

I Sicherheit, Risikoakzeptanz, Nutzungs-, Lebensdauer und das richtige Maß

Johann-Dietrich Wörner, Darmstadt

Konrad Bergmeister, Wien

Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz.

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner

© 2013 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2013 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.



1 Begriffsbestimmungen und Einführung

Bauwerke müssen sicher sein. Dies ist eine der grundlegendsten Anforderungen an das technische Erzeugnis Bauwerk. Eng hängt die Definition der Sicherheit mit der Akzeptanz des verbleibenden Risikos zusammen. Als Lebensdauer für Bauwerke und technische Anlagen wird der Zeitraum bis zum Erreichen eines noch akzeptablen Sicherheitsniveaus bezeichnet.

Die Nutzungsdauer, oft als geplante Nutzungsdauer (design working life) bezeichnet, definiert die nutzbare Zeit unter Gewährleistung der Funktionalität unter Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit. Dabei muss der Aufwand für die Instandhaltung und der mögliche Ersatz oder die Erneuerung einer baulichen Anlage in einem angemessenen, wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis stehen. Allgemein wird vorausgesetzt, dass die technische Lebensdauer „ t_{lif} “ mindestens gleich oder größer als die geplante Nutzungsdauer „ t_n “ ist [1].

$$t_{lif} - t_n \geq 0 \quad (1)$$

Diese Betrachtung zeigt die enge Verflechtung der Begriffe. Die Vorgehensweise bei einem Nachweis für eine technische Lebensdauer oder bei einer geplanten Nutzungsdauer ist vom schöpferischen Prozess des Strukturentwurfs, von den Baustoffen, den Baukonstruktionen, den Einwirkungen und ihren zeitlichen Auswirkungen auf die Eigenschaften von Baustoffen und Bauteilen sowie noch einigen nicht identifizierbaren oder quantifizierbaren Parameter abhängig. Im Vergleich zu anderen technischen Erzeugnissen wird die Frage der ausreichenden Sicherheit und der Lebensdauer von Bauwerken in der Regel aber nicht mehr von der Öffentlichkeit wahrgenommen. Dies obwohl Forderungen zum Nachweis einer bestimmten Lebensdauer eines Bauwerks sowohl eine technische als auch eine juristische Bedeutung haben. Anforderungen an Bauwerke und spezifisch auch an die Lebensdauer werden in Europa in den Eurocodes sowie national, wie beispielsweise in Deutschland und Österreich, in den Landesbauordnungen geregelt.

1.1 Nutzungsdauer, Lebensdauer

In den Eurocodes werden die Grenzzustände der Tragsicherheit und der Gebrauchstauglichkeit über eine bestimmte Nutzungsdauer definiert. Dabei werden für diese Grenzzustände bestimmte

Zuverlässigkeiten gefordert und die maximal akzeptierbaren Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. die minimalen Sicherheitsindizes über eine bestimmte Lebensdauer definiert. Das Niveau dieser Versagenswahrscheinlichkeit wurde unter Berücksichtigung bestimmter Gesichtspunkte des akzeptablen Risikos festgelegt.

In Abschnitt 2.1 der EN 1990 (Basis of structural design) wird definiert:

„Ein Tragwerk ist so zu planen und auszuführen, dass es während der Errichtung und in der vorgesehenen Nutzungszeit mit angemessener Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit den möglichen Einflüssen standhält und die geforderten Gebrauchstauglichkeitseigenschaften behält. Bei der Planung und Berechnung des Tragwerks sind ausreichende Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit zu beachten.“

Zur Gewährleistung einer definierten Zuverlässigkeit über eine technische Lebensdauer von Bauwerken müssen nun die einzelnen Bauteile, die Verbindungselemente und die Bausysteme eine definierte Qualität aufweisen. Durch die Normen werden die Sicherheitsstandards der gängigen Bauteile abgebildet. Im Falle von Bauprodukten, für die es keine normenmäßige Erfassung der Wirkungsweisen und der Bemessung gibt, wurden auf europäischer Ebene durch die EOTA entsprechende Leitlinien oder CUAPs für europäische technische Zulassungen (Guidance Documents) herausgegeben. Folgende Dokumente sind in Bezug auf die Nutzungsdauer relevant:

- EOTA Guidance Document 002: Annahmen zur Nutzungsdauer von Bauprodukten in Leitlinien für europäische technische Zulassungen und harmonisierte Normen,
- EOTA Guidance Document 003: Bewertung der Nutzungsdauer von Bauprodukten.

Am 4. April 2011 wurde die neue Bauproduktenverordnung (EU 305/20011) im Europäischen Amtsblatt veröffentlicht. Sie löst die Bauproduktenrichtlinie ab, die bisher die rechtliche Grundlage der CE-Kennzeichnung war. Diese Verordnung ersetzt ab 1. Juli 2013 die alte Ratsrichtlinie 89/106/EWG, die sogenannte Bauproduktenrichtlinie (BPR) aus dem Jahr 1988. In Österreich erfolgte die Umsetzung durch das Bauproduktengesetz (BauPG). Im Anhang 1 der europäischen Bauproduktenverordnung werden die Grundanforderungen an Bauwerke treffend beschrieben:

Beton-Kalender 2013: Lebensdauer und Instandsetzung – Brandschutz.

Herausgegeben von Konrad Bergmeister, Frank Fingerloos und Johann-Dietrich Wörner

© 2013 Ernst & Sohn GmbH & Co. KG. Published 2013 by Ernst & Sohn GmbH & Co. KG.

„Bauwerke müssen als Ganzes und in ihren Teilen für deren Verwendungszweck tauglich sein, wobei insbesondere der Gesundheit und der Sicherheit der während des gesamten Lebenszyklus der Bauwerke involvierten Personen Rechnung zu tragen ist. Bauwerke müssen diese Grundanforderungen an Bauwerke bei normaler Instandhaltung über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum erfüllen.“

Wesentlich ist auch die Bedeutung der Lebensdauer und des Instandsetzungsaufwandes [2], wobei der Begriff der Instandhaltung aus der zurückgezogenen DIN VDE 31000-2 [3] zitiert wird (ID 1.3.3):

„(1) Instandhaltung ist ein Bündel von vorbeugenden und sonstigen Maßnahmen, die an dem Bauwerk durchgeführt werden, damit es während der Nutzungsdauer all seine Funktionen erfüllen kann.“

(2) Normale Instandhaltung schließt in der Regel Inspektionen ein und findet zu einem Zeitpunkt statt, zu dem die anfallenden Kosten unter Berücksichtigung der Folgekosten in einem angemessenen Verhältnis zum Wert des betreffenden Teils des Bauwerks stehen.“

Die Zeitspanne, in welcher ein Bauwerk mit einer bestimmten Zuverlässigkeit die geforderte Funktionalität bzw. die geforderte Nutzbarkeit erfüllt, wird als Nutzungsdauer bezeichnet (ID 1.3.5)

„(1) Die Nutzungsdauer ist der Zeitraum, während dessen die Leistungsfähigkeit des Bauwerks (oder seiner Teile) auf einem Stand gehalten wird, der mit der Erfüllung der wesentlichen Anforderungen im Einklang steht.“

(2) Eine wirtschaftlich angemessene Nutzungsdauer setzt voraus, dass alle maßgeblichen Faktoren (unter Berücksichtigung von Aufwand und Nutzen) berücksichtigt werden, wie z. B.:

- Entwurfs-, Bau- und Nutzungskosten,
- durch verhinderte Nutzung entstehende Kosten,
- Risiken und Folgen des Versagens des Bauwerks während seiner Nutzungsdauer und Versicherungskosten zur Deckung dieser Risiken,
- planmäßige Teilerneuerung,
- Inspektions-, Instandhaltungs-, Wartungs- und Reparaturkosten,
- Betriebs- und Verwaltungskosten,
- Entsorgung,
- Umweltaspekte.“

In der EN 1990:2002 wird die geplante Nutzungsdauer wie folgt definiert:

„Angenommene Zeitdauer, innerhalb derer ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist.“

In der ISO 8930:1991 [4] wird die Nutzungsdauer von Bauwerken wie folgt definiert (GP F 3.1):

„Die Nutzungsdauer von Bauwerken ist der Zeitraum, über den die Leistung der Bauwerke auf einem der Erfüllung der wesentlichen Anforderungen angemessenen Niveau aufrechterhalten werden soll.“

Insgesamt kann festgehalten werden, dass Bauprodukte einen wesentlichen Einfluss auf die Nutzungsdauer der daraus hergestellten Bauwerke haben.

