

# Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken

**Dr.-Ing. habil. Dirk Proske**

*Axpo Power AG, Döttingen (Schweiz)*

## 1 Ausgangslage

Brückenbauwerke zählen zu den sichersten und langlebigsten technischen Erzeugnissen [1]. Zahlreiche Risikoindikatoren belegen diese Tatsache. So liegt die Sterblichkeit durch Brückeneinstürze in den entwickelten Industrieländern zwischen  $10^{-9}$  [2] und  $10^{-8}$  [3] pro Jahr. Die Sterblichkeit durch den Einsturz von Bauwerken insgesamt liegt bei ca.  $10^{-7}$  pro Jahr [3], [4], [5]. Zielwerte von  $10^{-6}$  pro Jahr werden also deutlich unterschritten [4]. Auch die *fatal accident rate* [4], die bezogene Unfallrate, die die Sterblichkeit auf die Expositionszeit normiert, liegt für Brücken mit 0,00002 sehr deutlich und für Bauwerke mit 0,002 deutlich unterhalb der Zielwerte von 0,03 [4] bis 2,0 [6]. Der Risikoparameter 'verlorene Lebenszeit' dürfte nach Ansicht des Autors für Brückeneinstürze im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten liegen und damit ebenfalls weit unterhalb der Werte für andere technische Produkte, wie z. B. für Flugzeugunfälle mit wenigen Tagen oder für Kraftfahrzeugunfälle mit ca. 200 Tagen verlorener Lebenszeit [4].

Risikoparameter bestehen in der Regel aus einem Wert für die Eintrittshäufigkeit bzw. Eintrittswahrscheinlichkeit des Versagens und aus dem Schadensmaß beim Versagen [4]. Im ersten Absatz wurde als Schadensmaß der Verlust an Menschenleben verwendet. Der zweite Parameter, die Versagenswahrscheinlichkeit, ist eines der Sicherheitsziele aktueller Sicherheitskonzepte in den Baunormen. Damit könnte man die berechnete Versagenswahrscheinlichkeit mit der beobachteten Versagenshäufigkeit vergleichen.

Der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik lehnt dies jedoch ab. So schreibt Spaethe [7]: „... [die operative Versagenswahrscheinlichkeit enthält] nur einen Anteil an der Gesamtversagenswahrscheinlichkeit ... mögliche Anteile aus menschlichen Fehlhandlungen [sind] in diesem theoretischen Wert nicht enthalten. Wenn man die Fehlerfreiheit des mechanischen Modells voraussetzen kann, dann wird die Versagenshäufigkeit größer sein als die theoretische Versagenswahrscheinlichkeit.“ Vergleichbare Aussagen finden sich im Eurocode 0, Tabelle 2.3, Fußnote 2 [8] oder in anderen Veröffentlichungen [9].

## 2 Ziel der Untersuchung

Allein die Unvollständigkeit aller Faktoren ist aus Sicht des Autors kein maßgebendes Kriterium für den Ausschluss des Vergleichs. Es ist möglich, die wichtigsten Faktoren zu berücksichtigen. Im Eurocode wird sogar darauf hingewiesen, dass Bemessungswerte basierend auf der Erfahrung gewählt werden können [8], Abschnitt 6.3.3, Absatz 2, Fußnote. Da auch die Versagenswahrscheinlichkeit als Grundlage für die Bestimmung von Bemessungswerten verwendet wird, muss zwangsläufig über die Gleichwertigkeit der Methoden ein Bezug zur Realität bestehen. Der Vergleich von Berechnung und Beobachtung ist also implizit in den Normen enthalten.

Brückeneinstürze gehören zur beobachteten Realität. Beispiele für Brückeneinstürze in den vergangenen Jahren in Deutschland sind der Eisenbahnanprall in Eschede 1999 mit über 100 Todesopfern, der Einsturz mehrerer Brücken bei der Flut 2002, z. B. der Vorlandbrücke Riesa [10], der Pöppelmannbrücke in Grimma und einer Brücke in Eilenburg, oder der Einsturz der Brücke im Bauzustand in Schraudenbauch 2016. Außerdem sind mehrere Beinahe-Einstürze bekannt, wie z. B. der Schiffsanprall an die Brücke Segnitz im Jahr 2000, der zu einer klaffenden Mauerwerksfuge von über 3 m Länge im Pfeiler führte, oder der Schiffsanprall gegen die Eisenbahnbrücke in Krems in Österreich 2005, bei dem der getroffene Pfeiler zwei Meter verschoben wurde (für nähere Informationen zu den Schadensfällen siehe bspw. in [11], [12]).

Es liegen also Erfahrungswerte und Statistiken zum Einsturz von Brücken vor. Ein erster Vergleich von Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken erfolgte durch den Autor in [13]. Der vorliegende Beitrag stellt eine Erweiterung dieser Arbeiten dar.

### 3 Begriffe

In diesem Abschnitt werden kurz einige Begriffe für das Verständnis des Beitrages erläutert.

#### 3.1 Brücken und Brückenbestand

Unter Brücken versteht man gemäß DIN 1076 [14] „Überführungen eines Verkehrsweges über einen anderen Verkehrsweg, über ein Gewässer oder tiefer liegendes Gelände, wenn ihre lichte Weite rechtwinklig zwischen den Widerlagern gemessen 2,00 m oder mehr beträgt.“ Die Festlegung der Mindestspannweite ist weltweit unterschiedlich geregelt. In den USA findet man eine Mindestspannweite von 20 Fuß (6,1 m) [15], in Südafrika eine Mindestspannweite von 6 m [16]. Diese Unterschiede erschweren den weltweiten Vergleich.

Insgesamt dürfte der Brückenbestand bei weltweit zwischen 5 und 6 Millionen Brücken liegen. Einige Details zur Anzahl von Brücken in verschiedenen Ländern finden sich in [13]. In den vergangenen Jahren zeichnete sich ein deutliches Wachstum des Brückenbestandes in Entwicklungsländern ab, während das Wachstum in den

entwickelten Ländern gering ist. Bild 1 erlaubt den direkten Vergleich der Entwicklung des Brückenbestandes in den USA und China. Außerdem finden sich in dem Bild Zahlen des Brückenbestandes für verschiedene Industrieländer für einzelne Jahre.

#### 3.2 Einsturz von Brücken

Ein Brückeneinsturz tritt auf, wenn eine Brücke vollständig oder in wesentlichen Teilen kollabiert, d. h. Brückenteile nicht mehr durch die Konstruktion selbst in ihrer Lage gehalten werden. Bei einem Einsturz verliert das Bauwerk mindestens seine Funktionsfähigkeit [17]. Eine andere Definition betrachtet den Brückeneinsturz als die Entwicklung einer kinematischen Kette, die zum vollständigen oder teilweisen Zerfall der Brücke führt. Ein örtliches Querschnittsversagen oder die Überschreitung bestimmter Grenzwerte führt nicht notwendigerweise zu einem Einsturz, da die Brücke in einem reparaturfähigen Zustand verbleiben kann [18]. Der Unterschied zwischen Versagenswahrscheinlichkeit für ein Querschnittsversagen und für einen Brückeneinsturz (kinematisches System) kann je nach System mehr als eine Zehnerpotenz betragen [19].

