

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Band:** 103 (1985)  
**Heft:** 19: 50 Jahre Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der ETH Zürich

**Artikel:** Geotechnik und Umwelt  
**Autor:** Sinniger, Richard  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-75776>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **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. [Voir Informations légales.](#)

### **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. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 24.11.2024

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

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 Entscheidungen 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 Expertensysteme (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.

### 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 beson-

ders 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

*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.*

zu beantworten, ja, sie wird meines Erachtens letzten Endes zu einer politischen Angelegenheit.

Wir erleben gerade in diesen Tagen engagierte und mit Vehemenz geführte Diskussionen um dieses zulässige Mass. Offenbar ist zurzeit die

*Beziehung zur Umwelt*

dermassen beeinträchtigt, dass viele Zeitgenossen nur noch ein Unterlassen jeglichen menschlichen Eingriffes als annehmbar und mit der Natur verträglich erachten. Die Möglichkeit, in und mit ihr nach Kriterien der Vernunft zu leben und zu gestalten, scheint mancherorts ausgeschlossen zu sein.

Aus dieser Sicht betrachtet, hätte gerade der Geotechniker kaum eine Chance, vor solch extremen Kriterien zu bestehen. In der Tat bietet er zum Beispiel Hand, Produktionsanlagen und Verkehrswege auf schwierigem Baugrund zu verwirklichen, oder er geht so weit und nützt den Boden sogar als Baustoff, um damit Dämme zum Hochwasserschutz oder zur Energieerzeugung zu bauen. Eingriffe in die Natur sondergleichen, die heute von vielen kategorisch abgelehnt werden, selbst wenn sie andernorts Nutzniesser solcher Bauwerke sind.

Ich frage mich deshalb, ob die in den letzten Jahren bis hinauf zu den internationalen Konferenzen der Gesellschaft für Bodenmechanik und Foundationstechnik angefachte Diskussion über die Beziehung der Geotechnik zur Umwelt nicht letzten Endes aus einem möglichen Bedürfnis nach Rechtfertigung heraus entstanden ist, einem Bedürfnis nach der Suche von Tätigkeiten, die unter keinen Umständen riskieren, kritisiert zu werden.

Die Beiträge an der Konferenz 1977 in Tokio, wo erstmals eine Sondersitzung zu diesem Thema auf dem Programm stand, haben gezeigt, wie schwer es sich mit diesem Thema anlässt, zielten doch die Beiträge in alle möglichen Richtungen [6]. Aber vier Jahre später, an der Konferenz von Stockholm, war das Ergebnis nicht überzeugender. Das Fehlen einer umfassenden Definition von Umwelt im Bezug auf Geotechnik muss nämlich auch die Suche nach spezifischen Tätigkeiten des Geotechnikers scheitern lassen.

Zum Glück! Würde es nämlich gelingen, Tätigkeiten zu identifizieren, die eindeutig dem Schutz der Umwelt dienen, würden andererseits Tätigkeiten des Geotechnikers entstehen, die eben nicht zum Schutz oder gar zum Schaden der Umwelt führen würden. Dies käme aber beinahe dem Einzug von Gut und Böse in der Geotechnik gleich.

Dies muss meines Erachtens vermieden werden, da die Geotechnik als solche weder gut noch böse sein kann. Der Geotechniker hat in jedem Fall die ihm im Rahmen eines Projektes gestellten Aufgaben mit grösstmöglicher Rücksicht auf das umgebende Milieu zu lösen, wobei das Mass der Rücksicht sowohl von der Zeit wie vom Ort stark abhängig ist.

Die von Sembenelli und Ueshita [9] in Stockholm geäusserte Ansicht, dass umweltbezogene Geotechnik vor allem in der Planungs- und Entscheidungsphase gewichtige Beiträge zu leisten hat, finde ich ebenfalls gefährlich. Dadurch könnte auf der einen Seite der umweltbewusste Planer und auf der anderen Seite der weniger besorgte Ausführende entstehen. Wir wissen jedoch, dass gerade von der Ausführung her viele Impulse gegeben wurden und dass, dank unternehmerischer Initiative, manches in der Geotechnik möglich wurde, selbst zu einer Zeit, da die Umweltdiskussion noch nicht entfacht war.

Meines Erachtens gibt es nur eine Geotechnik, und das ist die, welche Grundlagen und Modelle zum Verständnis gewisser Vorgänge im bebauten und unbebauten Milieu liefert.

Je besser diese Grundlagen und Modelle sind, desto näher kommen wir unserem Ziel, der Umwelt gerecht zu bauen. Welches Objekt aber im Einzelfall Wirklichkeit wird, ist dabei keine Frage der Geotechnik, sondern eine Frage der Gesellschaft und ihrer Politik. Die Geotechnik liefert nur einen Beitrag unter vielen.

