

Numerische Methoden in der Geotechnik – Alibi oder Hilfsmittel ?

A. H. ZETTLER

1 Einleitung

Ein Zitat, das im Zusammenhang mit dem Einsatz von numerischen Methoden in der Geotechnik erwähnt werden muß, ist ein Ausspruch von Leopold Müller-Salzburg 1988.

„Und man ist verliebt in die Rechenverfahren, beschäftigt sich mit diesem großartigen, zugegebenermaßen faszinierenden Überbau und übersieht oder vergißt oder vernachlässigt oder unterbewertet das, was in unserer Wissenschaft, wie in allen Naturwissenschaften, das Wesentliche ist. Man muß ja erst einmal verstanden haben, wie sich der Fels verhält, warum er sich so verhält, wie er sich verhält, bevor man zu rechnen anfängt. Wenn man das nicht zutiefst begriffen hat, dann kann man nicht rechnen, man kann schon, aber dann ist das ein Plunder was herauskommt.“

Man möchte meinen, wenn jemand so etwas über Berechnungen sagt, dann ist er ganz und gar gegen numerische Berechnungen.

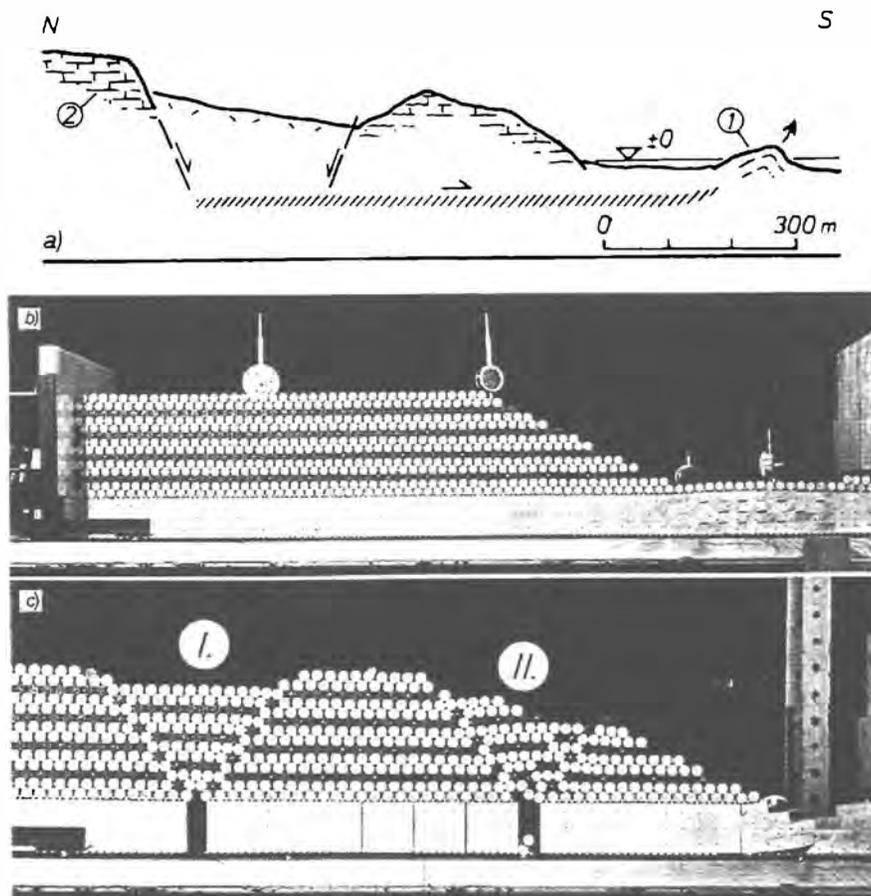


Bild 1: Waagrechte Hangbewegung und Grabenbildung durch hohe Horizontalspannungen, wie sie z.B. durch Ausbaggerungen oder durch tektonische Beanspruchungen zustande kommen können (Müller-Salzburg, 1978).

Diese oder ähnliche Zitate von Leopold Müller-Salzburg werden sehr gerne als unverrückbare Aussage und kaum zu überwindendes Argument gegen die Verwendung numerischer Methoden angewendet.

Nimmt man aber die Bücher von Müller-Salzburg zur Hand, so finden sich sehr wohl Berechnungsverfahren und Berechnungsmethoden neben oft zitierten physikalischen Modellversuchen. Stellvertretend dafür möchte ich hier nur eine Auswahl von drei Bildern anführen. Zum einen eine waagrechte Hangbewegung und Grabenbildung durch hohe Horizontalspannungen wie sie z.B. durch Ausbaggerungen oder durch tektonische Beanspruchungen zustande kommen können (Bild 1).

Solche Modellversuche wären heute mit PFC (Particle Flow Code, Itasca, 1996) sehr einfach nachzurechnen.

Zum anderen ein Bild eines Tunnels in einem Hang mit dem Titel Materialwanderung und Auflockerung bei der Herstellung eines Lehnentunnels (Bild 2). Dieses Beispiel könnte numerisch heute mit UDEC (Universal Distinct Element Code, Itasca, 1984) berechnet werden.



