

# Überlegungen zu einem konkreten Sicherheitsbegriff für die Bemessung von Bauwerken

Autor(en): **Schneider, Jörg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **89 (1971)**

Heft 29

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-84933>

## **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.

## Überlegungen zu einem konkreten Sicherheitsbegriff für die Bemessung von Bauwerken

DK 331.823:624

Bericht an die Kommission für die SIA-Norm 162, im Auftrag der Arbeitsgruppe «Sicherheitsfragen», erstattet von Prof. Jörg Schneider, ETH Zürich

*Die Kommission des SIA für die SIA-Norm Nr. 162 (Norm für die Berechnung, Konstruktion und Ausführung von Bauwerken aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton) hat einer aus ihrer Mitte gewählten Arbeitsgruppe den Auftrag erteilt, den Sicherheitsbegriff der heute gültigen Norm einer kritischen Prüfung zu unterziehen, und – falls erforderlich – einen klärenden Bericht und grundlegende Vorschläge vorzulegen, welche als Grundlage für die nächste Revision der Norm und damit für die weitere Arbeit der Kommission dienen sollen. Der Bericht liegt vor und wurde Ende April 1971 von der Kommission gutgeheissen. Wir drucken in der Folge diesen Bericht auf Wunsch der Kommission im vollen Wortlaut ab, um den die Normenarbeit beeinflussenden Gedankengang einer weiteren Fachwelt zur Kenntnis zu bringen.*

### 1. Problemstellung

Am Anfang der Arbeit des projektierenden Ingenieurs stehen Vorstellungen, die er sich von der Konstruktion macht, welche er zu verwirklichen im Begriffe ist. Zu diesen gehören Vorstellungen über die äusseren Einwirkungen auf die Konstruktion, solche bezüglich des Verhaltens derselben sowie schliesslich auch Vorstellungen über Eigenschaften der verwendeten Materialien, über ihr Zusammenwirken und die Herstellung der Konstruktion selbst. Die Vorstellungen des Ingenieurs weichen in jeder Hinsicht mehr oder weniger stark ab von der schliesslich realisierten Wirklichkeit.

Der projektierende Ingenieur ist bestrebt, das Verhalten dieser Wirklichkeit vorauszusagen. Hierbei ist er sich der Abweichungen bewusst, die zwischen den Vorstellungen (die er der Voraussage zugrundelegt) und der Wirklichkeit möglich sind. Er weiss, dass gewisse Elemente seiner Vorstellung unsicher sind und dass gewisse andere Elemente dieser Vorstellung nicht von ihm, sondern von der Tätigkeit anderer Menschen, von Zufälligkeiten, von ungünstigen äusseren Einflüssen und dergleichen abhängig sind. Der Ingenieur wird deshalb seine Voraussagen unter Beachtung dieser Unsicherheiten machen und seine Massnahmen so lenken, dass die von ihm projektierte Konstruktion trotz dieser Unsicherheiten *sicher* ist. Hierbei wird er seine Verantwortung in der Art einschränken, dass er einerseits von einer mit dem Besteller *vereinbarten Nutzung* ausgeht, andererseits eine gewisse *zumutbare Sorgfalt* in der Ausführung der von ihm projektierten Konstruktion voraussetzt. Innerhalb der so abgesteckten Grenzen ist der Ingenieur für die Sicherheit der Konstruktion verantwortlich.

Die Erfüllung dieser Forderung setzt voraus, dass sich der Ingenieur einerseits Klarheit verschafft über alle wesentlichen Aspekte der Nutzung und dass er andererseits festlegt, unter welchen Gesichtspunkten die Sicherheit der Konstruktion zu überprüfen ist. Zur ersten Gruppe gehören Fragen der Belastungsart und Belastungsintensität, allfälliger weiterer äusserer Einwirkung auf die Konstruktion wie Temperatureinflüsse, korrosive Medien usw. sowie Fragen bezüglich des Tragwerkverhaltens. Zur zweiten Gruppe gehören Fragen des Bruchwiderstandes, des Verformungsverhaltens, des Widerstandes gegenüber wechselnden Lasten, Temperatureinflüssen, korrosiven Medien usw. Ein Teil der Aspekte wird in der Regel auf dem Wege der Bemessung berücksichtigt, indem die Abmessungen der Bauteile den aus der vorgesehenen Nutzung der Konstruktion herrührenden Beanspruchungen angepasst werden. Die übrigen Aspekte finden ihre Berücksichtigung in einer Reihe von ergänzenden Nachweisen.

