

# Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke

Autor(en): **Schneider, Jörg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **108 (1990)**

Heft 46

PDF erstellt am: **20.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-77556>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke

**Für die Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauwerke ist die direkte Anwendung der Bemessungsregeln des bestehenden Normenwerks des SIA fraglich, denn in diesen Regeln sind Reserven enthalten zur Abdeckung von Voraussage-Unschärfen, die bei bestehenden Bauwerken durch Beobachtung und Messung der massgebenden Grössen ersetzt werden können bzw. müssen. Hierzu werden methodische Ansätze dargelegt und es wird gezeigt, wie man sich bei der Beurteilung am Sicherheitsniveau des Normenwerks orientieren kann.**

## Abgrenzung und Ziel

Tragwerke müssen tragsicher, gebrauchstauglich und dauerhaft sein. Das statisch-konstruktive Normenwerk des SIA (siehe insbesondere die Teile neusten Datums [1] und [2]) legt unter anderem die Grundsätze fest, die beim Nachweis von Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu beachten sind. Diese Grundsätze, insbesondere aber die festgelegten Zahlenwerte, gelten vorwiegend für die Projektierung neuer Bauwerke. Für die Beurteilung bestehender Tragwerke dient dieses Nor-

VON JÖRG SCHNEIDER,  
ZÜRICH

menwerk als *massgebende* Grundlage, kann jedoch allein nicht genügen, weil der Charakter der Unsicherheiten und Unschärfen und der Stand des Wissens (bzw. Unwissens) vor der Erstellung eines Bauwerks sich fundamental unterscheiden von dem, was angesichts eines bestehenden Bauwerks zu beachten ist.

Es zeigt sich, dass bei bestehenden Bauwerken die Beurteilung der *Tragsicherheit* das wesentliche und schwierige Problem ist, denn es gilt, Aussagen über das Verhalten des Tragwerks in Extremsituationen zu machen, die in der Regel ausserhalb des direkt erschlossenen Erfahrungsbereichs liegen. Dazu gehört oft auch die äusserst schwierige und für die Beurteilung der Tragsicherheit entscheidende Frage, in welchem Zustand sich gewisse Tragelemente, z.B. in bezug auf Korrosion, befinden.

Die *Gebrauchstauglichkeit* lässt sich hingegen oft rasch beurteilen, denn Durchbiegungen, Rissbildungen, die Charakteristik des Schwingungsverhal-

tens usw. zeigen sich unter den Umständen des normalen Gebrauchs und lassen schlüssige Aussagen ohne weiteres zu. Auch die Frage der *Dauerhaftigkeit* stellt sich bei bestehenden Bauwerken in anderem Licht, kann man doch in der Regel anhand des angetroffenen Zustands leichter auf die zu erwartende weitere Entwicklung schliessen.

Es ist Ziel dieses Aufsatzes, die Grundlinien der Argumentation und des Kalküls vorzuschlagen, aufgrund welcher die Tragsicherheit bestehender Bauwerke beurteilt werden kann. Auf Methoden der Datenbeschaffung geht dieser Aufsatz nicht ein.

## Problemstellung

### Eine erfundene Geschichte mit glücklichem Ausgang

Da ist ein Hochhaus, das auf sehr gedungenen Stützen steht. Per Zufall entdeckt man einen entscheidenden Fehler bei der Bemessung der Stützen. Der Querschnitt ist viel zu klein. Statt des notwendigen Stützendurchmessers von  $D = 1,35$  m wurde nur ein Durchmesser von  $D = 0,95$  m in die Pläne übernommen und bei der Ausführung realisiert. Eine mit einem gewissen Aufwand verbundene Überprüfung des Bauwerks zeigt dann allerdings, dass der Unternehmer weit bessere Betonqualität geliefert und die Betonfestigkeit im übrigen im Laufe der verstrichenen Zeit zusätzlich noch wesentlich zugenommen hat. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob die Tragsicherheit dieser Stützen gegeben ist.

Es stellen sich im übrigen weitere interessante Fragen, z.B.: Liegt hier – falls die Tragsicherheit genügend wäre – überhaupt ein Schaden vor, wie ist die

Schuldfrage zu beantworten und wer muss angesichts des entdeckten Fehlers gegebenenfalls wem wieviel zahlen? Die Beantwortung dieser Fragen sei kompetenteren Leuten überlassen. Auch lassen sich leicht Varianten dieser Geschichte ausdenken, bei der z.B. ein Fehler des Unternehmers durch glückhafte Übermessung durch den Ingenieur kompensiert wird oder wo zusätzliche Lasten dank glückhafter Überbemessung und/oder erhöhter Festigkeiten aufgenommen werden können.

