

## 13. Erdbaufachtagung „Sicherungen im Erd-, Fels- und Grundbau“

---



*Nichtwissen hat seinen Wert;  
jedoch nur hie und da,  
Nicht jeder, der nach Indien fährt,  
entdeckt Amerika.*

*frei nach Erich Kästner*

### Nichtwissen und Unschärfe im Erd- und Grundbau

Referent | **Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Karl Josef Witt**  
Bauhaus-Universität Weimar

Tagungsort | **Ramada Hotel Leipzig**

**02./03. März 2017**

# 1 Einleitung

Nichtwissen wird in der Umgangssprache als Ahnungslosigkeit verstanden, ein Unwissen im Sinne einer Bildungslücke, die grundsätzlich behoben werden könnte. Die Philosophie verwendet den Begriff Agnosie für Nichtwissen und definiert ihn etwas weiter gefasst als Ausgangspunkt einer philosophischen Betrachtung, manchmal leider auch Endpunkt. Nichtwissen kann auch ein absichtliches Zurückversetzen in einen unwisenden Zustand sein, um unbefangen und unbeeinflusst durch Vorurteile, falsches Wissen, bestehende Irrtümer, Lehrmeinungen oder Manipulation zu eigenen Erkenntnissen zu gelangen. Nichtwissen ist dann der Ausgangspunkt von Wissen, kann Ursprung der Weisheit sein. Der Weg dahin ist das allgemeine Ziel der Ausbildung. Doch es geht in der beruflichen Phase weiter. Bereits die Erkundung und Charakterisierung des Baugrundes ist im Erd- und Grundbau immer wieder aufs Neue eine Beseitigung von Nichtwissen. Folgt man allerdings den Ausführungen Goethes, so wächst mit dem Wissen auch der Zweifel. Auch das ist geotechnischer Alltag. Im universitären Alltag bleibt der Zweifel gelegentlich auf Seiten der Lehrenden, wenn man im Umgang mit Studierenden auf ein „gefühltes Wissen“ stößt, was nach genauer Prüfung doch eher einem Nichtwissen gleichkommt, das von Erkenntnis und Weisheit noch weit entfernt ist.

Der Begriff der Unschärfe, neben der Optik auch in der Fuzzy-Logic benutzt, bezeichnet im Gegensatz zum Nichtwissen nicht ein zu geringes Niveau der benötigten Information, sondern eher ein zu hohes, das allerdings aufgrund der Variabilität keine exakte Zustandsbeschreibung erlaubt. Und auch das ist geotechnischer Alltag. Die klassische Logik, aufbauend auf Axiomen, kennt nur wahre und falsche Sätze. Wenn ein Tier ein Vogel ist, ist es kein Fisch! Anders beim Baugrund. Eine Baugrundsicht kann sowohl Boden, als auch Fels sein, ihre geotechnischen Kennwerte streuen im Allgemeinen und diese Variabilität setzt sich im Erd- und Grundbau als Unschärfe von den geologischen Gegebenheiten bis zu den von uns abgeleiteten Prognosen und Sicherheitsnachweisen fort. Selbst die Unschärfe ist unscharf, alle Feststellungen und Entscheidungen basieren auf Wahrscheinlichkeiten. Damit verbunden ist ein wie auch immer definiertes Risiko aus der Unkenntnis des tatsächlichen Verhaltens des Baugrundes, ein Planungsrisiko, wenn Entscheidungen auf der Grundlage von unzutreffenden Informationen getroffen werden, ein Ausführungsrisiko, das Unvorhergesehenes im Bauablauf betrachtet, ein Kostenrisiko und nicht zuletzt ein Zahlungsrisiko. Wenn wir es mit streuenden Größen und mit Wahrscheinlichkeiten zu tun haben, sind wir im Bereich der Statistik und Probabilistik.

Nichtwissen und Unschärfe sind im Erd- und Grundbau ein weites Feld, das in diesem Vortrag keinesfalls erschöpfend behandelt werden kann. In der Projektrealisation gibt es zumindest vier Felder, auf denen Nichtwissen, Unschärfe und Wahrscheinlichkeiten in Betracht zu ziehen sind (a) Erkundung und Beschreibung des Baugrundes, (b) Entscheidungen zu Kennwerten, Bauweisen und Methoden, (c) Entwurf, Bemessung und Ausschreibung von Bauwerken, Bauteilen oder Leistungen und schließlich (d) Qualitätsprüfung von Bauwerken des Erd- und Grundbaus.

Ich möchte aus diesem weiten Feld auf drei Fragen näher eingehen

- *Was verstehen die Probabilisten unter den vielen Begriffen?*
- *Welche der vielen statistischen und probabilistischen Methoden können im Erd- und Grundbau angewendet werden, für welche Frage geben sie hilfreiche Antworten?*
- *Was kann man tun, um in der Praxis die sinnvollen Anwendungen zu verbreiten?*

## 2 Begriffe der Statistik und Probabilistik

Im Zentrum der geotechnischen Projektbearbeitung steht die Sicherheit, die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks. *Sicherheit* eines Bauwerks ist dann gegeben, wenn alle Gefährdungen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptierbar kleines Maß beschränkt werden. Der im Ingenieurwesen traditionell verwendete *Sicherheitsfaktor*  $\eta$  ist das Verhältnis von Widerstand und Einwirkung, genauer von Beanspruchbarkeit und Beanspruchung. Der Reziprokwert wird als *Ausnutzungsgrad*  $\chi$  eines Bauwerks oder Bauteils bezeichnet, wobei dann Bemessungswerte betrachtet werden, eine um Teilsicherheitsfaktoren erhöhte Beanspruchung und abgeminderte Beanspruchbarkeit. Die *Zuverlässigkeit*  $Z$  ist die Eigenschaft, eine betrachtete Funktion unter definierten Bedingungen über einen bestimmten Zeitraum mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit zu erfüllen. Die *Versagenswahrscheinlichkeit*  $p_f$  ist das Komplement der Zuverlässigkeit  $Z = 1 - p_f$ . *Risiko* wird allgemein als die Möglichkeit betrachtet, einen Schaden zu erleiden und setzt sich aus der Wahrscheinlichkeit des Eintritts eines Ereignisses und dem Erwartungswert der Schadensgröße zusammen. Das Gegenteil von Risiko ist keinesfalls Sicherheit, eher Hoffnung oder Optimismus. Wer ein Risiko bewusst eingeht, tut dies mit der Erwartung, dass es sich nicht verwirklicht, in der Hoffnung zu gewinnen.

*Statistik* beschreibt zusammenfassend Methoden zur Analyse von empirischen Daten. Die *Stochastik* dient der Beschreibung und Untersuchung von Experimenten oder Ereignissen, welche vom Zufall, von zeitlichen Entwicklungen und räumlichen Strukturen beeinflusst sind. *Probabilistik* steht für die Wahrscheinlichkeitslehre. Sie beschäftigt sich mit der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses, oft mit der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  eines Bauwerks oder Bauteils

Die Variabilität des Bodens, der Einwirkungen und der Widerstände wird in Sicherheitsnachweisen dadurch berücksichtigt, dass nicht Mittelwerte, sondern auf der sicheren Seite liegende Erwartungswerte angesetzt werden, wobei sich der Sicherheitsfaktor an der Präzision des Modells und an der Empfindlichkeit der Einflussparameter orientiert. Mit der aktuellen Europäischen Normengeneration wurde das Konzept der Teilsicherheiten eingeführt, die getrennte Bewertung der Einflussparameter von Einwirkung und Widerstand mit spezifischen Sicherheitsfaktoren. Wenngleich die ersten Gedanken und Ideen hierzu vor über 100 Jahren publiziert wurden, wird dieses Konzept nur zögerlich und zurückhaltend in der Ingenieurpraxis angenommen.

Zum Sicherheitsnachweis nach EC-7 Teil 1 wird der Bemessungswert der Einwirkung oder Beanspruchung  $E_d$  mit dem des Widerstandes oder der Beanspruchbarkeit  $R_d$  verglichen. Die Sicherheitsanforderungen sind erfüllt, wenn gilt

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

Statistische und probabilistische Methoden werden dabei nicht direkt angewendet, sondern liegen diesem Konzept durch die Festlegung der charakteristischen Werte und der Teilsicherheitsfaktoren zugrunde.

