

Aktivitäten im DAfStb-Unterausschuss „Sicherheit im Massivbau“: Erstellung einer neuen probabilistischen Richtlinie zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten im Massivbau

Jan Philip Schulze-Ardey, Josef Hegger

*Lehrstuhl und Institut für Massivbau,
RWTH Aachen University,
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Germany*

jschulze@imb.rwth-aachen.de

Kurzfassung

In diesem Beitrag werden Entwicklungen im Bereich der aktuellen Normung vorgestellt. Angesichts neuartiger Baustoffe und Bauprodukte sind Ingenieurmodelle zunächst in Bemessungsmodelle zu überführen. Hierbei sind Teilsicherheitsbeiwerte erstmalig festzulegen. Statistisch abgesicherte Teilsicherheitsbeiwerte sind bei fehlenden baupraktischen Erfahrungen essenziell. Eine zu konservative Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte lässt neue Baustoffe und Bauprodukte schnell unattraktiv werden (z. B. erhöhter Materialverbrauch, steigende Kosten). Werden Teilsicherheitsbeiwerte hingegen zu progressiv angesetzt, erhöht dies die Wahrscheinlichkeit von Schadensfällen. In beiden Szenarien wird das Ziel, leistungsfähige und innovative Produkte wirtschaftlich einzusetzen und zeitnah in der Baupraxis zu etablieren, verfehlt.

Trotz verfügbarer Literatur ist eine standardmäßige Anwendung von probabilistischen Methoden im Bauwesen zur Ableitung von normativen Sicherheitselementen zurzeit noch die Ausnahme. Um hier entgegenzuwirken, wird aktuell die fünfteilige DAfStb-Richtlinie "Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden" erarbeitet. Neben der statistischen Auswertung (z. B. Ausreißer- und Verteilungstests, Parameterschätzer) beinhaltet die Richtlinie Festlegungen für Zuverlässigkeitsanalysen sowie zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten und zur Bewertung des Sicherheitsniveaus von Bemessungsregeln. In einer Entwurfsfassung liegen bereits die ersten beiden Teile zu Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen (Teil 1) und Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Entkoppelung von Last- und Widerstandsseite (Teil 2) vor. Im neu gegründeten DAfStb-Unterausschuss „Sicherheit im Massivbau“ werden der Richtlinienentwurf sowie die Bearbeitungsfortschritte der weiteren drei Teile hinsichtlich Praxisgerechtigkeit und Sicherheit diskutiert und für die bauaufsichtliche Einführung vorbereitet.

Keywords: DAfStb-Richtlinie, Probabilistische Verfahren, Teilsicherheitsbeiwerte

Abstract

This paper presents developments in the field of current standardization. For new types of building materials and products, engineering models must first be converted into design models. Partial factors must be defined for the first time. Statistically calculated partial factors are important when practical construction experience is missed. If the partial factors are defined too conservatively, new building materials and products quickly become unattractive (e.g. increased material consumption, rising costs). If, on the other hand, partial factors are set too progressively, this increases the probability of damage. In both scenarios, the goal of using high-performance and innovative products economically and establishing them in building practice in a timely manner is missed.

Despite available literature, a standard application of probabilistic methods in civil engineering for the derivation of normative safety elements is currently still the exception. To counteract this, the five-part DAfStb guideline "Procedures for the derivation of safety factors in structural concrete using probabilistic methods" is currently being developed. In addition to statistical evaluation (e.g. outlier and goodness-of-fit tests, parameter estimators), the guideline includes specifications for reliability analyses as

well as for the determination of safety factors and the evaluation of the safety level of design rules. A draft of the first two parts on the fundamentals for time-invariant considerations (Part 1) and procedures for deriving partial safety factors when decoupling the load and resistance sides (Part 2) is already available. In the newly founded DAfStb subcommittee "Safety in Structural Concrete", the draft guideline and the progress of the other three parts are being discussed with regard to practical suitability and safety and prepared for introduction by the building authorities.