### 2. Unsicherheiten und Sicherheitsbegriffe

In den weitaus meisten Fällen werden der Bemessung der Tragwerke die Forderung nach einer ausreichenden Tragfähigkeit sowie die Forderung nach einem zufriedenstellenden Verformungsverhalten zugrunde gelegt. Hierbei wird stets einer *Beanspruchung* die entsprechende Beanspruchbarkeit bzw. – wie im folgenden aus sprachlichen Gründen bevorzugt – der entsprechende *Widerstand* gegenübergestellt. Beide werden in der Regel rechnerisch vorausbestimmt, und es ist einleuchtend, dass eine solche Voraussage Unsicherheiten enthält. Wenn wir Sicherheitsüberlegungen anstellen, müssen wir annehmen, dass die vorausberechnete Beanspruchung mit Unsicherheiten behaftet ist und dass die wirkliche Beanspruchung *über* der vorausberechneten liegen könnte. Ebenso könnte der wirkliche Widerstand *unter* dem vorausberechneten liegen; mit anderen Worten: der vorausgesagte Widerstand  $W$  muss ausreichend (die Unsicherheiten abdeckend) *über* der vorausgesagten Beanspruchung  $B$  liegen. In symbolischer Schreibweise ist dies

$$B < W.$$

Die Einführung eines sogenannten Sicherheitsfaktors  $S$  führt zu

$$S = \frac{W}{B}.$$

Die notwendige Grösse dieses Sicherheitsfaktors hängt weitgehend von der Güte der Voraussage von  $W$  und  $B$  ab. Ist diese bekannt, lässt sich eine Aussage über die erforderliche Grösse des Sicherheitskoeffizienten machen und die Forderung lautet

$$S = \frac{W}{B} \geq \text{erf } S.$$

Die Beziehung lässt sich auch wie folgt schreiben

$$B \leq \text{zul } B = \frac{W}{\text{erf } S}$$

und entspricht damit allen Verfahren, die auf der Basis der zulässigen Spannungen oder der zulässigen Schnittkräfte beruhen. Ein Vorteil dieser Schreibweise liegt darin, dass sie auf eine sorgfältige Betrachtung des Gebrauchszustandes einer Konstruktion hinführt. Ihr Nachteil ist, dass die ganze Unsicherheit auf den Widerstand bezogen wird, obwohl  $\text{erf } S$  auch die Unsicherheiten der Voraussage der Beanspruchung  $B$  enthält.

Die Forderung nach Sicherheit lässt sich auch wie folgt formulieren

$$\text{erf } S \cdot B \leq W$$

und entspricht in dieser Form den sogenannten Traglastverfahren, bei denen das Verhalten im Falle eines Versagens im Vordergrund der Betrachtungen steht, während die Fragen des Verhaltens im Gebrauchszustand nicht beantwortet werden. Ein Nachteil dieser Schreibweise ist, dass die ganze Unsicherheit auf die Beanspruchung bezogen wird, obwohl erf  $S$  auch die Unsicherheiten der Voraussage des Widerstandes  $W$  enthält.

Beide Varianten sind demnach nur Vereinfachungen eines komplizierteren Sachverhalts: Die Voraussage der Beanspruchung ist bis zu einem gewissen Grade unsicher, die Voraussage des Widerstandes ebenfalls. Eine Vermischung der grundsätzlich verschiedenen Einflussgrößen führt zu Missverständnissen.