### 3 Grundlagen statistischer und probabilistischer Methoden

#### 3.1 Statistik und Wahrscheinlichkeit

Statistik und Probabilistik werden schon seit langem in allen Bereichen des Bauingenieurwesens, vor allem in der Datenanalyse, angewendet, um auf standardisierte und objektivierte Weise verwertbare Erkenntnisse zu gewinnen. Ein aktueller Überblick findet sich in HUBER U. WITT, 2017.

Die Kernbegriffe einer statistischen Bearbeitung von Daten sind *Grundgesamtheit*, *Stichprobe*, *Mittel- oder Erwartungswert*, *Standardabweichung*, *Varianz* und *Variationskoeffizient* einer Variablen sowie *Art*, *Schief*e und *Wölbung* einer statistischen Verteilung. Die *Grundgesamtheit* ist die gesamte Gruppe einer Variablen, z. B. eine Schicht im Baugrund. Eine *Stichprobe* ist der betrachtete Teil der Gruppe, die an einer Bodenprobe ermittelte Eigenschaft. Die mathematische Definition und die Berechnung von *Mittelwert*  $\mu$ , *Standardabweichung*  $\sigma$  oder *Varianz*  $\sigma^2$  einer Datenmenge wird als bekannt vorausgesetzt, der *Variationskoeffizient*  $CoV = \sigma/\mu$  ist das Verhältnis von Standardabweichung und Mittelwert.

Ein *Histogramm* ist die in Intervalle gruppierte Darstellung der relativen Häufigkeit stetiger Daten. Es gibt eine erste Auskunft über die Art einer statistische Verteilung, so dass die Häufigkeitsverteilung mit einer mathematisch definierten Dichte, z. B. Normal- oder Log-Normalverteilung, angenähert werden kann.

Bild 1 zeigt als Beispiel die Auswertung eines Ringversuches zur Bestimmung der Konsistenzzahl eines tonigen Schluffs. Der Mittelwert der Ergebnisse beträgt  $\mu = 0,99$ , die Standardabweichung  $\sigma = 0,115$ . Die Variabilität liegt hier allein in der Qualität der Versuchsdurchführung. Der Variationskoeffizient der Konsistenzzahl, dieser zur Charakterisierung eines bindigen Bodens so wichtigen Kenngröße, beträgt bei diesem realen Beispiel schon allein aufgrund der Unschärfe der Bestimmung  $CoV = 12\%$ . Hinzu kommt die tatsächlich im Baugrund existierende räumliche Variabilität.

Die Streuung von Bodenkenngrößen hängt stark von der Genese des Baugrunds oder von der Homogenität einer Schüttung ab. Als grobe Orientierung kann für die Kenngrößen der Scherfestigkeit und Steifigkeit von einem Variationskoeffizienten in der Größenordnung von 30 bis 60 % ausgegangen werden.

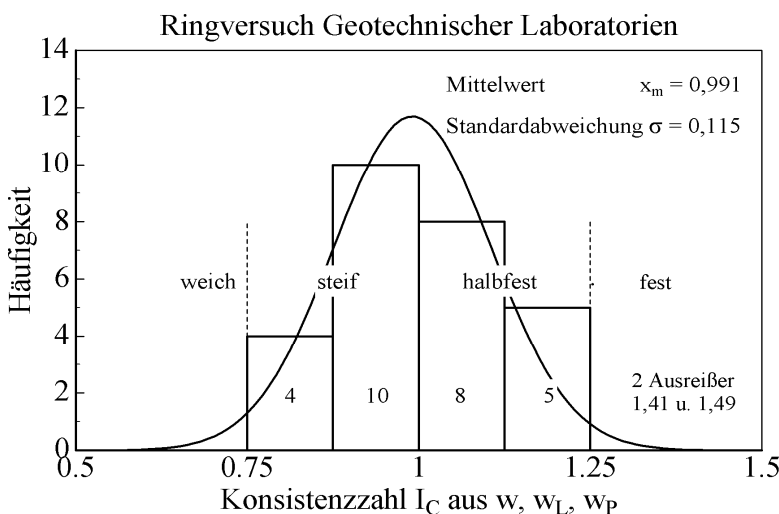


Bild 1: Histogramm eines Ringversuches zur Bestimmung der Konsistenzgrenzen [WITT, 2002]

Mit zunehmendem Umfang der Stichprobe und damit verbunden, mit engeren Intervallen, wird das Histogramm glatter. Geht die Anzahl der der Stichproben gegen Unendlich und die Breite des Intervalls gegen Null, geht das Histogramm direkt in die Dichtefunktion  $f(x)$  über, wobei  $X$  die betrachtete Zufallsvariable, in diesem Beispiel die Konsistenz mit dem Wert  $x_m$  darstellt. Die Funktion  $f(x)$  ist die relative Häufigkeit. In Bild 1 ist dieser Übergang durch eine Normalverteilung angenähert. Die in der

Geotechnik betrachteten variablen Kenngrößen werden oft mit einer Log-Normalverteilung zutreffender beschrieben, bei der nicht die Prüfwerte selbst, sondern deren Logarithmen normalverteilt sind und somit negative Werte ausgeschlossen sind. Dies gilt besonders dann, wenn es um sehr seltene Häufigkeiten geht, deren Eintreten sich an den Rändern der Verteilung abbilden.

Bei allen Verteilungstypen ist die Fläche unter der Dichtefunktion „1“. Die Wahrscheinlichkeit  $P$ , dass ein Wert innerhalb definierter Grenzen  $a$  und  $b$  dieser Verteilung liegt errechnet sich aus

$$P(a < X < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (2)$$

Die kumulative Wahrscheinlichkeitsfunktion gibt die Wahrscheinlichkeit an

$$P(X < x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (3)$$

Für die am häufigsten verwendete Gauß'sche Normalverteilung gilt

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4)$$

mit den Parametern Erwartungswert (Mittelwert)  $\mu$  und die Standardabweichung  $\sigma$  bzw. die Varianz  $\sigma^2$ . Durch eine Transformation lässt sich die Verteilung in eine Standardnormalverteilung mit  $\mu = 0$  und  $\sigma^2 = 1$  überführen. Ist die Zufallsvariable  $X$  mit den Parametern  $\mu$  und  $\sigma^2$  normalverteilt, so bildet die transformierte Zufallsvariable  $(x-\mu)/\sigma$  eine Standardnormalverteilung. Zur Auswertung der Standardnormalverteilung greift man auf Tabellenwerke, zurück.

Die grafische Darstellung der Dichtefunktion einer Normalverteilung ergibt die bekannte glockenförmige Kurve (Bild 1), die bei den Abszissen  $\mu + \sigma$  bzw.  $\mu - \sigma$  den Wendepunkt hat. Die Fläche unter der standardisierten normalverteilten Dichtefunktion gibt die Eintrittswahrscheinlichkeit an. So beträgt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Wert im Intervall zwischen Mittelwert +/- einem Mehrfachen der Standardabweichung liegt

$$P(\mu - \sigma \leq X \leq \mu + \sigma) = 0,6827 \text{ bzw. } \sim 68\% \quad (5)$$

$$P(\mu - 2\sigma \leq X \leq \mu + 2\sigma) = 0,9545 \text{ bzw. } \sim 95\% \quad (6)$$

$$P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) = 0,9973 \text{ bzw. } \sim 99,7\% \quad (7)$$

Für unser obiges Beispiel bedeutet dies, dass bei Untersuchungen die Konsistenzzahl des Schlufts mit einer Wahrscheinlichkeit von 68 % im Intervall zwischen 0,88 und 1,11, mit 95 % Wahrscheinlichkeit im Intervall zwischen 1,22 und 0,76 und mit 99 % im Intervall zwischen 1,34 und 0,65 liegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass der Schuff bei den Untersuchungen als „weich“ ermittelt wird ( $I_C < 0,75$ ) beträgt

$$P(I_C < 0,75) = \Phi\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right) = \Phi\left(\frac{0,75 - 0,991}{0,115}\right) = \Phi(-2,10) = 1 - \Phi(2,1) = 0,0179 = 1,8\% \quad (8)$$

wobei  $\Phi$  aus den Tafeln der Standard-Normalverteilung entnommen wird, z. B. aus PLATE, 1993.