Gestatten Sie mir noch einige Überlegungen zum Ausdruck Umwelt, sei er nun allgemein oder im Bezug auf Geotechnik angewandt. Diese Gedanken scheinen mir um so erforderlicher, als momentan eine Begriffseinengung droht, die wahre Bedeutung von Umwelt zu verfälschen. Heute wird nämlich Umwelt vielerorts als Lebensraum von Flora und Fauna allein verstanden. Der Mensch mit seinen technischen Fähigkeiten wird dabei, je nach Standpunkt, als Herr über alles, als Übeltäter oder als beides zusammen hingestellt. Dabei, so will ich meinen, ist Umwelt viel umfassender und enthält neben anderem auch kulturelle Werte sowie gesellschaftliche und wirtschaftliche Aspekte. Die Anstrengungen zum Schutz der Umwelt müssen demzufolge auch Kultur, Gesellschaft und Wirtschaft mit in die Überlegungen einbeziehen, denn gerade gesellschaftliche Krisen oder wirtschaftliche Missstände sind die schlimmsten Feinde dessen, was wir eigentlich gerne schützen möchten.

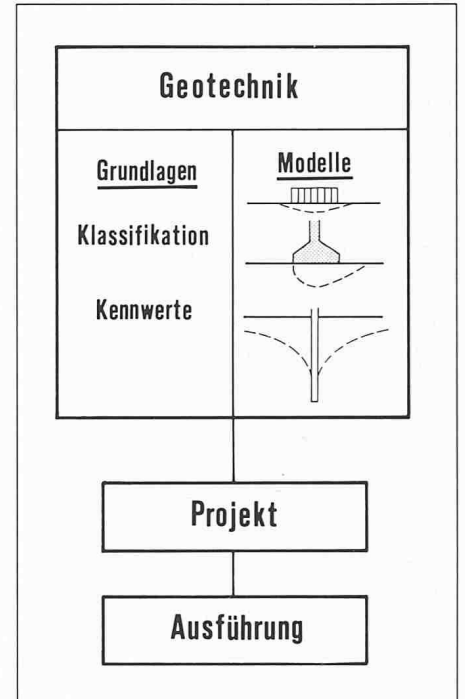


Bild 1. Aufbau und Beitrag der Geotechnik zur Lösung von Problemen

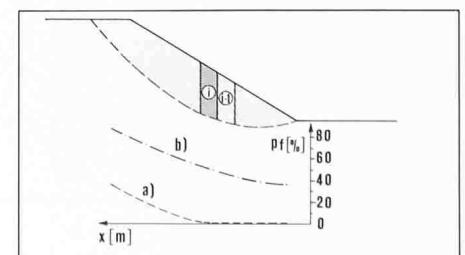
Bild 2. Einflüsse, die sich auf die Entwicklung der Geotechnik auswirken



Bild 3. Informationsgehalt bei deterministischer bzw. probabilistischer Berechnung

ermittelte $\theta'$ -Werte [°]	Informationsgehalt	
	deterministisch	probabilistisch
2 1	$\bar{\theta}' = 27^\circ$	min. min. $\theta' = 0$ (geschätzt) $f(\theta')$  $\bar{x} - s \quad \bar{x} \quad \bar{x} + s$ max. max. $\theta' = 50^\circ$ (geschätzt)
2 4		
2 5		
2 6		
2 6		
2 7		
2 7		
2 8		
2 9		
2 9		
3 0		
3 2		

Bild 4. Übergangswahrscheinlichkeit pf für a) stabilen Hang, b) rutschgefährdeten Hang



Umwelt könnte somit versuchsweise als «Summe aller Einflüsse, die sich auf die Entwicklung einer Sache auswirken», definiert werden. Bezogen auf die Geotechnik heisst das folglich, dass nicht nur nach einer Klassifizierung ihrer lobenswerten Anwendung gesucht werden sollte, sondern dass wir sie im ganzen Umfeld der möglichen Einflüsse sehen, wie in Fig. 2 dargestellt.

Nur wenn wir bestrebt sind, die Geotechnik mit Rücksicht auf andere Fachbereiche anzuwenden und unter Berücksichtigung der Erkenntnisse aus anderen Disziplinen weiterzuentwickeln, können wir von umweltgerechtem Handeln sprechen.

In meinen weiteren Ausführungen werde ich denn an einigen wenigen Beispielen aufzuzeigen versuchen, wie sich diese mannigfaltigen Beziehungen Umwelt/Geotechnik gegenseitig beeinflussen können.

