

## Bemessung von Wasserbauwerken im Binnenbereich nach dem Teilsicherheitskonzept (PIANC WG 140)

Dipl.-Ing. Claus Kunz

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

### Zusammenfassung

Die PIANC Arbeitsgruppe 140 untersuchte das semi-probabilistische Bemessungskonzept für Wasserbauwerke im Binnenbereich in Europa, USA und China und deren Grundlagen. Einige Ergebnisse der Arbeit der PIANC Arbeitsgruppe 140 "Semi Probabilistic Design of Hydraulic Inland Structures" werden vorgestellt. Unterschiede der Konzepte werden dargestellt und analysiert. Nur wenige Länder haben spezielle zusätzliche Regelungen für Wasserbauwerke, obwohl die Basisnormen bevorzugt für Hochbauten entwickelt wurden. Mit einem Fragebogen wurden typische Elemente des semi-probabilistischen Bemessungskonzepts bezüglich der Grenzzustände von Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit abgefragt. Dieses beinhaltete die Bestimmung der charakteristischen Last- oder Widerstandswerte, die typische Einwirkungen für den Wasserbau, Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände, Modell-Faktoren, Kombinationsbeiwerte, Konfigurationen der Grenzzustandsfunktionen, die Existenz und die Anzahl von Versagensfolge-Klassen, Zielsicherheiten und Robustheitskriterien. Abfrage-Ergebnisse wurden bestmöglichst verglichen und bewertet.

### 1. Einführung

Die PIANC Arbeitsgruppe 140 hat ihre Arbeit Mitte des Jahres 2010 aufgenommen, um das Thema der semi-probabilistischen Bemessungskonzepte für Wasserbauwerke zu bearbeiten.

Ingenieure nutzen die semi-probabilistische Methode für ihre Entwürfe von Wasserbauwerken, um die Zuverlässigkeit in ihrer Bemessung besser zu verstehen und zu verbessern. Aktuell existieren semi-probabilistische Bemessungs-Normen wie die amerikanische Last- und Widerstands-Faktor-Bemessung (LRFD) und verschiedene Bemessungs-Eurocodes, die frühere deterministische Ansätze ersetzen.

Die Vorteile dieser Umstellung sind effizientere Bemessungen, die der Zuverlässigkeit beim Entwurf von Wasserbauwerken besser Rechnung tragen. Diese Entwürfe sollten einheitliche Zuverlässigkeit haben mit einer besseren Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit, da die bekannten Unsicherheiten bei Bemessung und Konstruktion besser definiert sind.

Frühere deterministische Ansätze wurden durch semi-probabilistische Ansätze ersetzt (wie z.B. durch Eurocodes, LRFD, ...), wobei Teilsicherheitsfaktoren mit Lasten (Erhöhungsfaktoren) und mit Widerständen (Reduktionsfaktoren) multipliziert werden. Der Hintergrund des semi-probabilistischen Ansatzes ist, dass sich jede Realisierung einer Last oder auch einer Festigkeit stochastisch verhält. Diese Teilsicherheitsfaktoren werden zunächst nach Erfahrungswissen (Nachkalibrierung) und mehr und mehr nach den Ergebnis-

sen von Wahrscheinlichkeitsmodellen festgelegt, um die Unsicherheiten bei Lasten und Widerständen darzustellen, wobei die unterschiedlich zu betrachtenden Grenzzustände (Leistungsanforderung des Tragwerks), die Art der Einwirkung und untersuchte Versagensarten unterschieden werden.

Mitglieder der PIANC Arbeitsgruppe 140 sind die USA, die Niederlande, Belgien, Frankreich und Deutschland sowie korrespondierende Mitglieder aus Großbritannien und China. Die Untersuchung wurde mit einem Fragebogen begonnen, Literatur-Recherchen und Diskussionen schlossen sich an. Einige Ergebnisse werden in diesem Papier beschrieben. Der Bericht der PIANC WG 140 befindet sich in seiner endgültigen Entwurfsfassung, PIANC WG140 (2014), leichte Modifikationen der beschriebenen Ergebnisse sind noch möglich.

### 2. Semi-probabilistische Bemessungsmethode

#### 2.1 Geschichte und Grundlagen

Während in früheren Bemessungskonzepten ein einzelner (globaler) Sicherheitsfaktor verwendet wurde, in den meisten Fällen wurde die Festigkeit der Widerstandsseite bzw. des Materials als Teil des Widerstands reduziert (oft als Verfahren der zulässigen Spannung bezeichnet), betrachtet das semi-probabilistische Bemessungsverfahren die Unsicherheiten einerseits auf der Einwirkungsseite und andererseits auf der Widerstandsseite. Hierfür wurde eine Menge von Wahrscheinlichkeitsmodellen entwickelt, abgeleitet und angewendet. Dabei wurden zwei unterschiedliche Sicherheitsfaktor-Kategorien (für Einwirkung und Widerstand) mit verschiedenen Faktoren hergeleitet, welche wiederum in verschiedene Sicherheitsfaktor-Komponenten aufgeteilt werden können. Beispielsweise wird gemäß Eurocode die Unsicherheit der Einwirkung in die Unsicherheit der Einwirkung selbst und in die Unsicherheit des Modells der Einwirkung und in ihre Beanspruchung unterschieden.

Alle Einwirkungen, die während der Nutzungsdauer eines Tragwerks auftreten können, werden nach Einwirkungen unterschieden, die jeweils gleichzeitig auftreten können und demzufolge in Bemessungs-Situationen (der früher nicht ganz kongruente Begriff war „Lastfall“) behandelt werden. Innerhalb der Bemessungssituationen werden relevante Grenzzustandsfunktionen, z. B. für Biegung mit Längskraft, z. B. für Querkraft, z. B. für Ermüdung, formuliert. Mehrere Bemessungs-Situationen sind möglich. In diesen Bemessungssituationen werden die charakteristischen Einwirkungen durch Teilsicherheits- und manchmal auch durch Kombinationsfaktoren gewichtet.

Die Grenzzustandsfunktion muss dahingehend gelöst werden, indem die Beanspruchung in jeder Bemessungssituation kleiner als das Widerstandsvermögen sein muss. Im semi-probabilistischen Bemessungskonzept werden stochastische Einflüsse in einer vereinfachten Art und Weise behandelt. Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen werden nicht direkt geführt, sie sind vielmehr durch die Bestimmung der charakteristischen Werte für Einwirkungen und Widerstände, durch die Bemessungs-Situationen und durch definierte Teilsicherheitsfaktoren repräsentiert. Die Methode der Teilsicherheitsbeiwerte (semi-probabilistisches Bemessungsmethode)

sungsverfahren) ist ein erster Schritt aus dem ehemaligen deterministischen Verfahren (historische oder empirische Bemessung) hin zu einem probabilistischen Verfahren, wobei die ehemaligen deterministischen (globalen) Sicherheitsfaktoren für Einwirkung und Widerstand in Einwirkungs- und Widerstandsfaktoren aufgetrennt und kalibriert wurden, vereinzelt auch durch probabilistische Methoden. Dieser Vorgang wird innerhalb von drei unterschiedlichen Stufen als Stufe I bezeichnet (Abb. 1).

Dadurch werden Unsicherheiten sowohl auf der Einwirkungsseite als auch auf der Widerstandsseite getrennt, um ein bauartübergreifendes Sicherheitskonzept, also für alle Arten von Tragwerken, als Ziel zu ermöglichen.

In verschiedenen Teilen der Welt wurden semi-probabilistische Bemessungsverfahren entwickelt und übernommen. Für die europäischen Länder wurde einstmalig das Eurocode-Programm mit einem semi-probabilistischen Bemessungsverfahren beschlossen, um eine Harmonisierung für Produkte und für den Entwurf zu fördern. Im Jahr 1975 hat sich die Kommission der Europäischen Gemeinschaft zu einem Aktionsprogramm im Bereich der Baukonstruktionen entschlossen, das sich auf Artikel 95 des EG-Vertrags, siehe EN 1990 (2002), beruft. Die erste Eurocode-Generation war in den 1990er Jahren entstanden und wurde von der heutigen Generation ab etwa dem Jahr 2000 abgelöst. Eurocodes sind vor allem auf Hoch- und Ingenieurbauten sowie Brücken konzentriert. Eurocodes umfassen etwa 150 Hauptdokumente und geben einen Rahmen, in dem einige Anforderungen für weitere nationale Anpassungen geöffnet sind. Dadurch vermag jedes europäische Land eigene nationale Anhänge (kurz: NA) haben, in denen die zulässigen nationalen Ansätze dokumentiert werden. Hieraus wird die Anwendung des EUROCODE selbst und des zugehörigen NA zwingend erforderlich (z.B. DIN EN 1990 + DIN EN 1990/NA). Einige europäische Länder, wie z.B. Deutschland, haben individuelle Normen für Wasserbauwerke entwickelt, die vereinzelt auf den EUROCODEs basieren.

