Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 103 (1985)

Heft: 19: 50 Jahre Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich

Artikel: Unsicherheit in der Geotechnik

Autor: Einstein, Herbert H.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75775

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 07.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

gen in Entwicklungsländern engagiert. Zu diesen gehört auch der bereits erwähnte Tarbela-Damm. Er staut den Indus auf und vermag 14 000 Mio m³ Wasser (entspricht dem Inhalt des Neuenburgersees) zurückzuhalten. Damit hilft er, das natürliche Wasserdargebot gleichsam auf die Wassernachfrage der Bevölkerung Pakistans abzustimmen, und zwar in den Bereichen Wasserkraftnutzung, Bewässerung und Hochwasserschutz.

Ein weiterer moderner Trend betrifft die *Schaffung von Verbundsystemen.* Nach dem Vorbild des bereits vollendeten Verbundes zwischen den schweizerischen Wasserkraftwerken wird heute in der Schweiz ein Verbund der Wasserversorgung angestrebt. Ähnlich wird im Bereich der Abwassertechnik überregional gedacht und gehandelt; es geht ja letztlich auch dort um eine Verbundwirkung zugunsten des gesamten schweizerischen Gewässernetzes. Zurzeit läuft gerade die Vernehmlassung für ein Bundesgesetz zur Freihaltung von Flüssen im Hinblick auf ein allfälliges schweizerisches Wasserstrassennetz.

Im Bereich des Hochwasserschutzes ist dieser Verbundgedanke leider etwas in Vergessenheit geraten. Er erlebte seine Höhepunkte anlässlich der grossen schweizerischen Flusskorrektionen, zuletzt bei der 1973 abgeschlossenen II. Juragewässerkorrektion. Er müsste heute aber wieder aufleben, um die vielen Hochwasser- und Erosionsschutzprobleme an kleinen Flüssen und Wildbächen zeitgemäss zu lösen. Als Beispiel seien hier die Hochwasserschutzmassnahmen im Kocher-Lein-Gebiet östlich von Stuttgart erwähnt. Dort wurden gemäss Bild 10 insgesamt 16 Hochwasserrückhaltebecken erstellt, die im Verbund die Unterlieger längs den Flüssen Kocher und Lein vor Überschwemmungen schützen. Damit konnten dort grössere Flusskorrektionen vermieden und Spannungen zwischen Anliegen des Schutzwasserbaus und des Naturschutzes abgebaut werden.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *D. Vischer,* Direktor der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH (VAW), 8092 Zürich.

Unsicherheit in der Geotechnik

Von Herbert H. Einstein, Cambridge, Massachusetts

Geotechnisch-geologische Unsicherheiten sind unvermeidbar. Eine Übersicht über traditionelle und neuere Methoden zeigt, dass diese Unsicherheiten erfasst und in Bemessung, Planung und Verwirklichung eingeführt werden können. Einige der neueren Methoden bilden die Grundlage für vielversprechende zukünftige Entwicklungen

Einführung und Problemstellung

Unsicherheit und Geotechnik gehen Hand in Hand, und das ingenieurmässige Bearbeiten der Unsicherheit ist so alt wie die Geotechnik. Navier [1] erwähnt schon, dass Unsicherheiten in Reibungswinkel und Kohäsion durch «Wahl der kleinsten anwendbaren Werte» zu berücksichtigen sind; Terzaghi und nach ihm Peck [2] benützten die «Observational Method», um Erdbauwerke anfänglich nicht erkannten Bedingungen anzupassen; Casagrande [3] formuliert das Einführen geotechnischer Unsicherheiten mit seiner Methode des kalkulierten Risikos.

Die Ursachen dieser Unsicherheiten können wie folgt definiert werden:

- Räumliche und u.U. zeitliche Streuung der Materialeigenschaften und Geometrie
- Lastenunsicherheit (Lasten sind nur als Streuwerte bekannt)
- Messfehler (die Information ist durch systematische Messfehler und Zufalls-Messfehler beeinflusst)
- Modellungenauigkeiten (physische und ideelle Modelle sowie geologische Vorstellungen entsprechen nicht ganz der Wirklichkeit)
- Unterlassungen und unerwartete Ereignisse

Es soll deshalb versucht werden, etwas Klarheit über das Bearbeiten, d.h. das Erfassen und Behandeln der Unsicherheit zu schaffen. Dies wird anhand einer Betrachtung und mit Beispielen aus jeder der typischen Phasen von Bau- und Planungsprojekten verwirklicht, nämlich aus der Erkundung, der Berechnung, der Bemessung und Planung und der Verwirklichung. Die beschriebenen Methoden zur Bearbeitung der Unsicherheit sind sowohl traditioneller Art wie auch neuere Entwicklungen, diese vor allem aus den Arbeiten des Verfassers.

Erkundung

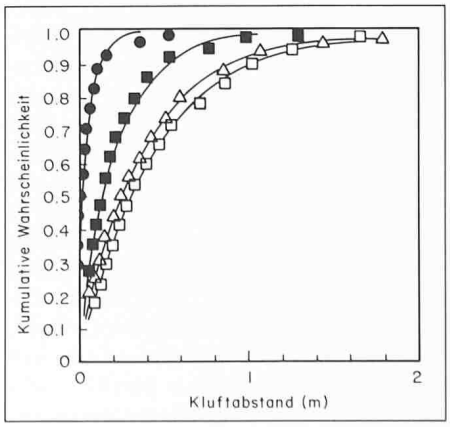
Erkundung dient dem Erfassen der Unsicherheit. Sie führt aber nicht unbedingt zum Verringern der Unsicherheit; es ist nämlich durchaus möglich, dass während der Erkundung ein grösserer Streubereich erkannt wird, als ursprünglich angenommen wurde. Zwei Hauptprobleme interessieren in der Erkundung, nämlich die Erkundungsplanung und das Sammeln und Auswerten von Informationen.

Erkundungsplanung

Erkundungsplanung im traditionellen Sinne besteht aus dem Auswählen von natürlichen Aufschlüssen oder von künstlichen Aufschlussmethoden und deren Anordnung. Dabei werden einerseits Einflusszonen des Bauwerkes, anderseits die geologisch-geotechnischen Bedingungen beachtet. Neben diesen technischen Randbedingungen sind auch wirtschaftliche vorhanden, indem die Erkundungskosten in einem gewissen Verhältnis zu den Gesamtkosten stehen müssen. Geotechnisch-geologische Gegebenheiten und wirtschaftliche Bedingungen sind von Unsicherheit geprägt. Allgemein zugängliche Erfahrungswerte, vor allem aber das persönliche Wissen des Geotechnikers und des Geologen, spielen deshalb eine wichtige Rolle in der traditionellen Erkundungsplanung.

