

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Author's Postprint

Stauder, Florian

Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/104577>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Stauder, Florian (2013): Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hg.): DAFStb-Doktorandensymposium 2013 (1. DAFStb Jahrestagung), 7.-8.11.2013, Ruhr-Univ. Bochum. Berlin: DAFStb. S. 139-145.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Erstveröffentlichung in: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DafStb Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07. - 08 November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum. Bochum: DafStb 2013, S.139-145.

Für eine korrekte Zitierbarkeit ist die Seitennummerierung der Originalveröffentlichung für jede Seite kenntlich gemacht.

S. 139

Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton

Florian Stauder

Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe, Deutschland in Forschungskooperation mit der TU Kaiserslautern

Zusammenfassung

Auf Basis des für Neubauten konzipierten, semiprobabilistischen Sicherheits- und Nachweiskonzeptes der aktuellen Normengeneration führt die Nachrechnung bestehender Bauwerke aus Stahlbeton oftmals zu Tragfähigkeitsdefiziten, obwohl die Tragwerke selbst keine Auffälligkeiten zeigen. Durch die im Manuskript beschriebenen Aspekte zur Anpassung des Zuverlässigkeitsindex β wird gezeigt, wie ein grundsätzlicher Beitrag zur Heilung dieses Mankos auf Grundlage der im Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] enthaltenen Zuverlässigkeitstheorie erfolgen kann. Neben der Anpassung von Basisvariablen und Teilsicherheitsbeiwerten an die tatsächlich vorhandenen Gegebenheiten eines Bestandstragwerkes begünstigt insbesondere dieser Aspekt eine wirtschaftliche Bewertung bestehender Tragwerke.

1 Einführung

Die Bewertung bestehender Tragwerke gewinnt aufgrund der Altersstruktur der vorhandenen Bausubstanz zukünftig stark an Bedeutung. Unabhängig, ob es sich um Infrastruktur-, Ingenieurbauwerke oder um Tragwerke des üblichen Hochbaus handelt, steht hierbei generell die Frage der Tragwerkszuverlässigkeit im Mittelpunkt der ingenieurmäßigen Betrachtung. Im Zuge ihrer Nutzung, Erhaltung und gegebenenfalls auch Ertüchtigung müssen Bestandstragwerke hinsichtlich ihrer Standsicherheit bewertet werden, was nicht allein auf Basis des aktuellen Regelwerkes (Eurocodes) erfolgen kann.

Ursächlich hierfür ist, dass sich die Bewertung bestehender Tragwerke grundsätzlich von der Bemessung neu zu erstellender Tragwerke unterscheidet. Das für Stahlbetonbauteile im aktuellen Regelwerk enthaltene Sicherheits- und Nachweiskonzept [1, 2] wurde zur Erstellung von Neubauten konzipiert und berücksichtigt, dass alle Bemessungsparameter im Neubaufall als unbekannte und mit Unsicherheiten behaftete Größen anzunehmen sind.

Beim Bauen im Bestand kann dagegen eine Vielzahl dieser Basisvariablen innerhalb einer qualifizierten Bestandsaufnahme am Tragwerk ermittelt werden, was zusätzlich die Anpassung von Teil-

sicherheitsbeiwerten an die am Tragwerk vorherrschenden Streuungen von Einwirkungen und Widerständen ermöglicht. Aufgrund des Erkenntnisgewinns besteht weiterhin die Möglichkeit, im Sicherheitskonzept [1] implementierte Unsicherheitsfaktoren zu reduzieren.

Letztendlich ermöglicht diese Vorgehensweise die Verwendung zugeschräfter Basisvariablen und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte, wodurch bestehende Tragwerke aus Stahlbeton auf Basis des aktuellen Regelwerkes [1, 2] und unter Aufrechterhaltung des bauaufsichtlich geforderten Zuverlässigkeitsniveaus nachgewiesen werden können [3, 4]. Voraussetzung hierfür ist lediglich die Präzisierung der Basisvariablen infolge einer qualifizierten Bestandsaufnahme am Tragwerk.

Bei Einhaltung gewisser Randbedingungen ist zum Nachweis bestehender Tragwerke auch die Absenkung des Zielzuverlässigkeitsindex möglich, insbesondere wenn Konzepte mit einer begrenzten Restnutzungsdauer verfolgt werden. Die über die Gesamtnutzungsdauer eines Tragwerks bauaufsichtlich sicherzustellende Versagenswahrscheinlichkeit wird hierbei nicht überschritten.

Da das Sicherheitskonzept der Eurocodes [1] menschliche Fehler und zeitabhängige Alterungsprozesse nur implizit berücksichtigt, steigt aus theoretischer Sicht die Zuverlässigkeit bestehender Bauwerke mit zunehmendem Tragwerksalter [5]. Dies steht zunächst im Widerspruch zu den praktischen Erfahrungen im Umgang mit bestehender Bausubstanz, nicht aber mit den Inhalten des in Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] verankerten Sicherheitskonzeptes.

