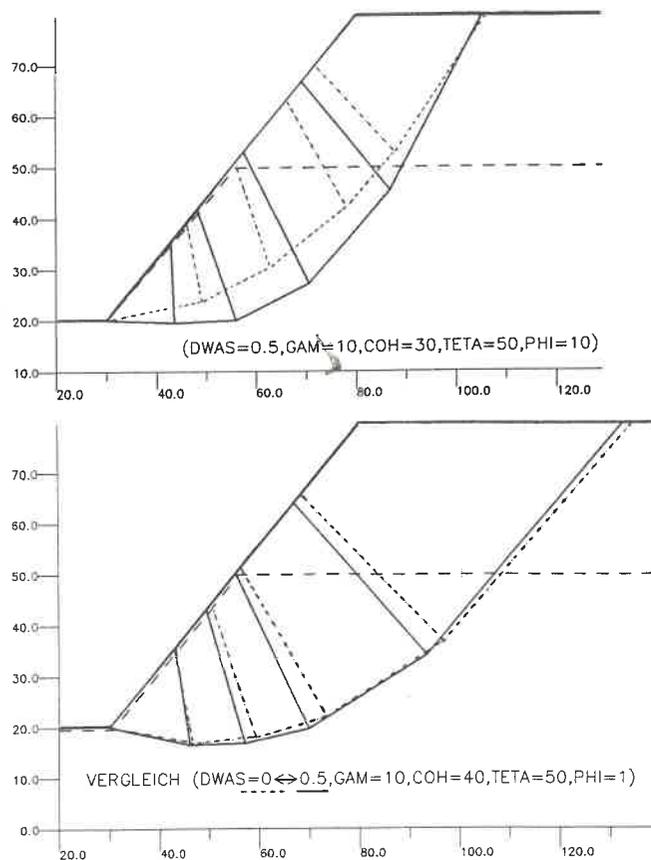


Bild 6.5: Vergleich von Endgeometrien mit und ohne Wasser

### 6.2.1 Austritt des Bruchpolygons im Hang

Bei der Berechnung mit Grundwasserspiegel ergaben sich auch erstmals verschiedene Bruchformen für dieselben Eingangswerte. Ob es sich dabei um echte Subminima handelt, ist schwer zu sagen, weil sich erstaunlicherweise nahezu dieselben Sicherheitswerte ergaben<sup>1</sup>.

In Bild 6.2 sind diese Ergebnisse durch Dreiecke und eine gestrichelte Linie

<sup>1</sup> Bei der späteren Feinarbeit an dieser Kurve für  $\beta = 50^\circ$  ergaben sich dann doch noch deutlich geringere Sicherheiten für diesen Kurvenbereich. Möglicherweise haben hier also auch numerische Effekte eine Rolle gespielt

markiert. In diesen Fällen trat das Bruchpolygon oben in die Hangschräge ein, wie Bild 6.6 zeigt.

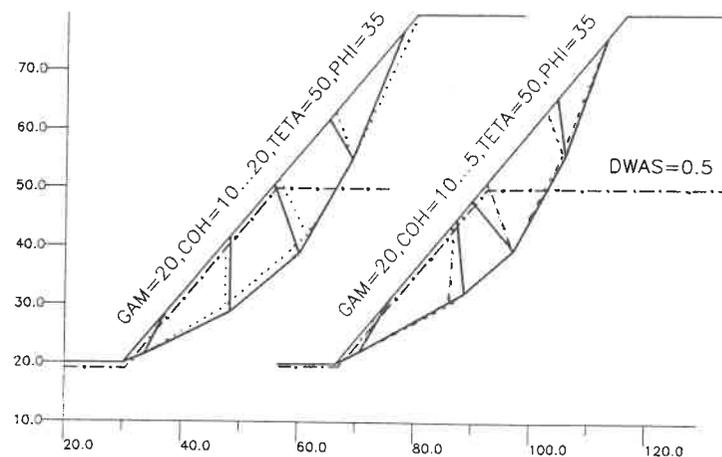


Bild 6.6: Eintritt des Bruchpolygons im Hang

Die Verminderung der effektiven Böschungshöhe wurde bei den Ergebnissen nicht berücksichtigt.

### 6.3 Standsicherheitstafel mit Wasser

In Bild 6.7 sind die Ergebnisse von Berechnungen der Standsicherheit bei einem Grundwasserstand in halber Böschungshöhe für den Lastfall plötzliche Wasserspiegelsenkung aufgetragen. Der wassergesättigte Teil der Böschung ist in der Schlüsselskizze von Bild 6.7 grau unterlegt.

Die Ausarbeitung von Tafeln mit Wasser oder verschiedenen Bodenschichten ist also in gleicher Weise möglich. Der dazu erforderlich Rechenaufwand wächst jedoch, verglichen mit dem homogenen Fall, beträchtlich.

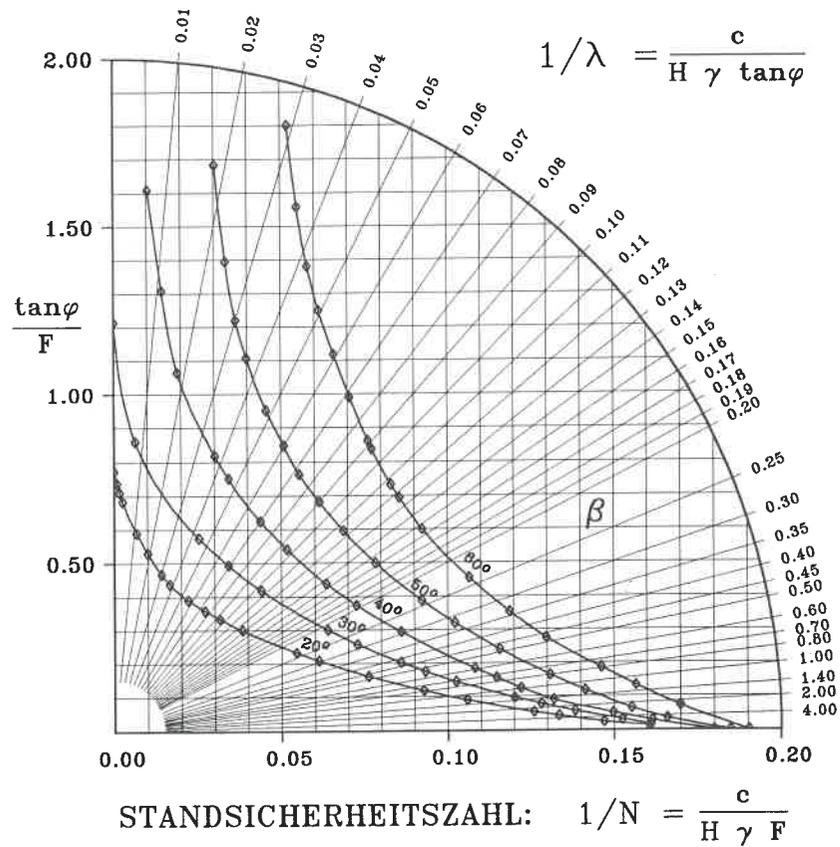
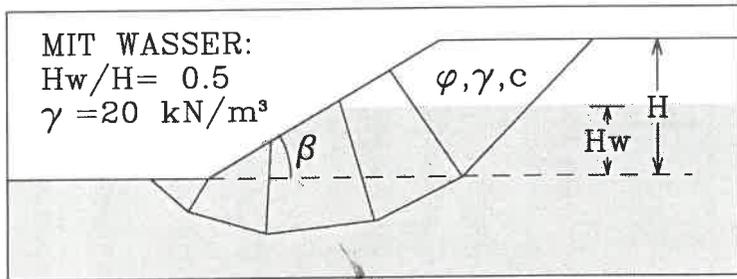


Bild 6.7: Standsicherheitstafel mit Wasser ( $H_w/H = 0.5$ )

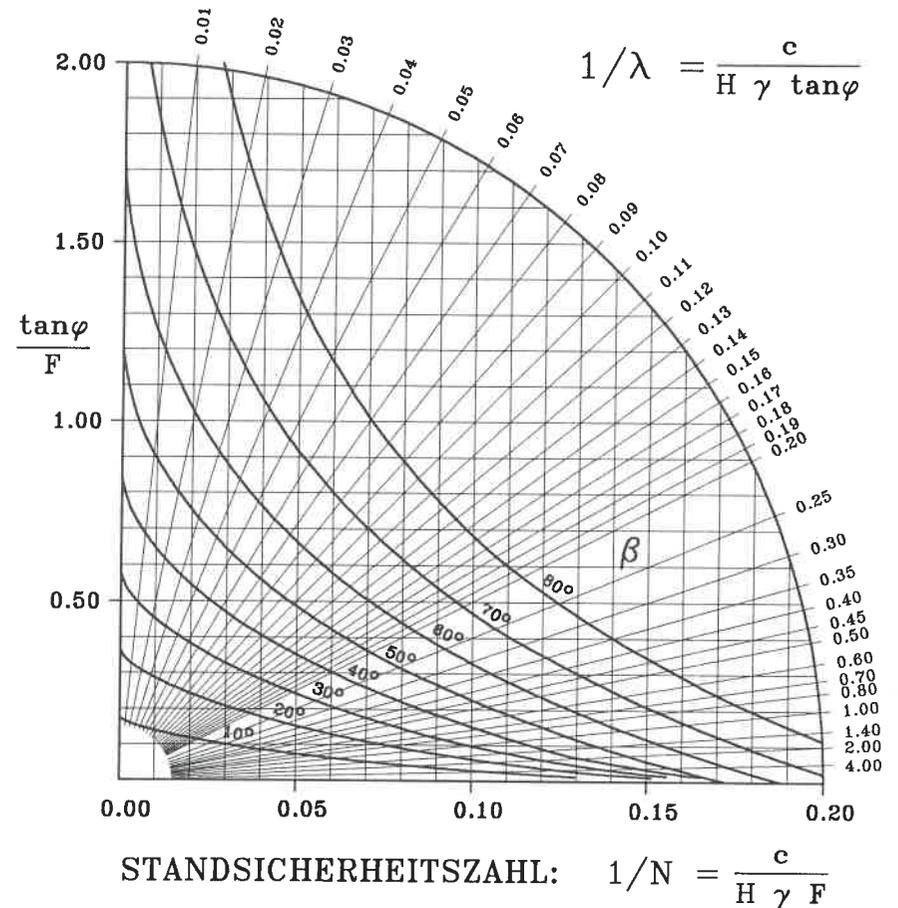
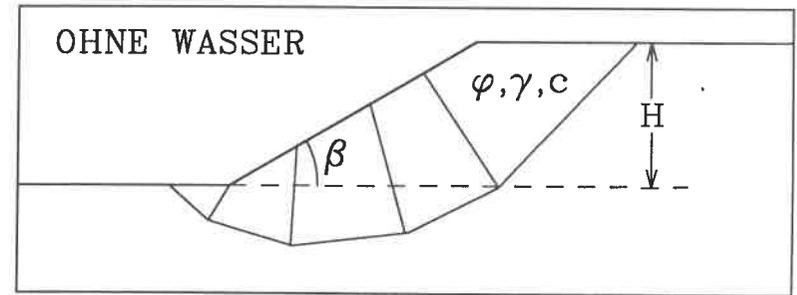


Bild 6.8: Standsicherheitstafel ohne Wasser

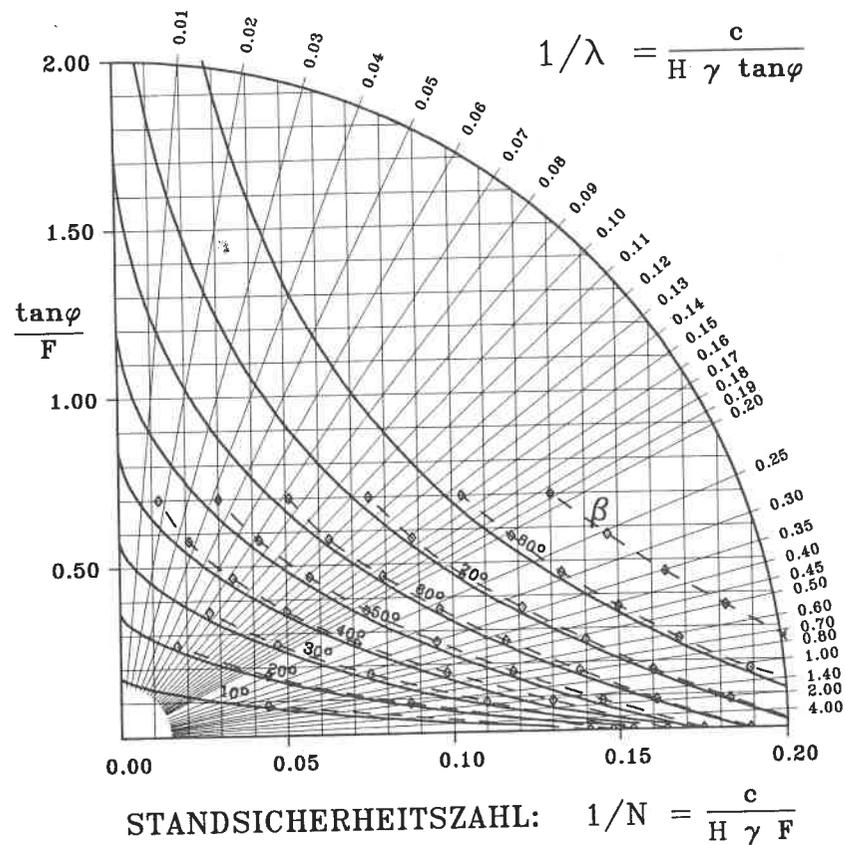
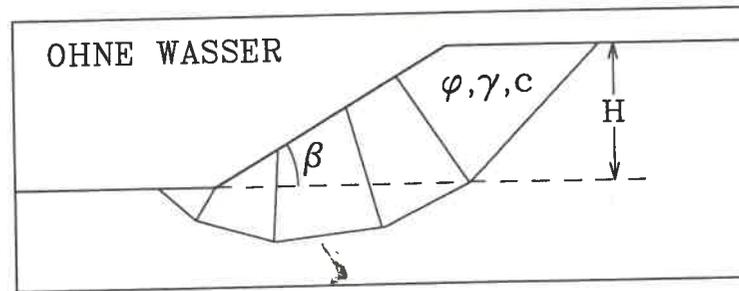


Bild 6.9: Vergleich von KEM mit der Taylor-Tafel aus TAYLOR 48

## Kapitel 7

### ANHANG

#### 7.1 Ergebnisse der Rechnungen in Tabellenform

Auf der folgenden Seite ist der Inhalt der Datei FILE TATET40 abgedruckt, welche die Ergebnisse bei einer Böschungsneigung von  $40^\circ$  in geordneter Form enthält. Der Datensatz wurde von dem Programm ODTIN in dieser Form abgespeichert, wobei in der Zeile ohne Stern die wichtigsten Eingaben, und in der Zeile mit Stern die wichtigsten Ausgabewerte stehen<sup>1</sup>.

Alle in dieser Arbeit aufgeführten Diagramme wurden in der abgedruckten Form von den Programmen PLODIA und PABLO und dem Grafik-Paket PICASSO auf dem Versatec-Erosionsrasterplotter am Rechenzentrum der Universität Stuttgart erzeugt. Die beiden Plotprogramme lesen dazu alle Sternzeilen unabhängig von ihrer Anzahl im Format (2X,3F12.5) ein.

Alle zu diesen Rechenwerten gehörigen Endgeometrien befinden sich in gleicher Reihenfolge ebenfalls im Anhang.

<sup>1</sup> Der Stern kennzeichnet somit alle in den Diagrammen berücksichtigten Werte, da nur die Sternzeilen von den Plotprogrammen gelesen werden.

- JELINEK 43 Jelinek, R., *Grenzzustände des Gleichgewichts und Gleitlinienfelder in einer kohärenten, mit Reibung ausgestatteten schweren Masse, die einen Raum unterhalb einer unbegrenzten Böschung ausfüllt*, Dissertation, TH Wien (1943)
- MORGENSTERN /PRICE 65 Morgenstern, N. R./Price, V. E., *The analysis of the stability of general slip surfaces*, Géotechnique 15 (1965), pp. 70-93
- OCHMANN 87 Ochmann, H., *Beschreibung des Eingabe-Files des Programms KEM*, (nicht veröffentlicht)
- SCHWEFEL 77 Schwefel, H.P., *Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie*, Birkhäuser Verlag Basel 1977 ISBN 3-7643-0876-1
- SMOLTZYK 83 Smoltczyk, U., *Studienunterlagen Grundbau und Bodenmechanik*, (1983) Eigenverlag Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Stuttgart (Bild E6.16 Taylor-Tafel, S.196 Tafeln von Bishop/Morgenstern (1960), mit und ohne Wasser)
- SPENCER 73 Spencer, E., *Thrust line criterion on embankment stability analysis*, Géotechnique 23 (1973), pp. 85-100
- TAYLOR 48 Taylor, D. W., *Fundamentals of Soilmechanics*, (1948) J. Wiley & Sons Inc. New York London Sidney
- TOMPOULIDIS 83 Tompoulidis, H., *Bemessungsdiagramme für Böschungen*, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Diplomarbeit Nr.121, Stuttgart 1981, Allgemeines Lamellenverfahren nach GUSSMANN 78

## Bibilographie

- MC. CARTHY 78 Mc. Carthy, D. F., *Essentials of Soilmechanics*, Reston Publishing Company Inc., Virginia, Chapter 15 enthält Cousins Charts (1978) und Morgenstern Charts for rapid Drawdown (1963), ISBN 0-8359-1781-9
- FRANKE 69 Franke, D., *Beitrag zum Problem der Gleitflächenform beim Bruch homogener Böschungen*, Dissertation, Bergakademie Freiberg (1969)
- GUSSMANN 78 Gußmann, P., *Das allgemeine Lamellenverfahren unter besonderer Berücksichtigung der äußeren Kräfte*, Geotechnik 1, Seite 68-74
- GUSSMANN 86 Gußmann, P., *Die Methode der kinematischen Elemente*, Mitteilungen des Baugrundinstituts Stuttgart Nr.25, im Eigenverlag 1986, ISBN 3-921837-25-1
- GUSSMANN 86 Gußmann, P., Anlagen 1 & 2 der *Übungsunterlagen Ü.B4*, Eigenverlag Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Stuttgart, (Stand sicherheitsdiagramm für homogene Böschungen nach dem Lamellenverfahren von Krey/Bishop)
- HOEK 77 Hoek, E./Bray, J., *Rock Slope Engineering*, The Institut of Mining and Metallurgy, London 1977, enthält die Circular Failure Charts, ISBN 0-900488-36-0
- JANBU 54 Janbu, N., *Stability Analysis of Slopes with Dimensionless Parameters*, Promotion, Cambridge Massachusetts 1954

=====

ERGEBNISSE DER BERECHNUNGEN VON HOMOGENEN BÖSCHUNGEN MIT KEM  
BÖSCHUNGSNEIGUNG = 40 GRAD

=====

	( NICHT MIT KEM GERECHNET )					
*	0.00000	0.83910	0.00000	15.0000	1.0000	0.0000
	55.0000	40.0000	5.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.00298	0.74879	0.00397	1.90724	1.00000	0.00000
	55.0000	40.0000	10.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.00560	0.70406	0.00795	2.02839	1.00000	0.00000
	55.0000	40.0000	20.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.01022	0.64269	0.01590	2.22210	0.99995	-0.00005
	55.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.01428	0.59891	0.02384	2.38452	1.00000	0.00000
	55.0000	40.0000	35.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.01615	0.58067	0.02782	2.45941	1.00000	0.00000
	55.0000	40.0000	40.0000	15.0000	1.0000	0.0000
	0.01794	0.56418	0.03179	2.53131	1.00000	0.00000
	53.0000	40.0000	40.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.01898	0.55477	0.03421	2.39201	0.99999	-0.00001
	51.0000	40.0000	40.0000	15.0000	1.0000	0.0000
	0.02004	0.54518	0.03677	2.26505	1.00000	0.00000
	50.0000	40.0000	40.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.02061	0.54090	0.03810	2.20322	1.00000	0.00000
	40.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
	0.02160	0.53216	0.04058	1.57675	0.99996	-0.00004
	45.0000	40.0000	40.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.02349	0.51738	0.04540	1.93277	0.99998	-0.00002
	35.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
	0.02469	0.50780	0.04863	1.37888	1.00000	0.00001
	30.0000	40.0000	25.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.02488	0.50628	0.04915	1.14037	1.00000	0.00002
	25.0000	40.0000	25.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.02899	0.47635	0.06085	0.97891	1.00000	0.00000
	20.0000	40.0000	25.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.03433	0.44038	0.07796	0.82648	1.00000	0.00000
	15.0000	40.0000	25.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.04187	0.39542	0.10590	0.67762	1.00000	0.00001
	10.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.05927	0.30691	0.19311	0.57452	1.00654	0.00001
	7.5000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.06866	0.26546	0.25864	0.49593	1.01409	0.00000
	5.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.08242	0.21177	0.38920	0.41313	1.02458	0.00009
	2.5000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.10533	0.13506	0.77988	0.32326	1.05219	-0.00001
	2.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.11193	0.11479	0.97508	0.30421	1.05739	0.00008
	1.5000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000
*	0.11990	0.09221	1.30033	0.28399	1.06443	0.00002
	1.0000	40.0000	30.0000	15.0000	1.0000	0.0000

## 7.1. ERGEBNISSE DER RECHNUNGEN IN TABELLENFORM

*	0.13013	0.06671	1.95075	0.26166	1.10309	0.00000
	1.0000	40.0000	30.0000	10.0000	1.0000	0.0000
*	0.14124	0.04827	2.92612	0.36162	1.41787	0.43618
	1.0000	40.0000	30.0000	5.0000	1.0000	0.0000
*	0.15501	0.02649	5.85225	0.65899	1.71024	0.75656
	1.0000	40.0000	30.0000	2.5000	1.0000	0.0000
*	0.16532	0.01412	11.70450	1.23581	2.12181	1.27112
-----						
	PHI	TETA	COHAESION	GAMMA	GAMG/GAM	HWAS/HOEH
	1/N	TANPHI/F	1/LAMDA	SICHERHEIT	DBRTIEF	DFUPU
-----						

## Dabei bedeuten:

- GAMG/GAM : Verhältnis  $\gamma_{feucht}/\gamma_{trocken}$  ;  
muß in den Berechnungen also immer 1.0 sein, sonst wurde  
versehentlich nur einer der beiden Eingabewerte geändert.
- HWAS/HOEH : Verhältnis von größter Wasserspiegeldifferenz zur Bösch-  
ungshöhe, wird zu 0 gesetzt, falls kein Wasser vorhanden.
- DBRTIEF : Verhältnis der Bruchkrestiefe zur Böschungshöhe:  
DBRTIEF= 1 Bruch durch den Böschungsfuß  
DBRTIEF > 1 Bruchsohle tiefer als Böschungsfuß  
DBRTIEF < 1 Bruchpolygon tritt im Hang aus
- DFUPU : Horizontaler Abstand des ersten Bruchpolygonpunktes  
vom Böschungsfußpunkt, bezogen auf die horizontale  
Böschungslänge:  
DFUPU= 0 Bruch durch den Böschungsfuß  
DFUPU > 0 Bruchpolygon tritt vor dem Böschungsfuß aus  
DFUPU < 0 Bruchpolygon tritt im Hang aus

## 7.2 Zugehörige Endgeometrien

Die zu der Ergebnistabelle gehörenden Geometrien werden im folgenden in der Form wiedergegeben, wie sie von dem Programm OUTIN in der Datei FILE GEO. abgespeichert wurden<sup>2</sup>.

Während der Ausarbeitung konnte auf die einzelnen Geometrien zurückgegriffen werden, um sie in die Eingabedatei zu laden, oder als Endgeometrie plotten zu lassen<sup>3</sup>.

Dadurch war es möglich einzelne Kurvenpunkte der Standsicherheitstafel zu einem späteren Zeitpunkt mit einem Restart zu verbessern, falls ein Knick in der Auftragung auf eine unzureichende Iterationszahl deutete.

### Es bedeuten:

**BLOCKID** : Kennzeichnung, welche den Bezug zu den Ergebnistabellen in Anlage D herstellt. Die Werte von PHI, TETA, COHAESION und GAMMA wendensind der zugehörigen Endgeometrie vorangestellt (Format 4I5)).

**KN-NR** : Nummer des Elementknotens entsprechend Bild 1.1.

**X-KOOR** : X-Koordinate dieses Punktes

**Y-KOOR** : Y-Koordinate dieses Punktes

**IFREI** : Kennzahl, welche die Beweglichkeit dieses Punktes festlegt:

- 1 = Nur die X-Koordinate wird variiert
- 2 = Punkt wird beliebig in X und Y -Richtung variiert
- 3 = Punkt bleibt auf einem gegebenen Polygonzug
- 4 = Oberflächenpunkt

<sup>2</sup> Um Platz zu sparen ist der Ausdruck zweispaltig. Außerdem wurden die Daten für die Oberfläche jeweils gelöscht, wenn sie sich gegenüber der vorangegangenen Rechnung nicht geändert haben.

<sup>3</sup> Dazu muß lediglich in der Eingabedatei die BLOCKID der gewünschten Geometrie eingegeben werden.

=====				6	68.65054	40.92178	2
Ergebnisse der Berechnungen von				7	68.09280	51.96365	4
homogenen Boeschungen mit KEM				8	90.22968	59.71632	2
Boeschungsneigung = 40 Grad				9	87.90012	68.58397	4
BLOCKID: PHI,TETA,COH,-GAMMA				10	104.94234	78.73697	4
=====				-----			
1 XP ZP = -60.00000 20.00000				BLOCKID			
2 XP ZP = 30.00000 20.00000				55 40 30 -15			
3 XP ZP = 100.00000 78.73697				ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
4 XP ZP = 250.00000 78.73697				KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI			
-----				1 29.99997 20.00000 4			
BLOCKID				2 38.62357 22.19353 2			
55 40 5 -15				3 39.64680 28.09462 4			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE				4 55.39072 30.55716 2			
KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI				5 55.57050 41.45621 4			
1 30.00014 20.00012 4				6 70.50748 40.64973 2			
2 37.02293 23.09956 2				7 68.99422 52.72003 4			
3 37.47922 26.27580 4				8 91.20351 58.64040 2			
4 52.29388 32.88684 2				9 88.11357 68.76308 4			
5 52.33397 38.74043 4				10 106.45715 78.73697 4			
6 69.11700 45.71846 2				-----			
7 68.74384 52.50993 4				BLOCKID			
8 89.06442 63.54462 2				55 40 35 -15			
9 88.25455 68.88136 4				ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
10 101.95583 78.73697 4				KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI			
-----				1 30.00015 20.00012 4			
BLOCKID				2 40.28577 22.71368 2			
55 40 10 -15				3 41.27589 29.46159 4			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE				4 56.21005 30.63390 2			
KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI				5 56.14388 41.93732 4			
1 30.00008 20.00008 4				6 71.31853 40.64018 2			
2 37.90634 23.02728 2				7 69.53519 53.17395 4			
3 38.50887 27.13979 4				8 92.71666 59.35545 2			
4 53.78133 32.48946 2				9 89.25552 69.72128 4			
5 53.87491 40.03343 4				10 107.15945 78.73697 4			
6 68.66721 43.36565 2				-----			
7 68.12013 51.98660 4				BLOCKID			
8 90.72264 63.11586 2				55 40 35 -15			
9 89.40758 69.84888 4				ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
10 102.95676 78.73697 4				KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI			
-----				1 30.00003 20.00003 4			
BLOCKID				2 40.87309 22.76237 2			
55 40 20 -15				3 41.83270 29.92882 4			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE				4 56.97517 30.58910 2			
KN-NR X-KOOR Z-KOOR IFREI				5 56.66901 42.37794 4			
1 30.00319 20.00269 4				6 71.72589 40.24335 2			
2 37.78796 22.21904 2				7 69.95782 53.52859 4			
3 38.47701 27.11305 4				8 93.06499 58.89764 2			
4 53.94479 30.78394 2				9 89.15108 69.63364 4			
5 53.41280 39.64566 4				10 107.52386 78.73697 4			

BLOCKID			
53 40 40 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00061	20.00050	4
2	42.06668	23.09349	2
3	42.67839	30.63843	4
4	55.96332	29.88882	2
5	55.68533	41.55257	4
6	72.24919	40.39793	2
7	70.47784	53.96494	4
8	94.37518	59.99727	2
9	90.52255	70.78445	4
10	107.71243	78.73697	4

BLOCKID			
51 40 40 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00012	20.00011	4
2	39.31451	21.95589	2
3	39.67734	28.12025	4
4	54.98782	28.86343	2
5	55.01138	40.98705	4
6	71.47134	39.19981	2
7	68.66354	52.44257	4
8	93.35735	57.75722	2
9	90.16103	70.48109	4
10	108.61337	78.73697	4

BLOCKID			
50 40 40 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00032	20.00027	4
2	41.05086	22.55904	2
3	41.93140	30.01163	4
4	54.02385	28.36848	2
5	54.09666	40.21950	4
6	71.21957	38.97101	2
7	68.98160	52.70944	4
8	93.18420	57.57185	2
9	89.02652	69.52913	4
10	108.80074	78.73697	4

BLOCKID			
40 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99857	20.00000	4
2	41.04688	22.11218	2
3	42.14354	30.18964	4
4	52.84285	26.91664	2
5	52.38165	38.78044	4

1	30.00291	20.00244	4
2	43.73318	23.51161	2
3	44.73540	32.36446	4
4	53.95244	28.06868	2
5	53.45602	39.68193	4
6	71.75525	39.03128	2
7	69.50746	53.15070	4
8	94.17905	58.34410	2
9	89.57040	69.98550	4
10	109.00928	78.73697	4

BLOCKID			
45 40 40 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00122	20.00104	4
2	42.06436	22.68028	2
3	42.90559	30.82909	4
4	54.33035	27.96704	2
5	54.25984	40.35641	4
6	71.84496	38.53889	2
7	69.26793	52.94971	4
8	94.04553	57.50925	2
9	89.30759	69.76498	4
10	109.27258	78.73697	4

BLOCKID			
35 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99965	20.00000	4
2	42.00369	22.44826	2
3	43.14415	31.02925	4
4	53.38795	27.19611	2
5	53.16458	39.43739	4
6	69.72369	36.62317	2
7	67.81964	51.73444	4
8	92.52177	55.16512	2
9	87.62575	68.35374	4
10	110.61235	78.73697	4

BLOCKID			
30 40 25 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99857	20.00000	4
2	41.04688	22.11218	2
3	42.14354	30.18964	4
4	52.84285	26.91664	2
5	52.38165	38.78044	4

6	68.29054	35.66769	2
7	65.82899	50.06410	4
8	92.01399	54.59016	2
9	87.15979	67.96275	4
10	110.61374	78.73697	4

BLOCKID			
25 40 25 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99991	20.00000	4
2	41.47092	21.84377	2
3	42.48650	30.47742	4
4	52.91653	26.14178	2
5	52.41644	38.80963	4
6	69.45657	35.09370	2
7	66.64957	50.75262	4
8	92.61063	53.54935	2
9	87.19594	67.99309	4
10	112.12471	78.73697	4

BLOCKID			
20 40 25 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99998	20.00000	4
2	40.57906	21.20065	2
3	41.31816	29.49706	4
4	52.89445	25.26701	2
5	52.33470	38.74104	4
6	71.63274	34.81004	2
7	68.25291	52.09801	4
8	94.44093	52.49522	2
9	88.64890	69.21227	4
10	115.06239	78.73697	4

BLOCKID			
15 40 25 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99953	20.00000	4
2	40.97208	20.81339	2
3	42.07893	30.13544	4
4	54.72713	24.99127	2
5	53.67242	39.86353	4
6	74.31776	34.98904	2
7	69.95828	53.52899	4
8	93.20482	49.42265	2
9	85.18826	66.30846	4
10	117.12668	78.73697	4

BLOCKID			
10 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99918	20.00000	4
2	39.24831	19.61562	2
3	40.10030	28.47516	4
4	54.73734	22.70049	2
5	53.25504	39.51329	4
6	76.49529	32.18697	2
7	69.97615	53.54398	4
8	97.84563	47.77402	2
9	86.57634	67.47319	4
10	122.63353	78.73697	4

BLOCKID			
8 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00027	20.00023	4
2	39.19502	19.17224	2
3	40.22949	28.58356	4
4	57.00508	22.23047	2
5	54.97070	40.95291	4
6	75.93311	29.96329	2
7	69.50278	53.14676	4
8	95.85210	43.31058	2
9	83.51974	64.90839	4
10	125.84251	78.73697	4

BLOCKID			
5 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99399	20.00000	4
2	40.97267	18.55627	2
3	42.15181	30.19658	4
4	56.20338	20.05219	2
5	53.76096	39.93781	4
6	75.91159	26.91370	2
7	68.02699	51.90845	4
8	101.29343	43.61790	2
9	86.35077	67.28391	4
10	130.39925	78.73697	4

BLOCKID			
3 40 30 -15			
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99857	20.00000	4
2	41.04688	22.11218	2
3	42.14354	30.18964	4
4	52.84285	26.91664	2
5	52.38165	38.78044	4

1	30.00092	20.00076	4
2	44.16022	16.93446	2
3	44.16533	31.88612	4
4	57.52524	17.30894	2
5	53.71127	39.89613	4
6	85.52940	25.98880	2
7	72.18234	55.39519	4
8	107.72176	41.07713	2
9	87.27846	68.06233	4
10	138.99509	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
2	40	30	-15
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	30.00146	20.00124	4
2	44.11890	16.25230	2
3	43.65862	31.46095	4
4	59.58269	16.67363	2
5	54.61530	40.65468	4
6	86.92238	25.18599	2
7	72.49200	55.65503	4
8	110.11617	41.72266	2
9	87.01369	67.84015	4
10	138.99635	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
2	40	30	-15
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99870	20.00000	4
2	38.91901	17.10529	2
3	39.30275	27.80594	4
4	60.14429	16.21565	2
5	55.23853	41.17763	4
6	86.64693	24.10706	2
7	72.16544	55.38100	4
8	112.87292	42.28821	2
9	87.81525	68.51274	4
10	143.47385	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
1	40	30	-15
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	29.99998	20.00000	4
2	43.60114	15.12617	2
3	43.38908	31.23479	4
4	62.52267	13.94456	2
5	56.38196	42.13708	4
-----			
6	90.32520	20.94160	2
7	72.65746	55.79385	4
8	111.80759	33.91521	2
9	84.66737	65.87137	4
10	153.07132	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
1	40	30	-10
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	-0.53255	20.00000	4
2	19.18504	2.19021	2
3	30.00024	20.00020	4
4	41.11131	-4.54467	2
5	44.21333	31.92641	4
6	75.93980	-3.54956	2
7	62.58781	47.34444	4
8	116.27505	13.60424	2
9	81.38596	63.11794	4
10	181.09225	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
1	40	30	-5
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	-22.95898	20.00000	4
2	12.00354	-12.03091	2
3	29.99995	20.00000	4
4	48.11458	-21.71745	2
5	49.27008	36.16951	4
6	86.51648	-18.22029	2
7	65.23105	49.56236	4
8	127.24611	0.47042	2
9	81.71777	63.39636	4
10	205.16061	78.73697	4
-----			
BLOCKID			
1	40	30	-3
ENDGUELTIGE GEOMETRIE			
KN-NR	X-KOOR	Z-KOOR	IFREI
1	-58.97870	20.00000	4
2	-2.65190	-33.29437	2
3	30.00008	20.00008	4
4	32.67651	-45.89175	2
5	43.17827	31.05788	4
6	88.03850	-45.25349	2
7	63.78557	48.34946	4
8	140.92477	-23.36032	2
9	80.63284	62.48599	4
10	244.27979	78.73697	4

