

Sonderdruck aus

DFG Deutsche Forschungsgemeinschaft

Zuverlässigkeitstheorie bei wasserwirtschaftlichen Aufgaben

Ergebnisse eines Rundgespräches

Herausgegeben von
Werner Buck und Erich Plate

Mitteilung IX
der Senatskommission
für Wasserforschung



2.2 Zuverlässigkeitstheorie im Konstruktiven Ingenieurbau

Rüdiger Rackwitz

Lehrstuhl für Massivbau,
Technische Universität München

Eine Übersicht über den Stand von Theorie und Anwendungen, die auf die Probleme des Konstruktiven Ingenieurbaus zugeschnitten ist und zum Teil für diesen entwickelte Zuverlässigkeitsbetrachtungen anstellt, mag u. a. zu begründen versuchen, weshalb das Konstruktive Ingenieurwesen eine eigene Spielart der Zuverlässigkeitstheorie benötigt, und weiter, ob, abgesehen von rein akademischem Interesse, ein Bedarf aus den Fragestellungen der Baupraxis heraus ablesbar ist. Bekanntlich existiert eine leistungsfähige, mathematische Theorie der Zuverlässigkeit. Sie wird in gewissen Technikbereichen, so in der Anlagentechnik oder in der Computertechnik, mit Erfolg eingesetzt. Daß die „klassischen“ Modelle nicht ausreichen, soll im folgenden noch deutlich gemacht werden. Bezüglich der Nachfrage nach neuartigen Betrachtungsweisen muß festgestellt werden, daß auch bisher schon im großen und ganzen „zuverlässig genug“ gebaut wurde. Man wird kaum die These vertreten können, daß die Bautechnik bei der Beherrschung der Unsicherheiten generell an die Grenzen ihrer Möglichkeiten gestoßen war, wenngleich das Zuverlässigkeitsniveau in den verschiedenen Bereichen zum Teil unterschiedlich ausfiel und hier und da auch spektakuläre Schadensfälle zu beklagen waren. Vielmehr sind Sicherheitsfragen bei baulichen Anlagen mit großer Sensibilität aus der Erfahrung heraus mit Erfolg behandelt worden. Man begegnet deutlich Reserviertheit, in dieser Frage bewährte Vorgehensweisen zu verlassen und sie durch theoretische Konzepte zu ersetzen. Solche sind dem Praktiker in der Regel schon deshalb suspekt, weil sie ein ungeohntes methodisches Instrumentarium verlangen und dieses zudem noch nicht so ohne weiteres praktisch erfahrbar ist. Man mag die Situation mit jener Mitte des 18. Jahrhunderts vergleichen, als bei der Sanierung der Kuppel des Petersdoms zu Rom erstmals konkrete, statische Überlegungen angestellt wurden, die, da von Theoretikern und fast ausschließlich mit den Hilfsmitteln der Mathematik durchgeführt, in ihren Folgerungen nur sehr mühsam bei den Praktikern durchzusetzen waren.

Diese weitgehend psychologisch bedingte Zurückhaltung hat natürlich mit der Beantwortung der Frage, ob eine neuartige, theoretisch fundierte Betrachtung der Zuverlässigkeit technischer Objekte vonnöten ist, nichts zu tun. Um die Frage eindeutig positiv beantworten zu können, muß weiter ausgeholt werden.

Es scheint sinnvoll, zunächst zurückzublicken und nach den Motiven und Marksteinen der bisherigen Entwicklung zu sehen. Daß Zuverlässigkeit von Bauwerken in unserem Zusammenhang nicht nur eine Frage der Beherrschung der technischen Mechanik und Festigkeitslehre, sondern darüber hinaus eine Frage der Größe der Sicherheitsabstände zwischen rechnerischer Beanspruchbarkeit und rechnerischer Beanspruchung bei Vorliegen unsicherer Eingangsgrößen und den Systemeigenschaften, der Datenerhebung für solche Größen aber vor allem auch eine Frage der Kontrolle dieser Größen und – vorrangig – des Unsicherheitsfaktors „Mensch“ ist, soll als allgemein anerkannt gelten. Ebensowenig stellen wir in Frage, daß Zuverlässigkeit technischer Objekte letztlich immer das Ergebnis einer Optimierung von erwarteten Aufwendungen und Nutzen ist. Eine Theorie der Zuverlässigkeit löst daher nur eine Teilaufgabe, und auch nur diese soll hier näher diskutiert werden.