Der hier aufgedeckte Einwand gegen den sogenannten globalen Sicherheitsfaktor  $S$  kann beseitigt werden durch Trennung der Unsicherheiten. Die symbolische Schreibweise hierfür ist

$$S_B \cdot B \leq \frac{W}{S_W}$$

$S_B$  bzw.  $S_W$  berücksichtigen hierbei die Unsicherheiten in der Voraussage einerseits der Beanspruchung, andererseits des Widerstands.

### 3. Einführung von Begriffen aus der Wahrscheinlichkeitstheorie

Die bisher vorgestellten Sicherheitsbegriffe helfen nicht darüber hinweg, dass sowohl die Beanspruchung  $B$  wie auch der Widerstand  $W$  zuerst zu definieren sind, bevor über die noch abzudeckenden Unsicherheiten diskutiert werden kann. Diese Tatsache wird deutlich, wenn wir uns vor Augen führen, dass es für die Grösse des Faktors  $S_W$  von Bedeutung ist, ob wir bei der Bestimmung von  $W$  von der mittleren Festigkeit, der Mindestfestigkeit oder einer irgendwie festgelegten Nennfestigkeit (Fraktile) ausgehen.

Der Gedankengang führt zur Erkenntnis, dass Fragen der Wahrscheinlichkeit des Auftretens einer bestimmten Beanspruchung bzw. eines bestimmten Widerstandes für den Sicherheitsbegriff von Bedeutung sind. Wendet man die Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie auf die Ergebnisse von Festigkeitsversuchen an, wird man gute Übereinstimmung herstellen können zwischen wirklicher Verteilung aller Prüfwerte und mathematischer Beschreibung dieser Verteilung (in Form einer Gaußschen – oder anderer Verteilungen). Allerdings – und dies muss deutlich ausgesprochen werden – ist diese Übereinstimmung nur in einem mittleren Bereich zufriedenstellend. Während die mathematischen Gesetzmässigkeiten auch von einer Wahrscheinlichkeit der Grösse  $10^{-7}$  zu sprechen gestatten, wird die Wirklichkeit in dieser Zone stark von jeder möglichen Annahme über die Verteilung der Prüfwerte abweichen, und es wird in der Regel kein Prüfwert unterhalb zum Beispiel der zur Wahrscheinlichkeit  $10^{-2}$  liegenden Festigkeit zu finden sein. Hierbei sind grobe Fehler natürlich auszuschliessen.

Was hier an Festigkeitsversuchen erläutert wurde, gilt in analoger Form ganz allgemein für die Widerstände und in ähnlicher Weise auch für die Lasten und die daraus folgenden Beanspruchungen. Nicht der Mittelwert allein einer Beanspruchung oder eines Widerstandes ist entscheidend, sondern die Verteilung dieser Grössen in statistischer Hinsicht.

Nun ist es naheliegend, von den Wahrscheinlichkeiten einer Überschreitung einer bestimmten Beanspruchung bzw. einer Unterschreitung eines bestimmten Widerstandes ausgehend, eine Versagenswahrscheinlichkeit für die jeweilige

Konstruktion zu berechnen bzw. die Forderung nach Sicherheit durch die Forderung einer kleinen Versagenswahrscheinlichkeit zu ersetzen.

Der erste Einwand hiergegen ist dieser: Formuliert man die Versagenswahrscheinlichkeit innerhalb desjenigen Bereichs, in welchem Wirklichkeit und Verteilungsfunktion von  $B$  und  $W$  ausreichend übereinstimmen, erhält man allzu grosse Versagenswahrscheinlichkeiten. Setzt man diese herab, auf Werte wie zum Beispiel  $10^{-7}$ , extrapoliert man unbewusst in Bereiche, wo von Wahrscheinlichkeit nicht mehr wirklich gesprochen werden kann. Ein zweiter Einwand ist ein methodischer: es lässt sich zeigen, dass die Versagenswahrscheinlichkeit nicht in allen Fällen und vor allem nicht allein nach den Gesetzen der Wahrscheinlichkeitstheorie mit den Häufigkeitsverteilungen der das Versagen begründenden Grössen verknüpft werden kann. Schliesslich der grundsätzliche Einwand: Wir sprechen von Sicherheit, nicht von Versagenswahrscheinlichkeit. Mit der Angabe der letzteren ist niemand wirklich zu befriedigen; von einem Bauwerk fordert man im Rahmen der vorgesehenen Nutzung und unter Voraussetzung einer zumutbaren Ausführungssorgfalt Sicherheit.