Wesentliche Vorteile können gewonnen werden, wenn die Erkundung in die Bemessungs- und Planungsphasen und vor allem in die Verwirklichung weitergezogen wird. Einerseits ist die vom Projekt her nötige Erkundung dann besser bekannt, anderseits sind vor allem während der Verwirklichung

Bild 1. Kluftabstände. Die Streuung folgt im allgemeinen einer Exponentialverteilung



wesentlich detailliertere und aussagekräftigere Aufschlüsse vorhanden. Ein solches Vorgehen bedingt das Einbeziehen der Erkundung in die Bemessung und Verwirklichung durch sogenannte anpassungsfähige Methoden, wie z.B. die «Observational Method» von Peck [2].

Neuere Methoden der Erkundungsplanung schliessen eine finanzielle Erfassung der Unsicherheit ein, womit es möglich wird, die Kosten der Erkundung mit deren Nutzen für das Projekt zu vergleichen. Diese Methoden sind dynamisch, indem die Optimierung von Erkundungsprogrammen nicht nur vor, sondern auch während deren Verwirklichung vorgenommen werden kann; so z.B. können die Ergebnisse der ersten Bohrung verwendet werden, um Ort und Tiefe der nächsten zu bestimmen. Einzelheiten dieses Vorgehens, das auf der probabilistischen «a preposteriori Analyse» beruht, wurden vom Verfasser schon mehrmals beschrieben (z.B. [4]).

Gebirgsklasse	*Gesteine* 1. Schiefer 2. Metaquarzit 3. Diorit 4. Quarzit	*RQD* 1. 75–100% 2. 25–75% 3. 0–25%	*Verwitterung* 1. schwach 2. stark	*Wasserzufluss* 1. niedrig 2. mittel 3. hoch
1:	1, 2, 3	1	1	1, 2
2:	4	1	1	1, 2
3:	1, 2, 3, 4	2	1	2
	1, 2, 3, 4	2	1	2
4:	1, 2, 3, 4	3	1	3
	1, 2, 3, 4	2	1	3
	1, 2, 3, 4	1	1	3
	1, 2, 3, 4	3	1	2
	1, 2, 3, 4	3	1	1
5:	1, 2, 3, 4	3	2	1, 2, 3
	1, 2, 3, 4	2	2	1, 2, 3
	1, 2, 3, 4	1	2	1, 2, 3

Tabelle 1. Gebirgsklassen im Seabrook-Tunnel

Sammeln und Auswerten von Informationen

Informationssammeln ist das Ermitteln einzelner oder mehrerer Daten für jeden Kennwert im Feld oder in Laborversuchen. Üblicherweise werden Mittelwerte berechnet und zusammen mit Extremwerten als Ausdruck der Unsicherheit in die Berechnung einbezogen. Formaler und weiterführend ist die Anwendung der Statistik [5, 6].

In der Geotechnik und Geologie ist es wichtig zu wissen, dass Statistik frequentistisch oder subjektiv aufgefasst und angewendet werden kann (diese Trennung ist zur Klarstellung vorteilhaft, wird aber z.B. von der Fontainebleau-Schule als nicht grundlegend betrachtet).

In der *frequentistischen Statistik* werden aufgrund einer geeigneten Anzahl Daten (Proben) Streubereiche durch Momente (Mittelwert, Standardabweichung oder höhere Momente) oder Verteilungsfunktionen bestimmt, um die Unsicherheit eines Kennwertes auszudrücken. Bild 1 zeigt als Beispiel die Streuung von Kluftabständen, die Exponentialverteilungen folgen.

In der Anwendung *subjektiver Statistik* werden Unsicherheiten direkt den Zuständen der Natur zugeordnet. Im vereinfachten Tunnel in Bild 2 werden verschiedene geologisch-geotechnische Zustände vermutet, und die Unsicherheit ihres Auftretens wird durch direkte Zuordnung von Wahrscheinlichkeitswerten ausgedrückt. Dies ist nichts anderes als die herkömmliche Beschreibung der Geologie mit verbalen Ausdrücken wie «grosse Wahrscheinlichkeit, dass die Zone stark geklüftet ist». Die Zahlen können entweder, wie die verbalen Ausdrücke, direkt geschätzt oder mit formaleren Methoden ermittelt werden [7]. Die Verwendung von Zahlen hat den Vorteil, dass die Werte neben der einfacheren Verwendung in der Berechnung besser überprüft werden können (z.B. die subjektive Zuordnung von 20% oder 40% zwingt einen zum Überdenken, ob wirklich eine Verdoppelung der Wahrscheinlichkeit vorliegt). Die Zahlen sind aber ebenso Ausdrücke der subjektiven Beurteilung, wie es die Worte sind; sie werden also von Person zu Person variieren.

Berechnung

Unsicherheiten, die in der Erkundung erfasst worden sind, sind in den Berechnungen zu berücksichtigen. Für die folgenden Ausführungen ist es besser, statt von Berechnungen von Beziehungen zwischen Daten und dem vorherzusagenden (erwarteten) Verhalten zu sprechen. Dies erlaubt es, nicht nur Berechnungen im engeren Sinn, sondern auch empirische Beziehungen zu berücksichtigen.

Empirische Beziehungen

In empirischen Beziehungen werden beobachtbare Boden- oder Gebirgseigenschaften direkt mit dem Verhalten in Verbindung gesetzt, ohne den zugrunde liegenden Mechanismus zu be-

Bild 2. Subjektive Schätzung des geologisch-geotechnischen Zustandes und seiner Wahrscheinlichkeiten entlang eines Tunnels

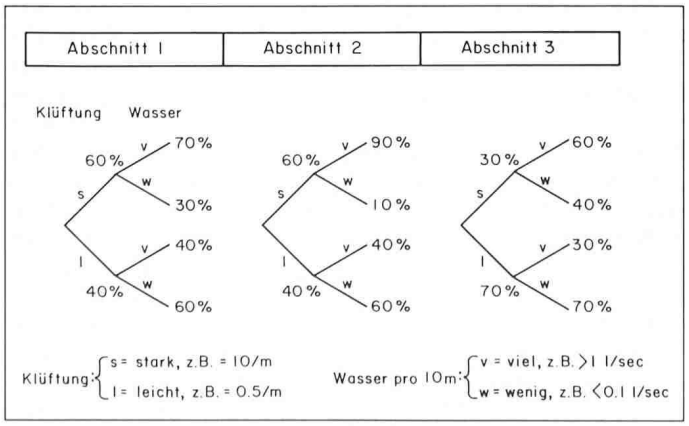
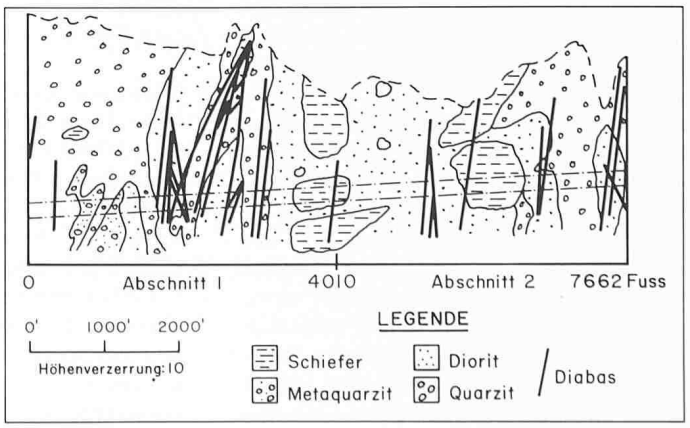