Die Geschichte einer Zuverlässigkeitstheorie für Bauwerke beginnt in den zwanziger Jahren mit zwei wissenschaftlichen Arbeiten (FORSELL, 1924; MAYER, 1926), die beide die Wahrscheinlichkeitstheorie und die Statistik als methodisches Hilfsmittel heranziehen. FORSELL versuchte, die Zuverlässigkeit von kleinen, im wesentlichen landwirtschaftlich genutzten Brücken zu optimieren. Er kam zu dem Ergebnis, daß Bauwerke mit geringem Schadenspotential aus Wirtschaftlichkeitsgründen nicht zu sicher angelegt werden dürften, da sonst der Aufbau einer flächendeckenden landwirtschaftlichen Infrastruktur zu aufwendig würde. MAYER untersuchte u. a. die große Empfindlichkeit von Stützmauern gegenüber den naturgegebenen Unsicherheiten in der Exzentrizität des Lastangriffs. Er stieß zwangsläufig auf die Frage, wie mehrere, gleichzeitig wirkende Unsicherheiten rechnerisch zu beherrschen wären. Er stützte sich auf das Fehlerfortpflanzungsgesetz, das nur Näherungslösungen unbekannter Genauigkeit zuließ. Mit diesen Arbeiten war der Untersuchungsgegenstand einer Zuverlässigkeitstheorie für bauliche Anlagen in den wesentlichen Zügen bereits abgesteckt. Die konkrete Formulierung und Lösung gewisser Standardprobleme gelang jedoch erst viel später in den fünfziger Jahren. Sie sind in erster Linie mit dem Namen FREUDENTHAL (siehe FREUDENTHAL et al., 1966, und die dort angegebenen Stellen) verbunden. Diese Entwicklungen wurden von der Inge-

nieurpraxis, die ja zumindest im Wasserbau an ein Denken in Wahrscheinlichkeiten, z. B. bei der Festlegung des Bemessungshochwassers, gewöhnt war, schlicht übersehen. Vielmehr kam der Ruf nach einer theoretischen Grundlage von sicherheitsrelevanten Festlegungen zunächst zögernd, aber seit etwa 1965 verstärkt aus der nationalen und internationalen Normungsarbeit, da man meinte, sich ohne eine solche Grundlage über bestimmte Ansätze kaum mehr einigen und den jeweiligen Erfahrungsbereich nicht überschreiten zu können. Die letzten Jahre sahen als Antwort auf diese Herausforderung eine Reihe von Grundsatzdokumenten zur Festlegung und Verifizierung von Sicherheitsanforderungen, die durch intensive Forschungsarbeiten an Hochschulen gestützt wurden. Im Bereich neuer Technologien, etwa des Kernkraftwerkbaus und der Meerestechnik, verzeichnet man seit etwa zehn Jahren zunehmend auch direkte Anwendungen der neuen Betrachtungsweise. Es scheint, daß die Zuverlässigkeitstheorie, die in Anlehnung an C. A. CORNELL „erwachsen zu werden“ beginnt, ein „gesunder Jüngling“ geworden ist (CORNELL, 1981).

Etwa gleichzeitig und bemerkenswerterweise fast unabhängig von den aus der Normung herauskommenden Impulsen setzte eine intensive Erforschung der Einwirkungen auf Bauwerke ein. Hier erschien eine probabilistische Betrachtungsweise von vornherein angemessen und natürlich. Weniger spektakulär, aber doch nachhaltig drang sie in die Materialforschung, etwa auf dem Gebiet der Ermüdung, und in die Baumechanik, z. B. in Form der stochastischen Schwingungstheorie, ein. Insgesamt ist wohl heute unbestritten, daß eine probabilistische Betrachtungsweise der Zuverlässigkeit von baulichen Anlagen nicht nur eine schärfere Modellierung der Wirklichkeit ermöglicht und rationale und rationellere Entwurfsentscheidungen begünstigt, sondern auch ingenieurmäßiges Handeln durchsichtiger und besser vertretbar macht.

