

# Stochastische Prozesse in der Geotechnik

## - Eine Einführung in die Thematik -

Karl Josef Witt

Bauhaus-Universität Weimar

### Zusammenfassung

Auch vermeintlich konservativ bemessene Bauwerke können versagen. Sorgfältig bemessene Baugrubenwände können sich außerplanmäßig verformen, Setzungsprognosen treffen selten zu. Wenn ein Fundament nicht durch Grundbruch versagt oder eine Einschnittsböschung nicht rutscht, kann daraus geschlossen werden, dass der Grenzzustand nicht erreicht ist, unscharf bleibt dagegen das vorhandene Sicherheitsmaß. In der Geotechnik wird traditionell mit Unsicherheiten gearbeitet, denen man mit konservativen Annahmen begegnet. Die Berechnungen und Empfehlungen, die wir auf der Grundlage einer stichprobenweisen Erkundung oder Schätzung machen, sind Grundlage weitreichender Entscheidungen im Planungsprozess. Die Aussagen enthalten aber alle Unschärfen der Bearbeitung, die der Erkundungsmethoden, die der geschätzten Bodenkenngrößen, die der physikalischen Modellierung der Problems, die der stochastischen Einwirkungen und die Gefahr, dass Zusammenhänge und Lastfallkombinationen nicht erkannt werden. Unsicherheiten und Unschärfen lassen sich mit statistischen Methoden erfassen und zumindest teilweise transparent machen. Der Beitrag gibt einen Überblick über die typischen Unsicherheiten, über deren Größe und Einfluss auf die Bemessung und er zeigt Anwendungsfelder stochastischer Methoden in der Geotechnik auf.

### Summary

Based on limited knowledge about the behaviour of the subsoil, the geotechnical engineers design conservatively. However, we know from a lot of failures and damages, we notice fatal errors in prediction of settlements and deformations of retaining walls. If a building works like expected, if there is no failure, we know that there is a certain distance to limit state conditions. But we are not able to quantify the margin of safety. In geotechnical engineering we deal with several uncertainties and therefore in engineering practice we use conservative assumptions. The geotechnical design and recommendations based on some field observations and measurements, on a set of calculations with simplified models affects important decisions in the planning process of a building. But the result contains all the typical uncertainties like errors and incompleteness in field investigation, spatial variation of subsoil properties, undetected site conditions, stochastic impact of external loads, vague estimations the soil parameters, inadequate physical models and errors in human performance. Uncertainties can be considered with statistical and stochastic methods, even in geotechnical engineering. The contribution illustrates the several fields, in which we can use such approaches to quantify uncertainties and to replace subjective conservative assumptions with more objective best estimates.

## 1. Unsicherheiten

Die Wirklichkeit ist unsicher. Viele der Unsicherheiten betrachten wir als Zufall, viele sind derart in unseren Alltag integriert, dass wir sie nicht als solche wahrnehmen. Hierzu zählen die Abläufe und Risiken des Straßenverkehrs aber auch der Nachweis eines Bohrpfahls, bei dem wir für die Einwirkung Lastfallkombinationen und für die Widerstände selbstverständlich feste Erfahrungswerte annehmen. Andere Unsicherheiten und die Möglichkeit der Überlagerung zufälliger Ereignisse werden einem erst in Zusammenhang mit konkreten Entscheidungen bewusst. Als Beispiel sei eine persönliche, unternehmerische oder politische Entscheidung aufgeführt, die auf unsicheren Annahmen oder Prognosen zukünftiger Entwicklungen aufbaut. Spätestens bei Verlusten, Schadensfällen, nach Unfällen oder Naturkatastrophen wird die Tatsache deutlich, dass die deterministische Betrachtungsweise im Ingenieurwesen nur eine grobe Näherung an die Gesetzmäßigkeiten der Wirklichkeit erlaubt. Unsere empirischen und deterministischen Beschreibungs- und Bemessungsregeln sind nur dann befriedigend, wenn die Gefahren mit den zutreffenden Kombination aus Einwirkungen und Widerständen betrachtet werden oder wenn zumindest bekannt ist, welche Unsicherheiten und zufällige Ereignisse zugrunde liegen. Der Wandel in der aktuellen Sicherheitsphilosophie von der unbedingten Gefahrenabwehr zur Risikokultur fordert auch im geotechnischen Ingenieurwesen eine detailliertere Betrachtung und Benennung der Unsicherheiten. Es fehlt an einer Transparenz der Risiken, die sich aus den unsicheren Grundlagen für die Entscheidungen bei der Planung und schließlich für die Zuverlässigkeit der Bauwerke ergeben. Um die Unschärfen und Unsicherheiten in den Aussagen und Prognosen des geotechnischen Ingenieurwesens benennen zu können, müssen die dort relevanten probabilistischen und stochastischen Prozesse betrachtet und beschrieben werden.

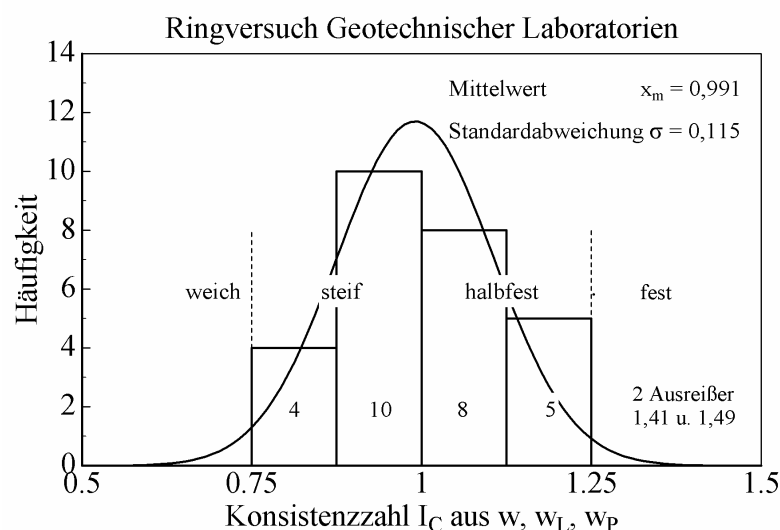


Bild 1: Ringversuch an einem tonigen Schluff

Bei einem probabilistischen Prozess wird das Ereignis durch die Realisation ein- oder mehrdimensionaler Zufallsvariablen bestimmt. Einfache geotechnische Bemessungen und Nachweise hierzu, z. B. die Grundbruchsicherheit, Gleiten, Setzungen unter statischen Lasten oder