Bild 2: Materialwanderung und Auflockerung bei der Herstellung eines Lehnentunnels (Müller-Salzburg, 1978)

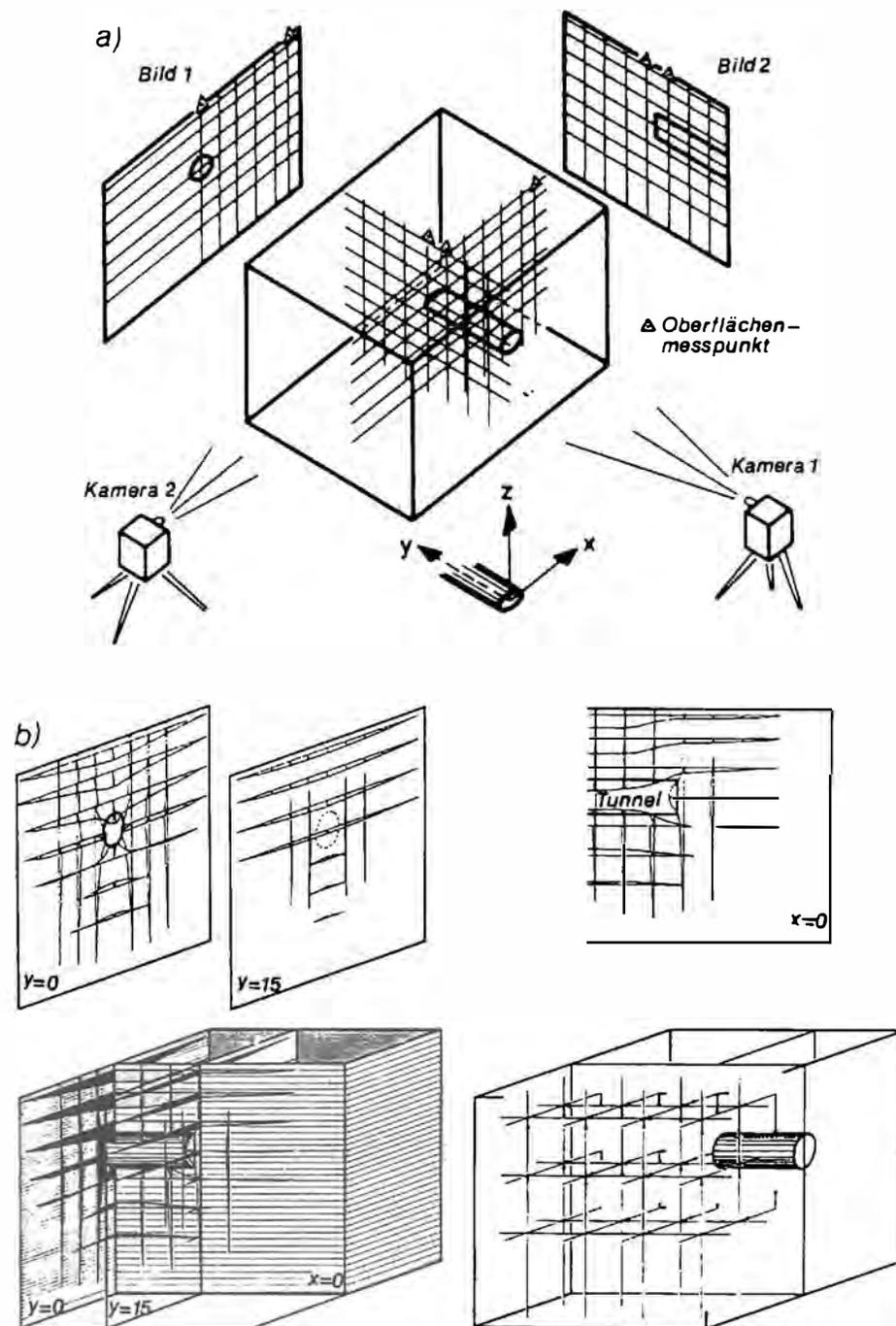


Bild 3:
Verwendung von
gekühlter Gelatine,
um die Setzungen
in der Umgebung
einer Stollenbrust
zu modellieren
(Müller-Salzburg, 1978)

Diese beiden Bilder findet man im dritten Band des Buches „Der Felsbau“ mit dem Untertitel Tunnelbau „Versuche der statischen Berechnung“ Unterkapitel „Versuche einer Tunnelstatik“. Die zweimalige Wahl des Wortes Versuche zeigt schon, wie vorsichtig Leopold Müller mit dem Begriff der Berechenbarkeit im Zusammenhang mit dem Fels war. Dessen ungeachtet, hat er diese Methoden aber verwendet.

Ein weiteres Beispiel aus diesem Kapitel des Bandes Tunnelbau zeigt die Verwendung von gekühlter Gelatine, um die Setzungen in der Umgebung einer Stollenbrust zu modellieren (Bild 3). Mit zwei Kameras wird ein Vortrieb in dieser Gelatine aufgezeichnet und ausgewertet. Dies sind alles physikalische Modelle, die aber im Wesen einem numerischen Modell gleichen. Alle Beispiele physikalischer Modelle können heutzutage mit numerischen Methoden berechnet werden. Das heißt aber nicht, daß physikalische Modelle obsolet sind, ganz im Gegenteil, erst die Synthese aus physikalischen und numerischen Modellen erlaubt eine Aussage: Die Stärke der numerischen Berechnung ist die leichtere Variation der Parameter, dies ist aber gleichzeitig auch eine Schwäche, weil es unmögliche Parameter und Parameterkombinationen zuläßt. Diese Schwäche kann mit Hilfe von physikalischen Modellen ausgeglichen werden.

In seinem Zitat spricht Leopold Müller von einer „großartigen, zugegebenermaßen faszinierenden“ Methode, ordnet sie aber gleich ihrer Bedeutung nach ein. Diese Einordnung entspricht dem Sinne nach einem Zitat von Albert Einstein in einem Brief an Max von Laue

„Es gibt die erstaunliche Möglichkeit, etwas mathematisch zu beherrschen, ohne den Witz der Sache erfaßt zu haben.“

Diese Aufforderung, sich um den „Witz“ der Sache verstärkt zu kümmern, gilt im besonderen für die Felsmechanik. Mit anderen Worten muß zuerst das Wesentliche des Felsverhaltens verstanden, Müller fordert sogar, es zutiefst begriffen zu haben, bevor man rechnen darf, um nicht einen „Plunder“ als Ergebnis zu erhalten. Es gilt also, dem „Witz“ einer Sache auf die Spur zu kommen.