Worin drückten sich nun die wesentlichen Entwicklungsphasen der Zuverlässigkeitstheorie aus? FREUDENTHAL und andere betrachteten verschiedene Versionen des Standardfalls, daß nämlich Versagen auftritt, wenn zufällig eine Widerstandsgröße R kleiner als eine Einwirkungsgröße S ausfällt. Die Versagenswahrscheinlichkeit ergibt sich als Doppelintegral

$$P_f = \iint_{[R < S]} dF_{R,S},$$

welches in der Regel numerisch berechnet werden muß. $\{R < S\}$ bezeichnet den Versagensbereich und $F_{R,S}$ die gemeinsame Verteilungsfunktion

von R und S . R und S sind im allgemeinen aber Funktionen weiterer unsicherer Variablen. Für einigermaßen wirklichkeitsnah modellierte Zuverlässigkeitsaufgaben läuft das mithin auf eine mehrdimensionale Integration hinaus, die mit den klassischen Integrationsmethoden, der numerischen Integration oder den verschiedenen Simulationsverfahren vom Aufwand her, wenn überhaupt, allenfalls in günstig gelagerten Sonderfällen bewältigt werden kann. Wie aber sollte man dann an die eigentlich interessanten Aufgaben herangehen, d. h. wenn Versagen der Struktur auf vielerlei Weise auftreten kann und jeweils erst bestimmte Kombinationen gleichzeitigen Versagens von Systemkomponenten auch Systemversagen hervorrufen, wenn Einwirkungen oder Widerstände nicht einfache Zufallsvariable, sondern von der Zeit oder von Raumkoordinaten abhängige Zufallsprozesse sind, oder wenn Versagen aufgrund von Schadensakkumulation infolge wiederholter Beaufschlagung des Systems durch zeitvariante Einwirkungen eintritt? Es schien, als ob die verschiedenen Zuverlässigkeitsaufgaben theoretisch wohl formuliert werden könnten, sich aber der numerischen Behandlung entzögen.

Das hat – und in dieser Richtung wurden und werden ähnliche Vorschläge immer wieder vorgebracht – dazu geführt, die Beschreibungsmittel für den Unsicherheitscharakter der Einflußgrößen so zu reduzieren, daß die Zuverlässigkeitsaufgabe auch praktisch „berechenbar“ wurde. Grundlage hierfür ist der Kalkül mit Erwartungswerten, d. h. insbesondere mit linearen oder linearisierten Funktionen von ersten und zweiten probabilistischen Momenten der Zufallsgrößen (-funktionen) (CORNELL, 1968). Obwohl dieser Ansatz immer noch dann legitim erscheint, wenn tatsächlich nur ein erster und nächster Schritt aus der rein deterministischen Betrachtungsweise heraus gewagt werden soll oder wenn die Datensituation bzw. die Modelle zwischen Einwirkung und Auswirkung im System eine genauere Untersuchung nicht rechtfertigen, hat dieser Ansatz entscheidende Nachteile. Die zwei wichtigsten sind: Wahrscheinlichkeitsaussagen sind vom Typ der Tschebyscheffschen Ungleichung und damit wenig hilfreich, und weiter, die Ergebnisse sind abhängig von der Art der Formulierung des physikalischen Sachverhalts. Kann beispielsweise eine bestimmte Bemessungsaufgabe mechanisch äquivalent sowohl durch Vergleich von Spannungen als auch durch Vergleich von Traglasten gelöst werden, so müßte man für beide Nachweisarten unterschiedliche Sicherheitsfestlegungen treffen.

Hier nahm die neuere Entwicklung ihren Ausgang. HASOFER und LIND (1974) beseitigten die Invarianz der Zuverlässigkeitsmaße gegenüber der physikalischen Formulierung – noch im Kontext eines Rech-

nens mit Erwartungswerten. Der Autor trug mit anderen dazu bei, die Wahrscheinlichkeitsinformation wieder zu verschärfen (RACKWITZ, 1976). Grundidee ist, jeden beliebig verteilten und beliebig abhängigen Zufallsvektor in einen standardnormalen Zufallsvektor zu transformieren und dann das sich ergebende Wahrscheinlichkeitsintegral näherungsweise zu lösen. Das wird, so der ursprüngliche, heuristisch begründete Ansatz, dadurch möglich, daß die Begrenzung des sicheren Bereiches, die Grenzzustandsfunktion, in einem ausgezeichneten Punkt, dem „wahrscheinlichsten Versagenspunkt“, durch eine lineare oder quadratische Taylor-Entwicklung approximiert wird. Für den Wahrscheinlichkeitsinhalt des Versagensbereiches gelten dann einfache, gut bekannte Beziehungen für unkorrelierte, standardnormale Zufallsvariable.