Gegen eine derartige ultimative Forderung wird freilich sofort Widerspruch aufkommen, der damit argumentiert, dass jede Aktivität – so auch das Bauen, Wohnen, Benützen von Brücken, Lagern von Gütern usw. – unabdingbar mit einem (wenn auch in der Regel sehr kleinen) Risiko verbunden sei. Dieser Widerspruch ist berechtigt, solange man das System, in welchem die Aktivität stattfindet und ihre Auswirkungen sich zeigen, in seiner Gesamtheit betrachtet. Innerhalb eines solchen umfassenden Systems ist Sicherheit nicht denkbar. Im vorliegenden Fall handelt es sich jedoch um eine *Forderung nach Sicherheit in einem normativen Sinn*, welche einerseits die Allgemeinheit vor Schaden schützen, andererseits die Verantwortung des Ingenieurs auf ein erträgliches und zumutbares Mass beschränken soll. Des weiteren wird die Forderung nach Sicherheit eingeschränkt auf normale Bauwerke, die mit einer zumutbaren Sorgfalt hergestellt und im vorgesehenen Sinn genutzt werden. Eine genauere, wenn auch schwerfälligere Formulierung der Forderung lautet demnach: Der Ingenieur hat seine Massnahmen so zu lenken, dass seine Werke im Rahmen der vorgesehenen Nutzung und unter Voraussetzung einer zumutbaren Ausführungssorgfalt als sicher gelten können.

### 4. Ein konkreter Sicherheitsbegriff

Der hier in Vorschlag zu bringende Sicherheitsbegriff geht weder von einer mittleren oder wahrscheinlichen Beanspruchung noch von einem mittleren oder wahrscheinlichen Widerstand, sondern ganz konkret von der im Grunde genommen banalen Forderung aus, dass der obere Grenzwert  $B'$  der möglichen Beanspruchung bei der vorgesehenen Nutzung kleiner sein muss oder höchstens gleich sein darf dem als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwert  $W'$  des Widerstandes der betrachteten Konstruktion bei zumutbarer Ausführungssorgfalt. In symbolischer Schreibweise ist dies

$$B' \leq W'$$

Der obere Grenzwert  $B'$  der möglichen Beanspruchung berücksichtigt die Lastannahmen und die Einflüsse des statischen Systems sowie die in diesen Einflussgrössen liegenden Unsicherheiten. Der obere Grenzwert ergibt sich

– durch *bauliche* oder *physikalische Begrenzung* der Beanspruchung (z.B. durch Abschränkungen, Überlaufen eines Behälters, durch Ansprechen von Sicherheitsvorrichtungen, Überschreitung der Festigkeit der die Beanspruchung übermittelnden Teile usw.).



- durch *Begrenzung* aufgrund *menschlichen Einflusses* (z.B. Beschränkung der Stapelhöhe, Beschränkung des genutzten Lagerflächenanteils, Beschränkung der Nutzlast, Signalisation, Vorschriften usw.). Die Sicherstellung der Begrenzung ist hier jedoch durch wirksame Kontrollen oder durch entsprechende Vorrichtungen von ausschlaggebender Wichtigkeit.
- durch *Vereinbarungen über die Begrenzung* an sich unbegrenzter Beanspruchungen (wie durch Wind, Schnee, Lawinen, Erdbeben, Waffenwirkungen usw.). Die Vereinbarung ist hierbei aufgrund der Auftretenswahrscheinlichkeit der Beanspruchung zu treffen, unter Umständen auch aufgrund einer Abschätzung des Risikos, welches bei einer Überschreitung des vereinbarten oberen Grenzwerts der Beanspruchung in Kauf genommen werden kann, darf oder muss.