Wir wollen die Geschichte in ihrer ersten Variante begleitend diesem Aufsatz zugrundelegen.

## Formulierung des Problems

Die Geschichte beleuchtet in einfachster Form den hier angesprochenen Problembereich: Kann die bestehende Konstruktion als sicher gelten? Gegeben sind durch Statik, Pläne und Ausschreibungstext die Grundlagen der Ausführung, dann durch Messungen der tatsächliche Querschnitt der Stützen und die Festigkeit des Betons (mit gewissen Streuungen und Unschärfen wegen beschränkter Probenzahl). Schliesslich ist die grundsätzliche Möglichkeit gegeben, die Normalkraft in den Stützen aufgrund der auf das Bauwerk wirkenden Lasten und Kräfte neu zu ermitteln, wobei allerdings Ungewissheiten in der Voraussage zukünftiger Nutzlasten zu beachten wären.

Es handelt sich im Prinzip um eine im wesentlichen zentrisch belastete, gedrungene Stütze. Für diesen Fall lässt sich die Sicherheitsbedingung in aller-einfachster Form wie folgt schreiben:

Hierin sind

$$A \cdot B - G - Q > 0$$

- A Stützenquerschnitt
- B Betonfestigkeit
- G Normalkraft aus Eigenlasten
- Q Normalkraft aus Nutzlasten

Die Stützen werden nicht versagen, wenn die Ungleichung erfüllt ist. Freilich wird sofort klar, dass die vier Grössen keineswegs in aller Schärfe bekannt sind. Während der Stützendurchmesser relativ genau messbar und damit der Querschnitt ziemlich zuverlässig zu berechnen ist, muss die Ermittlung der Festigkeit in aller Vorsicht geschehen, um die Stützen nicht zusätzlich zu schwächen. Kernbohrungen werden



deshalb nur Zonen entnommen, die nicht kritisch sind. Damit bleibt eine gewisse Ungewissheit (um das Wort Unsicherheit - als missverständlich - hier zu vermeiden) über die Betonfestigkeit im massgebenden Bereich der Stützen bestehen. Auch bleibt die Frage zunächst offen, wie die an den Bohrkernen ermittelten Festigkeitswerte im Hinblick auf die Frage der Tragsicherheit zu interpretieren seien. Schliesslich ist auch die geringe Anzahl der Proben zu beachten, die Zufallsergebnisse nicht ganz ausschliessen lässt. Dann ist der Genauigkeitsgrad bei der Ermittlung der Normalkräfte in der Stütze zu beachten. Schliesslich müssen auch die einzelnen Komponenten der Sicherheitsbedingung zugrundeliegenden Rechenmodelle bis zu einem gewissen Grade in Frage gestellt werden: Man redet von Modellunschärfen.

Allgemein gesagt: Es geht in diesem Zusammenhang um Variablen, Zufallsvariablen, stochastische Grössen usw. im Raum und in der Zeit: Nicht eine einzige Zahl genügt zur Beschreibung eines Merkmals, es braucht weitere Informationen, z.B. Mittelwert, Standardabweichung, Verteilungstyp, kurz: die Parameter der Verteilung der zu beschreibenden Variablen. Es erscheint angebracht, hier etwas weiter auszuholen.

## Beurteilungsgrundlagen

### Die Wichtigkeit von Information

Um den grundsätzlichen Charakter solcher Variablen aufzuzeigen, sei beispielsweise ein Bohrkern betrachtet und nach seiner Festigkeit gefragt. Wir haben keine Prüfpresse, aber vielleicht eine Gruppe von Experten, die wir befragen können. Wir bitten z.B. alle diejenigen, die Hand zu erheben, die der Meinung sind, dass die Festigkeit des Bohrkerns kleiner als  $x$  sei. Bei  $x = 20$  N/mm<sup>2</sup> wird wohl niemand aufstrecken. Bei höheren Zahlenwerten werden immer mehr Hände hochgehen, bis beispielsweise bei  $x = 70$  N/mm<sup>2</sup>, alle aufstrecken. Das lässt sich grafisch schön darstellen: Wir tragen über der Festigkeits-Skala bei  $x$  den Prozentsatz derjenigen Fachleute auf, die jeweils bei  $x$  aufstrecken. Was so entsteht, nennt man Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  (Bild 1).