Grundsätzlich kann bei Tragwerken mit einer mehrjährigen versagensfreien Standzeit von einer geringeren Fehleranfälligkeit und somit reduzierten Versagenswahrscheinlichkeit ausgegangen werden, wodurch die Absenkung des Zielzuverlässigkeitsindex zum Nachweis solcher Tragwerke gerechtfertigt scheint. Durch den im Vergleich zum Neubaufall vorhandenen Erkenntnisgewinn wird die rechnerische Überschreitung der bauaufsichtlich geforderten Versagenswahrscheinlichkeit von $10^{-6}/a$ [1] kompensiert, sodass die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerkes auch bei diesem Vorgehen unverändert bleibt.

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. S.140
In: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb Jahrestagung mit
54. Forschungskolloquium, 07. - 08. November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum.
Bochum: DafStb 2013, 139-145.

Nachfolgende Betrachtungen wurden in der Regel zunächst für Bauwerke des allgemeinen Hoch- und Ingenieurbaus angestellt. Es wird versucht, diese Erkenntnisse auf spezifische Bauarten, wie z.B. Wasserbauwerke, zu übertragen bzw. durch spezifische Betrachtungen zu ergänzen.

2 Semiprobabilistisches Sicherheitskonzept der Eurocodes

Im Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] ist das zur Bemessung von Stahlbetonbauteilen maßgebende semiprobabilistische Sicherheitskonzept beschrieben. Einwirkungen E und Widerstände R werden darin vereinfacht ausgedrückt durch stochastisch voneinander unabhängige Normalverteilungen abgebildet, die mathematisch nicht begrenzt sind. Dies bedeutet, dass stets Bereiche existieren, bei denen die Einwirkungen die Widerstände übersteigen. Aus theoretischer Sicht hat dies den Verlust der Tragfähigkeit zur Folge, weshalb eine absolute Bauteilsicherheit im eigentlichen Wortsinn ausgeschlossen ist, vgl. Abb. 1.

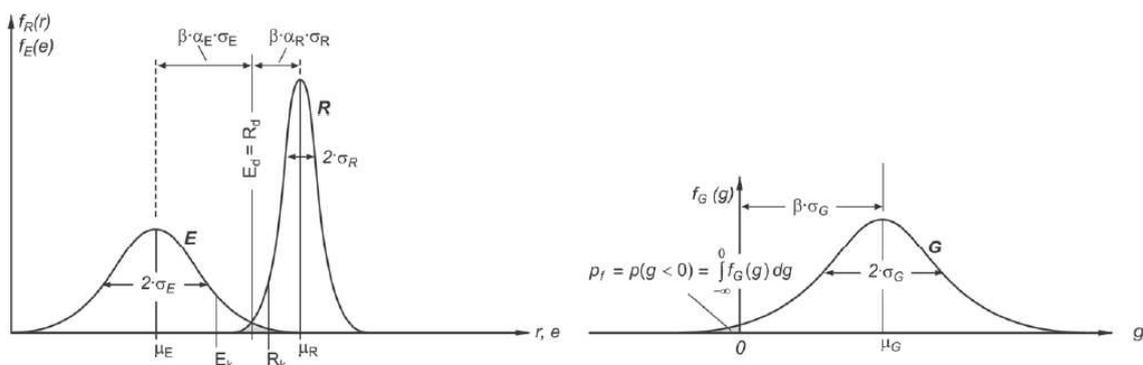


Abb. 1 Zustandsfunktion $G = R - E$; Definition von Versagenswahrscheinlichkeit p_f und Sicherheitsindex β [6]

Um das Versagensrisiko auf ein ausreichend geringes sowie definiertes Maß zu beschränken, erfolgt die Festlegung des Abstandes zwischen beiden Verteilungsfunktionen mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie. Als Maß für die Versagenswahrscheinlichkeit dient dabei der Zuverlässigkeitsindex β .

Hierbei handelt es sich allerdings nur um einen operativen Wert, der nicht die wirkliche Versagensrate ausdrückt, sondern nur zur Kalibrierung von Normen und für Vergleiche des Zuverlässigkeitsniveaus unterschiedlicher Bauweisen verwendet wird [1]. Die wirklichen Versagensraten stehen im Wesentlichen im Zusammenhang mit menschlichem Versagen, das bei der Bestimmung der Teilsicherheitsbeiwerte unberücksichtigt bleibt [1].

Im Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] werden zur Differenzierung der Zuverlässigkeit Schadensfolge- und Zuverlässigkeitsklassen unterschieden. In Deutschland sind die zur Bemessung von Stahlbetonbauteilen maßgebenden Teilsicherheitsbeiwerte der Widerstandsseite in DIN EN 1992-1-1 [2] für die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 und einen Bezugszeitraum von 50 Jahren ausgelegt [7]. Der dazugehörige Zuverlässigkeitsindex beträgt $\beta = 3,8$. Neben diesen Festlegungen wurden die bestehenden Teilsicherheitsbeiwerte jedoch in erster Linie an den Erfahrungen früherer Normen kalibriert [1].