die Versagenswahrscheinlichkeit einer Böschung bei zeitlich und räumlich unveränderten Bedingungen. Im wesentlichen geht es um die Unsicherheit, die in der Bestimmung oder in der Annahme der effektiven Kenngrößen besteht. Hierzu werden im geotechnischen Ingenieurwesen die statistischen Verfahren zur Auswertung von Versuchen oder Versuchsreihen angewendet und Fraktilwerte abgeschätzt [Bauduin 2001]. Bild 1 zeigt die statistische Auswertung eines Ringversuches, den die Straßenverwaltung Thüringen mit seinen beauftragten Baugrundbüros durchgeführt hat. Jedes Labor hat den gleichen Boden untersucht, es handelt sich also nur um Unschärfen in der Bestimmung von Kenngrößen im Labor. Dargestellt ist die Streuung der Konsistenzzahl. Die Bestimmung anderer Parameter zeigte kein befriedigenderes Ergebnis. So streute der Tongehalt ( $2\ \mu\text{m}$ ) zwischen 5 und 29 %, die „fachgerechte“ Ansprache des gleichen Bodens reichte von SU über TL bis TM. Es sollte nicht erwartet werden, dass Labors in anderen Regionen verlässlichere Kenngrößen liefern. Das einfache Beispiel zeigt, welche Unschärfe bereits in der Festlegung charakteristischer Kenngrößen aus Aufschlüssen liegt, einer der grundlegenden geotechnischen Aufgaben. Aufbauend auf solch einer unscharfen Bodenansprache werden in der Praxis weitergehende Kenngrößen wie Scherfestigkeiten oder Steifigkeiten nach Erfahrungswerten angegeben, mit denen dann schließlich Bauteile bemessen oder geotechnische Nachweise geführt werden. Auf dem Gebiet der Umweltgeotechnik, bei der Ermittlungen repräsentativer Schadstoffkonzentrationen im Boden und Grundwasser, ist dieses Problem wegen der Heterogenität der Schadstoffverteilung und wegen der starken Beeinflussung durch die Probennahme noch gravierender. Die Anwendung statistischer Methoden ist dabei eine Möglichkeit, Aussagen transparenter und objektiver zu treffen.

Während es bei probabilistischen Fragen um die Realisation von einzelnen Zufallsvariablen und um deren Verteilung geht, hängt ein Ereignis bei stochastischen Prozessen von der Gesamtheit mehrerer Zeit- oder Raumfunktionen ab. Die Unsicherheiten können von diskreten Folgen von Daten oder auch von stetigen Zeitverläufen abhängen. Beispielhaft wird dies anhand der Standsicherheit der landseitigen Böschung des in Bild 2 dargestellten Deiches veranschaulicht.