Die Ableitung der Verteilungsfunktion nach  $x$  ergibt die Verteilungsdichte  $f_X(x)$ , die mit der Abszisse den Flächeninhalt 1 einschliesst. Die auf die Abszisse projizierte Lage  $x_m$  des Schwerpunkts dieser Fläche entspricht bekanntlich dem Mittelwert, der Trägheitsradius der Fläche der Standardabweichung  $\sigma_X$  der Variablen.

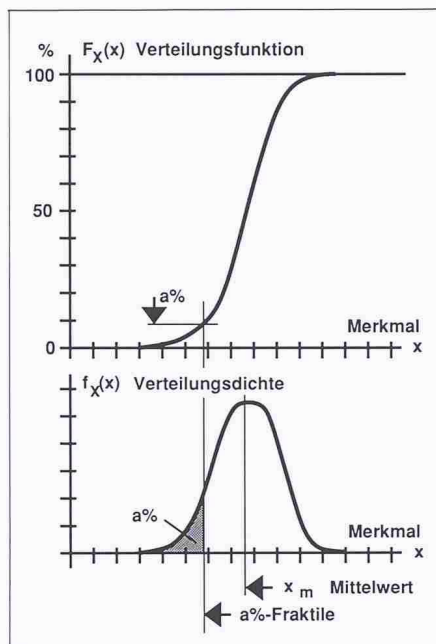


Bild 1. Verteilungsdichte und Verteilungsfunktion einer Variablen und weitere begriffliche Festlegungen

Entscheidend für das folgende ist nun, dass der Bohrkern eine ganz bestimmte Festigkeit hat (die wir allerdings noch nicht kennen) und dass die durch Befragung gewonnene Verteilungsfunktion lediglich die Vermutung der Gruppe widerspiegelt, in die jeder Einzelne seine Erfahrung und seine Urteilskraft eingebracht hat. Die sich aus der Befragung ergebende Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  beschreibt den Grad des Vertrauens der befragten Gruppe in die Aussage, dass  $X < x$  ist. Da die Befragung einer anders zusammengesetzten Gruppe jedoch zweifellos zu anderen Aussagen führen würde, sind Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte als subjektive Grössen anzusehen.

Bezeichnend ist weiter, dass sich die Antworten ändern, wenn zusätzliche Information einfließt. Die Kenntnis der Ergebnisse aus der Prüfung dreier vergleichbarer Bohrkerns beispielsweise wird die Einschätzung des vorgelegten Bohrkerns durch die befragte Gruppe unter Umständen grundlegend verändern. Mit steigender Zahl von Prüfergebnissen werden Verteilungsfunktion und Verteilungsdichte immer zuverlässiger; der subjektive Charakter der Einschätzung tritt mehr und mehr zurück. Bei grosser Probenzahl kann man sich fast vollständig auf die Methoden der Statistik stützen, und die Verteilung beschreibt dann - quasi objektiv - die Grundgesamtheit der Festigkeitswerte des Betons in der untersuchten Zone.

Was hier für die Einschätzung der Festigkeit von Bohrkernen ausgeführt wurde, ist typisch für fast alle Grössen,

mit denen der Bauingenieur zu tun hat, z.B. mit einer Einschätzung der Mächtigkeit einer Bodenschicht, der Grösse einer Schneelast usw. Zu jeder Aussage, die er macht, müsste er im Grunde genommen seinen zwischen 0 und 1 liegenden persönlichen und damit subjektiven Grad des Vertrauens in die Aussage hinzufügen. Und dieser Grad des Vertrauens wird von seinem Informationsstand in entscheidender Weise abhängen.

Dieser subjektive und wesentlich vom Informationsstand beeinflusste - mit dem Namen Bayes (Thomas Bayes, englischer Mathematiker: Satz von Bayes, 1763) verknüpfte - Wahrscheinlichkeitsbegriff stützt sich auf die Umgangssprache, die ohne weiteres die Aussage gestattet, dass es morgen mit 30 Prozent Wahrscheinlichkeit regnen wird. Zwar weiss jedermann, dass es ohne allen Zweifel morgen entweder regnet oder dann eben nicht regnet, also 100% oder 0%. Es kann nicht 30% regnen. Trotzdem ist die Aussage in bezug auf die Frage, ob ich einen Regenschirm mitnehmen soll, unter Umständen nützlich. Und ein Blick auf die Wetterkarte wird vielleicht meine Einschätzung ändern.