Autorenfassung

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton, 2013

Neben deterministischen Methoden (Stufe I) stehen zur Modifikation von Teilsicherheitsbeiwerten grundsätzlich auch probabilistische Näherungsmethoden (Stufe II) und vollständig probabilistische Methoden (Stufe III) zur Verfügung, die sich hinsichtlich des erforderlichen Berechnungsaufwandes unterscheiden.

Aufgrund ihrer Komplexität finden vollständig probabilistische Methoden der Stufe III im Bauwesen nur selten Verwendung, obwohl sie aus mathematischer Sicht sehr genaue Angaben über das Zuverlässigkeitsproblem liefern. Für Anwendungen im Bauwesen sind in der Regel Stufe II-Verfahren ausreichend, die auf einigen Vereinfachungen basieren.

Im Rahmen des Stufe II-Verfahrens „First Order Reliability Method“ (FORM) sind die Bemessungswerte z. B. so zu bestimmen, dass sie den Werten der Basisvariablen im Bemessungspunkt nach der Zuverlässigkeitsmethode 1. Ordnung entsprechen. Der Bemessungspunkt ist der Punkt auf der Grenzzustandsfunktion $g = 0$ mit dem kürzesten Abstand zum Mittelpunkt im Raum der normierten Variablen, vgl. Abb. 2.

Bei beiden Methoden wird als Maß für die Zuverlässigkeit die Überlebenswahrscheinlichkeit $P_s = (1 - P_f)$ verwendet, wobei P_f die Versagenswahrscheinlichkeit für die betrachtete Versagensart innerhalb eines festgelegten Bezugszeitraumes ist. Übersteigt die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit die vorgegebene Zielgröße P_0 , wird ein Tragwerk als unsicher bezeichnet.

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. S.141
In: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb Jahrestagung mit
54. Forschungskolloquium, 07. - 08. November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum.
Bochum: DafStb 2013, 139-145.

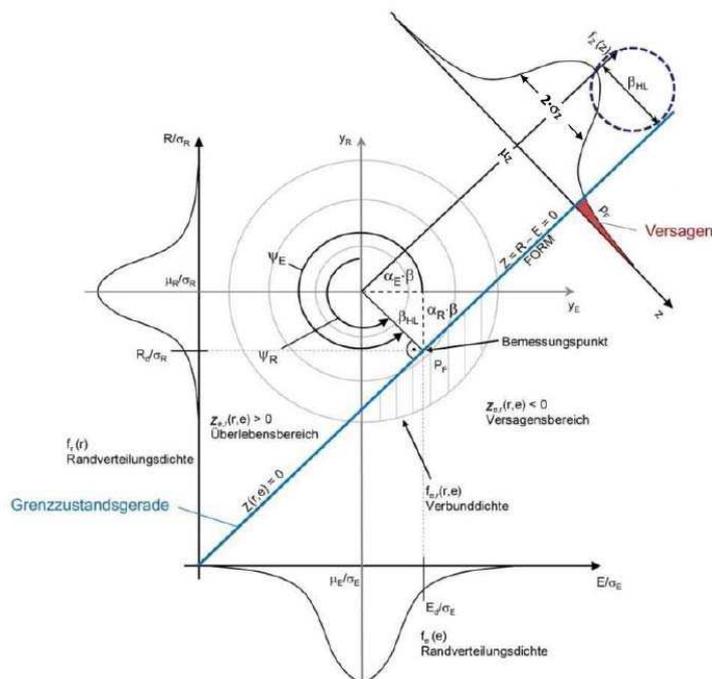


Abb. 2 Bemessungspunkt, Zuverlässigkeitsindex β_{HL} und gemeinsame Wahrscheinlichkeitsdichte von E und R im standard-normalen Raum [8]

3 Absenkung des Zielzuverlässigkeitsniveaus zum Nachweis von Bestandstragwerken

In den informativen Anhängen B und C des Eurocode 0: DIN EN 1990 [1], die in Deutschland nicht bauaufsichtlich eingeführt sind, wird die „Behandlung der Zuverlässigkeit im Bauwesen“ und „Grundlagen für die Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten und die Zuverlässigkeitsanalyse“ geregelt. Den in DIN EN 1992-1-1 [2] enthaltenen Teilsicherheitsbeiwerten für die Werkstoffe Beton und Betonstahl liegt, wie bereits erwähnt, die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 zugrunde. Hiermit verbunden ist die Versagenswahrscheinlichkeit von $1,3 \cdot 10^{-6}$ pro Jahr, was einem Zielzuverlässigkeitsindex von $\beta_{Eurocode,1} = 4,7$ für ein Jahr und $\beta_{Eurocode,50} = 3,8$ für 50 Jahren entspricht.