Ganz wesentlich ist, dass die Nutzungs- bzw. die Lebensdauer von Bauwerken vom Systementwurf und damit von der Genialität des planenden Ingenieurs abhängt. Die Nutzungsdauer und Dauerhaftigkeit von Bauprodukten sind mitbestimmend, weshalb in den europäischen technischen Spezifikationen, in den harmonisierten europäischen Normen (hEN) und in den europäischen technischen Zulassungen (ETA) die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten festgeschrieben wurde. Allgemein wird die Dauerhaftigkeit von Bauprodukten über die Funktionalität unter definierten Anwendungsbedingungen für eine bestimmte Nutzungsdauer, beschrieben. Die Nutzungsdauer wird auf der Grundlage von Erfahrungswerten, sowie von wissenschaftlich statistisch abgesicherten Datensätzen, festgelegt. Für die Nutzungsdauer gibt es aber keine gesetzliche Absicherung oder Gewährleistung eines Herstellers für eine konkrete Anwendung.

Die grundlegenden Systemscheide mit den Werkstoffauswahlen, den eingetragten Spannungs- und Verformungszuständen bedingt durch die Herstellung und den Bau sind die Basisvoraussetzungen für die Nutzungsdauer. Für die verschiedenen Ingenieurbauwerke gibt es eine Serie von Monitoring- und Managementsystemen zur Inspektion und Erhaltung während der Nutzungsdauer. Ziel ist es dabei, während der Nutzungsdauer die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit unter Berücksichtigung eines bestimmten Sicherheitsniveaus (z. B. Tragfähigkeit: $P_f < 10^{-6}/\text{Jahr}$; Gebrauchstauglichkeit: $P_f < 10^{-3}/\text{Jahr}$) zu gewährleisten und Schäden zu vermeiden.

Die Nutzungsdauer wird manchmal auch als konstruktive Lebensdauer „structural lifetime“ bezeichnet [5].

Die geplanten Nutzungsdauern von Bauwerken oder Bauteilen werden im Eurocode EN 1990:2002, Tabelle 2.1 angeführt.

Die Lebensdauer „ t_{tr} “ von Ingenieurtragwerken umspannt die gesamte Zeit vom schöpferischen Prozess eines Entwurfs über die Planungen, Genehmigungen, Bau, Inbetriebnahme, Betrieb bis hin zum Abbruch.

$$t_{tr} = t_0 \text{ (Entwurf, Planung, Genehmigung)} + t_b \text{ (Bau)} + t_n \text{ (Nutzung)} \quad (2)$$

Tabelle 1. Angaben zu geplanten Nutzungsdauern von Bauwerken oder Bauteilen nach Eurocode EN 1990:2002, Tabelle 2.1

Klasse der Nutzungsdauer	Planungsgröße der Nutzungsdauer (in Jahren)	Beispiele
1	10	Tragwerke mit befristeter Standzeit
2	10 bis 25	Austauschbare Tragwerksteile, z. B. Kranbahnträger, Lager
3	15 bis 30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
4	50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
5	100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

Entscheidend für die Lebensdauer sind die Qualitäten des Entwurfs, der Planung und des Baus. Diese „Lebensphasen“ müssen entsprechend sorgfältig mit bestem Ingenieurwissen in einem respektvollen Umgang mit anderen Wissensgebieten, der Natur und den Ressourcen betreut werden. Jede dieser Lebensphasen müssen Kosten zugeordnet werden. Die Kostenstruktur eines Projekts kann wie folgt angegeben werden [6]:

$$Z(p) = B(p) - C_0(p) - L(p) \quad (3)$$

mit

$B(p)$ Nutzen des Bauwerks

$C_0(p)$ Baukosten

$L(p)$ Wertverlust bei einem Ausfall oder beim Ende der Lebensdauer; dieser Wertverlust wird in Form von Verlustkosten in Zusammenhang mit dem Eintreten der Versagenswahrscheinlichkeit ermittelt:
 $(p) = C_1$ (Cost of losses)
 $\cdot P_f$ (probability of failure)

Der Vektor „ p “ beschreibt sämtliche Bemessungsparameter für eine bestimmte Nutzungsdauer.

Die Gleichung der Kostenstruktur wurde in der Literatur in Zusammenhang mit verschiedenen Grenzzustandsfunktionen beschrieben.

Der Begriff der Lebenszykluskosten umfasst wiederum den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, vom Entwurf über die Herstellung, den Betrieb über die Instandhaltung, den Abbruch und die Entsorgung. Dabei werden alle Kostenanteile summativ erfasst. In Deutschland wurde der Begriff der Lebenszykluskosten als Kriterium für nachhaltige Gebäude [7] eingeführt. Dabei führen König et al. [8] Folgendes aus: „Für die Lebenszykluskostenberechnung werden die – total cost of ownership – also die Kosten eines selbstnutzenden Eigentümers verstanden“. Dabei stehen für die Be-

rechnung der Lebenszykluskosten (Life Cycle Costing) für den Gebäudebereich sowohl Methoden als auch Datenbanken zur Prognose der Nutzungskosten zur Verfügung [9, 10].

1.2 Sicherheit – Risiko

Die Sicherheit eines Bauwerks und die damit zusammenhängende Akzeptanz eines verbleibenden Risikos basiert auf wahrscheinlichkeitstheoretischen Festlegungen. Dabei wird die Aufrechterhaltung der Funktionen in Bezug auf Grenzzustände gefordert. Der Begriff der Sicherheit findet sich auch in verschiedenen technischen Normen. Beispielfhaft genannt seien DIN EN 61508-4 [11], DIN EN 14971 [12] oder DIN VDE 31000-2 [3]. Die DIN VDE 31000-2 versteht unter Sicherheit S eine Sachlage, bei der das vorhandene Risiko vorh Risk nicht größer als das Grenzkrisiko zul Risk ist:

$$\text{vorh Risk} \leq \text{zul Risk} \Rightarrow S \quad (4)$$

Die Sicherheit im Allgemeinen ist systemisch gestaffelt und steht in Zusammenhang mit den Ausgaben zur Gewährleistung für Sicherheit, mit gesetzlichen Regelungen und mit der gesellschaftlichen Risikoakzeptanz [13].

Ein Bauwerk wird als sicher eingestuft, wenn bei vergleichbaren Situationen das vorhandene Risiko ein von der Gesellschaft akzeptiertes verbleibendes Risiko nicht übersteigt (DIN 1055-9, Abs. 5.1 (3), Eurocode 1).