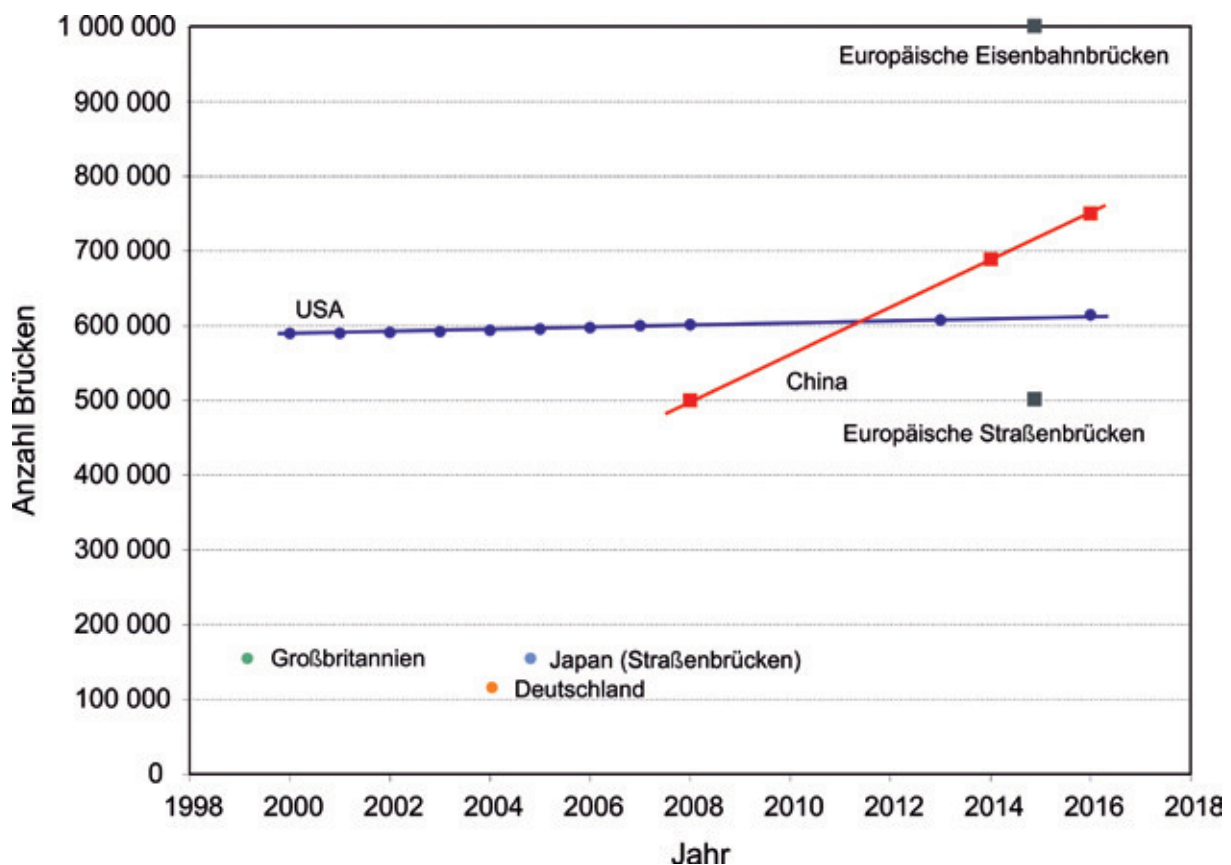


Bild 1 Brückenbestand in verschiedenen Ländern, entnommen aus [13]<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Alle Grafiken wurden vom Autor erstellt.

### 3.3 Versagenshäufigkeit von Brücken

Die Versagenshäufigkeit von Brücken  $F_c$  ergibt sich aus dem Verhältnis von eingestürzten Brücken  $n_c$  bezogen auf die Grundgesamtheit  $n_b$  für ein bestimmtes Gebiet und einen bestimmten Zeitraum:

$$F_c = \frac{n_c}{n_b}$$

Mit genauen zeitlichen Angaben ließen sich umfangreiche statistische Trenduntersuchungen durchführen. Dieser Beitrag verwendet aber nur mittlere zeitliche Einsturzhäufigkeiten.

Innerhalb dieses Beitrages werden die Ausdrücke Einsturzhäufigkeit und Versagenshäufigkeit bedeutungsgleich verwendet.

### 3.4 Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken

Die Versagenswahrscheinlichkeit  $P_f$  ist ein Sicherheitsmaß für Bauwerke. Es wird als Integral der multi-dimensionalen Wahrscheinlichkeit der Zufallszahlen  $X$ , die durch eine Grenzzustandsfunktion  $g(X)$  begrenzt wird, berechnet:

$$P_f = \int \dots \int_{g(X) \leq 0} f_X(x) dx$$

Bei den Zufallszahlen handelt es sich um Einwirkungs- und Widerstandsgrößen. Die Grenzzustandsfunktion stellt die Nachweisgleichung dar.

## 4 Vergleich

### 4.1 Methode

Im Rahmen dieser Arbeit werden keine neuen Daten oder statistische Auswertungen vorgenommen. Vielmehr werden bestehende Veröffentlichungen mit dem Ziel zusammengeführt, eine umfangreichere Datenbasis und damit robustere und allgemeingültige Schlussfolgerungen zu ermöglichen. Solche Studien werden als Metaanalysen bezeichnet.

### 4.2 Einsturzhäufigkeiten

Statistische Daten zum Einsturz von Brücken finden sich in einer Vielzahl von Veröffentlichungen. Im Rahmen dieses Beitrages wurde eine Auswahl von Veröffentlichungen verwendet, deren Zahlen vergleichbar sind. Es handelt sich dabei um die Studien von Vogel et al. [3], Imhof [5], Menzies [6], Wardhana und Hadipriono [17], Zerna [20], Taricska [21], Lee et al. [22], Cook [23], Harik et al. [24], Sharma und Mohan [25], Hersi [26], Christian [27], McLinn [28] und Scheer [29]. Die Studien geben