### Erhaltung von Kulturgütern

Ferner möchte ich aufzeigen, dass Geotechnik nicht nur Umwelt erhaltend oder gestaltend sein kann, sondern dass ihre Entwicklung selbst von dieser Umwelt und ihren Anforderungen gekennzeichnet ist. In der Tat prägt die Gesellschaft mit ihren Zielen und Bedürfnissen zu einem beachtlichen Teil die Forschung und die aus ihr entstehenden neueren Methoden und Kenntnisse.

Das berechtigte Bedürfnis nach der

#### Erhaltung von Kulturgütern

hat zum Beispiel in den vergangenen Jahren zu einem recht grossen Aktionsfeld der Bodenmechanik und der Fundamentstechnik geführt. Am zehnten internationalen Kongress über Bodenmechanik und Fundamentstechnik, 1981 in Stockholm, wurde sogar eine besondere Session unter dem Titel «Rettung von

Siedlungen und alten Bauwerken» geschaffen, zu der 29 Beiträge aus aller Welt eingereicht wurden [1]. Diese Artikel sprechen von Anstrengungen, so berühmte Bauwerke wie die Akropolis in Athen oder den schiefen Turm von Pisa der Nachwelt zu erhalten.

Diese Tätigkeit bringt den Bodenmechaniker in Verbindung mit ganz anderen Fachgebieten, wie zum Beispiel Kunstgeschichte und Archäologie. Doch diese Öffnung zu anderen Disziplinen ist nicht die einzige Herausforderung bei der Erhaltung von Kulturgütern. Vorerst gilt es doch die Ursachen des Schadens zu erkennen und wenn möglich auszuschalten. Die Erkundung des Fundationsbereiches, auch hier unabdingbare Voraussetzung für sinnvolle Massnahmen, hat meistens unter erschwerten Umständen zu erfolgen. Ferner sind die Art des seinerzeit verwendeten Baustoffes und die Kräfteverhältnisse oft nur näherungsweise erfassbar. Was die eigentlichen Sanierungsarbeiten anbelangt, ist festzustellen, dass meistens bekannte Techniken wie Unterfangung, Pfählung oder Injektionen auch hier gangbare Lösungen darstellen. Die Erfordernis, eine bereits bestehende Fundation aufzufangen, bedingt jedoch eine Anpassung von Geräten, Materialien und Bauelementen, so dass eine Vielzahl von neuen Methoden entstanden ist und sicherlich noch entstehen wird, nicht zuletzt zum Nutzen neuer Objekte.

Aber auch die Erhaltung schützenswerter Elemente im Zusammenhang mit der Erstellung neuer Projekte bringt Herausforderungen an den Bodenmechaniker, der dadurch einen Beitrag leistet, eine lebenswerte Umwelt zu erhalten, ohne auf die Befriedigung neuer Forderungen zu verzichten.