### Versagenswahrscheinlichkeit als Hilfsbegriff

Aus dem vorstehenden ergibt sich, dass wir es in der Regel mit Variablen  $X$  zu tun haben, die durch Verteilungsfunktion  $F_X(x)$  und Verteilungsdichte  $f_X(x)$  beschrieben werden können. Hierin steht  $X$  immer für die Variable selbst (z.B. die Festigkeit des Betons in den betrachteten Stützen) und  $x$  für eine ganz bestimmte Realisation dieser Variablen (z.B. das Resultat einer Messung oder einen beliebig gewählten Festigkeitswert aus dem Kontinuum aller möglichen Werte). In diesem Sinne sind in der Sicherheitsbedingung eingeführten Grössen  $A$ ,  $B$ ,  $G$  und  $Q$  als Variablen aufzufassen. Es wird offensichtlich, dass wir Methoden brauchen, die den Umgang mit solchen unscharfen Grössen gestatten.

Im vorliegenden Zusammenhang stellen wir uns normalerweise die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Sicherheitsbedingung nicht erfüllt ist, wir fragen nach der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$ . Das schreibt sich wie folgt:

$$p_f = P[A \cdot B - G - Q \leq 0].$$

Hierin steht  $P[...]$  für die Wahrscheinlichkeit, mit der die Aussage im Innern der Klammer zutrifft. Dass es sich hierbei wieder um eine subjektive Wahr-



scheinlichkeit, um den Grad des Vertrauens handelt, den der Befragte angesichts der ihm zugänglichen Information in die in Klammern gesetzte Aussage hat, dürfte nun klar sein. Das erklärt auch durchaus die Tatsache und macht sie akzeptabel, dass verschiedene Experten über einen ganz bestimmten Tatbestand eine unterschiedliche Aussage machen: Jeder stützt sich bei seiner Aussage auf seine ganz persönliche Erfahrung. Das erklärt auch, warum sich die Auffassungen von Experten nach einem im Gespräch erfolgten Austausch von Informationen und Erfahrungen nach und nach annähern können. Und es erklärt auch, warum man erfahrenen Experten eher traut.

Zum Schluss steht eine Aussage da vom Typus: Die Wahrscheinlichkeit, dass diese Brücke versagt, wenn dieses ganz bestimmte Fahrzeug darüber fährt, ist z.B. 5%. Dabei ist es – in Analogie zum Beispiel des Regenschirms – offensichtlich, dass die Brücke bei der Überfahrt des spezifizierten Fahrzeugs ohne allen Zweifel entweder einstürzt oder eben nicht einstürzt. Sie hat nur diese beiden Möglichkeiten. Sie kann nicht 5% einstürzen. Trotzdem ist die Aussage über die so verstandene Versagenswahrscheinlichkeit in bezug auf die Frage, ob man die Brücke weiter im Verkehr lassen darf, unter Umständen von grossem Wert.

Zur Ermittlung solcher Wahrscheinlichkeiten, als Methode zur Verarbeitung unscharfer Grössen, steht das aus der Vermessung seit langem bekannte Fehlerfortpflanzungsgesetz zur Verfügung. Es bedarf angesichts der hier betrachteten kleinen Wahrscheinlichkeiten gewisser Anpassungen, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll.

Die heute im vorliegenden Bereich als Standard geltende Methode von *Hasofer/Lind* mit Ergänzungen von *Rackwitz/Fiessler* ist in diesem Sinne ausgereift (siehe z.B. [3]). Man kann im übrigen davon ausgehen, dass die Methode über Programme, die schon auf kleinen PCs laufen, für die unmittelbare Anwendung erschlossen sind [4].

### Sicherheitsindex

Es zeigt sich, dass die Verwendung der Versagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  als Mass für die Sicherheit in mancher Hinsicht missverständlich ist und unnötige Diskussionen heraufbeschwört.

Es liegt deshalb nahe, als Mass den sogenannten *Sicherheitsindex*  $\beta$  zu verwenden, der über die Standard-Normalverteilung in einem direkten und eindeutigen Zusammenhang mit der Ver-

sagenswahrscheinlichkeit  $p_f$  steht. Es gilt:

$$\beta = \Phi^{-1} \{ p_f \}.$$

Es handelt sich um den Wert, den man in entsprechenden Tabellen der Standard-Normalverteilung neben dem Wert von  $p_f$  ablesen kann. Je grösser der Wert des Sicherheitsindex, desto grösser die Sicherheit, desto kleiner demnach die Versagenswahrscheinlichkeit.