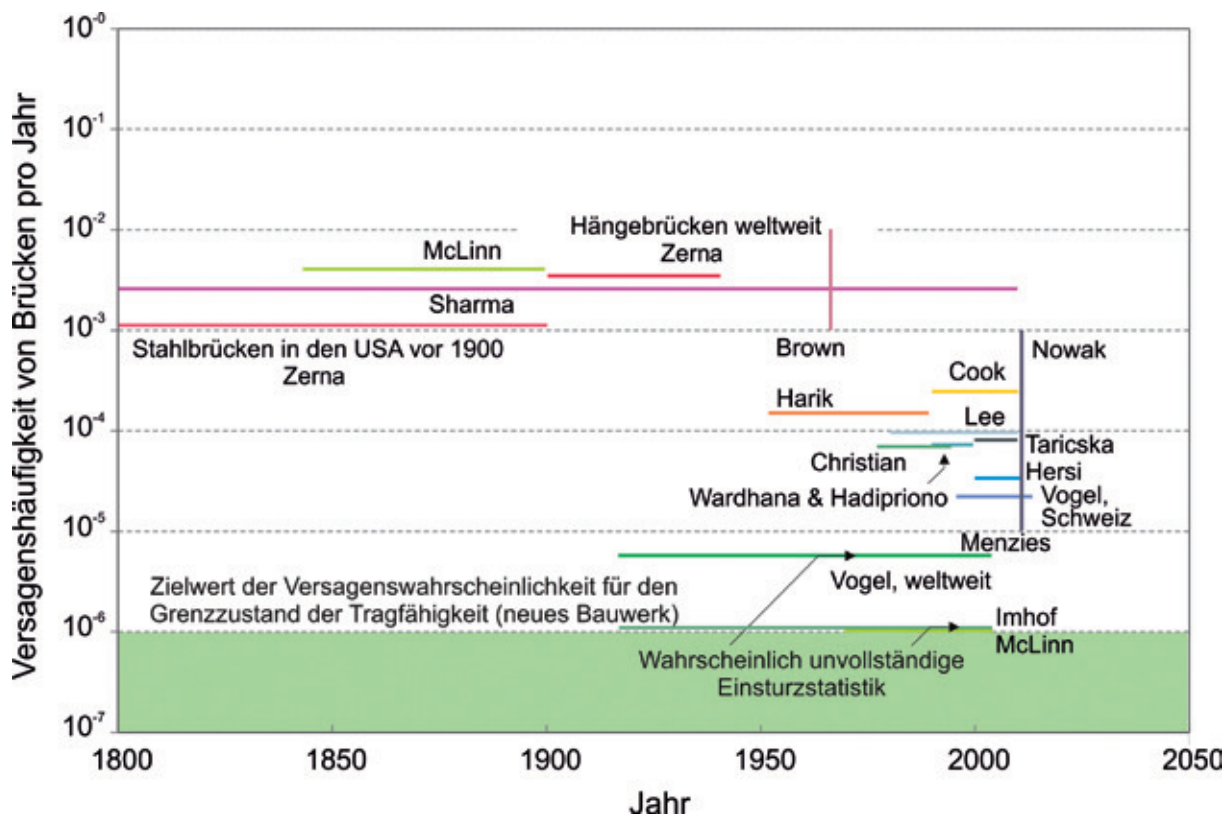


Bild 2 Einsturzhäufigkeiten von Brücken nach verschiedenen Referenzen

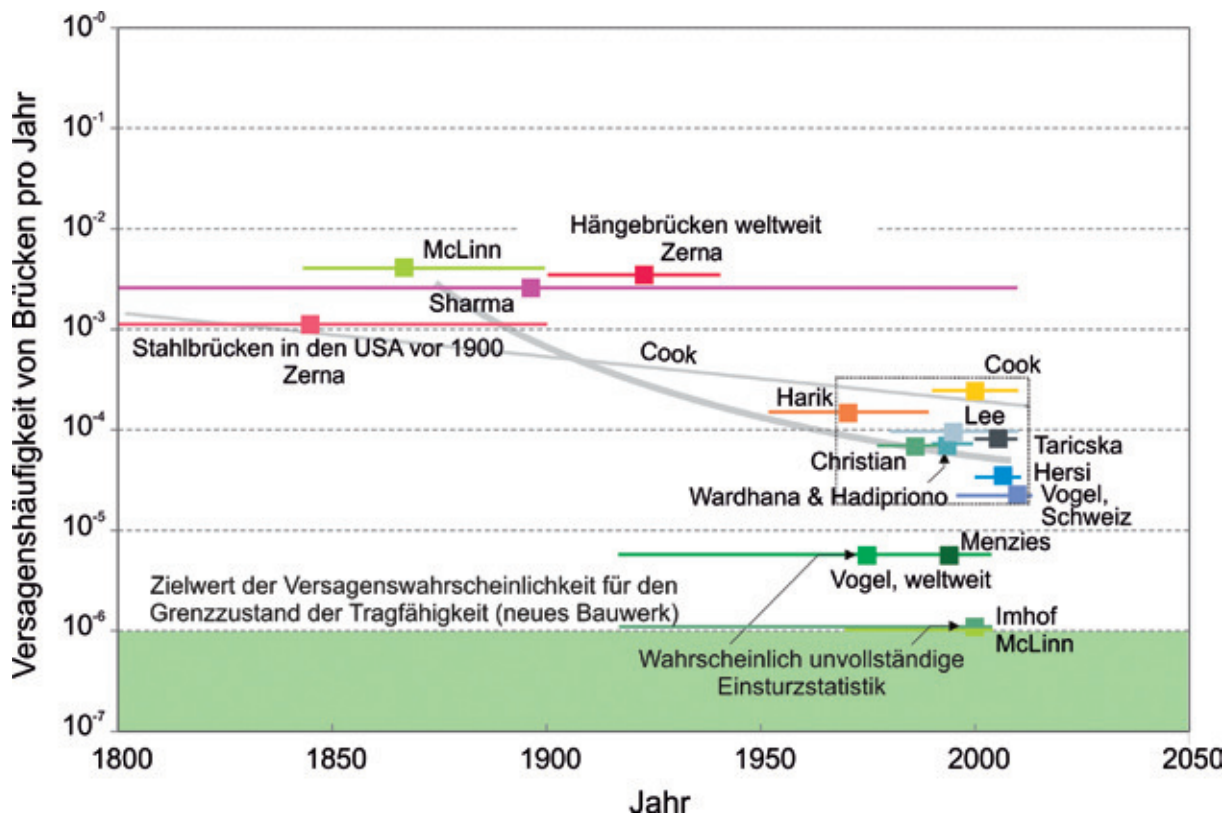


Bild 3 Einsturzhäufigkeiten von Brücken nach verschiedenen Referenzen mit Abschätzung eines Mittelwertes der Häufigkeitslinie

eine Versagenshäufigkeit von Brücken für eine bestimmte Region bzw. ein bestimmtes Land und für einen bestimmten Zeitraum an. So geben Sharma und Mohan [25] Einsturzhäufigkeiten für einen Zeitraum von ca. 200 Jahren an.

Bild 2 zeigt die Einsturzhäufigkeiten über die berücksichtigte Zeitspanne als waagerechte Linien. Zwei Veröffentlichungen zeigen bereits eine Zusammenstellung von Einsturzhäufigkeiten [30], [31]. Diese werden als senkrechte Linien dargestellt, die die waagerechten Linien umgreifen.

Prinzipiell lassen sich in Bild 2 drei statistische Gruppen erkennen. Die erste Gruppe ist durch sehr hohe Einsturzhäufigkeiten größer  $10^{-3}$  pro Jahr gekennzeichnet. Diese Gruppe umfasst einen Zeitraum von 1800 bis ca. 1950 (mit Ausnahme von Sharma und Mohan). Die zweite Gruppe umfasst einen Zeitraum von ca. 1950 bis 2010 und zeigt Einsturzhäufigkeiten zwischen  $10^{-5}$  und etwa  $2 \dots 3 \times 10^{-4}$  pro Jahr. Die dritte Gruppe umfasst Werte unterhalb  $10^{-5}$  pro Jahr etwa ab 1920.

Die erste Gruppe beschreibt den Zustand von Brücken im 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts. Die Angabe von Sharma und Mohan mit hohen Einsturzhäufigkeiten bis zum Jahr 2000 wird sicherlich dominiert durch die hohen Werte im 19. Jahrhundert [25]. Die zweite Gruppe wird von Cook

[23] nach oben und von Vogel et al. [3] mit Daten für die Schweiz nach unten begrenzt. Die meisten Studien in dieser Gruppe beziehen sich auf Daten aus den USA.

Die dritte Gruppe umfasst die Referenzen Vogel et al. [3], Imhof [5], Menzies [6] und McLinn [28]. Diese Gruppe, mit Ausnahme von Menzies, basiert wahrscheinlich auf unvollständigen Grundgesamtheiten, d. h. dass nicht alle Einstürze bekannt waren und damit nicht berücksichtigt werden konnten. Dies gilt auch für die Veröffentlichung von Vogel et al. [3] weltweit, welche überwiegend Daten von [5] verwendet. Einzige Ausnahme in dieser Gruppe ist Menzies [6], welcher alle Daten aus Großbritannien berücksichtigt. Da die meisten Angaben in der Gruppe 2 auf Daten aus den USA basieren, ist ein systematischer Unterschied zu Großbritannien möglich. Erstaunlich ist allerdings, dass die Einsturzhäufigkeit in der Schweiz damit praktisch fast eine Zehnerpotenz höher wäre als in Großbritannien. Dies wäre insofern möglich, als die Brücken in der Schweiz mehr natürlichen Gefährdungen wie Lawinen, Steinschlägen, Blitzfluten etc. ausgesetzt sind [32], [33].