## Bildverzeichnis

1.1	KEM-Plotausgabe mit verwendeter Numerierung . . .	10
2.1	Untersuchung der Normierung . . . . .	13
2.2	Verhalten in der Anlaufphase der Iteration . . . . .	16
2.3	Iterationsverhalten in der Nähe der Bruchgeometrie .	18
2.4	Gleichgewicht am obersten Element . . . . .	22
2.5	Zugseilanalogie, graphische Lösung . . . . .	24
2.6	Schnittmuster der Trennflächen, Winkelhalbierenden .	25
3.1	Verdopplung der Elemente durch Streckenhalbierung	31
3.2	Zurücksetzen inaktiver Elementtrennflächen . . . . .	32
4.1	Alle berechneten Punkte im CFC-Diagramm . . . . .	36
4.2	Endgeometrien am Beispiel einer flachen Böschung .	38
4.3	Bruchformen steiler Böschungen . . . . .	40
4.4	Standsicherheitsdiagramm mit Linien $1/\lambda = const.$ .	41
4.5	Zonen qualitativ gleicher Bruchformen . . . . .	43
5.1	Vergleich von KEM mit dem allgemeinen Lamellen- verfahren . . . . .	47
6.9	Vergleich von KEM mit der Taylor-Tafel . . . . .	66
5.2	Vergleich von KEM mit den Ergebnissen von Cousins	49
5.3	Vergleich von KEM mit dem Verfahren nach Krey/Bishop . . . . .	51
5.4	Vergleich von KEM mit den Circular Failure Charts .	53
5.5	Vergleich einer flachen Böschung mit und ohne Zugriß	54
5.6	Verschiedene Zugrißlagen der Circular Failure Charts	55
5.7	Möglichkeiten KEM mit Zugrissen zu rechnen . . . . .	56
6.1	Einfluß der Wichte auf die Bruchform bei Grundwasser	58
6.2	Kontrolldiagramm nach der Berechnung mit Wasser .	59
6.3	Endgeometrien im Verlauf der Rechnung mit Wasser	60
6.4	Standsicherheit für verschiedenen Wichten und Wasser	61
6.5	Vergleich von Endgeometrien mit und ohne Wasser .	62
6.6	Eintritt des Bruchpolygons im Hang . . . . .	63
6.7	Standsicherheitstafel mit Wasser ( $H_w/H = 0.5$ ) . .	64
6.8	Standsicherheitstafel ohne Wasser . . . . .	65

## Teil B

# KEM - Nachweise im Grundbau<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Schlußbericht zum Forschungsvorhaben des Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau am Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart

## Bezeichnungen und Dimensionen

$A$	$[m^2]$	Fläche
$A$	$[kNm]$	kinetische Arbeit/Energie
$\hat{A}$	$[kNm]$	äußere Arbeit des bewegten Randelements
$c, d, e, f$		Elementnummern
$c$	$[kN/m^2]$	Kohäsion
$D$	$[kNm]$	Dissipation in den Fugen
$E_a$	$[kN/m]$	aktiver Erddruck
$E_{ah}$	$[kN/m]$	horizontaler aktiver Erddruck
$e_{ah}$	$[kN/m^2]$	horizontale Erddruckspannung
$f$	$[kN/m]$	Zielfunktion
$F$		Lastvektor
$G$	$[kN/m^3]$	Gewicht des Erdkörpers
$g_i$	$[1]$	Gradient
$H$	$[m]$	Wandhöhe
$k$		Reibungsmatrix im Element
$K$		Matrix für Gesamtstruktur, Reibungsmatrix in der Statik, Reibungscosinus in der Kinematik
$K_a$	$[1]$	aktiver Erddruckbeiwert
$K_{ah}$	$[1]$	horizontaler aktiver Erddruckbeiwert
$l$	$[m]$	Länge
$l_c$	$[m]$	Gleitfugenlänge
$m$	$[-]$	Anzahl der Elemente
$n$	$[-]$	Anzahl der Unbekannten in der Kinematik bzw. in der Statik
$N$	$[kN/m]$	Normalkomponente von $S$
$N'$	$[kN/m]$	effektive Normalkraftkomponente
$N$	$[kN/m]$	Normalkraft auf die Elementseite
$P$	$[kN/m]$	eingeprägte Kraft
$q$	$[-]$	Kräfte $Q_i$ pro Element
$Q$	$[kN/m]$	Resultierende von $N'$ und $R$ , Hauptunbekannte in der Statik

$Q$		Vektor der unbekanntten Kräfte $Q_i$ pro Struktur
$R$	$[kN/m]$	Reibungskraft
$S$	$[kN/m]$	resultierende Kraft auf die Elementseite
$T$	$[kN/m]$	Tangentialkomponente von $S$
$U$	$[kN/m]$	Wasserdruckkraft auf die Elementseite
$\hat{v}$	$[-]$	Verschiebung (virtuell)
$v$		Vektor der unbekanntten Verschiebungen
$\hat{v}$	$[-]$	vorgegebene Randverschiebung
$v$		Vektor der bekannten Randverschiebungen
$x, z$	$[-]$	kartesische Koordinaten, Komponenten
$S$		Seite, Kante
$u$	$[kN/m^2]$	Porenwasserdruck (Spannung)
$\alpha$	$[^\circ]$	Neigung einer Strecke gegen $+x$ -Achse
$\alpha$	$[^\circ]$	Wandneigungswinkel
$\beta$	$[^\circ]$	Böschungswinkel
$\gamma$	$[kN/m^3]$	Bodeneigengewicht
$\delta$	$[^\circ]$	Wandreibungswinkel
$\bar{\delta}$	$[-]$	Richtungsvorzeichen
$\lambda$	$[1]$	dimensionslose Variable
$\varphi$	$[^\circ]$	Reibungswinkel
$\sigma$	$[kN/m^2]$	Normalspannung
$\sigma'$	$[kN/m^2]$	effektive Normalspannung
$\tau$	$[kN/m^2]$	Schubspannung
<b>Indices:</b>		
$e/f$		zwischen Element $e$ und $f$
$f$		bezogen auf Element $f$
$h, i, j, k$		Knotennummern
$i, j$		zwischen Knoten $i, j$
$s$		Kantenummer
$v$		bezogen auf Kinematik
$N$		normal
$T$		tangential

## Kapitel 1

### Einführung, Ziel des Forschungsauftrages

Ausgangspunkt für den ersten Teil des vorliegenden Forschungsauftrages sind die von SCHWEIKERT 84 durchgeführten Untersuchungen bezüglich des Einflusses des Böschungswinkels  $\beta$  auf die Berechnung des aktiven Erddruckes. Die durchgeführten Berechnungen zeigten die guten Anwendungsmöglichkeiten der Kinematische-Elemente-Methode, auch im Vergleich mit anderen (theoretischen und experimentellen) Lösungen auf.

Bei der hier vorliegenden Weiterführung dieser Untersuchungen wird der Parameterbereich bezüglich der Scherfestigkeit des Bodens  $\varphi$  ergänzt und eine Variation der Wandneigung  $\alpha$  bzw. des Wandreibungswinkels  $\delta$  durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Form von Diagrammen zur einfachen Bemessung von Stützbauwerken aufbereitet. Dadurch ist eine genauere Erfassung des maßgebenden Bruchverhaltens des Erdkörpers möglich.

Entsprechend dem in DIN 4017 geregelten Nachweis der Grundbruchsicherheit wird das Flachfundament unter Horizontal- und Vertikalbelastung exemplarisch untersucht. Mittels der KEM werden dabei sowohl die Tragfähigkeitsbeiwerte  $N_b$  und  $N_c$  als auch die Lastneigungsbeiwerte  $\kappa_b$  und  $\kappa_c$  für ausgewählte Böden berechnet. Ziel ist dabei eine Bewertung der in der DIN 4017 festgelegten Werte.

#### 1.1 Die Methode der kinematischen Elemente

Das im folgenden dargestellte und von GUSSMANN 82, GUSSMANN 86 entwickelte Verfahren zur Berechnung von Bruchzuständen wird, in Anleh-

nung an die Finite-Elemente-Methode, als Kinematische-Elemente-Methode (KEM) bezeichnet. Die Darstellung folgt im wesentlichen der Formulierung gemäß GUSSMANN 88; sie ist zur Einführung in die Problematik gedacht und deswegen ziemlich vollständig wiedergegeben.

Das Kontinuum wird dabei diskretisiert durch endliche, aber kinematisch verschiebliche Bruchkörper: die Elemente. Die Unterteilung kann prinzipiell beliebig fein durchgeführt werden. Die Elemente selbst werden als starr betrachtet.

In den Begrenzungen der Elemente gegeneinander bzw. nach außen soll die Coulombsche Bruchbedingung

$$\tau = (\sigma_n \cdot u) \tan \varphi + c \quad (1.1)$$

mit den Stoffparametern Reibungswinkel  $\varphi$  und Kohäsion  $c$  gelten.

Die Gesamtheit der kinematischen Elemente eines Problems wird als Bruchmechanismus bezeichnet; er muß die jeweiligen geometrischen Randbedingungen befriedigen.

Als Elementformen werden ausschließlich durch Geraden begrenzte Elemente betrachtet.

Auf die Elemente wirken eingeprägte Kräfte (wie Eigengewicht und quasistatische Erdbebenkräfte) und äußere Kräfte einschließlich Wasserdruck.

Die Berechnung folgt dem Rechenschema:

- Entwicklung bzw. Wahl eines geeigneten Bruchmechanismus'
- Beschreibung der Geometrie einschließlich geometrischer und bodenmechanischer Zuordnung
- Ermittlung der Kinematik für vorgegebene virtuelle Randverschiebungen durch Lösen eines linearen Gleichungssystems
- Ermittlung der Statik durch Lösen eines unabhängigen, aber von den Verschiebungsrichtungen abhängigen, linearen Gleichungssystems
- Definition und Ermittlung einer geeigneten Zielfunktion (mehrere Alternativen)
- Optimierung der Ausgangsgeometrie im Hinblick auf die Zielfunktion.

Als Zielfunktion wird die virtuelle Arbeit der äußeren Kräfte am sogenannten „beweglichen Rand“ (für den die Bewegung auslösenden virtuellen Verschiebungen vorgegeben sind) definiert. Daraus abgeleitet können alternativ die

Traglast (z.B. Grundbruchlast oder Erddruck) bzw. die Sicherheit (bei Stand sicherheitsproblemen) als Zielfunktion gewählt werden.

Die abgeleiteten Zielfunktionen sind teilweise an gewisse einschränkende Voraussetzungen gebunden. Die maßgebende Zielfunktion ergibt sich durch Variation der Geometrie des betrachteten Bruchmechanismus bzw. übergeordnet aus dem ungünstigsten aller denkbaren und zulässigen Bruchmechanismen.

Während die Variation der geometrischen Parameter eines Bruchmechanismus durch Optimierungsprogramme gelöst werden kann, ist für die Variation der möglichen Bruchmechanismen nur eine Strategie anzugeben.

Da die KEM gemäß den Grenzwertsätzen der Plastizitätstheorie zu den Kinematischen Verfahren (oberes Schrankentheorem) gehört, ist einer „ausreichenden“ Variation besondere Beachtung beizumessen.

Die KEM kann verstanden werden als eine Erweiterung des allgemeinen Lamellenverfahrens von GUSSMANN 82 bzw. als eine analytische Weiterentwicklung der von GUDEHUS 72, GROSS 81 u.a. entwickelten Kinematischen Verfahren, die ihren gemeinsamen Ursprung in der Extremalmethode von COULOMB 1776 haben. Methodisch ist die KEM nach Gußmann jedoch eine eigenständige Entwicklung auf breiter Grundlage. Die Grenzen der zukünftigen Entwicklungsmöglichkeiten sind noch nicht abzuschätzen.

## 1.2 Geometrie

Die Geometrie eines beliebigen, durch Geraden begrenzten, ebenen Elements kann nach Einführung einer Zuordnungsvorschrift durch die Koordinaten seiner Eckpunkte beschrieben werden.

Als Grundlage der Eigengewichtsermittlung kann die Fläche  $A$  des Elements  $f$  nach Bild 1.1 gemäß

$$A = 1/2 \cdot \sum_i (x_i z_{i+1} - x_{i+1} z_i) \quad ; \quad P_{m+1} = P_1 \quad (1.2)$$

angegeben werden. Der Elementrand  $s$ , welcher entweder

- zwei benachbarte Elemente  $c$  und  $f$
- die unverschiebliche, starre Umgebung (Element 0) und Element  $f$
- das bewegliche Randelement  $f$  (Stützwand oder Fundament) und Element  $f$

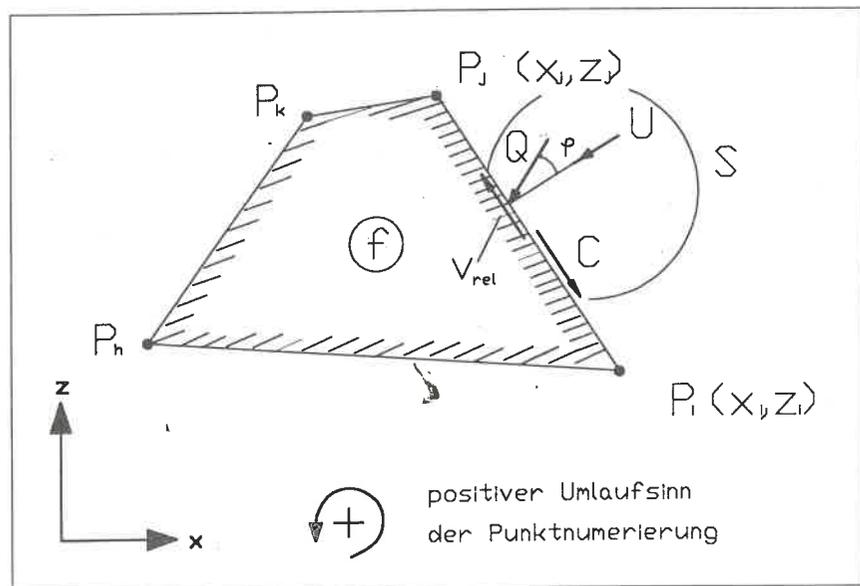


Bild 1.1: Kinematisches Element

- die „leere“ Umgebung (Luft) und Oberflächenelement  $f$

voneinander trennt, wird durch seine äußere Normale nach Bild 1.2 in seiner Ausrichtung definiert.

Zusammen mit den Abkürzungen

$$\begin{aligned} \alpha_{c/f} &= \alpha_s^f = \alpha_{i,j} & ; & & \gamma_{c/f} &= \gamma_s^f = \gamma_{i,j} \\ x_{i,j} &= x_j - x_i = -x_{j,i} & ; & & z_{i,j} &= z_j - z_i = -z_{j,i} \\ d_{i,j} &= \sqrt{x_{i,j}^2 + z_{i,j}^2} = d_{j,i} \end{aligned} \quad (1.3)$$

kann der Vektor der Normalen als Einheitsvektor durch seine Richtungskosinus zu den Koordinatenachsen mit

$$\begin{aligned} e_x &= l_{c/f} = \cos \alpha_{c/f} = z_{i,j}/d_{i,j} = -l_{f/c} \\ e_z &= n_{c/f} = \cos \gamma_{c/f} = -x_{i,j}/d_{i,j} = -n_{f/c} \\ l^2 + n^2 &= 1 \\ e_{c/f} &= \{l_{c/f}; n_{c/f}\} = -e_{f/c} \end{aligned} \quad (1.4)$$

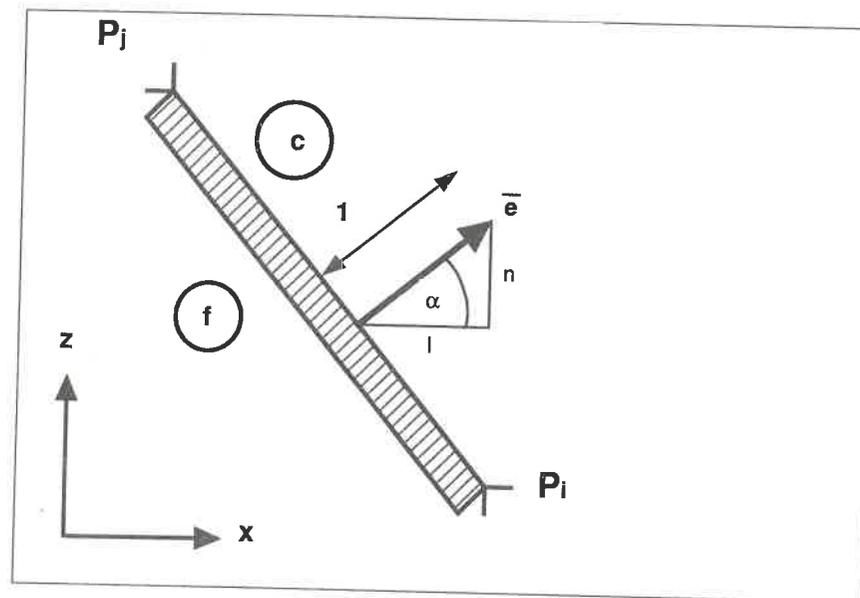


Bild 1.2: Elementrand und Normale

angegeben werden.

### 1.3 Bruchmechanismus und Kinematik

üblicherweise wird ein Bruchmechanismus im Boden durch

- Bruchlinien
- starre Bereiche
- elastische Bereiche
- plastische Bereiche
- elastoplastische Bereiche

beschrieben. Die KEM reduziert diese Idealisierungen auf starre Bereiche — die Elemente —, die durch Bruchgeraden voneinander getrennt sind.

Als Kinematik wird angenommen, daß sich die Elemente nur durch Gleiten in den geraden Bruchrändern nach Bild 1.3 verschieben können.

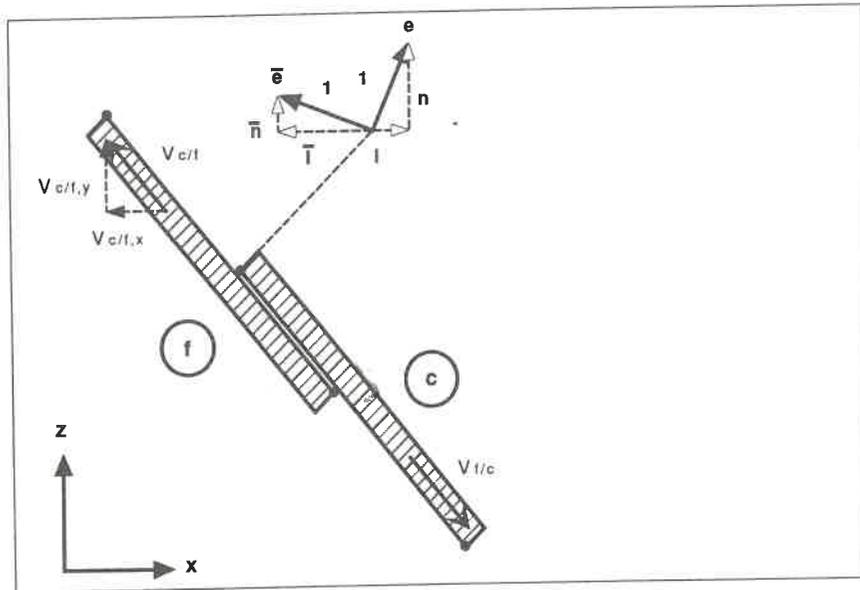


Bild 1.3: Relativverschiebung zweier Elemente (Gleiten)

Die kinematische Verträglichkeitsbedingung für eine zulässige Bewegung von zwei benachbarten Elementen  $c$  und  $f$  wird abgeleitet aus der Bedingung, daß die Normalkomponente des Vektors der Relativverschiebung verschwinden muß.

Mit den Abkürzungen

$$v_{c/f} = v^f - v^c \quad ; \quad v_{c/f,x} = v_x^f - v_x^c \quad ; \quad v_{c/f,z} = v_z^f - v_z^c \quad (1.5)$$

erhält man mit Bild 1.3 zunächst

$$v_{c/f,x} \cdot \cos \alpha_{c/f} + v_{c/f,z} \cdot \cos \gamma_{c/f} = 0$$

und nach Aufspaltung in die Absolutverschiebungskomponenten die erste Verträglichkeitsbedingung

$$l_{c/f} \cdot v_x^f + n_{c/f} \cdot v_z^f + l_{f/c} \cdot v_x^c + n_{f/c} \cdot v_z^c = 0 \quad (1.6)$$

Die Lage eines beliebigen Elements ist genau durch die Angabe der Lage von zwei nichtparallelen Rändern  $c/f$  und  $c/f$  eindeutig fixiert. Damit kann die

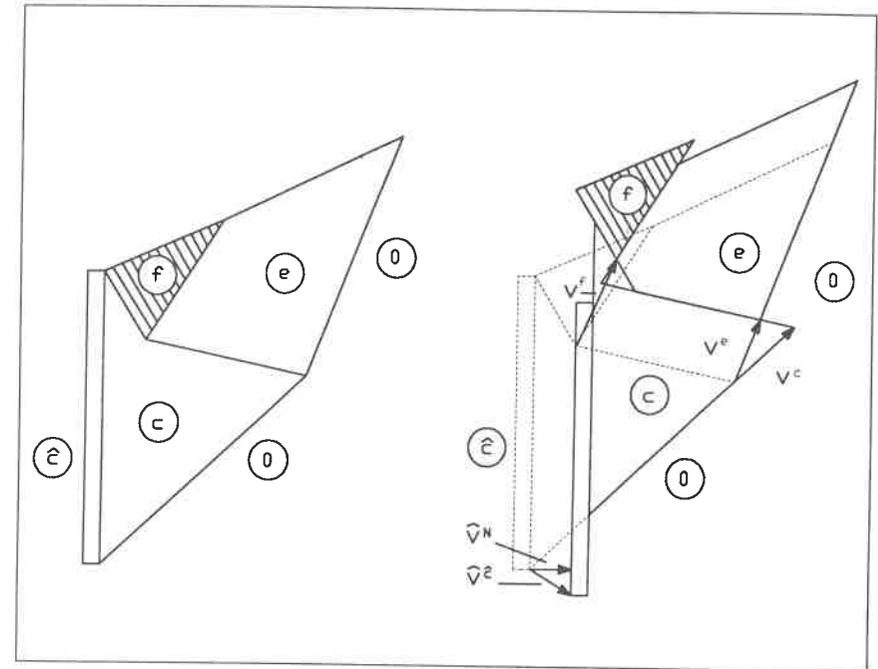


Bild 1.4: Kinematik

noch fehlende zweite Verträglichkeitsbedingung aus der Relativverschiebung im Rand  $c/f$  nach Bild 1.4 analog zu

$$l_{e/f} \cdot v_x^f + n_{e/f} \cdot v_z^f + l_{f/e} \cdot v_x^e + n_{f/e} \cdot v_z^e = 0 \quad (1.7)$$

angeschrieben werden.

Werden Klaffungen generell ausgeschlossen, so erhält man für einen aus  $m$  (Boden)- Elementen bestehenden Bruchmechanismus genau  $2 \cdot m$  Verträglichkeitsbedingungen für die  $2 \cdot m$  unbekanntes Absolutverschiebungskomponenten dieser Elemente.

Die Kinematik kann somit durch Lösen des linearen Gleichungssystems

$$K \cdot v + \hat{v}_N = 0 \quad (1.8)$$

gefunden werden, wenn die bruchauslösenden Verschiebungen  $\hat{v}$  der beweglichen Randelemente  $\hat{f}$  als bekannt vorausgesetzt werden.

In Glg. (1.8) bedeuten

$K$  die unsymmetrische „Kinematikmatrix“, welche die Richtungskosinus der Normalen der Elementränder enthält,

$v$  den Vektor der unbekanntesten Absolutverschiebungskomponenten der  $m$  Bodenelemente,

$\hat{v}_N^0$  die Normalkomponenten der umgebenden Elemente, die für die beweglichen Elemente  $\hat{f}$  vorzugeben sind, während sie sich für das unbewegliche Umgebungselement (Element 0) zu  $v_N^0 = 0$  ergeben.

Die Absolutverschiebungskomponenten  $v_x$  und  $v_z$  können entweder durch Lösen des unsymmetrischen Gleichungssystems (1.8) gefunden werden oder vorteilhafter, durch elementweises Lösen der jeweiligen Verträglichkeitsbedingungen (1.6, 1.7), sofern eine geeignete Numerierung eingehalten wird.

Aus den anschließend bekannten Absolutverschiebungen ergeben sich die Relativverschiebungen nach Glg. (1.5), wobei man für den Einheitsvektor der Relativverschiebungen die Komponenten

$$\begin{aligned} \bar{e}_x &= \bar{l}_{c/f} = \cos \alpha_{c/f} = \frac{v_{c/f,x}}{|v_{c/f}|} \\ \bar{e}_z &= \bar{n}_{c/f} = \cos \gamma_{c/f} = \frac{v_{c/f,z}}{|v_{c/f}|} \\ |v_{c/f}| &= \sqrt{v_{c/f,x}^2 + v_{c/f,z}^2} \end{aligned} \quad (1.9)$$

erhält.

Da die Einheitsvektoren  $e$  und  $\hat{e}$  gemäß Bild 1.3 senkrecht aufeinander stehen, erweist sich die Einführung eines Vorzeichens  $\delta$  im Zusammenhang mit der Vorzeichenregel

$$\begin{aligned} \delta_{c/f} &= \text{sign}(v_{c/f}) = \frac{v_{c/f}}{|v_{c/f}|} \\ \bar{l}_{c/f} &= -\delta_{c/f} \cdot n_{c/f} \quad ; \quad \bar{n}_{c/f} = \delta_{c/f} \cdot l_{c/f} \end{aligned} \quad (1.10)$$

nach Bild 1.5 als zweckmäßig. Daraus folgt bei Beachtung der Beziehungen nach Glg. (1.9) zunächst

$$\delta_{c/f} = \frac{-v_{c/f,x}}{|v_{c/f}| \cdot n_{c/f}} = \frac{v_{c/f,z}}{|v_{c/f}| \cdot l_{c/f}} \quad (1.11)$$

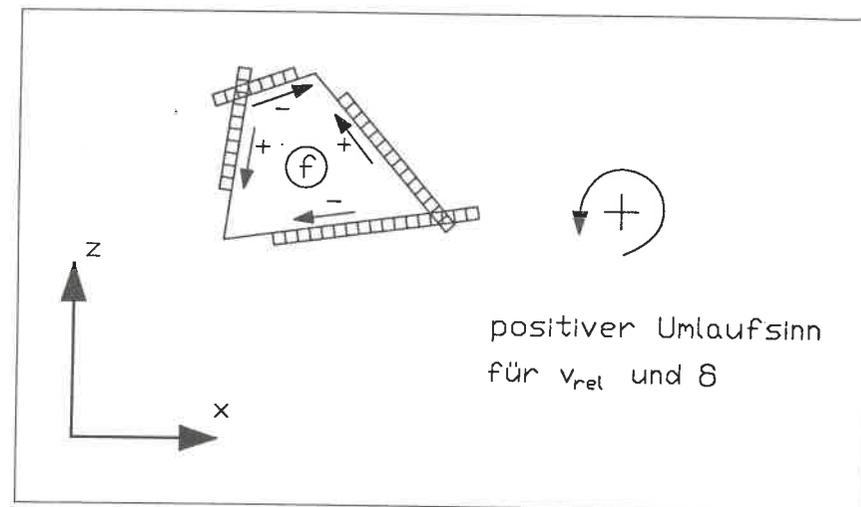


Bild 1.5: Vorzeichendefinition

Glg. (1.11) führt wegen der Division zu numerischen Schwierigkeiten, die durch die folgende Formulierung

$$\delta_{c/f} = \text{sign}(-n_{c/f} \cdot v_{c/f,x} + l_{c/f} \cdot v_{c/f,z}) \quad (1.12)$$

vermieden werden können.

### 1.4 Statik

Zur Lösung der Statik wird zunächst die auf einen Elementrand wirkende Einzelkraft  $S$  in ihre Normal- und Tangentialkomponenten zerlegt. Da die Normalkräfte  $N$  als Druckkräfte dem Normalenvektor  $e$  entgegengesetzt gerichtet sind, die Tangentialkräfte  $T$  als Scherkräfte dem Einheitsvektor  $\hat{e}$  der Relativverschiebungen entgegenwirken, können ihre kartesischen Komponenten sofort zu

$$\begin{aligned} N_x &= -l \cdot N \quad ; \quad T_x = -\bar{l} \cdot T \quad ; \quad S_x = N_x + T_x \\ N_z &= -n \cdot N \quad ; \quad T_z = -\bar{n} \cdot T \quad ; \quad S_z = N_z + T_z \end{aligned} \quad (1.13)$$

angegeben werden.

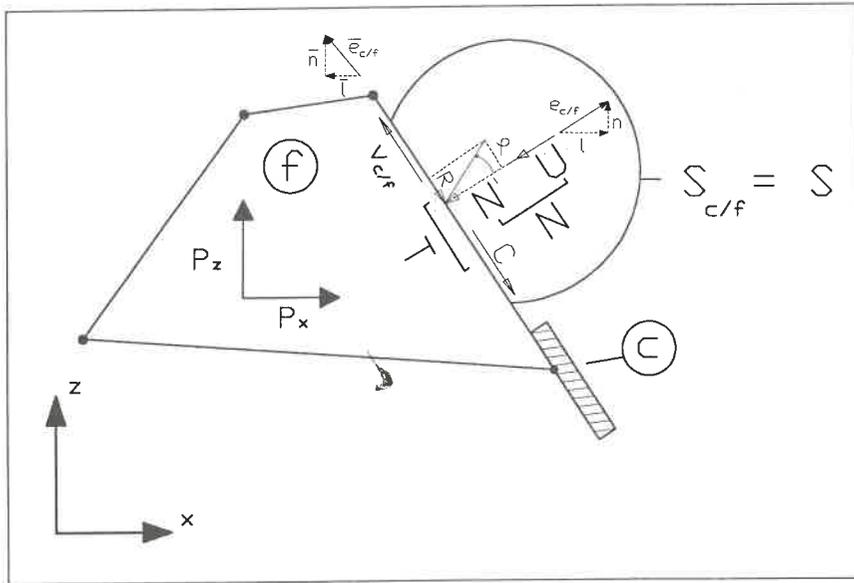


Bild 1.6: Statik

Nach Trennung dieser Komponenten in ihre physikalisch unterschiedlichen Anteile kann die Normalkraft in eine effektive Normalkraft  $N'$  und eine Porenwasserdruckkraft  $U$ , die Tangentialkraft in Reibung  $R$  und Kohäsion  $C$  aufgespalten werden, wobei man nach Übertragung der Coulomb'schen Bruchbedingung (1.1) auf Kräfte

$$\begin{aligned} N &= N' + U & ; & & T &= R + C \\ N' &= Q \cdot \cos \varphi & ; & & R &= Q \cdot \sin \varphi \\ C &= c \cdot d & ; & & U &= u \cdot d \end{aligned} \quad (1.14)$$

erhält. Unter  $Q$  wird die Resultierende aus  $N'$  und  $R$  gemäß Bild 1.6 verstanden. Für  $\varphi$ ,  $c$  und  $u$  sind hierbei konstante, ggfs. über die jeweilige Elementrandlänge  $d$  gemittelte Werte für den Reibungswinkel, die Kohäsion und den Porenwasserdruck einzusetzen.

Damit folgt aus den Glg. (1.13) und (1.14) für die kartesischen Komponenten der Randkraft  $S$

$$\begin{aligned} S_{c/f,x} &= - \{ (l_{c/f} \cdot \cos \varphi_{c/f} + \bar{l}_{c/f} \cdot \sin \varphi_{c/f}) \cdot Q_{c/f} \\ &\quad + \bar{l}_{c/f} \cdot C_{c/f} + l_{c/f} \cdot U_{c/f} \} \\ S_{c/f,x} &= - \{ (n_{c/f} \cdot \cos \varphi_{c/f} + \bar{n}_{c/f} \cdot \sin \varphi_{c/f}) \cdot Q_{c/f} \\ &\quad + \bar{n}_{c/f} \cdot C_{c/f} + l_{c/f} \cdot U_{c/f} \} \end{aligned} \quad (1.15)$$

bzw. alternativ unter Berücksichtigung des Vorzeichens  $\delta$

$$\begin{aligned} S_{c/f,x} &= - \{ (l_{c/f} \cdot \cos \varphi_{c/f} - \delta_{c/f} \cdot n_{c/f} \cdot \sin \varphi_{c/f}) \cdot Q_{c/f} \\ &\quad - \delta_{c/f} \cdot n_{c/f} \cdot C_{c/f} + l_{c/f} \cdot U_{c/f} \} \\ S_{c/f,x} &= - \{ (n_{c/f} \cdot \cos \varphi_{c/f} + \delta_{c/f} \cdot l_{c/f} \cdot \sin \varphi_{c/f}) \cdot Q_{c/f} \\ &\quad + \delta_{c/f} \cdot l_{c/f} \cdot C_{c/f} + n_{c/f} \cdot U_{c/f} \} \end{aligned}$$

Nach Einführung der Abkürzungen

$$\begin{aligned} \tilde{k}_{s,f}^x &= -(l_s^f \cos \varphi_s - \delta_s \cdot n_s^f \cdot \sin \varphi_s) \equiv -\tilde{l}_s^f \\ \tilde{k}_{s,f}^z &= -(n_s^f \cos \varphi_s + \delta_s \cdot l_s^f \cdot \sin \varphi_s) \equiv -\tilde{n}_s^f \\ F_{s,f}^x &= \delta_s \cdot n_s^f \cdot C_s^f - l_s^f \cdot U_s^f = C_x + U_x \\ F_{s,f}^z &= -\delta_s \cdot l_s^f \cdot C_s^f - n_s^f \cdot U_s^f = C_z + U_z \end{aligned} \quad (1.16)$$

erhält man die prägnantere Formulierung

$$\begin{aligned} S_{s,f}^x &= \tilde{k}_{s,x}^f \cdot Q_s + F_{s,x}^f \\ S_{s,f}^z &= \tilde{k}_{s,z}^f \cdot Q_s + F_{s,z}^f \end{aligned}$$

in der

$Q$  die noch unbekannte Kraft,

$F$  die bekannte Resultierende aus Kohäsion und Wasserdruck,

$\tilde{k}$  den Richtungsterm der Kraft  $Q$

darstellen.