Bild 3. Seabrook Tunnel, New Hampshire. Geschätztes geologisches Längenprofil



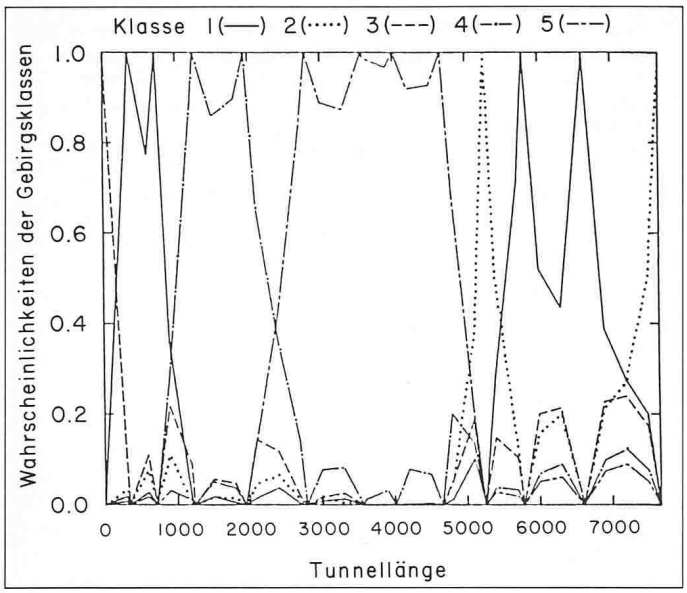


Bild 4. Gebirgsklassen-Wahrscheinlichkeiten für den Seabrook Tunnel

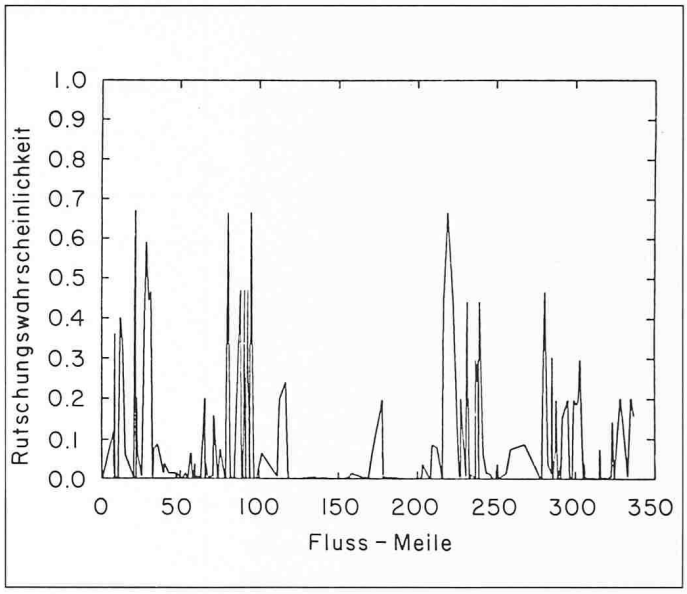


Bild 6. Kinematische Instabilität von Felskeilen, die aus den Kluftgruppen 1 und 2 entstehen können

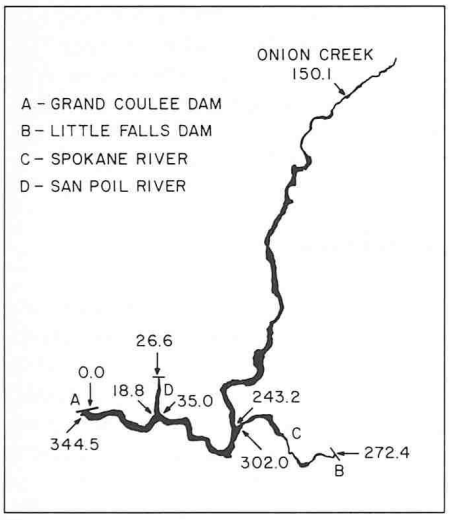


Bild 5. Lake Roosevelt am Columbia. a: Lageplan mit Fluss-Meilen, Massstab 1:1 000 000; b: Rutschungswahrscheinlichkeiten

Ursprüngliche Hangneigung (N)
Terrassenhöhe, total
Terrassenhöhe, unter Wasser
Absenkungshöhe (H)
Absenkungsgeschwindigkeit
Jährliche Niederschlagsmenge
Maximale monatliche Niederschlagsmenge
Niederschlagsmenge während der Absenkung
Max. monatliche Niederschlagsmenge während der Absenkung
Absenkungsdauer
Material (5 Arten)
Hangindex (H/N)

Tabelle 2. Beobachtungsvariablen, Lake Roosevelt

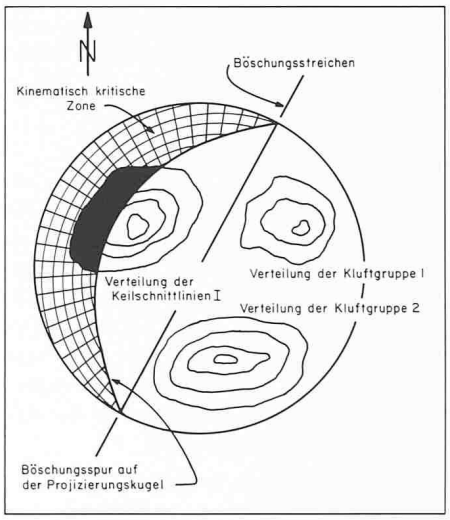


Bild 7. Dreidimensionales stochastisches Klüftungsmodell

schreiben. Die folgenden Beispiele illustrieren solche empirischen Beziehungen und den Einbezug der Unsicherheit.