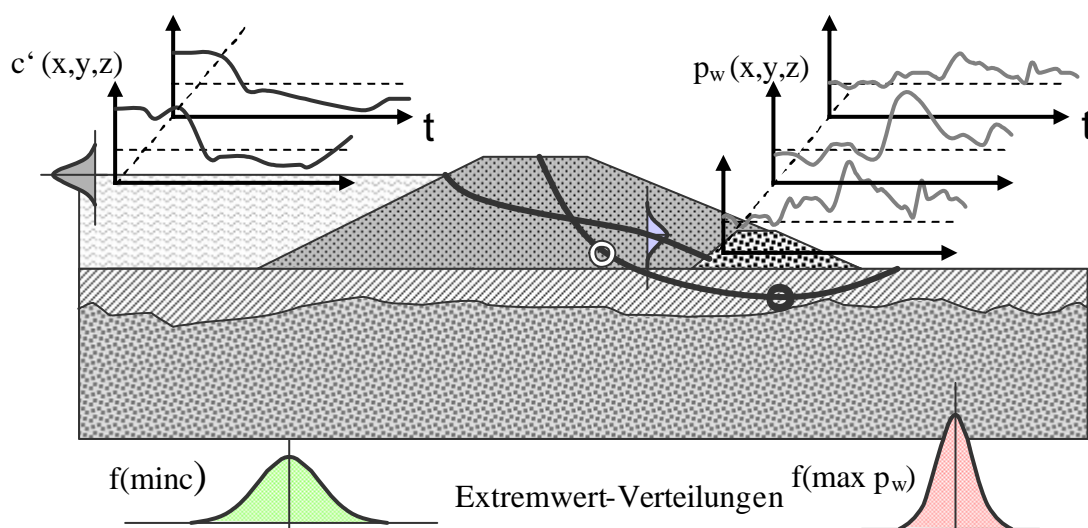


Bild 2: Standsicherheitsbetrachtung der landseitigen Böschung eines Flussdeiches

Die Standsicherheit einer Böschung wird durch die Gewichtskräfte des Bodens und durch dessen Scherwiderstände bestimmt. Als Einwirkung wirken bei einem Deich außerdem Wasserdrücke und Strömungskräfte. Die Gewichtskräfte streuen zeitlich nicht und räumlich nur gering, so dass sie als deterministische Größe betrachtet werden können. Unsichere Zufallsgrößen sind die Scherparameter des Bodens, insbesondere die Kohäsion, und der Porenwasserdruck unter dem landseitigen Böschungsfuß. Die Mächtigkeit und Integrität der bindigen Deckschicht ist die maßgebende Größe für den Auftrieb infolge Unterströmung. Alle Wasserdruck- und Strömungskräfte werden durch den zeitlichen Verlauf des Flusswasserstandes, die Geometrie des Deiches und durch die Wasserdurchlässigkeit der Erdstoffe bestimmt. Der Flusswasserstand ist eine typische Zeitfunktion, die davon beeinflussten Parameter sind von der Zeit und vom Ort abhängig, da die Bodenstruktur räumlich streut. Der Porenwasserdruck im betrachteten Bruchkörper hängt von der zeitlichen Ausbreitung der Sickerfront im Deich und im Deichuntergrund und von der streuenden Bodenbeschaffenheit ab. In Bild 2 sind diese zeitlichen und räumlichen Funktionen für die Kohäsion  $c$  und für den Porenwasserdruck  $p_w$  entlang des Deiches angedeutet. Für Standsicherheitsbetrachtungen interessieren nun nicht Einzelwerte, vielmehr sind hier je nach Autokorrelationsstruktur abschnittsweise Mittel- oder auch Extremwerte zu betrachten. In jedem Fall sind hier die ungünstigsten Kombinationen durch eine Zeitreihen- bzw. Autokorrelationsanalyse zu erfassen, was weit über ein rein statistisches Problem hinausgeht. Vergleichbare komplexe Zusammenhänge treten in der Geotechnik bei Tragfähigkeits- und Verformungsberechnungen immer in Verbindung mit der räumlichen Streuung von Baugrundeigenschaften auf. Zu der Unsicherheit der Bestimmung von diskret deterministischen Kenngrößen (vgl. Bild 1) und der Unschärfe des Berechnungsmodells, das ja immer nur eine Vereinfachung und nie eine Abbildung der Wirklichkeit ist, tritt die räumliche Streuung und die Modellierung der Baugrundeigenschaften hinzu. Bei jeder stochastischen Bemessung ist zu analysieren, ob das Ergebnis auf der Widerstandsseite durch einen gleitenden Mittelwert kontrolliert wird oder ob zeitliche und/oder räumliche Extremwerte den betrachteten Grenzzustand auslösen. Setzungen und die Standsicherheit großflächiger Bruchkörper werden meist durch Mittelwerte kontrolliert. Erosionsphänomene, Auftriebseffekte, Verflüssigung bei dynamischer Einwirkung wie auch Bruchmechanismen mit geologisch vorgegebenen Gleitflächen werden daher durch räumlich begrenzte Extremwerte bestimmt und erfordern daher eine genauere Kenntnis der Datenstruktur.

Der Einfluss von Unsicherheiten und Unschärfen auf die Qualität und Funktion von Bauwerken wurde bereits früh als Gegenstand der Forschung aufgegriffen. Zunächst wurde versucht, die Sicherheitstheorie der Luftfahrt und gefährlicher Industrieanlagen auf den konstruktiven Ingenieurbau und schließlich auf geotechnische Probleme zu übertragen [Benjamin and Cornell 1970, Rackwitz u. Peintinger 1981, Idel 1988, Schneider 1994]. Die praktische Umsetzung der erarbeiteten Methoden scheiterte in der Geotechnik meist daran, dass für eine solche Analyse im Regelfall die erforderlichen Daten nicht mit einem angemessenen Aufwand zu beschaffen sind. Die moderne Statistik und Fortschritte in der Rechentechnik bieten heute jedoch Methoden und Möglichkeiten, die Unsicherheit der Daten mit geostatistischen Verfahren transparenter zu machen.

Bei der Aufbereitung und Analyse geotechnischer Daten sind zwei Arten von Unsicherheiten zu unterscheiden: Solche, die sich durch die Zufälligkeit der Natur ergeben und solche, die auf unsere unvollständige Kenntnis zurückzuführen sind. Die Trennung der Unsicherheit in Zufall und Unkenntnis ist für das Verständnis der Prozesse und für deren Modellierung wichtig. Zufällige Ereignisse lassen sich mit statistischen Methoden gut beschreiben. Bei diesen sog. aleatorischen Unsicherheiten geht es meist um Frequenzen oder Häufigkeiten (aleator = Spieler). Unsicherheiten, die auf die Unkenntnis einer Situation zurückzuführen sind, in Hacking 1975 epistemische Unsicherheiten genannt, unterliegen nicht a priori den Gesetzen der Statistik. Zu dieser Art Unsicherheit zählt eine nicht erkannte ungünstige Lastkombination bei der Bemessung oder die Baugrundbeschaffenheit an einer unbeprobten Stelle (Baugrundrisiko). Die unsicheren Daten könnten durch eine Untersuchung beschafft werden. Eine andere Möglichkeit besteht darin, durch Erfahrung oder durch geostatistische Methoden von gesicherten beprobten Stellen auf unbeprobte zu schließen. Wenden wir hierbei wiederum statistische Gesetzmäßigkeiten, Krigingmethoden, Autokorrelationsfunktionen oder Variogramme an, können wir diese epistemischen Unsicherheiten mit quantitativen Aussagen belegen. Die theoretischen Zusammenhänge sind u.a. in Marinoni u. Tiedemann 1999, Goovaerts 1997 erläutert. Konkrete exemplarische Anwendung zeigen Wickmann 1990 sowie Plate 1993.

## 2. Baugrundmodellierung

Die Entscheidungen im geotechnischen Planungsprozess hängen wesentlich von der Zuverlässigkeit der Datengrundlage ab. Mit der Bewertung der verfügbaren Daten erhebt sich zunächst die Frage nach deren Repräsentativität. Vermeintlich sichere Aussagen über den Baugrund an einer Beprobungsstelle können zufällige oder systematische Fehler aufweisen. Andererseits können die Beprobungsstellen wie auch die ermittelten Kenngrößen ungeeignet oder unvollständig sein, die relevanten Fragen zu beantworten. Dies alles ist nicht nur eine Frage des Beprobungsumfanges, sondern eine der Beprobungsstrategie. Zu Beginn der Erkundung sind daher die Ziele zu klären und zu prüfen, welche Methoden oder Kombinationen von Erkundungstechniken die besten Aussagen für die Folgeentscheidungen liefern. Es geht bei der Datenqualität und der Repräsentativität einer Erkundung um mehr als um pure Statistik. Dies gilt für die Altlastenbearbeitung in noch stärkerem Maße als für die Gründungsberatung.