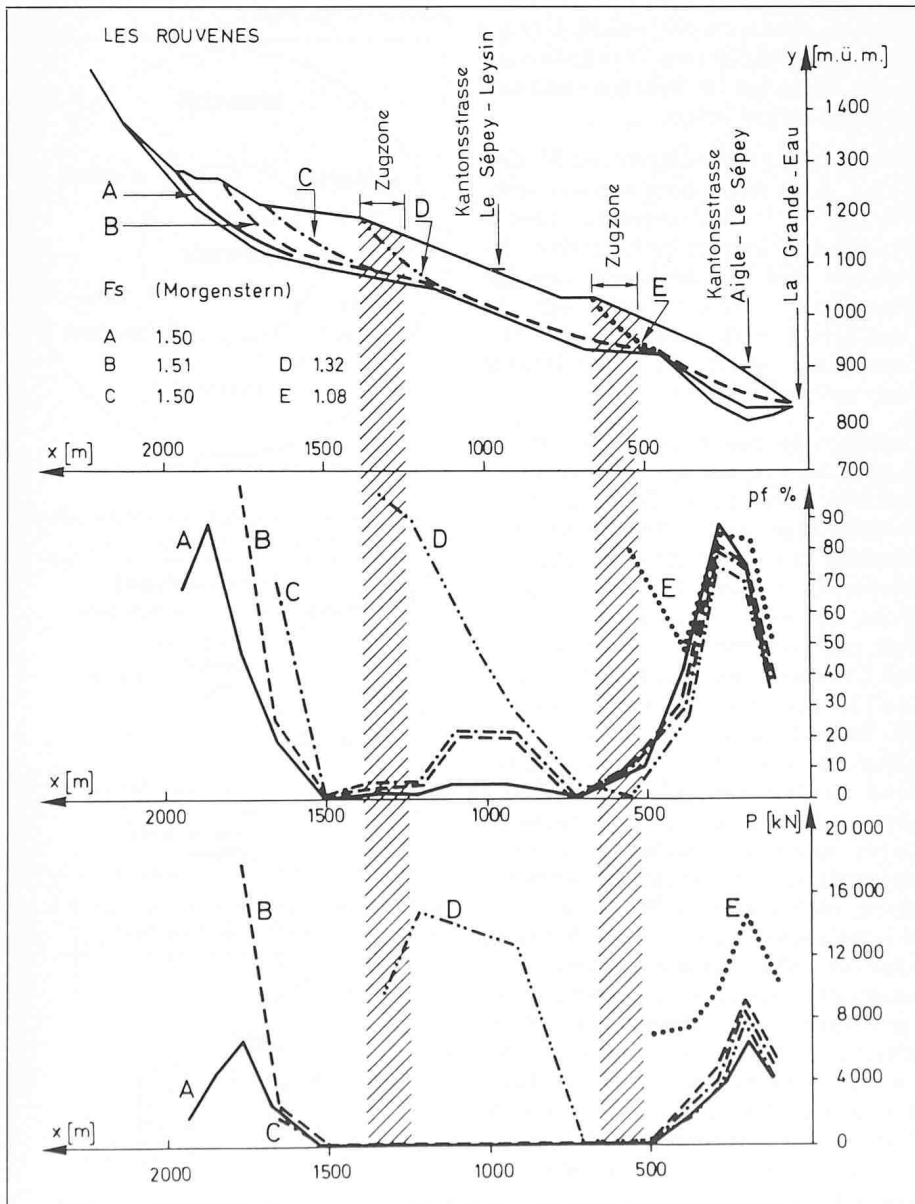
### Sicherung des Lebensraumes

Es sind aber nicht nur Pyramiden, Tempel und Kirchen, um nur einige erhaltenswerte Kulturmonumente aufzuzählen, deren Fortbestand gesichert werden soll. Verwitterungserscheinungen im Untergrund, klimatische Änderungen oder menschliche Einflüsse führten und führen mancherorts zu weiträumigen Rutschungen, die Massnahmen zur

#### Sicherung des Lebensraumes

verlangen. Die Geotechnik wird in diesem Zusammenhang vor Probleme gestellt, die in ihrer Art nicht neu, aber in ihrer Auswirkung selten so ausgeprägt sind. Um den ganzen Fragenkomplex im Zusammenhang mit Geländerrutschungen zu bearbeiten, hat die ETH

Bild 5. Probabilistische Stabilitätsanalyse der Rutschung La Frasse nach Oboni und Bourdeau.  $pf$  ist die Übergangswahrscheinlichkeit und  $P$  die mittlere übertragene Kraft



Lausanne im September 1980 ein interdisziplinäres Forschungsprogramm gestartet. Es läuft unter dem Namen «Détection et Utilisation des Terrains Instables», abgekürzt DUTI. Hier finden wir als Gesprächspartner oder Teamkollegen zum Bodenmechaniker den Juristen, den Landschaftsplaner, den Spezialisten in Photogrammetrie und andere mehr. Den Geologen und Hydrogeologen schliesse ich absichtlich nicht in die Liste mit ein, da deren Beiträge in jedem Fall wesentliche Bestandteile der Studien von Baugrundfragen bilden.

Instabilität von natürlichen Böschungen, sei dies in Fels oder Lockergestein, haben von jeher den Geotechniker in besonderer Art und Weise beschäftigt. Das räumliche Ausmass sowie die menschlichen und wirtschaftlichen Folgen solcher Geländebewegungen sind sicher die zwingendsten Gründe dieses Interesses. Die besondere Herausforderung, welche die Bearbeitung solcher Probleme an den Geotechniker stellt, spielt aber ebenfalls eine grosse Rolle. In der Tat wirken beim Studium von Rutschungen sehr unterschiedliche Fachbereiche mit, so dass für die Beurteilung recht viele Parameter zu berücksichtigen bleiben. Es mag denn auch nicht erstaunen, dass Sachverhalte oft recht unterschiedlich beurteilt werden, je nachdem, wer die Analyse durchführt. Im folgenden beschränke ich mich lediglich auf die geotechnischen Aspekte, das heisst auf die Erfassung und Beurteilung der Bodeneigenschaften und des Modells der Rutschung.

Bei grossräumigen Geländebewegungen tritt besonders ein Merkmal von geotechnischen Problemen ganz deutlich in Erscheinung. Die Kennziffern der Materialeigenschaften sind keine festen Zahlenwerte. Sie ändern örtlich, infolge Inhomogenität des Untergrundes, und zeitlich, infolge wechselndem Wassergehalt. Zudem bringen die Methoden zur Bestimmung dieser Kennziffern zusätzliche Streuungen mit ins Spiel. Diese Feststellung ist durchaus nicht neu und jedem auf Kennziffern Angewiesenen wohlvertraut. Bereits Terzaghi [10] schreibt in der Einleitung zur Bodenmechanik in der Baupraxis, dass «... jede Feststellung und Schlussfolgerung über die in der Natur anstehenden Bodenarten viele Unsicherheiten einschliesst».