Tunnelbau

Gebirgs- oder Bodenklassen im Tunnelbau erfassen geologisch-geotechnische Zustände und können als eine Kombination einer Anzahl Parameter aufgefasst werden. In Bild 3 ist das geschätzte geologische Längenprofil für den Seabrook Tunnel in New Hampshire dargestellt. In Tabelle 1 sind die verwendeten Parameter, deren mögliche Zustände und die sich aus verschiedenen Kombinationen ergebenden Gebirgsklassen (vereinfacht) aufgeführt. Das Auftreten der Parameterwerte, d.h. deren Wahrscheinlichkeiten dem Tunnel entlang, wurden unter Annahme eines Markov-Prozesses (siehe [8]) subjektiv geschätzt. Die Kombination der Parameterwerte in Gebirgsklassen führt dann zum probabilistischen Gebirgsklassenprofil in Bild 4, welches somit die Unsicherheit der geologisch-geotechnischen Zustände ausdrückt.

Planung in Gebieten mit Hanginstabilitäten

In den vergangenen zwei Jahrzehnten sind zahlreiche Kartierungen vorgenommen worden, in denen instabiles Gelände markiert wird (z.B. [9, 10]). Normalerweise werden 4 bis 5 Stufen in diesen Kartierungen unterschieden:

- 1 Zustandskarte (Topographie, Geologie, Hydrologie)
- 2 Gefahrenkarte (instabiles Gelände oder andere Gefahren wie Hochwasser werden in Kategorien, z.B. verschiedene Kriechzonen, unterteilt und eingetragen)
- 3 Gefahrenpotentialkarte (englisch: Hazard Map) (Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefahr wird in das entsprechende Kartengebiet eingetragen)
- 4 Risikokarte (Die Konsequenzen, z.B. Schadenkosten, werden mit dem Gefahren-Potential kombiniert, und Gebiete mit verschiedenen Risiken werden entsprechend markiert)
- 5 Planungswerkzeuge (z.B. Zonenpläne).

Das erste Beispiel, das hier diskutiert wird, befasst sich mit Rutschzonen entlang Lake Roosevelt, dem Stausee hinter dem Grand-Coulee-Damm am Columbia (Bild 5). Aufbauend auf einer früheren Studie von Jones [11] und auf Beobachtungen während der letzten 18 Jahre an 201 Stellen entlang dem See wurden die Beobachtungsparameter in Tabelle 2 mit dem Auftreten von Rutschungen in Verbindung gesetzt; dies wurde mittels eines logistischen Regressionsmodells verwirklicht [12]. Weitere Berechnungen führten sowohl zur Ausscheidung wie zur Einführung zusätzlicher Parameter. Mit der endgültigen Beziehung können probabilistische

Vorhersagen über das Auftreten von Rutschungen gemacht werden, wie Bild 6 zeigt. Der Vorteil dieser formalen Beziehung gegenüber der blossen Identifizierung kritischer Stellen ist die Möglichkeit, die Rutschungspotentiale verschiedener Stellen quantitativ zu vergleichen.

Während das vorherige Beispiel fast ausschliesslich auf frequentistischer Statistik beruht, baut das folgende auf subjektiver Statistik auf. Es wurde im Rahmen des Hochschulprojektes DUTI (Détection et utilisation des terrains instables) der ETH Lausanne von Noverraz und dem Verfasser erarbeitet [13, 14]. Der Geologe erfasst subjektiv den Zustand, die Gefahr und deren Potential, wobei die Schätzung des Potentials besonders interessant ist: Für plötzliche Bewegungen ist das Potential z.B. die Wahrscheinlichkeit pro Jahr des Eintretens eines Ereignisses, wobei die Kategorien $>10^{-2}$, 10^{-2}–10^{-3}, $<10^{-3}$ pro Jahr unterschieden wurden (also z.B. analog zum Potential von Hochwassern). Dies genügt nicht für Kriechbewegungen. Hier war es nötig, das Potential des stationären, des beschleunigenden und des verlangsamenden Verhaltens abzuschätzen. Tabelle 3 zeigt Verhaltens- und Potential-Kategorien mit den zugeordneten Gebieten im Anwendungsfall Villars (für eine genauere Beschreibung siehe [13, 14]). Noverraz hat zusätzliche Pfeilsymbole eingeführt, um Verhaltenskategorie und Potential direkt auf der Karte auszudrücken. Diese Methode steht erst am Anfang der Entwicklung; die Einführung in die Praxis verlangt Verfeinerungen und natürlich weitere Kalibrierungen.

Wahrscheinlichkeits-Kategorien	*Kriechbewegungs-Geschwindigkeit*		
	verlangsamend	*konstant (stationär)*	*beschleunigend*
Sehr wahrscheinlich $P_B > 90\%$		3 10 23 5 11 24 9 13	
Wahrscheinlich oder möglich $20\% < P_B < 80\%$	1 25	1 12 19 2 14 20 4 15 21 6 16 22 7 17 8 18	2 14 21 4 15 22 6 16 7 17 8 18 12 19
Unwahrscheinlich $5\% < P_B < 20\%$	12 17 21 15 19 16 20	25	20 25
Sehr unwahrscheinlich oder unmöglich $P_B < 5\%$	2 8 15 3 9 22 4 10 23 5 11 24 6 12 7 13		1 13 3 20 5 23 9 24 10 11

Tabelle 3. Kriechbewegungspotential und zugeordnete Gebiete

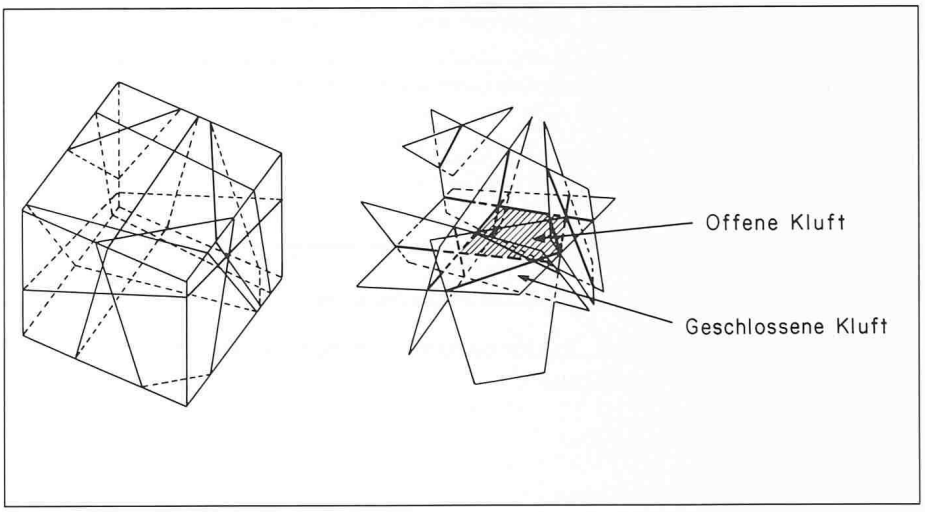


Bild 8. Zeit-Kosten-Streudiagramm für einen Tunnel. Die Zahlen geben die Anzahl Simulationen an, die ein bestimmtes Zeit-Kosten-Wertepaar ergeben