Die Situation des Baugrundgutachters ist vergleichbar mit der eines geschickten Spielers, der seine Entscheidungen intuitiv unter Berücksichtigung der sich ständig ändernden Unsicherheiten trifft. Reine Statistik wäre mit Würfeln zu vergleichen, mit einer statistisch zufälligen Bestimmung von Baugrundinformationen. Eine solche Erkundung kann auch nur zufällig die richtigen Informationen liefern, wenn gleich die Aussagefähigkeit mit dem Umfang zunimmt. Der geschickte Kartenspieler reagiert dagegen aus dem Spielverlauf heraus. Er kennt die eigenen Karten, merkt sich die gespielten und wägt ab, welche Karten noch im Stock liegen und welche Trümpfe die Mitspieler noch in der Hand haben können. So verarbeitet er gesicherte und wahrscheinliche Informationen, stellt Hypothesen über den weiteren Verlauf auf und überprüft deren Wahrscheinlichkeit. Auf dieser Grundlage trifft er Entscheidungen unter Ein-

beziehung seiner individuellen Risikobereitschaft. Dieser Weg ist mit einer stufenweisen Beschaffung von Informationen zum Baugrund, mit einer optimierten Erkundung vergleichbar. Um bei komplexen Baumaßnahmen die verdeckten Karten im Baugrund abschätzen zu können, müssen Vorinformationen systematisch bewertet und verarbeitet, Modelle und Szenarien aufgestellt, verifiziert oder falsifiziert werden. Kommt man dabei zumindest zu semiquantitativen Aussagen, lässt sich der Aufwand von zusätzlichen Erkundungen den Folgen von Fehlentscheidungen im Sinne eines Risikomanagements gegenüberstellen. Die Methoden und Theorien der für die bergbauliche Exploration entwickelten Geostatistik [Wackernagel 2003] sollen hinsichtlich der Übertragbarkeit auf geotechnische Problemlösungen geprüft werden.

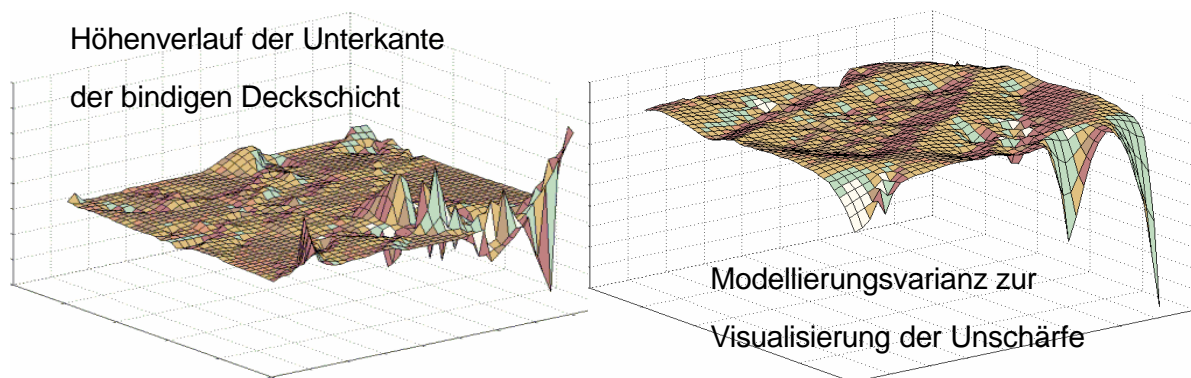


Bild 3: Räumliche Darstellung des Verlaufes und der Varianzfunktion einer Schichtgrenze

Für baupraktische Anwendungen werden die Datenbestände meist ohne Kennzeichnung nachgewiesener und angenommener Aussagen in Bohrprofilen mit Randbemerkungen oder allenfalls in geologischen Schnitten dargestellt. Die Interpretation wird dann der subjektiven Vorstellungskraft des geotechnischen Bearbeiters überlassen. Datenanalyse ist aber weit mehr. Die räumlich und zeitlich veränderliche Situation des Baugrundes sollte dabei mit den Schritten Datenbeschreibung – Dateninterpretation – Parameterschätzung dargestellt werden. Zur Beschreibung komplexer räumlicher Datenbestände könnten in stärkerem Maße Visualisierungsmethoden der Computergraphik eingesetzt werden. In dreidimensionalen Bildern lassen sich Sensibilitäten aufzeigen, Vorinformationen, eigene Erkundungsergebnisse und eigene Prognosen gegenüberstellen, auf Plausibilität prüfen und wichten. Die Dateninterpretation betrifft die parameterspezifische räumliche Abgrenzung von Homogenbereichen mithilfe statistischer Methoden, die Modellierung der Abhängigkeiten und Korrelationen und die Beschreibung stochastischer, also räumlicher oder zeitlicher Strukturen. Die Parameterschätzung hat zwei Aufgabenfelder. Zum einen wird darunter der Schritt verstanden, quantitative Aussagen von beprobten auf unbeprobte Stellen zu übertragen. Zum andern betrifft dies die Herleitung konkreter Aussagen zu Baugrundkenngrößen über verschiedene indirekte Erkundungsmethoden. Für beide Felder sind Korrelationen und statistische Verteilungen der Parameter zu betrachten. Als Werkzeuge können die lineare und nichtlineare Geostatistik und Simulationstechniken angewendet werden. Auch hier lassen sich mit modernen Methoden der Visualisierung Modelle aufbauen, die eine Unterscheidung gesicherter und prognostizierter Aussagen erlauben. Bild 3 zeigt die Modellierung einer Schichtgrenze und die räumliche Dar-

stellung der Modellunsicherheit (Varianz) nach Schönhardt u. Witt 2001. Es handelt sich um eine Frage des Hochwasserschutzes. Die Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch hängt von der Höhenlage und Integrität der dargestellten Schicht ab. Will man die Zuverlässigkeit des Modells verbessern, sind zusätzliche Erkundungen gezielt dort anzusetzen, wo hohe Unsicherheiten vorliegen.