1.1 Basisfragen während der Kartierung

In der Geologie sowie in den Naturwissenschaften allgemein wird versucht, durch genaues Hinsehen Muster und Zusammenhänge zu erkennen. Der Geologe hat durch seine Ausbildung im „Sehen“ der Zusammenhänge einen großen Vorteil. Er sollte diesen Vorteil auch im Zusammenhang mit numerischen Methoden nützen. Wie die Feststellung des angetroffenen Gesteins bei der Kartierung durch das Begreifen und durch die ständige Beantwortung grundsätzlicher Fragen meist automatisiert ist, kann durch die Beantwortung einiger Basisfragen die Feststellung der für die Berechnung notwendigen Randbedingungen geschaffen werden.

Bei der Kartierung lernt der Anfänger durch die Beantwortung der Basisfrage:

Welche Art von Gestein treffe ich an ?

Erstarrungsgestein

Sedimentgestein oder

Methamorphes Gestein.

Granit

Sandstein

Phyllit

Diese Basisfragen für numerische Berechnungen könnten wie folgt lauten:

Welches grundlegende Verhaltensmodell kann ich dem angetroffenen Gestein zuschreiben?

Homogen	Sandstein	Kontinuumsmechanik
Geklüftet	Geklüfteter Granit	Diskontinuumsmechanik
Brucherscheinungen	Bruchmechanik	

Ist das Gestein in eine Richtung besonders deformierbar?

Transversal isotrop	Phyllit (Kontinuum, aber eine Richtung ist dominant).
----------------------------	--

Die genauere Feststellung der Parameter ist schon etwas schwieriger. Wie in der Geologie kann man aber Feldmethoden, wie die Ritzhärte, die Spaltbarkeit, den Strich, die Beständigkeit gegen verdünnte Salzsäure zur genaueren Bestimmung anwenden.

Umgelegt auf Eingangparameter für numerische Modelle bedeutet das:

Die Feststellung der natürlichen Böschungsneigung, die Standfestigkeit einer freistehenden Wand bzw. Wandhöhe, der Einfluß des Wassers.

Wie in der Geologie sind dieser Methode aber Grenzen gesetzt und die Anordnung von Versuchen ist unumgänglich. Aber auch bei der Anordnung der Versuche muß man sich die Frage nach Kontinuum, Diskontinuum und rezentem Bruchmechanismus stellen. Vor allem ist es notwendig, Bereiche der Gültigkeit abzustecken.

Wie in Bild 4 dargestellt, ist bei der Beurteilung von Fels immer die Frage nach dem Gültigkeitsbereich, dem Maßstab zu beantworten. Hinzu kommt **immer auch eine projektspezifische Komponente**; die Frage nach Art und Umfang des Projektes beeinflusst die Erfassung der Parameter. Das Projekt gibt die Randbedingungen, wie Größe, Einflußbereich, Kräftegrößen etc. vor. Das heißt, das Problem ist immer auch auf das Projekt bezogen. Das heißt weiter, daß immer nur im Wechselspiel zwischen Geologen und Bauingenieuren dem „Witz“ der Sache auf die Spur zu kommen ist.

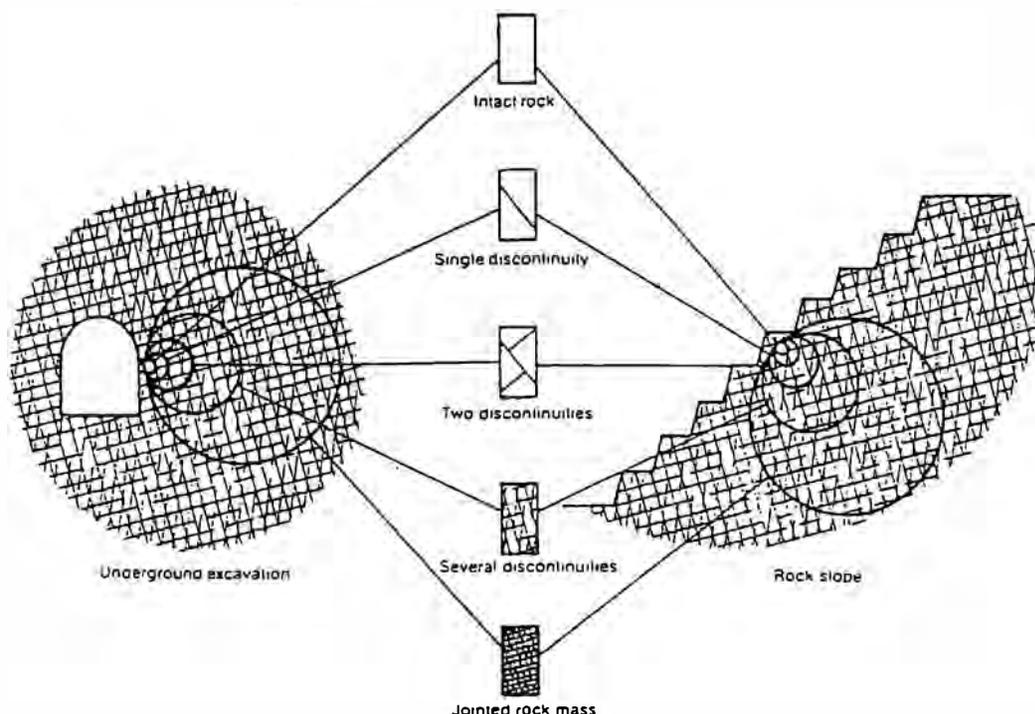


Bild 4: Vereinfachte Darstellung des Einflusses des Maßstabeffektes auf das zu verwendende Modell zur Beschreibung des Gebirgsverhaltens (Hoek, 1983).