Unter Einbeziehung der als bekannt vorausgesetzten, äußeren Kräfte  $P$ , die an einem Element angreifen und sich aus Eigengewicht, Oberflächenlast, Ankerkraft bzw. auch aus quasi-stationären Erdbebenkräften zusammensetzen, liefert die Gleichgewichtsbedingung pro Element genau zwei Gleichungen

$$\begin{aligned} P_x^f + \sum^i S_{s,x}^f &= 0 \\ P_z^f + \sum^i S_{s,z}^f &= 0 \end{aligned} \quad (1.17)$$

wobei die Summierung über die Elementränder geht.

Berücksichtigt man (1.15) in (1.17) und summiert über alle  $m$  Elemente, so ergibt sich für die Statik das unsymmetrische, lineare Gleichungssystem

$$\tilde{K} \cdot Q + \tilde{F} = 0 \quad (1.18)$$

das analog zur Kinematik gelöst werden kann, wobei

$\tilde{K}$  die „Reibungsmatrix“,

$Q$  den Vektor der unbekanntenen Kräfte,

$\tilde{F}$  den Lastvektor aus  $F$  (Kohäsion und Wasserdruck) und  $P$  (äußere Kräfte)

bezeichnen.

## Kapitel 2

### Zielfunktion und Optimierung

Die äußere Arbeit

$$\hat{E} = \hat{v}_s^t \cdot S \quad (2.1)$$

der Randelemente  $\hat{f}$  kann bei vielen Problemen als geeignete Zielfunktion  $f$  (zu unterscheiden von der bisher für ein beliebiges Element benutzten Nummernbezeichnung) angesehen werden, die minimiert werden muß durch Variation der Bruchmechanismen und der Bruchgeometrie. Eine äquivalente Formulierung ergibt sich nach Aufspaltung der inneren Arbeiten in Dissipation und kinetische Arbeit zu

$$\hat{E} = D - E = \hat{v}_s^t \cdot T_s - \hat{v}_f^t \cdot P_f \quad (2.2)$$

Bezeichnet man für einen bestimmten Bruchmechanismus mit  $X$  den Vektor der die Geometrie beschreibenden, variablen Größen (dies können entweder bestimmte Eckpunktskoordinaten oder aber auch sogenannte „EntwurfsvARIABLEN“ im Zusammenhang mit Netzgenerierungsfunktionen) sein, so lautet das zugehörige Optimierungsproblem

$$f = \hat{E} \quad ; \quad f_{min} = \hat{E}_{min}(X^*) \quad (2.3)$$

zusammen mit den Restriktionen

$$\begin{aligned} L_i &\geq 0 \\ A_j &> 0 \quad ; \quad j = 1(1)m \\ Q_j &\geq 0 \quad ; \quad j = 1(1)2m \end{aligned} \quad (2.4)$$

$X^*$  enthält die Optimierungsvariablen beim gesuchten Minimum,

$L_i$  steht für lineare Geometrie-Restriktionen, z.B. starre Betongrenzen,

$A_j$  bedeutet die Fläche eines Elements, die positiv sein muß und deren Ränder sich nicht „überschlagen“ dürfen,

$Q_j$  bedeutet die resultierende Randkraft, die als Druckkraft positiv sein muß.

Im Falle von freien Problemen, z.B. bei Böschungen ohne Fundamentauffasten, ist die gewählte Zielfunktion teilweise ungeeignet. An ihre Stelle tritt dann z.B. die Sicherheit nach Fellenius. Da diese nicht explizit angegeben werden kann, ist eine i.a. schnell konvergierende Iterationsrechnung erforderlich.

Das Optimierungsproblem (2.3) unter Beachtung der Nebenbedingungen (2.4) kann mit unterschiedlichen Optimierungsprogrammen gelöst werden, wobei sich eine interaktive, dialogunterstützte Optimierung und wahlweiser Einsatz von

- totaler Enumeration (Rastertechnik),
- direktem Suchverfahren mit Simplex, z.B. nach NELDER/ MEAD 65,
- oder Complex nach BOX 86,
- mausgesteuerter und bildschirmorientierter direkter Koordinatenänderung,
- unterschiedlichen Quasi-Newtonverfahren, z.B. nach DAVIDON 75 in der Programmierung gemäß DAVIDON/ NAZARETH 77

als effizient erwiesen haben.

## Kapitel 3

### Erläuterungen zum verwendeten Programm KEM2D

Die Ermittlung der Grenztragfähigkeit nach der Kinematische-Elemente-Methode erfordert stets eine Variation der Geometrie der Bruchkörpermechanismen. Zur Lösung dieses Optimierungsproblems werden die Verfahren nach Nelder/Mead (Simplex) und Davidon (Quasi-Newton-Verfahren) verwendet. Die verschiedenen Methoden sind dabei ineinander verschachtelt, um die Konvergenz zu beschleunigen.

Dem direkten Suchverfahren mit Simplex ist eine Rastertechnik vorgeschaltet, deren relativ grobe Endwerte diesem als Startwerte dienen. Die damit erhaltenen Werte durchlaufen abschließend ein Quasi-Newton-Verfahren. Das von Gußmann entwickelte und von Schanz an die spezielle Problematik angepaßte Rechenprogramm ist modular aufgebaut, löst bei jeder Geometrievaryation die kinematischen und statischen Gleichungssysteme und ermittelt den Wert der Zielfunktion.

Der prinzipielle Ablauf der KEM-Berechnung nach einem Quasi-Newtonverfahren ist aus Bild 3.1 zu ersehen.

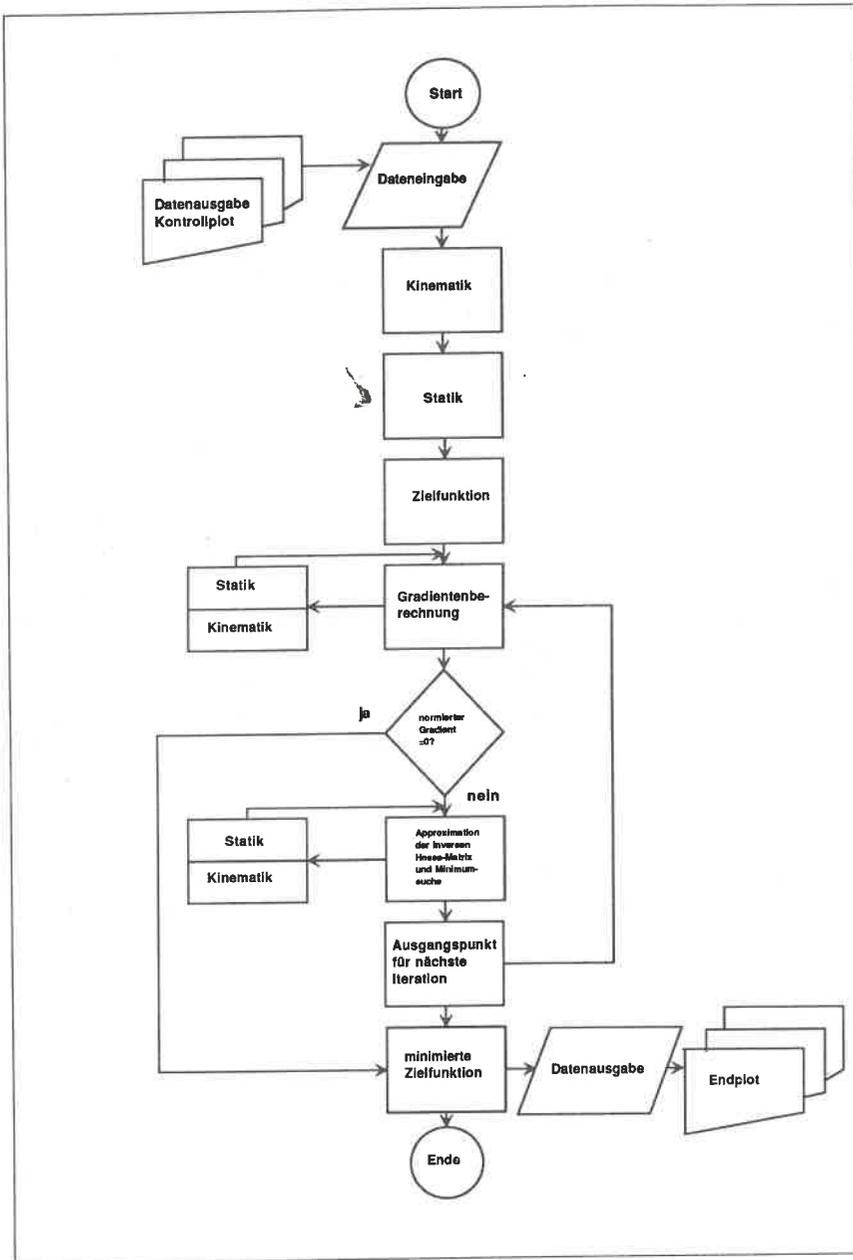


Bild 3.1: Programm KEM2D

## Kapitel 4

### Anwendung der KEM auf das Problem des aktiven Erddrucks bei Böden mit Kohäsion und Reibung

Für die Berechnung des aktiven Erddrucks werden in der Regel kinematische Verfahren wie etwa die Erddruckberechnung nach COULOMB 1776 oder nach GROSS 81 angewandt. Frühere Untersuchungen zeigten, daß auch die kinematische Element Methode sehr gut auf dieses Problem anwendbar ist. Bild 4.1 zeigt eine Prinzipskizze mit den im folgenden benutzten Bezeichnungen.

Es zeigte sich, daß bei Böden mit Reibung und geringer Kohäsion die Kohäsion zwar die Gleitfugeneigung beeinflusst, daß aber eine ebene Gleitfläche maßgebend ist. Steigt hingegen der Kohäsionsanteil bei zunehmendem Böschungswinkel, so ist eine gerade äußere Gleitfläche nicht mehr maßgebend. Der Ansatz von Bruchmechanismen mit mehreren Elementen ergibt dabei eine geknickte äußere Gleitfläche und bewirkt eine deutliche Steigerung der Erddruckkraft.

Aus Gründen der Rechenzeitbegrenzung (mittels wenigen Freiheitsgraden bei der Optimierung) und in Anbetracht der zahlreichen Parameterkombinationen und Vergleichsrechnungen mit feiner diskretisierten Mechanismen wurden die Untersuchungen mit dem Mechanismus nach Bild 4.2 durchgeführt.

Auch GUSSMANN 86 empfiehlt für die Diskretisierung von überwiegend homogenen, aktiven Erddruckproblemen mit im allgemeinen geringen Hauptspannungsrichtungsänderungen die Verwendung von 1 bis 4 Elementen.

Als Zielfunktion wurde im Rahmen dieser Berechnungen die resultierende äußere Arbeit gewählt.

Bemerkenswert ist darüber hinaus noch die Tatsache, daß nach der KEM

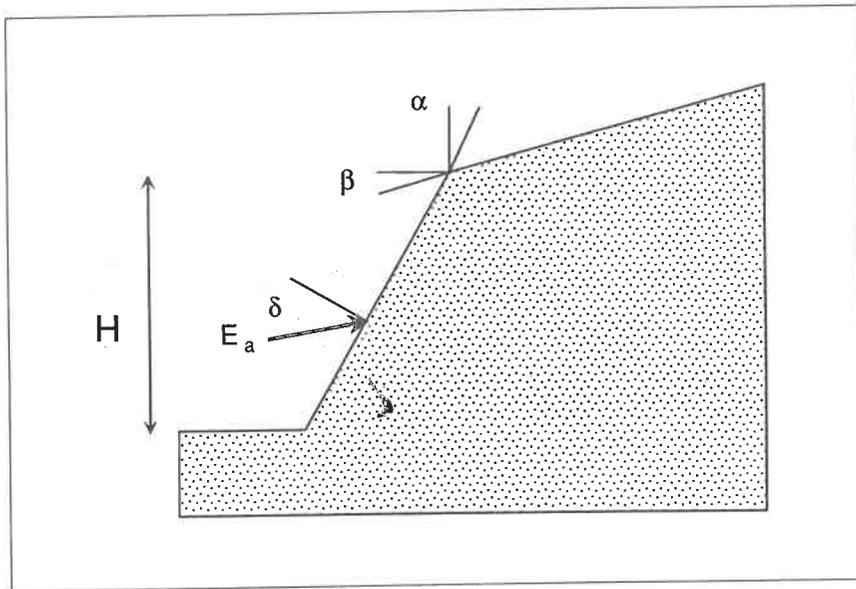


Bild 4.1: Bezeichnungen und Vorzeichenregeln

prinzipiell auch der aktive Erddruck für den Fall  $\beta > 0$  und  $c \neq 0$  ermittelt werden kann. In diesen Fällen ist jedoch zusätzlich die Geländebruchsicherheit des Gesamtsystems getrennt nachzuweisen (Dieser Nachweis ist in den Tabellen des Anhangs nicht enthalten).

Zur Verifizierung des gewählten Mechanismus wurden für untenstehende reine Reibungsböden Vergleichsrechnungen nach Coulomb und der Schweizer VSS durchgeführt:

**Boden I:**  $\beta = 20^\circ, \delta = 20^\circ, \alpha = 0^\circ, \varphi = 30^\circ$   
 $K_{a(\text{Coulomb})} = 0.414205 \quad K_{a(\text{KEM3})} = 0.414206$

**Boden II:**  $\beta = 0^\circ, \delta = 26.7^\circ, \alpha = 0^\circ, \varphi = 40^\circ$   
 $K_{a(\text{Coulomb})} = 0.17859 \quad K_{a(\text{VSS})} = 0.179 \quad K_{a(\text{KEM3})} = 0.179982$

**Boden III:**  $\beta = 20^\circ, \delta = 26.7^\circ, \alpha = 0^\circ, \varphi = 40^\circ$   
 $K_{a(\text{Coulomb})} = 0.22596 \quad K_{a(\text{VSS})} = 0.226 \quad K_{a(\text{KEM3})} = 0.226148$

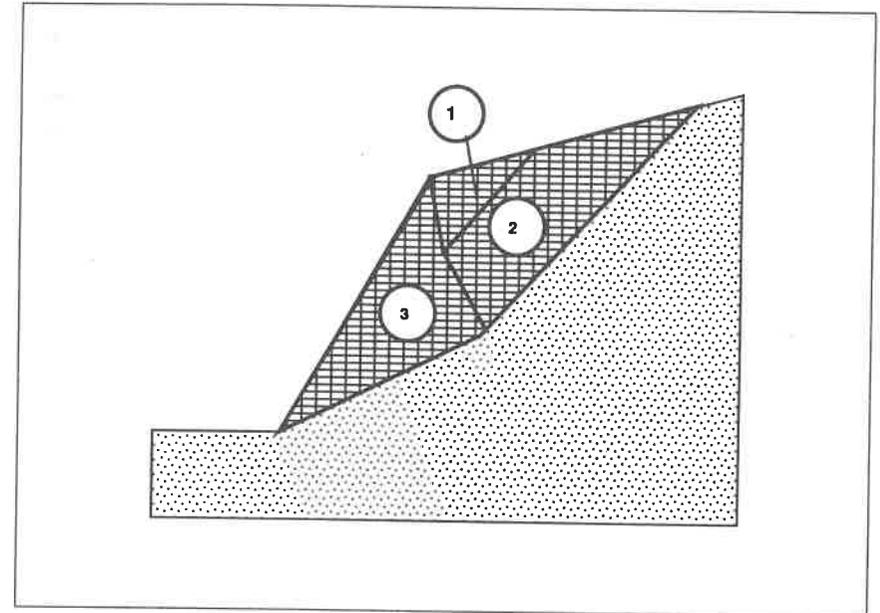


Bild 4.2: Elementnetz KEM-3

**Boden IV:**  $\beta = 0^\circ, \delta = 13.3^\circ, \alpha = 0^\circ, \varphi = 20^\circ$   
 $K_{a(\text{Coulomb})} = 0.42614 \quad K_{a(\text{VSS})} = 0.426 \quad K_{a(\text{KEM3})} = 0.429398$

**Boden V:**  $\beta = 10^\circ, \delta = 13.3^\circ, \alpha = 0^\circ, \varphi = 20^\circ$   
 $K_{a(\text{Coulomb})} = 0.51021 \quad K_{a(\text{VSS})} = 0.510 \quad K_{a(\text{KEM3})} = 0.510450$

Das Problem des aktiven Erddrucks wurde für  $\beta > 0$  und  $c \neq 0$  mittels einer Variation folgender Parameter untersucht:

- Böschungswinkel  $\beta$ ,
- Scherfestigkeit  $\varphi$  und  $c$ ,
- Bodeneigengewicht  $\gamma$ ,
- Wandreibungswinkel  $\delta$ ,
- Wandneigungswinkel  $\alpha$
- und Wandhöhe  $H$ .

Es zeigte sich, daß durch Umformung der Gleichgewichtsbetrachtung je Element auf dimensionslose Größen nicht das ganze Spektrum der Parameter einzeln variiert werden muß.

Werden wie bei den folgenden Untersuchungen jeweils der Wandreibungswinkel  $\delta$  und der Wandneigungswinkel  $\alpha$  konstant gehalten, so ist der dimensionslose Erddruckbeiwert  $K_a$  nur noch vom Böschungswinkel, der Scherfestigkeit und einer dimensionslosen Variablen  $\lambda$  mit

$$\lambda = \frac{c}{\gamma \cdot H}$$

abhängig. Die Bemessungsdiagramme wie z.B. Bild 4.3 sind somit jeweils für eine feste Kombination von  $\varphi$ ,  $\alpha$  und  $\delta$  angegeben, so daß sich aus dem Böschungswinkel  $\beta$  und der Variablen  $\lambda$  der Erddruckbeiwert  $K_a$  ergibt.

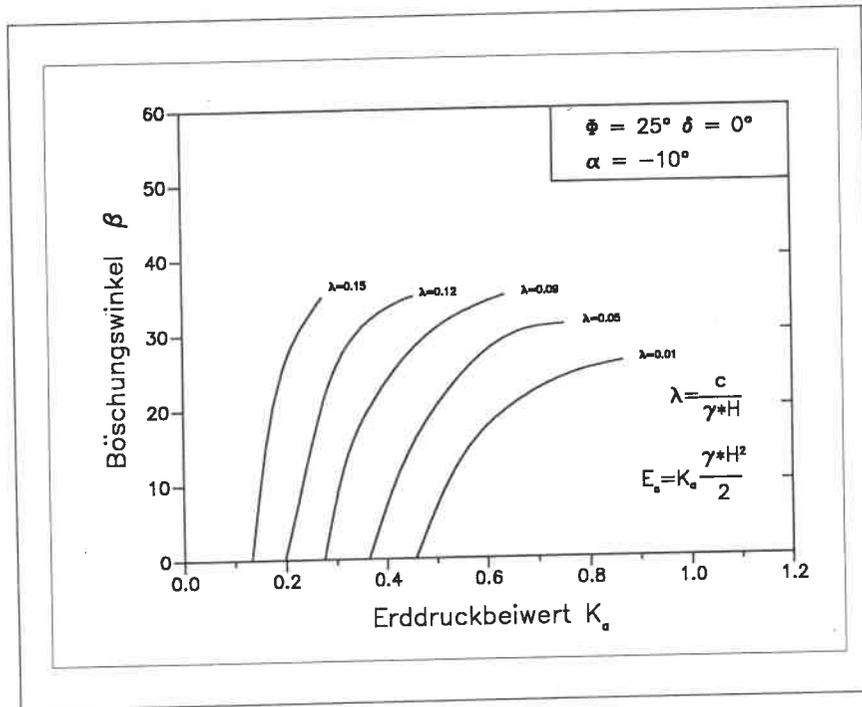


Bild 4.3: Bemessungsdiagramm

Bei den durchgeführten Berechnungen wird der Reibungswinkel von  $25^\circ$  bis  $45^\circ$  in Fünferschritten,  $\beta$  von  $0^\circ$  bis zum jeweils maximal möglichen Wert und  $\delta$  von  $0^\circ$  über  $1/3\varphi$ ,  $2/3\varphi$  bis  $\varphi$  variiert.  $\lambda$  wird von 0.01 über

$\alpha$		$-10^\circ$	$0^\circ$	$+10^\circ$	$+20^\circ$	$+30^\circ$
$\varphi$	$\delta$					
$25^\circ$	0	•	•	•	•	•
	$1/3\varphi$	•	•	•	•	•
	$2/3\varphi$	•	•	•	•	•
	$3/3\varphi$	•	•	•	•	•
$30^\circ$	0	•	•	•	•	-
	$1/3\varphi$	•	•	•	•	-
	$2/3\varphi$	•	•	•	•	-
	$3/3\varphi$	•	•	•	•	-
$35^\circ$	0	•	•	•	•	-
	$1/3\varphi$	•	•	•	•	-
	$2/3\varphi$	•	•	•	•	-
	$3/3\varphi$	•	•	•	•	-
$40^\circ$	0	•	•	•	-	-
	$1/3\varphi$	•	•	•	-	-
	$2/3\varphi$	•	•	•	-	-
	$3/3\varphi$	•	•	•	-	-
$45^\circ$	0	•	•	•	-	-
	$1/3\varphi$	•	•	•	-	-
	$2/3\varphi$	•	•	•	-	-
	$3/3\varphi$	•	•	•	-	-

Tabelle 4.1: Für den aktiven Erddruck untersuchte Parameterkombinationen

0.05, 0.09, 0.12 bis maximal 0.15 gesetzt und  $\alpha$  von  $-10^\circ$  bis maximal  $30^\circ$  gesteigert. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die untersuchten Varianten, die in Form übersichtlicher Bemessungsdiagramme in den Anlagen dargestellt sind.

## Kapitel 5

### Anwendung auf die Traglast von horizontal und vertikal belasteten Flachgründungen

Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, exemplarisch die Last und Neigungsbeiwerte der Grundbruchgleichung gemäß der neuen Fassung der DIN 4017 zur Ermittlung der Traglast von Flachgründungen im ebenen Fall mit der KEM nachzurechnen und mit den in der DIN 4017 angegebenen Werten zu vergleichen. Da letztere teilweise aus — an experimentell gewonnene Versuchskurven angepaßten — empirischen Formeln berechnet werden, kommt dieser Nachrechnung eine für die Praxis wichtige Bedeutung zu. Dabei wird sowohl der Einfluß der Fundamentbreite als auch der Kohäsion untersucht. Bezüglich des Einflusses der Einbindetiefe wird auf SMOLCZYK 87 verwiesen. Bild 5.1 zeigt die dabei verwendeten Mechanismen mit 5 bzw. 11 Elementen. Die dabei gewählte Form der Diskretisierung erlaubt eine spätere Berechnung mit sowohl symmetrischer als auch asymmetrischer Grundbruchfigur.

Nach DIN 4017 berechnet sich die Bruchlast einer durch Horizontal und /oder Vertikalkraft belasteten Flachgründung

Bruchlastgleichung:

$$V_f = B'_x \cdot B'_y \cdot \underbrace{(c \cdot N_c \cdot n'_c \cdot \kappa_c)}_{\text{Kohäsion}} + \underbrace{B'_x \cdot \gamma_2 \cdot N_b \cdot n'_b \cdot \kappa_b}_{\text{Fundamentbreite}} + \underbrace{q \cdot N_d \cdot n'_d \cdot \kappa_d}_{\text{Einbindetiefe}}$$

Formbeiwerte:  $\nu'_c = \nu'_b = 1$  (für den  $\infty$ -langen Streifen)

Neigungsbeiwerte:

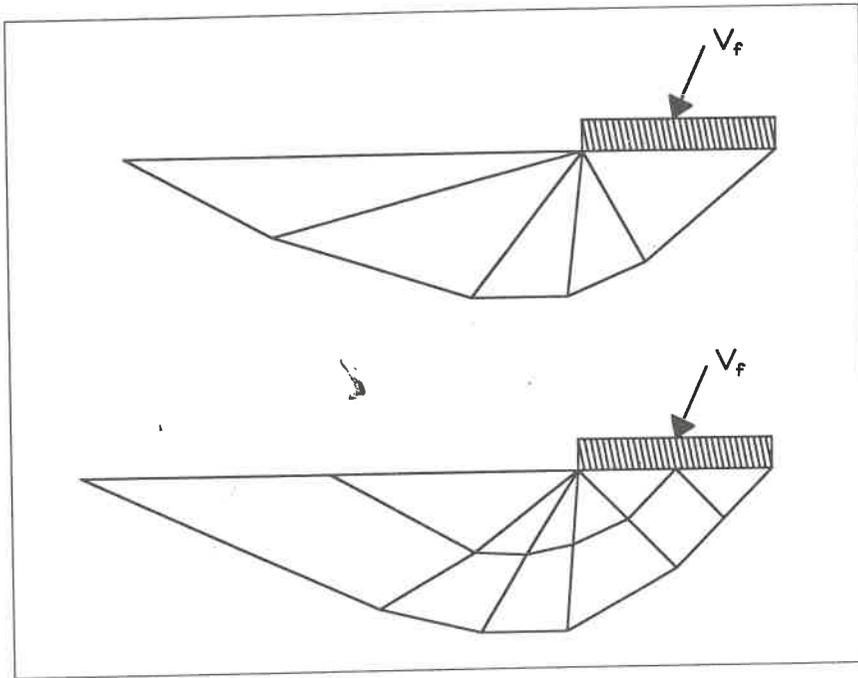


Bild 5.1: Elementnetze KEM-5 / KEM-11

$$\kappa_c = \kappa_d - \frac{1 - \kappa_d}{N_d - 1}$$

$$\kappa_b = \left[ 1 - \frac{F_p \cdot H}{F_p \cdot V + B'_x \cdot B'_y \cdot c' \cdot \cot \varphi'} \right]^3$$

Tragfähigkeitsbeiwerte:

$N_b$  und  $N_c$  laut Tabelle DIN 4017.

Da die Tiefenbeiwerte  $N_d$ ,  $\nu'_d$  und  $\kappa_d$  hier nicht nachgerechnet werden, fehlen sie in der obigen Aufzählung.

Zur Berechnung des Tragfähigkeitsbeiwertes  $N_b$  wurde die Kohäsion und die Lastneigung gleich 0 gesetzt. Zielfunktion ist wiederum die Arbeit der äußeren Kräfte. Somit ergibt sich die Bestimmungsgleichung für  $N_b$  zu

$$N_b = \frac{V_f}{\gamma \cdot B_x^2}$$

Die Bruchlast wurde mit beiden Mechanismen für verschiedene  $\varphi$  berechnet. Bild 5.2 zeigt die Ergebnisse der Berechnung mit 11 Elementen im Vergleich mit anderen Lösungen.

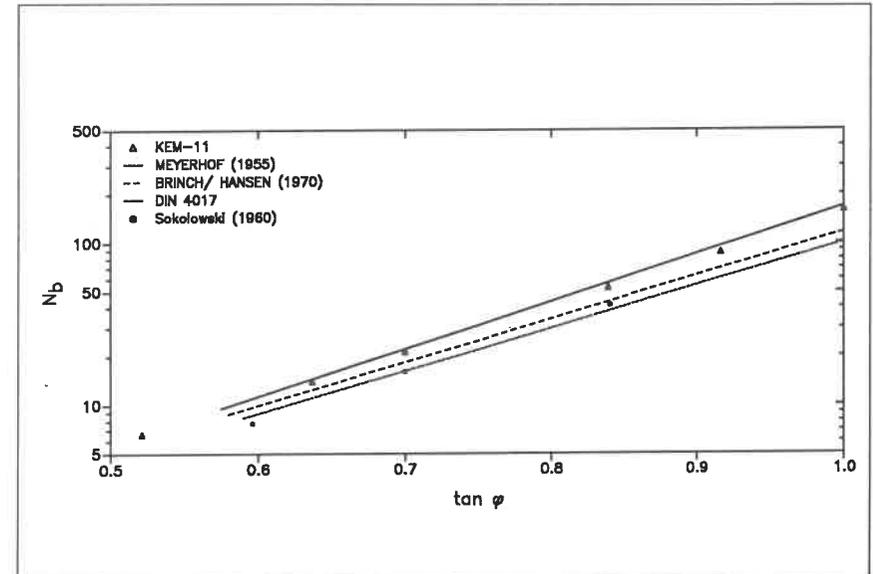


Bild 5.2: Tragfähigkeitsbeiwerte  $N_b$  nach verschiedenen Verfassern

Um den Einfluß des Breitengliedes auszuschalten, wurde  $\lambda = 0 \text{ kN/m}^3$  und  $c = 20 \text{ kN/m}^2$  gesetzt. Die Tragfähigkeitsbeiwerte  $N_c$  wurden mit dem 5- bzw. 11-Elementemechanismus berechnet, wobei sich nur vernachlässigbare Unterschiede ergaben. Bild 5.3 zeigt die gute Übereinstimmung der 5-Elementeberechnung mit den Werten gemäß DIN 4017.

Eine Berechnung für  $c = 40 \text{ kN/m}^2$  ergab nur vernachlässigbar geringe Unterschiede. Die in DIN 4017 vorausgesetzte Unabhängigkeit des Beiwertes  $N_c$  von  $c$  konnte somit bestätigt werden.

Bei der Berechnung der Neigungsbeiwerte  $\kappa_b$  und  $\kappa_k$  wurden jeweils die vorab mittels KEM ermittelten Tragfähigkeitsbeiwerte, dem verwendeten Mechanismus entsprechend, angesetzt. Als Zielfunktion wurde die Arbeit der äußeren Vertikalkräfte gewählt; dies ist eine für das Problem geeignete Zielfunktion, sicher jedoch nicht die einzig mögliche. Die Lastneigung wird rechen-technisch durch die Veränderung des Sohlreibungswinkels gesteuert.

Wie aus Bild 5.4 hervorgeht, führt eine Netzverfeinerung zu einer quantitativen Verbesserung der Ergebnisse. Qualitativ stimmen alle drei Kurven jedoch

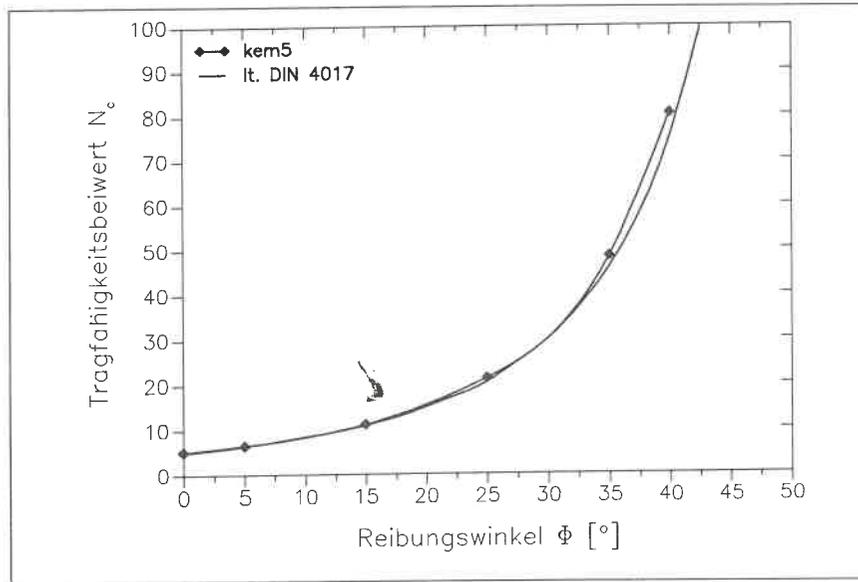


Bild 5.3:

gut überein.

Da die KEM nach den klassischen Sätzen der Plastizitätstheorie zu den kinematischen Lösungen gehört, nähern sich demzufolge die Ergebnisse der vollständigen Lösung von oben, dh. von der unsicheren Seite. Eine Verbesserung der Werte wäre von einer weiteren Netzverfeinerung bzw. ggfs. von einem anderen Mechanismus zu erwarten.

Bild 5.5 zeigt, nach einer Berechnung mit fünf Elementen, die Unabhängigkeit von  $\kappa_b$  vom Reibungswinkel  $\varphi$ , von der in der DIN 4017 ausgegangen wird.

Bei der Berechnung von  $\kappa_c$  ergab sich wie die Bilder 5.6 und 5.7 zeigen keine Abhängigkeit von der Kohäsion bzw. der Wahl des Mechanismus.

Für eine Kohäsion von  $c = 20 \text{ kN/m}^2$  ergaben sich für  $\varphi = 15^\circ, 20^\circ$  und  $25^\circ$  die Werte nach Bild 5.8.