Bei der Festlegung des oberen Grenzwerts der Beanspruchung ist stets auch zu prüfen, ob nicht die vorgesehene Nutzung sekundäre Begleiterscheinungen nach sich zieht, welche für die Beanspruchung massgebend sind. Zum Beispiel ist die effektive Belastung von Wohnhausdecken sehr gering; kleine Explosionen (Sicherheitsventil Fenster), Wasserrohrbrüche usw. sind hier als sekundäre Begleiterscheinungen möglich und unter Umständen massgebend.

Da es sich beim oberen Grenzwert der Beanspruchung nach dem Vorstehenden um eine wohl seltene, aber doch in der Regel durchaus mögliche Beanspruchung handelt, ergibt sich neben der Forderung nach Sicherheit die weitere Forderung, die *Konstruktion sei so auszubilden, dass ihr Verhalten für alle Beanspruchungsgrössen unterhalb des oberen Grenzwerts der Beanspruchung  $B'$  normal, das heisst im wesentlichen reversibel ist.*

Der als sicher zu bezeichnende untere Grenzwert des Widerstandes  $W'$  wird sich im wesentlichen aus Abmessungen und Materialfestigkeiten herleiten lassen, wobei die Streuung dieser Werte sowie Ausführungsungenauigkeiten, die Güte des für die Voraussage verwendeten Gedankenmodells sowie der Charakter des Widerstandes berücksichtigt werden müssen. Es handelt sich im übrigen nicht nur um den statischen Bruchwiderstand, sondern - je nach Fragestellung - auch um den Widerstand gegenüber einer irgendwie definierten dynamischen Beanspruchung, und zum Beispiel auch um den unteren Grenzwert des Widerstandes, welcher zu einem noch als zulässig erachteten Risseverhalten der Konstruktion führt.

Bei der Festlegung von  $W'$  sind des weiteren auch Argumente wie die Wichtigkeit des betrachteten Bauteils im Rahmen der Gesamtkonstruktion sowie die *Art* der vorgesehenen Nutzung von Bedeutung.

Der hier vorgelegte Sicherheitsbegriff hat den Vorteil, dass er nicht auf die Festlegung von sogenannten Sicherheitsfaktoren hinausläuft, deren Auslegung als Last- oder als Widerstandsfaktor dann dem jeweiligen Zweck anpassbar ist; er fordert vielmehr ganz konkret, dass - etwas vereinfacht ausgedrückt - die grösste Beanspruchung kleiner sein muss als der kleinste Widerstand, oder allenfalls gleich diesem. Die ganze Arbeit läuft darauf hinaus, *sich ganz konkret Vorstellungen zu machen* über diese beiden bestimmenden Grössen. Ein weiteres Charakteristikum dieses Gedankens ist es, dass der sogenannte *Sicherheitsfaktor* durch eine Reihe von *Argumenten* ersetzt wird, die eine Vergrösserung bzw. Abminderung gewisser Rechengrössen rechtfertigen. Diese dienen dazu, sowohl obere Grenzwerte der Beanspruchung wie auch die als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerte des Widerstandes festzulegen. Die Aussage ist schliesslich: Die Konstruktion kann als sicher bezeichnet werden (im Rahmen der vorgesehenen Nutzung und unter Voraussetzung der zumutbaren Ausführungssorgfalt) oder: Sie kann nicht als sicher gelten. Es gibt keine abgestufte Sicherheit.