Dasselbe gilt auch für die Festlegung der Parameter aus Proben. Wie im Bild 5 dargestellt, müssen die Größen der Kennwerte aus Proben zur Beurteilung des Gebirgsverhaltens abgemindert werden. Diese Abminderung erfolgt immer auf der Grundlage eines Modells. Die Parameter, die aus Proben gefunden wurden, beschreiben noch lange nicht das Gebirge oder, wie es Horninger ausgedrückt hat: „da hat man nun einen Bohrkern und glaubt das Gebirge zu kennen“

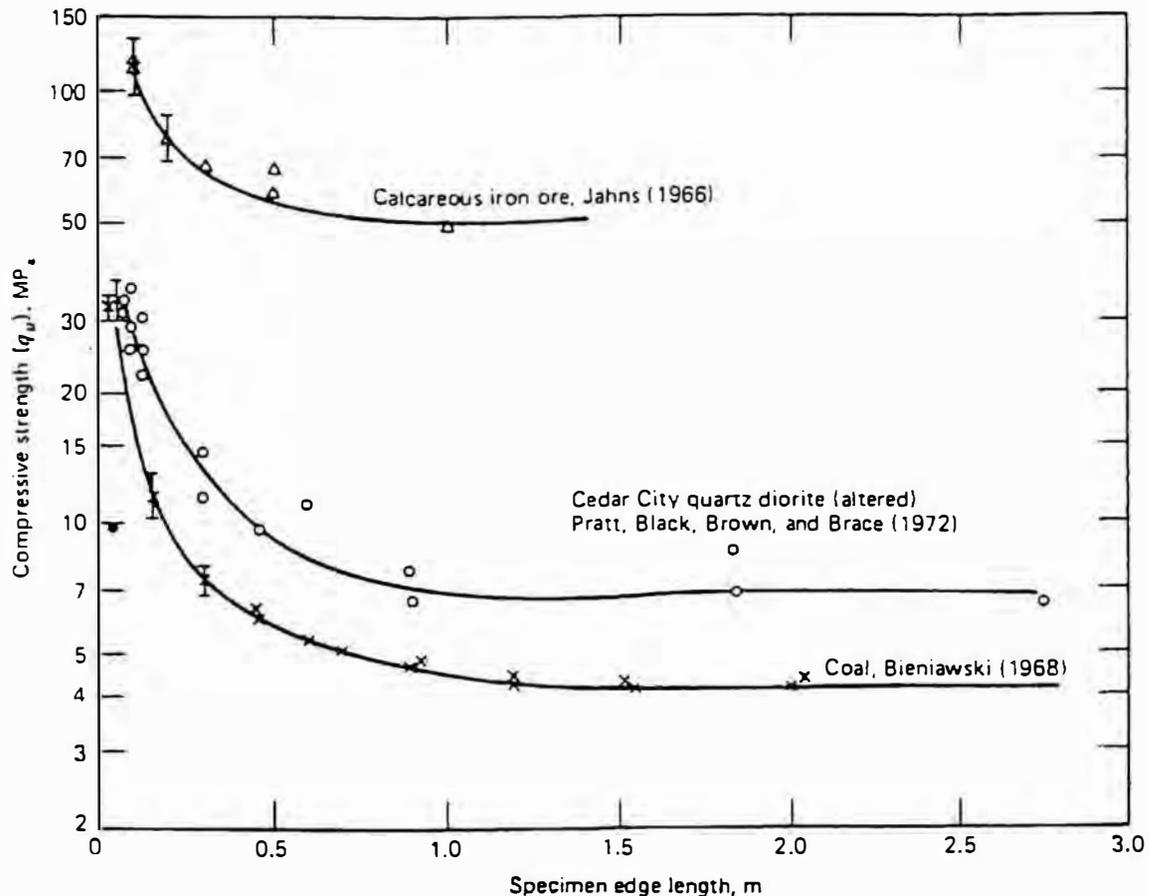


Bild 5: Der Einfluß der Probekörpergröße von einachsialen Druckversuchen (Bieniawski, 1975)

2 „Denkrichtungen“ bei der Anwendung numerischer Methoden

Das Hauptproblem bei der Beurteilung numerischer Methoden ist die Tatsache, daß es zwei „Denkrichtungen“ gibt.

Die Numerik erlaubt es, mit genauen Werten, z.B. Standsicherheitsfaktor $s=1$, zu arbeiten. Dies ist die **deterministische Denkrichtung**. Bild 6 zeigt die Berechnung des Sicherheitsfaktors gegen Gleiten mit einem Gleitkreisprogramm und mit dem Finite Differenzen Programm FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.4, Itasca, 1998).

Andererseits gibt es die **synergetische Denkrichtung**, die Modelle untersucht und das Verhalten des Modells bei Änderungen. Beide Methoden haben ihr Anwendungsgebiet und ihre Stärken. Von den stärksten Kritikern der numerischen Methoden werden meist Argumente gegen den Einsatz der deterministischen Methode gebracht. Meist auf Grund ihrer Erfahrung in der Natur beurteilen sie Aussagen über Versagensmechanismen mit Sicherheitsfaktoren sehr skeptisch. Berechtigterweise, denn in Wirklichkeit ist der Sicherheitsfaktor nur eine Seite der

Medaille, die andere Seite sind die notwendigen Randbedingungen: Sicherheitsfaktor $s = 1$ bedeutet genaue Kenntnisse der Geometrie, der Geologie, der Festigkeitsparameter, der Belastungen, etc.