### Normative Festlegung von Variablen

Für die Lösung des eingangs formulierten Problems ist eine normative Festlegung der hinter den einzelnen Zahlenwerten der verschiedenen Normen stehenden Parameter der Variablen nötig. Es kann sich hierbei nur um Vermutungen handeln, denn die Normkommissionen gingen in ihrer Arbeit ja nicht deduktiv vor, sondern orientierten sich eher an früheren schweizerischen, ausländischen oder internationalen Normenwerken. Dass es sich bei der normativen Festlegung der Parameter um Vermutungen handelt, ist jedoch zunächst nicht von grossem Einfluss.

In der Folge seien solche Vermutungen niedergelegt, soweit sie für diesen Aufsatz und das oben eingeführte Beispiel von Interesse sind. Es wäre eine Aufgabe des SIA, entsprechende Hintergrundinformationen für alle relevanten Variablen seines Normenwerks bereitzustellen. Eine schöne Zusammenstellung dieser Art findet sich in [5]. Die nachstehend getroffenen Festlegungen gelten nur im Rahmen dieses Aufsatzes und dürfen nicht verallgemeinert werden.

### Betonfestigkeit B

die in [2] benützte Schreibweise für die Klassierung von Beton gibt in der Form von z.B. B35/25 mit der ersten Zahl den anzustrebenden Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit  $w_m$  mit der zweiten den für die Bemessung der Stütze wichtigeren sogenannten Mindestwert, der etwa einer 2%-Fraktile entspricht. Die Differenz der Zahlen entspricht damit einer etwa zweifachen Standardabweichung, die von der Normkommission demnach allem Anschein nach unabhängig von der Betonsorte mit  $\sigma_w = 5 \text{ N/mm}^2$  eingeschätzt wird. Massgebend für die Sicherheit der Stütze ist jedoch nicht die an speziell hergestellten Würfeln gemessene Festigkeit nach normgerechter Lagerung während 28 Tagen, sondern die massgebende Festigkeit im Bauwerk zum massgebenden Zeitpunkt. Dieser Unterschied lässt sich

durch das Einführen einer sogenannten Übertragungsvariablen  $U$  (siehe z.B. [6]) wie folgt berücksichtigen:

$$B = W \cdot U.$$

Die Würfeldruckfestigkeit  $B$  ist eine Variable im vorher besprochenen Sinn. Die Übertragungsvariable  $U$  berücksichtigt nun sowohl den Quotienten aus der für den Widerstand der Stütze massgebenden Prismenfestigkeit und der Würfeldruckfestigkeit, als auch den Quotienten aus der Festigkeit am Bauwerk und derjenigen nach normgerechter Lagerung während 28 Tagen. Es ist offensichtlich, dass diese Übertragungsvariable einen Mittelwert unterhalb 1 haben muss, bei einer Standardabweichung von vielleicht 10 bis 15%. Das sagt uns die aus vielen Messungen gewonnene Erfahrung. Und hier ist die Normierung: Wir legen normativ fest:

$$U: \quad u_m = 0,80 \\ \sigma_U = 0,10 \\ \text{Verteilungstyp: Log-normal}$$

$$W: \quad w_m \text{ gemäss erster Zahl in Bezeichnung B./..} \\ \sigma_w = 5 \text{ N/mm}^2 \\ \text{Verteilungstyp: Log-normal}$$

Wie man sieht, hat sich aus der Argumentation eine Aufspaltung von  $B$  in zwei Variablen ergeben. Diese Verfeinerung zunächst grob erfasster Zusammenhänge ist oft zu beobachten.

### Querschnittsfläche A der Stütze

Die Querschnittsfläche der Stütze kann normalerweise aus den Nennwerten der Abmessungen ermittelt werden, wobei bei grösseren Querschnitten und guter Ausführungssorgfalt eine Standardabweichung von  $\sigma = 7 \text{ mm}$  erfahrungsgemäss kaum überschritten wird. Diese sei normativ auf diesen Wert festgelegt.

Bei einer kreisförmigen Stütze ist dann

$$A = 0,25 \cdot \pi \cdot D^2$$

worin der Mittelwert von  $D$  dem Nennwert gleichgesetzt wird. Als Verteilungstyp gelte, ebenfalls normativ, die Normalverteilung.