USA und das für den Verkehrswasserbau verantwortliche Corps of Engineers (USACE) begannen 1981 mit einer Bemessung mit Sicherheitsfaktoren und in Grenzzuständen (LRFD = Load Resistance and Factor Design), um Schritt mit industriellen Entwicklungen, Universitäten und anderen technischen Organisationen zu halten. Die überarbeiteten Sicherheitsfaktoren wurden so bestimmt, dass das Bemessungs-Ergebnis konservativ in etwa mit der früheren Methode nach zulässigen Spannungen übereinstimmte. Gegenwärtig sind in den USA verschiedene LRFD-Konzepte bekannt, die entweder im Hochbau, im Brückenbau oder im Wasserbau verwendet werden. Spezielle Regelungen für Wasserbauwerke unterschieden sich von denen im regulären Hochbau, repräsentiert durch ACI 318, "Bauvorschriften und Kommentar für Stahlbeton", um Anforderungen an die Nutzung und Gebrauchstauglichkeit von Wasserbauwerken zu stellen.

Die Bemessung von Hafenbauwerken in China ist dem EUROCODE-Bemessungskonzept sehr ähnlich.

## 2.2 Überblick über Zuverlässigkeitsmethoden und – Ziele

Für das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte werden die Basisvariablen (z.B. Einwirkungen, Widerstände, geometrische Eigenschaften, etc.) durch Bemessungswerte beschrieben, die durch Multiplikation von charakteristischen Werten mit Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma$  und Kombinationswerten  $\psi$  für die relevanten Grenzzustände gebildet werden. Grundsätzlich können Zahlenwerte für Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte durch zwei Arten bestimmt werden:

- i) auf der Grundlage der Kalibrierung an auf lange Erfahrung beruhender Bautradition, was das vorherrschende Prinzip der ersten Generation der EUROCODES (deterministische Kalibrierung) gewesen war,
- ii) auf der Grundlage der statistischen Auswertung von Beobachtungen und experimentellen Daten, die im Rahmen der Zuverlässigkeitstheorie (probabilistisches Kalibrierungsverfahren) durchgeführt werden sollte.

Bei der Verwendung von Verfahren ii), entweder allein oder in Kombination mit Verfahren i), sollten die Teilsicherheitsfaktoren für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und für verschiedene Einwirkungen und Widerstände derart kalibriert werden, dass die Zuverlässigkeitsniveaus für repräsentative Tragwerke so nah wie möglich an den Ziel-Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  gemäß Tabelle 2 reichen.

Abb. 1 zeigt eine schematische Übersicht der verschiedenen Verfahren zur Kalibrierung von Teilsicherheitsbeiwerten für Bemessungsgleichungen (Grenzzustand) und die Beziehung zwischen diesen. Die probabilistischen Kalibrierungsverfahren für Teilsicherheitsfaktoren können in zwei Klassen unterteilt werden:

- vollständige probabilistische Methoden (Stufe III) und
- Zuverlässigkeitsmethoden Erster Ordnung (FORM) (Stufe II).

Voll probabilistische Methoden (Stufe III) geben die richtige Antwort auf das Zuverlässigkeit-Problem. Stufe III Methoden werden wegen des häufigen Mangels an statistischen Daten noch selten in der Kalibrierung von Bemessungsnormen verwendet. Allerdings benutzen Level-II-Verfahren bestimmte, genau definierte Näherungen und führen damit zu Ergebnissen, die für die meisten Tragwerks-Anwendungen als ausreichend betrachtet werden können.

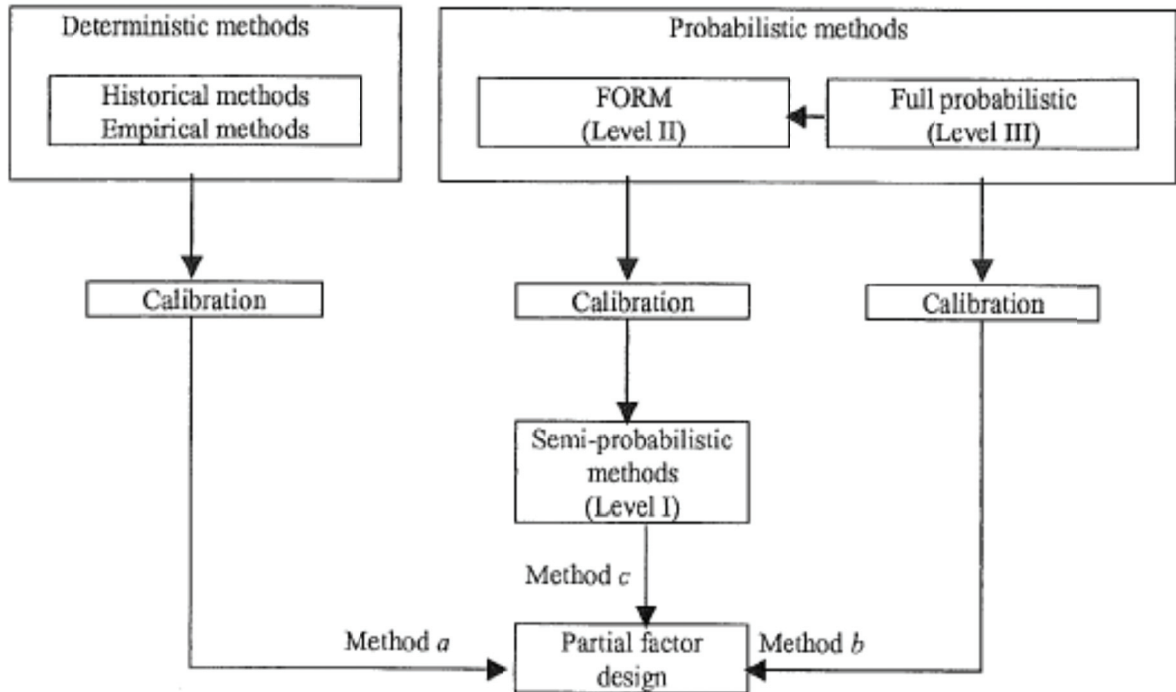


Abbildung 1: Übersicht der Zuverlässigkeitsmethoden, gem. EN 1990 (2002).

Das Maß der Zuverlässigkeit für die Stufen II- und III-Methoden sollte über die Überlebenswahrscheinlichkeit  $p_s = (1 - p_f)$  bestimmt werden, wobei  $p_f$  die Versagenswahrscheinlichkeit in einem maßgebenden Bemessungs-Bereich für die betrachtete Versagensart und innerhalb eines angemessenen Referenzzeitraums (Nutzungsdauer) ist;  $p_f$  wird durch EN 1990 (2002) für einige typische Tragwerkstypen empfohlen.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  und der entsprechende Zuverlässigkeitsindex  $\beta$ , siehe Tabelle 1, sind operative Werte für die Kalibrierung von Normen und dem Vergleich von Zuverlässigkeitsniveaus von Tragwerken. Sie müssen nicht unbedingt die tatsächliche Versagenswahrscheinlichkeit wiedergeben. EURO-CODES und LRFD basieren in erster Linie auf Methode a), siehe Abbildung 1. Methode c) oder gleichwertige Verfahren wurden oder werden verwendet für die weitere Entwicklung der EUROCODES.

Für das Vorgehen in den Stufe II-Verfahren ist ein alternatives Maß der Zuverlässigkeit konventionell durch den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  definiert, der mit  $p_f$  zusammen hängt über:

$$p_f = \Phi(-\beta) \tag{1}$$

worin  $\Phi$  die kumulative Verteilungsfunktion der standardisierten Normalverteilung ist. Die Beziehung zwischen  $\beta$  und  $p_f$  ist in Tabelle 1 aufgeführt. Als Vereinfachung wird eine Normalverteilung für Einwirkungen und Widerstände angenommen, so dass  $\beta$  als der Abstand von dem erwarteten Mittelwert der Grenzzustandsgleichung  $Z = R - E$  in  $\sigma_z$ -Einheiten interpretiert werden kann; R repräsentiert die Verteilung des Widerstands und E die Verteilung der Einwirkungen, siehe Abbildung 2. Im Falle einer nicht-linearen Grenzzustandsgleichung  $Z = g(R, E)$  - wie eigentlich bei allen praktischen Fällen - ist diese Interpretation nicht mehr streng gültig, wobei damit der Zuverlässigkeits-Index nicht mehr vernünftigen Quantilwerten der Wahrscheinlichkeitsfunktion entspricht.

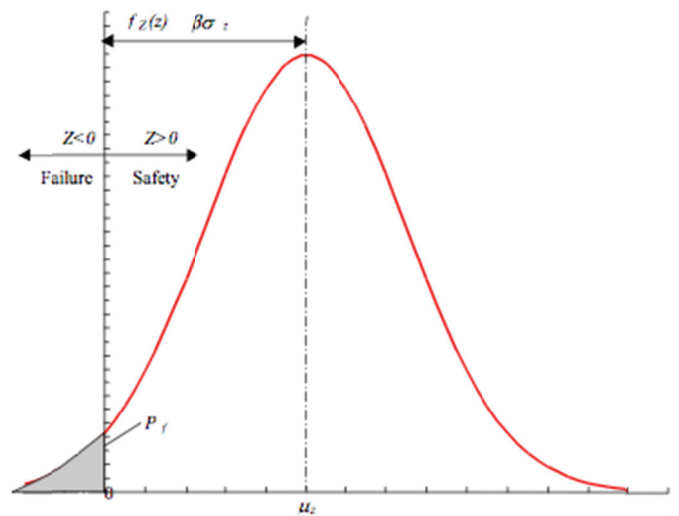


Abbildung 2:  $\beta$  als der Abstand von dem erwarteten Wert  $\mu_z$  der Grenzzustandsfunktion Z, in  $\sigma_z$ -Einheiten.