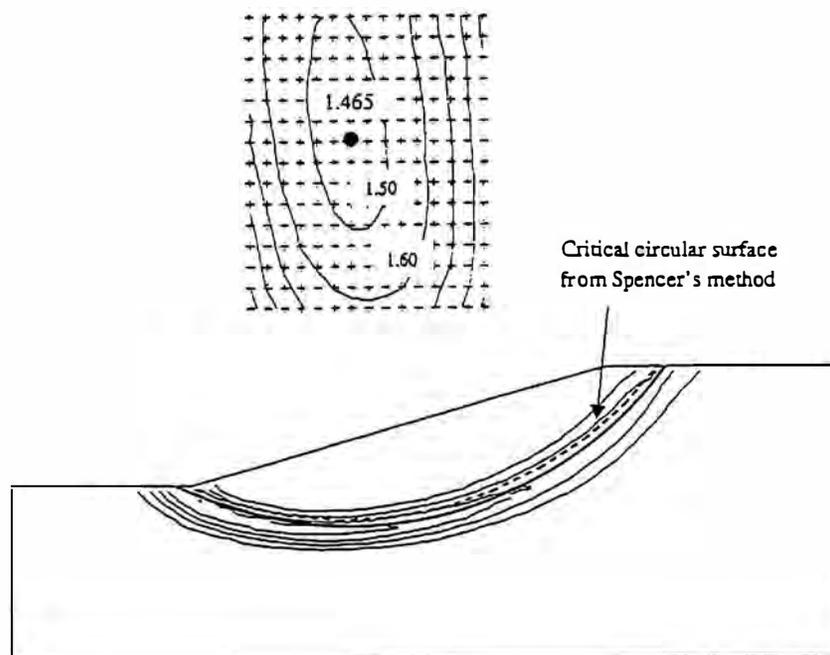
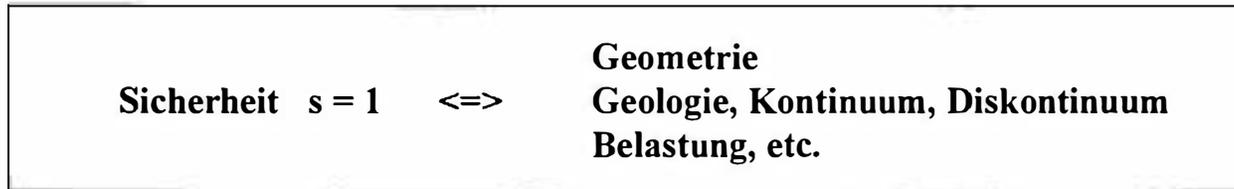


Bild 6: Hangstabilität mit Gleitkreis und mit Finite Differenzen Methode FLAC (Itasca, 1998) als Beispiel für die Berechnung eines Sicherheitsfaktors. Gleitkreis (durchgezogene Linie) mit Isolinien der Sicherheiten, aufgetragen beim jeweiligen Mittelpunkt des Gleitkreises. FLAC mit Linien gleicher Schubverzerrungsraten.

Würde die Natur diese Werte einhalten, dann wäre dieser Faktor gültig. Die Natur hält sich aber nicht an diese Randbedingungen des Modells.

Dieses Konzept des Sicherheitsfaktors ist Teil der Normung weil andere Methoden nicht leicht durchführbar wären. Diese Methode muß deshalb angewendet werden. Gerade darum soll und muß diese Methode aber immer kritisch hinterfragt werden, da aufgrund dieser Berechnungen die Sicherheiten beurteilt und damit Gefahren für Menschenleben abgeschätzt werden.

Aufgrund der Probleme mit der deterministischen Methode sollte aber das "Kind nicht mit dem Bade ausschütten" werden. Neben dieser deterministischen Betrachtung gibt es auch noch die synergetische Betrachtungsweise, wie von verschiedenen Autoren immer wieder gefordert (Fairhurst oder Poisel). Diese Methode fordert die Einbeziehung aller möglichen Hilfsmittel, um dem „Witz“ eines Problems auf den Grund zu kommen. Die Anwendung dieser Methode sollte im folgenden an verschiedenen Beispielen erläutert werden.

2.1 Beispiel: Lehnentunnel

Als erstes Beispiel soll ein diskontinuumsmechanisches Problem, das mit Hilfe von UDEC (Universal Distinct Element Code, Itasca 1984) und einem Base Friction Modells untersucht wurde, gezeigt werden. Das Base Friction Modell (Bild 7) besteht aus Plexiglasblöcken, die den geklüfteten Fels darstellen. Diese Blöcke liegen auf einer Folie. Durch Wegziehen der Folie unter den Plexiglasblöcken wird eine Kraft auf die Blöcke erzeugt, die als Schwerkraft für das Modell interpretiert werden kann.

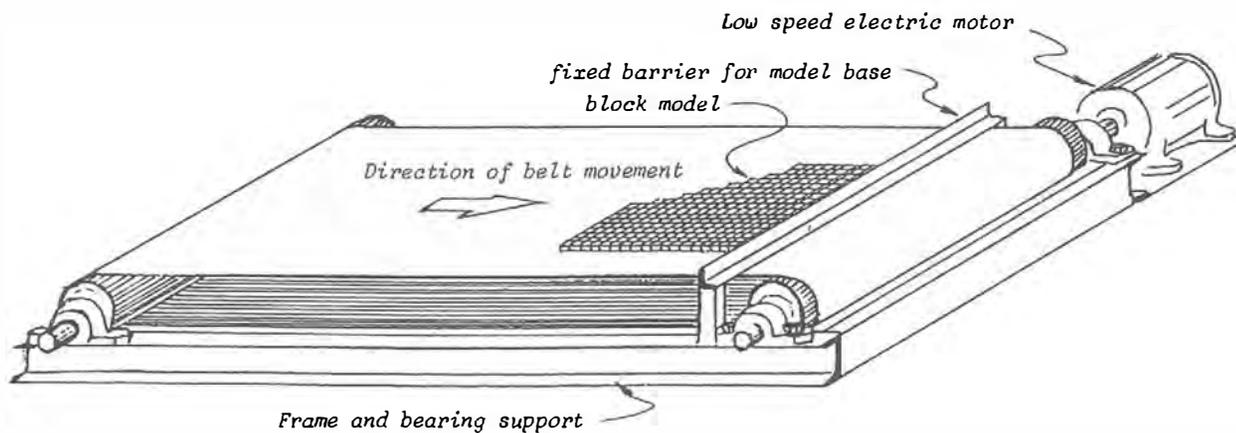


Bild 7: Skizze eines Base Friction Modells; hier verwendet, um das Versagen einer Felsböschung zu demonstrieren.