Solche einfache Betrachtungen zur Wahrscheinlichkeit und Vertrauenswürdigkeit von aus Stichproben ermittelten Verteilungen kommen vor allem bei der Bewertung von Qualitätskontrollen und bei der Festlegung charakteristischer Kennwerte zur Anwendung. Bei umgekehrter Fragestellung wird damit ein sog. Fraktilwert einer bodenmechanischen Größe ermittelt, ein Wert, der nur mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, z. B. 10 %, unterschritten wird. Das Prinzip normalverteilter Wahrscheinlichkeiten gilt gleichermaßen für die probabilistische Bemessung und die Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit geotechnischer Bauwerke, wobei die Zufallsvariablen dann die *Beanspruchung E* und *Beanspruchbarkeit R* sind.

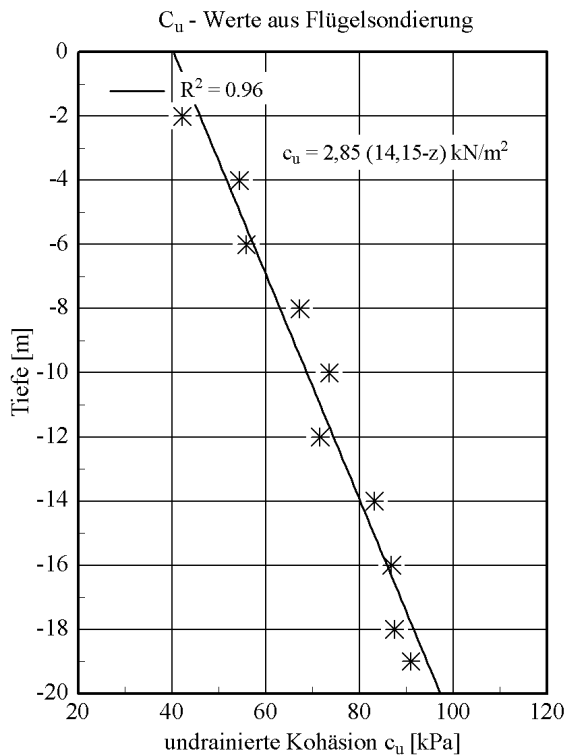


Bild 2: Beispiel zur linearen Regression

In der Versuchsauswertung und allgemein zur Darstellung von Gesetzmäßigkeiten zwischen einer abhängigen und einer oder mehrerer unabhängigen Variablen kommt als statistisches Analyseverfahren die Regressionsrechnung zur Anwendung. Bei den meisten geotechnischen Fragestellungen, insbesondere im Versuchswesen, reicht eine lineare Regression, bei der es um die beste Näherung der Steigung und des Achsenabschnitts einer Ausgleichsgeraden  $y = ax + b$  geht. Auf die gleiche Weise lassen sich auch die Parameter von Polynomen höheren Grades ermitteln. Eine sinnvolle Definition zur besten Näherung ist das Prinzip der kleinsten Fehlerquadrate, bei dem die Summe der Quadrate der Abweichung zwischen der Ausgleichsgerade und den Daten minimiert wird. Der Korrelationskoeffizient  $R^2$  gibt die Güte des Zusammenhanges an.

Die häufigste Anwendung dieser linearen Regression ist die Festlegung der Mohr-Coulomb'schen Grenzgeraden

und damit von Reibung und Kohäsion beim Rahmenscher- oder bei der Auswertung des  $p'$ - $q$ -Diagramms eines Triaxialversuches. Eine typische Anwendung bei der Erkundung könnte z. B. die Darstellung der Tiefenabhängigkeit des Widerstandes der Drucksondierung oder der mit einer Flügelsonde ermittelten undrained Kohäsion sein (Bild 2). Auch hierbei lässt sich bei Berücksichtigung des Trends die Varianz zur Fehleranalyse ermitteln. Zur Auswertung der Last-Setzungskurve des Plattendruckversuchs oder zur Darstellung der Proctor-Kurve werden mit dem Regressionsverfahren Polynome angenähert.

### 3.2 Bayes'sche Statistik

Während es bei der „klassischen“ Statistik um die quantitative Analyse von gesicherten Daten geht, gibt es mit den *Bayes'schen Methoden* die Möglichkeit, Informationen unter Einbeziehung von Vorwissen zu gewinnen. Mit der *Bayes'schen Statistik* werden beide Informationsquellen kombiniert, die *A-priori-Information* und die neu gesicherten Daten. Das Ergebnis ist eine *A-posteriori-Information*. Die mathematischen Grundlagen und beispielhafte Anwendungen aus dem Bereich der Naturwissenschaften werden in WICKMANN, 1990 übersichtlich dargelegt.

Mathematisch ausgedrückt betrachtet die klassische (frequentistische) Statistik relative Häufigkeiten, während die Bayes'sche Statistik (subjektivistische) Aussagen zur Wahrscheinlichkeit über Hypothesen erlaubt. Es geht im Sinne unseres Themas nicht um die bedingungslose Aufdeckung des Nichtwissens, sondern um eine unscharfe Prognose, bei der Vorwissen und konkret ermittelte Daten gleichermaßen einfließen, wie dies auch ohne Rechenaufwand und Statistik im Kopf des erfahrenen Experten bei der Bewertung von unsicheren Zusatzinformationen stattfindet.

Der Satz von Bayes wird in seiner einfachsten Form formuliert:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) \cdot P(A)}{P(B)} \quad (9)$$

$P(A|B)$  = Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis A unter der Bedingung eintritt, dass B eingetreten ist

$P(B|A)$  = Wahrscheinlichkeit, dass das Ereignis B unter der Bedingung eintritt, dass A eingetreten ist

$P(A)$  = A-priori-Wahrscheinlichkeit des Ereignisses  $P(B)$  = A-priori-Wahrscheinlichkeit des Ereignisses B

Die Betrachtungsweise soll an einem vereinfachten Beispiel verdeutlicht werden.

### **Beispiel**

*Das Baugrundlabor des Vertrauens liefert eine Konsistenzuntersuchung eines Schluffes.*

*Ereignis A: Schluff wird im Labor als weich charakterisiert ( $I_C < 0,75$ )*

*Ereignis B: Schluff hat tatsächlich weiche Konsistenz*

*Ereignis B\*: Schluff hat tatsächlich steife Konsistenz*

*Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit  $P(B|A)$ , dass der Schluff tatsächlich in weicher Konsistenz vorliegt, wenn das Labor in als „weich“ deklariert?*

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)}$$

*Das Labor sei zertifiziert und es sei daraus bekannt, dass es einen tatsächlich weichen Boden zu 96 % erkennt. Allerdings gibt das Labor auch in 1 % der Untersuchungen einen in Wirklichkeit steifen Schluff als weich aus.*

$$P(A|B) = 0,96; \quad P(A|B^*) = 0,01$$

*Nun sei aus der Region a-priori bekannt, dass nur 1,8 % der Schluffschicht in weicher Konsistenz anstehen*

$$P(B) = 0,018$$

*Es fehlt noch die nicht bedingte Wahrscheinlichkeit  $P(A)$ , dass das Labor eine weiche Schicht ausgibt, wenn der Schluff tatsächlich weich oder nicht weich ist.*

$$P(A) = P(A|B) \cdot P(B) + P(A|B^*) \cdot P(B^*), \text{ mit } P(B^*) = 1 - P(B)$$

$$P(A) = 0,96 \cdot 0,018 + 0,01 \cdot (1 - 0,018) = 0,027$$

*Damit ergibt sich*

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \cdot P(B)}{P(A)} = \frac{0,96 \cdot 0,018}{0,027} = 0,64 \approx 64\%$$

Wenn das Labor unter den genannten Bedingungen eine Probe des Schluffs als weich deklariert, ist das nur zu 64 % richtig, also umgekehrt zu 36 % unzutreffend. Dies ist zum einen der relativ hohen

Irrtumswahrscheinlichkeit des Labors geschuldet, im Wesentlichen aber in der Vorinformation  $P(B)$ , dass in der Grundgesamtheit nur wenig wirklich weicher Boden zu erwarten ist.