### Normalkräfte in den Stützen

Es ist hier der Einfachheit halber nur von Eigenlasten  $G$  und Nutzlasten  $Q$  die Rede. Die Parameter der Verteilungen dieser Grössen seien durch

$$G: \quad g_m = 1,05 \cdot G_{nom} \\ \sigma_G = 0,07 \cdot g_m \\ \text{Verteilungstyp: Normalverteilung}$$

$$Q: \quad q_m = 0,80 \cdot Q_{nom} \\ \sigma_Q = 0,30 \cdot q_m \\ \text{Verteilungstyp: Extremwert-I-Verteilung}$$



beschrieben. In diesen Ausdrücken sei mit dem Index «*nom*» auf die in der Norm festgehaltenen Kennwerte der entsprechenden Lasten verwiesen.

### Modellunschärfen

Bei der oben eingeführten Sicherheitsbedingung handelt es sich um die einfachste Formulierung. Unberücksichtigt bleiben Einflüsse ungewollter Exzentritäten, gewisser lokaler Inhomogenitäten über den Querschnitt usw., die wir hier nicht näher untersuchen wollen. Diese Einflüsse verringern tendenziell die Tragfähigkeit der Stütze, was wir mit einer Modellvariable berücksichtigen wollen. Auch hier sind normativ Festlegungen zu treffen, z.B. wie folgt:

$$M: \quad m_m = 0,85 \\ \sigma_m = 0,07 \cdot m_m \\ \text{Verteilungstyp: Normal-} \\ \text{verteilung}$$

Weiter erfordern auch die Unschärfen bei der Ermittlung der Normalkräfte in den Stützen die Einführung einer Modell-Unschärfe  $N$ , deren Parameter beispielsweise wie folgt festgelegt seien:

$$N: \quad n_m = 1,00 \\ \sigma_M = 0,07 \cdot m_m \\ \text{Verteilungstyp: Normal-} \\ \text{verteilung}$$

Damit wären die notwendigen Grundlagen zusammengestellt.

### Kalibrierung am Problem

Die Grundidee der Beurteilung der Tragsicherheit ist die Kalibrierung des Sicherheitsniveaus am Problem selbst. Es gelte das Axiom, dass die korrekte Anwendung des Normenwerks des SIA zu einer als sicher zu bezeichnenden Konstruktion führt. Lässt sich demnach nachweisen, dass eine bestehende Konstruktion einen Sicherheitsindex aufweist, der mindestens einer normgemässen Bemessung entspricht, darf die Konstruktion als sicher gelten.

Der Nachweis besteht demnach aus drei Schritten:

- Normgemässe Bemessung der fraglichen Konstruktion,
- Ermittlung des Sicherheitsindex  $\beta_0$  der normgemäss bemessenen Konstruktion unter Annahme der hinter der Norm vermuteten Parameter der Variablen,
- Ermittlung des Sicherheitsindex  $\beta$  der bestehenden Konstruktion unter Einführung der dem festgestellten Zustand angepassten (aktualisierten) Werte der Parameter.

Die Konstruktion gilt dann als sicher, wenn

$$\beta \geq \beta_0$$

ist. Es zeigt sich, dass die absolute Grösse von  $\beta$  und  $\beta_0$  von den getroffenen Festlegungen über die Variablen stark beeinflusst werden. Der hier vorgeschlagene Vergleich hingegen ist nur wenig von den Festlegungen abhängig.

### Ein Zahlenbeispiel

#### Normgemässe Bemessung der Konstruktion

Der Ingenieur hatte ursprünglich (ich spinne das Beispiel weiter) mit  $f_c = 16$  N/mm<sup>2</sup>, entsprechend einem Beton B35/25, gerechnet. Die Nominalwerte der Normalkräfte in den Stützen ermittelte er zu

$$G_{nom} = 9,0 \text{ MN} \\ Q_{nom} = 2,0 \text{ MN}$$

Nach SIA 160 ergibt sich der Bemessungswert der Beanspruchung zu

$$S_d = 1,3 \cdot 9,0 + 1,5 \cdot 2,0 = 14,7 \text{ MN.}$$

Die Erfüllung der Sicherheitsbedingung nach SIA 162

$$S_d \leq R/\gamma_R$$

erfordert mit  $\gamma_R = 1,2$  und dem aus den Diagrammen der Norm bei kleiner Schlankheit herausgelesenen Wert  $n_R = 0,77$  einen Stützenquerschnitt von

$$A = 1,2 \cdot 14,7/0,77 \cdot 16 = 1,43 \text{ m}^2$$

entsprechend einem Durchmesser einer kreisförmigen Stütze von  $D = 1,35$  m.