### Über den Sicherheitsfaktor

Dabei muss es sich nicht unbedingt um die Beurteilung eines ausgedehnten Rutschhanges handeln. Bereits die Charakteristiken eines «homogenen Mate-

riales», wie zum Beispiel das Kernmaterial für einen Damm, können in Grenzen variieren, welche die Wahl eines Wertes für die Berechnung fragwürdig erscheinen lassen. Darüber vermag auch eine Parameterstudie nicht hinwegzutäuschen. Denn, um nochmals Terzaghi zu zitieren, «Trotz des grossen Aufwandes an Zeit und Arbeit, den solche Untersuchungen erfordern, lassen die Ergebnisse gewöhnlich viele Möglichkeiten für ihre Auslegung offen».

Wie verhält sich aber der Bodenmechaniker gegenüber diesen Unsicherheiten und den vielen Möglichkeiten der Auslegung? Vorerst stellt er fest, dass er durch seine Tätigkeit ein Risiko eingeht, das heisst, dass sich der Untergrund nicht seinen Prognosen entsprechend verhalten könnte.

Casagrande hat bereits 1964 in seiner Terzaghi lecture [3] den bekannten Begriff des «Calculated risk» geprägt, wobei hier als Übersetzung von «calculated» das Wort «geschätzt» eingesetzt werden muss.

Um das Risiko möglichst klein zu halten, greift der Bodenmechaniker alsdann zu einem oft schwer festzulegenden Sicherheitsfaktor. Huder und Lang schreiben denn auch in der IGB Mitteilung Nr. 115 zur Frage der Sicherheitsüberlegungen im Grundbau [5]: «Die Frage nach der zahlenmässigen Grösse des im konkreten Einzelfall zu fordernden Sicherheitsgrades  $F$  kann nicht allgemein beantwortet werden».

Dies ist eine bezeichnende Formulierung für das allgemeine Unbehagen dem Sicherheitsfaktor gegenüber, dessen unterschiedliche Grösse nur durch Erfahrung gestützt werden kann.

Nehmen wir als konkretes Beispiel die oben erwähnte Analyse von Rutschhängen, so stellen wir rasch fest, dass in diesem Fall ein

#### *fragwürdiger Sicherheitsfaktor*

nicht angebracht ist, den Zustand in der Natur auch nur annähernd zu beschreiben. Vorab bereitet die Wahl der in die Rechnung einzuführenden Kennwerte grosse Mühe.

Alsdann trifft das vereinfachte Modell einer als Block gleitenden Masse oberhalb einer tatsächlichen oder angenommenen Gleitfläche nur in den seltensten Fällen zu. In der Tat wissen wir schon lange aus Beobachtungen, dass entlang einer solchen Gleitfläche zeitlich und örtlich verschiedene Kräfte und Verformungen auftreten. Eine bessere Modellierung ist daher wünschenswert, aber nur möglich, wenn wir Kenntnisse und Erfahrungen aus anderen Wissensbereichen heranziehen, was

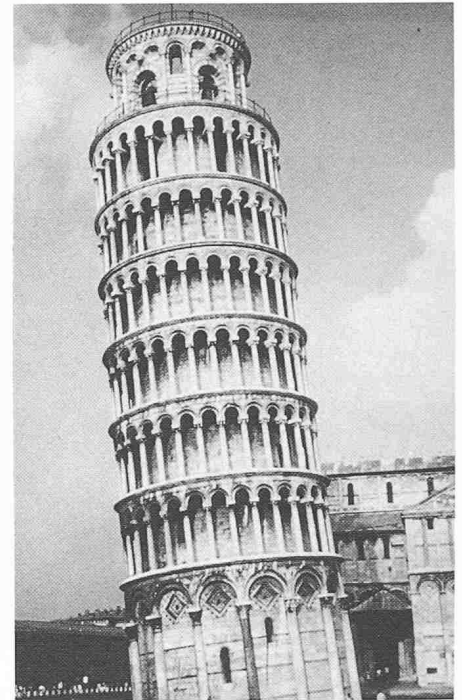


Bild 6. Der schiefe Turm von Pisa

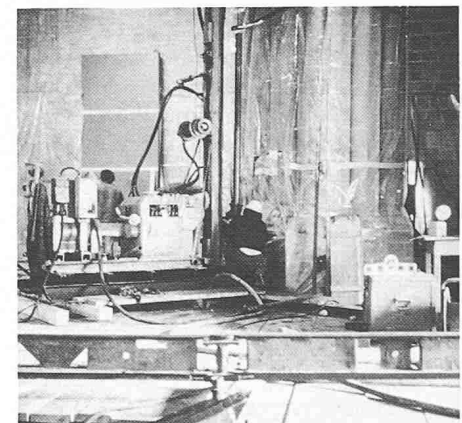


Bild 7. Bohrgerät im Inneren der Kathedrale St-Pierre in Genf (Foto Swissboring)