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  kann für ein Tragwerk durch eine Leistungsfunktion  $g$  derart ausgedrückt werden, dass ein Überleben durch  $g > 0$  und ein Versagen durch  $g \leq 0$  ausgedrückt wird:

$$p_f = \text{Prob}(g \leq 0) \tag{2}$$

Wenn R der Widerstand und E die Auswirkung von Einwirkungen (z.B. Schnittgröße, Spannung) darstellen, gestaltet sich die Leistungsfunktion  $g$ :

$$g = R - E \tag{3}$$

wobei R, E und G Zufallsvariablen sind.

Wenn  $g$  normalverteilt ist, lässt sich der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  ausdrücken durch:

$$\beta = \mu_g / \sigma_g \tag{4}$$

wobei  $\mu_g$  der Mittelwert von  $g$  und  $\sigma_g$  die Standardabweichung von  $g$  sind. Dann ergeben sich  $\mu_g - \beta \cdot \sigma_g = 0$  und für normalverteilte Sachverhalte  $p_f = \text{Prob}(g \leq 0) = \text{Prob}(g \leq \mu_g - \beta \cdot \sigma_g)$ .

Für andere Verteilungen von  $g$  ist der Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  nur ein abgeschätztes Maß für die Zuverlässigkeit.

Alle teilnehmenden (Mitglieds-)Länder kennen in ihrem Bemessungs-Konzept den Grenzzustand, für den im Allgemeinen die Bemessungs-Einwirkung den Bemessungswiderstand nicht überschreiten darf. EUROCODE gibt als grundlegende Gleichung im Allgemeinen  $E_d \leq R_d$  an (für das statische Gleichgewicht gilt  $E_{d,dst} \leq E_{d,stab}$ ), worin  $E_d$  der Bemessungswert für die Auswirkung der Einwirkung und  $R_d$  der Bemessungswert des entsprechenden Widerstands ist und gemäß EN 1990 (2002) geschrieben wird:

$$\sum_{i=1}^i \gamma_{F,i} \cdot \psi_i \cdot F_{k,i} \leq \frac{R_k}{\gamma_M} \quad (5)$$

wobei:

- $i$  = Anzahl der gleichzeitig berücksichtigten Einwirkungen,
- $\gamma_{F,i}$  = Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkung (günstig oder ungünstig),
- $\psi_i$  = Kombinationsbeiwert für die Einwirkung,
- $F_{k,i}$  = charakteristischer Wert der Einwirkung,
- $\gamma_M$  = Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand,
- $R_k$  = charakteristischer Wert des Widerstandes.

Für das LRFD-Konzept betragen die Grundgleichungen gemäß AASHTO (2012), EM 1110-2-2104 (2003) und EM 1110-2 - 2105 (1994):

$$\sum_{i=1}^i \gamma_i Q_{ni} \leq \alpha \phi R_n \quad (6)$$

wobei:

- $\sum \gamma_i Q_{ni}$  =  $U$  = die Auswirkung der faktorisierten Einwirkungen
- $\gamma_i$  = Lastfaktoren, die die Unsicherheit der Einwirkungen berücksichtigt
- $Q_{ni}$  = Auswirkungen der Nenn-Lasten (normenspezifisch)
- $\alpha$  = Leistungsfaktor (nur für Stahlwasserbau)
- $\phi$  = Widerstandsfaktor aus ACI 318 (2011)
- $R_n$  = Nennwert des Widerstands aus ACI 318 (2011).

Bei einem Vergleich der Gleichungen (5) und (6) ergibt sich zum einen, dass  $(\gamma_{F,i} \cdot \psi_i)$  in (5) dem  $\gamma_i$  in (6) entspricht, was bedeutet, dass der Teilsicherheitsfaktor für Einwirkungen im LRFD-Konzept auch die Kombination der Einwirkungen umfasst, siehe Ellingwood (1995), und zum anderen, dass  $\gamma_m \approx (1 / \phi)$  beträgt.

Neben allen probabilistischen Definitionen und Ableitungen darf nicht vergessen werden, dass die resultierende Sicherheit nicht unwesentlich auch von weiteren Konstruktionsregeln oder Robustheits-Anforderungen abhängt, die in den verschiedenen Normen und Richtlinien aufgenommen wurden. Obwohl Europa und die USA ein Konzept mit Teilsicherheiten verwenden, sind beide Systeme nicht direkt vergleichbar, weshalb in Kapitel 3 die Konzepte nacheinander vorgestellt werden.

### 3. Untersuchung des semi-probabilistischen Bemessungskonzepts

#### 3.1 Eurocode

Im EUROCODE wird zwischen Grenzzuständen der Tragfähigkeit (ULS) und der Gebrauchstauglichkeit (SLS) unterschieden, die beide sich auf Bemessungssituationen beziehen. Die Grenzzustände (ULS) betreffen:

- die Sicherheit von Personen und / oder
- die Sicherheit der Struktur

und werden für die Nachweisformate der Lagesicherheit (EQU), des Auftriebs (UPL), Strukturversagen (STR), Versagen des Bodens (GEO) und Ermüdungsbruch (FAT) betrachtet. Situationen vor dem eigentlichen Bauwerksversagen können - an Stelle des Versagens selbst - ebenfalls als Grenzzustände behandelt werden.

Die Grenzzustände (SLS) betreffen:

- das Funktionieren der Struktur oder Strukturelemente unter normalen Betriebsbedingungen
- den Benutzungskomfort der Menschen ,
- das Aussehen der Bauwerks (große Durchbiegung, umfangreiche Rissbildung).

Hier wird zwischen reversiblen und irreversiblen Grenzzuständen unterschieden. Die Bemessung für Grenzzustände soll auf Tragwerks- und Lastmodellen beruhen, die praktisch und für die normale Ingenieursarbeit mit dem Teilsicherheitskonzept bewältigt wird, in einigen besonderen Fällen aber direkt mit probabilistischen Methoden. Es ist nachzuweisen, dass kein Grenzzustand überschritten wird, wenn relevante Bemessungswerte für Einwirkungen, Materialeigenschaften oder Produkteigenschaften sowie Geometriedaten in diesen Modellen verwendet werden. Die vorgenannten Bemessungssituationen werden in ständige, vorübergehende oder außergewöhnliche bzw. seismische Situationen eingestuft. Nachweise von Grenzzuständen, die zeitabhängige Effekte (z.B. Ermüdung) betrachten, sollten auf die Nutzungsdauer des Bauwerks bezogen werden. Verschiedene Grenzzustände werden mit den verschiedenen Kombinationen von Teilsicherheitsfaktoren verbunden.

Die relevanten Bemessungssituationen berücksichtigen die Umstände, unter denen das Tragwerk seine Funktion zu erfüllen hat:

- Ständige Bemessungssituationen, die sich auf die normalen Einsatzbedingungen beziehen,

- Vorübergehende Bemessungssituationen, die zeitlich begrenzte Bedingungen des Tragwerks berücksichtigen, z. B. während der Ausführung oder einer Reparatur,
- Außergewöhnliche Bemessungssituationen, die außergewöhnliche Bedingungen des Tragwerks oder seiner Einwirkungen berücksichtigen, z. B. Feuer, Explosionen, Anprall oder die Folgen von örtlichem Versagen,
- Erdbeben-Situationen als Bedingungen für das Tragwerk unter seismischen Einwirkungen, so dass alle Bedingungen berücksichtigt sind, die vernünftigerweise während der Ausführung und während der Nutzung des Tragwerks auftreten können.

Für eine spezielle Nachweisführung werden nunmehr Lastkombinationen ausgewählt, die zueinander kompatible Laststellungen, Verformungen und Imperfektionen enthalten, die gleichzeitig mit ständigen und veränderlichen Einwirkungen wirken. Tragwerks- und Lastmodelle können sowohl physikalische Modelle als auch mathematische Modelle sein. Einwirkungen sind durch ihre zeitliche Änderung wie folgt unterschieden:

- Ständige Einwirkungen (G), z. B. Eigengewicht von Tragwerksteilen, fester Ausrüstung und Straßenbelägen, aber auch indirekte Wirkungen infolge Schwinden/Kriechen und Setzungen;
- Veränderliche Einwirkungen (Q), z. B. Nutzlasten und Verkehrslasten auf Böden, Balken und Dächern, Wind- und Schneelasten;
- Außergewöhnliche Einwirkungen (A), z. B. Explosionen oder der Auswirkungen von Fahrzeuganprall.

Einwirkungen infolge Wasser können in Abhängigkeit vom Variationskoeffizient als ständige oder variable Einwirkung berücksichtigt werden.

Der charakteristische Wert einer Einwirkung wird als Mittelwert, als oberer oder unterer Wert oder als Nominalwert, letzterer bezieht sich mangels Erkenntnissen nicht auf eine bekannte statistische Verteilung, angegeben. EUROCODE gibt Informationen, wie man die charakteristischen Werte ermittelt, d.h. als Quantilwert und/oder als oberer oder unterer Wert.

Der Bemessungswert  $F_d$  einer Aktion  $F$  wird ausgedrückt durch

$$F_d = \gamma_{F,i} \cdot \psi_i \cdot F_{rep} \quad (7)$$

wobei  $F_k$  der charakteristische Wert der Einwirkung,  $\gamma_F$  der Teilsicherheitsfaktor und  $\psi_i$  der Kombinationsfaktor (wobei  $\psi_i \leq 1$  gilt) sind.