Mathematisch definiert man Risiko im klassischen Sinne als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit (Häufigkeit) „ P “ eines schadens erzeugenden Ereignisses und dem Schaden bzw. der Konsequenz C , der/die durch das Ereignis verursacht wird:

$$\text{Risk} = P \cdot C \quad (5)$$

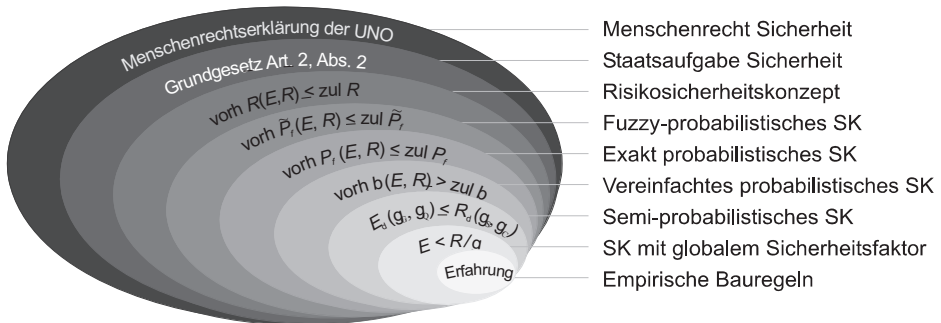


Bild 1. Staffellung von Sicherheitskonzepten (aus [13])

Die Definitionen des Begriffs Risiko können wie folgt kurz beschrieben und klassifiziert werden nach [15, 16]:

1. Risiko als Wahrscheinlichkeit eines Schadens,
2. Risiko als Ausmaß eines Schadens,
3. Risiko als Funktion von Wahrscheinlichkeit und Ausmaß des Schadens,
4. Risiko als Varianz der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller möglichen Konsequenzen einer Entscheidung,
5. Risiko als Semivarianz der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller möglichen Konsequenzen einer Entscheidung,
6. Risiko als gewichtete lineare Kombination der Varianz und des Erwartungswertes der Wahrscheinlichkeitsverteilung aller möglichen Konsequenzen einer Entscheidung.

Als einen Sonderfall beinhaltet der Begriff des Risikos den Begriff des Grenzkrisikos. Dieser Begriff war z. B. Inhalt der Definition des Begriffs Sicherheit. Unter dem Vergleichs- oder Grenzkrisiko versteht man allgemein jenes Risiko, welches von der Gesellschaft gerade noch toleriert wird bzw. welches implizit durch die Technik akzeptiert wird [16].

1.3 Verbleibendes Risiko, F-N-Diagramme

Die Gefahren zu akzeptieren hat ein bewusst akzeptiertes verbleibendes Risiko zur Folge. Aufgrund der subjektiv unerkannten, der vernachlässigten Gefahren und aufgrund von nicht geeigneten Maßnahmen entstehen die durch menschliche Fehlhandlungen verbleibenden Risiken. Diese verbleibenden Risiken sind ein vorhandener Bestandteil unseres Lebens und sollten durch entsprechende Vorkehrungen so klein wie möglich gehalten werden. Das vorhandene verbleibende Risiko umfasst die bewusst akzeptierten und die

aus menschlichen vielfältigen Fehlhandlungen resultierenden Risiken.

Dabei werden drei Ebenen unterschieden:

- das bewusst akzeptierte Risiko,
- die Sicherheit durch Maßnahmen,
- die Gefahren durch menschliche Fehlhandlungen.

Das von der Gesellschaft akzeptierte Risiko kann mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\text{Risk}_{\text{ak}} \leq \text{Risk}_{\text{vorh}} = P_f \cdot C \quad (6)$$

mit

Risk_{ak}	akzeptables Risiko
$\text{Risk}_{\text{vorh}}$	vorhandenes Risiko
P_f	Wahrscheinlichkeit eines Schadens
C	Schadens- bzw. Kostenumfang

Die Erfahrung und Beobachtung der gesellschaftlichen Reaktionen nach verschiedenen Katastrophen zeigt, dass der Mensch die Höhe des akzeptablen Risikos von subjektiven Überlegungen abhängig macht.

Bei der Beurteilung der Sicherheit muss zwischen der subjektiven Wahrnehmung und den Eintretensfällen von Versagen oder Todesfällen bewusst unterschieden werden. Soll der Risikoparameter als Sicherheitsparameter erfolgreich eingesetzt werden, so muss er das Sicherheitsempfinden und -bedürfnis der Bevölkerung in ausreichendem Maß widerspiegeln. Zur Verbesserung der subjektiven Risikobewertung, die auch als Risikoaversion bezeichnet wird, wurden sogenannte F-N-Diagramme entwickelt [17]. Die Risikoforschung erhielt damals große Impulse durch den Bau von Atomkraftwerken. Besonders bekannt wurden F-N-Diagramme im sogenannten Rasmussen-Report Anfang der 70er-Jahre des letzten Jahrhunderts.

Objektives Gefährdungspotenzial

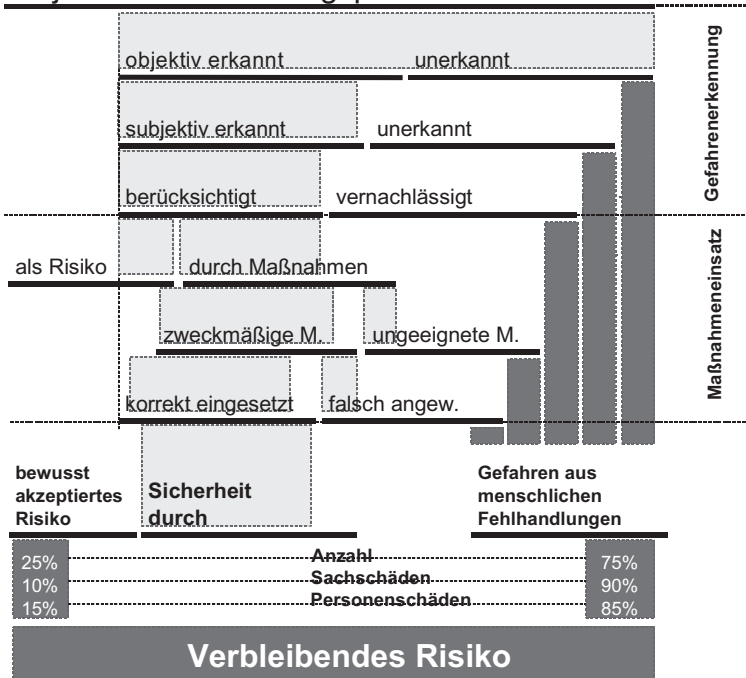


Bild 2. Gefährdungspotenzial

Heute werden solche F-N-Diagramme vielfach zur Beurteilung der Sicherheit in Tunneln verwendet.

Zur Entwicklung eines solchen Diagramms werden zunächst Daten über Unfälle mit Angabe der Schäden bzw. Opfer in der Vergangenheit oder Berechnungen benötigt, die solche Daten ergeben. Die Daten, Opferanzahl und Unfallsauftretenshäufigkeit werden zunächst nach steigender Opferanzahl sortiert. Anschließend werden die Daten kumuliert, d. h. die Häufigkeit für die Opferzahl N und mehr bestimmt und sortiert. Diese Datenpaare werden grafisch in dem F-N-Diagramm dargestellt.

Der Nachweis der ausreichenden Sicherheit erfolgt mithilfe der F-N-Diagramme. Für den Nachweis werden Vergleichslinien benötigt, die für eine Vielzahl von besonderen Ereignissen entwickelt wurden. Dabei können durch diese Zielkurven akzeptable und nicht akzeptable Bereiche definiert werden. Dazwischen kann noch ein Bereich, der unter gewissen Bedingungen zulässig ist, ein sogenannter ALARP-Bereich, ausgewiesen werden (as low as reasonable possible). Trägt

man nun die ermittelte Kurve in ein solches Diagramm ein, erkennt man, ob die Kurve in einem zulässigen Bereich liegt [18].