Bild 8. Façade Audéoud in Genf (Foto Zschokke Genf)

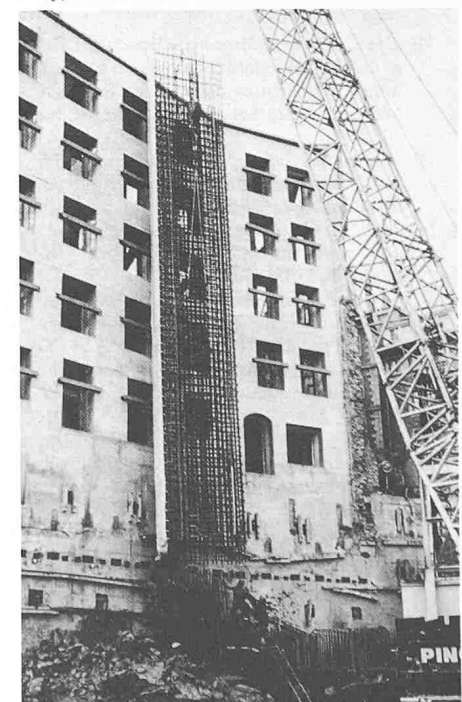




Bild 9. Rutschung La Frasse (Foto DUTI).

für mich auch eine Berücksichtigung der Umwelt bedeutet.

In Anbetracht der Zufälligkeit einer an einem beliebigen Punkt des Untergrundes bestimmten Kennziffer sollten wir die mögliche Streuung der Werte nicht mehr ausser acht lassen. Wir sollten in der Bodenmechanik akzeptieren lernen, dass praktisch alle Werte, mit denen wir es zu tun haben, mit einbezogen die äusseren Belastungen, Zufalls-

variable sind. Die Statistik und die Wahrscheinlichkeitslehre bieten sich hier an, einen Schritt näher an die tatsächlichen Verhältnisse zu kommen. Wenn sie auch nicht die endgültige Lösung des Problems erlauben, so gestatten sie immerhin, das viel diskutierte Risiko besser zu umschreiben, in gewissen Fällen sogar zu quantifizieren. Zum Glück ist es seit der siebzehnten Terzaghi lecture von Whitman [11] im Jahre 1981 nicht mehr nötig, eine Lanze für diese neuen Wege in der Geotechnik zu brechen. In eindrücklicher Art und Weise wurden von Whitman die Möglichkeiten, die sich dadurch anbieten, aufgezeigt.

Nehmen wir zum Beispiel die Werte der inneren Reibung eines Lockergesteins.

Erfahrungsgemäss ist die Streuung der  $\phi$ -Werte recht gross. Würde man sich, wie bei einer deterministischen Berechnung üblich, auf einen einzigen, recht fraglichen Wert einigen, ginge sehr viel an Information über das betreffende Material verloren.

Derselbe Gehalt an Information geht verloren, wenn wir gezwungen sind, für die äussere Belastung einen einzigen Wert festzulegen, insbesondere wenn diese, wie bei Rutschungen, durch den Boden selbst verursacht wird.

Formuliert man jedoch Funktionen der Wahrscheinlichkeitsdichte für alle Grössen, welche die Scherfestigkeit des Bodens charakterisieren, sowie für die Grössen, welche die Scherspannung verursachen, kann die Wahrscheinlichkeit, dass die tatsächliche Scherspannung grösser ist als der Widerstand, das heisst, dass Instabilität auftritt, berechnet werden [4]. Anstelle eines Sicher-

heitsfaktors tritt somit eine Wahrscheinlichkeit, dass die Scherspannung grösser ist als die Scherfestigkeit. Ich zweifle nicht daran, dass die vielerorts laufenden Anstrengungen in absehbarer Zeit dazu führen werden, aussagekräftige Zusammenhänge zwischen dieser Wahrscheinlichkeit und dem Ausmass der tatsächlich auftretenden Bewegungen aufzuzeigen.