Berechnungen

Das Verhalten (z.B. Verformung, Versagen) wird mit einem auf physikalischen Prinzipien beruhenden Modell beschrieben. Die Parameter solcher Modelle, d.h. die geotechnischen Kennwerte, beruhen auf Daten, die meist stochastischen Charakter haben und mit Messfehlern behaftet sind. Diese Unsicherheiten, und nach Möglichkeit auch die Modellunsicherheiten, müssen im Ergebnis der Berechnung ausgedrückt werden. Oft wird dies durch die Einführung von Mittel- und Extremwerten erzielt. Weitergehende Methoden führen auch die Standardabweichung oder die ganze Streuung in die Berechnung ein (siehe z.B. [15] für eine Übersicht). Diese Möglichkeiten sollen nun am Beispiel einer Felsböschungs-Stabilitätsberechnung illustriert werden, wobei einige zusätzliche wichtige Bemerkungen angebracht werden können.

Die Stabilität einer Felsböschung kann oft mit der Stabilität verschiedener Kluftkörper dargestellt werden, wie z.B. Felskeile, die durch zwei Klüfte bestimmt werden. Die Stabilität eines einzelnen Keils ist durch eine kinematische und eine kinetische Komponente bestimmt, wobei die erste von den Kluftlagen, die zweite von den Scherwiderständen abhängt. Beide sind unsicher. Bild 7 zeigt die Lagenstreuung zweier Klüfte, die sich daraus ergebende Streuung der Keilschnittlinien sowie die Böschungsneigung. Schnittlinien, die in den schattierten Teil fallen, sind kinematisch instabil. Das Beispiel zeigt, dass die übliche deterministische Berechnung unter Verwendung von Mittelwerten oder häufigsten Werten zu falschen Ergebnissen führen kann. Sogar die Verwendung von Standardabweichungen ist oft irreführend. Mittels numerischer Auszählung kann die Wahrscheinlichkeit der kinematischen Instabilität aufgrund der gesamten Streuung berechnet werden. Diese Wahrscheinlichkeit ist dann mit derjenigen der kinetischen Instabilität (Scherwiderstand kleiner als Scherspannungen entlang der Klüfte) zu kombinieren; zuletzt folgt die Berücksichtigung der Zusammenwirkung mehrerer Keile, d.h. der Systeminstabilität (siehe [15]).

Obwohl das soeben erwähnte Vorgehen eine gegenüber den vielerorts üblichen Berechnungen verbesserte Behandlung der Unsicherheit bringt, ist es in einem weiteren Punkt noch nicht zufriedenstellend. Die Konstruktion von Poldiagrammen wie in Bild 7 beruht auf der Idealisierung, dass alle Klüfte durch einen Punkt laufen. Eine korrekte stochastische Darstellung sollte nicht nur die Lage, sondern auch die Kluftorte erfassen wie z.B. in Bild 8, welches eine von vielen Geometrien einer stochastischen Kluftstreuung darstellt. Berechnungsmethoden, die dem stochasti-

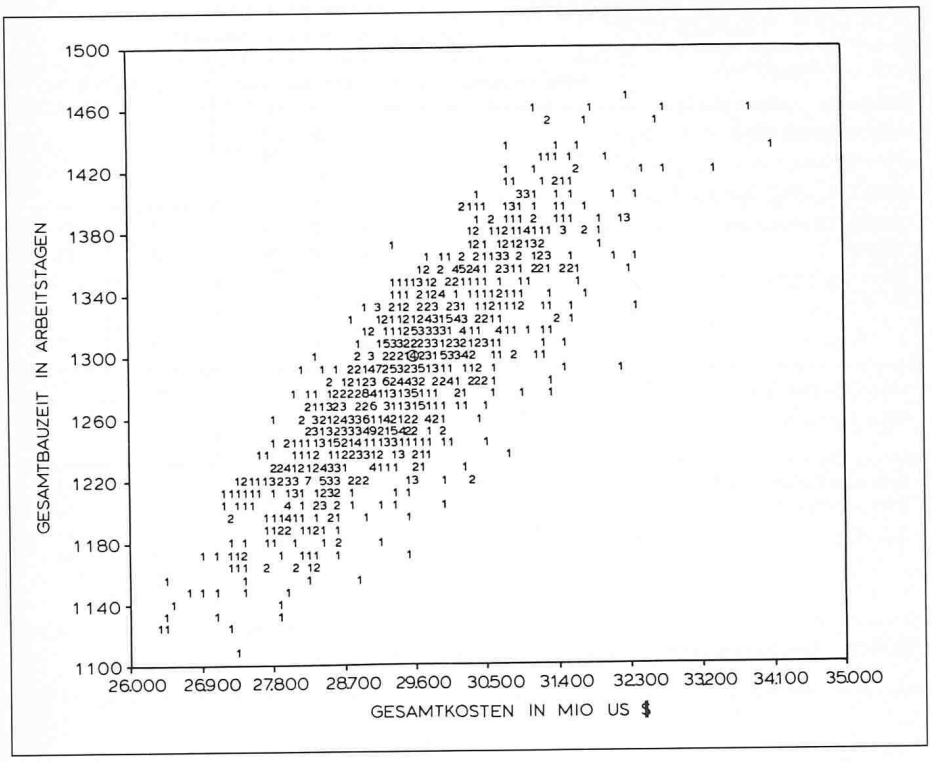
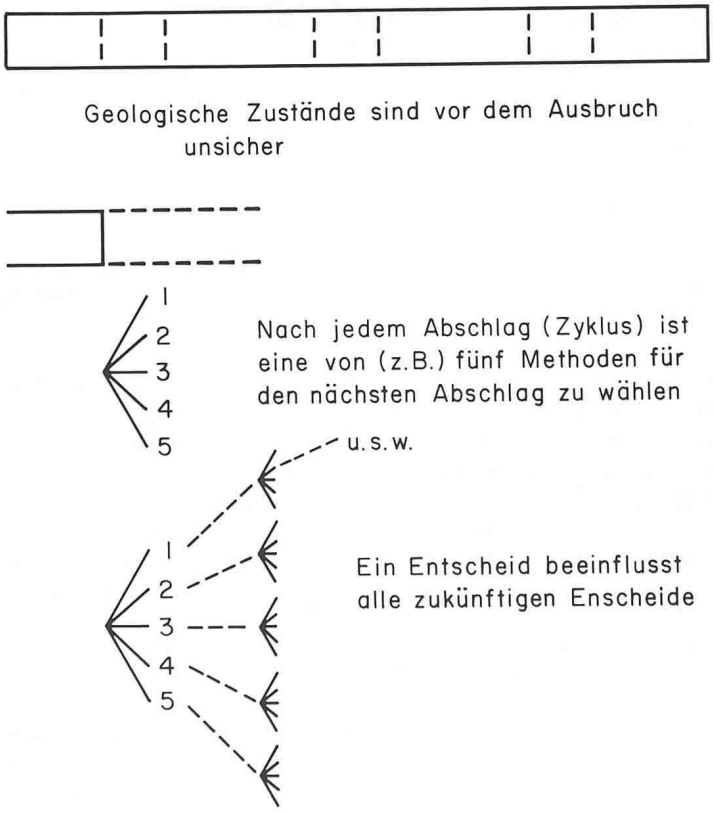