Das Modell zeigt ein Versagen, einen Tunnelkollaps auf Grund des Ausbruches des Lehnentunnels (Bild 8). Das selbe Modell wurde mit UDEC, einem Finite Differenzen Programm simuliert, wobei die Parameter für die Reibung aus dem Base Friction Modell genommen wurden, also mit den Werten des Plexiglasmodells übereinstimmen. Die Ergebnisse sind nahezu deckungsgleich (Bild 8).

Auch bei Verwendung von Ankern, z.B. zwei kurzen Ankern, ist die Übereinstimmung der beiden Modelle sehr gut (Bild 9, Bild 10).

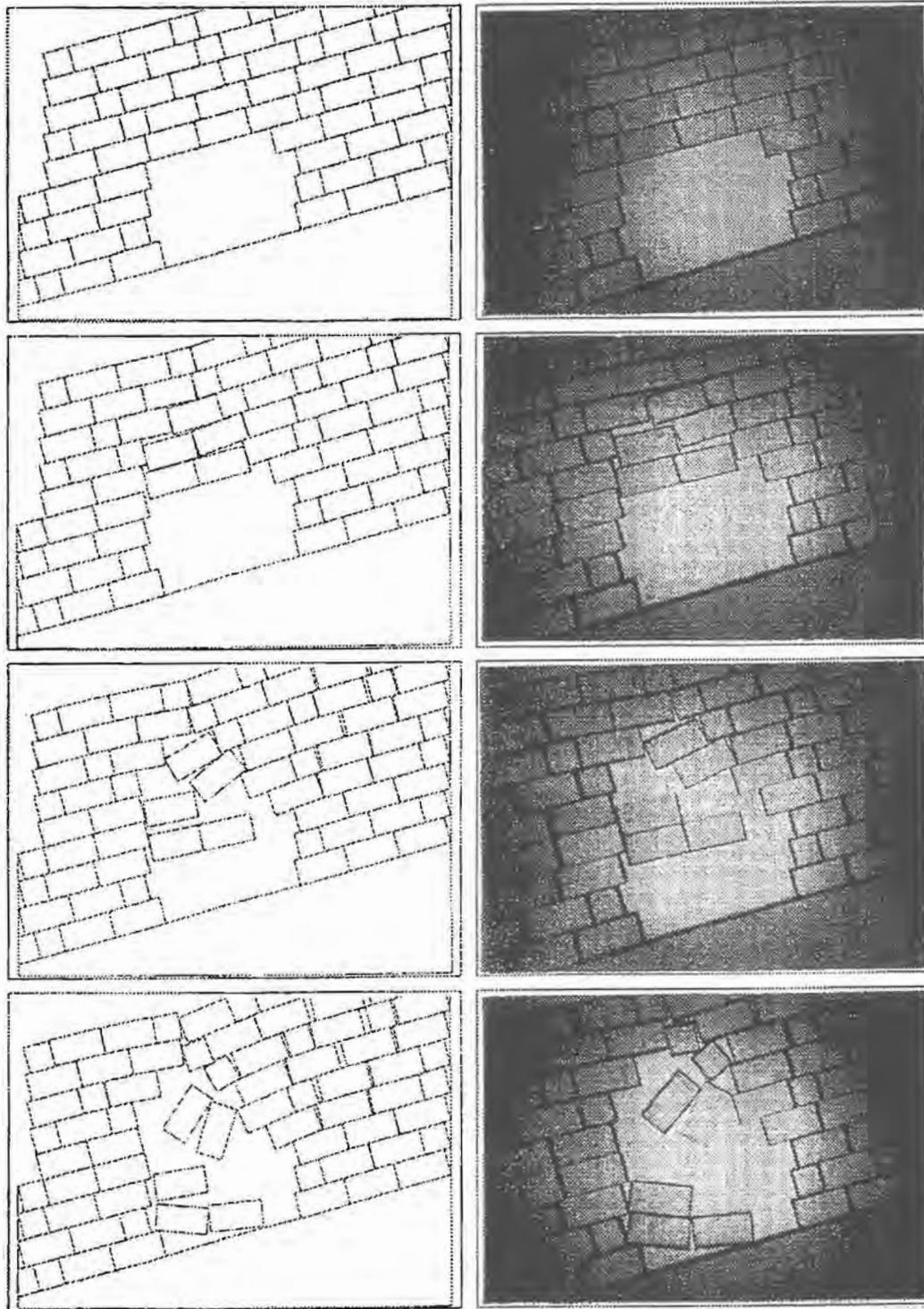


Bild 8: Vergleich Lehnentunnel UDEC Modell (rechts) mit Base Friction Modell (links).