#### Sicherheitsindex $\beta_0$ des normgemäss bemessenen Tragwerks

Es geht im zweiten Schritt darum, den Sicherheitsindex  $\beta_0$  dieser als sicher geltenden Stütze zu ermitteln. Dafür stützen wir uns auf die oben eingeführte einfache Versagensbedingung, die mit den weiter vorne begründeten zusätzlichen Variablen wie folgt geschrieben werden kann:

$$M \cdot 0,25 \cdot \pi D^2 \cdot W \cdot U - N \cdot (G + Q) \leq 0.$$

Diese Versagensbedingung und die vorne zusammengestellten normativen Parameter gibt man z.B. ins Programm MacBeta [4] ein. Das ist eine Sache von vielleicht zehn Minuten. Herauskommt nach wenigen automatisch durchlaufenen Iterationsschritten der Sicherheitsindex  $\beta_0$  der normgemäss bemessenen Stütze mit  $\beta_0 = 4,9$ .

Dieser Sicherheitsindex gibt im vorliegenden konkreten Einzelfall ein Mass für das Sicherheitsniveau des Normen-

werks des SIA in bezug auf Stützen vom betrachteten Typ. Dabei ist offensichtlich, dass sich bei der Wahl eines anderen, z.B. verfeinerten Modells ein anderer Wert ergeben hätte. Auch andere normative Festlegungen der Parameter der Variablen hätten das Ergebnis verändert. Der Absolutwert des Sicherheitsindex  $\beta_0$  ist deshalb ohne Aussagekraft. Es handelt sich lediglich um einen Wert, der den sicherheitsrelevanten Vergleich der bestehenden Stütze mit dem Sicherheitsniveau der Norm gestattet.

#### Sicherheitsindex $\beta$ des bestehenden Tragwerks

Im dritten Schritt ist der Sicherheitsindex  $\beta$  der betrachteten Stütze zu ermitteln, wobei natürlich die Parameter der Variablen den vorliegenden Gegebenheiten anzupassen sind. Man redet vom Aktualisieren der Parameter der Variablen.

Zu aktualisieren sind die Betonfestigkeit  $B = W \cdot U$  und der Stützendurchmesser  $D$ . Es gibt keinen hinreichenden Grund, auch die Lasten zu aktualisieren, denn in der Ermittlung der Lasten sind keine nennenswerten Abweichungen zu verzeichnen. Auch gibt es keine aus Unterschieden zwischen Projekt und bestehender Konstruktion herleitbaren Gründe, die Parameter der Modellvariablen  $M$  und  $N$  in Frage zu stellen.

Eingehende Messungen der Stützen an verschiedenen Stellen zeigen, dass der Stützendurchmesser mit

$$D = 0,95 \text{ m} \\ \sigma_D = 5 \text{ mm}$$

als normalverteilte Grösse eingesetzt werden kann.

Für den Beton wurden eine ganze Reihe von Bohrkernen entnommen und auf ihre Druckfestigkeit  $K$  geprüft. Die statistische Auswertung führt zu einer mittleren Festigkeit von  $k_m = 46$  N/mm<sup>2</sup> und einer Standardabweichung von  $\sigma_K = 4$  N/mm<sup>2</sup>.

Die Übertragungsvariable  $U$  muss angesichts der prismatischen Form der Bohrkern nur noch berücksichtigen, dass die Proben nicht genau im massgebenden Querschnitt gezogen wurden. Allerdings wurde mit dem Betonprüfhammer die Gleichmässigkeit des Betons und damit die Gültigkeit der Ergebnisse auch für den massgebenden Querschnitt weitgehend gesichert. Es erscheint angemessen, die Übertragungsvariable zu aktualisieren auf

$$U: \quad u_m = 1,00 \\ \sigma_u = 0,05 \\ \text{Verteilungstyp: Log-normal.}$$



An die Stelle von  $W$  in der Versagensbedingung tritt demnach  $K$ . Im übrigen sind die aktualisierten Werte für  $U$  und  $D$  einzusetzen.

Eine erneute Berechnung mit dem Programm MacBeta liefert den Sicherheitsindex  $\beta$  der bestehenden Stütze zu  $\beta = 5,7$ .

Da dieser Wert grösser ist als  $\beta_0$ , kann die bestehende Stütze im Vergleich zum Normenwerk des SIA als sicher bezeichnet werden.

### Vertiefte Einsichten

Die hier verwendete Methode von Hasofer/Lind und die entsprechenden Programme, wie z.B. MacBeta, liefern im übrigen mit den sogenannten Bemessungswerten  $x^*$  und den Wichtigkeitsfaktoren  $\alpha$  weitere Einsichten in das Problem. Die wesentlichen Ergebnisse der Analyse der bestehenden Stütze sind – neben den Eingaben – in den zwei letzten Spalten der Tabelle 1 zusammengestellt.