Keywords: DAfStb guideline, probabilistic methods, partial factors

1 Einführung

Bauwerke müssen eine Vielzahl von Anforderungen erfüllen. Gleichzeitig steigt die Komplexität von Bauwerken immer weiter und es ergibt sich die zentrale Forderung nach klimagerechterem Bauen. Zur Erfüllung dieser Anforderungen sind maßgeschneiderte technische Regelwerke und Zulassungen unerlässlich. Eine Anpassung und Verbesserung bestehender Regelwerke durch neue Forschungsergebnisse sind in diesem Zusammenhang von entscheidender Bedeutung. Diese Anpassung ist verbindend und in Ergänzung zu anderen Anstrengungen durchzuführen, wobei hier im Betonbau die additive Fertigung [1], bildbasierte Frischbetonprüfung [2] und allgemein die Ausschöpfung von Potentialen der Digitalisierung [3] als Beispiele von einer sehr großen Bandbreite neuer Möglichkeiten hin zum klimagerechteren Bauen zu nennen sind.

Um das Ziel, den Bausektor klimagerecht aufzustellen, zu erreichen, sind daher neben einer Material-, Konstruktions- und Prozessoptimierung im Bauablauf auch praxiserichte und weitentwickelte Ingenieur- sowie Bemessungsmodelle erforderlich. Von ebenso großer Bedeutung ist hierbei die Anwendung von Methoden der Zuverlässigkeitstheorie, durch die eine Optimierung der Sicherheitselemente möglich ist. Trotz verfügbarer Literatur ist eine standardmäßige Anwendung von probabilistischen Methoden im Bauwesen zur Ableitung von normativen Sicherheitselementen zurzeit noch die große Ausnahme. Um hier entgegenzuwirken, wird aktuell die fünfteilige DAfStb-Richtlinie „Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden“ erarbeitet.

2 Vorstellung der neuen DAfStb-Richtlinie

In diesem Abschnitt werden die Inhalte der zurzeit in Beratung befindlichen DAfStb-Richtlinie „Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden“ beschrieben. Diese geplante anwendungsbezogene Richtlinie soll vor allem auch zur Akzeptanz probabilistischer Rechenverfahren im Bauwesen und zur Anerkennung durch Bauaufsichtsbehörden führen.

2.1 Stand der Technik

Bei der Wahl von Sicherheitselementen (z. B. Teilsicherheitsbeiwerten) besteht die Forderung, dass diese nach Möglichkeit sowohl unter wirtschaftlichen als auch zunehmend unter ökologischen Gesichtspunkten ausgewählt werden, dabei jedoch das normativ geforderte Zuverlässigkeitsniveau erfüllen. Dieser Widerspruch ist durch eine Optimierung der Sicherheitselemente unter Berücksichtigung geeigneter Grenzen der einzuhaltenden bzw. von der Gesellschaft geforderten Versagenswahrscheinlichkeit zu lösen. Sicherheitselemente sind Teil von Diskussionen im Entwicklungsprozess von neuen Normen bzw. Richtlinien, wobei bei vielen Sicherheitselementen Optimierungspotential bestehen dürfte. Die Eurocodes sind die relevanten Normen im Bauwesen und beruhen derzeit im Wesentlichen auf deterministischen Methoden (d. h. historische und empirische Methoden) [4] und die Teilsicherheitsbeiwerte in den Eurocodes wurden durch zusätzliche „Kalibration“ festgelegt.

Die Problematik bei der Wahl der Sicherheitselemente zwischen einer zu konservativen Festlegung der Teilsicherheitsbeiwerte und einer zu progressiven Festlegung besteht seit jeher. In beiden Szenarien wird jedoch das Ziel, leistungsfähige und innovative Bauweisen und Bauprodukte wirtschaftlich einzusetzen und zeitnah in der Baupraxis zu etablieren, verfehlt. Eine Lösung stellt die Zuverlässigkeitstheorie dar, die im Bauwesen eine lange Tradition besitzt. So wurde im Bauwesen die Zuverlässigkeit von Tragwerken bereits in den 1940er-Jahren intensiv erforscht. Nach FREUDENTHAL und anderen Forschern lässt sich eine widerspruchsfreie Zuverlässigkeitstheorie nur auf Grundlage statistischer Be-