Inzwischen wurden verschiedene Varianten entwickelt, wo auf der x-Achse bei F-D-Diagrammen der Schaden, bei F-PAR-Diagrammen die Anzahl der Menschen in einem gefährdeten Bereich, die F-t-Diagramme die Zeit, um die Schäden zu beseitigen und bei F-E-Diagrammen der Energieverlust angegeben werden. Neben dem direkten Nachweis der Sicherheit über F-N-Ziellinien ist es auch möglich, aus den Diagrammen Zielwerte für Sterbe- oder Versagenswahrscheinlichkeiten zu ermitteln. So kennt man heute Diagramme, die auf der x-Achse die Schadenskosten, einen Schadensparameter aus verschiedenen anderen Parametern, die Anzahl durch den Schaden betroffener Menschen (PAR) oder die Zeit bzw. die Kosten für die Schadensbeseitigung zeigen.

Vrijling et al. [19] haben durch Umformungen der Formeln von F-N-Kurven und durch die Wahl gewisser Annahmen eine Gleichung entwickelt, mit der man invers die operative Zielversagenswahrscheinlichkeit

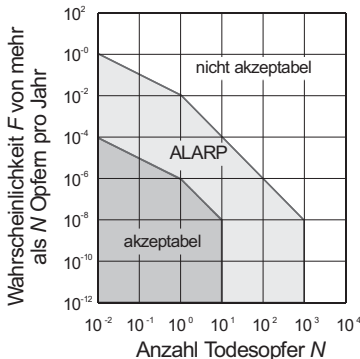


Bild 3. Beispiel einer Nachweiskurve (Groningen-Kurve 1978, aus [13])

scheinlichkeit P_f von Bauwerken ermitteln kann. *Vrijling et al.* geben zunächst folgende Formel für ein akzeptables Risiko an:

$$E(N_{di}) + k \cdot \sigma(N_{di}) < \beta_i \cdot 100 \quad (7)$$

mit

$E(N_{di})$ mittlere Opferanzahl

$\sigma(N_{di})$ Standardabweichung der Opferanzahl

k Faktor: zu 3 gewählt

β_i Politikfaktor: abhängig vom Grad der Freiwilligkeit des Risikos
Wird das Risiko bewusst und absolut freiwillig eingegangen, liegt der Wert bei 100, wird das Risiko unbewusst und absolut unfreiwillig eingegangen, so liegt der Wert bei 0,01

Weiterhin soll gelten:

$$E(N_{di}) = N_A \cdot P_f \cdot P_{dli} \cdot N_{Pi} \quad (8)$$

$$\sigma^2(N_{di}) = N_A \cdot P_f \cdot (1 - P_f) \cdot (P_{dli} \cdot N_{Pi})^2 \quad (9)$$

mit

N_A Anzahl der Bauteile/Bauwerke in einem Land

N_{Pi} Anzahl der bei einem Versagen gefährdeten Menschen

P_{dli} Sterbewahrscheinlichkeit für die gefährdeten Menschen

P_f Versagenswahrscheinlichkeit des Bauteils/Bauwerks

Das Prinzip „Technisches Risiko ist die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadens multipliziert mit dem Schadensumfang“, wird in der Ingenieurpraxis einerseits indirekt durch Teilsicherheitsbeiwerte

bei der Bemessung und andererseits durch konstruktive Regeln umgesetzt [20]:

1. Beschränkung der Versagenswahrscheinlichkeit durch Einführung von Sicherheitsbeiwerten (globale Sicherheitsbeiwerte oder Teilsicherheitsbeiwerte) und gleichzeitige Formulierung von materialspezifischen Konstruktionsregeln.
2. Definition der vertretbaren Versagenswahrscheinlichkeiten in grober Abhängigkeit von Schadensauswirkungen.

Mittels integrierten Ansätzen bei den Sicherheitskonzepten (s. Abschn. 3.1 Gesellschaftliche Relevanz) können auch die Aspekte des zeitlichen Verhaltens über die Nutzungsdauer und der gesellschaftlichen Relevanz berücksichtigt werden.

1.4 Lebensqualitätsparameter

Mit den F-N-Diagrammen können technische und natürliche Risiken erfasst und beispielsweise für Tunnelprojekte sinnvoll eingesetzt werden. Bei gesundheitlichen Risiken müssen aber der Lebensraum und die Umweltbedingungen des Menschen berücksichtigt werden. Zusätzlich haben auch soziale Umstände und Netzwerke eine Auswirkung auf die mittlere Lebenserwartung. Diese Erkenntnis führt dazu, die Art und Weise, wie wir leben, also unsere Lebensqualität als ein Risikomaß für Menschenleben zu verstehen. Die Definition des Begriffes Lebensqualität ist jedoch mit erheblichen Schwierigkeiten verbunden. In der Dissertation von *Hoffmann-Koch* [21] wurde die Lebensqualität als Messparameter im medizinischen Bereich untersucht und allgemein im Konsens mit anderen Autoren [22, 23] folgendermaßen definiert:

- psychisches Befinden (z. B. Angst, Depressionen, Verhaltensstörungen),
- soziales Befinden (z. B. Partnerschaftsbeziehungen, Kontakte zu Mitmenschen),
- Leistungsfähigkeit in unterschiedlichen Bereichen des alltäglichen Lebens (z. B. Beruf, Haushalt, Freizeit),
- körperliche Verfassung (z. B. Gesundheitszustand, Beschwerden).

Hierbei wird die Lebensqualität primär aus der Sicht der Betroffenen im Sinne einer erlebten Gesundheit betrachtet, was einer gesundheitsbezogenen Lebensqualität entspricht.

Wichtig ist aber neben der passiven Empfindung die aktive Gestaltung der Lebensqualität [24].

Im allgemeinen Sprachgebrauch wird mit Qualität des Lebens vorwiegend der Grad des Wohlbefindens eines Menschen oder einer Gruppe von Menschen beschrieben und der unmittelbare Lebensraum damit verstanden.

Der Lebensqualitätsparameter von *Nathwani, Lind, Pandey* [25] gestattet im Bauwesen z. B. die Beurteilung von baulichen Verstärkungsmaßnahmen hinsichtlich ihrer Effektivität. Dabei wird allerdings nicht die Lebensqualität einer einzelnen Person berücksichtigt, sondern jene innerhalb einer Region oder eines Landes. Sinnvoll sind diejenigen Maßnahmen, die zu einer Erhöhung der Lebensqualität führen.

Vernachlässigt man aber diese langfristige Entwicklung und geht stattdessen davon aus, dass die Veränderung der Lebensqualität allein durch die geplante Maßnahme erfolgt, dann kann man basierend auf dem Lebensqualitätsindex eine Formel entwickeln, die die maximalen Kosten einer baulichen Schutzmaßnahme in Abhängigkeit verschiedener Parameter angibt:

$$C_{\max} = \frac{1-w}{w} \cdot \frac{C_F \cdot N_F}{M} \cdot g \cdot (P_{f1} - P_{f2}) \quad (10)$$

mit

$C_{\max}$ maximale Kosten

C_F Formfaktor für die Sterbeverteilung in dem Land/der Region

N_F Anzahl der bedrohten Menschen

M mittlere Sterberate in dem Land/der Region

P_{f1} operative Versagenswahrscheinlichkeit vor der baulichen Schutzmaßnahme

P_{f2} operative Versagenswahrscheinlichkeit nach der baulichen Schutzmaßnahme

Die Lebensqualitätsparameter stehen in einem Verhältnis mit den Schutzmaßnahmen für den Lebensraum, die der Gesetzgeber festlegt. Dabei genügt aber nicht nur die Definition von Grenzwerten, sondern diese müssten auch überwacht und Korrekturmaßnahmen vollzogen werden. Beispielsweise werden Lebensräume in der Nähe von Hochleistungsautobahnen mit viel Güterverkehr erwähnt, wo nur durch eine quantitative Limitierung eine Verbesserung eintreten kann. Dies kann jedoch volkswirtschaftliche Konsequenzen hervorrufen. Eine konsequente Verbesserung könnte durch eine Verlagerung des Güterverkehrs von der Straße auf die Bahn erreicht werden, wodurch die Volkswirtschaft aufrecht erhalten und der Lebensraum gezielt verbessert werden kann [28]. Die Durchführung von Schutzmaßnahmen verursacht Kosten und kann bei Infrastrukturprojekten nur über die Betrachtung über den gesamten Nutzungsraum zu einem ausgewogeneren Verhältnis zwischen Aufwand und Nutzen führen.