Aus den drei Gruppen kann man einen Trend ableiten: die Einsturzhäufigkeit ist in den vergangenen 100 bis 200 Jahren um 1 bis 2 Zehnerpotenzen gefallen. Um eine genaue Trendanalyse durchzu-



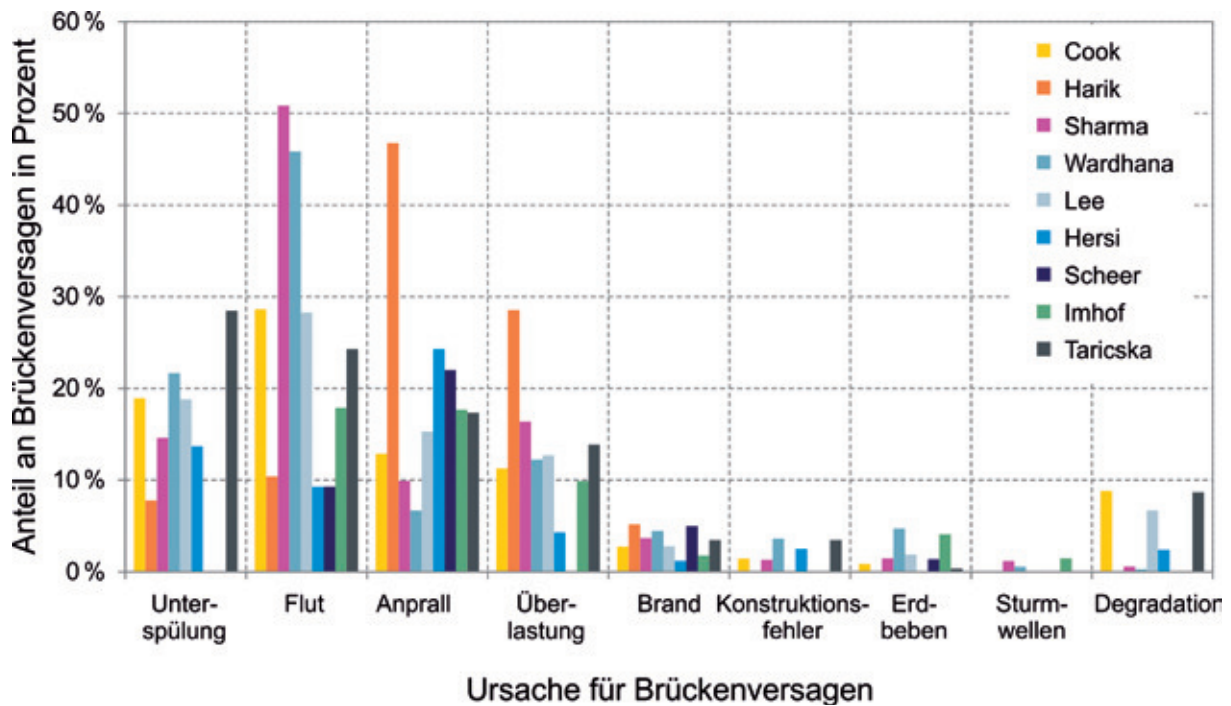


Bild 4 Einsturzursachen von Brücken nach verschiedenen Referenzen

führen, muss man den waagerechten Linien, also den Zeiträumen, einen festen Mittelwert zuweisen. Dieser Wert wird in der Regel bei einem früheren Zeitraum liegen, wenn tatsächlich ein Trend vorhanden ist. Insofern wäre also eine Iteration notwendig. In Bild 3 ist aber nur der erste Schritt dargestellt. Der eingezeichnete lineare Trend im logarithmischen Diagramm basiert auf Cook [23], der nicht-lineare Trend ist eine eigene Schätzung.

### 4.3 Einsturzursachen

Nach der Zusammenstellung der Einsturzhäufigkeiten wären Informationen über die Einsturzursachen hilfreich, um die Analyse zu verfeinern. Es gibt eine umfangreiche Literatur zu den Ursachen von Bauwerks- und Brückeneinstürzen, die verschiedene Ursachengruppen bewerten (Planungsfehler, Ausführungsfehler, organisatorische Fehler) [5], [29]. Im Folgenden werden aber nur Einsturzursachen mit Bezug auf Einwirkungen berücksichtigt. Wie Bild 4 zeigt, überwiegen bei allen Referenzen außergewöhnliche Einwirkungen als Einsturzursachen und zwar dominieren Fluten zusammen mit Unterspülungen (Auskolkungen).

Dies ist nicht verwunderlich, da Überflutungen oft eine Vielzahl von Brücken gleichzeitig betreffen. Beim Tsunami 2011 in Japan wurden über 300 Brücken zerstört [34], beim Hochwasser 2002 in Deutschland wurden mehrere hundert Brücken beschädigt [35], [36]. Bild 5 belegt die Wirkung solcher großflächig wirkenden außergewöhnli-

chen Einwirkungen durch die große Fluktuation in der Anzahl von Brückeneinstürzen pro Jahr basierend auf drei Referenzen.

Indirekt belegt auch die Unabhängigkeit der Einsturzhäufigkeit vom Brückenalter den großen Beitrag außergewöhnlicher Einwirkungen. Bild 6 zeigt die Unabhängigkeit basierend auf verschiedenen Referenzen, wobei Einstürze beim Bau nur bedingt integriert sind. Das Bild zeigt außerdem die 'Badewannenkurve', eine Theorie für die Beschreibung der Alterung technischer Systeme [37]. Die Kurve wird nicht durch die Beobachtungen bestätigt. Für eine genauere Analyse müssten die Daten auf das Alter des Brückenbestands normiert werden. Das Bild ist also kein Beweis, aber ein Indiz, da selbst bei relativ jungen Brücken signifikante Einsturzhäufigkeiten beobachtet werden.

### 4.4 Vergleich von Versagenshäufigkeiten und Versagenswahrscheinlichkeiten

Üblicherweise werden für den Grenzzustand der Tragfähigkeit für neue Bauwerke Zielversagenswahrscheinlichkeiten von  $10^{-6}$  pro Jahr angenommen. Da ein Bauwerk aber altert, müsste die Zielversagenswahrscheinlichkeit zeitabhängig sein. Bild 7 zeigt verschiedene Zielversagenswahrscheinlichkeiten in Abhängigkeit vom Alter. Im Folgenden wird auf die SIA 269 [39] zurückgegriffen. Bei der SIA 269 handelt es sich um eine