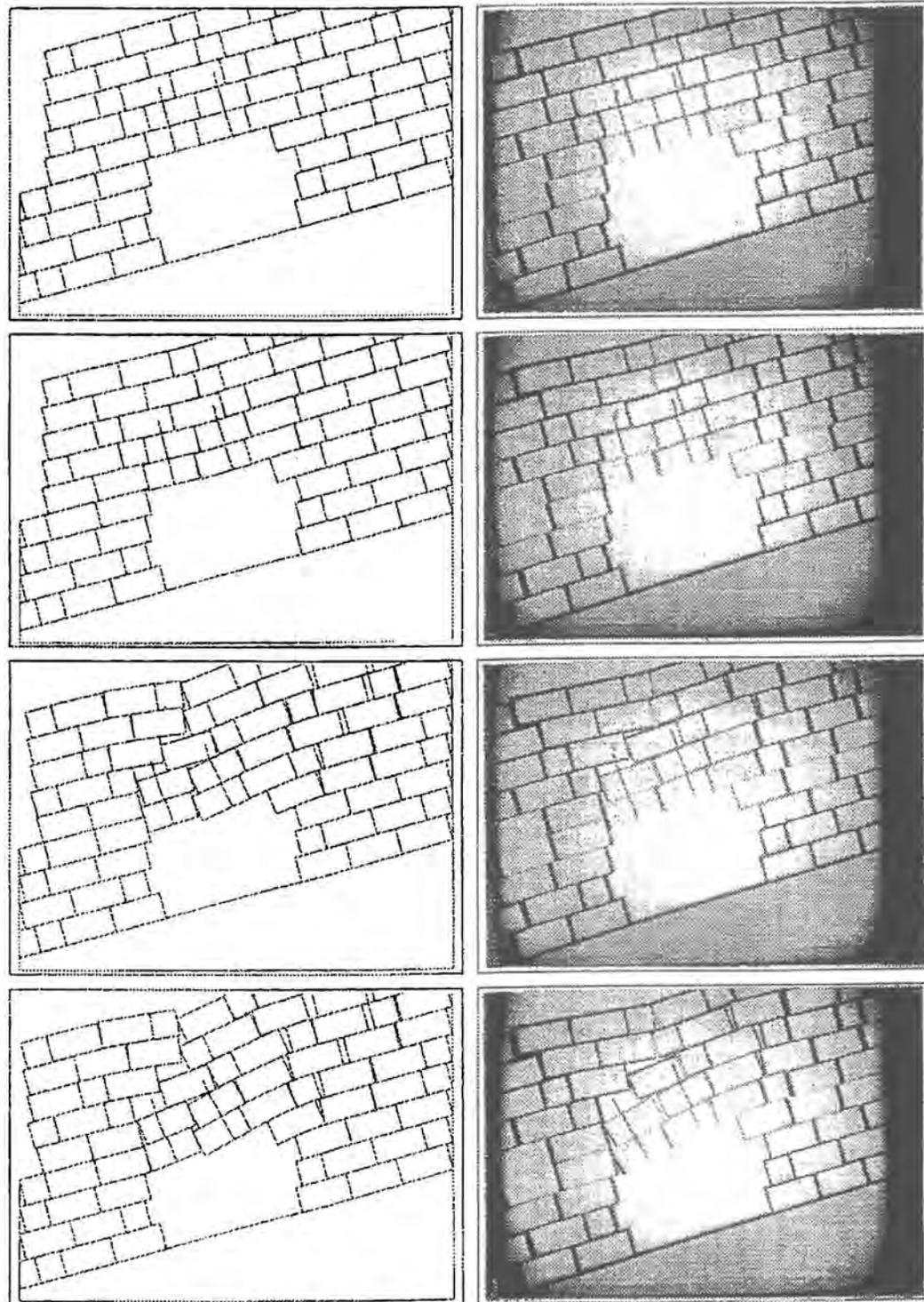


Bild 9: Vergleich Lehnentunnel UDEC Modell (rechts) mit Base Friction Modell (links); Anker über 2 Scharen mit versagen der Ankerinjektion.