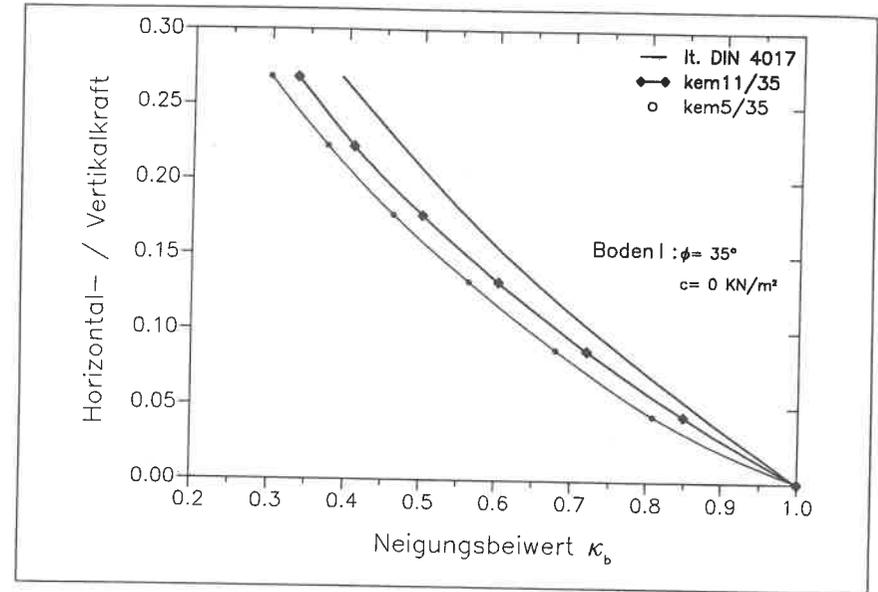


Bild 5.4:

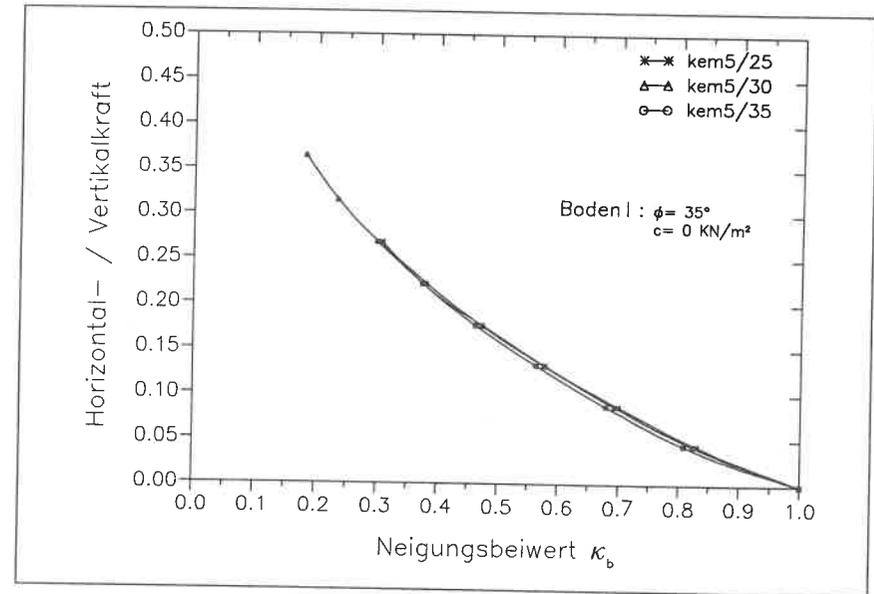


Bild 5.5:

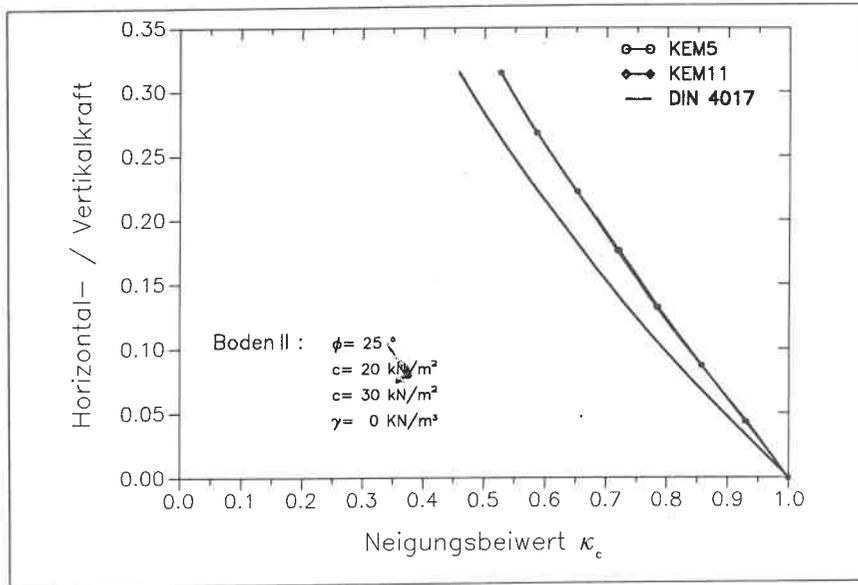


Bild 5.6:

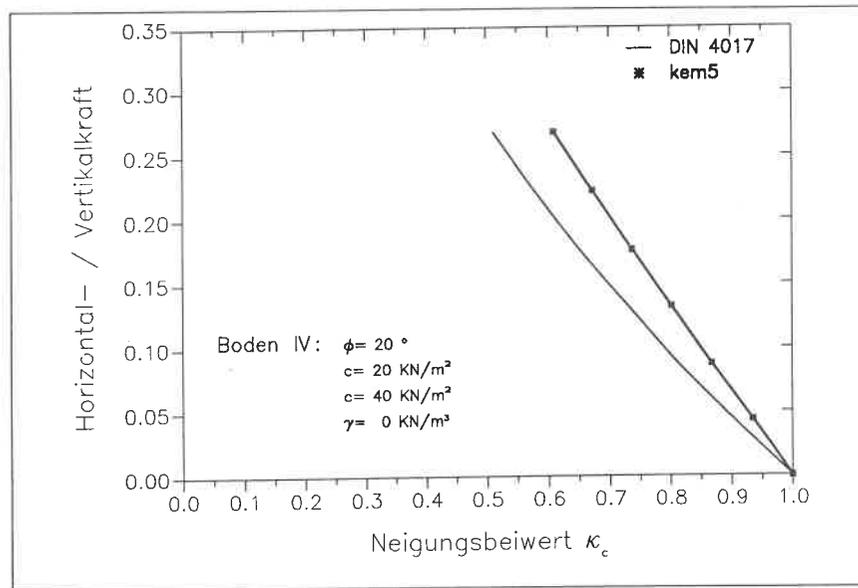


Bild 5.7:

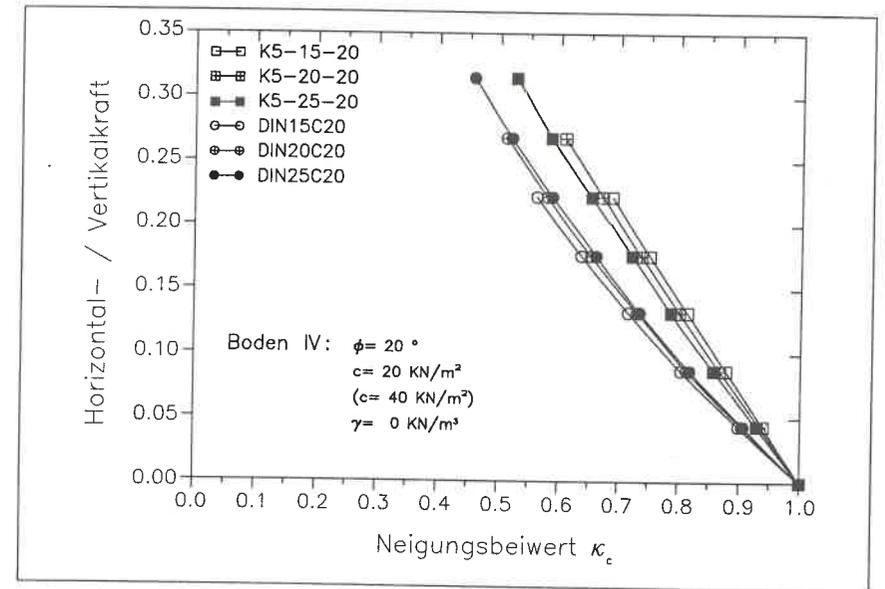


Bild 5.8:

## Kapitel 6

### Zusammenfassung

Das erste Kapitel dieser Arbeit gibt eine Einführung in die Theorie der Kinematische-Elemente-Methode nach GUSSMANN 86. Dabei werden sowohl die kinematischen als auch die statischen Gleichungen bis zum Aufstellen der Gleichungssysteme abgeleitet und die prinzipielle numerische Lösung mittels verschiedener Optimierungsverfahren aufgezeigt.

Ein Schwerpunkt ist daran anschließend die Erstellung von Bemessungsdiagrammen für die Ermittlung des aktiven Erddrucks auf Stützbauwerke bei geneigter Böschung und schräger Wand.

In Erweiterung der Arbeit von SCHWEIKERT 84 wird zusätzlich der Einfluß des Wandreibungswinkels  $\delta$  und der Wandneigung  $\alpha$  auf die Größe des Erddruckes untersucht. Mittels einer Parametervariation bzgl. der Scherparameter  $\varphi$  bzw.  $c$  und der geometrischen Größen werden dadurch für die Praxis einfach zu handhabende und vielseitig einsetzbare Hilfsmittel angeboten, die in dieser Form bisher noch nicht zur Verfügung standen. Die Ergebnisse sind in Form von Bemessungsdiagrammen im Anhang dargestellt.

Die Berechnungen wurden mit einem 3-Elemente Mechanismus auf dem COMPAREX 8/89 - Großrechner des Rechenzentrums der Universität Stuttgart durchgeführt. Dies geschah wegen des durch die Parametervielfalt bedingten umfangreichen Rechenaufwandes. Das verwendete Programm ist jedoch für die Praxis auch für PC's verfügbar.

In einem zweiten Kapitel zeigt sich die gute Anwendbarkeit der Kinematische-Elemente-Methode auch auf die Problematik der Traglastermittlung für horizontal und/oder vertikal belastete Flachgründungen. Exemplarisch für verschiedene Scherparameterkombinationen werden dabei die Tragfähigkeits- und Neigungsbeiwerte  $N_c$ ,  $N_b$  bzw.  $\kappa_c$ ,  $\kappa_b$  der DIN 4017, die den Einfluß der Kohäsion und der Fundamentbreite berücksichtigen, verifiziert. Bei den Tragfähigkeitsbeiwerten  $N_b$  und  $N_c$  zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

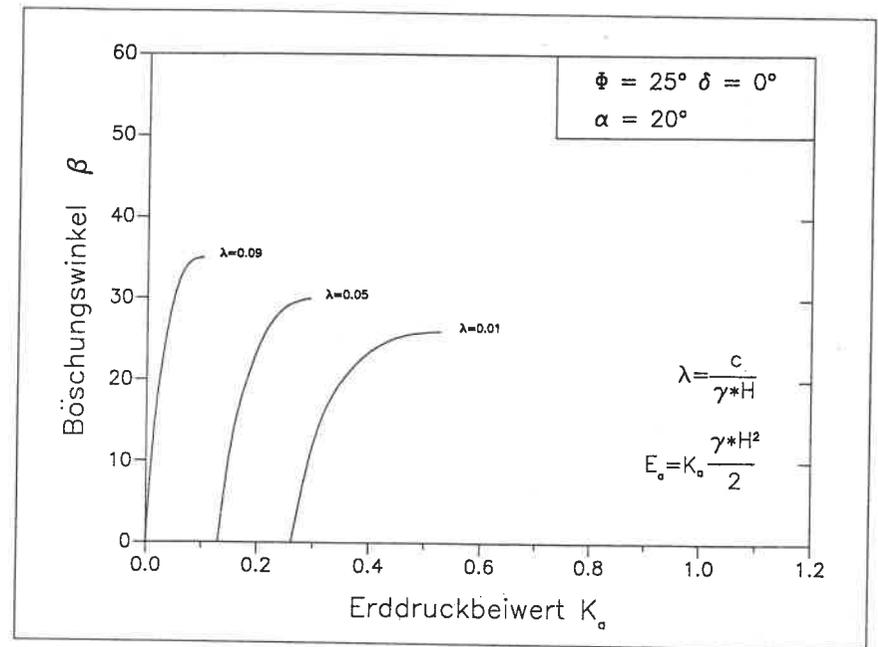
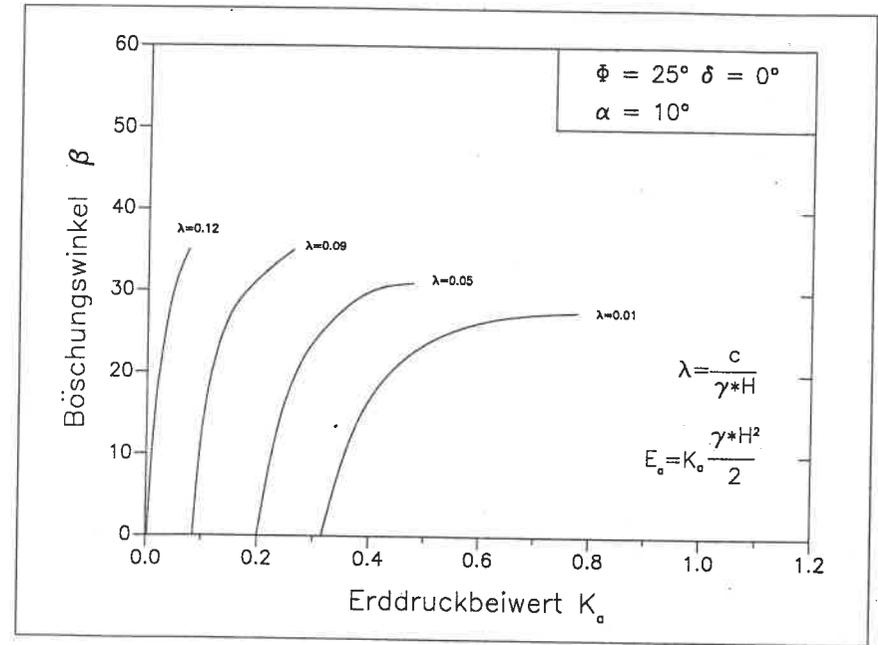
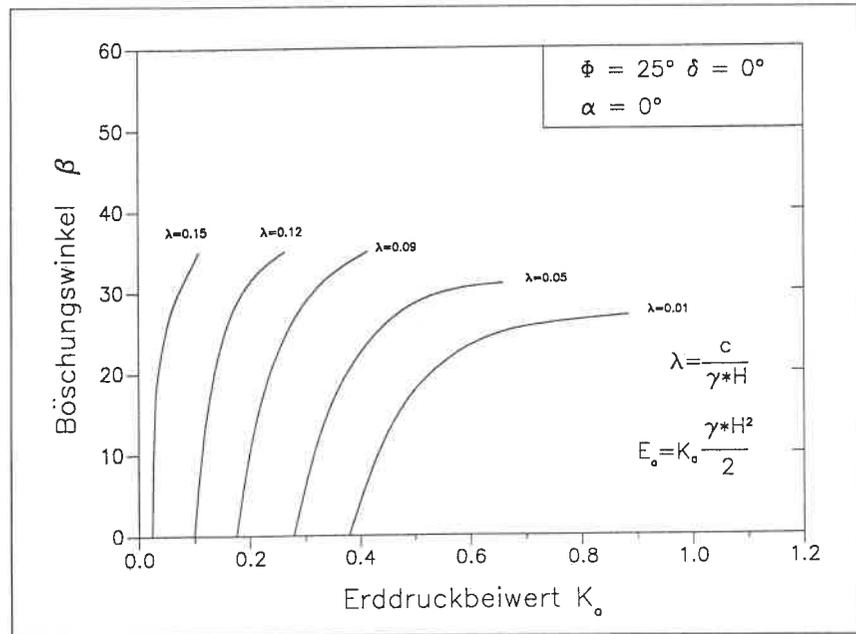
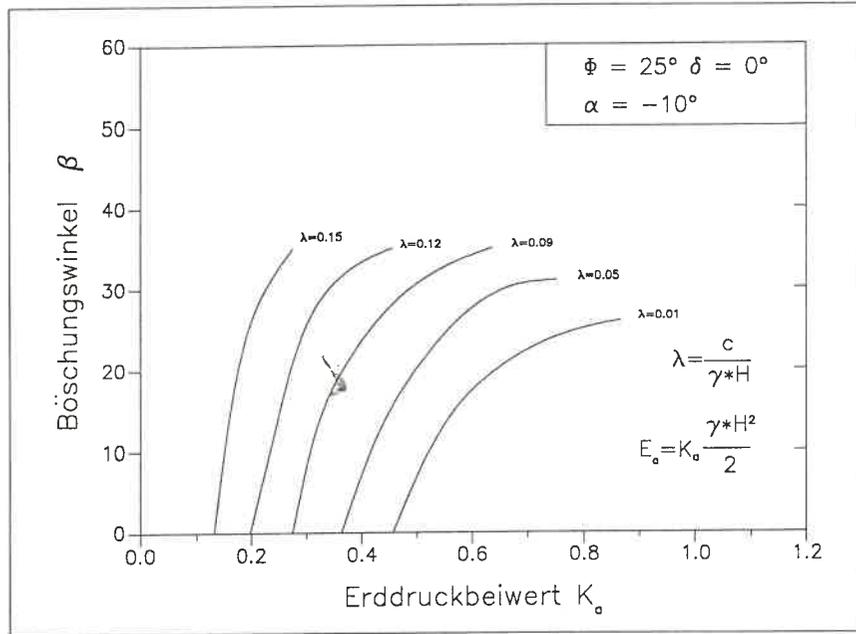
Die Unabhängigkeit des  $N_c$ -Wertes von der Kohäsion, von der auch in der DIN 4017 ausgegangen wird, konnte bestätigt werden. Auch die ermittelten Neigungsbeiwerte  $\kappa_b$  und  $\kappa_c$  stimmen mit den in der DIN 4017, auf halbempirischer Grundlage, festgelegten Werten im wesentlichen überein.

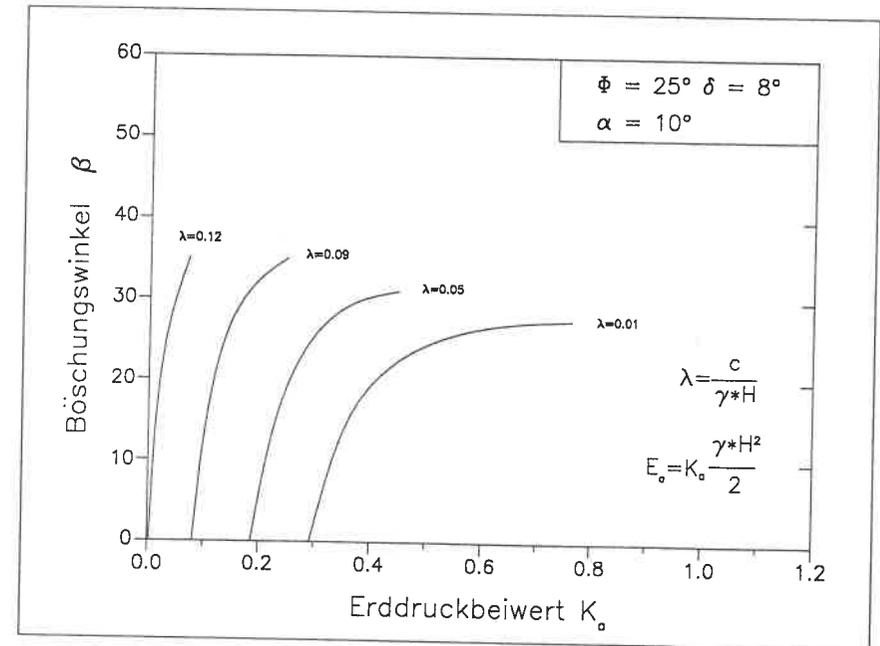
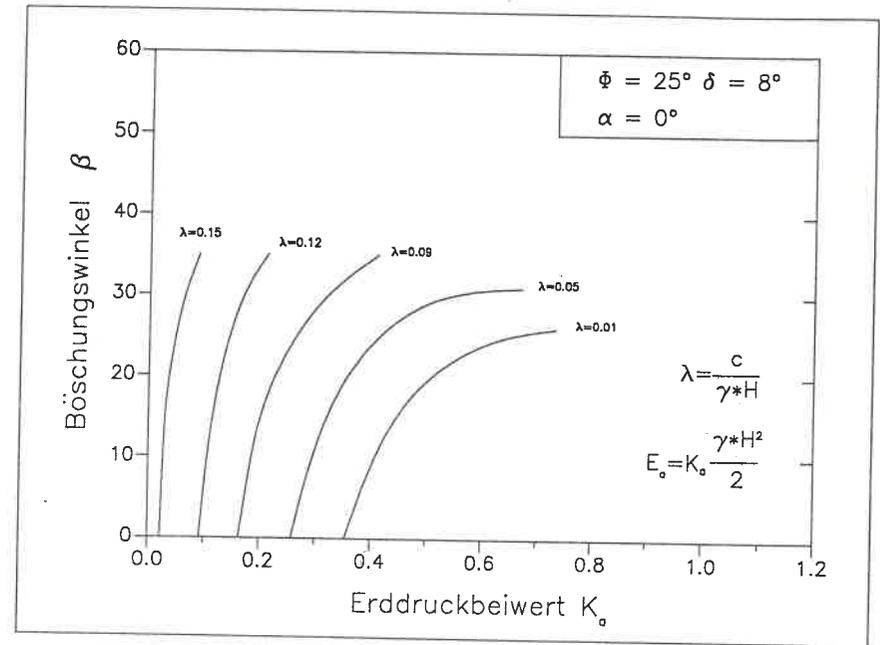
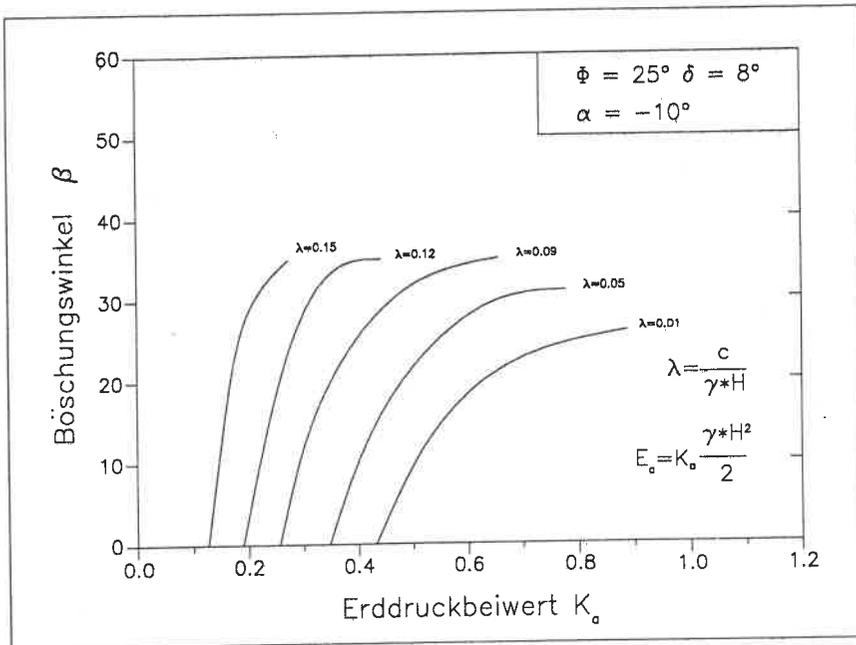
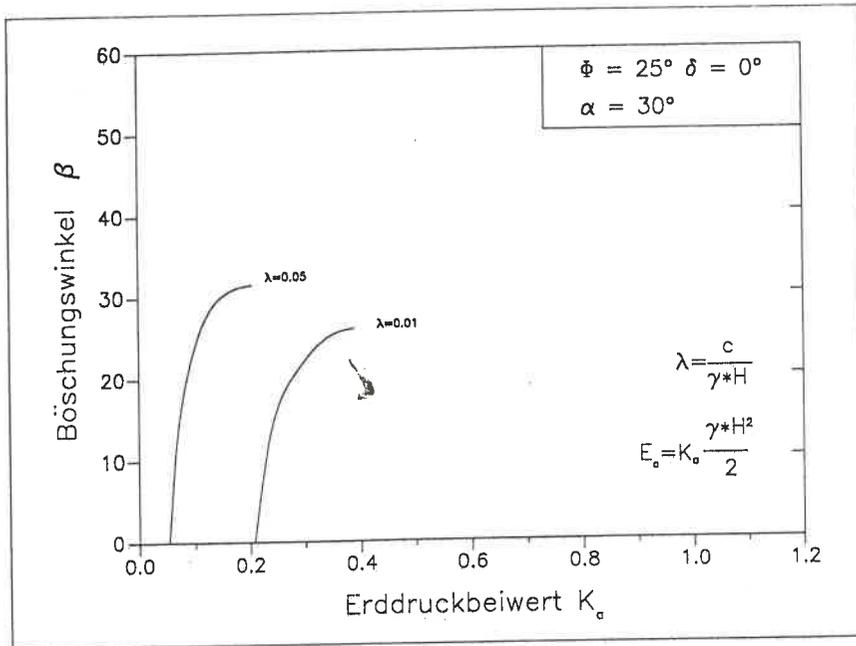
Der Einfluß des Reibungswinkels  $\varphi$  auf den Neigungsbeiwert  $\kappa_b$ , der in der DIN 4017 berücksichtigt wird, konnte allerdings nicht festgestellt werden.

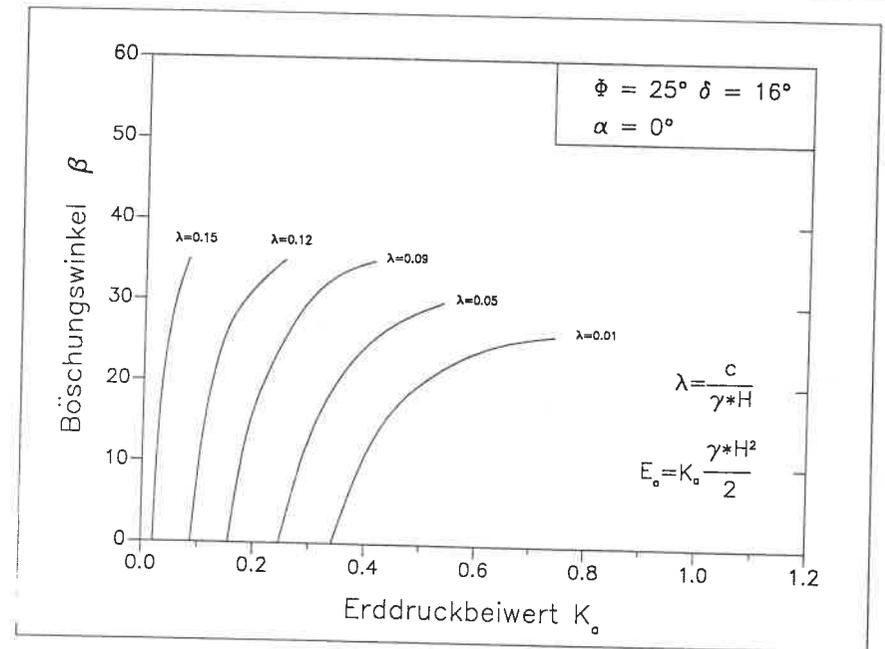
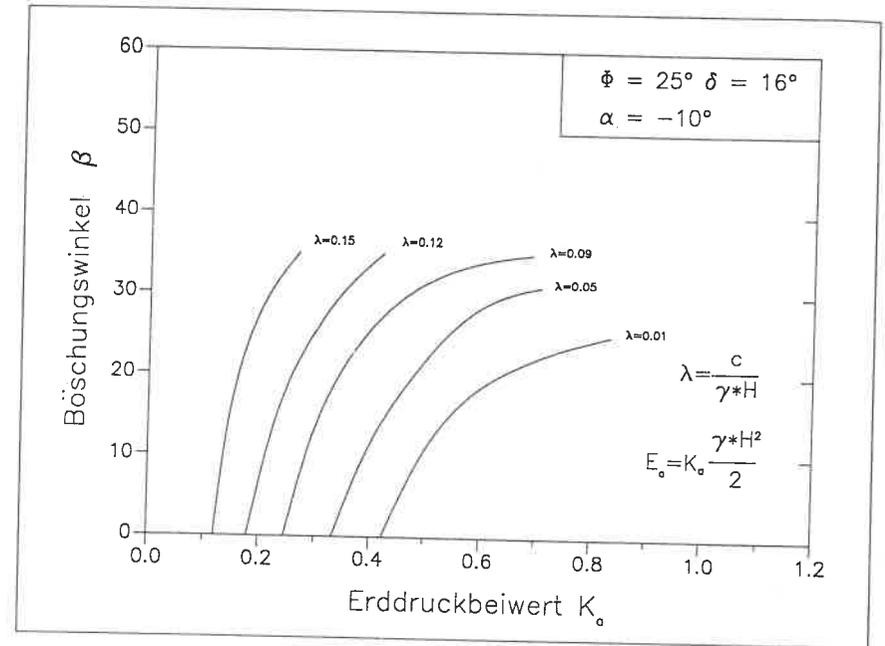
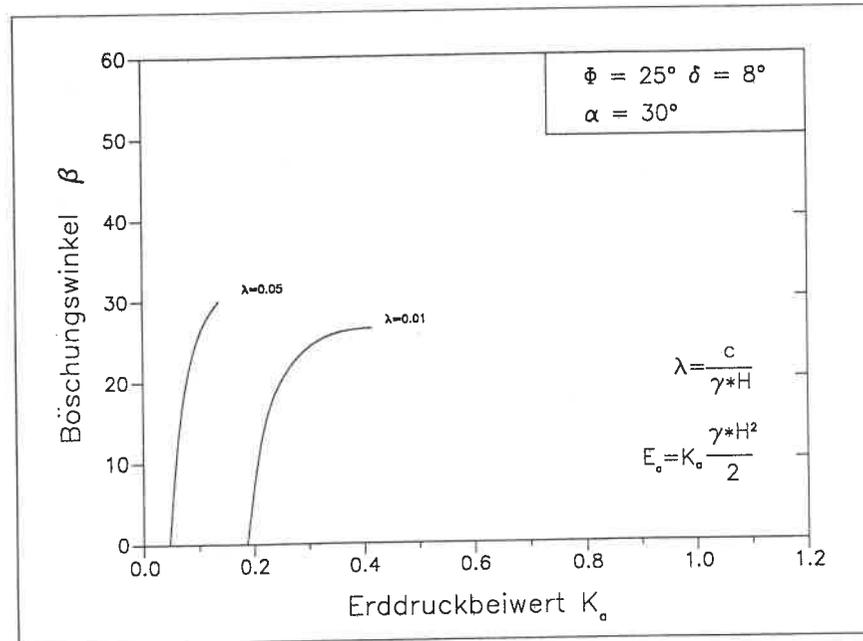
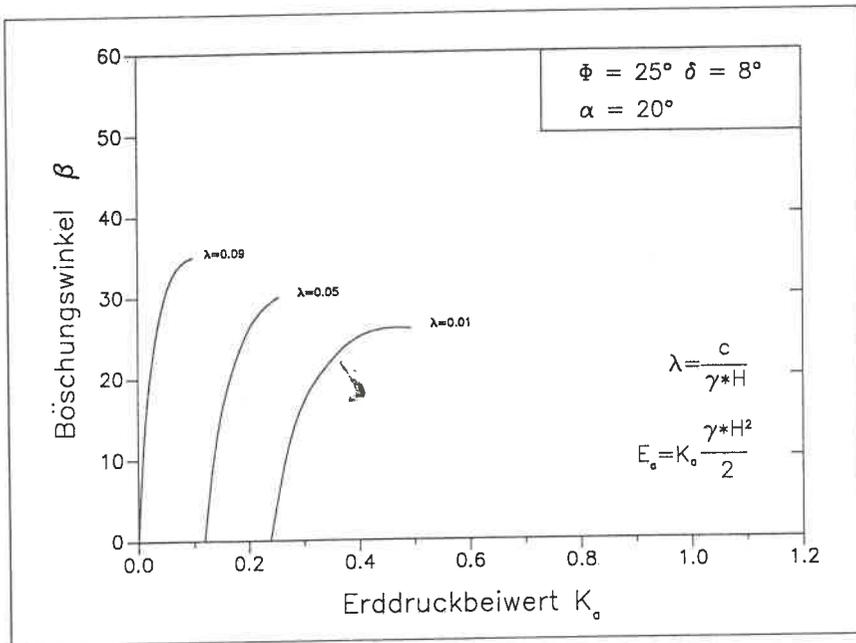
Insgesamt zeigt sich für die untersuchten Problemstellungen die gute Anwendbarkeit der Kinematische-Elemente-Methode. Mittels der heute in der Praxis weit verbreiteten Kleinrechner stellt sie eine gute Möglichkeit zur Abschätzung des maßgeblichen Bruchverhaltens dar.