trachtungen und den Regeln der Wahrscheinlichkeitsrechnung aufstellen [5, 6]. Um die Versagenswahrscheinlichkeit quantitativ beschreiben zu können, ist ein physikalisches Modell notwendig, das den Grenzzustand mathematisch in Abhängigkeit sogenannter Basisvariablen (Festigkeiten, Abmessungen, usw.) beschreibt [7, 8]. Die Basisvariablen sind meist Zufallsgrößen oder seltener stochastische Prozesse, für die statistische Informationen aufzubereiten sind. Eine Zufallsgröße ist in der Mathematik eine Variable, die in Abhängigkeit vom Zufall verschiedene Werte annehmen kann, wobei streuende Größen in der Realität den Regelfall darstellen. Im Gegensatz zu (näherungsweise) zeitinvarianten Problemen der Zufallsgrößen beschreibt ein stochastischer Prozess die mathematische Beschreibung von zeitlich geordneten zufälligen (zeitvarianten) Vorgängen. Im (vereinfachten) zweidimensionalen Fall werden zwei eindimensionale, stochastisch unabhängige Größen (Widerstand R und Einwirkung E) betrachtet, deren beliebige Dichtefunktionen durch Lage- und Streuungsparameter eindeutig charakterisiert werden [9–11]. Bei gegebenen Basisvariablen und Ingenieurmodellen ist es dann möglich die zuvor beschriebenen Sicherheitselemente abzuleiten und das Bemessungsmodell zu komplementieren.

Vor diesem Hintergrund stellt die neue Richtlinie Methoden zur Charakterisierung von zeitinvarianten stochastischen Modellen der Basisvariablen bereit und gibt konkrete Abläufe zur Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten und zur Bewertung des Sicherheitsniveaus von Bemessungsregeln vor.

2.2 Motivation, Aufbau und Ziel der Richtlinie

Die einheitliche und standardmäßige Anwendung von probabilistischen Methoden im Bauwesen zur Ableitung von Sicherheitselementen (z. B. Teilsicherheitsbeiwerte) in der Normung ist nur auf Einzelfälle beschränkt, obwohl die theoretischen Grundlagen vorhanden sind und leistungsfähige Computer und Serverstrukturen heutzutage verfügbar sind. Um diese Möglichkeiten zukünftig zu nutzen und auch auszuschöpfen, wurde die fünfteilige DAfStb-Richtlinie „Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden“ konzipiert. Neben der statistischen Auswertung (z. B. Ausreißer- und Verteilungstests, Parameterschätzer) beinhaltet der aktuelle Entwurf die Festlegungen für Zuverlässigkeitsanalysen sowie einen Leitfaden zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten und zur Bewertung des Sicherheitsniveaus von Bemessungsregeln.

In einer Entwurfsfassung liegen bereits die ersten beiden Teile der Richtlinie zu Grundlagen für zeitvariante Betrachtungen (Teil 1) und zu Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Entkoppelung von Last- und Widerstandsseite (Teil 2) vor. Im unter anderem hierfür neu gegründeten DAfStb-Unterausschuss „Sicherheit im Massivbau“ werden dieser Richtlinienentwurf sowie die Bearbeitungsfortschritte der weiteren drei Teile hinsichtlich Praxistauglichkeit und Sicherheit diskutiert und für die bauaufsichtliche Einführung vorbereitet. Diese zwei Teile (Teil 1 und 2) werden in Abschnitt 2.3 und 2.4 näher beschrieben und vorgestellt. Eine erste Entwurfsfassung der neuen DAfStb-Richtlinie ist in dem vom BMWK (vormals BMWi) geförderten Verbundforschungsvorhaben „TesiproV“ entstanden. Bei der Erarbeitung wurden durch Abstimmung mit Industriepartnern auch praktische Erfahrungen und Anforderungsprofile berücksichtigt. Allgemein gilt der Hinweis, dass diese neue Richtlinie ein Grundverständnis sowie die Beschäftigung mit zuverlässigkeitstheoretischen und statistischen Methoden voraussetzt.