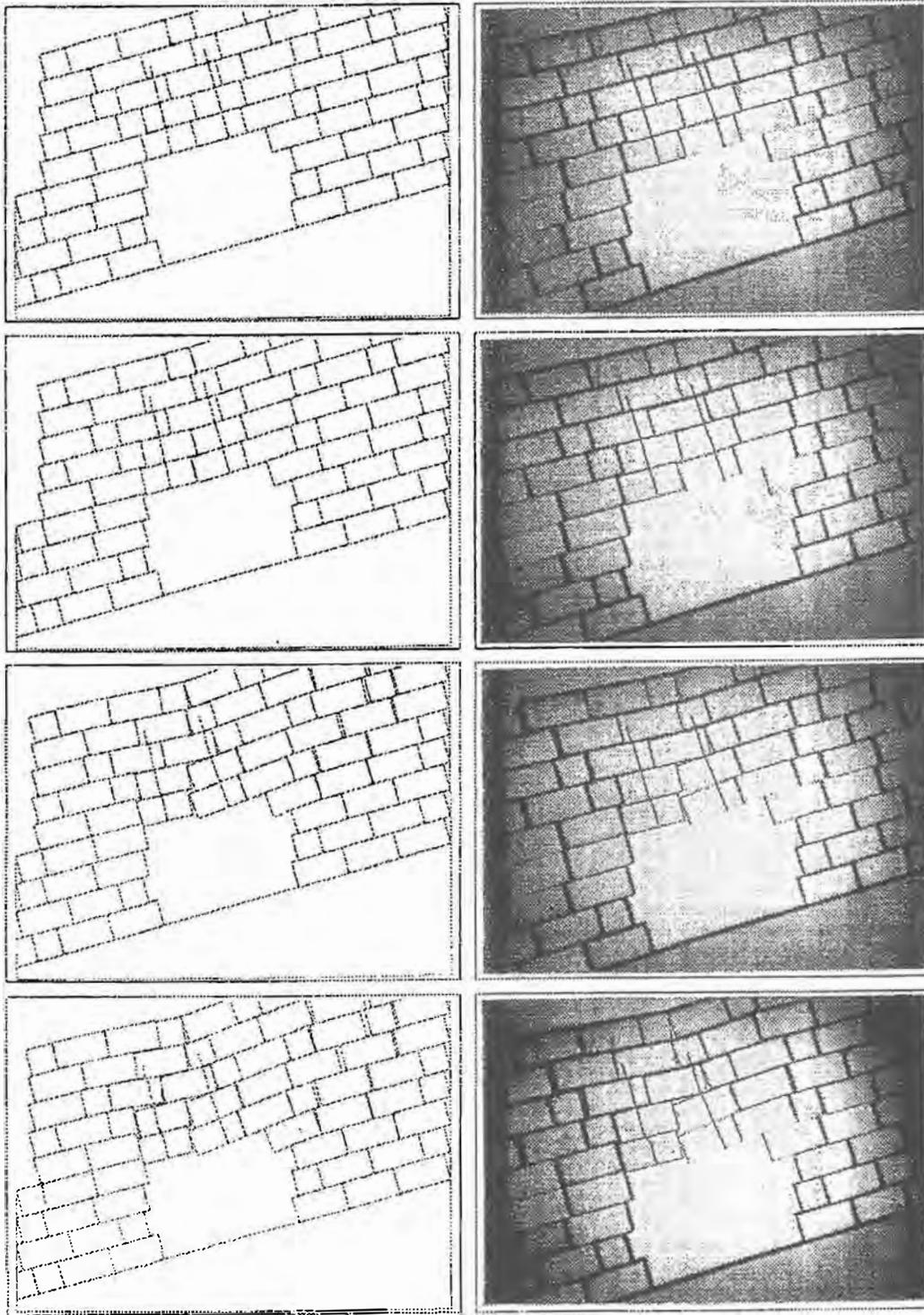


Bild 10: Vergleich Lehnentunnel UDEC Modell (rechts) mit Base Friction Modell (links); Anker über 2 Scharen mit Versagen der Ankerinjektion.

Im Plexiglasmodell wurden für die Anker Klebestreifen verwendet. Nun kann man z.B. durch die Verwendung längerer Anker die Auswirkungen auf die Stabilität des Tunnels untersuchen (Bild 10). Im gegebenen Beispiel wird bei der Verwendung von langen Ankern eine Stabilisierung des Gebirges erreicht. Bei Variation der Ankerrichtung kann ebenfalls Stabilität erreicht werden. Wie man sieht, kann das numerische Modell dazu verwendet werden, Sicherheiten gegenüber Bewegungen bzw. Kollaps zu berechnen. Auch die von den neuen Normen geforderten Teilsicherheiten können berücksichtigt werden. Es muß aber immer wieder betont werden, daß diese Aussagen von Sicherheiten immer auf das Modell bezogene und nicht „natürliche Sicherheiten“ sind. Überspitzt gesagt, müßte man die Natur vertraglich binden, sich an das Modell zu halten. Dies ist auch der Grund, warum Leopold Müller immer von einem Versuch einer Berechnung spricht, da er immer den Fels mit all seinen Unwägbarkeiten vor Augen hat. Die Schwierigkeiten bei der Beschreibung von Fels sollten uns aber nicht davon abhalten, diese numerischen Modelle zu verwenden. Wichtig ist nur, sich der Grenzen der Aussagen bewußt zu sein.

3 Abschließende Bemerkungen

Erst die Verwendung von mehreren numerischen Modellen und die Kombination mit physikalischen Modellen erlaubt eine Aussage. In diesem Sinne sind wir wieder bei der synergetischen Betrachtungsweise, alle möglichen Verfahren in die Beurteilung einzubeziehen. Jede Aussage über Sicherheiten beinhaltet immer das Modell, dem diese Sicherheitsberechnungen zugrunde gelegt werden.

Was gedanklich fein säuberlich getrennt wurde, um sich im Feld oder bei Beginn der Modellbildung einen Überblick zu verschaffen, muß wieder zusammengeführt werden, um der Komplexität des Materials Fels Rechnung zu tragen.

Numerische Methoden ersetzen das Denken nicht, sie helfen nur, ein Modell konsequent zu Ende zu denken !

In diesem Sinne sind sie ein großartiges, faszinierendes Hilfsmittel, das leider sehr oft fälschlicherweise als absolut gesehen und damit zum reinen Alibi degradiert wird!

Danksagung

Ich möchte mich besonders bei den Herren Dipl.Ing. Hannes Gamsjäger und Dipl.Ing. Dietmar Lakovits für die Durchführung der Modellversuche bedanken.

Literatur

Müller-Salzburg, L. (1978): Der Felsbau: Dritter Band Tunnelbau, Enke Verlag.

Müller-Salzburg, L. (1988): Mitt. D. Baugeol Tage in Lunz (noch nicht Veröffentlicht).

Itasca (1996): PFC (Particel Flow Code) Version 1.1, Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota, Minneapolis U.S.A.

Itasca (1994): UDEC (Universal Distinct Element Code) Version 3.0, Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota, Minneapolis U.S.A.

Itasca (1998). FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) Version 3.4, Manual, Itasca Consulting Group, Minnesota, Minneapolis U.S.A

Fairhurst, C. (1994, 1998): Vorlesungsmitschriften (nicht veröffentlicht).

Poisel, R. (1998): Persönliche Kommunikation (nicht veröffentlicht).

Hoek, E. (1983): Twenty-third Rankine Lecture: Strength of jointed Rock masses. Geotechnique 33, pp. 185-222.

Bieniawski, Z.T. and Van Heerden, W.L. (1975): The significance of in-situ tests on large rock specimens, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol 12, pp. 101-113.

Autor:

Alfred H. ZETTLER, Univ.Ass.Dipl.Ing.Dr.
Institut für Ingenieurgeologie, TU Wien
1040 Wien, Karlsplatz 13