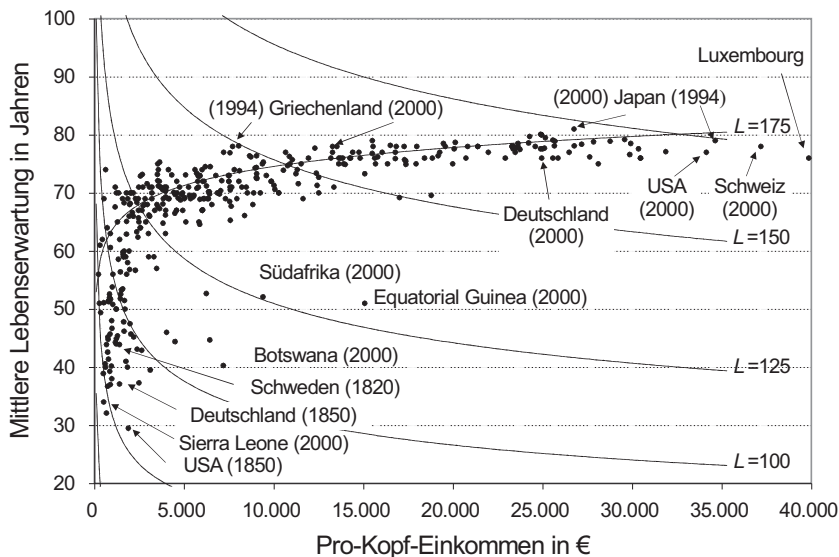


Bild 4. Pro-Kopf-Einkommen, mittlere Lebenserwartung und Lebensqualitätsindex für 170 Länder (aus [26, 27])

2 Zuverlässigkeit und Sicherheitskonzepte im Konstruktiven Ingenieurbau

2.1 Zuverlässigkeitsmethoden

Die Zuverlässigkeit einer Konstruktion ist durch die Einwirkung S und durch deren Widerstand R charakterisiert. Für statische Fälle tritt Versagen dann ein, wenn der Widerstand kleiner als die Einwirkung wird: $S < R$. Versagen an einer Struktur ist nicht unbedingt an den Verlust der Tragsicherheit gebunden. Versagen kann sich auf den Verlust der Gebrauchstauglichkeit (z. B. Durchbiegungen, Schwingungen etc.) als auch auf den Verlust von allgemeinen Anforderungen (z. B. Lärmemission, Wirtschaftlichkeit, Ästhetik etc.) beziehen. Hierzu werden je nach Anforderung Grenzzustandsfunktionen $g = R - S \geq 0$ definiert, die den Versagensbereich vom Überlebensbereich trennen.

Bei der Beurteilung von Konstruktionen ist es wesentlich, zwischen den beiden Begriffen Sicherheit und Zuverlässigkeit klar zu unterscheiden. Sicherheit, ein qualitativer Begriff, bezieht sich in erster Linie auf das Risiko von Personenschäden. Zuverlässigkeit ist hingegen eine quantifizierbare Größe und wird daher ursächlich mit Konstruktionen, Objekten, Prozessen in Verbindung gebracht.

Die klassische Zuverlässigkeitstheorie berücksichtigt im Allgemeinen nicht Versagensfälle aus menschlichen Fehlleistungen. Grund dafür ist, dass menschliche Fehlleistungen nur sehr schwer quantifizierbar sind und menschliche Fehlleistungen nur durch erhöhte Qualitätssicherung reduziert werden können.

Die Ermittlung der Zuverlässigkeit einer Konstruktion ist mit der Auswertung der Grenzzustandsbedingung – Integration des Versagensbereiches $g < 0$ – verbunden. Diese Aufgabe ist mittels folgender Verfahren lösbar:

- analytische Verfahren,
- direkte Integration,
- Näherungsverfahren,
- Simulationsverfahren.

Die analytischen Verfahren können nur für Grenzzustandsformulierungen herangezogen werden, welche wenige Variable beinhalten. Aus diesem Grund ist das Verfahren für übliche Konstruktionen des Ingenieurbaus unpraktikabel.

Die direkte Integration ist ebenfalls nur für einen beschränkten Kreis an Anwendungen geeignet, da der Rechenaufwand für eine steigende Anzahl an Zufallsvariablen und für unregelmäßige Formen des Integrationsgebietes D_f dramatisch ansteigt.

Die Näherungsverfahren bedienen sich meist einer Approximation der Grenzzustandsfunktion durch eine Ersatzfunktion im Bereich des Bemessungspunktes. Dies bringt den Vorteil, dass die Versagenswahrscheinlichkeit P_f in geschlossener Form berechnet werden kann.

Das First-Order-Second-Moment(FOSM)-Verfahren nähert die Grenzzustandsfunktion durch eine lineare Funktion im Bemessungspunkt an und bedient sich bei den Rechenroutinen der statistischen Momente 1. und 2. Ordnung [29]. Die Verfahren nach *Basler* und *Cornell* bzw. *Hasofer* und *Lind* beruhen auf diesen Grundsätzen.

Für das FOSM-Verfahren werden Taylorreihenentwicklungen zur Approximation der Grenzzustandsfunktion verwendet. Wird die Taylorreihe nach dem ersten Term abgebrochen, spricht man von Näherungsverfahren der Zuverlässigkeitstheorie 1. Ordnung (First Order Reliability Method FORM) bzw. wird die Taylorreihe nach dem zweiten Term abgebrochen, spricht man von dem Näherungsverfahren 2. Ordnung (Second Order Reliability Method SORM). Im Normenwesen werden die Verfahren 1. Ordnung sehr häufig zur Kalibrierung der Bemessungswerte herangezogen. Sie werden in den Europäischen Normen als Stufe-II-Verfahren bezeichnet.

Neben den bisher erwähnten analytischen Verfahren zur Lösung der wahrscheinlichkeitstheoretischen Problemstellungen existiert auch die Klasse der Simulationsverfahren, welche sich zur Lösung der wahrscheinlichkeitstheoretischen Problemstellung statistischer Mittel bedient. Mittels wiederholter Einzelberechnungen ist es möglich, durch Vergleich der Versagensfälle mit den Überlebensfällen, die Versagenswahrscheinlichkeit P_f abzuleiten. Zu den bekanntesten Verfahren dieser Klasse gehört die Monte-Carlo-Simulation, gefolgt von zahlreichen weiterentwickelten Techniken zur Reduktion der Sampleanzahl. In den Europäischen Normen werden diese Methoden als Stufe-III-Verfahren bezeichnet.

In der direkten Verknüpfung mit nichtlinearen Finiten Elementen können mittels eines Interaktionsalgorithmus bei jedem Lastschritt die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten eines Versagens bzw. das Zuverlässigkeitsniveau bestimmt werden [30].

2.2 Nachweiskonzepte im Ingenieurbau

Die Bemessung von Baukonstruktionen erfolgt auf der Grundlage des semiprobabilistischen Sicherheitskonzeptes mit Teilsicherheitsbeiwerten; in seltenen Fällen werden die Nachweise mit probabilistischen Methoden durchgeführt.

Wichtig ist die Erkenntnis, dass bei allen sicherheitstheoretischen Berechnungen sowohl die Ein-

gangparameter als auch die Modellierung mit Unsicherheiten behaftet ist. Deshalb sollen die errechneten Eintrittswahrscheinlichkeiten oder die abgeleiteten Sicherheitsindizes als Anhaltswerte und nicht als auf Kommastellen genaue Rechenwerte für die Beurteilung gesehen werden.