### 3. Nachweis- und Bemessungsmethoden

Bei geotechnischen Nachweisen und bei den darauf aufbauenden Bemessungen betrachten wir Grenzzustände. In der Sicherheitsbetrachtung werden die physikalische oder mechanische Zusammenhänge auf die Gegenüberstellung zweier Größen reduziert: Eine irgendwie geartete Beanspruchung oder Einwirkung  $S$  und eine Beanspruchbarkeit oder Widerstand  $R$ . Versagen ist verwirklicht, wenn die Beanspruchung größer ist als die Beanspruchbarkeit, wenn der Deich überströmt wird, wenn die Böschung rutscht, wenn ein Grundbruch unter einem Fundament eintritt, wenn verträgliche Setzungen oder Schiefstellungen eines Bauteils überschritten werden. In den Sicherheitsnachweisen des Erd- und Grundbaus werden Bemessungswerte verglichen. Der rechnerische Widerstand wird hierzu durch die Partialsicherheitsbeiwerte  $\gamma_R$  abgemindert, auf der Belastungsseite hingegen werden die Einwirkungen mit Partialsicherheitsbeiwerten  $\gamma_S$  multipliziert um Bemessungswerte zu erhalten. Damit sind vereinfacht alle Unsicherheiten und Variabilitäten von der Modellunschärfe bis zum Fehler bei der Probenahme und der Kennwertbestimmung berücksichtigt. Eine hinreichende Sicherheit ist nachgewiesen, d. h. es tritt kein Versagen ein, wenn gilt:

$$Z = R / \gamma_R - S \cdot \gamma_S \geq 0 \quad (1)$$

Eine höhere Stufe der Präzisierung ist die mathematische Berücksichtigung der unsicheren Variablen in der Grenzzustandsbedingung:

$$Z(a_0, X_1, X_2, \dots, X_n) \geq 0 \quad (2)$$

Wobei die Zufallsvariablen  $X_i$  die unsicheren Größen beschreiben. Die Grenzzustandsgleichung  $Z = 0$  trennt akzeptierte Zustände von solchen, die als Versagen definiert sind. Die Wahrscheinlichkeit  $p_f$ , dass Versagen eintritt, lässt sich dann beschreiben:

$$p_f = P \{ Z(a_0, X_1, X_2, \dots, X_n) < 0 \} \quad (3)$$

Mit dem Übergang von einer Sicherheit mit unbekanntem Reserven zur Versagenswahrscheinlichkeit lässt sich der Einfluss der unsicheren Größen auf die bestimmungsgemäße Funktion des Bauteils quantifizieren. Für den Nachweis der Sicherheit bzw. der Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit können verschiedene Stufen der Präzisierung betrachtet werden:

- (i) Die Zufallsvariablen werden durch einen einzigen, ungünstigen Wert beschrieben. Dies entspricht dem Niveau der heutigen Normung (Gl. 1).
- (ii) Die Zufallsvariablen werden durch ihre statistischen Momente z. B. Mittelwert und Standardverteilung oder Variationskoeffizient eingegeben, wobei meist eine Normal-

verteilung zugrunde gelegt wird. Die Versagenswahrscheinlichkeit kann dann bei einer einfachen Struktur der Grenzzustandsgleichung explizit ermittelt werden.

- (iii) Die Zufallsvariablen werden durch ihre bekannten Verteilungsfunktionen eingeführt, wobei auch Korrelationen oder stochastische Abhängigkeiten der Variablen berücksichtigt werden können. Hier ist eine explizite Berechnung nicht mehr möglich, die Versagenswahrscheinlichkeit lässt sich aber durch Simulationstechniken wie z. B. die Monte-Carlo Methode ermitteln.

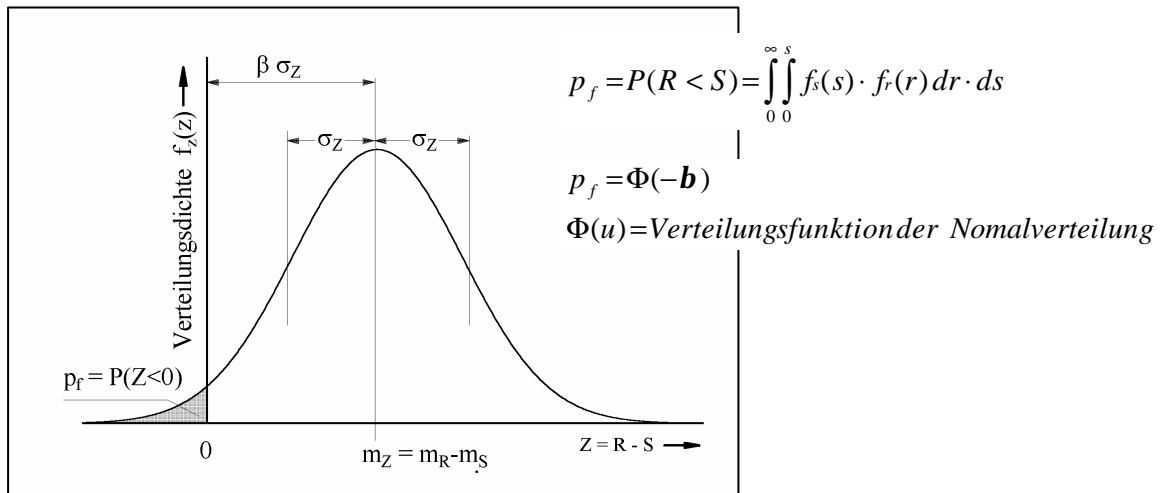


Bild 4: Versagenswahrscheinlichkeit bei normalverteilter Grenzzustandsfunktion

Für den klassischen Ansatz (ii) nach Bild 4, der First Order Second Moment Methode FOSM [Benjamin u. Cornell 1970] wurden zahlreiche Erweiterungen wie die Methode nach Hasbofer und Lind oder die Punktschätzmethode entwickelt. Eine gute Übersicht der Methoden und deren Möglichkeiten findet sich in [Schneider 1994] und in [Griffiths et al. 2002]. Für geotechnische Fragestellungen gelingt ein Nachweis mit einer geschlossenen Formel nur für sehr einfache Fälle wie z. B. für den Filternachweis, Gleiten oder für einfache Setzungsberechnungen. Zur Bearbeitung der meisten praktischen geotechnischen Fragen stehen einer Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit drei grundsätzliche Probleme entgegen:

- Die Grenzzustandsbedingung ist nicht hinreichend genau bekannt oder lässt sich nicht explizit formulieren, so dass ohnehin nur mit empirischen Regeln bemessen wird. Als Beispiele seien hier Bemessungsfragen einer Tunnelsicherung, Langzeitverformungen aufgrund von Strukturänderungen bedingt durch Erschütterung oder hydrodynamische Effekte im Boden.
- Die Grenzzustandsbedingung ist sehr komplex oder nichtlinear und erlaubt keine explizite Berechnung nach (ii). Hierzu zählt z. B. der Nachweis einer Böschungsstandsicherheit in einem geschichteten Untergrund, Setzungsberechnungen mit Berücksichtigung von Konsolidation oder eine Verformungsprognose hinter einer Baugrubenwand.

- Die Verteilungsfunktionen der Basisvariablen können nicht mit der erforderlichen Präzision angegeben werden, sind hinsichtlich ihrer Extremwerte oder ihrer räumlichen Mittelung unsicher.

Die erste Problemgruppe, unzureichende Kenntnis deterministischer Zusammenhänge, ist für eine probabilistische Bemessung nicht geeignet. Trifft man im Zuge einer Risikoberechnung, z.B. an einer Verzweigung eines Fehlerbaumes auf eine derartige Fragestellung, können nur bestmöglich empirische Schätzwerte eingesetzt werden. Gute Beispiele hierfür geben [Idel 1988], [Ziegler 2002] und [Baecher and Christian 2001].

Die Gruppe komplexer Grenzzustandsgleichungen lässt sich mit Simulationstechniken befriedigend bearbeiten, wenn die statistischen Eingangswerte gesichert sind. Insbesondere bei numerischen Untersuchungen des Grenzzustandes muss das physikalische Modell zuvor schrittweise vereinfacht werden, um den Rechenaufwand der Simulation zu begrenzen. Beispiele einer schrittweisen Vereinfachung bis hin zu einem handhabbaren Versagensmodell geben [Witt et al. 2002].

Das größte Problem bei der Anwendung stochastischer Methoden in geotechnischen Nachweisen ist die Beschaffung und Aufbereitung der Daten und die Beschreibung realitätsnaher Verteilungen der Basisvariablen. Im Zentrum der Häufigkeiten lassen sich geotechnische Parameter wie Wassergehalte, Scherparameter oder Dichten hinreichend genau mit Normal-, Lognormal- oder  $\beta$ -Verteilungen annähern. Beim Nachweis kleiner Versagenswahrscheinlichkeiten  $p_f = 10^{-5}$  bis  $10^{-6}$  (Sicherheitsindex  $\beta = 4,2$  bis  $4,7$ ) sind die Extremwerte der betrachteten Basisvariablen von Bedeutung, über die wegen des kleinen Stichprobenumfangs keine gesicherte Datenbasis vorliegen kann. Werden für großflächige Bodenzonen Analysen durchgeführt, bei Standsicherheitsuntersuchungen und Strömungsmodellierungen von Dämmen und Deichen, Erosionsproblemen oder bei tiefreichenden Setzungs-betrachtungen ist zu klären, ob das physikalische Modell überhaupt durch Extremwerte beeinflusst wird oder ob die Verteilung räumlicher Mittelwerte das Verhalten kontrolliert. Die Thematik der adäquaten Verteilung der Daten wird in [Oberuggenberger u. Fellin 2002] und in [Griffiths and Fenton 2001] diskutiert. Für dieses Thema, das in alle Anwendungen greift, besteht aber noch erheblicher Forschungsbedarf. Der gesamte Komplex schließt eng an die Fragestellungen der in Kapitel 2 behandelten Baugrundmodellierung an. Bei der Interpretation von Versagenswahrscheinlichkeiten, die durch Simulation hergeleitet wurden, ist daher immer die zugrundeliegende Verteilung der Baugrundkenngrößen kritisch zu prüfen. Das Ergebnis wird in starkem Maße von der Definition der Homogenbereiche und von der Wahl der Autokorrelationsstrukturen im Baugrundmodell beeinflusst.

#### 4. Risikobetrachtungen

Risikobetrachtungen sind ein großes Feld für die Anwendung stochastischer Methoden. Sie schließen alle oben beschriebenen Aufgaben und Themen ein und streben – meist als Grund-