Hauptziel der Richtlinie ist eine Vereinheitlichung bekannter statistischer Verfahren und die Abstimmung mit aktuellen Regelwerken im Bauwesen wie Eurocodes, Model Codes, ISO 2394, GruSiBau usw. [4, 12–15]. Statistische Methoden und Verfahren (z. B. Ausreißer- und Verteilungstests, Parameterschätzer) sowie die in der Praxis bzw. Forschung üblich verwendeten Methoden der Zuverlässigkeitstheorie [16–19] (z. B. First-Order-Reliability-Methods, erweiterte Monte-Carlo-Simulationen) sind größtenteils lange bekannt und in der Literatur dokumentiert. Außerdem sind Softwarelösungen – oftmals auch OpenSource – verfügbar. Adressaten der Richtlinie sind neben den Fachkreisen aus der Forschung insbesondere die Anwender aus der Praxis (z. B. Tragwerksplaner mit vertieften statistischen Kenntnissen, Gutachter bzw. Sachverständige, Genehmigungsbehörden), weswegen die DAfStb-Richtlinie anwendungsnäher als beispielsweise der *JCSS-Probabilistic Model Code* [20] gestaltet wird.

Durch die neue Richtlinie werden geregelte und standardisierte Vorgehensweisen bereitgestellt. Auf diese Weise wird dem praktischen Anwender der Richtlinie bei der Ableitung neuer oder bei der Überprüfung vorhandener Sicherheitsbeiwerte fundiertes Wissen durch normative Regelungen in der Anwendung von Verfahren der Zuverlässigkeitstheorie bereitgestellt. Durch Anwendung der Verfahren in

der Praxis z. B. in Zulassungsverfahren (ZiE, abZ/aBG) können durch Anwendung der höherwertigen Verfahren ökologische und ökonomische Gesichtspunkte gleichermaßen adressiert werden.

2.3 Richtlinie Teil 1 – Grundlagen für zeitinvariante Betrachtungen

Teil 1 der Richtlinie gliedert sich inhaltlich in folgende sechs Abschnitte:

- 1: Anwendungsbereich und Anwendungsgrenzen
- 2: Verweisungen auf Normen und sonstige technische Regelwerke
- 3: Begriffe, Definitionen, Symbole
- 4: Bestimmung der statistischen Parameter der Basisvariablen
- 5: Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit
- 6: Vorgehensweise zur Ermittlung von Sicherheitsbeiwerten

Teil 1 der Richtlinie stellt die Grundlagen für die weiteren Teile 2 - 5 in der Richtlinie bereit. Der Normtext soll – wie in den Eurocodes üblich – Prinzipien und Anwendungsregeln unterscheiden. Weiterhin wird in der Richtlinie anhand von Flowcharts das Vorgehen beschrieben. Hierbei ist beispielhaft das Vorgehen bei der stochastischen Auswertung der zuvor beschriebenen Basisvariablen (Zu-fallsgrößen) bzw. die Parameterschätzung der Basisvariablen und der Ablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion beschrieben (vgl. Bild 1 und Bild 2).