## Bodencharakteristiken als Zufallsvariable

Ist man bestrebt, auf eine der Umwelt gerechten, das heisst entsprechenden Art zu handeln, gilt es auch, die Abläufe in dieser Umwelt richtig zu erfassen. Um wiederum auf die Rutscherscheinungen zurückzukommen, stellt man, wie bereits angetönt, fest, dass in der Gleitzone einer Rutschung unterschiedliche Anteile der Scherfestigkeit mobilisiert werden. Diese Unterschiede bestehen übrigens auch bei stabilen Böschungen, so beispielsweise bei Dammschüttungen. Entlang einer bestehenden oder angenommenen Gleitfläche treten somit Zonen ganz verschiedener Beanspruchung auf. Ein globaler Vergleich von Beanspruchung und Widerstand, wie er bei den klassischen Stabilitätsanalysen gemacht wird, ist somit ein stark vereinfachtes Modell, das sich jedoch dank grosser Erfahrung, dies sei hier vermerkt, in vielen Fällen bewährt hat. Bei rutschgefährdeten Hängen sind jedoch solche globalen Betrachtungen recht unbefriedigend und die gerechneten Sicherheitsfaktoren schwer zu interpretieren. Für die Analyse von Rutschungen haben denn Oboni und Bourdeau ein Modell entwickelt, das erlaubt, lamellenweise die Beanspruchung und den Widerstand zu beurteilen. Dabei werden die

### Bodencharakteristiken als Zufallsvariable

eingeführt, was gestattet, die Übergangswahrscheinlichkeit  $pf$  zu berechnen.  $pf$  ist dabei die Grösse der Wahrscheinlichkeit, dass eine Lamelle  $i$  zu gleiten beginnt, wenn die unter ihr liegende Lamelle  $i-1$  bereits instabil ist.

Was die Beschreibung der Methode anbelangt, wird auf die verschiedenen Publikationen [2, 7, 8] hingewiesen. Nachstehend sei lediglich das Ergebnis für die Rutschung La Frasse kurz kommentiert:

– Die klassische Stabilitätsberechnung nach Morgenstern gibt für diesen bekannten und oft schadenverursachenden Hang Sicherheitswerte zwischen 1.08 und 1.51.

### Literatur

- [1] Proceedings of the X-ICSMFE, Vol. 3, Stockholm, 1981
- [2] Bonnard, Ch., Oboni, F.: Etude probabiliste de glissement – assainissement, Proc. XI-ICSMFE, San Francisco, 1985
- [3] Casagrande, A.: Role of the Calculated Risk in Earthwork and Foundation Engineering, "Journal of the Soil Mechanics Division", ASCE, Vol. 91, No SM4, July, 1965
- [4] Dysli, M.: Tendances actuelles dans l'usage des modèles mathématiques en géotechnique, «Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches», No 105, 1981
- [5] Huder, J., Lang, H.J.: Zur Frage der Sicherheitsüberlegungen im Grundbau, Mitteilung Nr. 115 des IGB, 1980
- [6] Moh, Za-Chieh: Geotechnical engineering and environmental control, Proc. IX-ICSMFE, Vol. 3, Tokyo, 1977
- [7] Oboni, F., Bourdeau, P.L.: Determination of the critical slip surface in stability problems, Proc. ICSP 4, Florence, 1983
- [8] Oboni, F., Bourdeau, P.L., Bonnard, Ch.: Probabilistic Analysis of Swiss Landslides, IV-Int. Symp. on Landslides, Toronto, 1984
- [9] Sembenelli, P., Ueshita, K.: Environmental geotechnics: State-of-the-art report, Proc. X-ICSMFE, Vol. 4, Stockholm, 1981
- [10] Terzaghi, K., Peck, R.B.: Die Bodenmechanik in der Baupraxis, Springer-Verlag, 1961
- [11] Whitman, R.V.: Evaluating Calculated Risk in Geotechnical Engineering, "Journal of Geotechnical Engineering", ASCE, Vol. 110, No 2, 1984.

- Gilt es, den Hang anhand der probabilistischen Rechnung zu beurteilen, ist von der untersten Lamelle nach oben fortschreitend die Änderung von  $pf$  zu beurteilen.
- Hat die unterste Lamelle eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass sie von oben gestossen wird, nimmt auch die Grösse der mittleren übertragenen Kraft zu. Die Rutschung kann sich so weit nach oben ausdehnen, bis die Wahrscheinlichkeit gegen Null strebt.
- Entlang einer durch die Geologie vorgegebenen Gleitfläche lassen sich somit Zonen unterschiedlichen Gleitrisikos bestimmen, was zum Beispiel erlaubt, Massnahmen zur Sanierung örtlicher besser festzulegen und die auftretenden Kräfte besser abzuschätzen.
- Im Bereich, wo die Wahrscheinlichkeit der Kraftübertragung sehr ge-

ring ist, können Risse im Gelände auftreten, was in diesem konkreten Fall durch die Beobachtungen bestätigt werden konnte.

Dieses Beispiel zeigt, dass wir von einer einzigen Zahl, dem globalen Sicherheitsfaktor, zu Vergleichswerten, welche die ganze untersuchte Fläche charakterisieren, gelangt sind.