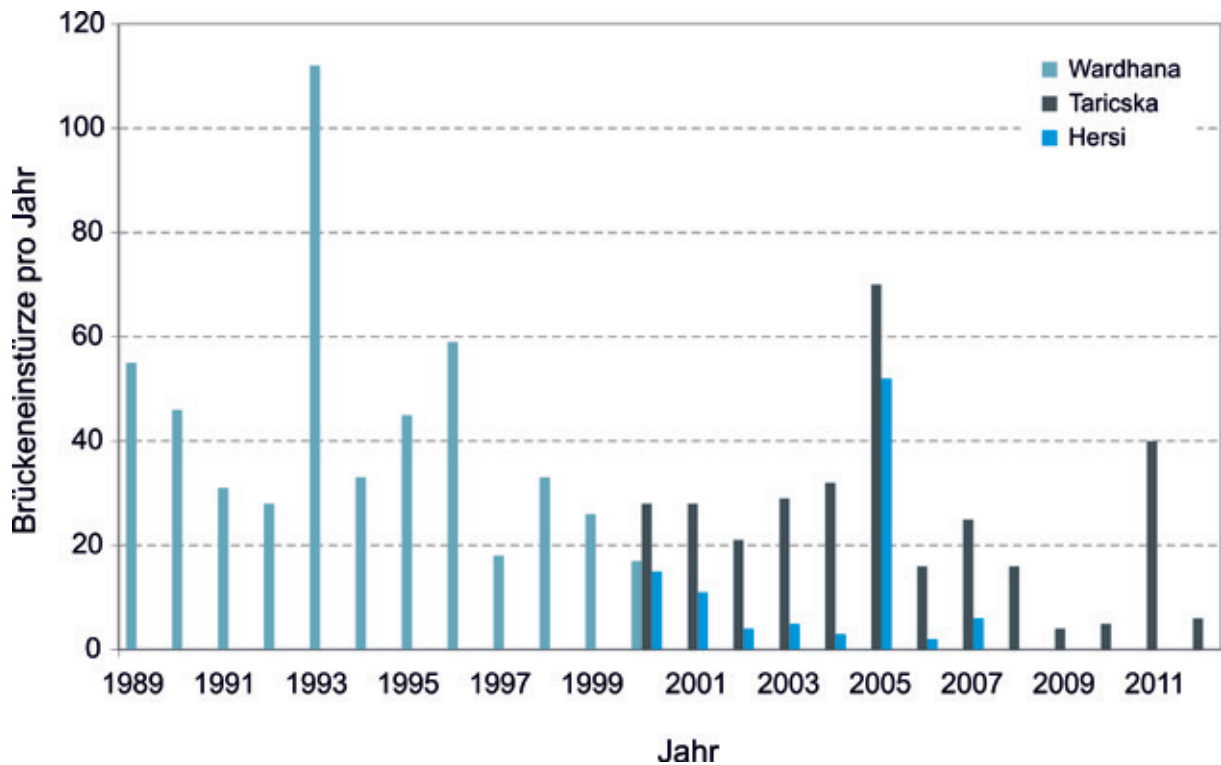


Bild 5 Absolute Zahlen von Brückeneinstürzen pro Jahr nach verschiedenen Referenzen

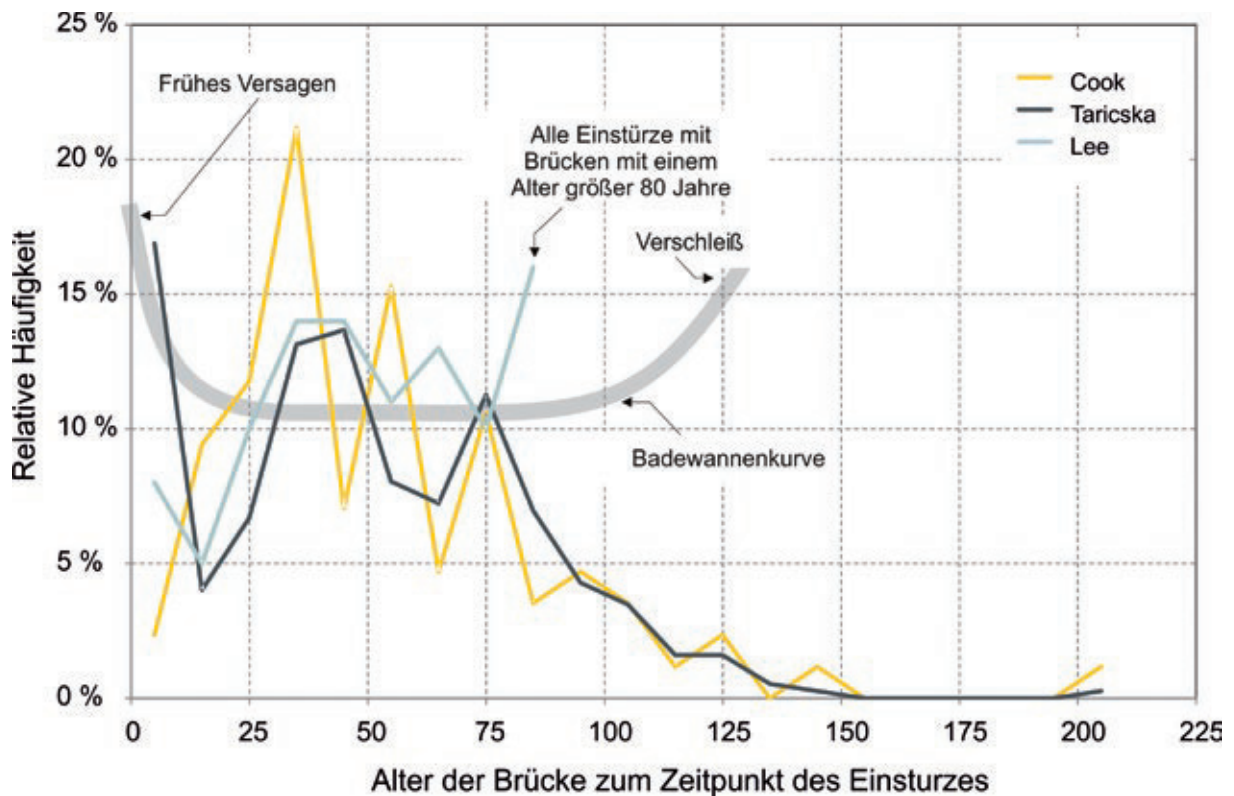


Bild 6 Einsturzhäufigkeiten von Brücken bezogen auf das Alter der Brücke beim Einsturz

Schweizer Norm für die Bewertung bestehender Bauwerke.

Die SIA-Kurve wurde in Bild 8 links in die Darstellung der Einsturzhäufigkeiten eingezeichnet, wo-

bei ein mittleres Alter der Brücken von ca. 50 Jahren angenommen wurde. Die Zielkurve mit dem Startwert von  $10^{-6}$  pro Jahr deckt fast vollständig die Datenpunkte der Gruppe 2 ab, mit Ausnahme von Harik [24] und Cook [23]. Berücksichtigt