Der Teilsicherheitsfaktor ist:

$$\gamma_{F,i} = \gamma_{Sd} \cdot \gamma_{f,i} \quad (8)$$

wobei:

$\gamma_{Sd}$  der Teilsicherheits-Modell-Faktor zur Berücksichtigung von Last- und Beanspruchungsmodell ist,

$\gamma_{f,i}$  der Teilsicherheitsfaktor für die Unsicherheit der Einwirkung ist.

Teilsicherheitsfaktoren können auf die Einwirkung, als  $\gamma_{f,i}$ , oder auf die Auswirkung bzw. Beanspruchung, als  $\gamma_{F,i}$ , angewendet werden, EN 1990 (2002). Wenn zwischen günstigen und ungünstigen Auswirkungen der Maßnahmen zu unterscheiden ist, werden zwei verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_{F,inf}$  (in den meisten Fällen  $\gamma_{F,inf} = 1,0$  für ständige Einwirkungen und  $0,0$  für veränderliche Einwirkungen) und  $\gamma_{F,sup}$  angesetzt. Für nicht-lineare Analysen (d.h., wenn die Beziehung zwischen Einwirkung und ihrer Wirkungen nicht mehr linear ist) sowie für den Fall einer einzig vorherrschenden Einwirkung gibt EN 1990 (2002) besondere Empfehlungen.

Die Eigenschaften von Materialien (Bauprodukte, aber auch Boden und Gestein) sollten auch durch charakteristische Werte beschrieben werden. Wenn der Nachweis des Grenzzustands empfindlich auf die Schwankungen der Materialeigenschaft reagiert, sollten obere und untere charakteristische Werte der Materialeigenschaft berücksichtigt werden. Wenn ein unterer Wert des Materials oder der Produkteigenschaft ungünstig ist, sollte der charakteristische Wert als 5% Quantilwert definiert werden, wenn ein hoher Wert von Material- oder Produkteigenschaft ungünstig ist, sollte der charakteristische Wert als 95% Quantilwert definiert werden. Materialeigenschaften werden aus standardisierten Tests unter festgelegten Bedingungen bestimmt.

Wenn statistische Daten nur unzureichend zur Verfügung stehen, um die charakteristischen Werte eines Materials oder Produkts zu ermitteln, können Nennwerte als charakteristische Werte oder gleich Bemessungswerte direkt festgelegt werden. Strukturelle Parameter, wie z. B. Elastizitätsmodul, Kriechzahl, thermischer Ausdehnungskoeffizient, etc. sollten durch einen Mittelwert dargestellt werden. Werte von Material- oder Produkteigenschaften sind in den spezifischen EURO-CODES, d.h. EN 1992 bis ggf. EN 1998 sowie in den einschlägigen harmonisierten europäischen technischen Spezifikationen oder anderen Dokumenten angegeben.

Geometrische Daten sind durch ihre charakteristischen Werte oder im Fall von Imperfektionen direkt durch Bemessungswerte angegeben. Die im Entwurf festgelegten Abmessungen können als charakteristische Werte angenommen werden. Wenn die statistische Verteilung ausreichend bekannt ist, können Werte von geometrischen Größen, die einem vorgeschriebenen Quantil der statistischen Verteilung entsprechen, verwendet werden.

Der Bemessungswert  $X_d$  eines Material- oder Produkteigenschaft wird in allgemeiner Form ausgedrückt durch:

$$X_d = X_k \cdot \eta / \gamma_m \quad (9)$$

und der Bemessungswert  $R_d$  für Strukturelemente :

$$R_d = (1 / \gamma_{Rd}) \cdot X_k \cdot (\eta / \gamma_m) \quad (10)$$

wobei:

$X_k$  ist der Kennwert des Materials oder der Produkteigenschaft,

$\eta$  ist der Mittelwert des Umrechnungsfaktors unter Berücksichtigung der Volumen- und Skaleneffekten, Wirkungen von Feuchtigkeit und Temperatur, und andere relevante Parameter

$\gamma_m$  ist der Teilsicherheitsfaktor für die Material- oder Produkteigenschaft, in dem die Unsicherheit bei der Festlegung der Material- oder Produkteigenschaft von ihrem charakteristischen Wert sowie die Unsicherheit des Umrechnungsfaktors  $\eta$  berücksichtigt sind;

$\gamma_{Rd}$  ist der Teilsicherheitsfaktor für die Unsicherheit des Widerstandsmodells sowie von geometrischen Abweichungen, wenn diese nicht explizit modelliert wurden.

Die Kombination der Beanspruchungen von zu berücksichtigenden Einwirkungen sollte sich an dem Bemessungswert der Leit-Einwirkung  $Q_{k,1}$  sowie der Kombination der Bemessungswerte von begleitenden veränderlichen Einwirkungen  $Q_{k,i}$  orientieren. Die gebräuchlichste Kombinationsregel (für lineare Beziehung zwischen Einwirkungen und deren Auswirkungen) für ständige und vorübergehende Bemessungssituationen lautet:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right\} \quad (11)$$

wobei:

"+" bedeutet "summiert werden (lineare Überlagerung) mit"

„Σ“ bedeutet "die kombinierte Wirkung von".

Das Format für die außergewöhnliche Bemessungssituation ist:

$$E_d = E \left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" A_d "+" \psi_{1,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i \geq 2} \psi_{2,i} Q_{k,i} \right\} \quad (12)$$

wobei  $\psi_{i,1}$  sich auf die maßgebende außergewöhnliche Bemessungssituation (Anprall, Feuer oder den Zustand nach einem außergewöhnlichen Ereignis) bezieht. Die Kombinationen von Einwirkungen für außergewöhnliche Bemessungssituationen sollten sich entweder auf eine spezielle außergewöhnliche Einwirkung  $A_d$  (Anprall, Feuer) oder auf eine Situation nach einer derartigen Ereignis (dann  $A_d = 0$ ) beziehen. Für Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit gibt es analoge Bemessungssituationen.

Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex  $\beta$  sind für verschiedene Bemessungssituationen und für Zeiträume von 1 Jahr und 50 Jahren, abhängig von der beabsichtigten Nutzungsdauer des Tragwerks in EN 1990 (2002) definiert. Eine Nutzungsdauer von 100 Jahren, die in einigen Ländern die planmäßige Nutzungsdauer für Wasserbauwerke ist, vgl. DIN 19702 (2013), und einem  $\beta$ -Wert wie gemäß EN 1990 für 50 Jahre, bedeutet, dass die jährliche Zuverlässigkeit vergleichsweise höher ist. Eine weitere Abhängigkeit besteht zu den Zuverlässigkeitsklassen (oder Versagensfolgeklassen) nach EN 1990 (2002). Als Beispiel zeigt Tabelle 2 die Ziel-Zuverlässigkeiten für die Zuverlässigkeitsklasse RC 2 (mittlere Konsequenzen für Menschenleben und/oder die Wirtschaft und/oder die Umwelt), die für normale Gebäude und Ingenieurbauwerke verwendet wird, aber auch für Wasserbauwerke.

Die folgenden Tabellen zeigen einige Teilsicherheitsbeiwerte, die durch die Arbeitsgruppe PIANC WG 140 untersucht und für die Anwendung auf Wasserbauwerke in Europa zusammengestellt wurden.

Grenzzustand	Ziel-Zuverlässigkeit $\beta$	
	1 Jahreszeitraum	50 Jahreszeitraum
Tragfähigkeit (ULS)	4.7	3.8
Ermüdung		1.5 – 3.8 <sup>1)</sup>
Gebrauchstauglichkeit (irreversibel) (SLS)	2.9	1.5

<sup>1)</sup> von Inspektionsfähigkeit, Reparaturfreundlichkeit und Schadenstoleranz abhängig

Tabelle 2: Zielzuverlässigkeitsindex  $\beta$  für die RC-Klasse 2, gem. EN 1990 (2002)

Partial safety factors $\gamma_F$ for actions „F“ (unfavourable / favourable)				
UPLIFT		DS-Persistent	DS-Transient	DS-Accidental
Permanent	D	1,05 / 0,95		1,0 / 0,95
	B	1,1 / 0,9		1,0 / 1,0
	F	1,0 / 0,9		1,0 / 1,0
	NL	1,0 / 0,9		1,0 / 1,0
Variable	D	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	B	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	F	1,5 / 0		1,0 / 1,0
	NL	1,5 / 0		1,0 / 1,0

Tabelle 3: Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Grenzzustand „Auftrieb“, gemäß EURO-CODE-Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

## Sicherheit und Risikomanagement

Bemessung von Wasserbauwerken im Binnenbereich nach dem Teilsicherheitskonzept (PIANC WG 140)

Partial safety factors $\gamma_F$ for actions „F“ (unfavourable / favourable)				
<b>STRUCTURAL</b>		DS-Persistent	DS-Transient	DS-Accidental
Permanent	D	1,35 / 1,0	1,2 / 1,0	1,0 / 1,0
	B	1,35 / 1,0		1,0 / 1,0
	F	1,35 / 1,1		-
	NL	1,35 (1,2) / 0,9		1,0 / 1,0
	CN	1,2 / 1,0		-
Variable	D	1,5 / 0 (0,8) <small>for water</small>	1,3 / 0 (0,9) <small>for water</small>	1,0 / 0
	B	1,5 / 0		1,0 / 0
	F	1,5 / 0		1,0 / 0
	NL	1,5 / 0		1,0 / 0
	CN	1,4 - 1,5 / 0		-

**Tabelle 4:** Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Tragwerksversagen, gemäß EURO-CODE-Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

Partial safety factors $\gamma_M$ for resistance „R“				
<b>resistance</b>		DS-Permanent	DS-Transient	DS-Accidental
Concrete	D	1,5		1,3
	B	1,5		1,5
	F	1,5		1,2
	NL	1,5		1,2
	CN	1,38		-
Reinforce- ment steel	D	1,15		1,0
	B	1,15		1,15
	F	1,15		1,0
	NL	1,15		1,0
	CN	1,1 – 1,2		-

**Tabelle 5:** Teilsicherheitsbeiwerte für Wasserbauwerke, Materialkennwerte für Stahlbeton, gemäß EUROCODE –Bemessung, für ständige und veränderliche Einwirkungen in ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Bemessungssituationen (DS), gem. PIANC WG140 (2014).