X	Typ	$x_m$	$\sigma_x$	$x^*$	$\alpha$
M	N	0.85	0.060	0.676	-0.51
D	N	0.95	0.005	0.948	-0.06
K	LN	46	4	35.7	-0.51
U	LN	1.00	0.050	0.919	-0.29
G	N	9.45	0.662	10.51	+0.28
Q	ET1	1.60	0.480	3.21	+0.43
N	N	1.00	0.070	1.14	+0.36

Tabelle 1. Parameter der Variablen der bestehenden Stütze und Ergebnisse der Berechnung mit MacBeta

Je grösser der Absolutwert des Wichtigkeitsfaktors, desto grösser ist der Einfluss der Variablen auf den Sicherheitsindex. Im vorliegenden Beispiel stehen die Modellvariablen für den Widerstand der Stütze und die Festigkeit des Betons hervor. An diesen Stellen müsste man demnach zuerst anset-

zen, um durch Verbesserung des Informationsstands den Sicherheitsindex zu beeinflussen. Die Summe der Quadrate der  $\alpha$ -Werte ist übrigens = 1. Das Vorzeichen kennzeichnet im verwendeten Programm mit negativem Vorzeichen diejenigen Variablen, wo kleine Werte, mit positivem diejenigen, wo grosse Werte gefährlich sind.

Die Bemessungswerte  $x^*$  schliesslich entsprechen denjenigen Realisationen der Variablen, bei denen das Versagen am wahrscheinlichsten ist. Setzt man diese Werte in die Versagensbedingung ein, ist sie genau erfüllt. Man erkennt hier, mit welchen Werten die Methode schliesslich die Versagensbedingung erfüllt.

### Einbettung in das Sicherheitskonzept des SIA

Ohne Zweifel muss die vorstehend behandelte Beurteilung der Tragsicherheit bestehender Bauten in das Sicherheitskonzept des statisch-konstruktiven Normenwerks des SIA eingebettet werden. Dieses fordert die Aufstellung eines *Nutzungsplans* in gemeinsamer Arbeit von Bauherr bzw. Betreiber und den beteiligten Fachleuten. Es geht dann darum festzuhalten, mit welchen Sicherheitsmassnahmen den erkannten und als wesentlich erachteten Gefährdungsbildern begegnet werden soll. Das ist der *Sicherheitsplan*. Gerade bei bestehenden Bauten, deren Tragsicherheit fraglich ist, bieten sich neben Verstärkungsmassnahmen eine Reihe – oft kostengünstigerer – organisatorischer oder administrativer Massnahmen an. Es gilt dann weiter, festzuhalten, welche *Risiken akzeptiert* werden. Eine wesentliche Rolle kommt bei bestehenden Bauwerken dem *Überwachungs-* und dem *Unterhaltsplan* zu, die festhalten, wie der Bestand des Bauwerks über die Zeit gesichert werden soll. Schliesslich

### Literatur

- [1] Norm SIA 160: «Einwirkungen auf Tragwerke», 1989. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- [2] Norm SIA 162: «Betonbauten», 1989. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.
- [3] Siehe z.B. Ang, A.H.S. & Tang, W. H.: «Probability Concepts in Engineering Planning and Design, Volume II – Decision, Risk and Reliability». John Wiley & Sons, New York, 1984
- [4] Siehe z.B. das Programm «MacBeta» für den Macintosh, geschrieben von Th. Burg, Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich
- [5] Vrouwenvelder, A.C.W.M. & Siemens, A.J.M.: «Probabilistic calibration procedure for the derivation of partial safety factors for the Netherlands building codes», HERON, Vol. 32, 1987, Stevin Laboratory of the faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Delft, NL.
- [6] SIA 260: «Sicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Tragwerken – Weisung des SIA an seine Kommissionen für die Koordination des Normenwerks». 5. Fassung, 1981. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein, Zürich.

ist durch eine sorgfältige Zusammenstellung aller wesentlichen *Bauakten* dafür zu sorgen, dass für eine erneute Beurteilung alle Grundlagen unmissverständlich und lückenlos vorliegen.

Adresse des Verfassers: Prof. Jörg Schneider, Institut für Baustatik und Konstruktion, Eidg. Techn. Hochschule Zürich, 8093 Zürich-Hönggerberg.