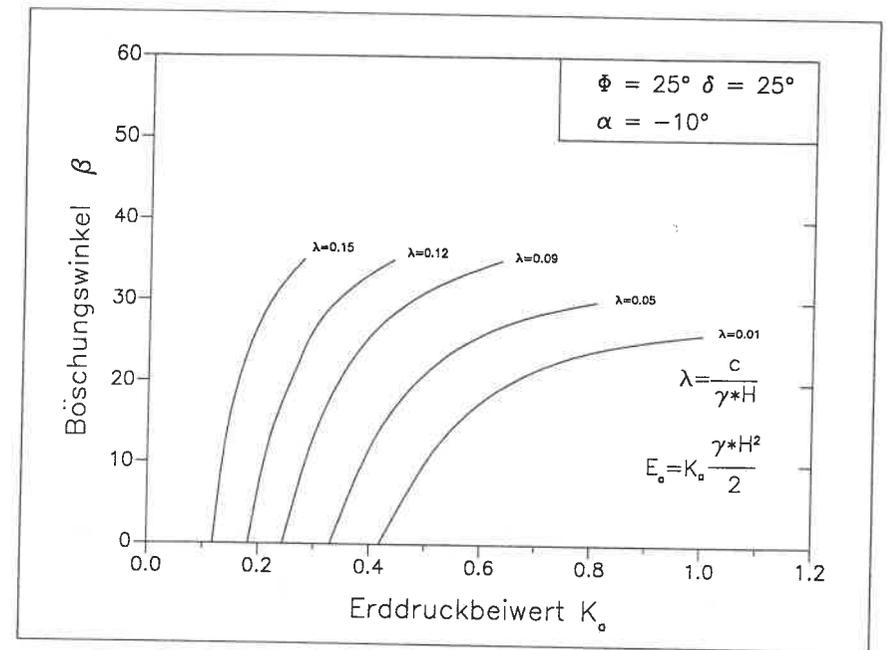
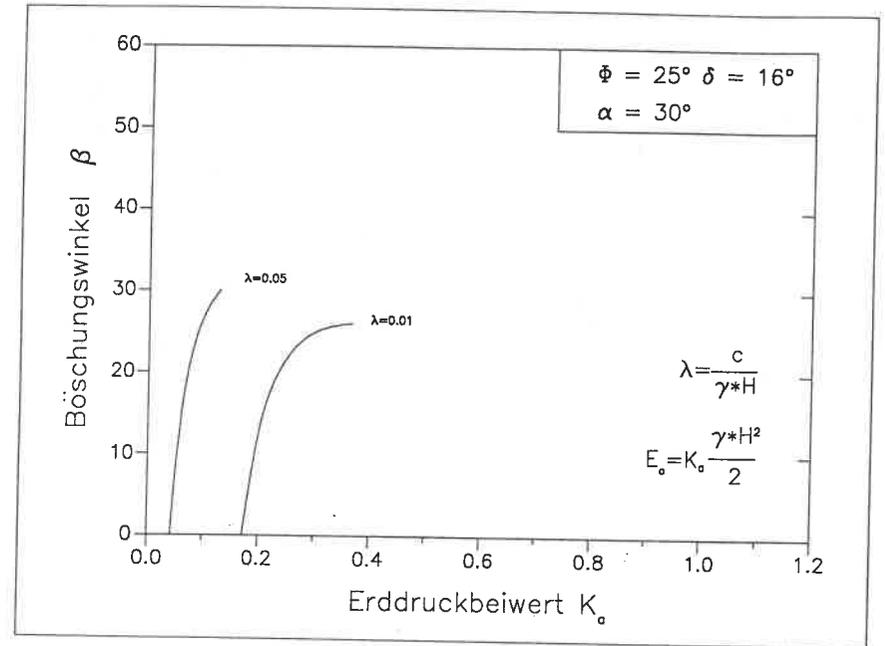
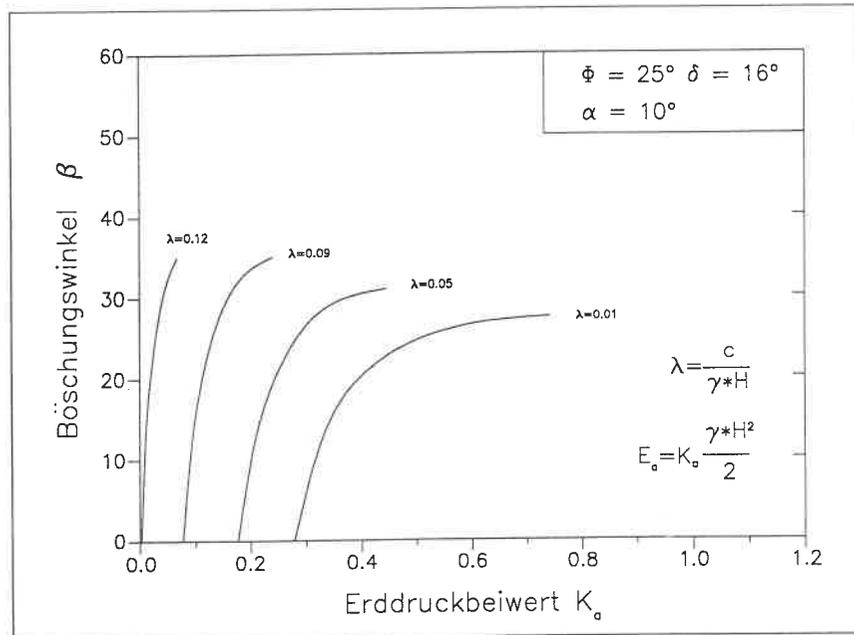
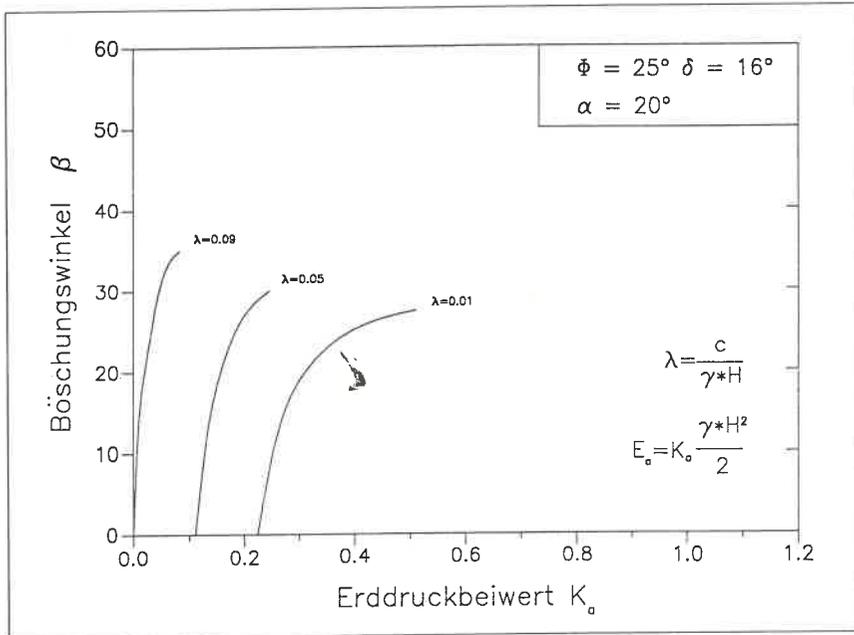
## Kapitel 7

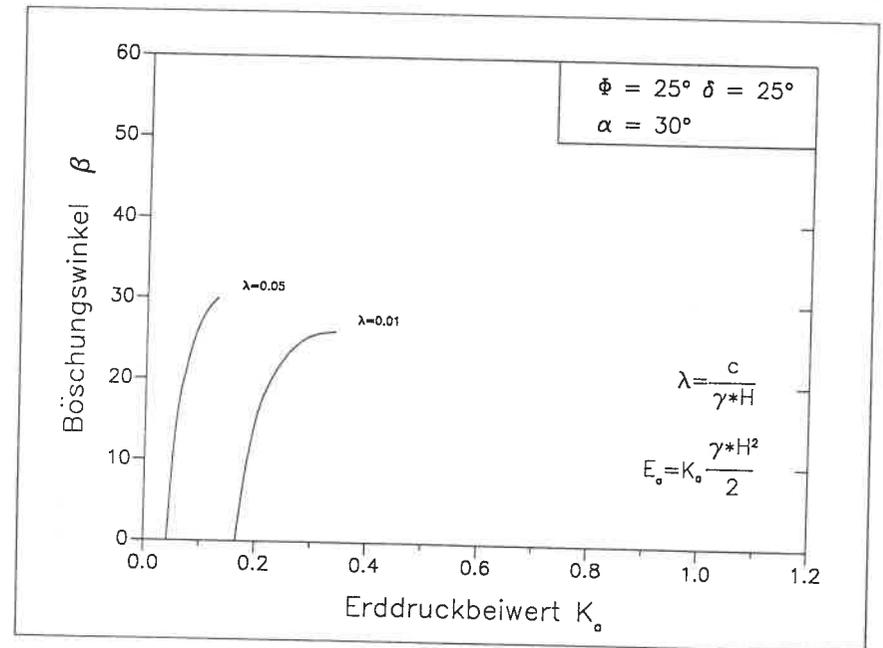
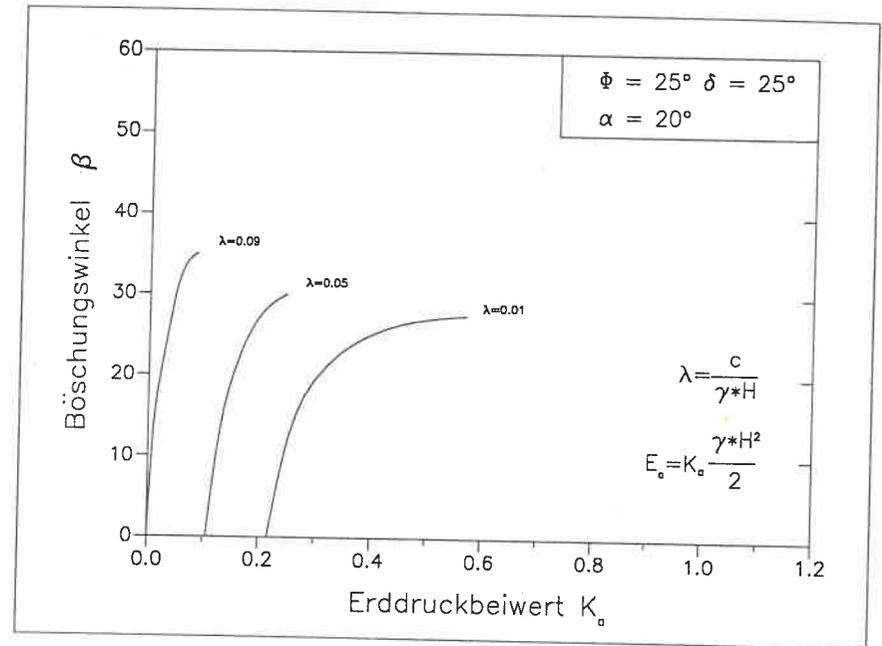
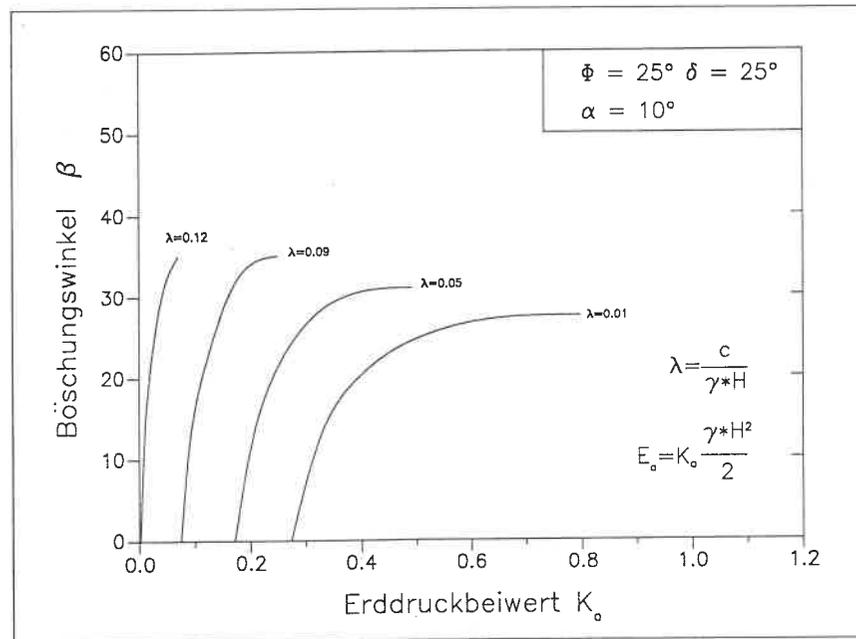
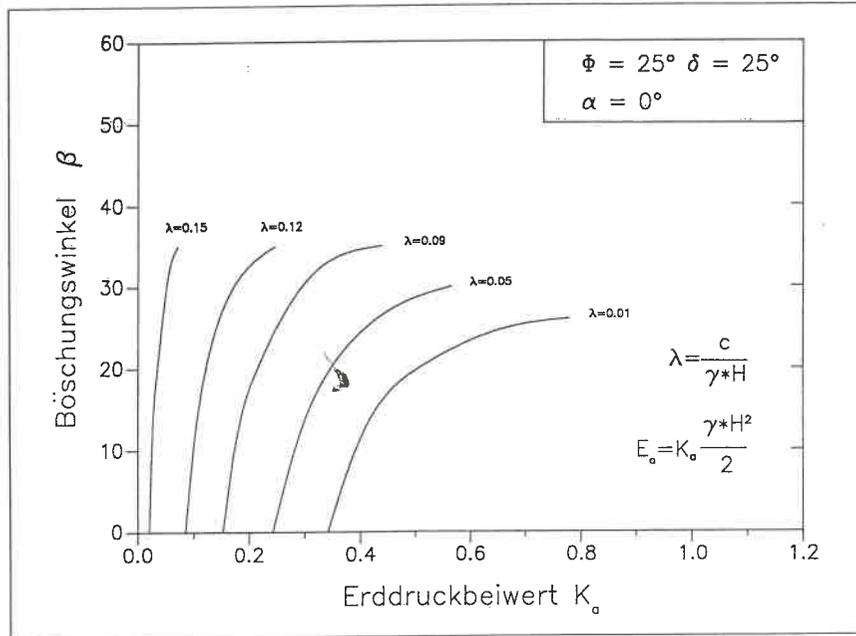
### Tafeln

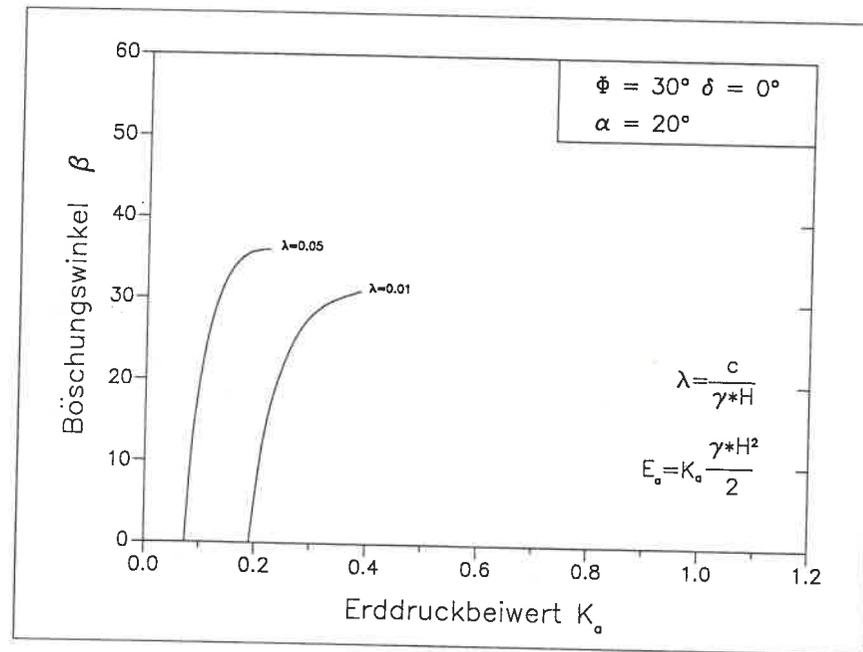
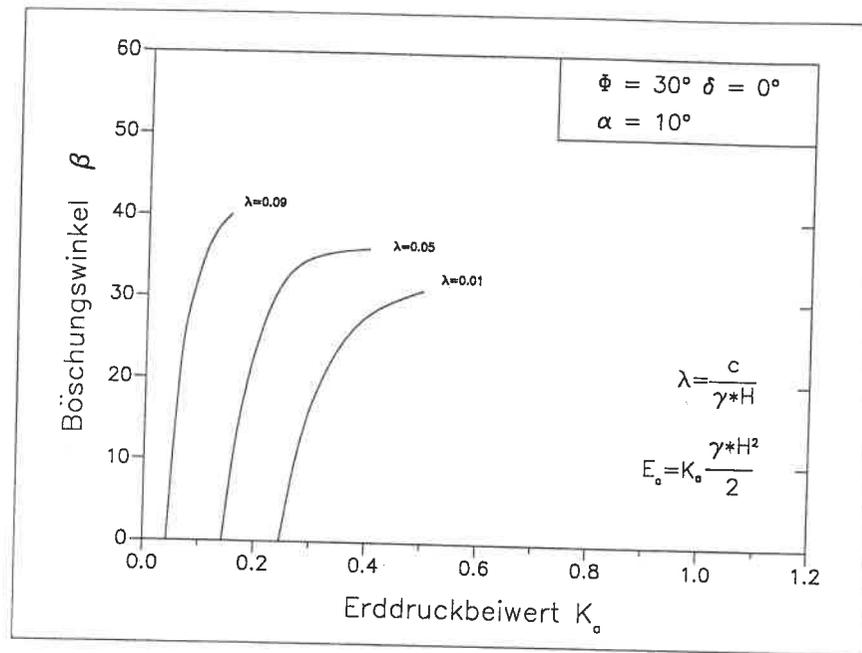
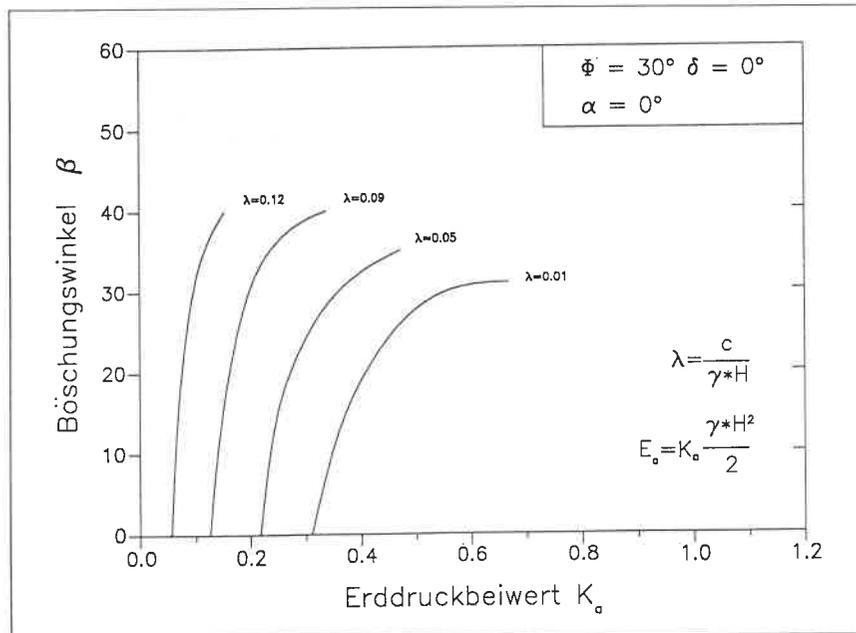
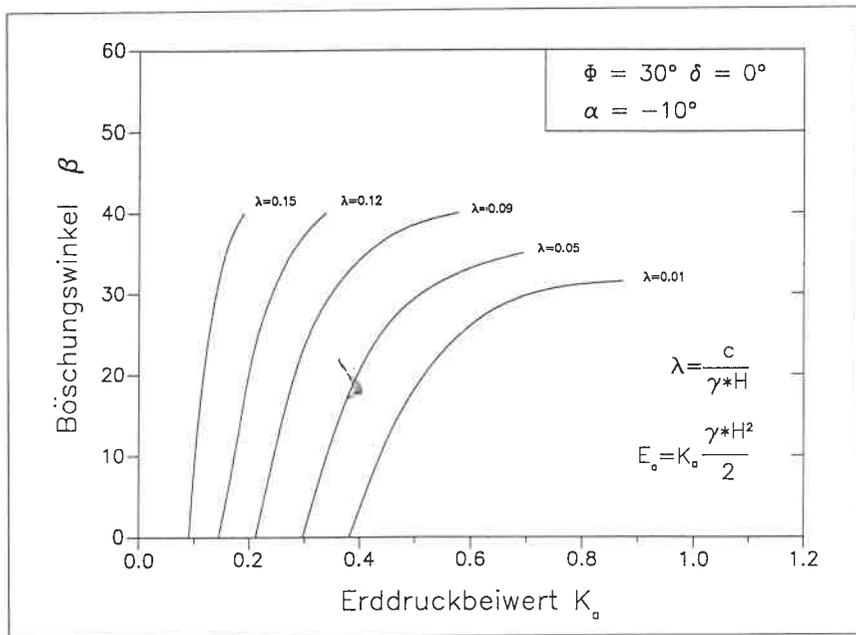


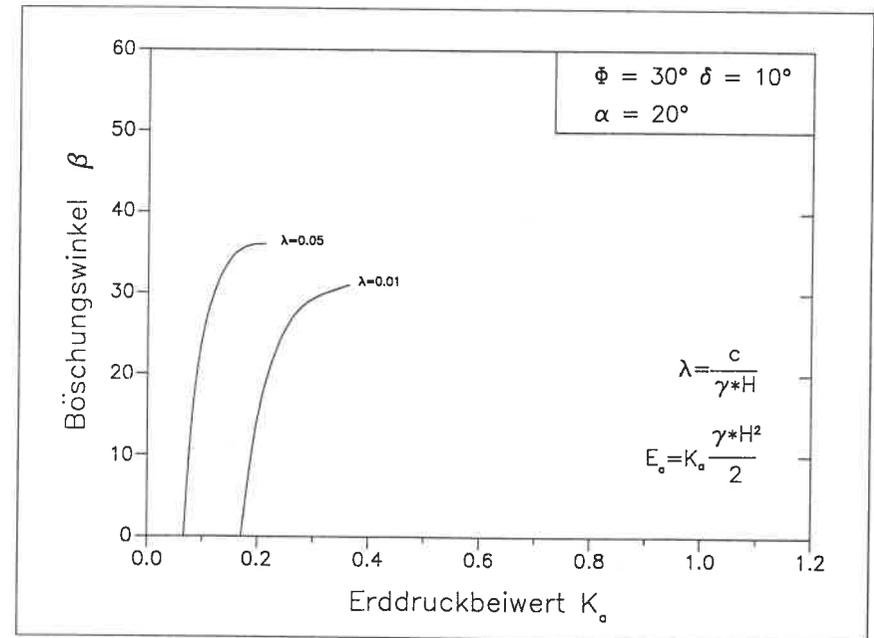
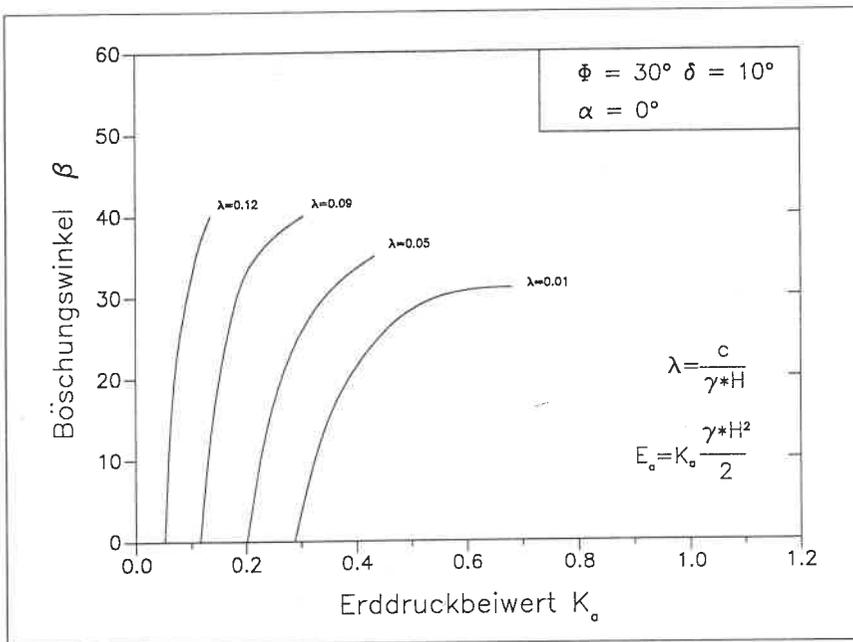
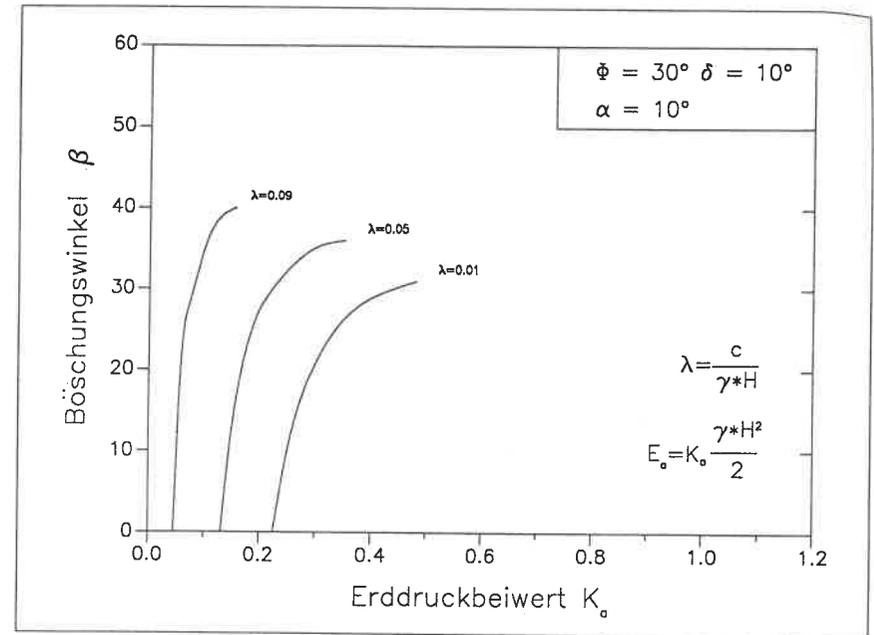
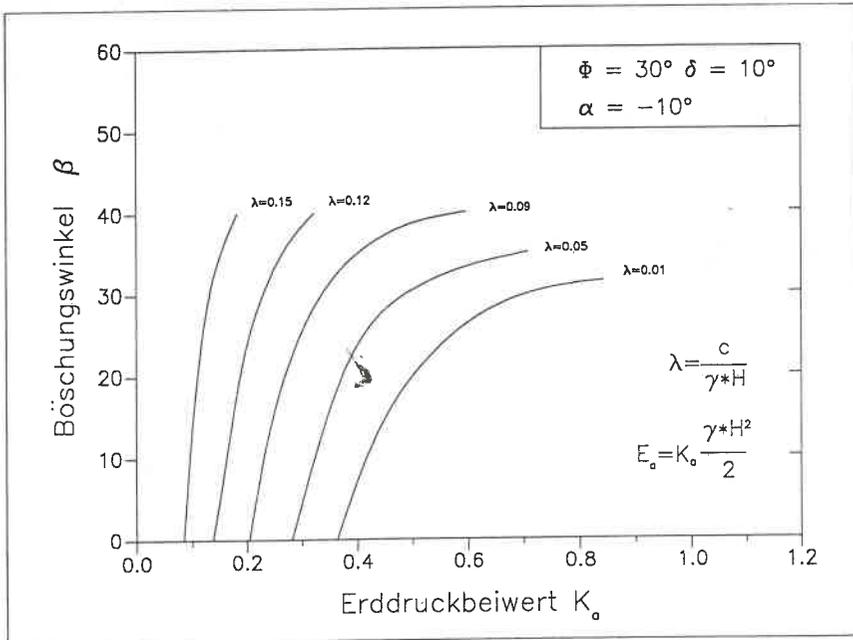


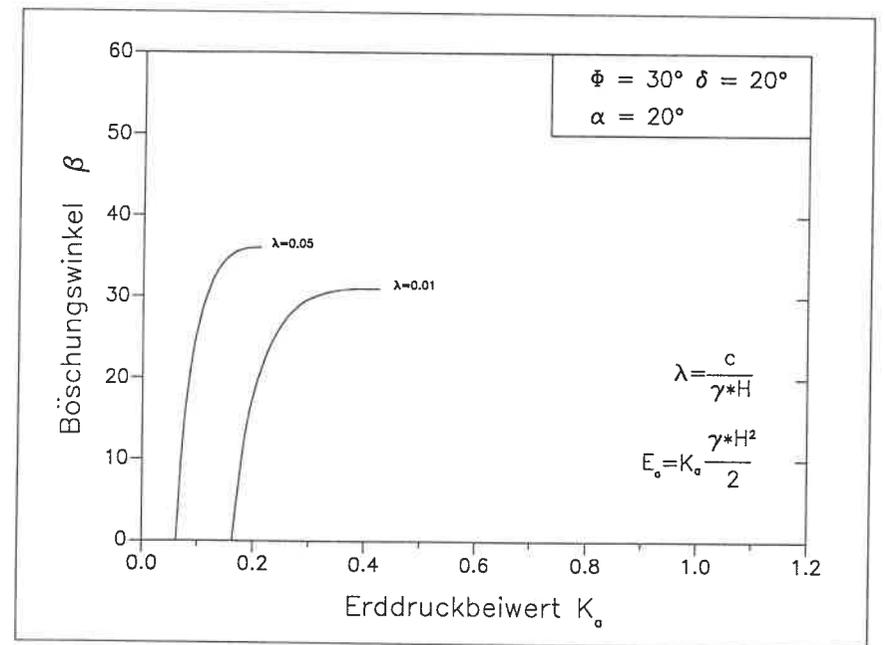
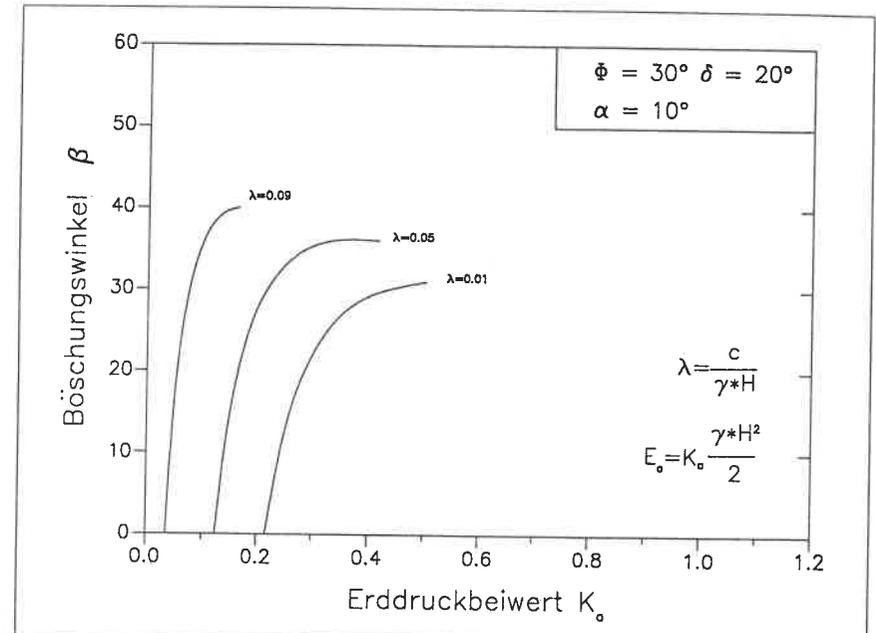
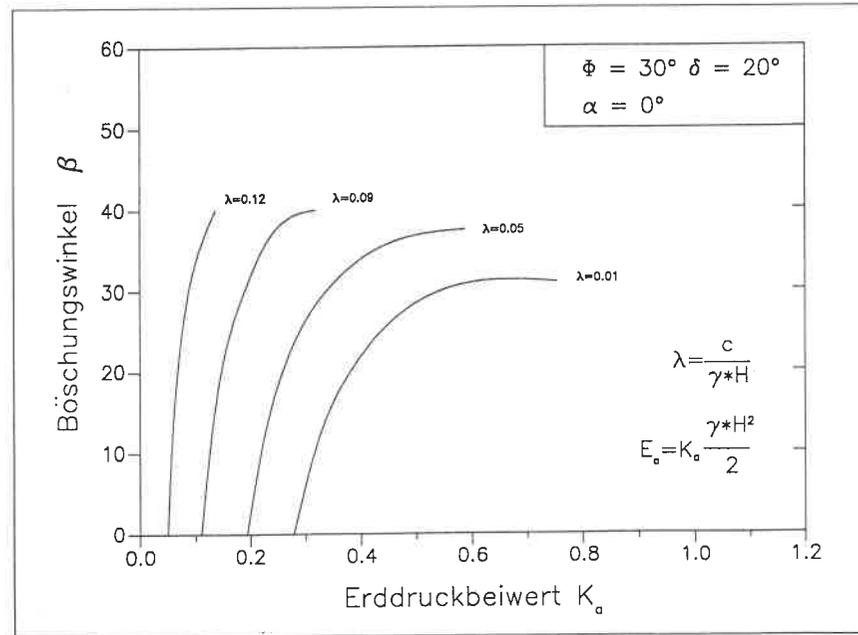
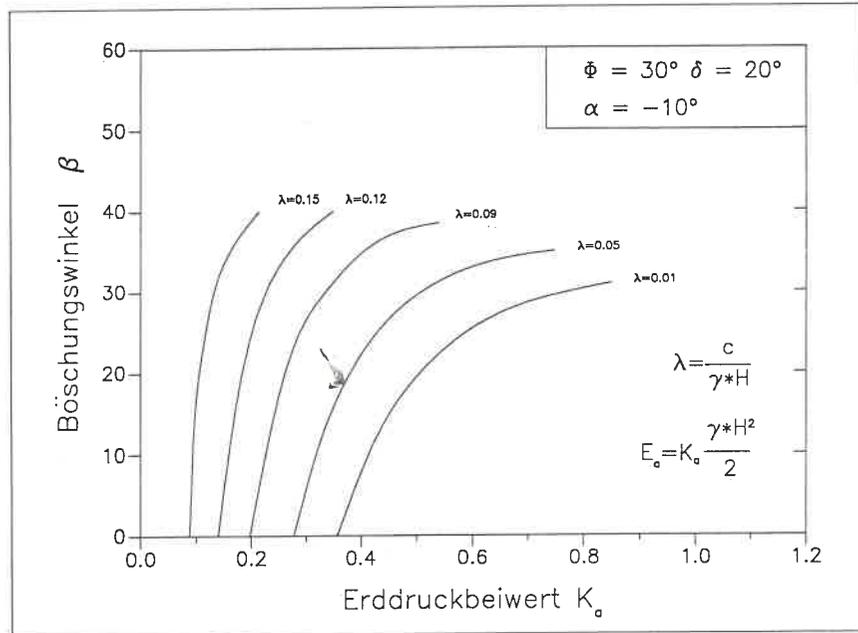


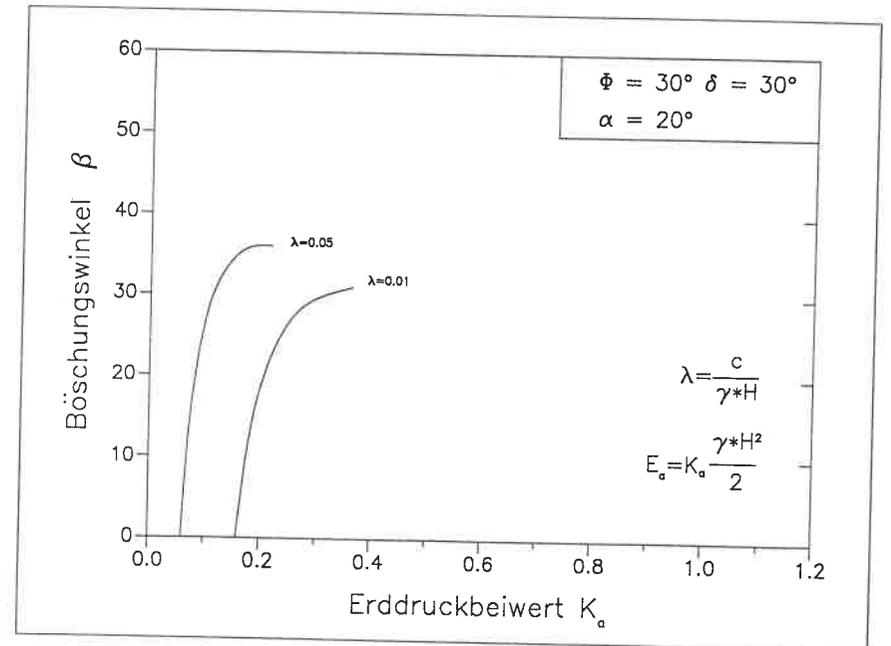
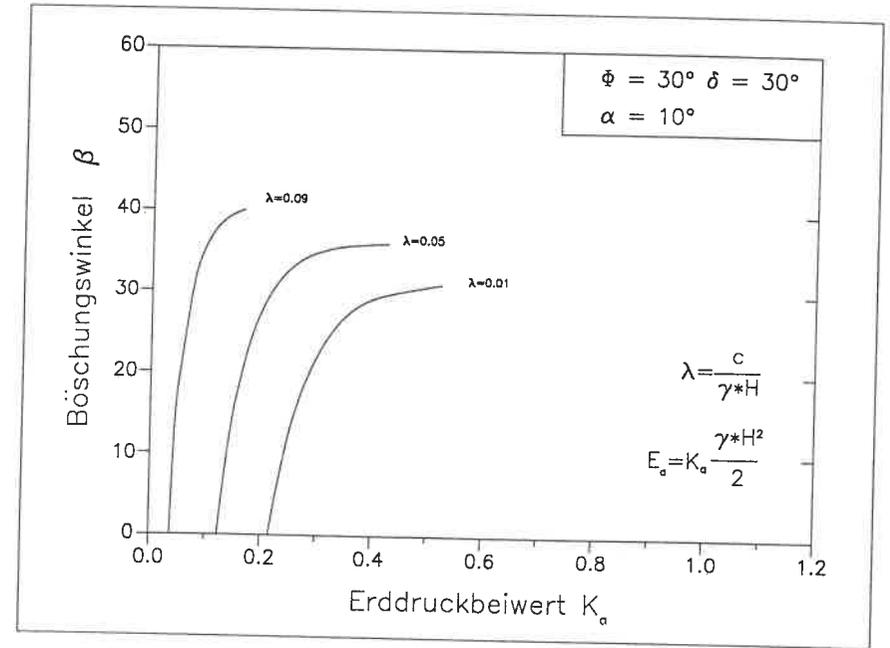
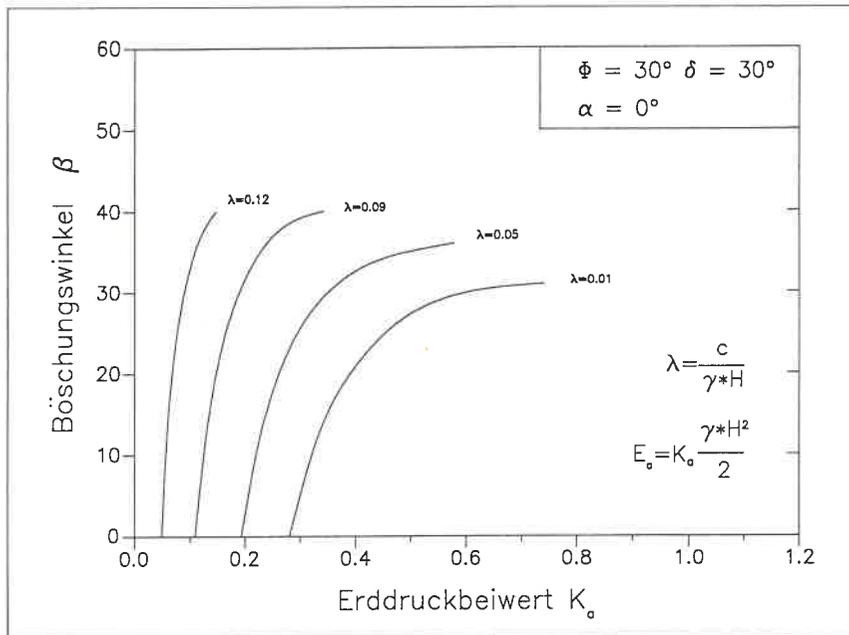
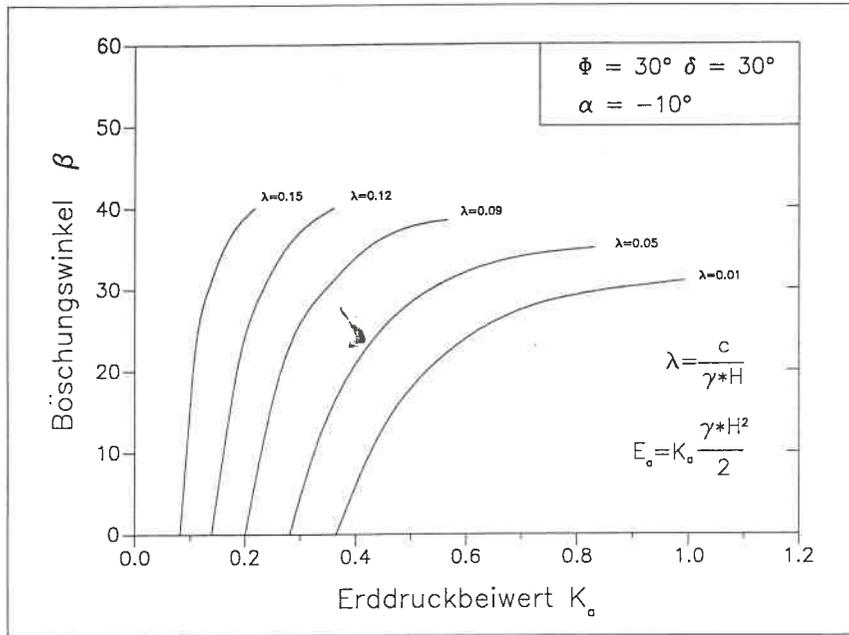