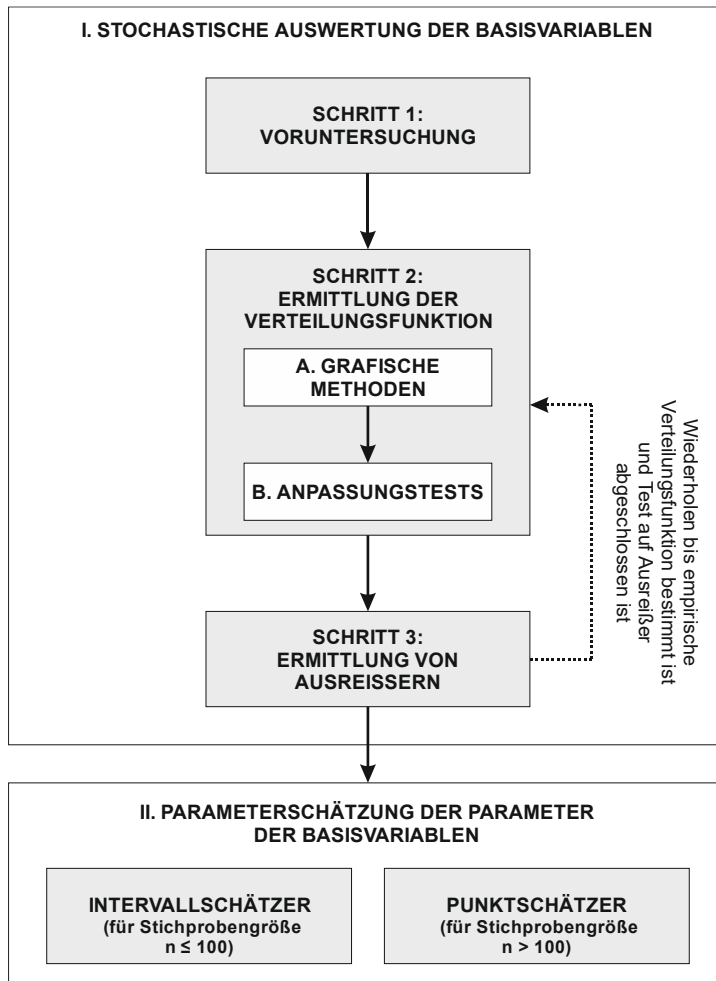


Bild 1 Flowchart „Allgemeiner Ablauf der Auswertung von Basisvariablen“ zur Verdeutlichung des Ablaufs bei der Bestimmung des stochastischen Modells

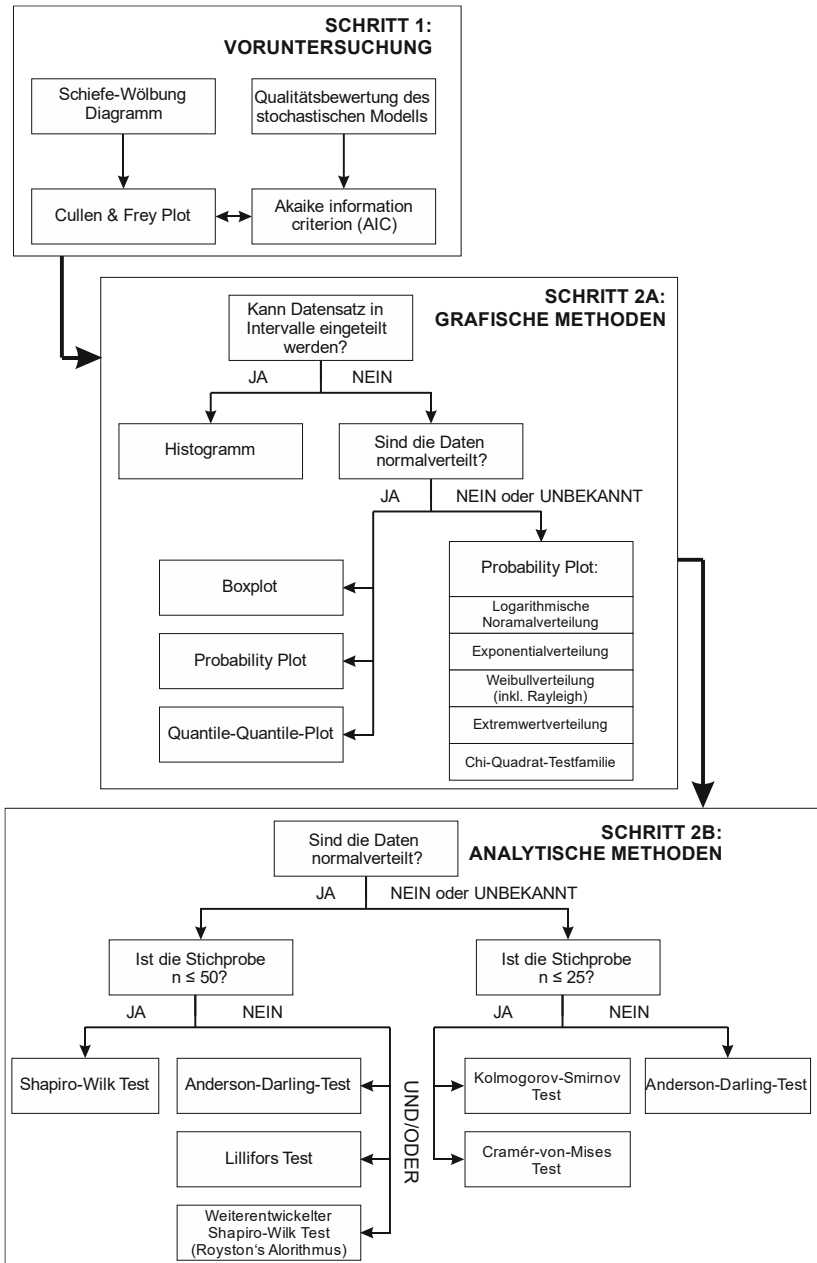


Bild 2 Flowchart mit Ablauf zur Bestimmung der Verteilungsfunktion anhand von Schritt 1, 2A und 2B mit Methoden der Statistik