Es muss erwähnt werden, dass ein Sicherheitsbegriff nie grobe Fehler bzw. grobes menschliches Versagen wird berücksichtigen können. Ein derartiges Versagen liegt dann vor, wenn beispielsweise die Nutzung eines Bauwerkes geändert wird, ohne vorgängig geprüft zu haben, ob die bei der Projektierung vorgesehene Nutzung auch für die veränderte ausreichend repräsentativ sein kann. Auch Verletzungen der gebotenen Sorgfalt in der Ausführung sind grobe Fehler, wie schliesslich auch Rechenfehler und Konstruktionsfehler des Ingenieurs. Sie müssen bei Diskussionen über den Sicherheitsbegriff beiseitegelassen werden.

##### 5. Zur Frage des Vergleichsmasses und des Vergleichsniveaus

Wenn hier von Beanspruchung und Widerstand die Rede ist, so können hierunter Lasten, Schnittgrössen oder Spannungen verstanden werden. Wichtig ist, dass sie auf beiden Seiten der Sicherheitsbedingung  $B' \leq W'$  von gleicher Art sind. Während bisher im wesentlichen die Spannung als Vergleichsmass gewählt wurde, wird in vielen Fällen das Vergleichsmass Schnittgrösse, in gewissen Fällen auch die Last selbst an deren Stelle treten.

Es scheint jedoch, dass innerhalb des vorliegenden Sicherheitsbegriffes das Vergleichsmass Schnittgrösse besonders geeignet ist, werden doch gerade in diesem Mass zutreffend die zwei wesentlichen Teile getrennt: Einerseits ist der Widerstand nicht allein durch die Festigkeit der Baustoffe, sondern durch viele andere Einflüsse bis hin zur Qualität der Ausführung beeinflusst, und diese Einflüsse müssen bis in die Querschnittsgrössen hineinverfolgt werden; andererseits kann die Beanspruchung nicht allein im Lastmass gemessen werden, weil zur Beanspruchung auch noch die Stellung der Last im System gehört. Bezeichnend ist, dass verschiedene Belastungen zu gleichen Beanspruchungen führen können und umgekehrt. Auch ist es eine Tatsache, dass die zutreffende Abstraktion der effektiven Lasten auf modellartige Nennlasten nur möglich ist über einen Vergleich der zugehörigen Schnittkräfte.

Was das Vergleichsniveau betrifft, so sind die wesentlichen Argumente bereits weiter vorne angeführt worden. Es ist nötig, bei der Voraussage von Beanspruchung und Widerstand die Unsicherheiten dort einzuführen, wo sie auftreten. Diese Notwendigkeit sei noch an einer Stütze demonstriert, deren Beanspruchung aus ständigen Lasten gerade aufgehoben wird durch diejenige aus Nutzlasten, so dass offensichtlich insgesamt die Beanspruchung null und somit kein Widerstand nötig ist. Erst eine Abminderung der vorausgesagten ständigen Lasten auf ihren unteren sowie eine Erhöhung der vorausgesagten Nutzlasten auf ihren oberen Grenzwert zeigt die Anforderung an den Widerstand der Stütze klar. Weitere Beispiele für die Notwendigkeit, das Vergleichsniveau auf den erwähnten oberen Grenzwert der Beanspruchung zu heben, sind im übrigen alle diejenigen, bei denen Belastung und Beanspruchung in einem nichtlinearen oder nichtproportionalen Zusammenhang stehen (Spannungsprobleme 2. Ordnung, Vibration usw.).

Dass in bestimmten einfachen Fällen der Vergleich (unter Beachtung gewisser Umrechnungsregeln) formal auch auf einem anderen Niveau durchgeführt werden kann, ist klar. Doch sollte auch in solchen Fällen die Vorstellung sich ganz konkret an oberen Grenzwerten der Beanspruchung und an als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerten des Widerstands orientieren.