Aufgrund der wirtschaftlichen Bedeutung von Wasserbauwerken (z. B. Schleusen) an Verkehrs- wasserstraßen müssen diese eine hohe Zuverlässigkeit und planmäßige Nutzungsdauer von 100 Jahren aufweisen. Für Wasserbauwerke wird von einem maßgebenden Zielzuverlässigkeitsindex von $\beta_{Wasserbau,100} = 3,8$ für 100 Jahre ausgegangen [9]. Die jährliche Versagenswahrscheinlichkeit reduziert sich hierdurch auf $7,2 \cdot 10^{-7}$ ($\beta_{Wasserbau,1} = 4,82$), d. h. die geforderte Zuverlässigkeit von Wasserbauwerken liegt über den Anforderungen des Eurocodes 0: DIN EN 1990 [1] für Hochbauten der Zuverlässigkeitsklasse RC 2, vgl. Abb.3. Weiterhin ermöglicht dieses Vorgehen, dass die normativen Teilsicherheitsbeiwerte in DIN EN 1992-1-1 [2] unverändert zur Bemessung von Neubauten im

Wasserbau verwendet werden können und infolge der verlängerten Bezugszeit lediglich Anpassungen bei der Bestimmung der charakteristischen veränderlichen Einwirkungen erfolgen müssen.

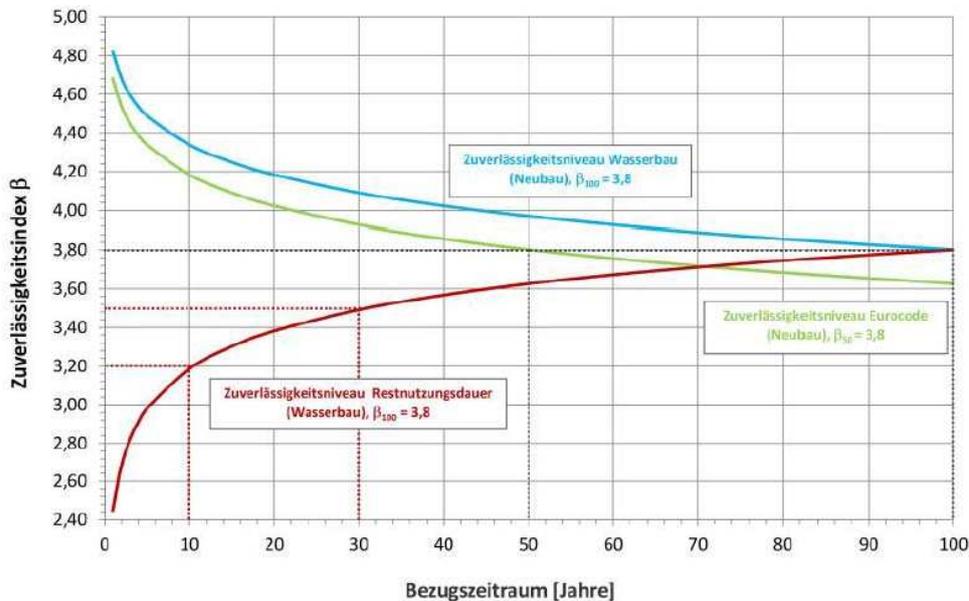


Abb. 3 Sicherheitsniveau von Wasserbauwerken, Neubau und Bestand, im Vergleich zu den Regelungen des Eurocode 0: DIN EN 1990 [1], [10]

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. S.142
 In: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb Jahrestagung mit
 54. Forschungskolloquium, 07. - 08. November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum.
 Bochum: DafStb 2013, 139-145.

Im Vergleich zur Erstellung von Neubauten, könnte beim Nachweis bestehender Tragwerke der einzuhaltende Zielzuverlässigkeitsindex aufgrund nachfolgend aufgeführter Aspekte reduziert werden, ohne dass dies die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerks beeinflusst.

3.1 Einfluss der Restnutzungsdauer

Zuverlässigkeit und Zuverlässigkeitsindex steigen mit kleiner werdendem Bezugszeitraum für die Nutzungsdauer unter Berücksichtigung eines konstanten nominalen Niveaus von Einwirkungen und Tragwiderständen [11]. Das Prinzip der Restnutzungsdauerbetrachtung sieht vor, dass eine versagensfrei absolvierte Standzeit bei der Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerks innerhalb der noch verbleibenden Restnutzungsdauer berücksichtigt werden darf, vgl. Gl. (1). Die bei der Erstellung des Tragwerks maßgebende Gesamtzuverlässigkeit wird hierbei ein-

gehalten [9, 10], da das nicht eingetretene Versagensereignis rückwirkend auf eine erhöhte Tragwerkszuverlässigkeit schließen lässt.

$$\beta_{RN} = -\Phi^{-1}(P_{f,RN}) = -\Phi^{-1}\left(T_N \cdot \left(1 - \sqrt[T_{RN}]{(1 - p_{f,1})^{T_N}}\right)\right) \quad (1)$$

Mit:

β_{RN}	Zielzuverlässigkeitsindex innerhalb der Restnutzungsdauer
$P_{f,RN}$	Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb der Restnutzungsdauer
T_N	Gesamtnutzungsdauer (Wasserbauwerke: $T_N = 100$ Jahre)
T_{RN}	Restnutzungsdauer in Jahren
$p_{f,1}$	jährliche Versagenswahrscheinlichkeit (Wasserbauwerke: $p_{f,1} = 7,2 \cdot 10^{-7}$)
Φ	Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung

Bei Anwendung des Konzeptes ergeben sich auf Basis der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit $p_{f,1}$ und der Gesamtnutzungsdauer T_N eines Tragwerkes die in Abb. 3 dargestellten Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex β_{RN} in Abhängigkeit der Restnutzungsdauer T_{RN} .

Mit nachfolgendem, fiktiven Beispiel kann das Potential des Konzeptes verdeutlicht werden. Geht man von einem Bezugszeitraum von 10 Jahren aus, beträgt der sicherzustellende Zuverlässigkeitsindex im Neubaufall $\beta_{NB,10} = 4,34$, währenddessen bei der Nachrechnung eines Bestandstragwerks für eine Restnutzungsdauer von 10 Jahren lediglich ein Zuverlässigkeitsindex von $\beta_{RN,10} = 3,19$ einzuhalten ist. Der Unterschied hinsichtlich der in beiden Fällen anzusetzenden Zuverlässigkeitsindices wird ausschließlich durch die zusätzliche Information einer mehrjährigen versagensfreien Standzeit ermöglicht und hat keine Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit innerhalb der Gesamtnutzungsdauer.

Unter Ausnutzung der im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie vorhandenen Zusammenhänge stellt das Konzept eine Möglichkeit dar, wie unter Beibehaltung der bauaufsichtlich geforderten Tragwerkszuverlässigkeit eine Absenkung des Zielzuverlässigkeitsindex β begründet werden kann.

Im Bereich des Wasserbaus wird für die Bewertung bestehender Brücken hinsichtlich Schiffsstoß bereits seit 2010 ein vergleichbares Zuverlässigkeitskonzept verwendet, das ebenfalls auf einer Restnutzungsdauerbetrachtung basiert und auch schon bauaufsichtlich eingeführt wurde [12].

3.2 Einfluss von menschlichen Fehlern auf die Versagenswahrscheinlichkeit

Im Sicherheitskonzept der Eurocodes werden menschliche Fehler bei der Erstellung bzw. Nutzung von Tragwerken nicht berücksichtigt, obwohl diese in der Regel maßgebend für das Versagen von Tragstrukturen sind [13]. Stattdessen wird innerhalb des Konzeptes vorgesehen, mit Hilfe von Überwachungsmaßnahmen (z. B. „Vier-Augen-Prinzip“) menschliche Fehler weitgehend auszuschließen.

Trotzdem kann man davon ausgehen, dass bei der Festlegung der zulässigen Versagenswahrscheinlichkeit das Risiko menschlicher Fehler implizit und empirisch berücksichtigt ist [3]. Bestätigt wird dies durch die Tatsache, dass die zulässige Versagenswahrscheinlichkeit durch Vergleiche mit der Zuverlässigkeit bestehender Normen festgelegt und pragmatisch bestimmt wurde [14]. Bei der Berücksichtigung von Bauzuständen innerhalb der vorübergehenden Bemessungssituation, wie es z. B. bei der Errichtung von Wasserbauwerken üblich ist, kann dieser Aspekt aus zuverlässigkeitstheoretischer Sicht weiter differenziert werden, was in diesem Beitrag jedoch vernachlässigt wird.

Können menschliche Fehler im Rahmen der Nachrechnung eines Tragwerks eingegrenzt bzw. ausgeschlossen werden, rechtfertigt dies eine Abminderung des für die Zuverlässigkeitsbewertung eines Tragwerks maßgebenden Faktors in Form des Zuverlässigkeitsindex β .

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. S.143
In: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb Jahrestagung mit
54. Forschungskolloquium, 07. - 08. November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum.
Bochum: DAfStb 2013, 139-145.

Da in der Literatur keinerlei Angaben bezüglich der empirischen Größe, mit der menschliche Fehler im Sicherheitskonzept berücksichtigt sind, vorliegen, erfolgt eine Abschätzung dieser Größe über das zeitliche Auftreten von Schadensfällen und deren Ursache.

Aus einer Analyse von rund 700 Schadensfällen im Bauwesen [15] geht hervor, dass die Sicherheit von Tragwerken nur in sehr seltenen Fällen durch zufälliges Zusammentreffen ungünstiger Umstände beeinträchtigt wird und mangelnde Sicherheit vorwiegend auf Fehler der am Bau Beteiligten, insbesondere in der Planungs- und Herstellungsphase, zurückzuführen ist [13]. Zur Veranschaulichung sind in Tab. 1 die Ergebnisse der Analyse von Matousek / Schneider [15] hinsichtlich des Zeitpunktes der Schadensentdeckung zusammengestellt.