Bayes'sche Statistik erweist sich in der Geotechnik überall dort als sinnvoll, wo Vorkenntnisse mit unsicherer Erkenntnissen kombiniert werden, z. B. bei der Bewertung einer Schadstofferkundung, bei der Festlegung von Pfahlwiderständen durch Kombination von Probelastungen mit Erfahrungswerten oder bei der Zusammenführung direkter Aufschlüsse mit einer im Grunde unscharfen geophysikalischen Erkundung. Beispiele zu typischen geotechnischen Fragen finden sich in BAECHER, G., CHRISTIAN, J., 2003.

Bei einer eher komplexeren Anwendung der Bayes'schen Statistik geht es nicht wie im Beispiel um einfache Hypothesen zur Irrtumswahrscheinlichkeit und Fehleranfälligkeit, sondern um die Verbesserung der Qualität von Verteilungen, um sog. Bayes'sches Updaten. Wie auch immer die Fragestellung, mit den Methoden wird kein Nichtwissen beseitigt, sondern eher subjektives Teilwissen in eine Gesamtbewertung nachvollziehbar nach statistischen Regeln eingebracht.

### 3.3 Geostatistik

Unter dem Begriff Geostatistik werden Methoden zusammengefasst, die sich mit der Analyse, Aufbereitung und Darstellung räumlich oder räumlich-zeitlich variabler Daten befassen. Es geht in einem ersten Schritt um die quantitative Erfassung und mathematische Beschreibung der räumlichen Variabilität von Kenngrößen, um die Strukturanalyse und darauf aufbauend um die Erstellung eines räumlichen Modells der Parameterstreuung durch Interpolation mit einem *Kriging*-Verfahren oder einer stochastischen Simulation. Typische Anwendungsfelder in den Geo- und Umweltwissenschaften, der Ingenieurgeologie und der Geotechnik sind die räumliche Darstellung von Kenngrößen wie Schichtgrenzen, Mächtigkeit, Grundwasserständen, Wassergehalten, Setzungen, Schadstoffkonzentrationen und anderen geometrischen, bodenmechanischen oder chemisch-physikalischen Parametern in Gleichenplänen. In Abgrenzung zur reinen Interpolation werden mit den geostatistischen Verfahren auch die Unschärfen der Prognose zwischen den konkreten Messpunkten ausgewiesen, was zum Beispiel bei der Prognose von Baugrundeigenschaften zwischen den Aufschlussstellen wichtig ist. Die räumliche Korrelationsstruktur von geometrischen und bodenmechanischen Kenngrößen wird jedoch auch für manche Anwendungen der probabilistischen Bemessung benötigt, z. B. bei der Schätzung der Variabilität des Scherwiderstandes innerhalb einer Scherfuge bei der Analyse von Böschungsstandsicherheit, Gleiten oder Grundbruch.

Ausgangspunkt einer geostatistischen Analyse sind konkrete Messungen. Aus den räumlich durch Koordinaten zuordenbaren Daten  $z(x,y)$  wird zunächst die Korrelationsstruktur von zwei durch die Distanz  $h$  entfernten Orten mit einem sog. experimentellen Variogramm geschätzt, das die Semikovarianz  $\gamma(h)$  von Paaren der Messwerte einer Kenngröße in Abhängigkeit von ihrem Abstand  $h$  zueinander darstellt. Die Semikovarianz (im Folgenden Varianz genannt) errechnet sich nach Gl. 10 und hat die Dimension der Messgröße zum Quadrat.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} [z(x,y) - z(x,y+h)]^2 \quad (10)$$

Mit



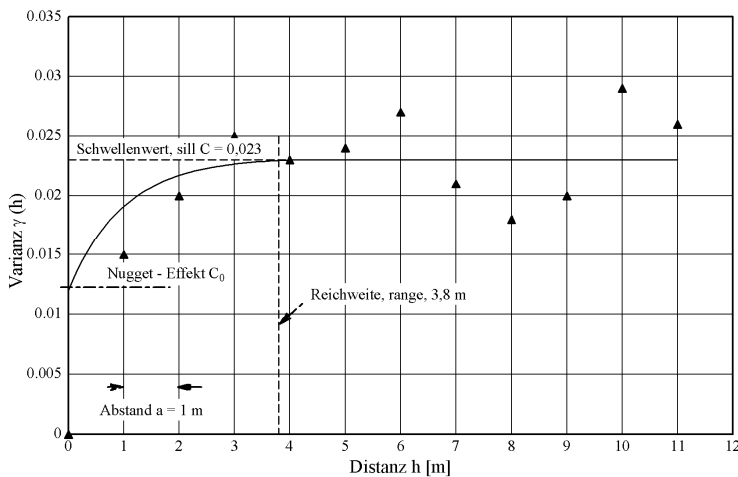


Bild 3: Experimentelles und theoretisches Variogramm

$N(h)$  = Anzahl der Beobachtungspaare mit dem Abstand  $h = \sqrt{\delta x^2 + \delta y^2}$   
 $z(x,y)$  = An der Stelle mit den Koordinaten  $x,y$  beobachteter Wert

Liegen die Messpunkte nicht mit gleichen Distanzen vor, können auch Abstandsklassen betrachtet werden. Bild 3 zeigt die typische Form eines Variogramms. Dargestellt ist die Varianz eines Reibungswinkels [HUBER U. WITT, 2017]. Die Symbole beschreiben die erste Schätzung anhand der mit konkreten Messdaten an Messstellen mit

dem Abstand  $a = 1 \text{ m}$  ermittelten räumlichen Variabilität (experimentelles oder empirisches Variogramm). Die durchgezogene Linie ist das theoretische Variogramm, eine Näherung, die nach einer der Methode zugeordneten exponentiellen, sphärischen (wie in Bild 3), gauß'schen oder auch linearen Funktion subjektiv angenähert wird (siehe z. B. SCHAFMEISTER, 1999, LABO, 2003, GAU, 2010). Die Aussageweite, auch Reichweite oder „range“ genannt, gibt den Abstand an, innerhalb dem die betrachtete Kenngröße signifikant korreliert ist. Diese Distanz entspricht auch der Autokorrelationslänge. Das Plateau, der Schwellenwert oder „sill“ ist der Grad der Varianz.

Der von der Näherungsfunktion gebildete Achsenabschnitt  $C_0$  wird Nugget-Effekt genannt. Er veranschaulicht die Variabilität auf sehr kleinen Distanzen, die beispielsweise auch durch Messfehler verursacht werden können.

Mit zunehmender Distanz der Messpunkte nimmt deren Korrelation ab, und damit erhöht sich die Varianz bis zur Reichweite. Bei darüber hinausgehenden Abständen gelten die Kennwerte als unkorreliert, als unabhängig. Die Form des Variogramms und die Reichweite spiegeln die Homogenität des Untersuchungsgebietes in der betrachteten Raumrichtung wieder. Beispiele einer Analyse realer geotechnischer Daten finden sich in HUBER ET AL., 2011.

Die praktische Fragestellung der Variographie zielt auf räumliche Effekte einer lokalen Änderung der Bodeneigenschaften, auf deren Ausstrahlung auf Nachbargebiete, sowie auf die quantitative Erfassung einer Anisotropie. Aus der eigenen Erfahrung liegt die Reichweite bzw. Autokorrelationslänge der wesentlichen Kenngrößen Scherfestigkeit, Dichte und Steifigkeit natürlicher Böden in der Größenordnung von einigen Metern, bei sehr homogenen Schüttungen auch darüber, wobei vertikal immer kleinere Reichweiten beobachtet werden, als horizontal. Grundsätzlich deutet eine Zunahme der Reichweite auf eine bessere Homogenität hin, so dass auch ein gröberes Erkundungsraster gerechtfertigt ist und umgekehrt. Dies ist vor allem für die Schadstofferkundung und Erkundungen für Tunnelbauten von Bedeutung, wenn es um die Beurteilung geht, ob mit dem Erkundungsraster Inhomogenitäten und Extremwerte mit einem gewissen räumlichen Ausmaß erfassbar sind. Die zweite Bedeutung der Reichweite und der Variabilität ergibt sich für probabilistische geotechnische Nachweise, da bei allen durch Mittelwerte dominierte Versagensarten aufgrund räumlicher Mittelungen nicht die Variabilität der Kenngröße selbst, sondern die Variabilität eines effek-

tiven Wertes innerhalb eines Einheitsvolumens im Baugrund maßgebend ist, das wiederum über die Reichweite zu definieren ist. Die Streuung von in einem Einheitsvolumen gemittelten Werten ist immer kleiner, als die der Einzelwerte selbst.