Kürzlich wurde gezeigt, daß dieses Verfahren asymptotisch, d. h. für hochzuverlässige Systeme, exakt ist (BREITUNG, 1984; HOHENBICHLER, 1984). Auch die bei der Berechnung von Systemen auftretenden Aufgaben der Ermittlung der Wahrscheinlichkeit von Vereinigungen, Durchschnitten oder sogar Vereinigungen von Durchschnitten von Versagensmengen können so unschwer bewältigt werden. Diese Methoden erlauben ferner, zeitvariante Probleme, etwa die Zuverlässigkeit dynamischer Systeme oder die Zuverlässigkeit von Tragsystemen unter kombinierten zeitabhängigen Lasten, ohne unangemessene Vereinfachungen zu bestimmen (VENEZIANO et al., 1977; MADSEN, 1979; RACKWITZ, 1983). Die Zuverlässigkeit bei Materialermüdung wird für realistische Annahmen berechenbar. Zeitvariante Zuverlässigkeitsprobleme werden in der Regel mit Hilfe des (verallgemeinerten) Konzeptes der Schwellenwertüberschreitungen durch stochastische Prozesse gelöst. Man muß sogenannte unbedingte Versagensraten berechnen, welche die Wahrscheinlichkeit pro Zeiteinheit angeben, daß ein System zu einem bestimmten Zeitpunkt versagt, wenn es sich vorher im funktionstüchtigen Zustand befand. Hier wurde ebenfalls eine Reihe hilfreicher, einfacher asymptotischer Ergebnisse vorgelegt. Der Begriff der Versagensrate ist auch in der „klassischen“ Zuverlässigkeitstheorie bekannt und analog definiert. Daher kann man die beschriebene Theorie der Zuverlässigkeit von Tragwerken als Teil und Verallgemeinerung der „klassischen“ Ansätze verstehen.

Statistische Unsicherheiten oder besser allgemeine Parameterunsicherheiten sind ebenfalls behandelbar. Das ist wichtig, weil die probabilistische Betrachtungsweise keine neue Information schafft, sondern sie nur optimal auswertet und gerade die so häufig anzutreffenden begrenzten Informationszustände im Hinblick auf die Sicherheit bewerten muß.

Erwähnenswert ist in diesem Zusammenhang eine Reihe von Büchern, die zeigen mögen, daß das Gebiet lehrfähig und lehrbar geworden ist (z. B. SCHUËLLER, 1981; BOLOTIN, 1981; DITLEVSEN, 1981; THOFT-CHRISTENSEN und BAKER, 1982). Diese Quellen müssen durch mehr der Modellierung gewidmete, ebenso wichtige Arbeiten ergänzt werden, wie z. B. für Verkehrslasten des Hochbaus (SENTLER, 1975), Straßenverkehrslasten (GEIDNER, 1978), Windlasten (PLATE, 1982), Erdbebenlasten (LOMITZ und ROSENBLUETH, 1976) oder auch, allerdings weniger ausführlich für Widerstandsgrößen wie Beton (RACKWITZ, 1983), den Baugrund (VANMARCKE, 1977), Baustahl (GALAMBOS, 1978) oder Holz (GLOS, 1981). Dabei ist in den verschiedenen Bereichen ein noch nicht durchweg vergleichbarer Wissensstand erreicht.

Damit ist der heutige Entwicklungsstand der Theorie und einiger Anwendungen grob umrissen. Die „klassische“ Zuverlässigkeitstheorie erfuhr eine interessante Erweiterung und Verallgemeinerung. Das bedeutet nicht, daß gewisse Fragen nicht noch intensiven Grundlagenstudiums bedürfen und für die Anwendung neue geeignete und zum Teil umfangreiche Datensätze nicht noch beschafft werden müßten. Viele praktische Probleme lassen sich jedoch schon bequem lösen.

Leider breitet sich die Anwendung insgesamt nur zögernd in der praktischen Ingenieurarbeit aus. Der Grund hierfür wurde bereits angedeutet. Die Grundlagen der probabilistischen Betrachtungsweise gehören derzeit noch nicht dem Lehrangebot der Hochschulen an. Dem verantwortungsbewußten, praktisch tätigen Ingenieur fehlen für ihren Einsatz wesentliche Voraussetzungen, auch wenn er den Reichtum der neuen Betrachtungsweise erkennt. Hier müssen die Hochschulen aktiv werden.