Es bedarf aber auch im Falle dieser neuen Methode noch vieler Anstrengungen, um den Inhalt der Aussage in einer beliebigen Anwendung richtig zu werten, und es wäre sicher voreilig zu behaupten, dies sei der einzige Weg, um in Zukunft Stabilitätsprobleme anzugehen.

### Schlussfolgerungen

Die Geotechnik erlaubt noch viele Beiträge zur Gestaltung und Erhaltung un-

seres Lebensraumes, wobei der Ingenieur *in jedem Fall*, sei es bei der Forschung, der Planung oder der Ausführung, Rücksicht auf die Umwelt zu nehmen hat. Dabei möchte ich den Ausdruck Umwelt in seiner umfassenden Bedeutung verstanden wissen. Diese Rücksicht erfordert Kenntnisnahme von Ansprüchen, die nicht allein durch das Projekt bedingt sind, sie erfordert Kenntnisnahme von Entwicklungen innerhalb und ausserhalb des eigenen Tätigkeitsfeldes, und sie verlangt in jedem Fall, das richtige Mass zu finden.

Dem IGB wünsche ich heute an seinem fünfzigsten Geburtstag, dass es weiterhin seinen wichtigen und wertvollen Beitrag auf der Suche nach eben diesem Mass leisten möge.

Adresse des Verfassers: Prof. R. Sinniger, Lehrstuhl für Wasserbau an der ETH Lausanne, 1015 Lausanne.

## Erdbebenforschung in der heutigen Bodendynamik

Von Armin Ziegler und Edward G. Prater, Zürich

### Bodendynamik: Entstehungsgeschichte und Umfeld

Es ist oft schwierig, den Anfang eines Fachgebietes genau festzulegen. So ist es auch bei der Bodendynamik. Zwar wurde vor 50 Jahren ein Anfang mit den ersten Arbeiten über Maschinenfundationen gemacht, die grossen Impulse bei ihrer Entwicklung kamen jedoch in den letzten 30 Jahren mit militärischen Anwendungen (wie die nuklearen Waffeneinwirkungen auf Untergrundschutzräume) und die Erdbebenbeanspruchung von Dämmen und Boden-Bauwerk-Systemen, insbesondere von Kernkraftwerken. Ein verwandtes Gebiet, das in der letzten Zeit Bedeutung erlangte, ist die Off-shore-Technik, bei der die Beanspruchung von Bohrplattformen durch Wellengang oder Erdbeben massgebend werden kann.

Die nachfolgende Liste gibt eine Übersicht der Teilaspekte der Bodendynamik:

- Maschinenfundationen mit aktiver und passiver Isolation
- Erschütterungsmessungen im Feld
- Stossbelastung des Bodens infolge Explosionen usw.

- seismisch induzierte Verflüssigung in Bodenschichten und künstlichen Erdbauten
- seismische Explorationsmethoden wie die Refraktionsseismik
- dynamische Boden-Bauwerks-Wechselwirkung (z.B. bei eingebetteten Massivbauwerken wie Reaktorgebäuden unter Erdbebenlast)
- dynamisch belastete Pfähle (axial und seitlich)
- Schwingungsverhalten von Erddämmen und anderen Erdbauten
- dynamischer Erddruck auf Stützmauern und verankerte Wände
- Wellenausbreitungseffekten bei Rohrleitungen
- dynamische Intensivverdichtung
- Materialuntersuchungen im Labor oder Feld (z.B. «Crosshole»- und «Down/Uphole»-Tests).

Die mathematischen Grundlagen (Wellentheorie im elastischen Halbraum usw.) wurden um die Jahrhundertwende erarbeitet. In den letzten Jahren haben wir grosse Fortschritte in der numerischen Behandlung von bodendynamischen Problemen erlebt. Heute ist es jedoch klar, dass das schwächste Glied unserer Wissenskette die Erfassung des Materialverhaltens ist. Bei monotoner Belastung bis zum Bruch genü-

gen einfache Materialmodelle elastoplastischer Art. Unter transienter oder zyklischer Belastung jedoch wird die Beschreibung des Bodenverhaltens viel komplizierter. Leider ist bei manchen Problemstellungen der Bodendynamik dieses Verhalten massgebend.

### Geotechnisches Erdbebeningenieurwesen

Drei Ereignisse haben vor allem das Interesse an der Erdbebengefährdung von geotechnischen Bauten erweckt, und alle drei haben mit Verflüssigungseffekten zu tun:

- Alaska 1964,  $M = 8,4$  (grosse Erdstösse, versagte Brückenfundationen)
- Niigata, 1964,  $M = 7,5$  (das destruktivste wenn nicht das stärkste Beben in den letzten Jahren in Japan)
- San Fernando, Kalifornien, 1971,  $M = 6,6$ .

Bild 1. Resonant-Column-Anlage des IGB