Eine typische geostatistische Anwendung von Variographie sind räumliche Interpolationsverfahren und hier vor allem die sog. *Kriging*-Methoden, die in viele Computer-Programmen zur räumlichen Darstellung implementiert sind (z. B. Surfer, ArcGIS, EPAEAS). Den Methoden ist gemeinsam, dass mit Kennwerten von konkret beprobten Stellen Schätzwerte für unbeprobte ermittelt werden, deren Varianz oder Unschärfe dabei bekannt ist. Auf der Basis einer Rasterung mit zusätzlich ermittelten virtuellen Beprobungspunkten lassen sich 2d oder 3d-Gleichenpläne oder auch Iso-Visualisierungen mit verschiedenen Farben für Intervalle erstellen. Typische Anwendungen sind Karten zur Darstellung oder Prognose von Grundwasserhöhen, Schadstoffkonzentrationen, Setzungen, Sicherheiten, Risiken und vielen anderen räumlich oder zeitliche veränderlichen Größen. Zur detaillierten Erläuterung und Abgrenzung der verschiedenen Kriging-Methoden verweise auf die bereits zitierte geostatistische Literatur, insbesondere auf WACKERNAGEL, 2003.

## 4 Zuverlässigkeitsanalyse

Bei der Bemessung von geotechnischen Bauwerken wie auch zum Nachweis der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit werden Grenzzustände betrachtet. Die physikalischen oder mechanischen Zusammenhänge werden auf die Gegenüberstellung zweier Größen reduziert: Der *Beanspruchung*  $E$  als Summe der Einwirkungen und eine *Beanspruchbarkeit*  $R$  als mobilisierbarer *Gesamtwiderstand*. Während für einen Sicherheitsnachweis nach EC 7 schlicht die mit Teilsicherheitsfaktoren erhöhten bzw. abgeminderten Bemessungswerte nach Gl. (1) verglichen oder ins Verhältnis gesetzt werden, betrachtet die Zuverlässigkeitsanalyse diese beiden Parameter der Grenzzustandsgleichung als unsicher, als variabel. Sowohl die Beanspruchung, als auch die Beanspruchbarkeit sind durch die Mittelwerte  $\mu_E$ ,  $\mu_R$ , Standardabweichungen  $\sigma_E$ ,  $\sigma_R$  bzw. durch die Variationskoeffizienten  $CoV_E$  und  $CoV_R$  beschrieben. Und gegebenenfalls besteht zwischen den Grenzzustandsvariablen auch eine Korrelation, die Kovarianz  $\rho_{ER} \cdot \sigma_E \cdot \sigma_R$ .

Der Grenzzustand wird als Zuverlässigkeit mit der Variablen  $Z$  formuliert, die Funktion lautet dann

$$Z = R - E = 0 \quad (11)$$

Die Wahrscheinlichkeit, dass der Grenzzustand  $Z = 0$  eintritt wird ist die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$ , die sich nach Gl. (3) unabhängig von der Art der Verteilung der Variablen ausdrücken lässt

$$p_f = P(R \leq E) = P(Z \leq 0) = \int_0^{\infty} \int_0^e f_E(e) \cdot f_R(r) d_e \cdot d_r = \int_{-\infty}^{z=0} f(z) dz \quad (12)$$

Gelingt es, die Verteilung und Momente der Variablen  $Z$  zu ermitteln, lässt sich die Versagenswahrscheinlichkeit berechnen und so der Einfluss der unsicheren Größen auf die bestimmungsgemäße Funktion eines Bauwerks oder Bauteils quantifizieren. Das Prinzip und die Definition der Versagenswahrscheinlichkeit sind in Bild 4 veranschaulicht. Die Beanspruchung  $E$  ist dort wie international üblich mit  $S$  bezeichnet (Stress).

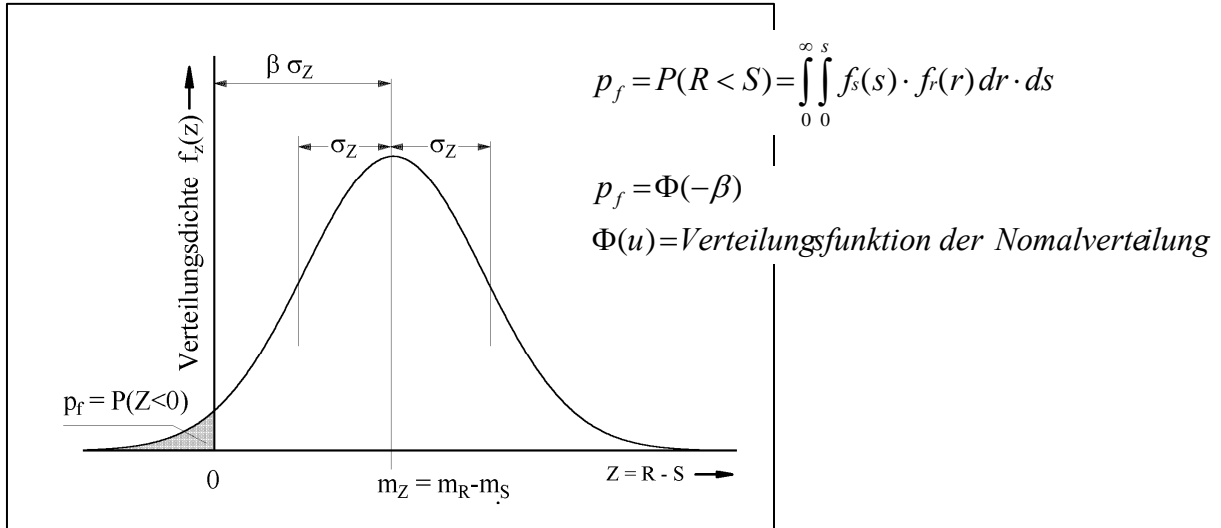
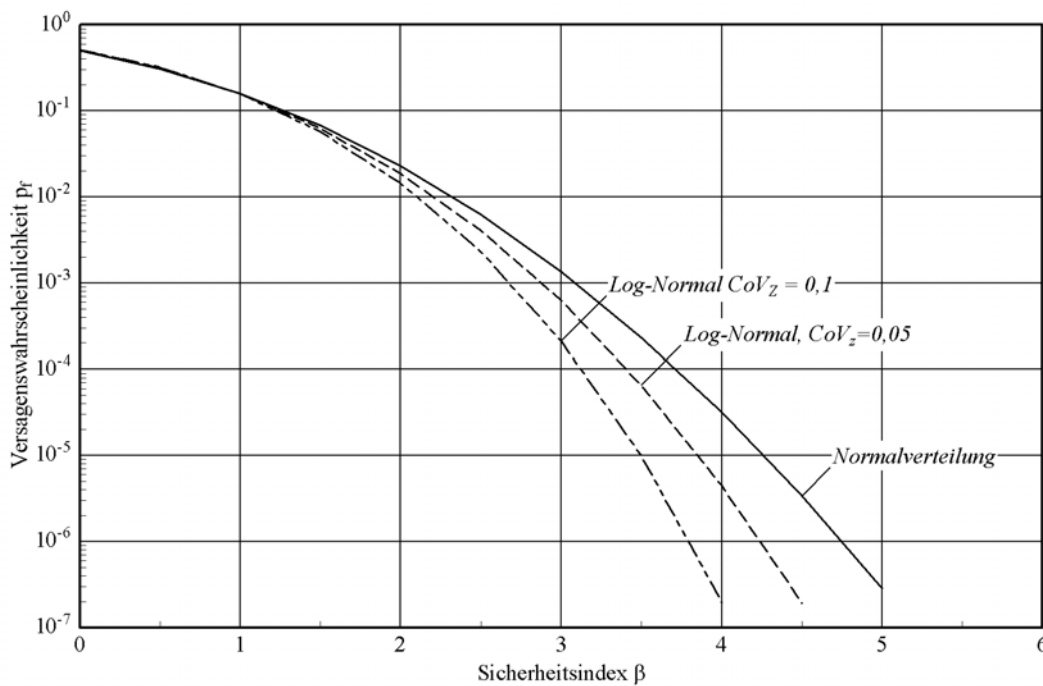