2.4 Richtlinie Teil 2 – Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Entkoppelung von Last- und Widerstandsseite

Im zweiten Teil der Richtlinie werden Verfahren zur Herleitung von Teilsicherheitsbeiwerten bei Entkoppelung von Last- und Widerstandsseite vorgestellt. Schwerpunktmäßig beschreibt Teil 2 einen siebenstufigen Ablauf (vgl. Bild 3).

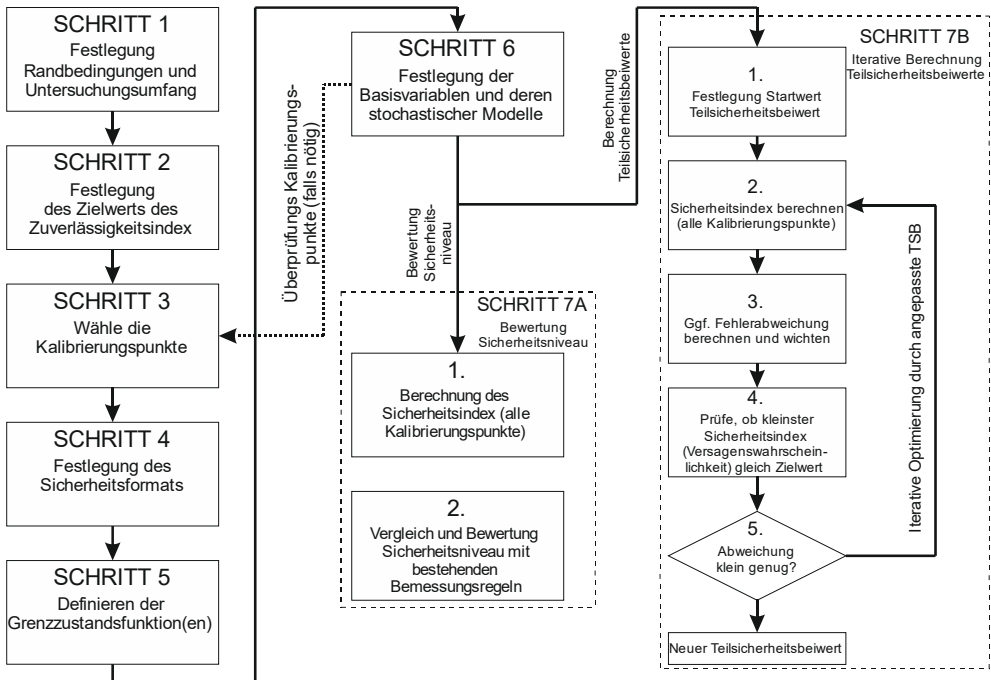


Bild 3 Flowchart mit siebenstufigem Vorgehen zur Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten oder zur Bewertung des Sicherheitsniveaus

Die Anwendung von Teil 1 und 2 erlaubt einerseits die Berechnung von Teilsicherheitsbeiwerten und die Bewertung des Sicherheitsniveaus von aktuellen Normengenerationen oder von neuen Bemessungsregeln.

3 Fazit und Ausblick

Die in diesem Beitrag vorgestellte Richtlinie „Verfahren zur Herleitung von Sicherheitsbeiwerten im Massivbau unter Verwendung probabilistischer Methoden“ ermöglicht einen allgemeingültigen Standard zur Ableitung von Teilsicherheitsbeiwerten auf Basis von Rechenverfahren der Zuverlässigkeit (Stufen II und III). Durch die Richtlinie werden wichtige Punkte angesprochen, die im Bauwesen zu einer breiten Akzeptanz probabilistischer Rechenverfahren durch ein allgemein anerkanntes standardisiertes Verfahren beitragen. Die Richtlinie soll einen Standardprozess zur Überprüfung des Sicherheitsniveaus bzw. zur Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten unter Einhaltung des geforderten Sicherheitsniveaus beschreiben, der auch von Bauaufsichtsbehörden und Normungsgremien anerkannt wird.