lage für weitreichende Entscheidungen - eine Gesamtaussage über die Unsicherheiten in geotechnischer Prozessen an. Dabei ist zwischen einer Risikoanalyse und der Risikobewertung zu unterscheiden. Bei der Analyse werden die Abläufe und die physikalischen Bedingungen herausgearbeitet, die zu einem Risiko führen. Die Bewertung ist der quantitative Teil, die Ermittlung oder Abschätzung des Risikos. Bei einer Ereignisbaum- oder einer Fehlerbaumanalyse entspricht die Analyse dem Aufstellen der Szenarien, der Bäume und Verzweigungen. Die mathematische Formulierung der Abhängigkeiten und die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten eines Ereignisses ist die Risikobewertung. Risiko ist im strengem Sinn als eine Verknüpfung aus der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses mit den (monetären) Folgen definiert [Crawford-Brown 1999]. Im Ingenieurwesen wird darunter aber meist nur die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefährdung, eines aus Einzelereignissen zusammengesetzten Szenarios, verstanden. Die Abfolge und Verknüpfung der Ereignisse wird meist als Ereignisbaum, gelegentlich auch als Fehlerbaum zusammengesetzt. Bild 5 zeigt als Beispiel einen Ereignisbaum aus einer Risikoanalyse für einen Staudamm [Idel 1988], der aus unterschiedlichen, bodenmechanisch definierten Zonen, aufgebaut ist. Betrachtet wird das initiale Ereignis, dass eine LKW-Ladung groben Stützkörpermaterials S versehentlich in den Kern K eingebaut wird. Je nach Verknüpfung der möglichen Verzweigungen kann dies unkritisch sein (Ausgang B), zu einem reparablen Schaden (Ausgang S) oder auch zu einem Dammbrech führen (Ausgang V). Belegt man die Verzweigung mit Einzelwahrscheinlichkeiten, lässt sich daraus die Systemwahrscheinlichkeit ermitteln. Auf diese Weise lassen sich zumindest die Einflüsse der Komponenten auf das gesamte Szenario vergleichend bewerten.

Ereignisbäume beginnen mit einem initialen Ereignis und stellen die sich daraus ergebenden hypothetischen Folgen dar. Fehler- oder Versagensbäume modellieren die Abfolge in umge-

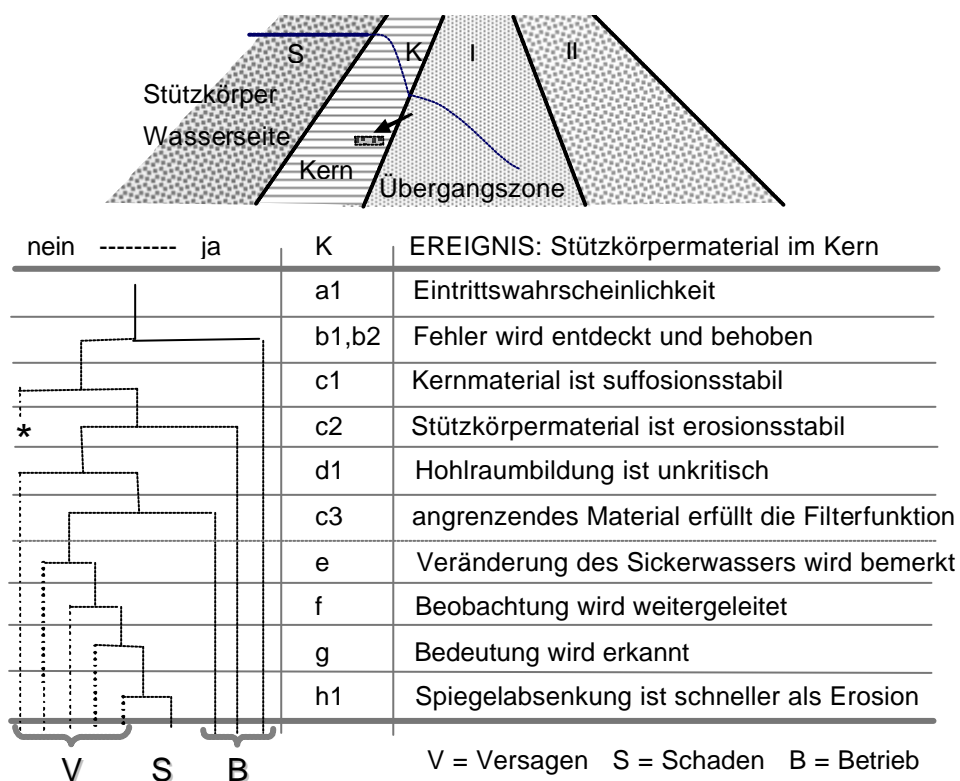


Bild 5: Ereignisbaumanalyse für einen Staudamm nach [Idel 1988]

kehrter Richtung. Hier werden mehrere Ursachen und der Verknüpfung betrachtet und untersucht, ob die Ereignisketten zum Versagen führen können. Anschauliche Beispiele aus dem Wasserbau finden sich in [Plate 1993].

Die Risikoanalyse beginnt immer mit der Definition des Versagenszustandes und der Modellierung der Ereignisse. Zur Risikobewertung sind die Einzelkomponenten mathematisch oder physikalisch zu beschreiben und die Verzweigungen mit Wahrscheinlichkeiten zu belegen. Dabei sind auch Abhängigkeiten zu identifizieren. Sind alle Parameter definiert, berechnet oder geschätzt, kann die Eintrittswahrscheinlichkeit des Ereignisses oder der Hauptstamm des Versagensbaumes in Form einer Versagenswahrscheinlichkeit formal ermittelt werden. Stochastische Methoden werden auch hier in der Aufbereitung der Daten, in der Analyse der Abhängigkeiten und in der Verarbeitung von Vorinformation, z. B. mit Bayes-Statistik, eingesetzt [Baecher 1983]. Die Unterscheidung aleatorischer und epistemischer Unsicherheiten wird zur Interpretation der ermittelten Versagenswahrscheinlichkeit benötigt. Können die Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungen der Szenarien nicht rechnerisch ermittelt, durch empirische Daten oder durch Beobachtungen beschafft werden, kann auch eine Expertenbefragung weiterhelfen. Hierbei werden verbalen Einschätzungen von Experten Wahrscheinlichkeiten zugeordnet oder daraus statistische Verteilungen ermittelt. Diese Methode wird auch bei komplexen Sicherheitsfragen der Medizin, der Luftfahrt und der Nuklearindustrie erfolgreich eingesetzt. Eine weitere interessante Anwendung dieser Technik ist die Risiko-Simulationsrechnung, wie sie von [Ziegler 2002] erstmals für geotechnische Fragen in Bauprozessen als quantitative Entscheidungshilfe entwickelt wurde. Hiermit lassen sich auf einfache Weise Unsicherheiten in Entscheidungen mit den Folgekosten kombinieren und so tatsächliche Risiken transparent darstellen.