Bild 4: Definition der Versagenswahrscheinlichkeit bei normalverteilter Grenzzustandsfunktion

Zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit wird der Reziprokwert des Variationskoeffizienten der Ver-



teilung der Zuverlässigkeitsfunktion, der sog. Sicherheitsindex  $\beta$  ermittelt. Ist die Zuverlässigkeit  $Z$  normalverteilt mit den Kenngrößen  $\mu_Z$ ,  $\sigma_Z$  oder  $CoV_Z$  lässt sich die Versagenswahrscheinlich über die Tabellenwerke der Verteilung ablesen. Bild 5 zeigt den Zusammenhang für eine Normal- und Log-Normalverteilung. Bei

einer log-normalverteilten Zufallsvariablen hängt der Zusammenhang zwischen  $p_f$  und  $\beta$  von dem Variationskoeffizienten  $CoV_Z$  ab (vgl. Bild 5).

$$p_f = P(R \leq E) = P(Z \leq 0) = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) \tag{13}$$

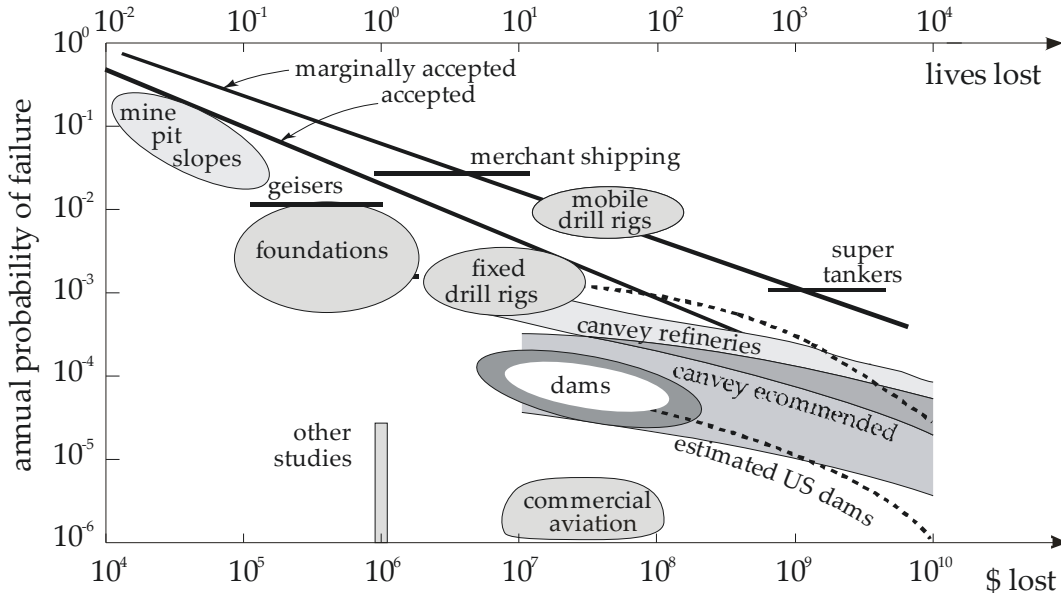


Bild 6. Jährliche Versagenswahrscheinlichkeit für ausgewählte Gefahren im Verhältnis zu den erwarteten Folgen in Anzahl der Toten oder Kosten (\$) nach BAECHER U. CHRISTIAN

Die Anforderung an die Zuverlässigkeit eines Bauwerks richtet sich nach dem Risiko, das über die sozialen oder ökonomischen Folgen eines Versagens definiert ist. Im Bauwesen wird die Versagenswahrscheinlichkeit als die Wahrscheinlichkeit angesehen, mit der bei gleichen Bauwerken und Bedingungen ein Versagensereignis pro Jahr eintritt. Die Bauwerke werden in Risiko- oder Zuverlässigkeitsklassen eingestuft. In Tabelle 1 sind die Vorgaben des EC 0 des zusammengefasst. Bild 6 zeigt einen empirischen Zusammenhang zwischen Versagenswahrscheinlichkeit und Folgen für verschiedene Bereiche der Technik.

Tabelle1: Mindestwerte des Sicherheitsindex  $\beta$  nach DIN EN 1990, [Huber u. Witt, 2017]

Zuverlässigkeitsklasse	Mindestwert Sicherheitsindex $\beta$	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
RC 3	5,2 $\approx p_f = 10^{-7}$	4,3
RC 2	4,7 $\approx p_f = 10^{-6}$	3,8
RC 1	4,2 $\approx p_f = 10^{-5}$	3,3

Je nach Komplexität der Grenzzustandsgleichung und deren Variablen können zur Ermittlung der Zuverlässigkeit bzw. Versagenswahrscheinlichkeit bei geotechnischen Fragestellungen mehrere Stufen der Präzisierung unterschieden werden.

- (a) Die Grenzzustandsvariablen  $E$  und  $R$  werden durch einen ungünstigen Wert, einen Fraktilwert mit bekannter Eintrittswahrscheinlichkeit als Bemessungswert berücksichtigt. Dies entspricht dem Nachweiskonzept der aktuellen Normung (Gl. 1), wobei allerdings die Teilsicherheitsfaktoren aus Zuverlässigkeits- oder Sensitivitätsbetrachtungen abzuleiten wären.

- (b) Die unsicheren Grenzzustandsvariablen der Beanspruchung und Beanspruchbarkeit können durch ihre statistischen Momente, Mittelwert und Standardabweichung oder Variationskoeffizient beschrieben werden, die Grenzzustandsgleichung hat eine mathematisch einfache Form. Die Zuverlässigkeit  $Z$  und die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  können nach Gl. (12) oder (13) direkt ermittelt werden, selbst wenn  $E$  und  $R$  korreliert sind.
- (c) Die Grenzzustandsgleichung lässt sich zwar mit allen unsicheren Variablen formulieren, ist aber nicht mehr in der einfachen linearen Form wie oben beschrieben darzustellen, so dass die Grenzzustandsfunktion  $Z$  nicht explizit berechnet werden kann. Hierfür wurden verschiedene Näherungsverfahren entwickelt, die eine vereinfachende Annäherung an den Bemessungspunkt erlauben. Bei komplexen Fällen lässt sich die Verteilung von  $Z$  und damit  $p_f$  nur durch Simulation, z. B. mit der Monte-Carlo Methode, oder mit der Methode der Finite Elemente annähern, indem Parametern Zufallsfelder zugeordnet werden (RFEM).

Anhand eines im Deponiebau häufig vorkommenden Nachweises, der Gleitsicherheit einer Oberflächenabdichtung, wird die Vorgehensweise einer expliziten Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit nach (b) nachfolgend exemplarisch erläutert. Vergleichbar einfache Bedingungen liegen bei der Standsicherheitsuntersuchung einer Felsböschung mit Blockgleiten oder beim Gleiten eines Fundamentes vor. Für komplexere Grenzzustandsfunktionen wird auf Spezialliteratur verwiesen, wie sie zum Beispiel in BAECHER U. CHRISTIAN, 2003 und in HUBER U. WITT, 2017 aufgeführt ist. Gute Beispiele und eine kritische Auseinandersetzung der Implementierung von probabilistischen Nachweisen in Normen finden sich in FENTON ET AL, 2016.

### Beispiel

Für eine ebene Gleitfuge auf einer  $1:n = 1:3$  geneigten Böschung einer Deponie-Oberflächenabdichtung hat sich als kritische Gleitfuge die Grenzschicht zwischen Kunststoffdichtungsbahn und einer Sandschutzschicht erwiesen. In der potentiellen Scherfuge wird nur Reibung mit dem Beiwert  $\delta$  mobilisiert. Es werden drainierte Bedingungen betrachtet.

Aus Laborversuchen und Erfahrungswerten hat sich ein Mittelwerte  $\mu_{\tan\delta} = 0,437$ ,  $\mu_\delta \approx 23,6^\circ$  ergeben. Der Variationskoeffizient des Reibungsbeiwertes beträgt  $CoV_{\tan\delta} = 0,11$ . Für die Böschungsneigung  $\alpha$  wird ein Variationskoeffizient von  $CoV_{\tan\alpha} = 0,05$  aufgrund von Erfahrungswerten geschätzt. Beide Grenzzustandsvariablen seien normalverteilt und nicht korreliert.