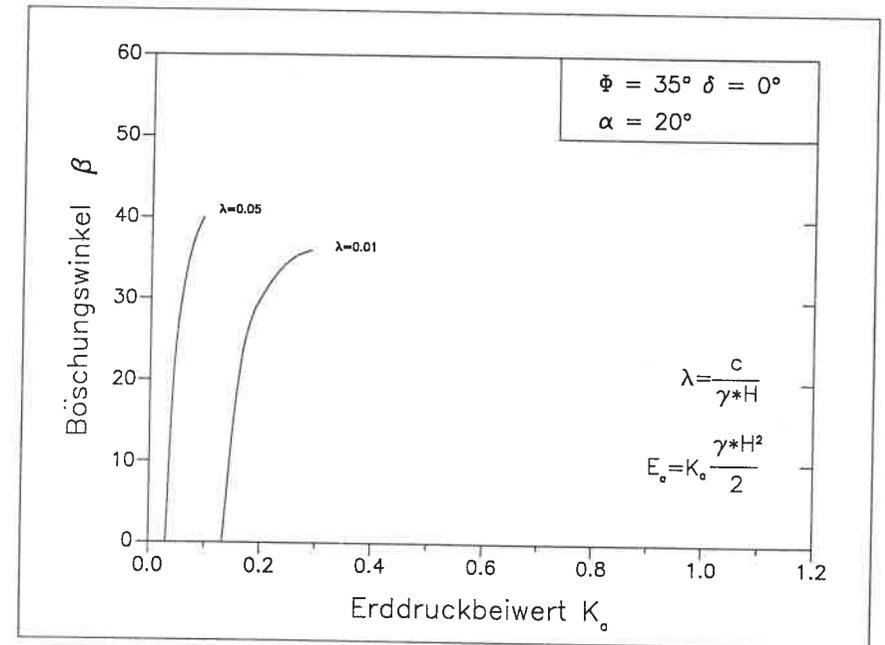
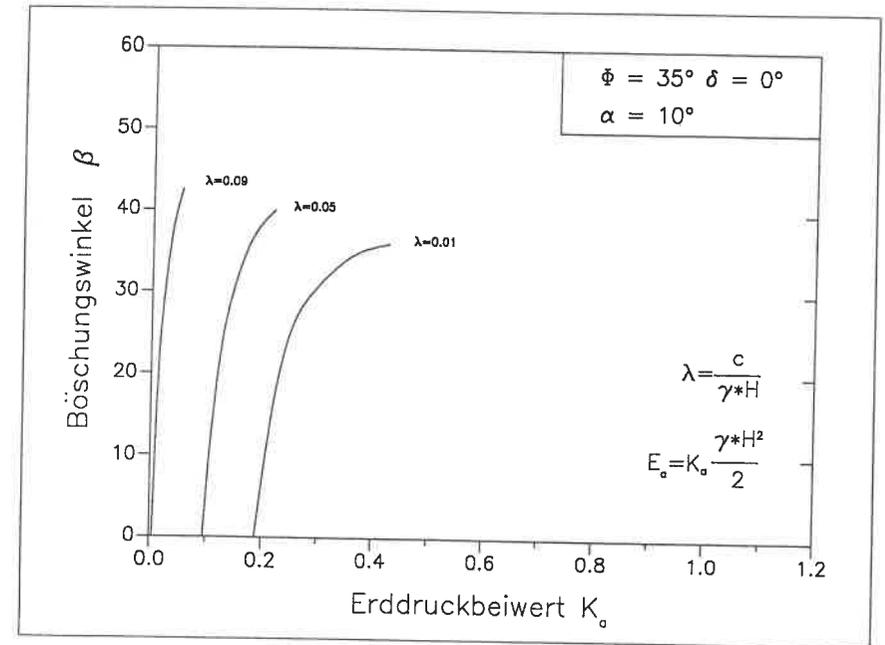
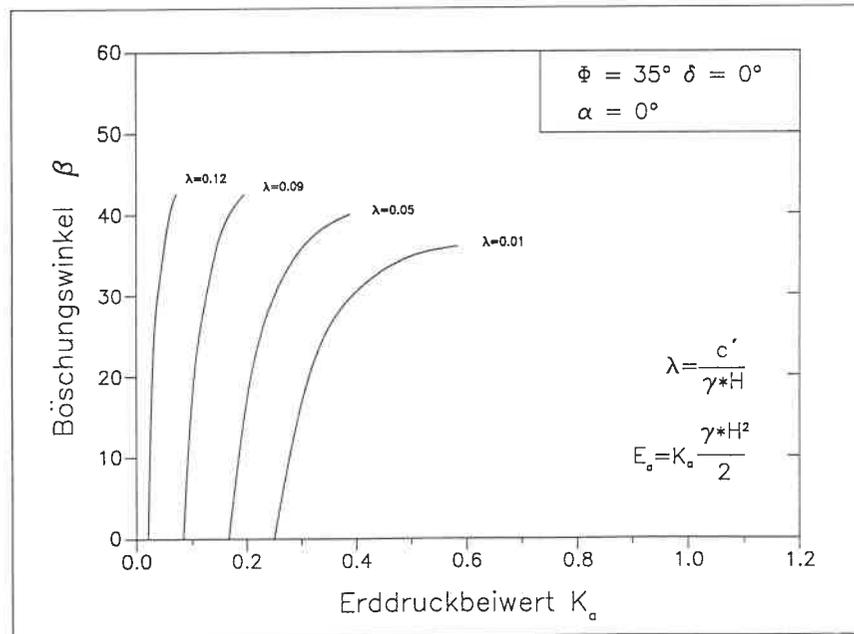
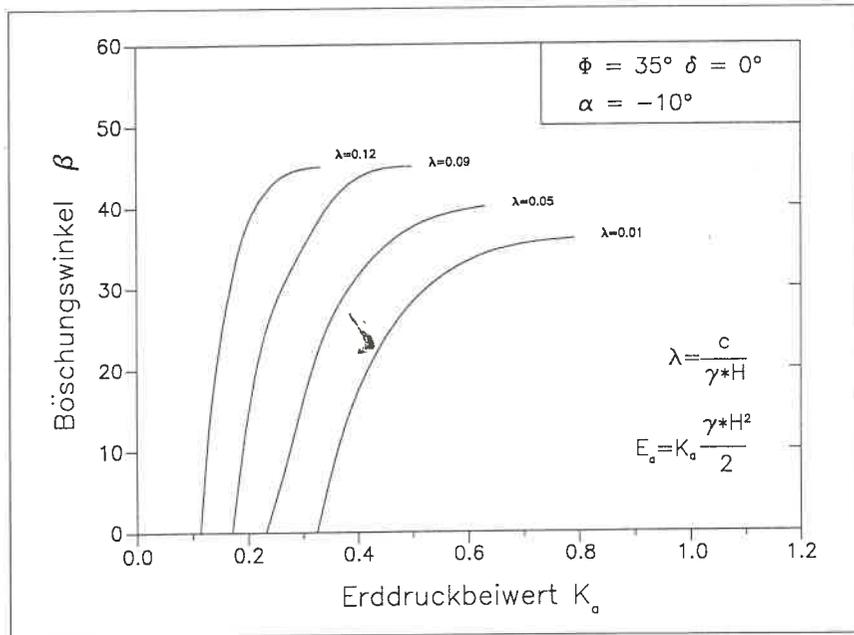


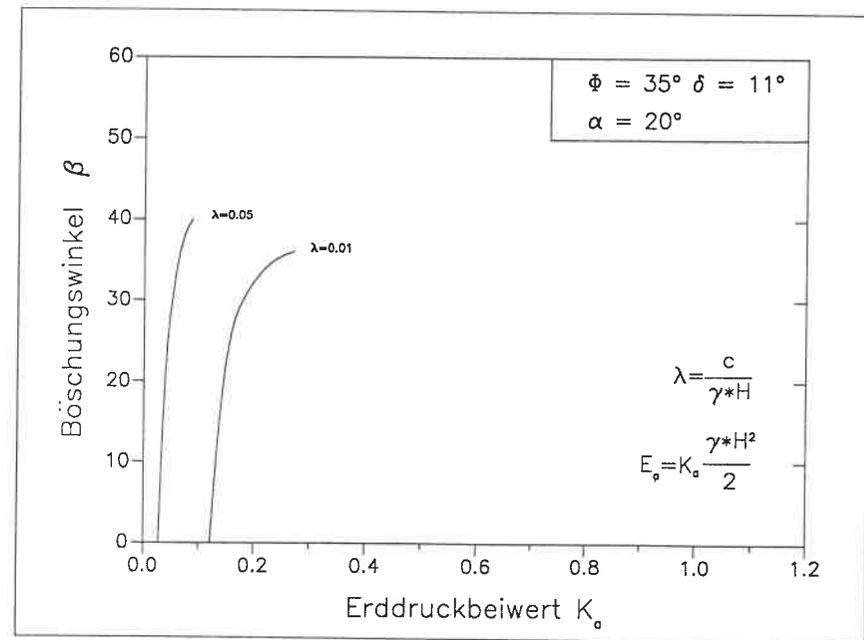
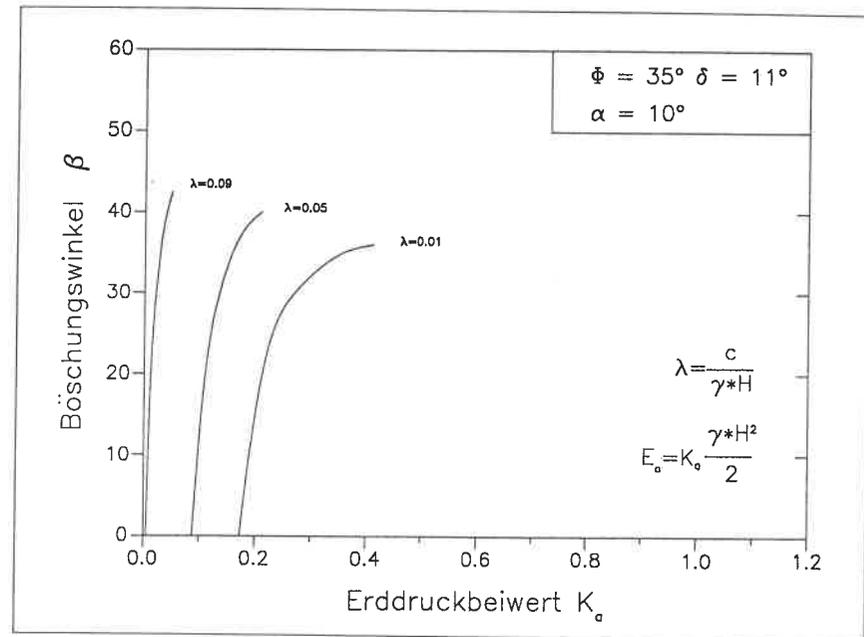
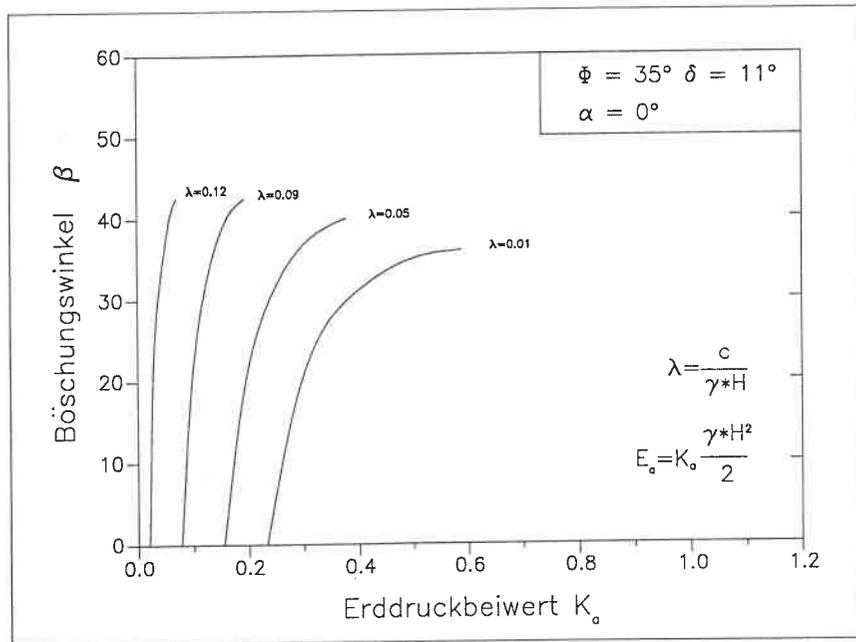
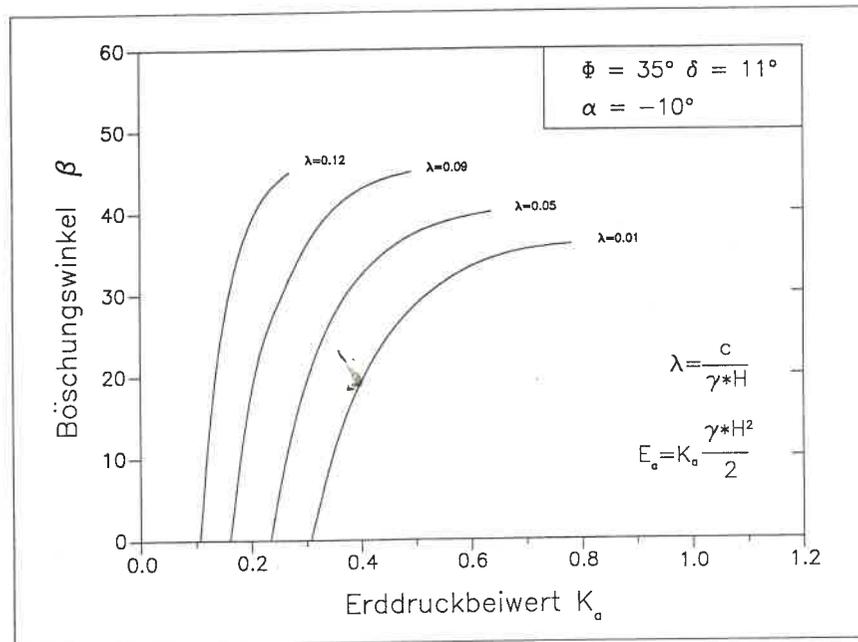


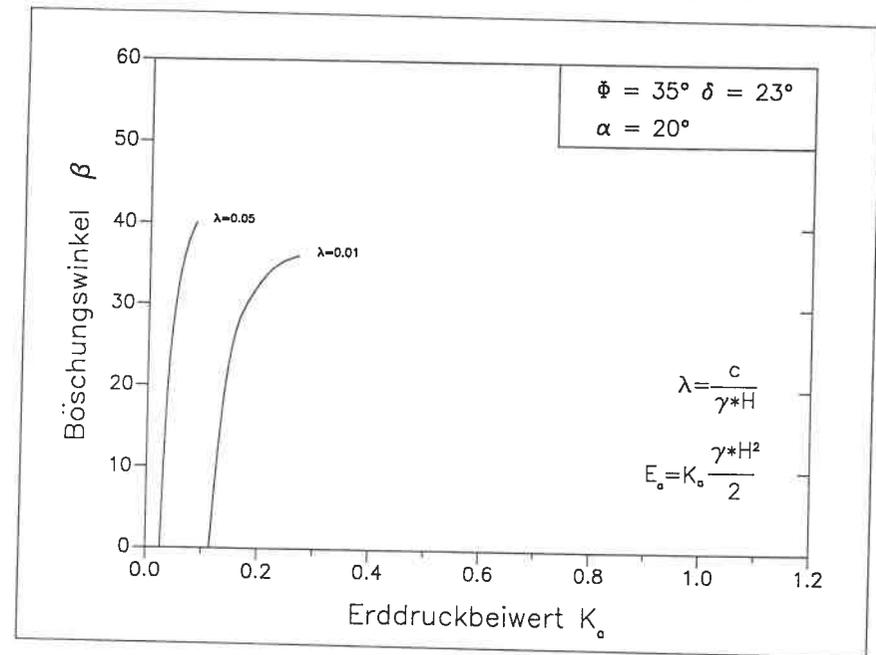
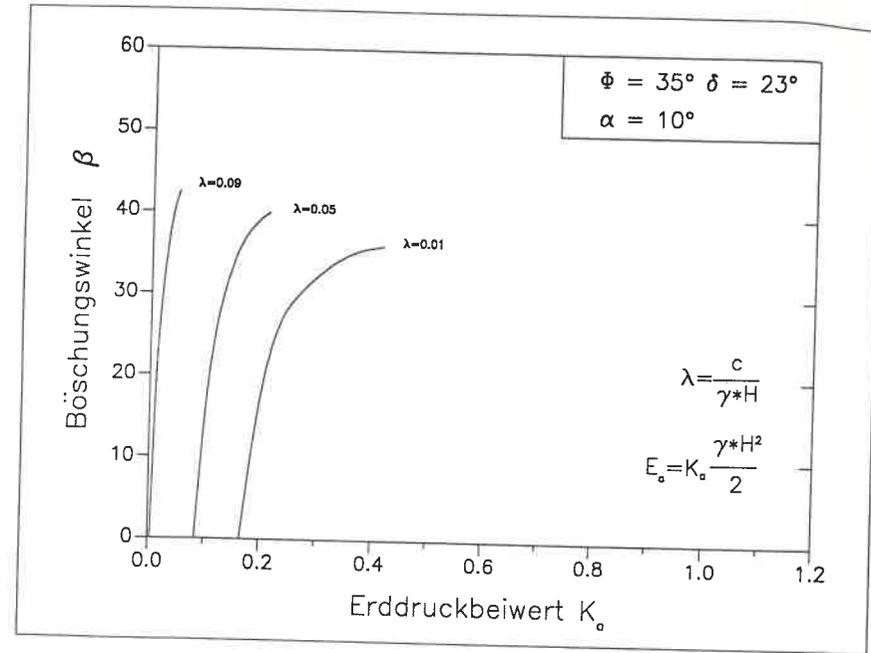
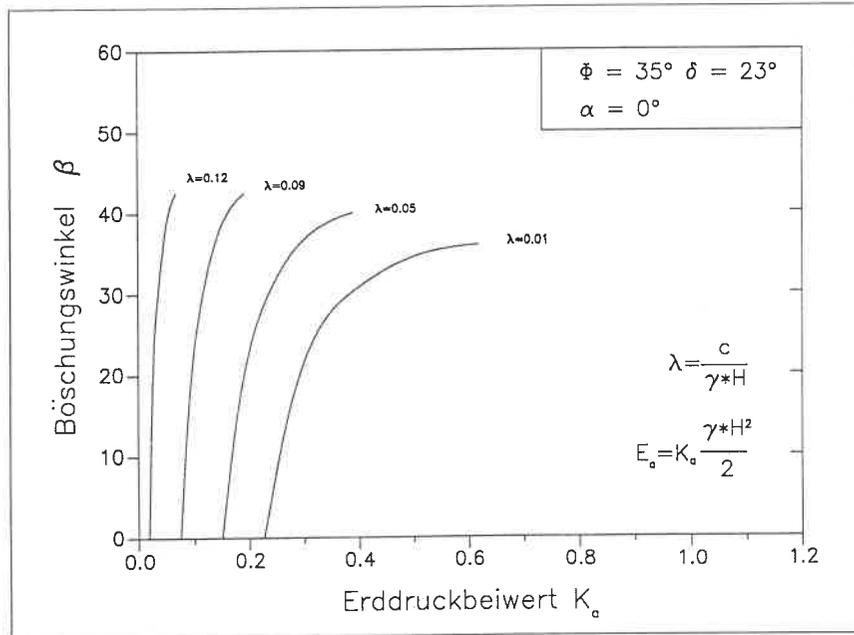
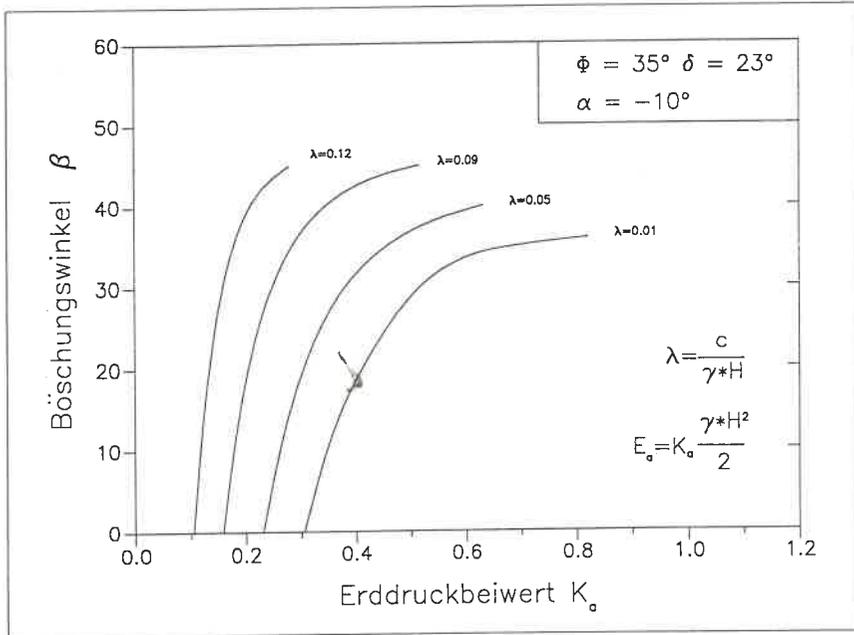


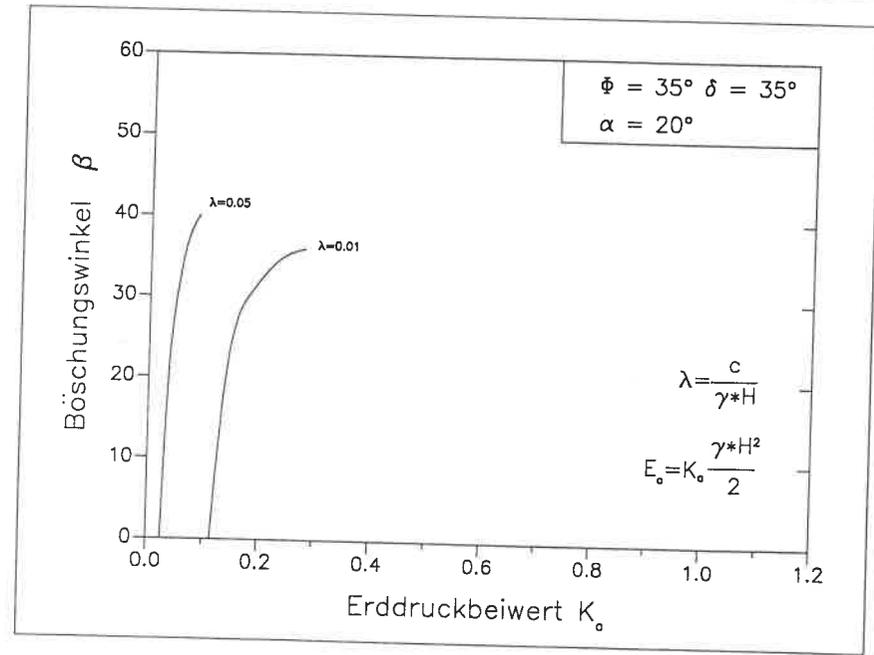
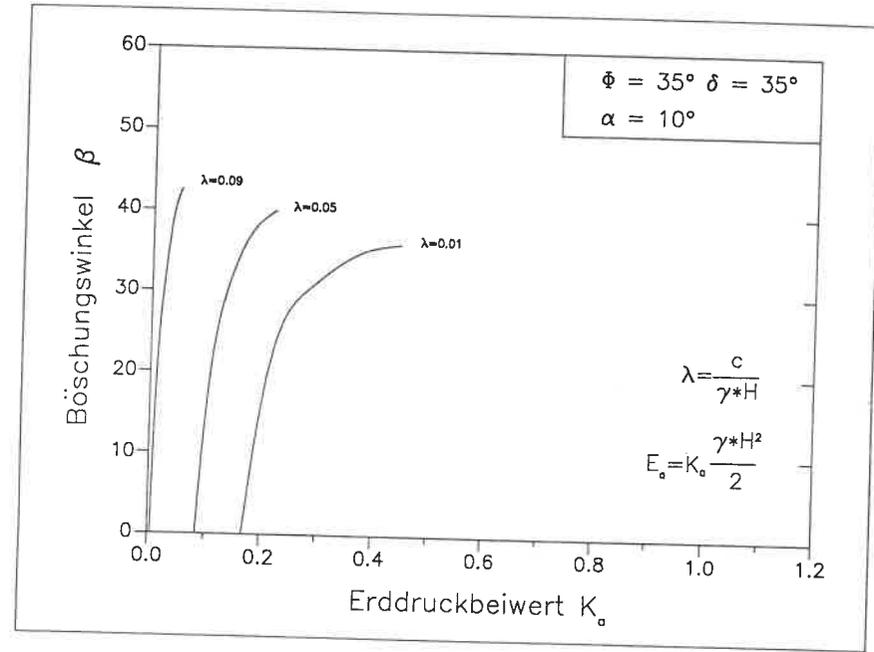
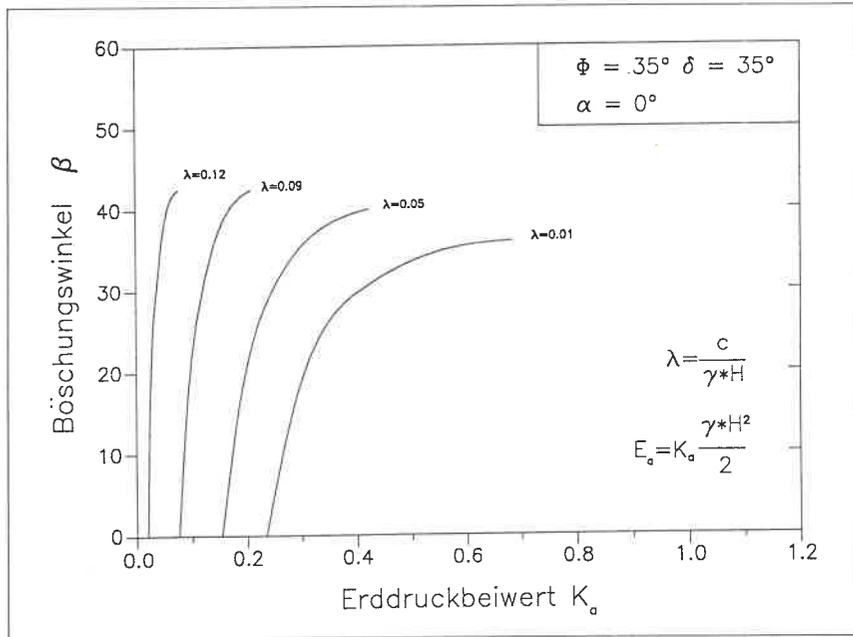
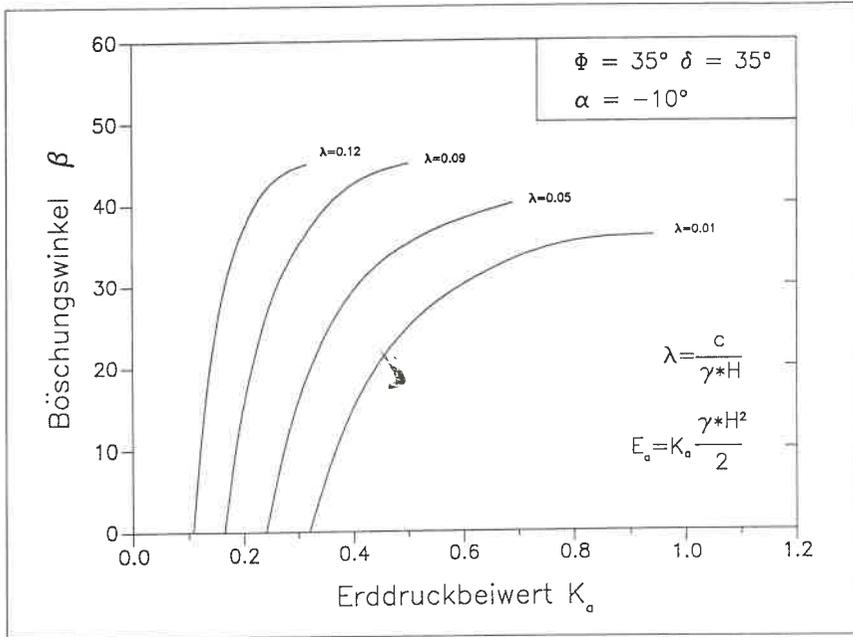