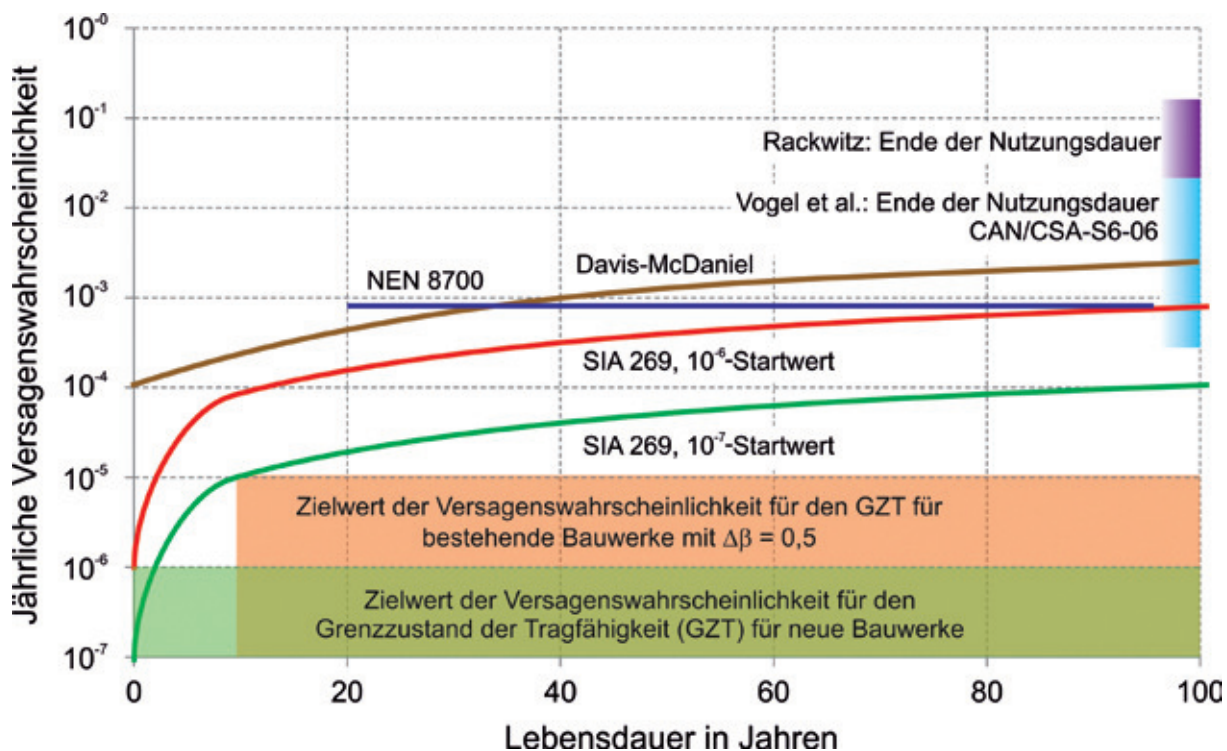


Bild 7 Zeitabhängige Zielversagenswahrscheinlichkeiten nach verschiedenen Autoren [3], [38]–[40], Details siehe [41]

man ferner weitere Einflüsse auf die Versagenswahrscheinlichkeit, wie die Korrelation zwischen den verschiedenen Nachweisgleichungen für die Ermittlung der Systemversagenswahrscheinlichkeit (siehe z. B. [42]) und menschliche Fehler, und rechnet diese auf die Zielversagenswahrscheinlichkeit auf, so erhöht sich diese um geschätzte 30 % und umgreift damit im Bild auch die Daten von Cook. Die Berechnung sieht vereinfacht wie folgt aus, wobei  $HEP$  (human error probability) den menschlichen Fehlerwahrscheinlichkeiten und  $K_{Brücke}$  der Gesamtkorrelation für das Bauwerk entsprechen [41]:

$$P_{f\text{Brücke}} = \frac{P_{f\text{Grenzzustand}} \times HEP}{K_{Brücke}} = \frac{10^{-6} \times 1,05}{0,80} = 1,3 \times 10^{-6}$$

Die entsprechende Kurve ist in Bild 8 rechts eingetragen.

Damit kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Versagenshäufigkeiten und den Versagenswahrscheinlichkeiten aufgezeigt werden. Interessant wäre im Weiteren der Vergleich zwischen der Zielversagenswahrscheinlichkeit und den üblichen Standardeinwirkungen wie Eigenlast und Verkehr. Diese werden oft für die Kalibrierung der Bemessungswerte verwendet, da bei außergewöhnlichen Einwirkungen oft Nennlasten mit einem Teilsicherheitsfaktor von 1 verwendet werden.

Bild 4 zeigt als Ursache nur den Überlastfall, der hier als Kombination aus Eigen- und Verkehrslast interpretiert wird. Die Versagenshäufigkeiten werden entsprechend des Anteils aus Bild 4 in Bild 9 heruntergerechnet. Für die Daten von Vogel et al. [3], Menzies [6] und Zerna [20] werden 10 % Überlast als Ursache für Brückeneinstürze angenommen. Bild 9 links zeigt die Verschiebung der Datenpunkte und rechts das endgültige Bild. In Bild 9 liegen drei Punkte im Bereich des zeitunabhängigen Zielwertes von  $10^{-6}$  pro Jahr, zwei Punkte davon beziehen sich auf europäische Brücken.

## 5 Schlussfolgerungen

Versagenshäufigkeit und Versagenswahrscheinlichkeit von Brücken passen erstaunlich gut zueinander. Auf Grund dieser Tatsache ist die Bestimmung von Bemessungswerten basierend auf der Erfahrung auch überhaupt erst möglich. Die außerordentlich geringen Risikowerte für Menschen lassen sich auf den großen Anteil von Fluten an der Versagenshäufigkeit von Brücken zurückführen. Bei diesem Ereignis gibt es meistens eine Vorwarnung und damit wird eine Sperrung der Brücken möglich.

Die These, dass die Versagenshäufigkeit generell oberhalb der Versagenswahrscheinlichkeit liegt, lässt sich nicht bestätigen, außer man verwendet

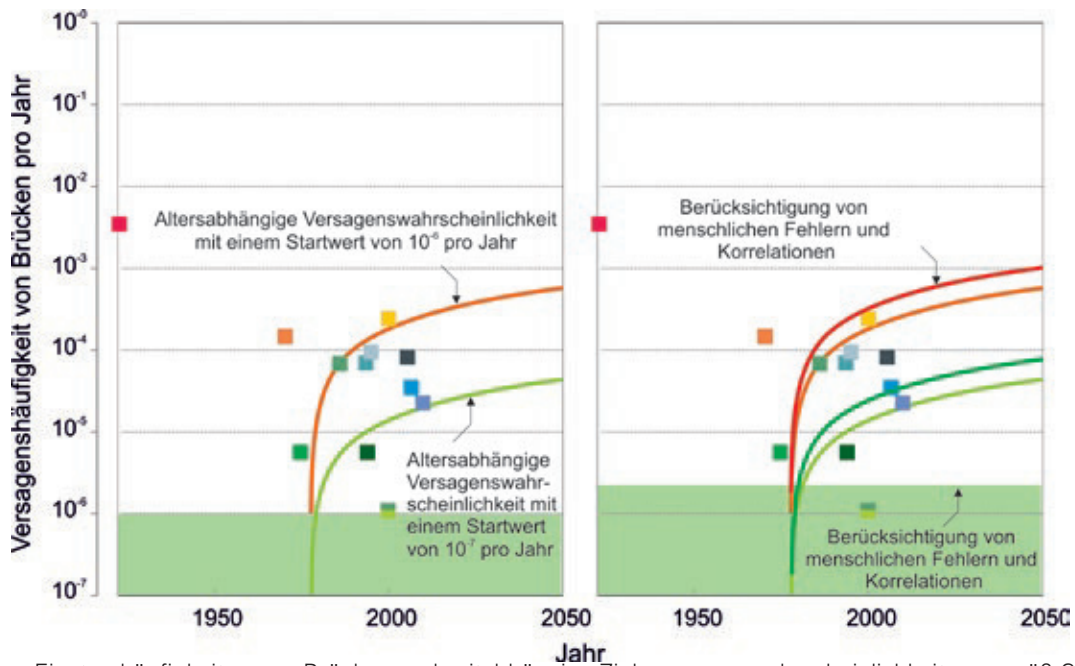


Bild 8 Einsturzhäufigkeiten von Brücken und zeitabhängige Zielversagenswahrscheinlichkeiten gemäß SIA 269 links und unter Berücksichtigung menschlicher Fehler und Systemkorrelationen rechts

eine konstante Versagenswahrscheinlichkeit über die gesamte Lebensdauer. Bezieht man die Versagenhäufigkeit allein auf übliche Verkehrs- und Eigenlasten, so sinkt die beobachtete Versagenhäufigkeit und liegt dann sogar im Bereich des zeitunabhängigen Zielwertes.

in die Berechnung der Versagenswahrscheinlichkeit eingebunden werden, sind vereinfacht in Bild 10 zusammengefasst. Einige der Faktoren wirken positiv (verringern die Versagenswahrscheinlichkeit), andere negativ (erhöhen die Versagenswahrscheinlichkeit). Unter Umständen folgen die Faktoren damit dem zentralen Grenzwertsatz und bilden eine Normalverteilung mit einem Mittelwert nahe Null.