### 3.2 Load Resistance and Factor Design (LRFD) Konzept

In den USA stellt das „Load and Resistance Factor Design“ Konzept den rationalen Ansatz dar, mit dem die wesentlichen Unsicherheiten, d.h., Einwirkungen und Widerstände, quantitativ in den Bemessungsprozess integriert werden können. Ein Grenzzustand ist ein Zustand, bei dessen Überschreiten ein Tragwerk oder Tragwerksteil, wie z.B. eine Gründung oder ein aufgehendes Tragwerk, nicht mehr die Funktion erfüllt, für die sie ausgelegt wurde. Die Grenzzustände umfassen:

- Betriebs-Grenzzustand
- Tragfähigkeits-Grenzzustand
- Extremer Grenzzustand
- Ermüdungs-Grenzzustand.

Der Betriebs-Grenzzustand stellt das Leistungsvermögen des Tragwerks unter Betriebsbedingungen dar. Beispiele hierfür sind Setzungen oder Verformungen von Tragwerken. Der Tragfähigkeits-Grenzzustand beinhaltet das vollständige oder teilweise Versagen der Konstruktion. Beispiele für Tragfähigkeits-Grenzzustände sind z. B. Bauwerksversagen, Gleiten in der Gründungsfuge oder in der Geotechnik die Instabilität eines Hangs, AASHTO (2012). Stahlbetonbauwerke sollten in Übereinstimmung mit der aktuellen Norm ACI 318 (2011) möglichst nach dem LRFD Konzept bemessen werden.

Als Bemessungssituationen werden eine übliche, eine ungewöhnliche und eine extreme Bemessungssituation identifiziert. Die ungewöhnliche Bemessungssituation umfasst Einwirkungen wie Wind und Schnee, die extreme Bemessungssituation umfasst Erdbeben und Anprall.

Eine Kalibrierung der Last und Widerstandsfaktoren war erforderlich, um bei der Anwendung von LRFD die gewünschten Ergebnisse zu erzielen. Kalibrierverfahren umfassen in der Regel die Anwendung des technischen Ingenieurverständs, die Anpassung an das frühere, zum Teil noch angewendete „Zulässige Spannungsverfahren“ (Allowable-Stress-Design = ASD), Anwendung der Zuverlässigkeitstheorie sowie eine Kombination der genannten Ansätze.

Für das LRFD Konzept wurde bei der Bestimmung des Teilsicherheitsbeiwerts für den Widerstand  $\phi$  eine Kombination der zuvor genannten Ansätze. In der Regel wurden die Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand für Gründungen mit den Methoden der Zuverlässigkeitstheorie kalibriert, wenn ausreichend Mess- und Kennwerte verfügbar waren. Wenn keine oder nur unzureichende Daten zur Verfügung standen, um eine auf der Zuverlässigkeit basierte Kalibrierung durchzuführen, wurde in erster Linie mittels ASD-Methode und mit ingenieurmäßiger Beurteilung gearbeitet. Damit wurde allerdings das Hauptziel des LRFD-Konzepts, ein einheitliches Sicherheitsniveau bei der Bauwerksbemessung zu erreichen, nicht vollständig realisiert. Die Teilsicherheitsbeiwerte für den Widerstand in den LRFD Spezifikationen wurden über Vergleichs-Bemessungen überprüft, um sicherzustellen, dass die Ergebnisse mit dem ASD-Konzept vergleichbar sind, AASHTO (2012).

Die Bemessungsnormen nach LRFD geben eine Versagenswahrscheinlichkeit oder eine Ziel-Zuverlässigkeit

$\beta$  explizit nicht an, sondern nur die Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstand. Diese Teilsicherheitsfaktoren sollen jedoch einem  $\beta$ -Zielwert zwischen 3 und 4 genügen, EM 1110-2-2104 (2003).

Einwirkungen werden als ständige Einwirkungen, Konstruktionslasten, Umwelt-Einwirkungen, hydraulische Lasten sowie Anpralllasten eingestuft, EM 1110-2-2106 (2008). Nennwerte wurden aus Statistiken abgeleitet und sind für Wasserbauwerke in USACE Engineering-Manuals angegeben, Ellingwood (1995).

Die Anforderungen innerhalb des LRFD Konzepts für die Bemessung wird durch eine Reihe von vorgegebenen Linear-Kombinationen mit faktorisierten Lasten dargestellt. Die Teilsicherheitsfaktoren sind für jede Lastkombination unterschiedlich und umfassen die Gleichzeitigkeit des Auftretens der darin enthaltenen Einwirkungen (Kombination). Das LRFD Konzept erlaubt eine Einzelfaktor-Methode (nur ein Teilsicherheitsbeiwert auf der Einwirkungsseite) oder eine Mehrfachfaktor-Methode (ggf. wird jeder Einwirkung ein eigener Teilsicherheitsbeiwert zugewiesen). In Abhängigkeit der Normen und von den Tragwerkstypen gibt es so eine bestimmte Anzahl von unterschiedlichen linearen Lastkombinationen. Modellunsicherheiten werden im LRFD Konzept ausdrücklich nicht betrachtet.

Das LRFD Konzept für Wasserbauwerke wird in Einzelfällen als Einzelfaktor-Methode oder durch die Mehrfachfaktor-Methode angewendet. Die Verwendung von einem einzigen Teilsicherheitsbeiwert für sowohl Eigen- als auch Verkehrslasten ist erlaubt. Darüber hinaus wird die Einzelfaktor-Methode erforderlich, wenn die Lasten auf das Tragwerk aus einer Boden-Bauwerks-Interaktion herrühren.

Alle Wasserbauwerke aus Stahlbeton müssen sowohl die Tragfähigkeits- als auch die Gebrauchstauglichkeitsanforderungen erfüllen. Beim Tragfähigkeitsnachweis wird dies durch die Multiplikation der charakteristischen (Gebrauchs-)Lasten mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten erreicht, für Wasserbauwerke zusätzlich durch Multiplikation mit einem zusätzlichen Hydraulik-Faktor  $H_f$ . Dieser hydraulische Faktor wird mit der gesamten Lastkombination multipliziert. Diese erhöhte Belastung dient der Sicherstellung der besonderen Tragfähigkeit wasserbaulicher Strukturen. Der Hydraulikfaktor ersetzt dabei auch die Durchführung von zusätzlichen Gebrauchstauglichkeitsnachweisen.

Teilsicherheitsbeiwerte gemäß ACI 318 (2011) dürfen bei Wasserbauwerken mit zwei Änderungen angewendet werden. Der Teilsicherheitsbeiwert für den seitlichen Flüssigkeitsdruck sollte mit 1,7 statt mit dem in ACI 318 vorgeschriebenen Wert von 1,4 berücksichtigt werden. Auch sollte für Wasserbauwerke, mit Ausnahme von zugbelasteten Bauteilen, die gesamte faktorisierte Bemessungslast  $U$  nach Ermittlung gemäß ACI 318 mit dem Hydraulikfaktor  $H_f = 1,3$  erhöht werden. Für Zugglieder von Wasserbauwerken ist  $H_f = 1,65$  anzusetzen.

Bei der Einzel-Lastfaktor-Methode werden sowohl die Eigen- als auch die Verkehrs-Lasten mit dem gleichen Teilsicherheitsbeiwert multipliziert:

$$U_h = H_f * [ 1,7 (D + L) ] \quad (13)$$

wobei



$U_h$  = faktorisierte Gesamt-Last für das Wasserbauwerk

$H_f$  = hydraulischer Faktor

$D$  = Eigenlast

$L$  = Verkehrslast .