Der Gelbdruck der Richtlinie soll in naher Zukunft veröffentlicht werden. Mit der neuen Richtlinie sollen interessierte wissenschaftliche Kreise sowie praktische Ingenieure und Genehmigungsbehörden im Bauwesen angesprochen werden. Weiterhin sind zukünftig auch internationale Entwicklungen und eine Einbringung in internationale Kreise geplant. Eine flächendeckende Übertragung im Bauwesen mit verschiedenen Bauweisen – insbesondere auch neuen Bauweisen – steht hierbei im Vordergrund.

4 Quellen

- [1] *Classen, M.; Ungermann, J.; Sharma, R.*: Additive Manufacturing of Reinforced Concrete—Development of a 3D Printing Technology for Cementitious Composites with Metallic Reinforcement. *In: Applied Sciences* 10 (2020), Heft 11, S. 3791. <https://doi.org/10.3390/app10113791>.
- [2] *Schack, T.; Coenen, M.; Haist, M.*: Bildbasierte Frischbetonprüfung – Teil 1: Konsistenz und Leimgehalt des Frischbetons. *In: Beton- und Stahlbetonbau* 118 (2023), Heft 4, S. 220-228. <https://doi.org/10.1002/best.202300013>.
- [3] *Claßen, M.; Engel, S.; Mechtcherine, V. et al. (eds.)*: Digital Design, Fabrication and Structural Testing of Thin-Walled Concrete Components – Proceedings - for internal use only, 2023.
- [4] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung. Norm, Ausgabe Dezember 2010.
- [5] *Freudenthal, A.M.*: The Safety of Structures. *In: Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 112 (1945), pp. 125-180.
- [6] *Freudenthal, A.M.*: Safety and the Probability of Structural Failure. *In: Transactions of the American Society of Civil Engineers* 121 (1954), S. 1337-1375.
- [7] *Melchers, R.E.; Beck, A.T.*: Structural reliability analysis and prediction. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK, 2018.
- [8] *Spaethe, G.*: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, 1992.
- [9] Statistical methods for quality control of building materials and components. 1997.
- [10] *Plate, E.J.*: Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitslehre für Bauingenieure. Ernst Verl. für Architektur und techn. Wiss, Berlin, 1993.
- [11] *Hedderich, J.; Sachs, L.*: Angewandte Statistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [12] DIN EN 1992-1-1:2011-01: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Norm, Ausgabe Januar 2011.
- [13] Model Code 2010: fib Model Code for Concrete Structures. Richtlinie, 2013.
- [14] ISO 2394:2015 (E): General principles on reliability for structures. März 2015.
- [15] *Deutsches Institut für Normung (Hrsg.)*: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Deutsches Institut für Normung. Beuth, Berlin, 1981.
- [16] *Rackwitz, R.*: Demonstration of Level-II-Methods. *In: Comité Européen du Béton (ed.)*: First Order Reliability Concepts for Design Codes. Joint-Committee CEB/CECM/CIB/FIP/IABSE Structural Safety, CEB Bulletin d'Information, 1976, pp. 90-107.
- [17] *Fießler, B.; Hawranek, R.; Rackwitz, R.*: Numerische Methoden für probabilistische Bemessungsverfahren und Sicherheitsnachweise. Technische Universität München Ausgabe 1976.
- [18] *Rackwitz, R.; Fießler, B.*: Structural Reliability under Combined Random Load Sequences. *In: Computers and Structures*, Vol. 9 (1978), Iss. 5, pp. 489-494.
- [19] *Hasofer, A.M.; Lind, N.C.*: Exact and Invariant Second-Moment Code Format. *In: Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 100 (1974), Iss. 1, pp. 111-121.
- [20] *Joint Committee on Structural Safety*: Probabilistic Model Code 2010 - Part 3: Material Properties and Resistance Models. Joint Committee on Structural Safety 2002.