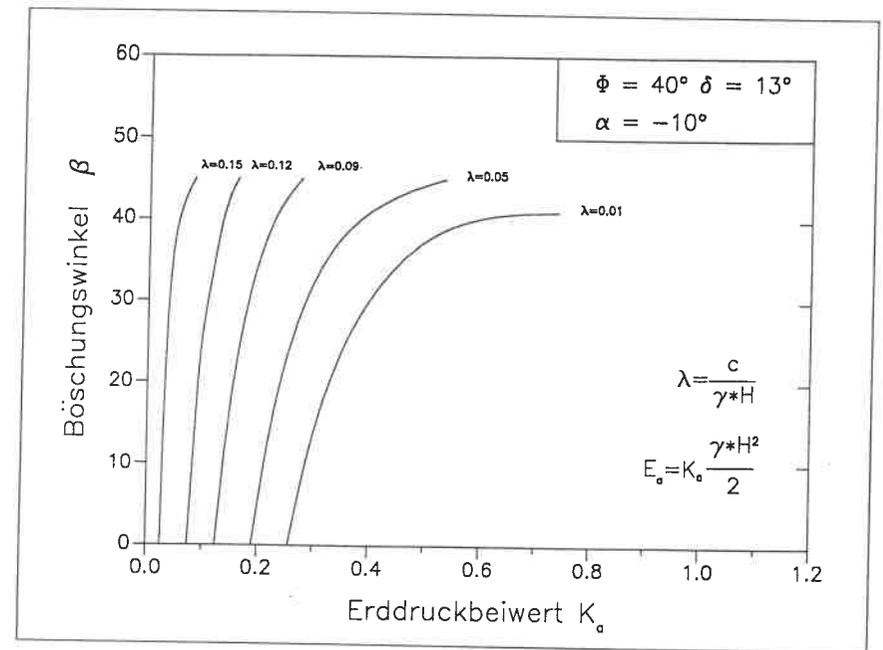
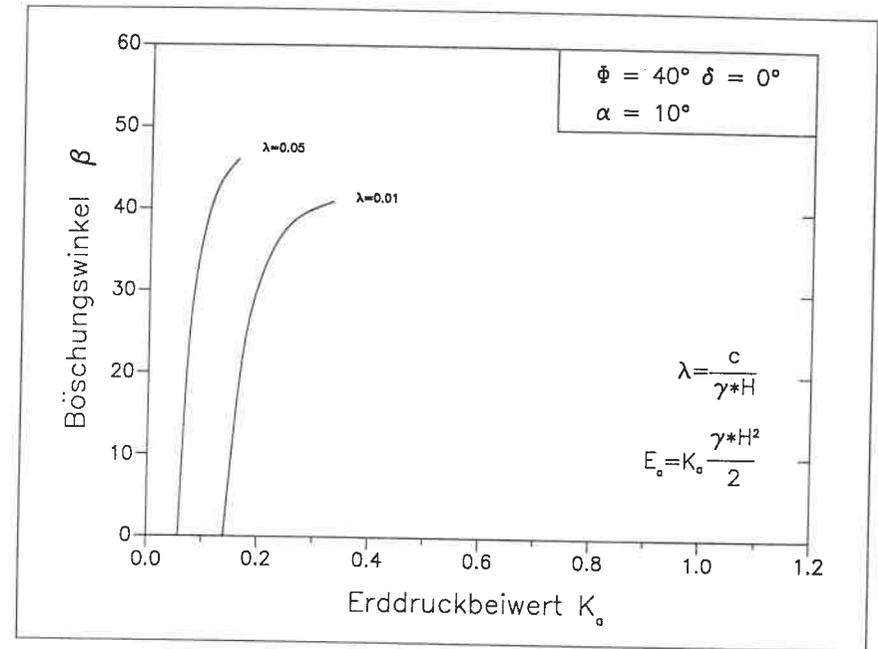
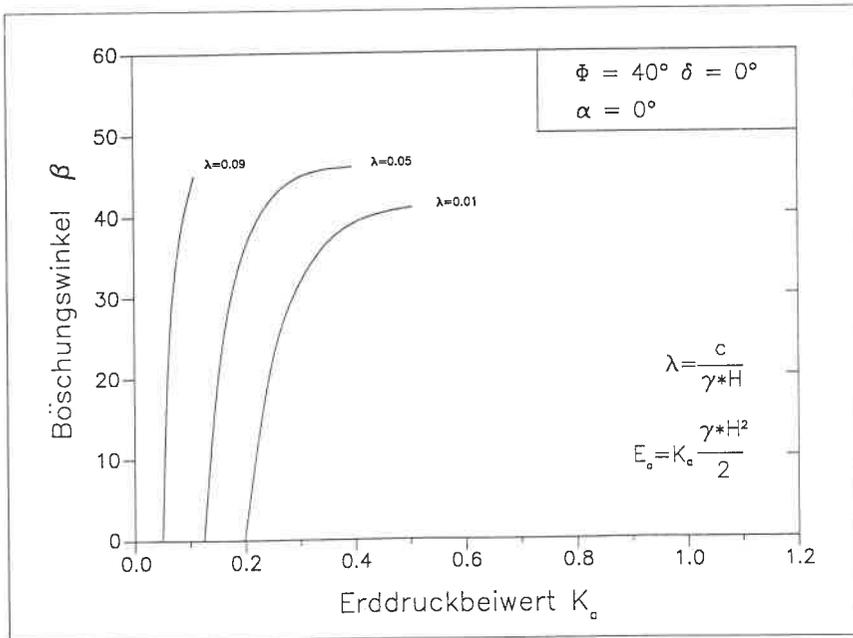
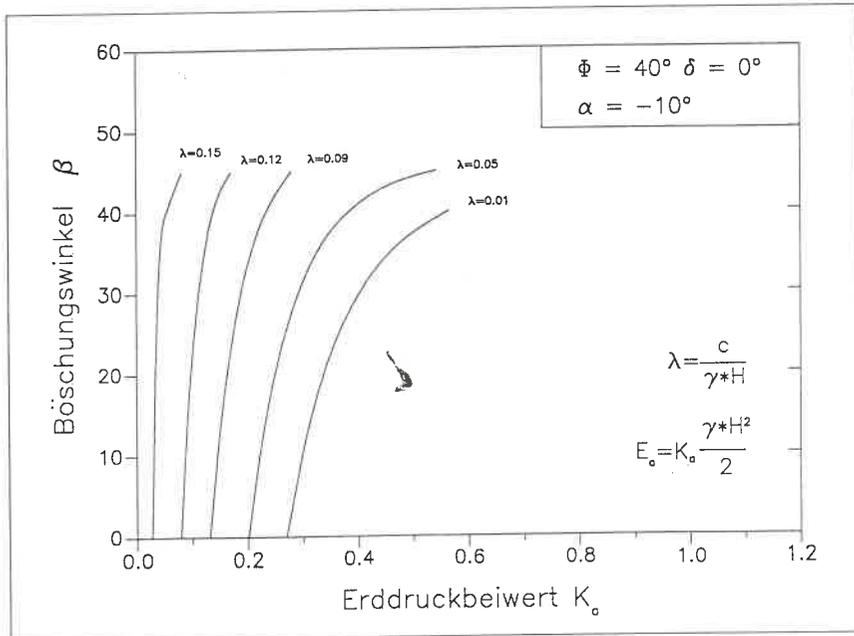


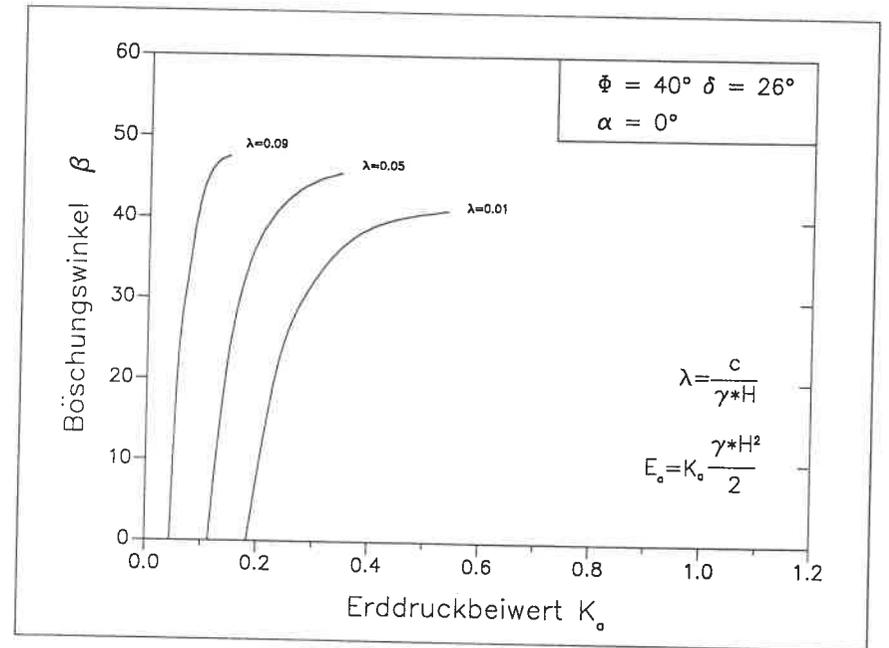
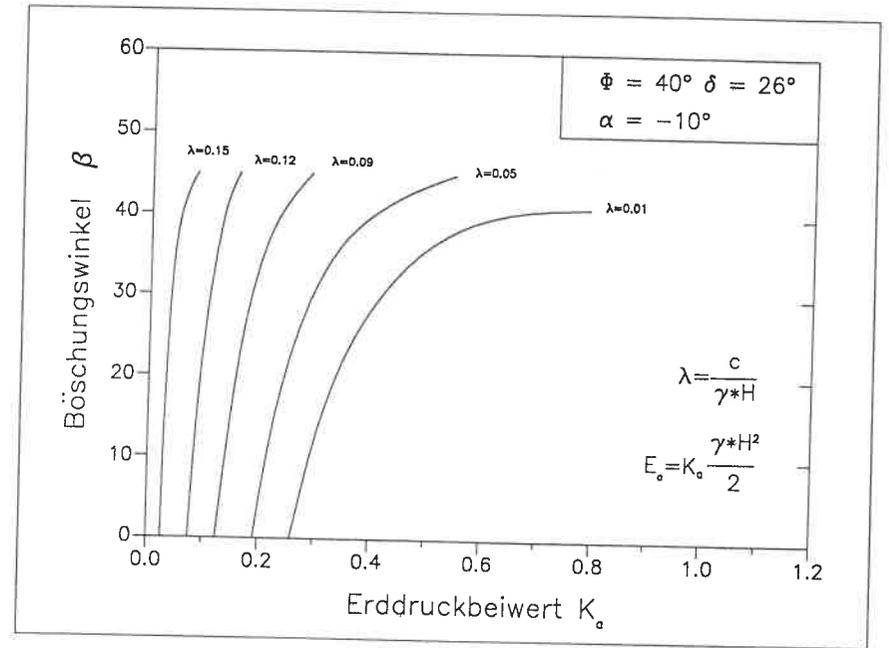
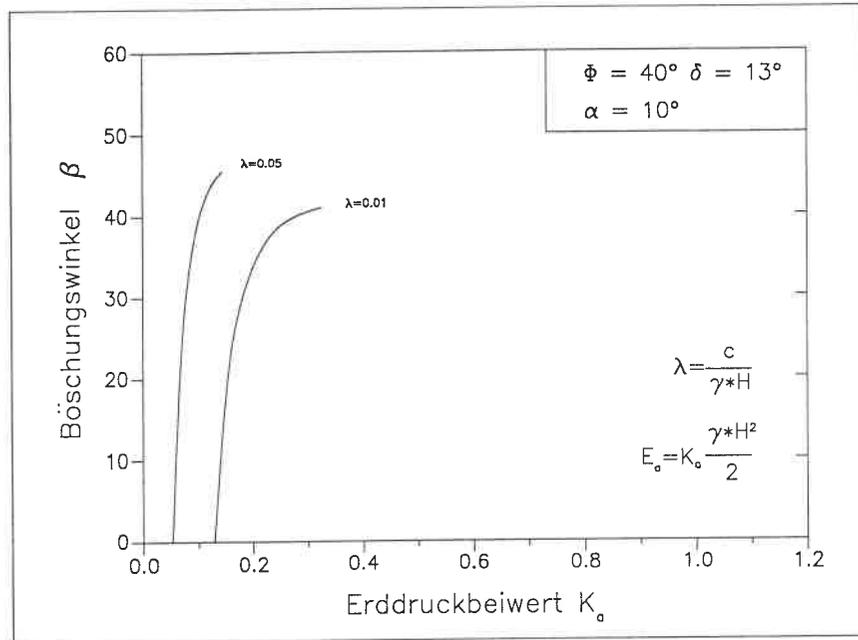
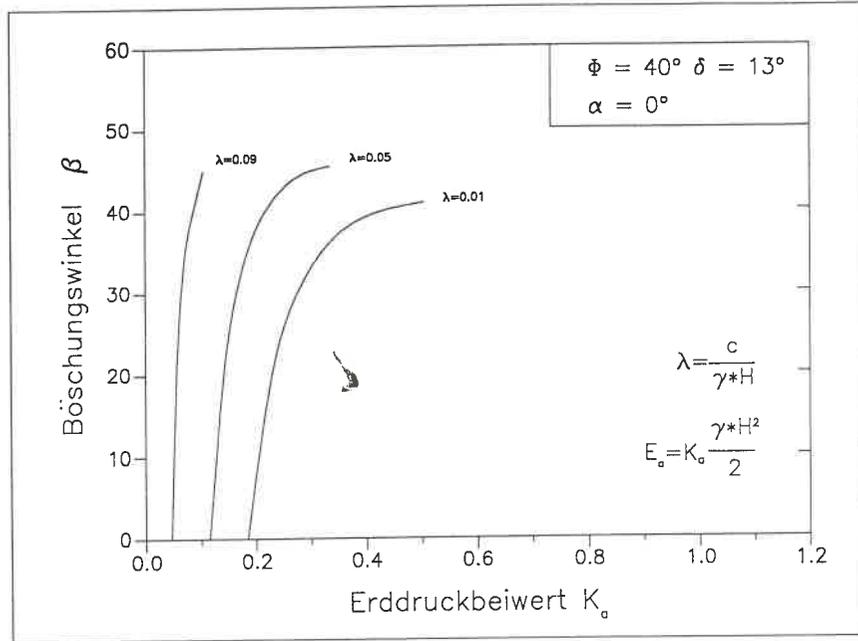


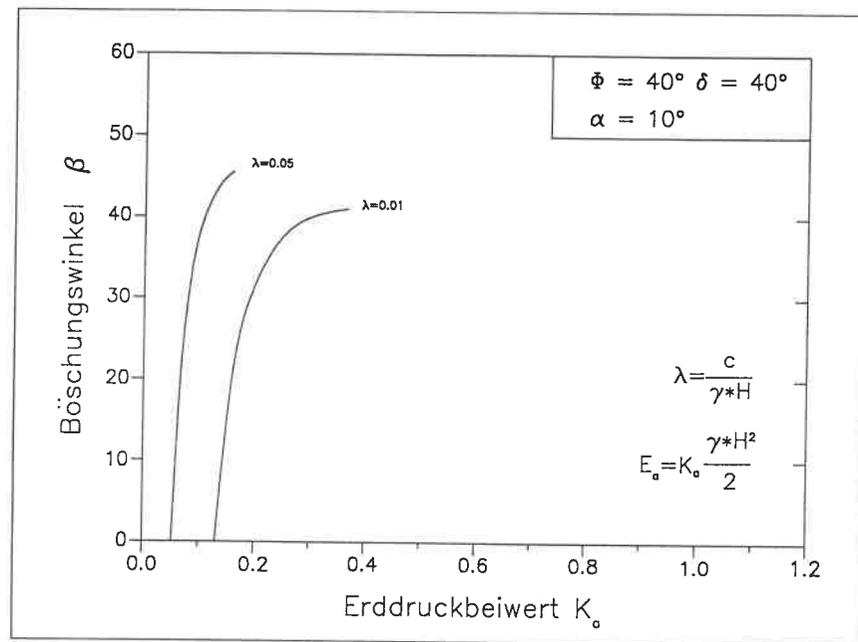
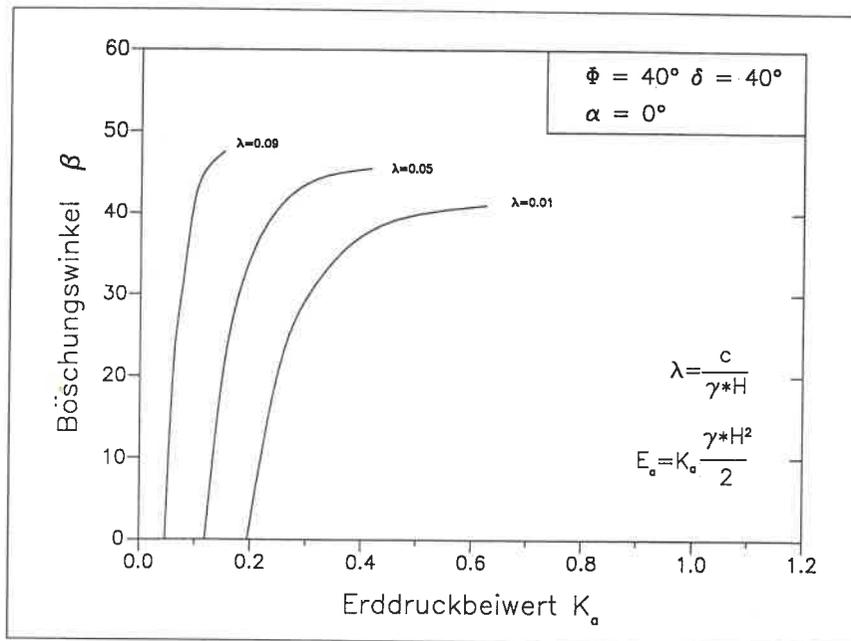
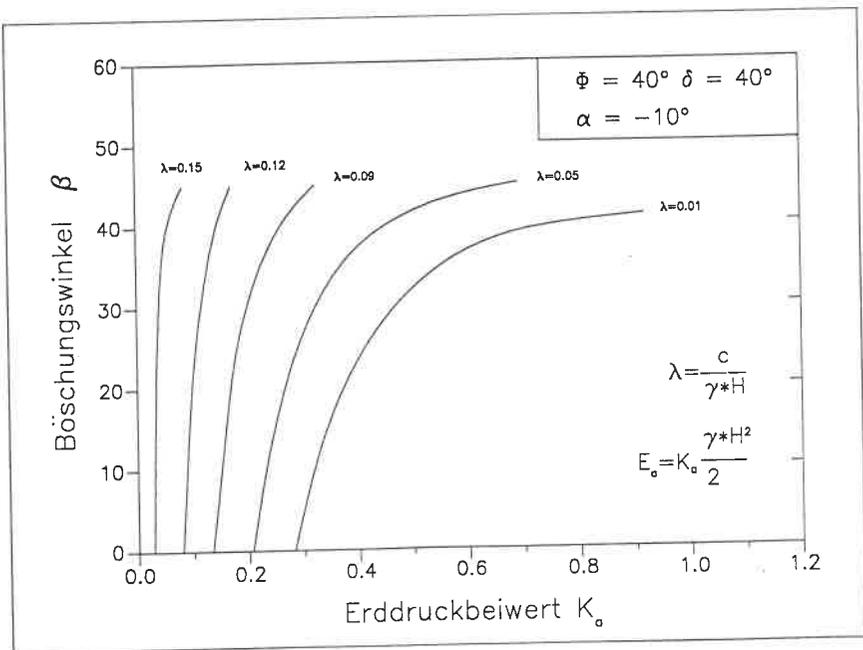
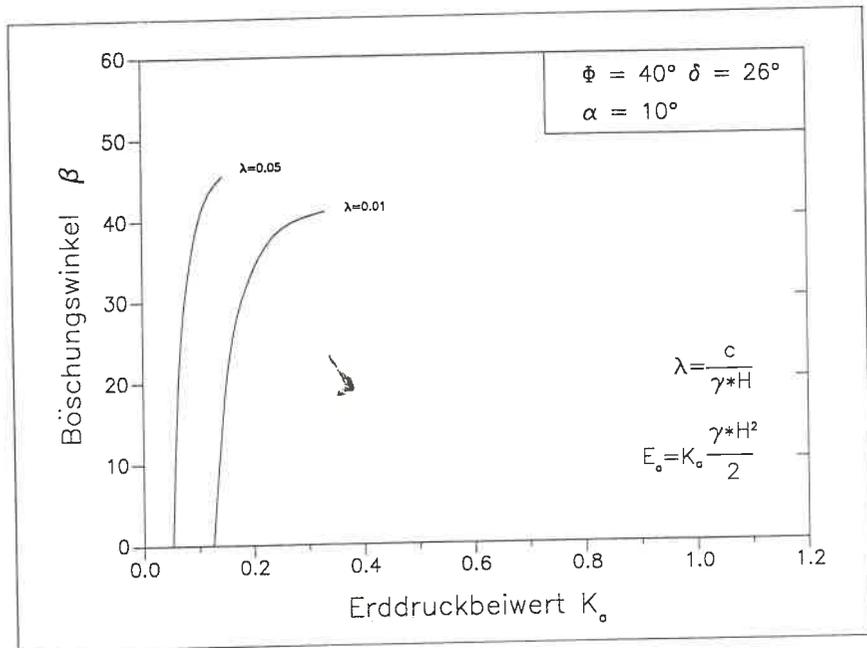


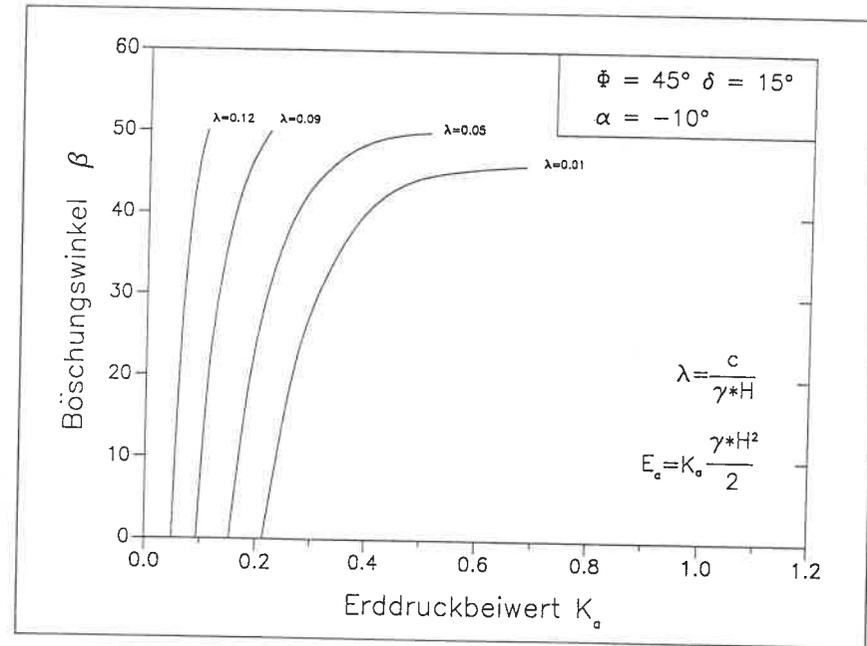
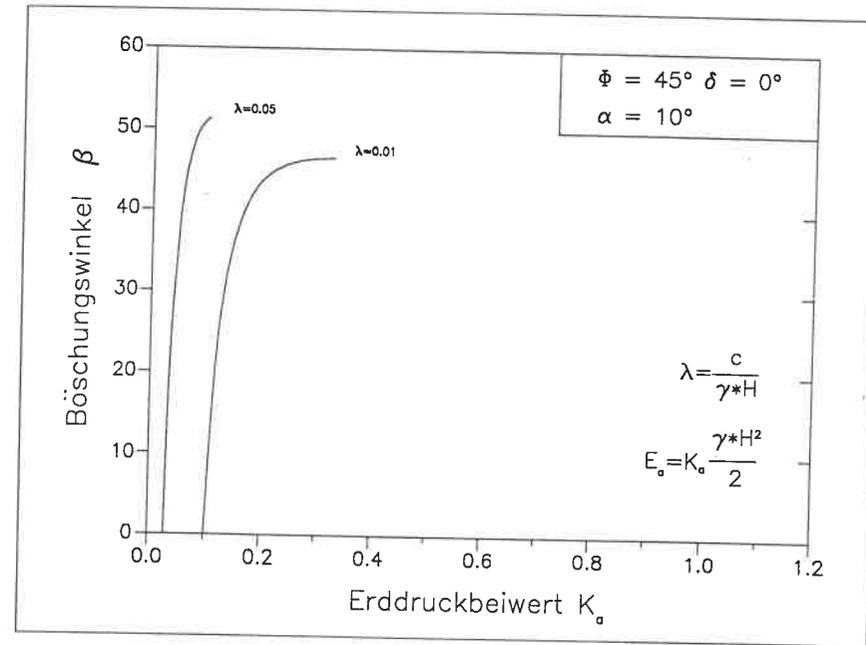
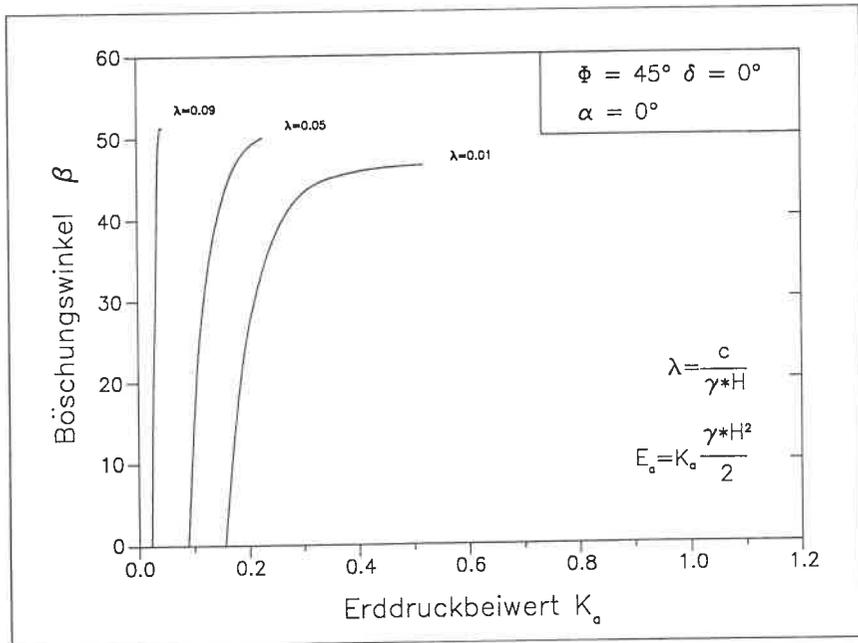
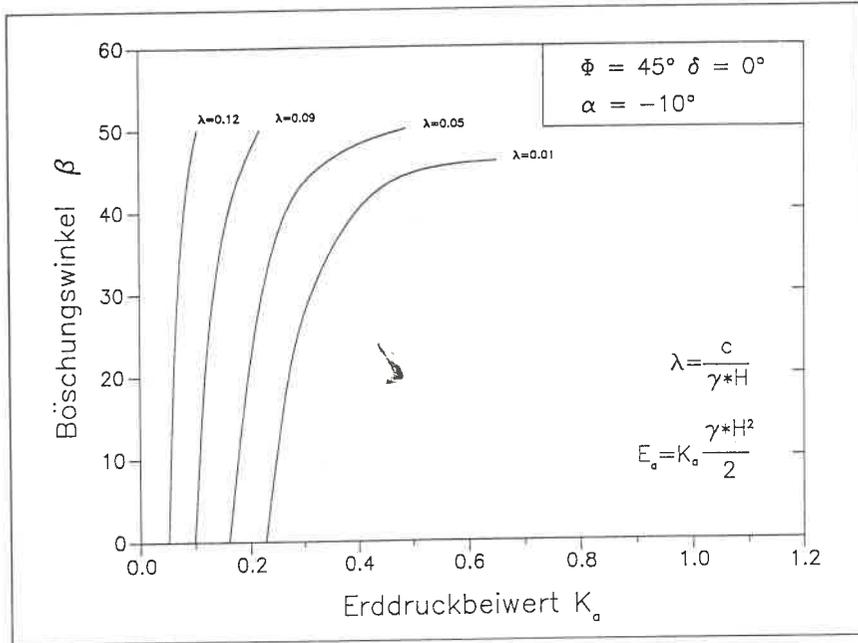


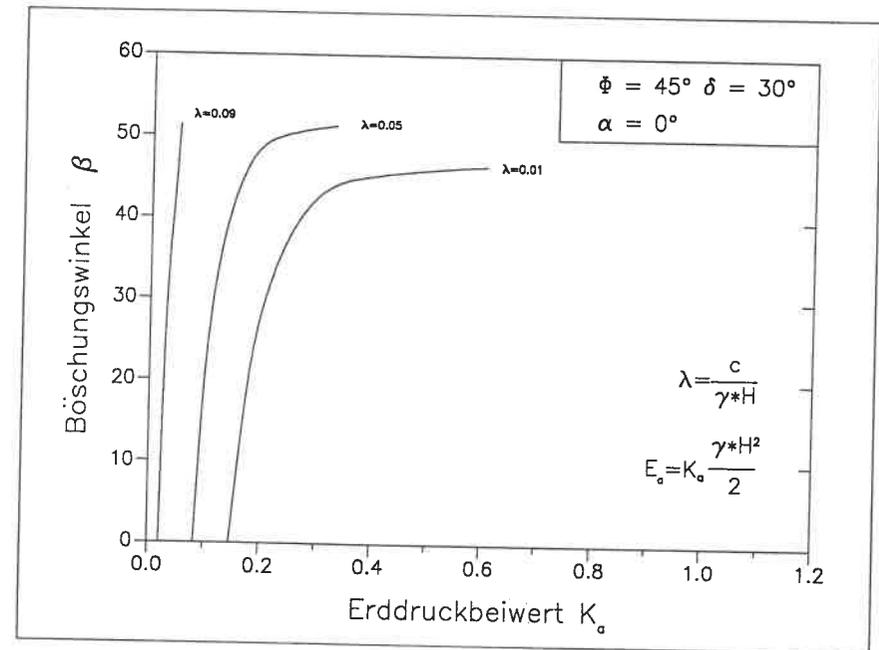
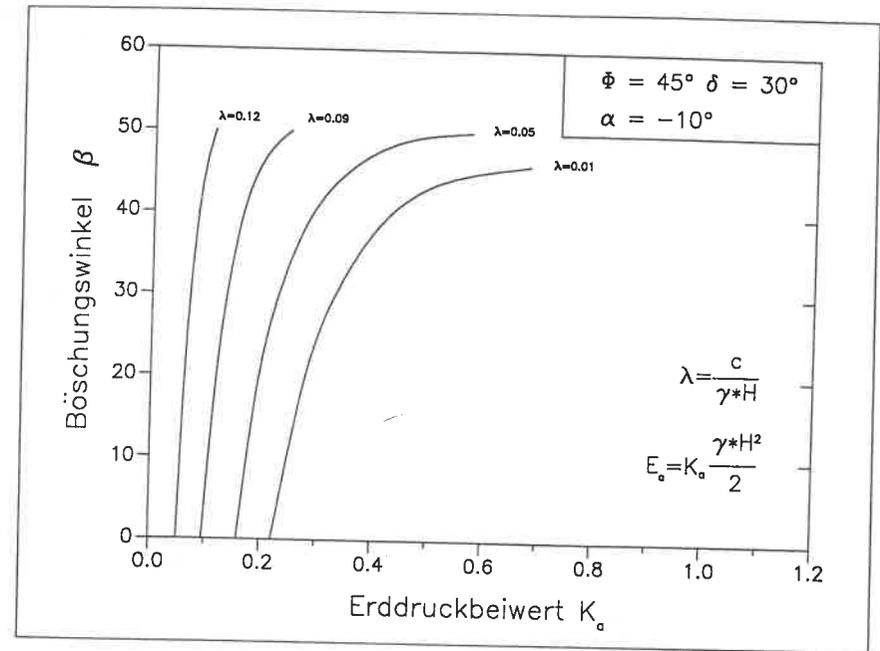
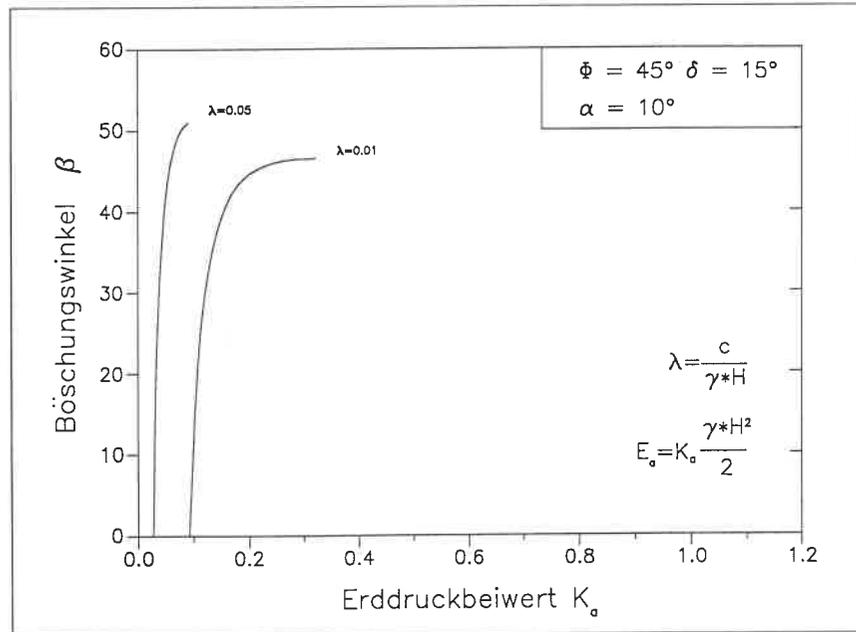
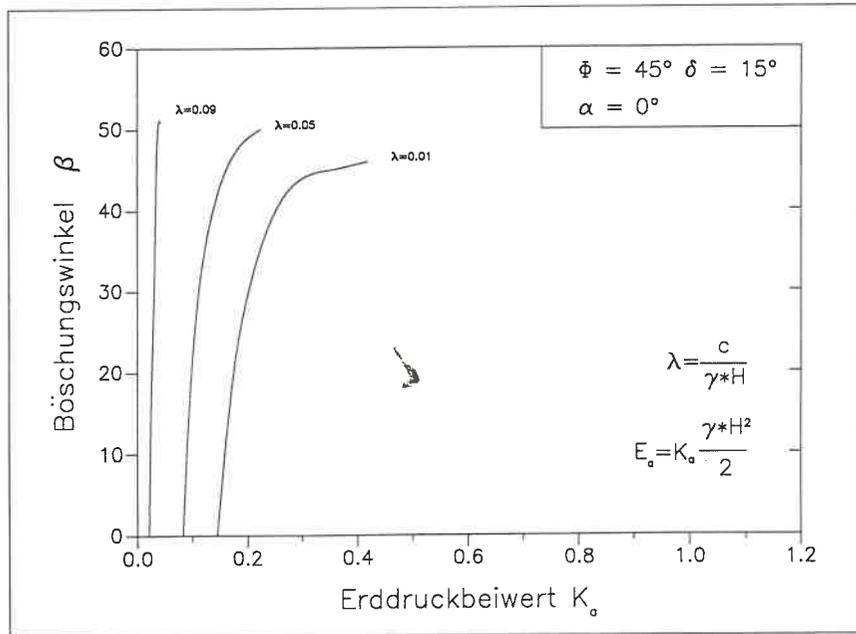