Bild 9 Management-Programm für operationelle Unternehmerentscheide

Bild 10. Resultat der Berechnung. Methode 2 ist optimal



CONST. METHOD	EQUIP. USAGE C1	C2	C3	C4	C5	RELATIVE LEVEL OF CONF.	EXPECTED LOSS (DOLLARS)	COST (DOLLARS) MEAN	STD. DEV.	DIFF. (%)
1	1	0	0	0	0	0.000	.2224E+06	.522567E+07	.160082E+06	4.44
* 2	0	1	0	0	0	0.900	.5187E+03	.500375E+07	.174576E+06	0.00
3	0	0	1	0	0	0.100	.4105E+05	.504428E+07	.178473E+06	0.81
4	0	0	0	1	0	0.000	.6835E+05	.507158E+07	.178222E+06	1.36
5	0	0	0	0	1	0.000	.9438E+05	.509761E+07	.178352E+06	1.88

schen Charakter der Kluftverteilung und anderer Parameter in der Felsmechanik gerecht werden, sind erst in den letzten Jahren entwickelt worden (z.B. [16]) und bedürfen noch zusätzlicher Arbeit. Im Gegensatz zur Felsmechanik ist die stochastische Darstellung in bodenmechanischen Berechnungen weiter fortgeschritten (siehe z.B. [17, 18]). Dies hängt zum grossen Teil mit einem der wesentlichen Unterschiede zwischen Boden- und Felsmechanik zusammen, indem es in jener oft genügt, mit statistischen Momenten zu arbeiten, während diese oft die Erfassung der Extremwerte der ganzen Streuung verlangt.

Planung und Bemessung

In der Planung und Bemessung sind Entscheide zu treffen, welche Verhaltens- und Kostenunsicherheiten berücksichtigen.

Berücksichtigung der Verhaltensunsicherheiten

Drei zum Teil überlappende Verfahren, nämlich die Verwendung von Sicherheitsfaktoren, von anpassungsfähigen Methoden und von risikoabhängigen Entscheiden sind hier möglich:

Die Problematik des *Sicherheitsfaktors* (SF) kann wie folgt zusammengefasst werden:

- Für Fälle SF≠1 ist er mechanisch oft unbestimmt
- Er ist oft von der Belastungsgeschichte abhängig
- Gleiche Sicherheitsfaktorenwerte bedeuten nicht unbedingt gleiche Sicherheit
- Eine Veränderung des Sicherheitsfaktorwertes bedeutet nicht unbedingt eine entsprechende Veränderung der Sicherheit
- Jeder Sicherheitsfaktor entspricht einer von Null abweichenden Versagenswahrscheinlichkeit
- Bei Verwendung von Sicherheitsfaktoren ist es nicht möglich, eine Vergrösserung der Sicherheit nutzenmässig auszudrücken.

Trotz dieser Nachteile ist der Sicherheitsfaktor brauchbar, wenn er mit Erfahrung und bei vergleichbaren Fällen angewendet wird.

Anpassungsfähige Methoden müssen, um sinnvoll zu sein, Erkundung, Berechnung (Planung) und Verwirklichung kombinieren. Die «Observational Method» ist die bekannteste Vertreterin dieser Methoden; die vorbehaltenen Entschlüsse in militärischen Anwendungen gehören auch dazu. Die Bemessung besteht hier aus dem Entwurf mehrerer Alternativlösungen. Welche

dieser Alternativen angewendet wird, hängt vom beobachteten (gemessenen) Verhalten während der Verwirklichung ab. Die Anpassung der Ankerdichte in Baugrubenabschlüssen aufgrund gemessener Verformungen oder Kräfte und die Wahl der Tunnelausbauklasse vor Ort sind Beispiele anpassungsfähiger Methoden.

Die Tatsache, dass Entscheide aufgrund unsicherer Verhaltensvorhersagen gefasst werden müssen, führt logischerweise zur «Entscheidungsfällung unter unsicheren Bedingungen», d.h. zu *risikoabhängigen Entscheiden*. Vereinfacht ausgedrückt ist das Risiko das Produkt von Versagenswahrscheinlichkeit und Erwartungskosten der Versagenskonsequenzen ($R = P_f{}^*C$). Der Ausdruck Versagen wird hier und im folgenden der Einfachheit halber verwendet; unbefriedigendes Verhalten, auch wenn es nicht zum Versagen führt, kann auch so behandelt werden. Alle oben erwähnten Verfahren, die Wahrscheinlichkeitswerte ergeben, lassen eine Risikoberechnung zu. Ein grosser Vorteil dieser Berechnung ist die Möglichkeit, den Nutzen der Risikoveränderung monetär mit den Kosten vergleichen zu können. Diese einfache Risikoberechnung ist aber oft nicht befriedigend. Die rein kostenmässige Berücksichtigung der Lebensgefährdung ist möglich, aber meist nicht annehmbar.

Ein anderes «klassisches» Problem ist die Tatsache, dass Produkte kleiner Wahrscheinlichkeiten und grosser Kostenkonsequenzen gleich gross wie Produkte grosser Wahrscheinlichkeiten und kleiner Kostenkonsequenzen sein können; das Risiko von Katastrophen und fast alltäglichen Ereignissen wäre auf dieser Grundlage gleich. Obwohl die verschiedenartige Einstellung zu so verschiedenartigen Versagen durch Einführung der Nutzwertanalyse behandelt werden kann, verbleibt die Tatsache, dass sehr kleine Wahrscheinlichkeiten oft ebenso geringe absolute Aussagekraft wie Sicherheitsfaktoren haben.

Die probabilistischen Berechnungen und empirischen Beziehungen für Böschungsstabilität sind gut geeignete Beispiele zu den obigen Bemerkungen: Für eine bestimmte Böschung lässt sich die Versagenswahrscheinlichkeit berechnen und dann z.B. die Risikoverkleinerung durch Abflachen der Böschung mit den Kosten dieser Massnahme vergleichen.