Hinsichtlich der theoretischen Grundlagen ist zu unterscheiden zwischen rein mathematisch-statistischen und mehr ingenieurwissenschaftlichen offenen Fragen. Erstere werden zunehmend Gegenstand der mathematischen Statistik und müssen dort geklärt werden. Die von den Ingenieurwissenschaften zunächst getragene Phase der Formulierung unseres Untersuchungsgegenstandes scheint weitgehend abgeschlossen. Ihnen obliegt nunmehr im wesentlichen die Anwendung, wobei es nur mit Einschränkungen möglich ist, allgemeine Problemstellungen zu identifizieren. Trotzdem seien einige Sonderfragen benannt, die bislang noch keine befriedigende Lösung haben.

So sind die Techniken, die Zuverlässigkeit von Systemen, bei denen die Ausfallwahrscheinlichkeit der Komponenten vom jeweiligen Zustand, d. h. von Art und Zahl der bereits ausgefallenen Komponenten abhängt, noch nicht wesentlich über Formulationsansätze hinaus entwickelt wor-

den. Dabei wirkt erschwerend, daß die schärfere, probabilistische Betrachtungsweise gleichzeitig einer realistischen, physikalischen Modellierung des Tragwerks bedarf. Generell ist die komplexe logische Struktur realer, technischer Systeme und die Hochdimensionalität des Raumes der unsicheren Größen auch mit dem Vorliegen der beschriebenen Methoden in Anwendungen nicht unproblematisch und bedarf noch der systematischen Suche nach Vereinfachungen. Immer wieder wird Kritik geübt an der fast allen Zuverlässigkeitsmethoden zugrunde liegenden Idealisierung der Komponentenzustände, daß diese nämlich entweder voll funktionstüchtig oder ausgefallen sind. Ein halboffenes Ventil kann in einem Leitungssystem eben ganz anders wirken als seine extremen Zustände. Und wie geht man an Objekte heran, für die die physikalischen Eingangs-Ausgangs-Beziehungen unklar, unbekannt oder nur grob genähert werden können? Paradebeispiele hierfür sind Staudämme, für die ohne Zweifel sehr starkes Interesse an Zuverlässigkeitsaussagen besteht. Eines der Hauptprobleme ist hier das Konzept, mit welchem Erfahrung, Beobachtungen und qualitativ gegebene Modellvorstellungen quantifiziert und damit im Hinblick auf Zuverlässigkeitsaussagen bewertet werden können.

In jüngster Zeit ist die Frage der Dauerhaftigkeit von Bauwerken in den Vordergrund getreten, eine Frage, mit der andere Technikbereiche schon seit Jahrzehnten zu tun haben und Lösungen anbieten. Inspektion und Unterhaltung gehören dort zu den natürlichen Maßnahmen, Zuverlässigkeit auf wirtschaftliche Weise zu erzielen. Für den Konstruktiven Ingenieurbau fehlen solche Ansätze fast gänzlich. Überhaupt waren Zuverlässigkeitsbetrachtungen für Bauwerke vornehmlich auf die Beherrschung jener Unsicherheiten gerichtet, die von der äußeren Umwelt gestellt werden oder die den unvermeidlichen und akzeptierten Abweichungen von Sollwerten bei der Produktion bzw. Bauausführung entsprechen. Die Statistik des Versagens von Bauwerken weist jedoch aus, daß die Ursachen für das Versagen in einem Großteil der Fälle am Menschen selbst liegen. Sie reichen von Unkenntnis, mangelhafter Koordinierung, Fehlern und Unterlassungen bis zu Fahrlässigkeit bei Planung, Ausführung, Betrieb oder Nutzung. Inwieweit hier theoretische Vorstellungen helfen können, diesem Aspekt beizukommen, bzw. ob eine solche Theorie überhaupt formulierbar ist, muß der weiteren Entwicklung vorbehalten bleiben (vgl. z. B. IVBH, 1983).