Während bei wasserbaulichen Fragen besonders bei der Prognose von Hochwasserereignissen traditionell mit stochastischen Methoden gearbeitet wird, werden in der Geotechniken probabilistische Methoden und Risikoanalysen sehr kritisch gesehen. Grund ist zum einen das fehlende Wissen und die bisher nur gering aufbereitete Methodik für geotechnische Anwendungen. Zum anderen wird – nicht ganz zu unrecht – das für den Grundbau spezifische Problem der geringen Datenmengen aufgeführt. Gegenüber der ersten Welle von Versuchen probabilistischer Anwendungen in den 70er und 80er Jahren haben sich zwei Dinge wesentlich geändert. Zum einen hat sich ein gesellschaftlicher Wandel zur Risikokultur vollzogen, man möchte **mehr** über die technischen und ökonomischen Risiken wissen, denen man sich aussetzt. Zum anderen hat die Rechentechnik derartige Fortschritte gemacht, dass Vorinformationen und Erfahrungen besser mathematisch beschrieben und verarbeitet werden könnten. Auf den Rat der Experten, die in Prozessen und in Szenarien denken können, kann bei komplexen Bauaufgaben nicht verzichtet werden. Aber auch Experten haben in der Vergangenheit große Irrtümer begangen. Risikobetrachtungen können und sollen deren Rat nicht ersetzen, aber sie können ihn stützen. Der Wert einer Risikobetrachtung liegt darin, dass man gezwungen ist, Szenarien zu analysieren und den Einfluss der Komponenten zu bewerten. Konservative Annahmen, deren wahre Sicherheit unbekannt ist, werden durch bestmögliche Schätzwerte der Unsicherheit ersetzt. Auf diese Weise können Risikobetrachtungen Entscheidungen unterstützen und absichern.

## 5. Literaturverzeichnis

[Bauduin 1996]

Bauduin, C.: *Ermittlung charakteristischer Kennwerte*. In Smolczyk, U. (Hrsg) *Grundbau-Taschenbuch.*, 6. Auflage, pp. 17-48, Ernst&Sohn, 2001.

[Baecher 1983]

Baecher, G.B.: *Professional judgement and prior probabilities in engineering risk assessment*. 4<sup>th</sup> Int. Conf. on Applications of Statistics and Probability to structural and Geotechnical Engineering, Florence, 1983.

[Baecher, Christian 1997]

Baecher, G.B. and Christian J. T.: *Parameters and approximations in geotechnical reliability*. In Ayyub B. M. (Ed.) *Uncertainty Modelling and Analysis in Civil Engineering*. CRC Press 1997.

[Benjamin 1997]

Benjamin, J. R. and Cornell, A. C.: *Probability, Statistics and Decision for Civil Engineers*. Mac-Graw-Hill Book Comp., New York, 1970.

[Crawford-Brown 1999]

Crawford-Brown, D.: *Risk-Based Environmental Decissions: Methods and Culture*. Kluver Academic Publishers, 1999.

[Goovaerts 1997]

Goovaerts, P.: *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, 1997.

[Griffiths, Fenton 1997]

Griffiths, D. V., Fenton G. A.: *Bearing capacity of spatially random soil: the undrained clay Prandtl problem revised*. *Geotechnique*, 51 (4), 2001, pp.351-359.

[Griffiths et al. 2002]

Griffiths, D. V., Fenton G. A. and Tveten D. E.: *Probabilistic geotechnical analysis: How difficult does it need to be*. In Pöttler et al. (Hrsg.), *Int. Conf. on Probabilistics in Geotechnics*, Graz, Austria 2002, pp. 3-20.

[Hacking et al. 1975]

Hacking, I : *The emergence of probability*. Cambridge University Press, 1975.

[Idel 1988]

Idel, K. H.: *Abschlussbericht des DGGT/BMFT Forschungsprojektes „Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme*. Band 1, Grundlagen, 1988.

[Marinoni, Tiedemann 1999]

Marinoni, O., Tiedemann, J.: *Geostatistische Verfahren als Hilfsmittel zur Baugrundmodellierung*. In DGG/DGGT Nationale Tagung für Ingenieurgeologie, Halle 1999.

[Oberguggenberger, Fellin 2002]

Oberguggenberger, M., Fellin, W.: *From probability to Fuzzy sets: The struggle for meaning in geotechnical risk assessment*. In Pöttler et al. (Hrsg.), Int. Conf. on Probabilistics in Geotechnics, Graz, Austria 2002, pp. 29-38.

[Plate 1993]

Plate, E.: *Statistik u. angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Verlag Ernst u. Sohn, 1993.

[Rackwitz, Peintinger 1981]

Rackwitz, R., Peintinger, B.: *Ein wirklichkeitsnahes stochastisches Bodenmodell mit unsicheren Parametern und Anwendung auf die Stabilitätsuntersuchung von Böschungen*. Bauingenieur 56, 1981.

[Schneider 1994]

Schneider, J.: *Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1994.

[Wackernagel 2003]

Wackernagel, H.: *Multivariate Geostatistics*, 3rd Ed., Springer Verlag, 2003.

[Wickmann 1990]

Wickmann, D.: *Bayes-Statistik: Einsichten gewinnen und entscheiden bei Unsicherheit*. BI-Wiss.-Verl., 1990.

[Witt 2002]

Witt, K. J. et al.: *Methodik bei der Risikobeurteilung einer Großrutschung*. Veröffentl. 12. Donau-Europäische Konferenz Geotechnisches Ingenieurwesen, Passau, 2002, pp. 127-130.

[Ziegler 2002]

Ziegler, M.: *Risikosimulationsrechnungen - eine Möglichkeit zur Quantifizierung von Sicherheit und Risiko in der Geotechnik*. Aus: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (Hrsg.): Vorträge der Baugrundtagung 2002 in Mainz. Verlag Glückauf. Essen 2002.