Für Planungsaufgaben, wie sie im Projekt DUTI behandelt werden, lässt sich die Risikoberechnung auch anwenden. Je nach Nutzung und Gefahrenpotential eines Gebietes besteht ein anderes Risiko. Man könnte also die verschiedenen Risiken als Grundlage für die Zonenplanung gebrauchen. Die verschiedene Einstellung individueller Landbesitzer zu den Konsequenzen verlangt aber ein wesentlich subtileres Vorgehen, vor allem wenn es sich um Verhalten mit geringfügigen Konsequenzen (z.B. nichtstrukturelle Risse an Häusern in Rutschgebieten) handelt. Weitere Bemerkungen hiezu folgen weiter unten.

Berücksichtigung der Kostenunsicherheiten

Wie Kosten- und Zeitunsicherheiten entstehen, lässt sich am besten mit dem Tunnelbeispiel (Bilder 3 und 4) erklären: Jede der Gebirgsklassen kann einer Ausbauklasse und damit einem Bauvorgehen, das bestimmte Kosten und Bauzeiten hat, zugeordnet werden. Die Unsicherheit der geologisch-geotechnischen Bedingungen, wie Bild 4 sie zeigt, überträgt sich damit in einen Zeit-Kostenstreubereich (Bild 9). Der Auftraggeber muss anhand dieser Information den Entscheid fällen, ob zur Ausführung geschritten wird oder nicht. Er kann das Risiko (mit Erwartungskosten oder Nutzwerten) abschätzen, dass die verfügbare Projektsumme überschritten wird.

Verwirklichung

Der Bemessungs- oder Planungsentscheid kann so konservativ gefällt werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines unbefriedigenden Verhaltens sehr klein ist (sie kann aber nicht Null sein!). So können z.B. Teilvortriebsmethoden mit kurzen Abschlagslängen für ein Tunnelprojekt vorgeschrieben werden, oder in der Zonenplanung für ein Rutschgebiet werden Nutzungen vorgeschrieben, die bewegungsunempfindlich sind (z.B. Weidwirtschaft); beides ist wirtschaftlich und das zweite auch politisch oft nicht vertretbar. Man wird also Verwirklichungsverfahren wählen, die eine höhere Wahrscheinlichkeit unbefriedigenden Verhaltens (Versagens) einschliessen. Die damit verbundene Unsicherheit muss mit einer Kombination von gesetzlich/vertraglichen, von organisatorischen und von technischen Massnahmen behandelt werden. Dies kann wiederum am besten mit Beispielen gezeigt werden:

Angesichts der durch die geologisch-geotechnischen Unsicherheiten bedingten Kosten-Zeit-Streuungen (Bild 9) steht der *Tunnelbau*unternehmer vor einem Dilemma. Einerseits zwingt ihn die Konkurrenz, einen niedrigen Eingabepreis zu formulieren, anderseits ist er finanziell oft nicht in der Lage, grössere Verluste zu tragen. Vertragliche Massnahmen können hier vorteilhaft sein, wenn nämlich der Auftraggeber, als normalerweise kapitalkräftigerer Vertragspartner, sogenannte nicht kontrollierbare Risiken übernimmt und dem Unternehmer Risiken verbleiben, die er kontrollieren kann. Wenn sorgfältig formuliert, bringt dies zwei nützliche Ergebnisse, nämlich niedrigere Eingabepreise und Vorteile für den besseren Unternehmer.

Der Tunnelbau-Unternehmer hat sich aber auch in der Organisation während

Literatur

[1] *Navier, M.:* Résumé des leçons données a l'école royale des ponts et chaussées, Firmin Didot, 1826

[2] *Peck, R.B.:* Advantages and limitations of the observational method, «Géotechnique», Vol. 19, 1969

[3] *Casagrande, A.:* The Role of Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering, «Géotechnique», Vol. 14, 1964.

[4] *Einstein, H.H., Baecher, G.B.:* Probabilistic and Statistical Methods in Engineering Geology, Part I, «Rock Mechanics and Rock Engineering», Vol. 16, 1983

[5] *Benjamin, J.R., Cornell, C.A.:* Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers, McGraw Hill, 1970

[6] *Bæcher, G.B.:* Uncertainty Analysis in Geotechnical Engineering, in Vorbereitung

[7] *Schlaifer, R.:* Probability and Statistics for Business Decisions, Wiley, 1959

[8] *Ashley, D.B., Veneziano, D., Einstein, H.H., Chan, M.H.:* Geologic Prediction and Updating in Tunneling, Proc. 22nd U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1981

[9] *Antoine, P.:* Réflexions sur la carthographie Zermos et bilan des expériences en cours. Bulletin BRGM, 2e Série, Sect. III, No 1/2 1977.

[10] *Kienholz, H.:* Kombinierte geomorphologische Gefahrenkarte Grindelwald, Geogr. Inst. der Univ. Bern, 1977

[11] *Jones, F.O.:* Landslides along the Columbia River Valley, USGS Prof. Paper 367, 1961

[12] *Carpenter, J.H.:* Landslide Risk Along Lake Roosevelt, MIT MS Thesis, 1983

[13] *Bonnard, Ch., Noverraz, F.:* Instability Risk Maps: From the detection to the administration of landslide prone areas. Proc. 4th Int. Symposium on Landslides

[14] *Einstein, H.H..:* Risque d'instabilité des terrains. Rapport int., Projet DUTI, 1982/83

[15] *Bæcher, G.B., Einstein, H.H.:* Slope Reliability Models in Pit Optimization, Proc., APCOM, 1979

[16] *Einstein, H.H., Veneziano, D., Baecher, G.B., O'Reilly, K.J.:* The Effect of Discontinuity Persistence on Rock Slope Stability, «Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences», Vol. 20, 1983

[17] *Alonso, E.E.:* Risk Analysis of Slopes and its Application to Slopes in Canadian Sensitive Clays, «Géotechnique», Vol. 26, 1976

[18] *Vanmarcke, E.:* On the Reliability of Earth Slopes, «ASCE Geotechnical Journal», Vol. 103, 1977

[19] *Kim, Y.:* Decision Support Framework in Adaptable Tunneling, MIT PH.D. Thesis, 1984.

des Baues mit Unsicherheiten zu befassen. Eine organisatorische Frage tritt oft beim Übergang vom Teil- zum Vollvortrieb auf: Soll, wenn bessere Verhältnisse angetroffen werden, gleich zum leistungsfähigeren Vollvortrieb übergegangen werden, oder soll man beim Teilvortrieb verbleiben, da die Verhältnisse sich allenfalls wieder verschlechtern können und ein abermaliger Verfahrenswechsel nötig würde. Viele andere organisatorische Entscheide hängen in ähnlicher Weise von geologisch-geotechnischen und verfahrenstechnischen Unsicherheiten ab. Wir haben für diesen Zweck eine Managementmethode durch Kombination probabilistischer Vorhersagen (wie Gebirgsklassenprofil in Bild 4) und dynamischem Programmieren entwickelt [19], die es dem Unternehmer an jedem Punkt im Tunnel ermöglicht, den optimalen Entscheid zu treffen (Bild 10). Dies ist der optimale Entscheid auf probabilistischer Basis, z.B. Bauverfahren 2 ist das beste mit 90% Wahrscheinlichkeit.