							Bauwerksschäden insgesamt			
		Hochbau	Industriebau	Verkehrsbauwerke	Wasserbau	Restliche				
Bauphase, in welcher der Schaden entdeckt wurde	Vorbereitung, Aushub, Fundamente	23	6	3	15	9	56	0,08	0,58	0,74
	Tragwerk unterhalb Terrain	11	3	12	17	2	45	0,07		
	Tragwerk oberhalb Terrain	141	43	36	11	28	259	0,37		
	Übergabe des Bauwerks	34	4	1	2	1	42	0,06		
	Im 1. Und 2. Jahr der Nutzung	48	16	3	4	6	77	0,11	0,16	
	3. bis 5. Jahre der	14	17	0	0	0	31	0,04		
	Nach 5. Jahre der Nutzung	41	36	7	0	1	85	0,12	0,24	0,24
	Während Nutzung, Zeitpunkt unbekannt	39	26	12	1	4	82	0,12		
	Umbau und Abbruch	11	1	1	1	1	15	0,02	0,02	0,02
Total	362	152	75	51	52	692	1,00	1,00	1,00	

Tab. 1 Verteilung der erfassten Fälle mit Bauwerksschäden nach Bauwerksart und Zeitpunkt der Schadensentdeckung [15], aus [3]

Demnach treten 74 % der Schadensfälle während der Herstellung und bis zum 5. Jahr der Nutzung auf. Berücksichtigt man diese Verteilung bei der Zuverlässigkeitsbewertung bestehender Tragwerke, kann Tragwerken mit einer versagensfreien Standzeit über fünf Jahren eine im Vergleich zu Neubauten erhöhte Zuverlässigkeit attestiert werden. Ursächlich hierfür ist, dass unter der Voraussetzung eines Versagensereignisses das Auftretensrisiko innerhalb der ersten fünf Jahre deutlich über dem Auftretensrisiko in den darauffolgenden Jahren liegt.

Im Umkehrschluss folgt hieraus, dass zur Bewertung bestehender Tragwerke mit einer schadensfreien Standzeit über fünf Jahren ein vergleichsweise geringerer Zuverlässigkeitsindex ausreicht, um mit Hilfe der zusätzlichen Information „schadensfreie Standzeit über fünf Jahre“ ein dem Neubaufall aus wahrscheinlichkeitstheoretischer Sicht gleichwertiges Zielzuverlässigkeitsniveau zu erreichen.

Auf Basis der Ergebnisse der Studie [15] liegt die Wahrscheinlichkeit zur Entdeckung eines Fehlers nach dem 5. Jahr der Nutzung lediglich bei 26 %, was eine Absenkung des Zielzuverlässigkeitsindex um $\Delta\beta = 0,3$ ermöglichen würde [3]. Wenn innerhalb der vorübergehenden Bemessungssituation Bauzustände explizit Berücksichtigung finden, kann sich dieser Effekt reduzieren. Trotzdem dürfte in einer späteren Betriebsphase immer noch ein leichter Zuverlässigkeitsgewinn verbleiben, der eine geringe Absenkung des Zuverlässigkeitsindex rechtfertigen würde.

3.3 Einfluss des Bauwerksalters im zuverlässigkeitstheoretischen Modell

Alterungsprozesse, die zu einer Verschlechterung von Materialeigenschaften führen, werden im Sicherheitskonzept der Eurocodes nur implizit erfasst. Die Sicherstellung der erforderlichen Materialeigenschaften über die geplante Nutzungsdauer erfolgt über Konstruktions- und Ausführungsregeln sowie durch planmäßige Instandhaltungsarbeiten (DIN EN 1990 [1], 2.4). Das Sicherheitskonzept der Eurocodes [1] beinhaltet demnach ein zeitlich konstantes Widerstandsmodell, in dem lediglich die Möglichkeit besteht, den Einfluss von Alterungsprozessen durch den Ansatz verminderter charakteristischer Kennwerte zu berücksichtigen. In diesem Fall werden die charakteristischen Materialkennwerte für das Ende der Nutzungsdauer spezifiziert, indem sie mit einem pauschalen Abschlagsfaktor belegt werden. Die üblichen Werkstoffe des Massivbaus (Beton und Betonstahl) sind hiervon allerdings nicht betroffen, weshalb dieser Aspekt im Folgenden nicht weiter berücksichtigt wird.

Innerhalb der Zuverlässigkeitsbetrachtung beantwortet die Ausfallrate $h_t(t)$ die Frage nach der Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb eines Zeitintervalls $(t, t + \Delta t)$, wenn das Tragwerk bereits das Alter t erreicht hat [5].

Unter Ansatz eines zeitlich konstanten Tragwerkswiderstandes, was die Vernachlässigung von Alterungsprozessen voraussetzt, und überwiegend zeitabhängig veränderlichen Einwirkungen, stellt die Ausfallrate immer eine mit der Zeit monoton fallende Funktion dar, [16] nach [5].