Die Grenzzustandsgleichung ist hier sehr einfach

$$Z = R - E = \tan \delta - \tan \alpha \quad (13)$$

Unabhängig von der Verteilung der Variablen gilt für den Mittelwert und die Varianz von  $Z$

$$\mu_Z = \mu_R - \mu_E = 0,437 - 0,333 = 0,104 \quad (14)$$

$$\sigma_Z^2 = \sigma_R^2 - \sigma_E^2 - 2 \cdot \rho_{RE} \cdot \sigma_R \cdot \sigma_E = (0,048)^2 - (0,017)^2 = 2,0 \cdot 10^{-3} \quad (15)$$

$$\sigma_Z = 4,5 \cdot 10^{-2} \quad (16)$$

Der Sicherheitsindex ergibt sich damit zu

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{0,104}{0,0451} = 2,30 \quad (17)$$

$$\text{Damit beträgt die Versagenswahrscheinlichkeit } p_f = 1 - \Phi(\beta) = \Phi(-\beta) = 0,0107 \quad (18)$$

Bei dieser Variabilität von Einwirkung und Widerstand versagt probabilistisch betrachtet pro Jahr 1 von 100 gleichartigen Böschungen. Das in Tab. 1 geforderte Niveau der Zuverlässigkeit ist nicht gegeben, obwohl eine globale Gleitsicherheit von  $\eta = 1,31$  und ein Ausnutzungsgrad von 95 % vorliegt.

Geht man davon aus, dass der betrachtete Mittelwert des Reibungsbeiwertes bereits ein um 10 % abgeminderter Versuchswert ist, erhöht sich in diesem Beispiel der Sicherheitsindex auf  $\beta = 2,94$  und verringert sich die Versagenswahrscheinlichkeit auf  $p_f = 0,0016$ , also etwa um den Faktor 10.

Für diese einfache Darstellung der Grenzzustandsgleichung mit zwei unkorrelierten Variablen lässt sich explizit der Zusammenhang zwischen dem Sicherheitsindex und dem herkömmlich betrachteten zentralen Sicherheitsfaktor  $\eta = \mu_R / \mu_E$  oder dem Ausnutzungsgrad  $\chi$  darstellen:

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_E}{\sigma_Z} = \frac{(\eta - 1) \cdot \mu_E}{\sigma_Z} = \frac{(1 - \chi) \cdot \mu_R}{\sigma_Z} \quad (19)$$

Das einfache Beispiel soll den Weg und die Empfindlichkeiten veranschaulichen. Bei jeglicher Methode zur Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit oder des Sicherheitsindex sollte man die Sinnhaftigkeit einer derartigen Betrachtung prüfen. Die Vertrauenswürdigkeit des Ergebnisses hängt ganz wesentlich von der Datenqualität ab, von der Realitätsnähe der Verteilung und der Momente der Grenzzustandsvariablen. Diesem Einfluss ist umso mehr Beachtung beizumessen, je höher das Sicherheitsniveau ist, da gerade bei kleinen Versagenswahrscheinlichkeiten die extremen Enden der statistischen Verteilung der Grenzzustandsvariablen einen starken Einfluss haben, deren Verlauf aber weitgehend unbekannt oder außerhalb der Erfahrung liegt.

## 5 Risikoanalyse und -bewertung

Zur Risikobetrachtung reicht die Kenntnis der Eintrittswahrscheinlichkeit eines konkreten Versagens nicht aus. Dem Nichtwissen und der Unschärfe begegnet man mit einer Risikoanalyse und der anschließenden Risikobewertung. Bei der Analyse werden die Abläufe und die physikalischen Bedingungen mit deren Unschärfe herausgearbeitet, die zu einem Risiko führen. Die Bewertung ist der quantitative Teil, die Ermittlung oder Abschätzung des Risikos. Die Werkzeuge sind dabei Ereignisbäume- oder Fehlerbäume, die Darstellung der Abfolge von aufeinander folgenden Ereignissen.

Bei der Analyse werden zunächst Abläufe und Szenarien mit Verzweigungen aufgestellt. Mit der mathematischen oder statistischen Formulierung der Abhängigkeiten und Eintrittswahrscheinlichkeiten an den Verzweigungen wird der Pfad bis zu einem Versagens-Szenario verfolgt. Zur konkreten Berechnung eines Ereignis- oder Fehlerbaums wird ebenfalls meist die Monte-Carlo-Simulation eingesetzt.

Bild 7 zeigt als Beispiel einen Ereignisbaum aus einer Risikoanalyse und -bewertung für einen Staudamm mit vier bodenmechanisch Zonen. Betrachtet wird das initiale Ereignis, dass eine LKW-Ladung mit grobem Stützkörpermaterial versehentlich in den Dichtungskern eingebaut wird. Je nach Verknüpfung der möglichen Verzweigungen kann dies unkritisch sein (Ausgang B), zu einem reparablen Schaden (Ausgang S) oder auch zu einem Dambruch führen (Ausgang V).

Mit den Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungen lässt sich die Systemwahrscheinlichkeit des betrachteten Pfades ermitteln. Auf diese Weise können zumindest die Einflüsse der Komponenten auf das gesamte Szenario vergleichend bewertet werden. Die Wahrscheinlichkeiten an den Verzweigungen sind jedoch meist subjektiv oder allenfalls empirisch abgesichert. Dennoch hat sich diese Methode bei vielen Arten von Risikobetrachtungen durchgesetzt und sich als Entscheidungsgrundlage für Optimierungsaufgaben im Erd- und Grundbau bewährt.

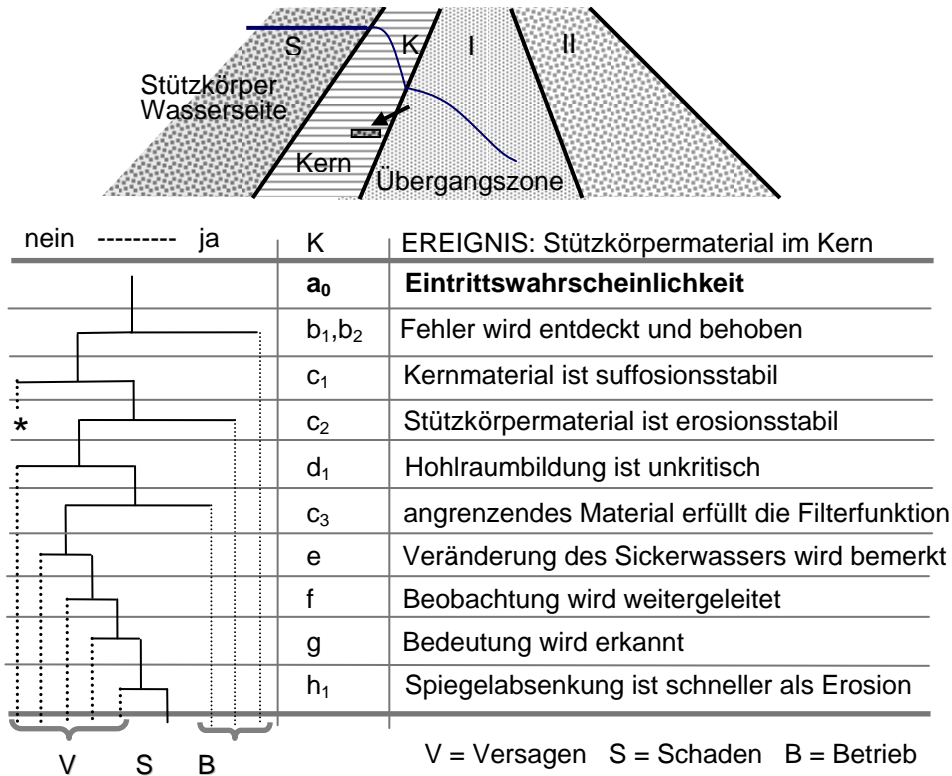


Bild 7: Ereignisbaumanalyse für einen Staudamm nach [Idel 1988]

## 6 Fazit Nichtwissen und Unschärfe

Unschärfe kennzeichnet die Geotechnik in allen Phasen der Projektbearbeitung, und die Ursache der Unschärfe ist Nichtwissen in seinen verschiedenen Ausprägungen. Fachliches Nichtwissen lässt sich beheben, durch Ausbildung, Hinterfragen, Reflektieren und durch Experimentierfreudigkeit, kurz durch Qualifikation. Doch die anderen Quellen des Nichtwissens müssen teilweise akzeptiert werden, man muss mit kritischem Blick lernen, damit umzugehen.