Die Vielzahl der Faktoren ( $F$ ), die Auswirkungen auf die Versagenhäufigkeit besitzen und die nicht

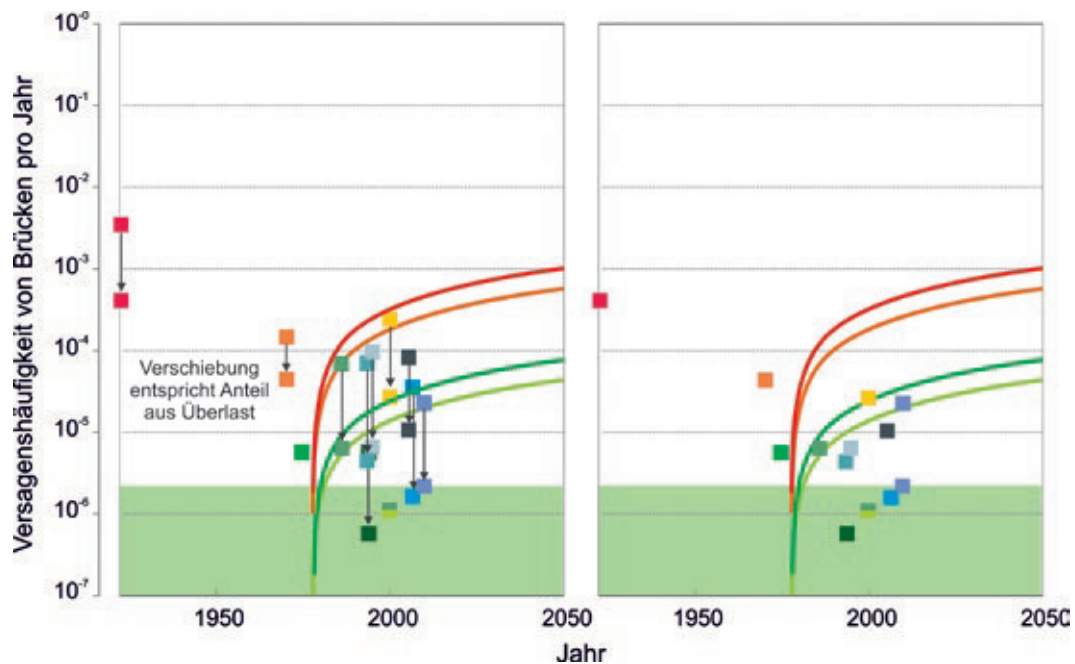


Bild 9 Einsturzhäufigkeiten für Brücken unter Überlast und zeitabhängige Zielversagenswahrscheinlichkeiten gemäß SIA 269 unter Berücksichtigung von Korrelation und menschlichen Fehlern und unter Berücksichtigung des Anteils aus Überlast



Die folgende Gleichung zeigt eine prinzipielle Berücksichtigung der Faktoren:

$$P_{f\text{Brücke}} = \frac{P_{f\text{Grenzzustand}} \times HEP \times \prod F_{\text{Negativ}}}{K_{\text{Brücke}} \times \prod F_{\text{Positiv}}}$$

Die Auswirkungen von großflächigen außergewöhnlichen Einwirkungen wie Überflutungen oder Erdbeben sind, wie in [43] am Beispiel Erdbeben gezeigt, prinzipiell technisch und konstruktiv beherrschbar. Das gilt auch für andere natürliche Einwirkungen, deren systematische Unterschätzung in [44] gezeigt wurde. Solche Unterschätzungen finden sich auch bei technischen Einwirkungen. Diese Unterschätzung basiert nicht auf unvollständigen Datensätzen für die statistischen Auswertungen wie bei natürlichen Einwirkungen, sondern auf technischen und sozialen Weiterentwicklungen, wie z. B. beim Schiffsanprall durch den Ausbau von Wasserstraßen. So wurden nach der Eröffnung des Rhein-Main-Donau-Kanals 1992 120 Brücken über den Main auf Schiffsanprall geprüft. Dabei wurden 55 Brücken als nicht standsicher beurteilt [45]. Veränderte technische Einwirkungen können also auch Auswirkungen auf eine Vielzahl von Brücken besitzen.

Der Beitrag zeigt, dass die Festlegung und Verwendung statistisch unbeständiger und kurzlebiger Werte für bemessungswirksame Einwirkungen der entscheidende Faktor für die beobachteten Versagenshäufigkeiten von Brücken sind. Viele Versagensereignisse könnten vermieden werden, wenn robuste bemessungswirksame Einwirkungswerte bei Entwurf und Ausführung von Brücken berücksichtigt werden.