Ein systematisiertes Denken in statischen oder besser noch zeitabhängigen „Gefährdungsbildern“, die mit Hilfe von Fehler- und/oder Ereignisbäumen auf ihre logische Struktur hin untersucht werden, ist schon

für sich genommen erhellend. Die Zuverlässigkeitsanalyse im jeweils angemessenen Grad an methodischer Verfeinerung zeigt dann auf, wann und welche sicherheitsrelevante Maßnahme mit größtmöglicher Wirksamkeit einzusetzen ist. Solche Untersuchungen fördern nicht selten überraschende Einsichten zutage. Es zeigte sich zum Beispiel mehrfach bei ganz verschiedenen Anwendungen, daß Unsicherheiten kaum noch in den klassischen Richtungen, etwa durch Verfeinerung der baumechanischen Berechnungsmethoden oder verstärkte, routinemäßige Qualitätskontrolle, abgebaut werden. Vielmehr sind Voruntersuchungen, unabhängige Kontrolle des Entwurfs und Inspektion während des Betriebs häufig die bei weitem wirksamsten und gleichzeitig wirtschaftlichsten Maßnahmen. Daraus folgt, daß die Quantifizierung der Wirksamkeit von sicherheitsrelevanten Maßnahmen zu den zentralen Aufgaben von zuverlässigkeitstheoretischen Betrachtungen gehört. Leider wird dieser Aspekt häufig zugunsten der Möglichkeit, Rechenwerte der Versagenswahrscheinlichkeit zu benutzen, vernachlässigt. In der Tat ist dabei größte Vorsicht geboten, da solche Werte nur im Zusammenhang mit dem gesamten Komplex von Annahmen, Modellen und Rechenverfahren sinnvoll interpretiert werden können. Sie sind für den „Insider“ sehr nützliche Größen. Sie wären aber höchst angreifbar als übergeordnete Vergleichsmaßstäbe für die Zuverlässigkeit verschiedener technischer Systeme. Sie versagen als Kommunikationsgegenstand in der Öffentlichkeit, weil dieser in der Regel das Mitliefern des oben genannten, jeweils etwas anderen Bedingungskomplexes für eine adäquate Interpretation solcher Werte weder zumutbar ist noch ausreichend verständlich gemacht werden kann.

Mit den gleichen Argumenten, also der Möglichkeit, effizient Gefährdungen abzuwenden, mag man im Angesicht immer größer werdender Komplexität und des immer höher werdenden Schadenspotentials vieler baulicher Anlagen auch die Notwendigkeit probabilistischer Zuverlässigkeitsbetrachtungen begründen. Dabei zeigt sich, daß sich Zuverlässigkeitsaufgaben in verschiedenen Bereichen von der mathematischen Substanz her sehr ähnlich sind. Das Problem kombinierter Lasten auf Tragwerken ist z. B. formal sehr ähnlich den Fragen bei der Gefährdung von Lebewesen durch Einwirkung und gegebenenfalls Akkumulation toxischer Stoffe, der Schadstoffbelastung von Flüssen infolge verschiedener, zufällig eintretender Einleitungen oder der Leistung von Ausfallstraßen bei erhöhtem Verkehrsaufkommen. Das ist nur eines von vielen Beispielen, die zeigen, daß verschiedene Fachgebiete voneinander profitieren können.

Im Konstruktiven Ingenieurbau sind erste Schritte zur Anwendung der neuen Konzepte getan. Davon zeugen nicht nur die „Grundlagen für die Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen“. Für die Gefährdungen durch Brand wurden die „Empfehlungen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen im konstruktiven Brandschutz“ erstellt. Demnächst wird ein weiteres Grundlagendokument, die „Grundlagen zur Festlegung von Prüfplänen für die Überwachung von Baustoffen und Bauteilen“, der Fachöffentlichkeit vorgelegt werden. Vieles von dem, was diese Dokumente noch offenlassen mußten, ist zum Teil noch Gegenstand der Forschung, wird derzeit an typischen Anwendungen erprobt oder muß auch in zukünftigen Ausgaben beiseite gelassen werden, weil eine zufriedenstellende Formalisierung entweder noch nicht gelungen ist oder derzeit aus grundsätzlichen Erwägungen nicht möglich erscheint. Trotzdem, die sicherheitsrelevanten Normen der neunziger Jahre werden mehr oder weniger ausdrücklich von einer zuverlässigkeitstheoretischen Grundlage ausgehen. Hierdurch wird es nicht nur möglich, im konkreten Anwendungsfall gegebene Informationen direkt zu nutzen. Auch das Sicherheitsniveau innerhalb gewählter Sicherheitsklassen wird gleichmäßiger. Das Abwägen, welche der sicherheitsrelevanten Maßnahmen auch greifen und wirtschaftlich sind, wird erleichtert. Das mag neben der erreichten größeren Transparenz ingenieurmäßiger Überlegungen bereits als ausreichende Begründung für theoretisch fundierte Zuverlässigkeitsbetrachtungen gelten. Darüber hinaus und längerfristig sicher am wichtigsten ist die Tatsache, daß die schnelle technische Entwicklung ein Sammeln und Auswerten nach rein deterministischen Denkansätzen kaum mehr rechtfertigt. Diese schöpfen den Informationsgehalt von Beobachtungen nur unvollkommen aus und liefern keine Quantifizierung der auf ihnen gegründeten Voraussagen.