Der Hauptanteil des Nichtwissens betrifft die Beschaffenheit des Baugrundes, gefolgt von der nur begrenzten Kenntnis zum Materialverhalten von Boden, der im Gegensatz zu anderen Baustoffen zum einen im natürlichen Zustand in seiner Zusammensetzung eine enorme Variabilität aufweist, zum andern als Baugrund und als Baustoff eine Veränderung mit der Zeit erfahren kann, die weit über übliche Alterungseffekte von Baustoffen hinausgeht. Der Boden rostet nicht, er verfault auch im Allgemeinen nicht, aber die für die Nutzung in der Geotechnik wesentlichen Eigenschaften Festigkeit und Steifigkeit sind stark von Änderungen des Wassergehaltes, von Erschütterungen, von Verformungen bei geändertem Spannungszustand abhängig.

Die Wissenslücken der Baugrundbeschaffenheit und -eigenschaften, lassen sich mit einer angemessenen und optimierten Erkundung und Untersuchung eingrenzen. Bayes'sche Statistik und Geostatistische Methoden können hier sinnvoll eingesetzt werden, um den Erkundungsumfang und die Erkundungsmethoden mit unterschiedlicher Aussagekraft zu optimieren. Die Variabilität und Homogenbereiche können damit visualisiert und abgegrenzt werden. Bei der Festlegung der Kennwerte und deren Streuung können Vorinformation und empirisches Wissen mit verarbeitet werden.

Die Methoden der Statistik und Geostatistik können kein Nichtwissen ersetzen, sie führen keinesfalls zur Wahrheit, aber sie erlauben eine bessere Transparenz und Objektivität. Die derzeitige Praxis sieht leider anders aus. In den meisten Fällen orientiert sich der Erkundungsaufwand an den Kosten, nicht an der Bedeutung der Aussagen für den weiteren Planungsprozess. Und am Ende werden die für Sicherheitsnachweise benötigten Kennwerte ohne experimentelle Untersuchung geschätzt. Die erdstatischen Berechnungen werden aufwändig durchgeführt und geprüft. Die zugrunde liegenden Annahmen, das Baugrundmodell und die Kennwerte werden meist nicht hinterfragt. Im Baugrundmodell liegt aber der Schwerpunkt der Unschärfe. Wenn wir besser werden wollen, müssen wir genau da ansetzen.

Die Methoden der probabilistischen Sicherheitsnachweise sind weit entwickelt. Zusammen mit den Simulationsmethoden und den großen Rechnerleistungen sind sie nahezu universell einsetzbar. Mit sinnvoll angenommenen Verteilungen, Streuungen und Korrelationen der Variablen lässt sich damit die Zuverlässigkeit von Bauwerken und Bauteilen aufzeigen, Abhängigkeiten und Sensibilitäten lassen sich damit vorzüglich abbilden. Das Gleiche gilt für Fehlerbaumanalysen als Grundlage von Entscheidungen auf unsicheren Informationen.

Wann lohnt sich der Mühe? Nicht bei Standardnachweisen, aber bei allen Entscheidungen, die ein erhöhtes Risiko darstellen können, wenn der Anspruch besteht, Unschärfe zu quantifizieren. Auf den Rat der Experten, die in Prozessen und in Szenarien denken können, kann dabei nicht verzichtet werden. Risikobetrachtungen können und sollen deren Rat nicht ersetzen, aber sie können ihn stützen. Für einfache Nachweise des geotechnischen Alltags reicht dagegen das herkömmliche Sicherheitskonzept aus. Im Gegensatz zur deutschen Praxis, bei der die Teilsicherheitsbeiwerte so getrimmt wurden, dass das bewährte Sicherheitsniveau beibehalten wird, versuchen andere Länder, die Faktoren durch Studien zur probabilistischen Bemessung zu untermauern.

Nichtwissen ist zunächst mit negativen Assoziationen belegt. Aber bei aller Kritik der Gesellschaft und anderer Ingenieurdisziplinen an der damit verbundenen Unschärfe der Prognosen in der Geotechnik soll nicht unerwähnt bleiben, dass Nichtwissen auch positive Seiten hat. Wir können, wollen und müssen nicht alles wissen. Positives Nichtwissen fördert die Kreativität, kann Innovation hervorrufen, beschleunigt Entscheidungen, kann auch schützend sein. Oder anders gesagt, auch zu viel Wissen kann schädlich sein. Wie in vielem kommt es auch hier auf das rechte Maß an.

Dem Sokrates zugesprochenen Satz: „Ich weiß, dass ich nichts weiß“ ist hinzuzufügen, dass es weniger schlimm ist, zu wissen, dass man nichts weiß, als wenn man im Glauben zu wissen handelt.



## 7 Literatur

- BAECHER, G., CHRISTIAN, J.: *Reliability and statistics in geotechnical engineering*. John Wiley & Sons Inc., 2003
- DAVID, M.: *Geostatistical Ore Reserve Estimation. – Development in Geomechanics 2*, Elsevier, 1977
- FENTON, G. A., NAGHIBI, F., DUNDAS, D., BATHURST, R., AND GRIFFITHS, D.V.: *Reliability-based geotechnical design in 2014 Canadian Highway Bridge Design Code*. Can. Geotech. J. 53: 236–251, 2016
- GAU, CH.: *Geostatistik in der Baugrundmodellierung; Die Bedeutung des Anwenders im Modellierungsprozess*. Springer Vieweg, 2010.
- GOOVAERTS, P.: *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, 1997
- HUBER, M., SALEHI SADAGHIANI, M., MOORMANN, C, WITT, K. J.: *Beitrag zur räumlichen Beschreibung der Heterogenität des Untergrundes*. 18. Tagung für Ingenieurgeologie und Forum „Junge Ingenieurgeologen“, Berlin, 2011
- HUBER, M., WITT, K. J.: *Statistik und Probabilistik in der geotechnischen Bemessung* In: Witt, K. J. (Hrsg.): *Grundbau-Taschenbuch, Teil1: Geotechnische Grundlagen*, 8. Aufl. 2017, *Verlag Ernst & Sohn*
- IDEL, K. H.: Abschlussbericht des DGGT/BMFT Forschungsprojektes „Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme. Band 1, Grundlagen, 1988.
- LABO - BUND-LÄNDER-ARBEITSGEMEINSCHAFT BODENSCHUTZ: *Geostatistische und statistische Methoden und Auswerteverfahren für Geodaten mit Punkt- bzw. Flächenbezug*, Abschlussbericht Teil 1: Grundlagen, 2003
- PLATE, E., J.: *Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure*. Verlag Ernst & Sohn
- SCHAFMEISTER, M.TH.: *Geostatistik für die hydrogeologische Praxis*. Springer, 1999
- U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION: *Fault Tree Handbook*. National Technical Information Service, Springfield, VA 22161, 1981
- USEPA, United States Environmental Protection Agency: *Geo-EAS 1.2.1 Users Guide*, 1991, National Service Center for Environmental publications, <https://www.epa.gov/nscep>
- VOSE, D.: *Risk analysis A quantitative guide*, John Wiley&Sons, Ltd, 2<sup>nd</sup> ed., 2000
- WACKERNAGEL, H.: *Multivariate geostatistics: An introduction with applications*. Springer Verlag, 3<sup>rd</sup> ed, 2003
- WICKMANN, D.: *Bayes-Statistik: Einsicht gewinnen und Entscheiden bei Unsicherheit. B-I Wiss.-Verl.*, 1990
- WITT, K. J.: *Stochastische Prozesse in der Geotechnik – Eine Einführung in die Thematik*. In Ziegler, M. (Hrsg.): *Schriftenreihe Geotechnik im Bauwesen RWTH Aachen, Heft 1*, 2002, S. 1-14

### Zitat:

WITT, K. J.: Nichtwissen und Unschärfe im Erd- und Grundbau. 13. Erdbaufachtagung Leipzig2017