Neben der Nachvollziehbarkeit der rechnerischen Zuverlässigkeitsbewertung soll eine Konstruktion wirtschaftlich sein und der Materialeinsatz ressourcenorientiert durchgeführt werden.

Komplexe Bauwerke mit langer Nutzungsdauer, Konstruktionen aus Glas und neuen Hybridwerkstoffen sind in Bezug auf das Langzeitverhalten sicherheitstechnisch zu bewerten.

Der linke Ast im Bild 5 gilt für Materialien und Konstruktionen, bei denen man die gesamte Kette mit den verfügbaren Verfahren widerspruchsfrei und vollständig erfassen kann. Der rechte Ast, der beispielsweise für geklebte Glasfassaden beim heutigen Stand der Wissenschaft und Technik zur Anwendung kommt, geht davon aus, dass noch Lücken in der Beschreibung vorhanden sind, die zusätzliche Maßnahmen erfordern. Wichtig ist dabei das Verhalten der einzelnen Konstruktionsteile auch qualitativ einzuschätzen: Spröde Materialien sind anders einzustufen als zähe, Systeme, bei denen das Versagen ohne Vorankündigung zu erwarten ist, bedürfen anderer Regelungen als Systeme, die z. B. mit großen Verformungen den Zustand „kommunizieren“.

Je nach der Einschätzung der einzelnen Situation sind verschiedene Instrumente verfügbar, um die Sicherheit zu gewährleisten, wie beispielsweise:

- Beschränkung der Nutzungs- bzw. Lebensdauer,
- Berücksichtigung zusätzlicher Tragelemente zur Absicherung eines redundanten Tragverhaltens,
- Monitoringmaßnahmen zum Erkennen eines versagenskritischen Zustands,
- parallele Auslagerung eines entsprechenden Bauteils mit bauwerksähnlicher Beanspruchung auf einem entsprechend höheren Niveau,
- Test aller einzubauenden Bauteile.

2.3 Sicherheitskonzept für geklebte Glasfassaden

Nach entsprechenden Anträgen der Wirtschaft wurde in den 1980er-Jahren in den entsprechenden Sachverständigenausschüssen des DIBt eine breite Diskussion darüber geführt, wie man geklebte Glasfassaden in Deutschland zulassen kann, ohne das bisherige Sicherheitsniveau infrage zu stellen. Als Ergebnis mussten alle Fassaden bei einer Einbauhöhe von über 8 m neben dem Nachweis der Klebung auch mit mechanischen Nothaltern versehen werden, die mit einer rechnerischen Sicherheit von 1,1 in der Lage waren, die Glaselemente vor dem Herabfallen zu sichern. Die Wirksamkeit die-

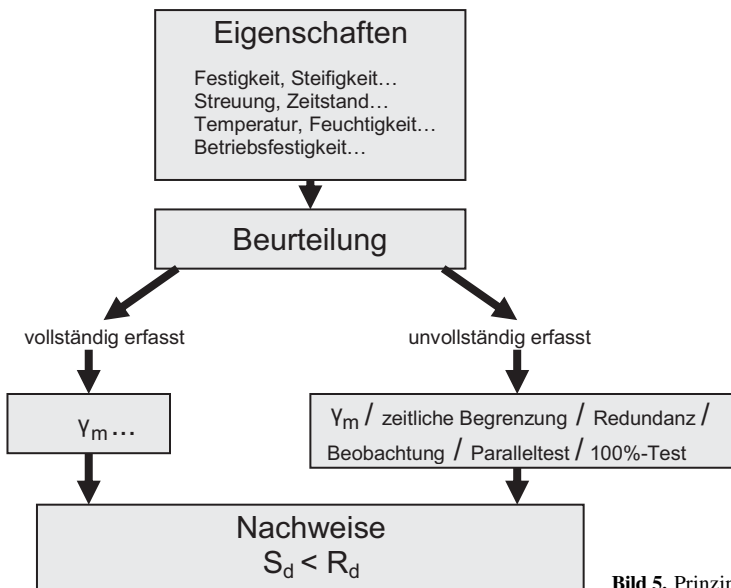


Bild 5. Prinzipielles Nachweiskonzept

ses Vorgehens wurde zum einen mit der probabilistischen Methode nachgewiesen, zum anderen auch mit Brandschutz etc. begründet.

Mit der Entwicklung der Kleber und der Bemessungsmethoden für Kunststoffe hat sich nun eine Möglichkeit der Aktualisierung der Gewährleistung der Sicherheit von geklebten Glasfassaden eröffnet.

Jede Maßnahme hat ihre Chance und ihre eigene Problematik. Das bisherige Vorgehen mit Nothalterungen entspricht dem Nachweis des rechten Astes in Bild 5. Dasselbe Sicherheitsniveau kann erreicht werden, wenn der Nachweis der Verklebung auf der Grundlage eines Zeitstandnachweises erfolgt. Die dafür erforderlichen Kennwerte und zeitlichen Extrapolationsverfahren sind material-spezifisch festzulegen.

Insgesamt besteht der Nachweis dann aus folgenden Schritten:

- Kennwerte Verklebung (Kurzzeitfestigkeit, Langzeitverhalten),
- Bemessungszeitraum 50 Jahre,
- Sicherheitsbeiwert am Ende des Zeitraums.

3 Vereinfachung und Transparenz der Sicherheitsnachweise

3.1 Sicherheit und gesellschaftliche Relevanz

So überzeugend dieses Konzept im Prinzip und beispielhaft in der konkreten Anwendung für geklebte Glaskonstruktionen ist, so wenig löst es die oben genannten Probleme.

Eine Auswertung einer großen Anzahl von Praxisbeispielen hat gezeigt, dass die angestrebte „Genauigkeit“ durch Verwendung sehr differenzierter Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte nicht zu entsprechend veränderten Konstruktionen führt. Schon bei reiner Betrachtung der Teilsicherheitsbeiwerte ist die Vorgabe mit 3 Dezimalstellen, d. h. Darstellung einer Differenzierung von weniger als 5 % nicht zu rechtfertigen, berücksichtigt man gleichzeitig die unsicheren Streuungsparameter von Einwirkung und Widerstand. Ähnliche Aussagen können für die Kombinationsbeiwerte getroffen werden. Ein Vergleich mit typischen Konstruktionen, die mit der früheren Überlagerungsregel „Schnee + Wind/2“ bzw. „Wind + Schnee/2“ berechnet werden, belegt die geringe Auswirkung theoretisch hochentwickelter Beiwerte und zugehöriger Kombinationen, die allenfalls noch in EDV-Programmen in Gänze betrachtet werden können.

Um auch zukünftig die Berechnungen zumindest teilweise wieder einer Transparenz zuzuführen, wäre eine Vereinfachung anzustreben, die ohne Verlust an Sicherheit und bei sehr eng begrenztem „Verlust“ an Wirtschaftlichkeit eine Bemessung ermöglicht.

Ein entsprechender Ansatz wird in [31] von *Cornelius* vorgestellt.

Vorschlag für Einwirkungen im üblichen Hochbau:

- Die Anzahl der Sicherheitsbeiwerte ist wesentlich zu reduzieren durch die Einführung eines gewichteten, mittleren Beiwerts. Für den üblichen Hochbau kann $\gamma_F = 1,4$ gesetzt werden.
- Die Übergabe von Auswirkungen wird vereinfacht, z. B. Lastübergabe an den Baugrund: $E_{Q,k} = E_d/\gamma_{F,Mittel} = -E_{G,k}$ mit $\gamma_{F,Mittel} = 1,4$ für die Grenzzustände STR/GEO. Durch die Einführung eines universellen Kombinationsbeiwertes $\Psi_{uni} = 0,7$ sind nahezu alle Einwirkungsarten nach DIN EN 1990:2010 gebührend zu berücksichtigen. Damit könnten die Kombinationsregeln wesentlich vereinfacht werden.