Eine Ausnahme von Gleichung (13) findet Anwendung, wenn die Auswirkungen von ungewöhnlichen oder extremen Belastungen wie Wind, Erdbeben oder andere Kräfte von kurzer Dauer und geringer Eintrittswahrscheinlichkeit einbezogen werden. Für diese Fälle sollten eine der folgenden Kombinationen für Wasserbauwerke verwendet werden:

$$U_h = H_f * (0,75 * U_{W \text{ oder } E}) \quad (14)$$

wobei

$U_{W \text{ oder } E}$  = nichthydraulische faktorisierte Last wie Wind oder Erdbeben

In der Mehrfach-Lastfaktor-Methode wird eine Lastkombination berechnet mit:

$$U_h = H_f * U = H_f * [ 1.4 D + 1.7 ( L + F ) ] \quad (15)$$

wobei:

$F$  = seitlichen Wasserdruck

Bei bestimmten Wasserbauwerken, wie Halbrahmen-Schleusen und Dükern, kann die Verkehrslast einen entlastenden („günstigen“) Effekt auf die Bemessungslast innerhalb der berücksichtigten Lastkombination haben. In diesem Fall ist eine weitere Lastkombination von Eigen- und Verkehrslasten mit einem angepassten Teilsicherheitsbeiwert für die variablen Lasten gemäß:

$$U_h = H_f * U = H_f * [ 1.4 D + 1.0 ( L + F ) ] \quad (16)$$

zu untersuchen und im statischen Nachweis zu bewerten, EM 1110-2-2104 (2003).

Für Stahlwasserbauwerke bestehen typweise unterschiedliche Last-Kombinations-Gleichungen. Stemm-tore zum Beispiel sollten ihre Tragfähigkeit für die in den folgenden Lastkombinationen einkalkulierten Lasten erfüllen, EM 1110-2-2105 (1994):

$$U_h = 1,4 * H_s + 1,0 * I \quad (17a)$$

$$U_h = 1,4 * H_s + 1,0 * H_t \quad (17b)$$

$$U_h = 1,2 * 1,6 * D + ( C + M ) + 1,0 * H_t \quad (17c)$$

$$U_h = 1,2 * 1,6 * D + ( C + M ) + 1,0 * Q \quad (17d)$$

$$U_h = 1,2 * H_s + 1,0 * E \quad (17e)$$

Die Nennlasten sind wie folgt definiert:

$D$  = Eigenlast

$Q$  = maximale Betriebsgeräteleast

$E$  = Erdbebenlast

$I$  = Schiffsstoßlast

$H_s$  = hydrostatischen Last

$H_t$  = zeitliche hydraulischen Belastung

$C$  = Eislast

$M$  = Schlammbelastung.

Andere Arten von Schleusen und Wehrverschlüssen werden mit einer anderen Reihe von Lastkombinationen

nachgewiesen, in einigen Fällen mit der Methode zulässiger Spannungen (ASD) bis das LRFD Konzept auch hier flächendeckend entwickelt ist.

Teilsicherheitsfaktoren für Widerstände reichen normalerweise von  $\Phi = 0,85$  für Druckglieder bis zu  $\Phi = 0,90$  für Balken unter Momenten- und Querkraft-Beanspruchung sowie Zugglieder an der Streckgrenze. Befestigungen und Zugglieder im Bruchzustand werden mit  $\Phi = 0,75$  bemessen.

Neben Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen müssen viele Wasserbauwerke auch Stabilitätsanforderungen unter verschiedenen Last- und Gründungsverhältnissen gerecht werden. Die Stabilitätsanalyse von Wasserbauwerken müssen mit Gebrauchslasten nach EM 1110-2-2101, "Stabilitätsanalyse von Wasserbauwerken" durchgeführt werden. Die nicht-faktorisierten Lasten und die daraus resultierenden Beanspruchungen werden dann verwendet, um die nicht-faktorisierten Momente, Quer- und Längskräfte an kritischen Punkten der Struktur zu bestimmen. Die nicht-faktorisierten Schnittgrößen werden dann mit passenden Teilsicherheitsfaktoren und ggf. dem Hydraulikfaktor multipliziert, um die Tragfähigkeitsnachweise in den relevanten Querschnitten zu bestimmen.

#### 4. Statistische Verteilungen von Einwirkungen und Widerständen

##### 4.1 Allgemeines

Die Modellierung der Einwirkungen sollte so anspruchsvoll wie die Analyse des Tragwerks ausgeführt werden. Eine grobe Schätzung der Einwirkungen sollte nicht mit einer detaillierten Analyse des Tragwerks kombiniert werden und umgekehrt. Von der Systematik her hängt nach Schüller (1981) der Zuverlässigkeitsindex von der maximalen oder extremen Einwirkung ab. Daher ist die Belastung als eine Folge von voneinander unabhängigen seltenen Zufalls Aktionen mit hoher Intensität (Pulsverfahren) zu betrachten. Die probabilistische Analyse von Ereignissen oder Lastkombinationen ist datenintensiv und benötigt Informationen, um die Häufigkeit, Dauer und Intensität aller Lasten zu beschreiben, die das Leistungsvermögen des Tragwerks beeinflussen, Ellingwood (1995). Für die Beschreibung sind Extremwertverteilungen oder asymptotische Verteilungen am besten geeignet. Selbst wenn die Stichprobe durch eine Normalverteilung um den Mittelwert beschrieben werden kann, passen oftmals die Zweige von Extremwertverteilungen gut, Schüller (1981).

EN 1990 (2002) gibt beispielhaft einige grundlegende Informationen über statistische Verteilungen für Einwirkungen und Widerstände, zusätzlich erweitert und aktualisiert entsprechende Literatur diese grundlegenden Informationen. EN 1990 (2002) zum Beispiel gibt allgemeine Informationen über die Bestimmung der Einwirkungen und Widerstände durch Quantilwerte; DIN 19702 (2013) präzisiert für Deutschland die Quantilen von veränderlichen Einwirkungen für technische Nutzungsdauern von Wasserbauwerken, die  $T_N = 100$  Jahre betragen.

#### 4.2 Einwirkungen

Eigenlasten und Eigengewichte sind Einwirkungen, die zufällig in ihrer Größe, aber in ihrer Position festgelegt und in der Regel zeitlich invariant sind. Sie ergeben sich aus dem Gewicht der Struktur und der ständigen Ausrüstung und Auflasten. Sie werden in der Regel durch eine Normalverteilungsfunktion modelliert, siehe EN 1990 (2002), Grünberg (2004), Ellingwood (1995) und Siemes/Vrouwenvelder (1984).

Nutzlasten (Arbeitslasten) werden entweder nach dem Borges-Castanheta-Modell modelliert oder auch mit dem Gumbel-Verteilung, siehe Grünberg (2004). Nutzlasten können alternativ auch durch Lognormal-, Gamma- oder GUMBEL-Verteilungen beschrieben werden, siehe Spaethe (1992) oder Siemes/Vrouwenvelder (1984).

Hydrometeorologische Einwirkungen, z.B. Wasserstände, werden mit Exponential-, Weibull- oder GEV/GPD-Verteilungen mit jährlichen Extremwerten modelliert. Extreme Hochwasserstände, z.B. für Hochwasser-Analysen und für die Ermittlung der damit zusammenhängenden Teilsicherheitsbeiwerte werden durch die GUMBEL Verteilungen modelliert, siehe Plate (1993), Fischer (2001), während Niedrigwasser-Analysen mit der Weibull-Verteilung beschrieben werden können, siehe Plate (1993). In den USA wird als Wahrscheinlichkeitsverteilung für die jährlichen Hochwassermaxima der log-PEARSON-III-Typ empfohlen, Ellingwood (1995). Die jährliche Wahrscheinlichkeit eines charakteristischen Wasserstands oder eines Wasserdruck-Ereignisses wird häufig zu  $p = 0,01$ , vgl. Ellingwood (1995), DIN 19702 (2013), gewählt. Manchmal ist die Definition einer Probable Maximum Flood (PMF) angemessen, falls dieses Ereignis nicht durch den Betrieb der wasserbaulichen Anlage bewältigt werden kann, Ellingwood (1995). Problematisch für die Aufarbeitung einer Statistik ist es, eine Aufzeichnung über einen belastbaren Zeitraum zu erhalten, um auf künftige Zeiträume schließen zu können, was bestimmte Bemühungen erfordert.

Wind- und Schneelasten werden oft als GUMBEL-Verteilung modelliert, EN 1990 (2002), Grünberg (2004) oder Ellingwood (1995). Theoretisch bildet die Gamma-Verteilung, die nicht einfach zu handhaben ist, Schneelasten durchaus besser als die Gumbel-Verteilung ab. Rackwitz (1996). Siemes/Vrouwenvelder (1984) empfehlen die Weibull-Verteilung für Windlasten und die Lognormal- oder GUMBEL-Verteilung für Schneelasten.

Außergewöhnliche Einwirkungen können mit einem Poisson-Prozess oder vielleicht auch mit dem Borges-Castanheta-Modell, Grünberg (2004), modelliert werden. Die Verteilung für z.B. Anprall selbst ist von verschiedenen, zusammenwirkenden Einflüssen wie der Masse des Aufprallobjekts (Normalverteilung), der Aufprallgeschwindigkeit oder Beschleunigung (Lognormalverteilung), der Steifigkeit des Aufprallobjekts (deterministisch) und dem Aufprallwinkel (Rayleigh-Verteilung) abhängig, siehe EN 1991-1-7 (2006).

Erdbeben-Einwirkungen gehören zu einem Poisson-Prozess, während die Extremwerte der Erdbebenbeschleunigung in Mitteleuropa am besten durch die Weibull-Verteilung, vgl. Rackwitz (2006), oder die Gumbel-Verteilung, Schüller (1981), modelliert werden. Für Wasserbauwerke werden die hydrodynamischen

Massen-Kräfte nach der Westergaard-Gleichung bestimmt, siehe Ellingwood (1995).