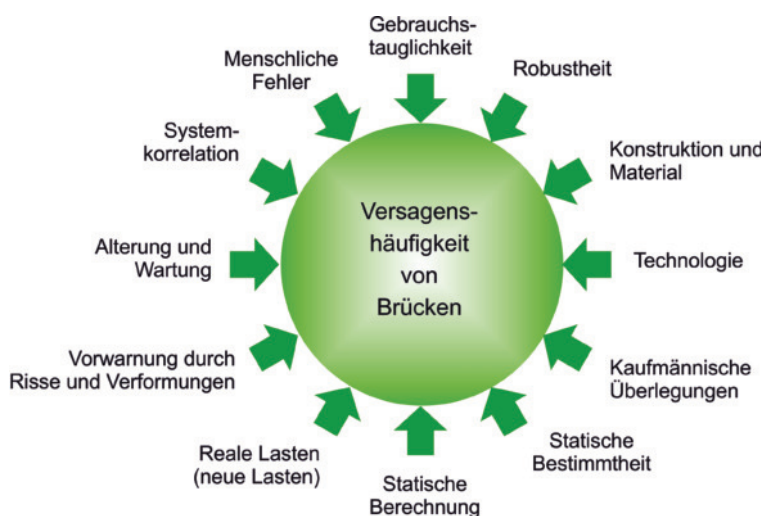


Bild 10 Mögliche Einflussfaktoren auf die Versagenshäufigkeit von Brücken

## Literatur

- [1] Curbach, M.; Nitzsche, W.-M.; Proske, D.: Die Sicherheit von Brücken im Vergleich zu anderen Risiken. In: Lehrstuhl Massivbau, Institut für Tragwerke und Baustoffe, TU Dresden (Hrsg.): Tagungsband zum 12. Dresdner Brückenbausymposium am 14.3.2002 in Dresden, Dresden, 2002, S. 197–218.
- [2] Das, P. C.: Safety of Bridges. London: Thomas Telford, 1997.
- [3] Vogel, T.; Zwicky, D.; Joray, D.; Diggelmann, M.; Hoj, N. P.: Tragsicherheit der bestehenden Kunstbauten, Sicherheit des Verkehrssystems Strasse und dessen Kunstbauten. Bundesamt für Strassen, 12/2009, Bern.
- [4] Proske, D.: Catalogue of Risks. Heidelberg: Springer, 2008.
- [5] Imhof, D.: Risk Assessment of Existing Bridge Structures. Diss., University of Cambridge/Kings College, 2004.
- [6] Menzies, J. B.: Bridge Failures, Hazards and Societal Risk. In: Das, P. C. (Hrsg.): Proc. of International Symposium on the Safety of Bridges, 4./5.7.1996 in London, London: Thomas Telford, 1996, S. 36–41.
- [7] Spaethe, G.: Die Sicherheit tragender Baukonstruktionen, zweite, neubearbeitete Auflage, Springer, Wien, 1992.
- [8] EN 1990:04-2017: Eurocode 0: Basis of Structural Design. 2nd draft.
- [9] Ellingwood, B. R.: Acceptable risk bases for design of structures. Progress in Structural Engineering and Materials 3 (2001) 2, April/June, S. 170–179.
- [10] Reichelt, A.; Richter, S.: Hochwasserschäden im Vorlandbereich der Elbebrücke Riesa – Maßnahmen zu deren Beseitigung. In: Lehrstuhl Massivbau, Institut für Tragwerke und Baustoffe, TU Dresden (Hrsg.): Tagungsband zum 13. Dresdner Brückenbausymposium am 13.3.2003 in Dresden, Dresden, 2003, S. 157–187.
- [11] Proske, D.: Beitrag zur Risiko-beurteilung von alten Brücken unter Schiffsanprall, Diss., Technische Universität Dresden, 2003.
- [12] Simandl, T.; Glatzl, J.; Schweighofer, B.; Blovsky, S.: Schiffsanprall an die Eisenbahnbrücke in Krems. Erstmalige Anwendung des neuen Eurocode EN 1991-1-7 für Außergewöhnliche Einwirkungen. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) 9, S. 722–728.
- [13] Proske, D.: Vergleich der Versagenswahrscheinlichkeit und

- der Versagenshäufigkeit von Brücken. *Bautechnik* 94 (2017) 7, S. 419–429.
- [14] DIN 1076:1999-11: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Brücken.
- [15] Federal Highway Administration (FHWA, Hrsg.): Recording and Coding Guide for the Structure Inventory and Appraisal of the Nations Bridges. Report FHWA-PD-96-001, Federal Highway Administration, Washington DC: US Department of Transportation, 1996.
- [16] Wolhuter, K. M.: Geometric Design of Roads Handbook. Boca Raton: CRP Press, Taylor & Francis Group, 2015.
- [17] Wardhana, K.; Hadipriono, F. C.: Analysis of Recent Bridge Failures in the United States. *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)* (2003) August, S. 144–150.
- [18] Klingmüller, O.; Bourgund, U.: Sicherheit und Risiko im Konstruktiven Ingenieurbau. Wiesbaden: Vieweg, 1992.
- [19] Schneider, R.; Fischer, J.; Bügler, M.; Nowak, M.; Thöns, S.; Borrmann, A.; Straub, D.: Assessing and updating the reliability of concrete bridges subjected to spatial deterioration – principles and software implementation. *Structural Concrete* 16 (2015) 3, S. 356–365.
- [20] Zerna, W.: Grundlage der gegenwärtigen Sicherheitspraxis in der Bautechnik. In: Hartwig, S. (Hrsg.): Große technische Gefahrenpotentiale: Risikoanalysen und Sicherheitsfragen, Berlin/Heidelberg: Springer, 1983, S. 99–109.
- [21] Taricska, M. R.: An Analysis of Recent Bridge failures in the United States (2000–2012). M.Sc. Thesis, The Ohio State University, 2014.
- [22] Lee, G. C.; Mohan, S. B.; Huang, C.; Fard, B. N.: A Study of U.S. Bridge Failures (1980–2012). Technical Report MCEER-13-0008, University at Buffalo, State University of New York, 2013.
- [23] Cook, W.: Bridge Failure Rates, Consequences, and Predictive Trends. Diss., Utah State University Logan, 2014.
- [24] Harik, I. E.; Shaaban, A. M.; Gesund, H.; Valli, Y. S.; Wang, S. T.: United States bridge failures, 1951–1988. *Journal of Performance of Constructed Facilities (ASCE)* 4 (1990) 4, S. 272–277.
- [25] Sharma, S.; Mohan, S.: Status of Bridge Failures in the United States (1800–2009). TRB 90th Annual Meeting: Transportation, Livability, and Economic Development in a Changing World, Washington D.C., 2011.
- [26] Hersi, M.: Analysis of Bridge Failure in United States (2000–2008). M.Sc. Thesis, The Ohio State University, 2009.
- [27] Christian, G. A.: Bridge Failures – Lessons learned. Bridge Engineering Course, University at Buffalo, 29.3.2010 – online unter: [http://mceer.buffalo.edu/education/bridge\\_speaker\\_series/2009-2010/presentations/P1%20Lessons%20learned%20from%20Bridge%20Failures\\_FINAL.pdf](http://mceer.buffalo.edu/education/bridge_speaker_series/2009-2010/presentations/P1%20Lessons%20learned%20from%20Bridge%20Failures_FINAL.pdf) (geprüft am 14.11.2017).
- [28] McLinn, J.: Major Bridge Collapses in the US and Around the World. IEEE Reliability Society 2009 Annual Technology Report. *IEEE Transactions on Reliability* 59 (2010) 3, 5 S.
- [29] Scheer, J.: Versagen von Bauwerken: Band 1: Brücken. Berlin: Ernst und Sohn, 2000.
- [30] Brown, C. B.: A fuzzy safety measure. *Journal of Engineering Mechanics Div. (ASCE)* 105 (1979), S. 855–872.
- [31] Nowak, A. S.; Collins K. R.: Reliability of structures. 2nd Ed., Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [32] Proske, D.: Brücken unter Alpinen Stoßeinwirkungen. In: Stritzke, J. (Hrsg.): Tagungsband zum 19. Dresdner Brückenbausymposium, 9./10.3.2009 in Dresden, Dresden, 2009, S. 243–257.
- [33] Proske, D.; Vögeli, A.: Bestimmung des Verklammerungsrisikos von Brücken bei Hochwasser. In: Curbach, M. (Hrsg.): Tagungsband zum 24. Dresdner Brückenbausymposium, 10./11.3.2014 in Dresden, Dresden, 2014, S. 243–254.
- [34] Akiyama, M.; Frangopol, D. M.; Arai, M.; Koshimura, S.: Probabilistic Assessment of Structural Performance of Bridges under Tsunami Hazard. In: Carrato, J.; Burn, J. G. (Hrsg.): Proc. of 43rd ASCE Structures Congress, 29.–31.3.2012 in Chicago (USA), 2012, S. 1919–1928.
- [35] von Kirchbach, H.-P.; Franke, S.; Biele, H.: Bericht der Unabhängigen Kommission der Sächsischen Staatsregierung Flutkatastrophe 2002. Dresden, 2002.
- [36] Kraus, U.: Lehren aus 2002 – Erfahrungen und Maßnahmen. Vortrag auf der Konferenz „Alle in einem Boot“ – 10 Jahre transnationale Zusammenarbeit beim Hochwasserrisikomanagement an der Labe-Elbe, 21./22.6.2012 in Dresden.
- [37] Eberlin, S.; Hock, B.: Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme – Eine Einführung in die Praxis, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014.
- [38] Davis-McDaniel, C.: Fault-Tree Model for Bridge Collapse Risk Analysis. M.Sc. Thesis, Clemson University, 2011.
- [39] Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (Hrsg.): SIA 269: Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich, Entwurf 03/2007.