Wie im Abschnitt 4.2 gezeigt wurde, können Schadenrisiken infolge Geländebewegungen als Grundlage für *Zonenpläne* dienen, wobei aber eine korrekte Erfassung der Risiken schwierig ist. Ähnlich wie bei den anpassungsfähigen Methoden im technischen Sinne wurde im Projekt DUTI die Methodik einer anpassungsfähigen Zonenplanung entwickelt. Dabei werden z.B. Baubeschränkungen nicht absolut ausgesprochen, sondern die Baubewilligung mit allfälligen Beschränkungen wird von den Ergebnissen vorgängiger geotechnischer oder geologischer Untersuchungen abhängig gemacht [13].

Schlussfolgerungen und Ausblick

Nach dieser Übersicht über die Rolle der Unsicherheit in der Geotechnik und über deren Bearbeitung stellt sich die Frage, wo stehen wir und wohin gehen wir:

Das Erfassen und Behandeln der Unsicherheit geschieht mit einer Kombination von objektiven, meist explizit ausgedrückten Verfahren und von Verfahren, die stark subjektiv geprägt sind und vor allem die Erfahrung implizit mitspielen lassen. Neuere Entwicklungen, die in diesem Beitrag beschrieben wurden, zielen vor allem darauf hin, die Erfahrung und Entscheidungsfassung explizit auszudrücken. Die Tatsache, dass dies meist mit Zahlen geschieht, hat den Vorteil einer konsequenten und direkten Verbindung der Unsicherheitsbearbeitung durch alle Projektphasen. Ebenso wichtig ist aber auch der Zwang zum vollständigen Durchdenken, der mit der expliziten Formulierung (ob zahlenmässig oder verbal) verlangt wird.

Die beschriebenen neueren Entwicklungen zeigen aber auch den Weg in die Zukunft:

- Die Erfahrung kann in sogenannte Expertsysteme (ein Gebiet der künstlichen Intelligenz) eingebaut werden, wodurch nicht nur von der persönlichen, sondern auch von der Erfahrung anderer systematisch Nutzen gezogen werden kann.
- Die Miniaturisierung und Verbesserung der Genauigkeit von Instrumenten wird einen Informationsreichtum bringen, der, systematisch ausgewertet, ein genaueres Bild der Wirklichkeit bringen wird.
- Zusammen mit entsprechend weiterentwickelten Organisationsmethoden wird diese genauere und schnellere Erfassung der Wirklichkeit zu wirtschaftlicheren Ausführungsverfahren führen.

Statt ein lästiger Umstand zu sein, scheint uns die Unsicherheit demnach Möglichkeiten zu geben, an Entwicklungen mitzuwirken, die bahnbrechenden Charakter haben, und dies weit über die Geotechnik hinausreichend.

Adresse des Verfassers: Dr. *Herbert H. Einstein*, Professor of Civil Engineering, Room 1-330, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge MA 02178, USA.

Geotechnik und Umwelt

Von Richard Sinniger, Lausanne

Die Geotechnik muss in der Lage sein, möglichst zutreffende Grundlagen und Rechenmodelle zu schaffen, um die ihr zustehenden Probleme im bebauten und unbebauten Milieu zu lösen. Dabei ist in jedem einzelnen Fall und im Rahmen jedes Projektes auf die Umwelt Rücksicht zu nehmen.
Der Ausdruck Umwelt sollte aber in seiner umfassenden Bedeutung verstanden werden und sämtliche Einflüsse enthalten, die sich auf ein Individuum oder eine Sache auswirken können. So gehört zu einer umweltgerechten Geotechnik unter anderem auch die Berücksichtigung der Tatsache, dass die meisten Kennwerte Zufallsvariable sind. Gerade bei Stabilitätsproblemen zeigt sich ein grosser Informationsverlust, wenn mit fraglichen Mittelwerten und schwer interpretierbaren Sicherheitsfaktoren gearbeitet wird.
Eine der Umwelt gerechte Geotechnik muss deshalb nicht nur die Erhaltung eines intakten Lebensraumes anstreben, sondern selbst bemüht sein, die wahre Natur der Vorgänge richtig zu erkennen und sie dementsprechend zu bearbeiten.

La géotechnique doit être en mesure de fournir les bases et les modèles de calcul les plus appropriés pour résoudre les problèmes qui lui sont posés dans le milieu construit et non construit.
Dans chaque cas particulier, de même que dans le cadre de chaque projet, il s'agit de prendre en considération l'environnement. Le terme «environnement» devrait toutefois être compris dans son sens le plus large et inclure tous les éléments pouvant porter atteinte à quelqu'un ou quelque chose. Ainsi, il appartient à une géotechnique respectueuse de l'environnement d'identifier la vraie nature du phénomène et de tenir compte, entre autres, du fait que la plupart des caractéristiques sont des variables aléatoires. Pour les problèmes de stabilité, en particulier, on constate une perte d'informations considérable si l'analyse est réalisée à l'aide de valeurs moyennes discutables et de coefficients de sécurité difficiles à interpréter.
Une géotechnique tenant compte de l'environnement ne doit donc pas seulement tendre à maintenir intact le milieu, mais également s'efforcer de reconnaître la vraie nature des phénomènes et les traiter en conséquence.

Beziehung zur Umwelt

Es ist eine unbestreitbare Tatsache, dass überall dort, wo der Mensch auftritt, eine Auswirkung seiner Existenz auf die ihn umgebende Welt, seine Umwelt, stattfindet. Dabei sind die materiellen Folgen, insbesondere die Umgestaltung des Lebensraumes, ganz besonders offensichtlich. Ich will hier nicht analysieren, wieweit diese Umgestaltung unerlässlich ist und wo sie vermeidbar wäre. Festgehalten sei lediglich, dass bei einer solchen Betrachtung das Mass des Eingriffes ganz wesentlich mitspielt. Und eben die Beurteilung dieses zulässigen Masses ist, je nach Epoche oder Betrachter, recht unterschiedlich und daher äusserst schwierig