Eine weitere Gruppe von Einwirkungen umfasst die Betriebslasten, die aus dem Betrieb des Wasserbauwerks bzw. der Schifffahrtsanlage herrührt. Beispiele sind hydrostatische Last, Ausrüstungs-Last und betriebliche Lasten, Ellingwood (1995).

#### 4.3 Widerstände

Materialfestigkeiten und -widerstände für Stahl, Betonstahl und Beton werden durch Lognormalverteilung modelliert, EN 1990 (2002), Grünberg (2004), oder – für untere Quantilwerte - durch eine Weibull-Verteilung, Schüller (1981).

### 5. Anschauungsbeispiel

Um die Ergebnisse der untersuchten unterschiedlichen semi-probabilistischen Bemessungs-Methoden aufzuzeigen, entschied die Arbeitsgruppe PIANC 140, einige Beispiele von einem oder mehreren Mitgliedsländern und in mehr oder weniger Tiefe auszuarbeiten. Typische Beispiele für Wasserbauwerke wie ein massiver Schleusen-Querschnitt, ein Träger eines Hubtors, ein Kaimauer-Wandabschnitt sowie ein massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip wurden nach verschiedenen semi-probabilistischen Normen bearbeitet.

Als Beispiel wird eine massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip gezeigt, Abbildung 3.

Die Wand hat einen Trapezquerschnitt und besteht aus unbewehrtem Beton. Auf der Hochwasser-Seite ist die Wand auf etwa einem Viertel der Wandhöhe im Boden eingebunden. Auf der Rückseite ist die Wand vollständig im Boden eingebettet, der Grundwasserspiegel liegt etwa auf der Hälfte der Wandhöhe. Die Einwirkungen sind das Eigengewicht des Betons als ständige Last, Wasserdruck auf beiden Seiten der Wand als veränderliche Einwirkung sowie der Erddruck als Ruhedruck als ständige Einwirkung angenommen.

Für die Anwendung des amerikanischen LRFD Konzepts wurden die Parameter speziell entwickelt. Normalerweise werden in den USA verschiedene Lastkombinationen wie seltene Hochwasserstände, eine ungewöhnliche und eine extreme Hochwasserlage, zwei verschiedene Erdbeben-Bedingungen und ein Bauzustand betrachtet. In diesem Beispiel wird hier nur das seltene Hochwasser-Ereignis untersucht. Teilsicherheitsbeiwerte wurden analog EM 1110-2-2104 (2003) und EM 1110-2-2105 (1994) bestimmt. Somit ist der Teilsicherheitsfaktor PF für Eigengewicht und vertikalen Erddruck  $PF = 1,2$ , für den Wasserdruck bei Hochwasser, für den Porenwasserdruck und für den seitlichen Erddruck  $PF = 1,6$ . Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände innerhalb der Nachweisformate sind  $PF = 0,9$  für Gleiten,  $PF = 1,0$  für Kippen und  $PF = 0,9$  für die Tragfähigkeit. Die Tragfähigkeit wird durch die Tragfähigkeitstheorie nach Meyerhoff, einer Grundbruch-Theorie, die auf flachen und tiefen Gründungen angewendet werden kann, berechnet.

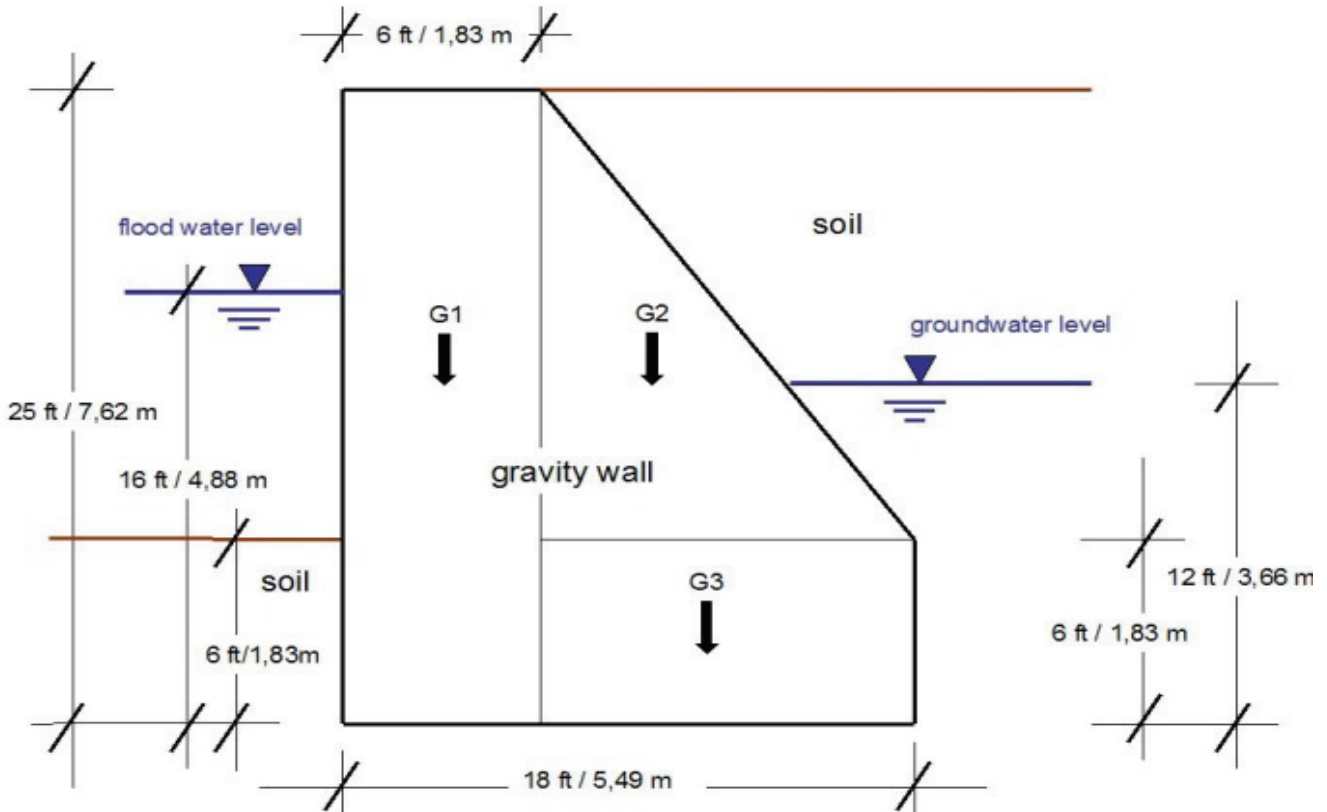


Abbildung 3: Massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem Schwergewichtsprinzip, PIANC WG 140 (2014)

In den Nachweisformaten für Gleiten und Tragfähigkeit werden die Einwirkungen faktorisiert, für Kippen wird mit Gebrauchslasten bemessen. In US-amerikanischen Nachweisen wird häufig ein Verhältnis zwischen Bemessungs-Beanspruchung und Bemessungs-Widerstand gebildet und mit „Sicherheitsfaktor FS“ bezeichnet; da dieser Wert bereits auf faktorisierte Einwirkungen und Widerstände bezogen ist, handelt es sich nicht um einen globalen Sicherheitsfaktor im herkömmlichen Sinn. Für Gleiten wird der Sicherheitsfaktor  $FS_d = 1.89$  berechnet, für die Tragfähigkeit  $FS_d = 1.87$ . Die Lastexzentrizität liegt bei  $e = 1.32$  ft, die kleiner ist als  $L/6 = 3.0$  ft. Dies bedeutet, dass eine Zugzone bzw. ein Klaffen nicht auftreten. Die Bodenspannung wurde zu  $\sigma = 7.26$  ksf (entspricht  $347.6$  kN/m<sup>2</sup>) berechnet.

Die vergleichende Berechnung aus deutscher Sicht verwendete die Einwirkungen aus der amerikanischen Berechnung und kombinierte sie mit den Grenzzustandsfunktionen nach (DIN) EN Normung. Analysiert wurde die Gesamtstabilität nach DIN EN 1997-1 (2009) und die Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 (2011) und DIN 19702 (2013). Für die Gesamtstand-sicherheit wurden die Nachweisforma-te:

- EQU: Kippen
- GEO-2: Gleiten
- UPL: Auftrieb
- SLS: Lastexzentrizität (nur mit charakteristischen Werten)

und für die Tragfähigkeit:

- STR: Druckfestigkeit (Biege- und axiale Kräfte) und Querkraftnachweis

berücksichtigt.

Bemessungssituation ist BS-P, die ständige Bemessungssituation gem. EN 1990 (2002), weil die Verhinderung von Hochwasser das Ziel der Wand ist und daher die Einwirkung „Hochwasser“ mehrmals (mindestens einmal) in der Lebensdauer erwartet werden darf.