Dies ist nachvollziehbar, da diese Theorie nur ein Ausfall infolge Überschreitens des zeitlich konstanten Widerstandes durch extreme Belastungszustände beinhaltet und die bei bestehenden Tragwerken im Vergleich zu Neubauten grundsätzlich reduzierte Restnutzungsdauer bei veränderlichen Lasten über die herabgesetzte Anzahl der Belastungszustände zu herabgesetzten Extremwerten führt [5].

Für die Bewertung bestehender Tragwerke auf Grundlage der Festlegungen in [1] folgt daraus, dass Tragwerke aus zuverlässigkeitstheoretischer Sicht mit zunehmendem Alter zuverlässiger werden. Dieses Ergebnis überrascht und steht zunächst im Widerspruch zu den Erfahrungen aus der Praxis, wo die Tragwerkszuverlässigkeit aufgrund von Alterungsprozessen mit zunehmendem Alter sinkt.

Die Ursache dieses vermeintlichen Widerspruchs liegt in den mathematischen Annahmen des zuverlässigkeitstheoretischen Berechnungsmodells der Eurocodes [1]. Auswirkungen von Alterungsprozessen können folglich nur berücksichtigt werden, wenn diese nicht von vornherein aus dem Berechnungsmodell ausgeschlossen werden. Sieht man von der zeitabhängigen Anpassung von charakteristischen Materialkennwerten ab, ist dies im zuverlässigkeitstheoretischen Nachweiskonzept der Eurocodes jedoch genau der Fall.

Unter Beibehaltung des Zuverlässigkeitskonzeptes der Eurocodes sollte demnach bei der Verwendung der Werkstoffe Beton und Betonstahl (Massivbau) der Zielzuverlässigkeitsindex ordnungsgemäß instandgehaltener, bestehender Tragwerke im Vergleich zu deren Erstellung reduziert werden können, da die rechnerische Zuverlässigkeit mit dem Tragwerksalter steigt.

4 Möglichkeiten eines reduzierten Zuverlässigkeitsniveaus für Bestandstragwerke

Die im Bestandsfall vorhandenen Bauwerksinformationen dürfen zur Reduktion von Unsicherheitsfaktoren im Rahmen des Bemessungskonzeptes verwendet werden. Zur wirtschaftlichen Nachrechnung bestehender Tragwerke liegt neben der Anpassung der Basisvariablen und Teilsicherheitsbeiwerte an die realen Verhältnisse des Tragwerks auch die Verwendung eines angepassten Zuverlässigkeitsindex nahe.

Die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerkes bleibt hierbei unbeeinflusst, da der Zuverlässigkeitsindex ohnehin nicht im Zusammenhang mit der tatsächlichen Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerks steht [1], vgl. Kap. 2.

Diamantidis / Holicky [17] und das JCSS [18] empfehlen zum Nachweis bestehender Tragwerke der Klasse RC2 einen Zuverlässigkeitsindex von $\beta_{50, \text{Bestand, RC2}} = 3,2$ für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren bzw. $\beta_{1, \text{Bestand, RC2}} = 4,2$ für eine Nutzungsdauer von einem Jahr, was in etwa einer Herabstufung um eine Zuverlässigkeitsklasse von RC2 auf RC1 entspricht. Beide Veröffentlichungen werden bei der Sicherheitsbetrachtung von Tragwerken auf zuverlässigkeitstheoretischer Basis als maßgebend angesehen und vielfach zitiert.

Die Ergebnisse der in diesem Beitrag vorgestellten Konzepte zur Absenkung des Zuverlässigkeitsindex liegen in einer vergleichbaren Größenordnung und wurden auf Basis der in Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] beinhalteten zuverlässigkeitstheoretischen Festlegungen abgeleitet. Mit Hilfe von Abschnitt 3.3 kann weiterhin gezeigt werden, dass die Absenkung des Zuverlässigkeitsindex grundsätzlich rein theoretisch begründet werden kann.

Unter bauaufsichtlichen Gesichtspunkten sind die vorgestellten Aspekte zu differenzieren. Integriert über die Gesamtnutzungszeit bleibt innerhalb des Restnutzungsdauerkonzeptes die in Eurocode 0: DIN EN 1990 [1] festgelegte, jährliche Versagenswahrscheinlichkeit unverändert aufrechterhalten.

Stattdessen haben die in Kap. 3.2 und Kap. 3.3 vorgestellten Aspekte, trotz der Berücksichtigung eines Informationsgewinnes als Kompensationsmaßnahme, eine rechnerisch Erhöhung der jährlichen Versagenswahrscheinlichkeit zur Folge, was aus bauaufsichtlicher Sicht intolerabel ist. Aus diesem Grund werden diese zwei Konzepte lediglich argumentativ aufgeführt, um die Erfordernis eines reduzierten Zielzuverlässigkeitsindex zum Nachweis bestehender Tragwerke zu verdeutlichen.