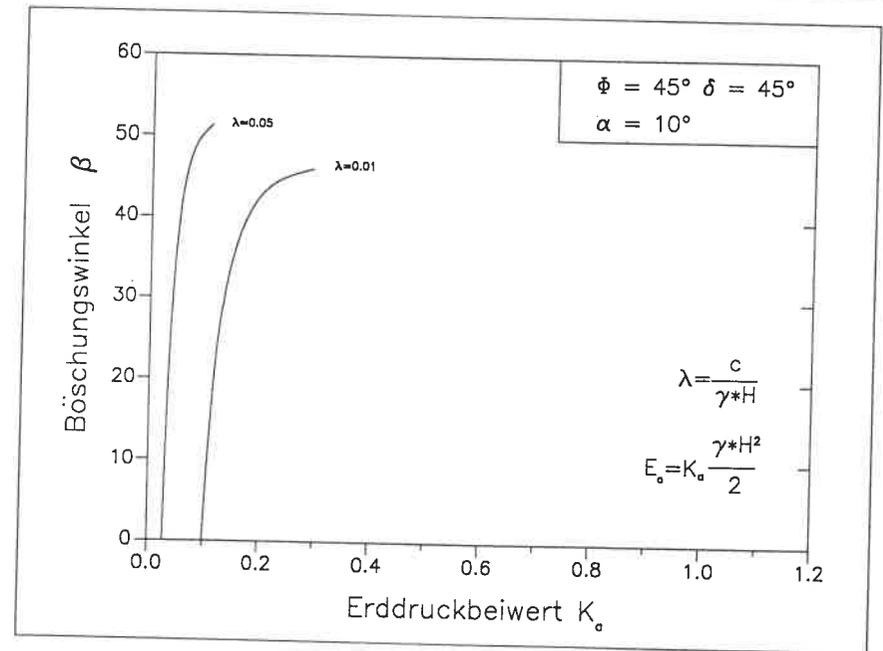
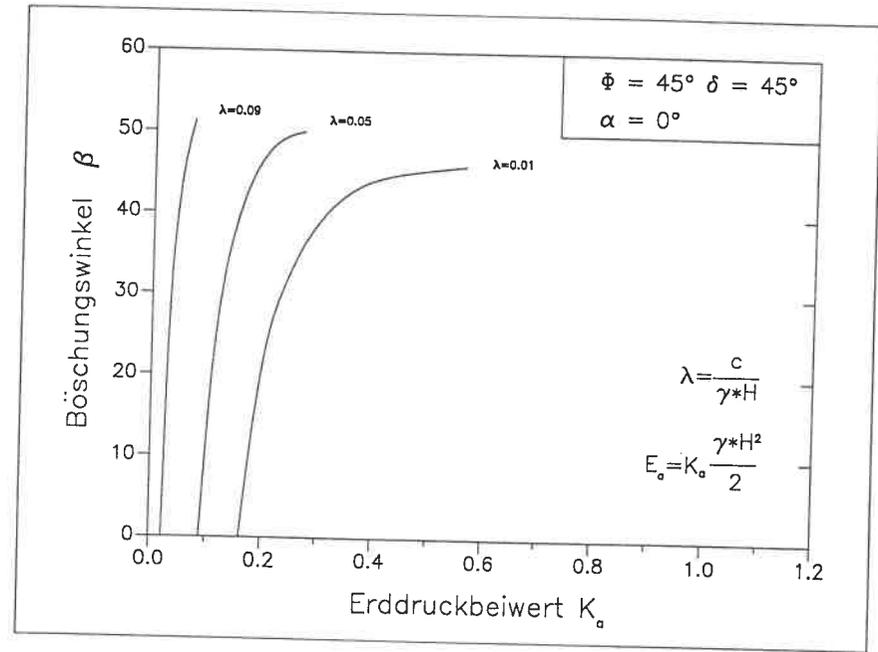
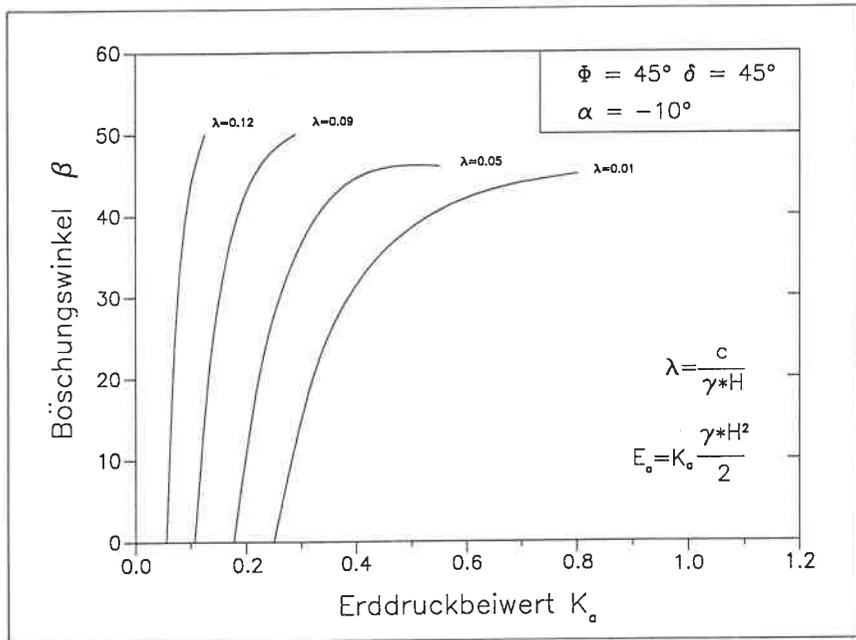
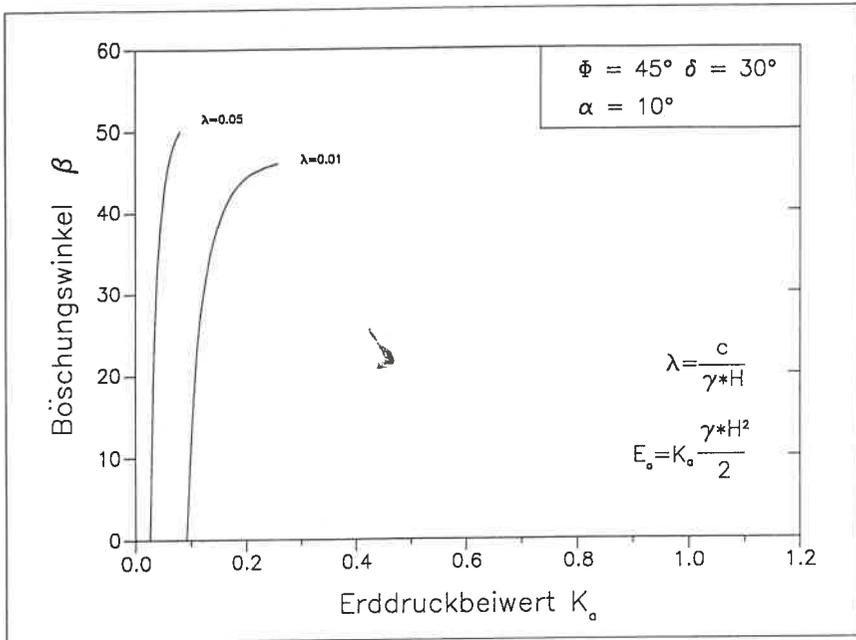












## Bibilographie

- Box 86 Box, M.J.: *A new method of constraint optimization and a comparison with other methods*, Computer Journal 8
- BRINCH/ HANSEN 60 Brinch Hansen, J., Lundgren, H.: *Hauptprobleme der Bodenmechanik*, Springer-Verlag, 1960
- COULOMB 1776 Coulomb, C.A.: *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs a l'architecture*, Mem. acad. royal des sciences, Vol.7, Paris 1776
- DAVIDON 75 Davidon, W.C.: *Optimally conditioned optimization algo rithms without line searches*, Math. Programming 9, p.1-30, 1975
- DAVIDON/ NAZARETH 77 Davidon, W.C./Nazareth, L.: *OCOPTR, A derivative free implementation of Davidon's optimally conditioned met hod*, Argonne National Lab., 1977
- GOLDSCHIEDER 79 Goldscheider, M.: *Stand sicherheitsnachweise mit zusammengesetzten Starrkörper-Bruchmechanismen*, Geotechnik, Heft 3, S. 130-139, 1979
- GROSS 81 Groß, H.: *Korrekte Berechnung des aktiven Erd drucks mit einer ebenen Gleitfläche bei Böden mit Reibung, Kohäsion und Auflast*, Geotechnik, Seite 66-69, 1981
- GUDEHUS 72 Gudehus, G.: *Lower and upper bounds for earth retaining structures*, Proc. 5, ECSMFE Madrid, Vol. 1, p. 21-28, 1972
- GUDEHUS GBT Gudehus, G.: *Erddruckermittlung*, Grundbautaschenbuch 3. Aufl., (Abschn. 1.12), Verlag W. Ernst & Sohn Berlin

- GUSSMANN 82 Gußmann, P.: *Kinematical elements for soils and rocks*, Proc. 4. Int. Conf. on Num. Meth. in Geomech., p. 47-52, Edmonton 1982
- GUSSMANN 86 Gußmann, P.: *Die Methode der Kinematischen Elemente*, Mitteilungsheft Nr. 25 des Baugrundinstituts Stuttgart, 1986
- GUSSMANN 88 Gußmann, P.: *KEM in geomechanics*, Numerical Methods in Geomechanics Innsbruck 1988, A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 1988
- MEYERHOF 50 Meyerhof, G. G.: *The ultimate bearing capacity of foundations*, Geotechnique Vol. II, p.301-331, 1950
- NELDER/ MEAD 65 Nelder, J.A./Mead, R.: *A simplex method for function minimization*, The Computer Journal 7, p. 308-313, 1965
- SCHWEIKERT 84 Schweikert, O.: *Der Einfluss des Böschungswinkel  $\beta$  auf die Berechnung des aktiven Erddrucks*, Mitteilungsheft Nr. 21 des Baugrundinstituts Stuttgart, 1984
- SMOLCZYK 87 Smolczyk, U.: *Zum Einfluß der Einbindetiefe auf den rechnerischen Nachweis der Tragfähigkeit von Einzelfundamenten*, Geotechnik, S. 153, 1987
- STURM 87 Sturm, U.: *Ein allgemeines Berechnungsverfahren für Grenzlastzustände im Grundbau*, Veröffentlichungen des Grundbauinstituts der Universität Berlin Heft 17, 1987
- SOKOLOVSI 60 Sokolovski, V. V.: *em Statics of soil media*, Butterworths Scientific Publications, 1960
- VSS VSS: *Stützmauern*, Selbstverlag, Zürich, 1966

## Mitteilungen des Instituts für Geotechnik

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. U. Smolczyk

- Nr. 1 Thamm, B.R. (1974) *Anfangssetzungen und Anfangsporenwasserüberdrücke eines normalverdichteten wassergesättigten Tones*  
DM 10,--
- Nr. 2 Gußmann, P. (1975) *Einheitliche Berechnung von Grundbruch und Böschungsbruch*  
DM 5,--
- Nr. 3 Feeser, V. (1975) *Die Bedeutung des Kalziumkarbonats für die bodenphysikalischen Eigenschaften von Löß*  
DM 10,--
- Nr. 4 Du Thinh, K. (1976) *Standsicherheit von Böschungen: Programm-Dokumentation*  
vergriffen
- Nr. 5 Smolczyk, U./ Pertschi, O./ Hilmer, K. (1976) *Messungen an Schleusen in der UdSSR. Schleusennorm der UdSSR (SN 303-65)*  
vergriffen
- Nr. 6 Hilmer, K. (1976) *Erddruck auf Schleusenkammerwände*  
DM 18,--
- Nr. 7 Laumans, Q. (1977) *Verhalten einer ebenen, in Sand eingespannten Wand bei nichtlinearen Stoffeigenschaften des Bodens*  
DM 18,--
- Nr. 8 Lächler, W. (1977) *Beitrag zum Problem der Teilflächenpressung bei Beton am Beispiel der Pfahlkopfanschlüsse*  
DM 15,--

- Nr. 9 Spotka, H. (1977) Einfluß der Bodenverdichtung mittels Oberflächen-Rüttelgeräten auf den Erddruck einer Stützwand bei Sand  
DM 15,--
- Nr. 10 Schad, H. (1979) Nichtlineare Stoffgleichungen für Böden und ihre Verwendung bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben  
DM 20,--
- Nr. 11 Ulrich, G. (1980) Verschiebungs- und kraftgesteuerte Plattendruckversuche auf konsolidierenden Böden  
Gußmann, P. (1980) Zum Modellgesetz der Konsolidation  
DM 20,--
- Nr. 12 Salden, D. (1980) Der Einfluß der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten  
DM 25,--
- Nr. 13 Seeger, H. (1980) Beitrag zur Ermittlung des horizontalen Bettungsmoduls von Böden durch Seitendruckversuche im Bohrloch  
DM 25,--
- Nr. 14 Schmidt, H.H. (1981) Beitrag zur Ermittlung des Erddrucks auf Stützwände bei nachgiebigem Baugrund  
DM 25,--
- Nr. 15 Smolczyk, U. (1981) Vorstudie über bauliche Alternativen für Durchgangsstraßen in Siedlungen  
Schweikert, O.  
DM 12,--
- Nr. 16 Malcharek, K. (1981) Vergleich nationaler Richtlinien für die Berechnung von Fundamenten  
Smolczyk, U.  
DM 15,--

- Nr. 17 Gruhle, H.-D. (1981) Das Verhalten des Baugrundes unter Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als räumliches Problem des Erdwiderstandes  
DM 30,--
- Nr. 18 Kobler, W. (1982) Untersuchungen über Böschungs- und Grundbruch bei begrenzten Lastflächen  
DM 25,--
- Nr. 19 Lutz, W. (1983) Tragfähigkeit des geschlitzten Baugrunds neben Linienlasten  
DM 25,--
- Nr. 20 Smolczyk, U. (1983) Studienunterlagen "Bodenmechanik und Grundbau"; überarbeitete Ausgabe (1988)  
DM 35,--
- Nr. 21 Schweikert, O. (1984) Der Einfluß des Böschungswinkels  $\beta$  auf die Berechnung des aktiven Erddrucks  
DM 20,--
- Nr. 22 Vogt, N. (1984) Erdwiderstandsermittlung bei monotonen und wiederholten Wandbewegungen in Sand  
vergriffen
- Nr. 23 Buchmaier, R. (1985) Zur Berechnung von Konsolidationsproblemen bei nichtlinearem Stoffverhalten  
DM 25,--
- Nr. 24 Schad, H. (1985) Möglichkeiten der Böschungssicherung bei kleinen Baugruben  
Smolczyk, U./  
Schad, H./  
Zoller, P. Sonderkonstruktionen der Böschungssicherung  
DM 35,-
- Nr. 25 Gußmann, P. (1985) Die Methode der Kinematischen Elemente  
DM 20,--

- Nr. 26 Steinmann, B. (1985) Zum Verhalten bindiger Böden bei monotoner einaxialer Beanspruchung  
DM 25,--
- Nr. 27 Lee, S.D. (1987) Untersuchungen zur Standsicherheit von Schlitzten im Sand neben Einzel-fundamenten  
DM 25,--
- Nr. 28 Kolb, H. (1988) Ermittlung der Sohlreibung von Gründungskörpern unter horizon-talem kinematischen Zwang  
DM 25,--
- Nr. 29 Ochmann, H. (1988) Ebene Grenzzustände von Erd-böschungen im stochastischen Sicherheitskonzept  
DM 25,--
- Nr. 30 Breinlinger, F. (1989) Bodenmechanische Stoffgleichungen bei großen Deformationen sowie Be- und Entlastungsvorgängen  
DM 30,--
- Nr. 31 Smolczyk, U./ (1989) Beitrag zur Bemessung von Tunneln in offener Bauweise  
Schad, H./ Wittlinger, M.  
DM 25,--
- Nr. 32 Gußmann, P./ (1990) Beiträge zur Anwendung der KEM (Erddruck, Grundbruch, Stand-sicherheit von Böschungen)  
Schanz, T./ Smolczyk, U./ Willand, E.  
DM 30,--
- [20] Gußmann, P./ (1974) Zweidimensionale Konsolidation dreiaxialer Versuchspröben.  
Thamm, B.R.  
Der Bauingenieur 49, S. 293-298.
- [21] Gußmann, P. (1974) Über den Einfluß unterschiedlicher Wasser-druckansätze auf die Standsicherheit von durchströmten Böschungen.  
Der Bauingenieur 49, S. 298-301.
- [22] Smolczyk, U./ (1974) DIN 4084 Beiblatt, Erläuterungen und Berechnungsbeispiele.  
Gußmann, P./ Schulz, H.  
20 S., Beuth-Verlag Berlin/Köln.
- [23] Laumans, Q. (1975) Die Anwendung der Methode finiter Elemente auf Flächengründungen.  
Technische Akademie Wuppertal, Heft 14.
- [24] Smolczyk, U. (1975) Graving Dock Foundation on Deep Fill.  
Proc. 1th Baltic Conf. SMFE, Gdansk, Vol. III, S. 213-222.
- [25] Smolczyk, U./ (1975) Zur Bebaubarkeit von vorbelasteten Verwitte-rungsböden.  
Du Thinh  
Fortschritts-Berichte VDI-Z., Reihe 4, Nr. 25, 70 S.
- [26] Smolczyk, U. (1975) Anmerkungen zum Gleitkreisverfahren.  
in: Festschrift Lorenz, TU Berlin, S. 203-218.
- [27] Smolczyk, U. (1975) Wie kann man Baugruben verbilligen?  
Der Architekt 2, S. 94-103.
- [28] Smolczyk, U. (1975) Schwierigkeiten beim Bauen im entfestigten Tonstein.  
Veröff. Inst. Felsmech. Bodenmech. Univer-sität Karlsruhe 63, S. 21-50.
- [29] Smolczyk, U. (1976) Pfahlgründung eines Eisenbahndammes.  
Proc. 6th Europ. Conf. SMFE, Wien, Vol. 1.2, S. 561-566.
- [30] Smolczyk, U./ (1976) Erddruck auf Schleusen-kammerwände.  
Hilmer, K.  
Votr. Baugrundtagung, Nürnberg, S. 245-265.
- [31] Smolczyk, U. (1976) Bau eines Großdocks; Baugrundverbesserung in tiefem Wasser.  
Votr. Baugrundtagung, Nürnberg, S. 575-592.

- [11] Gußmann, P. (1974) Different methods of evaluating the influence of seepage forces on slope stability. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 61-73.
- [12] Gußmann, P./ (1974) Practical considerations in the application of finite element techniques to soil problems. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 74-90.
- [13] Gußmann, P./ (1974) One-dimensional consolidation of multi-layered clays. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 91-102.
- [14] Gußmann, P./ (1974) Two-dimensional consolidation of triaxial test specimen. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 103-117.
- [15] Schad, H. (1974) Stresses in concrete caisson bells. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 118-121.
- [16] Smolczyk, U. (1974) Improved technique for foundations on slopes. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 122-129.
- [17] Smolczyk, U./ (1974) Pressure cell for the measurement of normal and shear stress. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 130-136.
- [18] Smolczyk, U./ (1974) Stabilizing sand grains by overhead water pressure in bell bottoms of caisson piles. Deutsche Beiträge zur Geotechnik Nr. 2, S. 137-141.

Die Nummern 11 bis 18 enthält das o.g. Heft Geotechnik Nr. 2, das von der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR ERD- UND GRUNDBAU E.V., Essen, zum Preis von DM 20.- verkauft wird.

- [19] Smolczyk, U. (1975) Die Anwendung der Finiten Elemente in der Grundbaupraxis. CAD-Berichte Heft 1 der Gesellschaft für Kernforschung Karlsruhe.

## Weitere Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und seiner Mitarbeiter

- [1] Smolczyk, U. (1971) Studienunterlagen "Bodenmechanik und Grundbau". s.a. Mitteilungen des Instituts für Geotechnik Stuttgart (überarbeitete Ausgaben 1983, 1988)
- [2] Smolczyk, U. (1972) Über die kritische Höhe elastisch gebetteter Türme. Der Bauingenieur 47, S. 59-60.
- [3] Smolczyk, U. (1972) Bodenmechanik zwischen Naturwissenschaft und Technik. Der Bauingenieur 47, S. 73-80.
- [4] Smolczyk, U. (1972) Der Zugwiderstand von Pfählen. Der Bauingenieur 47, S. 144-145.
- [5] Smolczyk, U. (1972) Keupermechanik. Votr. Baugrundtagung, Stuttgart, S. 407-419.
- [6] Smolczyk, U./ (1972) Zum Stellenwert der theoretischen Bodenmechanik. Gußmann, P. Votr. Baugrundtagung, Stuttgart, S. 551-579.
- [7] Gußmann, P. (1973) Ausgleichsvorgänge eindimensionaler Strömungen bei beliebiger Anfangsbedingung unter besonderer Berücksichtigung der Konsolidation einseitig drainierter Tonschichten. Die Bautechnik 50, S. 20-25.
- [8] Thamm, B.R. (1973) Die "Cam-Clay"-Theorie und das "Critical-State"-Konzept. Der Bauingenieur 48, S. 311-314.
- [9] Gußmann, P./ (1973) Eindimensionale Konsolidation mehrschichtiger Tonböden. Spotka, H. Die Bautechnik 50, S. 265-272.
- [10] Thamm, B.R. (1973) Anwendung der Finite-Element-Methode zur Berechnung von Spannungen in wassergesättigten Böden. Der Bauingenieur 48, S. 370-374.

- [32] Laumans, Q./ (1976) Calculation of Raft Foundations on Clayey Silts. Proc. 2nd Int. Conf. Num. Meth. in Geomechanics, Blacksburg, Vol. 1, S. 475-488.
- [33] Smolczyk, U./ (1977) Earth Pressure Variations Due to Temperature Change. Hilmer, K./ Franke, E./ Schuppener, B. Proc. 9th ICSMFE, Tokyo, Vol. 2, S. 225-233.
- [34] Smolczyk, U./ (1977) Lateral Deformation Testing in Keuper Marl Boreholes. Seeger, H. Int. Symp. The Geotechnics of Structurally Complex Formations, Capri, Vol. 1, S.443-447.
- [35] Smolczyk, U. (1978) Wagnis Baugrund. Deutsche Architekten- u. Ingenieurzeitschrift 8/9, S. 12-16.
- [36] Schad, H. (1978) Die Verwendung nichtlinearer Stoffgesetze bei der numerischen Analyse von Grundbauaufgaben. Vortr. Baugrundtagung, Berlin, S. 141-161.
- [37] Schulz, H./ (1978) Zur Ermittlung der Scherparameter überkonsolidierter Böden für Erddruckberechnungen. Smolczyk, U. Vortr. Baugrundtagung, Berlin, S. 275-296.
- [38] Smolczyk, U. (1978) DFG-Schwerpunktprogramm Bodenmechanik. Geotechnik 1, S. 29-42.
- [39] Gußmann, P. (1978) Das allgemeine Lamellenverfahren unter besonderer Berücksichtigung von äußeren Kräften. Geotechnik 1, S. 68-74.
- [40] Hilmer, K./ (1978) Der Einfluß der Temperatur auf den Erddruck hinter Bauwerkswänden. Vogt, N. Geotechnik 1, S. 75-84.
- [41] Schmidt, H.H. (1978) Entwicklung einer Eignungsprüfung für Maßnahmen zum mittelfristigen Schutz des Erdplanums unter besonderer Berücksichtigung des von oben eindringenden Wassers. Forschungsbericht F.A. Nr. 5.033 G 76 A für den Bundesminister für Verkehr, bearbeitet am Institut für Geotechnik Stuttgart.
- [42] Schmidt, H.H. (1978) Erprobung von Versiegelungen fein- und gemischtkörniger Böden auf bituminöser Basis unter Verwendung von Handelsprodukten. Forschungsbericht F.A. Nr. 5.034 G 76 A für den Bundesminister für Verkehr.
- [43] Gußmann, P. (1979) Bestimmung bodenmechanischer Parameter aus unterschiedlich drainierten Zeitsetzungsversuchen. Geotechnik 2, S. 148-154.
- [44] Smolczyk, U. (1979) Bestimmung der Baugrundfestigkeit mit der Seitendrucksonde. Vortragsband zum Pfahlsymposium, München 1977, S. 77-80.
- [45] Schmidt, H.H. (1979) Erddruck auf Widerlager und Stützmauern in Abhängigkeit von Untergrundbewegungen durch Dammschüttungen. Forsch.ber. FA 5.042 G 77 H, B. f. Verkehr.
- [46] Smolczyk, U. (1979) Zur Berechnung von Bodenreaktionskräften. Berichte Bundesvereinigung Prüftingenieure Baustatik, Arbeitstagung 4, S. 23-51.
- [47] Smolczyk, U./ (1979) Lateral Earth Pressure Due to Surcharge. Vogt, N./ Hilmer, K. Proc. 7th ECSMFE, Brighton, Vol. 2, S. 131-140.
- [48] Smolczyk, U. (1979) Influence of foundation depth on raft analyses. Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, Vol. 4, S. 1503-1512.
- [49] Smolczyk, U. (1979) Dammschüttung in Baggerseen beim Bau der Schnellbahnstrecke Mannheim-Stuttgart. 2. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Fellbach, S. 113-119.
- [50] Smolczyk, U./ (1979) Geotechnical Properties of a Soft Keuper Sandstone. Gartung, E. Proc. 4th Int. Congr. Rock Mechanics, Montreux, S. 639-644.
- [51] Smolczyk, U./ (1979) Forschungsergebnisse von Erddruckuntersuchungen an Modellwänden. Schmidt, H.H. Tagung der Arbeitsgruppe Untergrund der Forschungsges. f. d. Straßenwesen, Koblenz.

- [52] Smolczyk, U. (1980) Internationale Vereinbarungen; Klassifizierung des Fachschrifttums und Symbole. Baugrundgutachten. Grundbautaschenbuch, Teil 1, Abschn. 1.1, 1.2 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [53] Gußmann, P./ Schäd, H. (1980) Numerische Verfahren in der Bodenmechanik. Grundbautaschenbuch, Teil 1, Abschn. 1.7, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [54] Smolczyk, U./ Gußmann, P. (1980) Berechnung von Zeitsetzungen. Grundbautaschenbuch, Teil 1, Abschn. 1.10, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [55] Smolczyk, U. (1980) Untersuchung von Gründungsschäden unter Hinzuziehung von mineralogischen Untersuchungen. VDI-Seminar "Erkenntnisse aus Schäden im Tiefbau".
- [56] Smolczyk, U. (1980) Erfahrungen mit der Stuttgarter Seitendrucksonde. III. Int. Symp. DDR-Komitee Bodenmechanik Grundbau Dresden, S. 22-28.
- [57] Smolczyk, U. (1980) Beitrag zu den Thesen zu Problemen der lastbedingten Baugrundverformungen. III. Int. Symp. DDR-Komitee Bodenmechanik Grundbau Dresden, S. 58-61.
- [58] Buchmaier, R./ Smolczyk, U./ Schäd, H. (1980) Einfluß einer Mudde-Linse auf die Verschiebungen einer hinterfüllten Uferwand. Proc. 6th Donaueurop. CSMFE, Varna, Vol. 1a, S. 65-74.
- [59] Malcharek, K. (1981) Unterwasser-Sprengverdichtung - Polnische Praxis. Geotechnik 3, S. 190-192.
- [60] Smolczyk, U./ Malcharek, K. (1981) Lebendverbau von Steilböschungen. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau 23, S. 396-400.
- [61] Smolczyk, U. (1981) Saving cities and old buildings. State-of-the-art Report, 10th ICSMFE, Stockholm, Vol. 4, S. 441-465.
- [62] Gußmann, P./ Lutz, W. (1981) Schlitzstabilität bei anstehendem Grundwasser. Geotechnik 4, S. 70-81.
- [63] Kunz, B. (1981) Methodenbank im Grundbau (MIG). Schlußbericht S-SMO/103 des Instituts für Geotechnik Stuttgart, CAD-Projekt Kernforschungszentrum Karlsruhe.
- [64] Salden, D. (1981) Einfluß der Sohlenform auf die Traglast von Fundamenten. Geotechnik 4, S. 137-144.
- [65] Melzer, K.-J./ Smolczyk, U. (1982) Dynamic penetration testing. State-of-the-art Report, Proc. 2nd ESOPT, Amsterdam, Vol. 1, S. 191-202.
- [66] Smolczyk, U./ Malcharek, K. (1982) Living Sheets on Steep Slopes. Proc. 2nd Int. Conf. Geotextiles, Las Vegas, Vol. 1, S. 253-257.
- [67] Steinmann, B. (1982) Consolidation testing of Opalinuston with different types of drainage. Proc. Int. Symp. Num. Models Geomechanics, Zürich, S. 280-285.
- [68] Smolczyk, U. (1982) Use of non-linear constitutive soil models in engineering practice. Some personal experiences. Proc. Int. Symp. Num. Models Geomechanics, Zürich, S. 535-548.
- [69] Vogt, N. (1982) Large scale model tests with partial mobilization of the passive earth pressure and cyclic movements of the wall. Proc. IUTAM Conf. Deformation Failure Granular Materials, Delft, S. 643-652.
- [70] Smolczyk, U. (1982) Verkantung von Brückenpfeilern infolge Baugrund-Elastizität. Proc. 10. Geotechn. Konferenz, Brünn, CSSR, S. 408-415.
- [71] Smolczyk, U./ Netzel, D. (1982) Flachgründungen. Grundbautaschenbuch, Teil 2, Abschn. 2.1, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.

- [72] Smolczyk, U. (1982) Unterfangungen und Unterfahrungen. Grundbautaschenbuch, Teil 2, Abschn. 2.3, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [73] Smolczyk, U./ Hilmer, K. (1982) Baugrundverbesserung. Grundbautaschenbuch, Teil 2, Abschn. 2.5, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [74] Schenck, W./ Smolczyk, U./ Lächler, W. (1982) Pfahlroste, Berechnung und Konstruktion. Grundbautaschenbuch, Teil 2, Abschn. 2.12, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [75] Schenck, W./ Smolczyk, U. (1982) Gründungen im offenen Wasser. Grundbautaschenbuch, Teil 2, Abschn. 2.17, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [76] Gußmann, P. (1982) Kinematical Elements for Soil and Rocks. Proc. 4th Conf. Num. Meth. Geomechanics, Edmonton, Canada, Vol. 1, S. 47-52.
- [77] Gußmann, P. (1982) Application of the Kinematical Element Method to Collapse Problems of Earth Structures. Proc. IUTAM Symp. Deformation and Failure of Granular Materials, Delft, S. 545-550.
- [78] Smolczyk, U. (1983) Deep Compaction. General Report: 8th ECSMFE, Helsinki, Vol. 3, S. 1105-1116.
- [79] Smolczyk, U. (1983) Axiale Pfahl-Probebelastung: Empfehlungen für die Durchführung. Geotechnik 6, S. 174-195.
- [80] Gußmann, P. (1983) Stabilität von suspensionsgestützten Schlitzten unter statischen Lasten. Proc. 7th Donaueurop. CSMFE, Kishinev, UdSSR, Vol. III, S. 55-60.
- [81] Smolczyk, U./ Malcharek, K. (1984) Naturgerechte Sicherung von Steilböschungen. Geotechnik 7, S. 117-129.
- [82] Smolczyk, U. (1984) Wie sicher müssen Altbauten sein? Geotechnik 7, S. 174-181.
- [83] Smolczyk, U. (1984) Zur Berechnung der rückverhängten Erdwand. Geotechnik 7, S. 214.
- [84] Smolczyk, U. (1984) Neues Verfahren zur Sicherung von Steilböschungen mit Hilfe von Geotextilien. Proc. 23. Int. Chemiefasertagung, Dornbirn, S. 551-569.
- [85] Gußmann, P./ Ochmann, H. (1985) Probabilistic Theory and Kinematical Element Method. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, U.S.A., Vol. 2, S. 825-829.
- [86] Smolczyk, U./ Salden, D./ Majchrzyk, K. (1985) Determination of the Shear Strength of Partially Decomposed Mudstone. Proc. 11th ICSMFE, San Francisco, U.S.A., Vol. 2, S. 1055-1059.
- [87] Smolczyk, U./ Malcharek, K. (1985) Slope protection by membrane structures. Geotextiles and Geomembranes, Vol. 2, S. 323-336.
- [88] Smolczyk, U. (1985) Axial Pile Loading Test - Part 1: Static Loading. Geotechnical Testing Journal, Vol. 8, S. 79-90.
- [89] Schad, H. (1985) Computing Costs for FEM Analysis of Foundation Engineering Problems and Possible Ways of Increasing Efficiency. Int. Journ. for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 9, S. 261-275.
- [90] Smolczyk, U. (1985) Neue Erfahrungen mit der Seitendrucksonde. Geotechnik 8, S. 109-114.
- [91] Smolczyk, U. (1985) Vor 100 Jahren: Reynolds beschreibt die Dilatanz. Geotechnik 8, S. 208-209.
- [92] Gußmann, P. (1986) Kinematical Element Method for 3D-Problems in Geomechanics. Proc. ECONMIG 86, Stuttgart, Vol. 2.
- [93] Smolczyk, U./ Schad, H. (1986) Steigerung der Arbeitssicherheit und Umweltfreundlichkeit bei der Böschungssicherung. Die Bautechnik 63, S. 289-294.
- [94] Smolczyk, U. (1986) Zur Bewehrung des Bodens mit Geotextilien und Drahtgeweben. Proc. 14. Geotechn. Konferenz, Brünn, CSSR, S. 118-125.

- [95] Baumann, J./ Ochmann, H. (1986) Erdstatische Sicherheitsbewertung von Erd-dämmen an Speicherbecken. Vortr. Baugrundtagung, Nürnberg, S. 261-273.
- [96] Breinlinger, F. (1987) The finite element method as design aid for tunnels built in open cuts. Review 1st Young Geotechn. Engrs. Conf. YGEC '87, Copenhagen, Denmark, S. 1-9.
- [97] Gußmann, P. (1987) Kinematical Element Method in Soil Mechanics. Proc. NUMEG 87, Vysoke Tatry, CSSR, Vol. 1, S. 116-128.
- [98] Gußmann, P. (1987) Böschungsgleichgewicht im Lockergestein. Grundbautaschenbuch, Teil 3, Abschn. 3.2, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [99] Smolczyk, U. (1987) Stützmauern. Grundbautaschenbuch, Teil 3, Abschn. 3.7, 3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn.
- [100] Smolczyk, U. (1987) Underpinning, Part 54 in: Ground Engineers Reference Book. Butterworths, London.
- [101] Smolczyk, U. (1987) Zum Einfluß der Einbindetiefe auf den rechnerischen Nachweis der Tragfähigkeit von Einzelfundamenten. Geotechnik 10, S. 153-155.
- [102] Schad, H./ Breinlinger, F. (1988) Experiences with the analysis of geotechnical problems solved by the FEM using different equation solvers on several computers. Proc. 6th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Vol. 1, S. 183-187.
- [103] Gußmann, P. (1988) KEM in Geomechanics. Proc. 6th Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Innsbruck, Vol. 2, S. 823-828.
- [104] Smolczyk, U. (1988) 10 Jahre 'Geotechnik'. Geotechnik 11, S. 124-132.
- [105] Smolczyk, U. (1988) Quo vadis, DIN 1054 ? Geotechnik 11, S. 215-221.
- [106] Gußmann, P. (1989) Praktische Berechnungen mit KEM. in: Berichte zum Schlußkolloquium des DFG-Schwerpunktprogramms "Nichtlineare Berechnungen im Konstruktiven Ingenieurbau". Springer-Verlag, S. 605-626.
- [107] Gußmann, P. (1989) Application of the KEM to different limit load problems. European Mechanics Colloquium/248: "Non Linear Soil-Structure Interaction". Grenoble, S. 86-89.
- [108] Henne, J. (1989) Versuchsgerät zur Ermittlung der Biegezugfestigkeit von bindigen Böden. Geotechnik 12, S. 96-99.
- [109] Salden, D. (1989) Bestimmung der Scherfestigkeit künstlich verdichteter Schüttungen aus Ton- und Schluffsteinen. 7. Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Bensheim, S. 99-106.
- [110] Smolczyk, U./ Kolb, H. (1989) Analysis of ground friction mobilized by raft prestressing. Proc. 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 1, S. 723-726.
- [111] Gußmann, P./ Schanz, T. (1989) KEM-Nachweise im Grundbau. Geotechnik 12, S. 127-133, sowie Mitteilungen des IGS, Heft 32, Teil 2.
- [112] Smolczyk, U. (1989) Einfluß des Bauverfahrens auf den Erkundungsumfang bei Tiefgründungen. Proc. 17. Geotechn. Konferenz, Brünn, CSSR, S. 8-13.
- [113] Gußmann, P. (1989) Vergleich von Böschungsbruch und Grundbruch unter Einbeziehung der KEM. Vortrag Ohde-Kolloquium, TU Dresden, S. 41-64.
- [114] Smolczyk, U./ Schad, H. (1990) Zur Diskussion der Teilsicherheitsbeiwerte für den Grundbruchnachweis. Geotechnik 13, S. 41-43.
- [115] Smolczyk, U. (1990) European Geotechnics in the Nineties. ISSMFE News, Vol. 17, No. 2, March 1990.