Ein ähnlicher Vorschlag kann auf der Widerstandsseite angedacht werden.

Derzeitige Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände:

- Stahl $\gamma_{M0} = 1,1$ mit Stabilitätsversagen bzw. $\gamma_{M0} = 1,0$ ohne Stabilitätsversagen
- Bewehrungsstahl $\gamma_s = 1,15$
- Spannstahl $\gamma_s = 1,15$; die Ermittlung der mittleren Vorspannkraft „ P_{m0} “ nach Beendigung des Vorspannvorgangs bzw. nach dem Lösen der Verankerung bei Vorspannung mit sofortigem Verbund erfolgt mit:
 $P_{m0} = 0,85 \cdot f_p \cdot 0,1k \cdot A_p$ bzw. $P_{m0} = 0,75 \cdot f_{pk} \cdot A_p$
- Beton $\gamma_c = 1,5$; bei Fertigteilen mit einer werksmäßigen und ständig überwachten Herstellung darf $\gamma_c = 1,35$ gesetzt werden. Der Bemessungswert wird unter Berücksichtigung eines Abminderungsfaktors zur Berücksichtigung von Langzeiteinwirkungen sowie von ungünstigen Auswirkungen auf die Festigkeit ermittelt:
 $f_{cd} = 0,85 \cdot f_{ck}/\gamma_c$
- Holz $\gamma_m = 1,3$; wobei der Bemessungswert mit einem Modifikationsfaktor, der den Einfluss der Lasteinwirkungsdauer und der Holzfeuchte berücksichtigt, ermittelt wird:
 $f_{md} = f_{mk} \cdot k_{mod}/\gamma_m$
- Glas $\gamma_{gl} = 1,25$; vielfach wird eine zulässige Spannung ohne zusätzlichen Teilsicherheitsbeiwert verwendet.

Vorschlag für die Widerstandsseite:

Allgemein könnte für

a) die Baustoffe: Beton, Holz, bezogen auf den Bruchwert

- Beton ($\gamma_c = 1,5/0,85 = 1,76$)
- Holz (lange Lasteinwirkung, Nutzungsklasse 2 – offene Bauwerke): ($\gamma_m = 1,3/0,7 = 1,86$)

Im Kapitel I „Infrastruktur und Gesellschaft“ des Beton-Kalenders 2012 wurde Folgendes ausgeführt:

Der gesellschaftlichen Realität kann durch entsprechende Annahmen Rechnung getragen werden:

$$R_{\text{mod}} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot R_{\text{ak}} \quad (11)$$

$$R_{\text{mod}} \leq R_{\text{vorh}} = p_f \cdot S \cdot X_S \quad (12)$$

mit

R_{mod} modifizierter akzeptabler Wert des Risikos

R_{vorh} vorhandenes Risiko

p_f Wahrscheinlichkeit eines Schadens

S Schadensumfang

k_1 Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Vorteilserwartung
= 1 ohne Vorteilserwartung
Werte mit Vorteilserwartung bestehen nicht, als Anhaltswert kann ein Wert von 10 angesetzt werden.

k_2 Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Einflusserwartung
= 1 ohne Einflusserwartung
Werte mit Einflusserwartung bestehen nicht, als Anhaltswert kann ein Wert von 10 angesetzt werden

k_3 Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Schadensbedeutung
= 1 für Gefahr für Menschenleben und wirtschaftliche Folgen
= 10 für keine Gefahr für Menschenleben
= 0,1 für große Gefahr für Öffentlichkeit

X_S Faktor zur Berücksichtigung großer Schäden (Bild 6)

Unter Berücksichtigung dieser Zusammenhänge ist in Analogie zu dem VCI-Leitfaden ein Faktor zu entwickeln, der die erforderliche Sicherheit vergrößert. Der so festgelegte globale Beurteilungsfaktor γ_{Risiko} (ähnlich Bild 5) kann in einen Beurteilungsfaktor für die Einwirkung $\gamma_{\text{S,Risiko}}$ und einen für den Widerstand $\gamma_{\text{M,Risiko}}$ aufgeteilt werden.

$$\gamma_{\text{S,Risiko}} = \gamma_{\text{M,Risiko}} = \sqrt{\gamma_{\text{Risiko}}} \quad (13)$$

3.2 Das richtige Maß

Bereits in der Philosophie Platons (*427 v. Chr., †347 v. Chr.) in seiner Politeia finden wir in seinen Kardinaltugenden: „die Besonnenheit (das richtige Maß) – la temperantia“. Dieses Grundsatzprinzip soll zukünftig verstärkt in den Ingenieurdisziplinen, insbesondere bei der multidisziplinä-

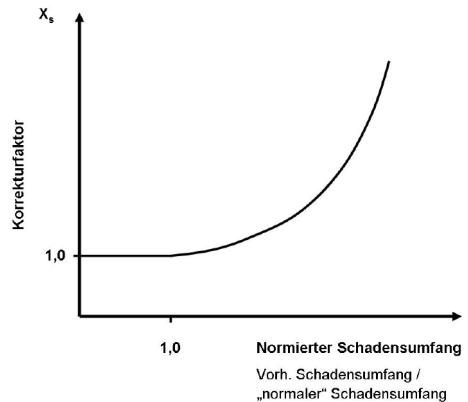


Bild 6. Korrekturfaktor X_S zur Berücksichtigung großer Schäden (qualitativ)

ren Bewertung der Zuverlässigkeit, berücksichtigt werden. Die kausalen Zusammenhänge können zwar mit Modellen beschrieben werden; die gesellschaftlichen und damit die sozialen Interaktionen könnten einerseits differenziert und müssten andererseits transparenter erfolgen [32].

Diese Grundhaltung von nachvollziehbaren Regeln führt auch zu einer verstärkten Bestrebung die Normenreihe der Eurocodes 0 bis 9 und deren nationale Anwendungsdokumente zu vereinfachen und klar nachvollziehbare Konzepte für alle Bemessungsnormen zu schaffen [31]. Nachdem in Deutschland die Tragwerksplanung ab dem 1. Juli 2012 auf den Eurocodes mit den Nationalen Anhängen basiert, werden neue Ansätze für praxismgerechte Regelwerke diskutiert. Dabei wurden von Cornelius [31] zehn Grundsätze erarbeitet, welche nachfolgend auszugswise wiedergegeben werden.

1. Grundregeln der Mechanik:
Von der Lastabtragung zur Einwirkung und der Lastabtragung im Bauwerk sollen die Wirkungsweisen kohärent auf mechanischen Regeln aufbauen.
2. Praxisgerechte und nachvollziehbare Nachweiskonzepte:
Sowohl die Rechenmodelle als auch die Erfassung der Einwirkungen und der Widerstände sollen gut nachvollziehbar und soweit sinnvoll mit grafischen oder tabellarischen Hilfwerten vereinfacht werden.
3. Vielzahl an Einwirkungskombinationen reduzieren:
Für Standardfälle sollen die Einwirkungskombinationen auf ein Mindestmaß reduziert werden. Dabei könnte auch eine globale Sicher-

heitsbetrachtung und keine differenzierte mit Teilsicherheitsfaktoren angewandt werden.