Literatur

- BOLOTIN, V. V. (1981): Wahrscheinlichkeitsmethoden zur Berechnung von Konstruktionen. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.
- BREITUNG, K. (1984): Asymptotic approximations for multinormal integrals. *J. Eng. Mech.* 110 (3).
- CORNELL, C. A. (1969): A probability based structural code. *ACI Journal*, Am. Concr. Inst. 66, 974-985.
- CORNELL, C. A. (1981): Structural Safety: Some Historical Evidence that it is a Healthy Adolescent. *Proc. ICOSSAR '81*, Trondheim, Norway, 19-31.
- DITLEVSEN, O. (1981): *Uncertainty Modeling*. McGraw-Hill, New York.

- FORSELL, C. (1924): *Economy and Construction*. Sunt Fornoft, pp. 74-77 (in schwedisch).
- FREUDENTHAL, A. M.; J. M. GARRELTS; M. SHINOZUKO (1966): The analysis of structural safety. *J. Struct. Div.* 92 (ST1), 267-325.
- GALAMBOS, T. V.; M. K. RAVINDRA (1978): Properties of steel for use in LRFD. *J. Struct. Div. (ASCE)* 104 (ST9).
- GEIDNER, T. (1978): Zur Anwendung der Spektralmethode auf Lasten und Beanspruchungen bei Straßen- und Eisenbahnbrücken. *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke*, Heft 37, TU München.
- GLOS, P. (1981): Zur Modellierung des Festigkeitsverhaltens von Bauholz bei Druck-, Zug- und Biegebeanspruchung. *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke*, Heft 61, TU München.
- HASOFER, A. M.; N. C. LIND (1974): An exact and invariant first order reliability format. *J. Eng. Mech. Div. (ASCE)* 100 (EM1), 111.
- HOHENBICHLER, M. (1984): An Asymptotic Formula for the Probability of Intersections. *Berichte zur Zuverlässigkeitstheorie der Bauwerke*, Heft 69, TU München.
- IVBH Reports (1983): *Qualitätssicherung im Bauprozeß*. IABSE Workshop, Rigi, 8.-10. Juni 1983, Vol. 47, Zürich.
- LOMNITZ, C.; E. ROSENBLUETH (1976): *Seismic Risk and Engineering Design*. Elsevier, New York.
- MADSEN, H. O. (1979): *Load Models and Load Combinations*. DTH, Lyngby.
- MAYER, M. (1926): *Die Sicherheit der Bauwerke*. Springer, Berlin.
- PLATE, E. (1982): *Engineering Meteorology, Studies in Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 1*. Elsevier, New York.
- RACKWITZ, R. (1976): Practical probabilistic approach to design. *CEB Bull. d'Inform.* 112, 13-71.
- RACKWITZ, R. (1983): Predictive distribution of strength under control. *Materials & Structures* 16 (94).
- RACKWITZ, R. (1983): Reliability of Systems under Renewal Pulse Loading. ASCE, EM.
- SCHÜLLER, G. I. (1981): *Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken*. Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin.
- SENTLER, L. (1975): A Stochastic Model for Live Loads on Floors in Buildings. *Div. of Building Technology, Lund Institute of Technology*, Report 60, Lund, Sweden.
- THOFT-CHRISTENSEN, P.; M. J. BAKER (1982): *Structural Reliability Theory and its Applications*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- VANMARCKE, E. H. (1977): Reliability of earth slopes. *J. Geotech. Eng. Div. (ASCE)* 103 (GT11).
- VENEZIANO, D.; M. GRIGORIU; C. A. CORNELL (1977): Vector-process models for system reliability. *J. Eng. Mech. Div. (ASCE)* 103 (EM3), 441-460.