Die quantitative Begründung der angepassten Zielwerte des Zuverlässigkeitsindex erfolgt jedoch ausschließlich auf Basis des Restnutzungsdauerkonzeptes, das aus den wahrscheinlichkeitstheoretischen Zusammenhängen in Anhang B und C von DIN EN 1990 [1] abgeleitet werden kann.

Stauder: Zuverlässigkeitskonzept für Bestandstragwerke aus Stahlbeton. S.145
In: R. Breitenbücher, P. Mark (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb Jahrestagung mit
54. Forschungskolloquium, 07. - 08. November 2013 an der Ruhr-Universität Bochum.
Bochum: DafStb 2013, 139-145.

5 Zusammenfassung

Zum wirtschaftlichen Nachweis bestehender Tragwerke müssen Eingriffe im semiprobabilistischen Zuverlässigkeitskonzept der aktuellen Normengeneration erfolgen, die gestatten, im Bestand gewonnene Informationen innerhalb der Nachweisgleichungen zu berücksichtigen.

Hierzu gehört in erster Linie die Anpassung von Basisvariablen und Teilsicherheitsbeiwerten an die am Tragwerk im Rahmen einer qualifizierten Bestandsaufnahme ermittelten tatsächlichen Kennwerte einschließlich ihrer statistischen Verteilung. Weiterhin besteht die Möglichkeit zur Absenkung des Zielzuverlässigkeitsindex, was mit einer im Vergleich zur Erstellung von Neubauten verkürzten Restnutzungsdauer sowie einer verminderten Anzahl von Unsicherheitsfaktoren begründet werden kann. Die Festlegung der Zielgröße des Zuverlässigkeitsindex sollte bestenfalls projektspezifisch auf Basis des vorgestellten Restnutzungsdauerkonzeptes erfolgen, wobei der Bauwerkszustand und die mit dem Projekt verbundenen Randbedingungen zusätzlich zu beachten sind.

Literatur

- [1] DIN EN 1990:2010-12: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung EN 1990:2002 + A1:2005 + A1:2005/AC:2010.
- [2] 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; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010.
- [3] DBV-Heft 24: Grünberg, J.; Schnell, J.; Stauder, F.; Fischer, A.: Begründung eines reduzierten Zuverlässigkeitsindex und modifizierter Teilsicherheitsbeiwerte für das Bauen im Bestand. Abschlussbericht zum DBV-Forschungsvorhaben 294. Deutscher Beton- und Bautechnik Verein E.V., Berlin, voraussichtlich 2013.
- [4] DBV-Merkblattsammlung: Bauen im Bestand - Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., 2013.
- [5] Späthe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Springer-Verlag, Wien, 1992.
- [6] Zilch, K.; Zehetmaier, G.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, 2010.
- [7] Fingerloos, F.; Hegger, J.; Zilch, K.: EUROCODE 2 für Deutschland, DIN EN 1992-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang. Kommentierte Fassung. Beuth-Verlag und Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 2012.
- [8] Braml, T.: Zur Beurteilung der Zuverlässigkeit von Massivbrücken auf der Grundlage der Ergebnisse von Überprüfungen am Bauwerk. Dissertation, Universität der Bundeswehr München, 2010.

- [9] Kunz, C.: Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke. Version I, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 13.07.2012 (unveröffentlicht).
- [10] Kunz, C.; Stauder, F.: Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke. Heft 23 (Tagungsband), Deutscher Bautechnik-Tag, 11. und 12. April 2013, Hamburg, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin, 2013.
- [11] Pertermann, I.; Puthli, R.; Ummenhofer, T.; Vrouwenvelder, T.: Risikoorientierte Bemessung von Tragstrukturen – geplante Nutzungsdauer. In: Stahlbau 81 (2012), Heft 7, S. 530 – 538.
- [12] Kunz, C.: Bewertung von bestehenden Brücken hinsichtlich Schiffsanprall. In: Bautechnik 90 (2013), Verlag Ernst & Sohn, Berlin, S. 280 – 285.
- [13] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Teubner Verlag, Stuttgart, 1994.
- [14] GruSiBau: Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. NABau, Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin, 1981.
- [15] Matousek, M.; Schneider, J.: Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitsproblems bei Bauwerken. Bericht Nr. 59, Institut für Baustatik und Konstruktion ETH Zürich, Birkhäuser Verlag Basel und Stuttgart, Zürich, 1976.
- [16] Ang, A.; Amin, M.: Reliability of Structures and Structural Systems. Journal of the Engineering Mechanics Division (1968), S. 671 - 691.
- [17] Diamantidis, D., Holicky, M.: Assessment of existing structures – On the applicability of the JCSS recommendations in Aspects of Structural Reliability. – Faber, Vrouwenvelder, Zilch (Hrsg.), Herbert Utz Verlag, München, 2007.
- [18] Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Assessment of Existing Structures. RILEM Publications, S.A.R.L., 2001.