4. Optimierungsparameter reduzieren:
Auf ein Mindestmaß sollte die Anpassung durch Verwendung von Parametern an individuelle Randbedingungen reduziert werden.
5. Einheitliche Gliederung in allen Normen des Konstruktiven Ingenieurbaus:
Ziel ist es, eine einheitliche Gliederung für alle Normen zu erstellen, damit immer in den gleichen Kapiteln beispielsweise die Baustoffe, die Nachweise etc. zu finden sind.
6. Durchgängigkeit der Regelungen über Baustoffgrenzen hinweg:
Hierbei sollten die Nachweise für den Baugrund mit denselben Lastkombinationen und denselben Sicherheitsselementen erfolgen wie die Nachweise im Bauwerk.
7. Vereinheitlichung der erforderlichen Heißbemessung:
Angestrebt wird dabei eine Vereinfachung in der Nachweisführung der Feuerwiderstandsdauer.
8. Verbesserung der handwerklichen Qualität und der Sprache der Normen:
Durch eine Vereinfachung der textlichen Fassungen sollen die Dokumente leichter lesbar und verständlicher werden.
9. Reduzierung der national festlegbaren Parameter (NDP):
Soweit wie möglich sollten europaweit die gleichen Parameter gelten und die nationalen Eigenheiten reduziert werden.
10. Eurocodes repräsentieren den Stand der Technik, nicht der Wissenschaft:
Die Normen sollten einfach, verständlich, den anerkannten Stand der Technik berücksichtigend verfasst werden.

Die Sicherheit von Bauwerken über die technische Lebens- bzw. Nutzungsdauer kann zwar mit Normen beschrieben und mit den anerkannten Regeln der Technik nachgewiesen werden; entscheidend bleibt aber das verantwortliche Handeln des Ingenieurs, welcher das systemische Erfassen vom Entwurf bis zum Abbruch berücksichtigt und soweit als möglich die gesellschaftlichen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen berücksichtigt.

4 Literatur

- [1] Herold, C.: Lebensdauerdaten von Bauwerken und Bauteilen in Regelwerken – der europäische Ansatz. Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin 2008 (www.dibt.de/data/aktuelles_ref_II_4_9.pdf).
- [2] Vogdt, F. U.: Bedeutung der Lebensdauer und des Instandsetzungsaufwandes für die Nachhaltigkeit von Bauweisen. In: Aachener Bausachverständigentage 2008, S. 22–29. Aachener Institut für Bauforschung, 2009.
- [3] DIN VDE 31 000-2:1987-12: Allgemeine Leitsätze für das sicherheitsgerechte Gestalten technischer Erzeugnisse – Begriffe der Sicherheitstechnik – Grundbegriffe.
- [4] ISO 8930:1991-03: Allgemeine Grundsätze für die Zuverlässigkeit von Tragwerken; Liste äquivalenter Begriffe.
- [5] Stangenberg, F.: Lifetime-Oriented Design Concepts. In: Lifetime-Oriented Structural Design Concepts, S. 1–7. Springer Verlag, Berlin 2009.
- [6] Sánchez-Silva, M.; Rackwitz, R.: Implications of the high quality index in the design of optimum structures to withstand earthquakes. ASCE Journal of Structural Engineering, 130 (2004) 6, pp. 969–977.
- [7] BMVBS: Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Online: <http://www.nachhaltigkeitsbauen.de/baustoff-und-gebäuedaten>, 2010.
- [8] König, H.; Kohler, N.; Kreißig, J.; Lützkendorf, T.: Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung – Grundlagen, Berechnung, Planungswerkzeuge. Institut für Architektur-Dokumentation, München 2009.
- [9] BKI: Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern, Stuttgart 2009.
- [10] Roth, C.: Lebenszyklusanalyse von Baukonstruktionen unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, Heft 25, 2011.
- [11] DIN EN 61508-4:2011-02 (VDE 0803-4): Funktionale Sicherheit elektrischer/elektronischer/programmierbar elektronischer sicherheitsbezogener Systeme – Teil 4: Begriffe und Abkürzungen.
- [12] DIN EN ISO 14971:2009-10: Medizinprodukte – Anwendung des Risikomanagements auf Medizinprodukte.
- [13] Bergmeister, K.; Curbach, M.; Strauss, A. et al.: Sicherheit und Gefährdungspotenziale im Industrie- und Gewerbebau. In: Beton-Kalender 2005.
- [14] Jungermann, H.; Slovic, P.: Die Psychologie der Kognition und Evaluation von Risiko. In: Bechmann, G. (Hrsg.): Risiko und Gesellschaft, Westdeutscher Verlag, Opladen 1993.
- [15] Renn, O.; Zwick, M.: Risiko- und Technikakzeptanz. Springer Verlag, Berlin 1997.
- [16] Renn, O.: Risikowahrnehmung – Psychologische Determinanten bei der intuitiven Erfassung und Bewertung von technischen Risiken. In: Hosemann, G. (Hrsg.): Risiko in der Industriegesellschaft, S. 167–192. Erlangen/Nürnberg 1989.
- [17] Farmer, F. R.: Siting Criteria – a new Approach, Atom, Vol. 128, S. 152–170. 1967.
- [18] Bergmeister, K.; Matousek, M.: Tunnelsicherheit: Sicherheitskonzepte für Tunnel. Beton-Kalender 2005, Teil 1, S. 521–551. Ernst & Sohn, Berlin 2004.
- [19] Vrijling, J. K.; van Gelder, P. H. A. J. M.; Goossens, L. H. J. et al.: A Framework for Risk Criteria

- for Critical Infrastructures: Fundamentals and Case Studies in the Netherlands, Proceedings of the 5th Conference on Technology, Policy and Innovation, „Critical Infrastructures“, Delft, The Netherlands, June 26–29, Uitgeverij Lemma BV, 2001.
- [20] Schneider, J.: Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen – Grundwissen für Ingenieure. Vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich und B. G. Teubner, Stuttgart 1996.
- [21] Hoffmann-Koch, A.: Lebensqualität als Messparameter für die subjektive Wahrnehmung des Klappengeräusches nach mechanischem Herzklappenersatz. Dissertation, Medizinische Fakultät der Ruhr-Universität Bochum 2003.
- [22] Horstkotte, D.: Lebensqualität und Optimierung der Lebensqualität nach Herzklappenersatz. In: Blum, U., v. d. Emde, J. (Hrsg.): Diagnostik und operative Behandlung kardialer Erkrankungen; S. 53–71. Darmstadt: Steinkopff 1994.
- [23] Schreiber, H. W.: Lebensqualität und Allgemein Chirurgie. Suppl. II, S. 43–48. Langenbecks-Archiv für Chirurgie 1989.
- [24] Knecht, A.: Lebensqualität produzieren. Eine Ressourcentheorie und Machtanalyse, S. 18. VS-Verlag Wiesbaden 2010.
- [25] Nathwani, J. S.; Lind, N. C.; Pandey, M. D.: Affordable Safety by Choice: The Life Quality Method. University of Waterloo, Waterloo, Ontario, 1997.
- [26] Proske, D.: Katalog der Risiken – Risiken und ihre Darstellung. Eigenverlag, Dresden 2004.
- [27] Proske, D.; Curbach, M.; Köhler, U.: Lebensqualität als Bewertungsparameter für Lebensrisiken. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden 55 (2006), Heft 3–4.
- [28] Bergmeister, K.: Brenner Basistunnel – Lebensräume und Verkehrswege. Tappeinerverlag, Lana 2008.
- [29] Rackwitz, R.: Zuverlässigkeit und Lasten im konstruktiven Ingenieurbau. Vorlesungsskript, Technische Universität München, 1998.
- [30] Bergmeister, K.; Novák, D.; Pukl, R.: An advanced engineering tool for reliability assessment of concrete structures. In: A. Zingoni, ed. Progress in structural engineering, mechanics and computation, pp. 899–904. Taylor & Francis Group, London 2004.
- [31] Cornelius, V.: Bestandsaufnahme und Ziele der pränormativen Arbeit der Ingenieure. Der Prüfingenieur 05 (2012), S. 50–56.
- [32] Bergmeister, K.: Kausalität im Konstruktiven Ingenieurbau. In: Akademiedebatten: Kausalität in der Technik. Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin 2006.