Die angesetzten Teilsicherheitsbeiwerte für die Einwirkungen UPL, EQU und GEO -2 aus DIN EN 1997-1 (2009) und STR aus DIN 19702 (2013), sind:

	UPL	EQU			STR/GEO-2
$\gamma_{G,dst}$	1,05	1,10		$\gamma_{G,sub}$	1,35
$\gamma_{G,stab}$	0,95	0,90		$\gamma_{G,inf}$	1,00
$\gamma_{Q,dst}$	1,50	1,50		$\gamma_{Q,sub}$	1,50
$\gamma_{Q,dtb}$	0	0		$\gamma_{Q,inf}$	0 / 0,80 <sup>1)</sup>
				$\gamma_{E0,g}$	1,20
<sup>1)</sup> für Wasser als veränderliche Einwirkung in STR, gem. nach DIN 19702 (2013)					

Tabelle 6: Teilsicherheitsbeiwerte für Aktionen (Beispiel)

und für Widerstände STR aus DIN EN 1992-1-1 (2011) und GEO-2 aus DIN EN 1997-1 (2009):

	STR	GEO-2
$\gamma_{C,pl}$	2,15	
$\gamma_{R,h}$		1,10

**Tabelle 7:** Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstände (Beispiel)

Alle Nachweise ergeben eine ausreichende Bemessung für die Hochwasser-Schutzmauer. Die nachfolgend dargestellten Sicherheitsfaktoren  $FS_d$  aus der deutschen bzw. Eurocode-Nachweisführung sind lediglich zum Vergleich mit den amerikanischen Ergebnissen aufbereitet. Für die Gesamtstandsicherheit (Gleiten) liefert die Vergleichsberechnung eine ebenfalls ausreichende Sicherheit, der Sicherheitsfaktor  $FS_d = 2,05$  (im Vergleich zu US: 1,89). Die Vergleichsrechnung für Kippen führt zu einem Sicherheitsfaktor  $FS_d = 1,72$  (kein direkter Vergleich mit US). Für die Lastexzentrizität wird ein  $e = 0,73$  m (entsprechend zu 2,39 ft, im Vergleich mit US: 1,32 ft) ermittelt, das kleiner als  $L/6 = 0,92$  m ist. Auch hier entstehen weder Zugzone noch Klaffung.

Die maximale Bodenpressung beträgt  $\sigma = 243$  kN / m<sup>2</sup> (im Vergleich zu US: Es 347,6 kN / m<sup>2</sup>). Die Berechnung für die Auftriebssicherheit führt zu einem Sicherheitsfaktor  $FS_d = 3.68$  (kein Vergleich mit US). Die Überprüfung des Grenzzustands für die Tragfähigkeit, hier liegt kein Vergleichswert zur amerikanischen Untersuchung vor, zeigt ebenfalls eine ausreichende Sicherheit.

US-amerikanische und deutsche Nachweisführungen für eine massive Hochwasser-Schutzmauer nach dem jeweiligen Teilsicherheitskonzept führen nicht zu größeren Unterschieden bei Sicherheitsfaktoren oder anderen relevanten Ergebnissen. Die gezeigten Grenzzustände sind oftmals vom gleichen Typ. Die Lastexzentrizität wird in beiden Nachweisführungen mit charakteristischen Werten berechnet. Für weitere Beispiele siehe PIANC (2014).

## 6. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die Untersuchungen der PIANC Arbeitsgruppe 140 zeigte, dass das Teilsicherheitskonzept für die Bemessung von Wasserbauwerken durch alle teilnehmenden Mitgliedsländer angewendet wird. Im Wesentlichen standen in der Arbeitsgruppe das EUROCODE-Konzept und das LRFD-Konzept zur Untersuchung an. Diese semi-probabilistischen Bemessungs-Konzepte scheinen „best practice“ zu sein. Soweit die exemplarischen Beispiele zeigen können, führen die jeweils nationalen Entwurfsmethoden der teilnehmenden Länder für Wasserbauwerke nur zu geringen Unterschieden in den Ergebnissen. Dies ist teilweise auf geringe Unterschiede in den Teilsicherheitsbeiwerten oder in geringfügigen Unterschieden zwischen den jeweiligen Produkten aus dem Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen mit dem für Widerstände,  $\gamma_F * \gamma_M$  bzw.  $\gamma_i * 1/\Phi$ , zu erklären. Bei einigen Nachweisformaten führt die im EURO-

CODE verankerte Regelung bezüglich günstiger/ungünstiger Teilsicherheitsbeiwerte zu etwas größeren Unterschieden. So wird ein Schleusenhalbrahmen aus Stahlbeton nach EUROCODE auf Außen- und Innenseite gleichmäßiger und konsistenter bewehrt als nach LRFD Konzept, was bei etwa gleich großen Kräften und etwa gleich großen Variationskoeffizienten beiderseits des Schleusenhalbrahmens auch vernünftig erscheint, PIANC (2014).

Eine intensivere Analyse der wichtigsten Unterschiede zwischen den bestehenden semi-probabilistischen Normenkonzepten wäre wünschenswert, um mehr Einblick zu erhalten und die oben genannten Aussage zu verallgemeinern.

Ein neuer Aspekt wäre es, für alle Wasserbauwerke oder für gleiche Typen von Wasserbauwerken eine einheitliche Zuverlässigkeit, ggf. auch nach Risikoklassen, festzulegen. Die Notwendigkeit einer internationalen Norm für die Bemessung von Wasserbauwerken wird nicht unbedingt gesehen, zumal sich die zumindest von der PIANC Arbeitsgruppe untersuchten semi-probabilistischen Konzepte ähneln. Derzeit scheint die Eurocode-Bemessung ausgereifter als das LRFD Konzept zu sein.

Falls vorhanden, sollte die Bemessung auf Spezialnormen für Wasserbauwerke zurückgreifen, da diese besondere, zum Teil auf lange Erfahrungen basierende Erkenntnisse berücksichtigen. Vier (USA, CN, NL, D) der sieben teilnehmenden Länder verwenden spezielle Normen, während die anderen die normalen Bauvorschriften anwenden. Aufgrund der bestehenden Eurocodes, die für ein bauartübergreifendes Sicherheitskonzept stehen, sollten spezielle Wasserbauwerksnormen in Europa auf diesen Eurocodes basieren. Dadurch wird eine besondere Harmonisierung von Normen für Wasserbauwerke nicht erforderlich.

Durch die von der PIANC Arbeitsgruppe 140 behandelten Fragestellungen sind ebenfalls einige maritime Aspekte berücksichtigt worden, weil sie sich nicht von denen im Binnenbereich unterscheiden. Maritime Besonderheiten, wie z.B. die Bestimmung von Welleneinwirkungen auf Bauwerke sind nicht intensiv abgedeckt worden.

## Literatur

AASHTO (2012). American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO LRFD bridge design specifications, 6<sup>th</sup> edition, Washington D.C., 2012.

ACI 318 (2011). "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary". American Concrete Institute. 2011.

DIN 19702 (2013). Massive Wasserbauwerke: Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit. Beuth-Verlag, Berlin, 2013.

DIN EN 1992-1-1 (2011). Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; einschließlich Nationaler Anhang, 2011.

DIN EN 1997-1 (2009). Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln; einschließlich Nationaler Anhang. 2009.

Ellingwood, B.R. (1995). Event Combination Analysis for design and rehabilitation of U.S. Army Corps of Engineers Navigation Structures. Final report ITL-95-2, July 1995.

EM 1110-2-2104, (2003). Strength design for reinforced concrete hydraulic structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 2003.

EM 1110-2-2105, (1994). Design for hydraulic steel structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 1994.

EM 1110-2-2106, (2008). Design for precast and prestressed concrete for hydraulic structures. US Army Corps of Engineers, Washington D.C., 2008.

EN 1990 (2002). Eurocode - Basis of structural design; EN 1990:2002/A1:2005 Eurocode - Basis of structural design.

EN 1991-1-7 (2006). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-7 : General actions – Accidental actions.

EN 1992 (2004).: Eurocode 2: Design of concrete structures – Parts 1-1 and 1-2.

EN 1993 (2004).: Eurocode 3: Design of steel structures – Different Parts.

Fischer L. (2001). Das neue Sicherheitskonzept im Bauwesen - ein Leitfaden. Bautechnik Spezial, Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 2001.

Gruenberg J.(2004). Grundlagen der Tragwerksplanung – Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln für den konstruktiven Ingenieurbau, Erläuterungen zu DIN 1055-100. Deutsches Institut für Normung, Beuth-Verlag, Berlin 2004.

PIANC (2014), Report “Semi probabilistic design of hydraulic inland structures”, PIANC, InCom WG 140, Brussels (in preparation).

Plate E. (1993). Statistik und angewandte Wahrscheinlichkeitstheorie für Bauingenieure. Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1993.

Rackwitz R. (1996). Der Ingenieurbau, Band 9: Tragwerkszuverlässigkeit, Einwirkungen. (Hrsg.) Mehlhorn, G. Verlag Ernst&Sohn, Berlin, 1996.

Schüller G. (1981). Einführung in die Sicherheit und Zuverlässigkeit von Tragwerken. Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin – München, 1981.

Siemes, A. ; Vrouwenvelder, A. (1984). Veiligheid van bouwconstructies. TNO-rapport B1-84-36, TNO, Delft, juli 1984.

Spaethe G. (1992). Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen. Verlag Springer, Wien – New York, 1992.

### Verfasser

**Dipl.-Ing. Claus Kunz**  
Bundesanstalt für Wasserbau  
Kußmaulstraße 17  
76187 Karlsruhe  
Tel.: 0721/9726-3200  
E-Mail: [claus.kunz@baw.de](mailto:claus.kunz@baw.de)