##### 6. Zur Frage der Bestimmung von $B'$

Die Bestimmung von  $B'$  geht von der vorgesehenen Nutzung aus. Diese ist im wesentlichen durch die Belastungen gegeben. Da diese selten in einfacher Form anzutreffen sind, müssen sie für die Berechnung bis zu einem ausreichenden Grade vereinfacht und in Form definierter Belastungsarten

modellartigen Charakters (Einzellasten, Linienlasten, verteilte Lasten), also in Form von sogenannten Nennlasten, eingeführt werden. Bei der Festlegung dieser Nennlasten muss häufig bereits auch der Charakteristik des belasteten Tragwerkes Rechnung getragen werden. So sind für das Haupttragssystem grosser Brücken die gleichmässig verteilte Last, für Elemente der Fahrbahn Einzellasten massgebend. Die Abstraktion von der wirklichen Belastung auf Nennlasten ist häufig nur auf dem Umweg über die entsprechenden Schnittkräfte im betrachteten Tragsystem möglich.

Die Festlegung der Intensität dieser Nennlasten erfordert weitere Überlegungen. Da sich die Nutzung in verschiedener Form angeben lässt (z.B. in Form des durch den Sicherheitsbegriff bereits vorgezeichneten oberen Grenzwertes der Last, oder aber auch in der Form einer mit gewissen Auftretenswahrscheinlichkeiten verbundenen kleineren Last), ist hier eine Vereinbarung nötig, die bei der Festlegung von Nennlasten (z.B. in Normen für die Belastungsannahmen) einheitlich zu handhaben wäre.

Um auch an dieser Stelle konkret zu bleiben, wird vorgeschlagen, die Nennlast  $L$  nach den folgenden Regeln festzulegen:

- Die Nennlast ist mindestens gleich der planmässig vorgesehenen Last.
- Die Nennlast ist mindestens gleich der mit  $1/\nu_1$  multiplizierten definierten Last, welche im betrachteten Tragsystem die gleiche Beanspruchung hervorruft wie der obere Grenzwert der möglichen Last.

Der obere Grenzwert der möglichen Last ergibt sich aus einer Beschränkung der Belastung durch bauliche Massnahmen (Abschränkungen usw.), durch menschlichen Einfluss (Signalisation, Vorschriften, Überwachung), infolge physikalischer Gesetzmässigkeiten (Überlauf, Sicherheitsventil usw.) oder aufgrund von Vereinbarungen über die Begrenzung an sich unbegrenzter Lasten (Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit zum Beispiel bei Schnee- und Windlasten, Festlegung einer Fraktile).

Die Festlegung des Faktors  $\nu_1$  ist eine Sache der Vereinbarung. Eine Aufspaltung des heute verwendeten Sicherheitsfaktors in einzelne Anteile zeigt, dass für  $\nu_1$  die Grössenordnung von 1,25 vernünftig wäre. Auf die gezeigte Art ist somit – vom oberen Grenzwert der Beanspruchung ausgehend – die Festlegung von sogenannten Nennlasten prinzipiell geregelt. Freilich genügt für viele Fragestellungen die Kenntnis der Nennlast allein nicht. Es sollten in den entsprechenden Normen weitere Angaben erscheinen, wie zum Beispiel die im Zeitverlauf im Mittel vorhandene sowie die eine definierte Ermüdungsbeanspruchung hervorruhenden Bruchteile dieser Nennlast.

Bezeichnet man nun die Nennlast mit  $L$ , so ist definitionsgemäss der obere Grenzwert der möglichen Last nicht grösser als

$$L'' = \nu_1 \cdot L,$$

und bei der Ermittlung von  $B'$  wäre von diesem oberen Grenzwert auszugehen.

Eine Frage ist, ob diese Erhöhung auch für das Eigengewicht und die gegebenenfalls genau bekannten Lasten einer Konstruktion gelten sollen, denn das Eigengewicht zum Beispiel wird höchstens bei sehr dünnen Bauteilen (z.B. dünnen Platten des Stahlbetonbaus) merklich unsicher. Immerhin kann eine planmässig 4 cm starke Betonplatte oder ein gleich starker Estrich ohne weiteres in der Ausführung 5 cm dick sein, womit der Faktor 1,25 begründet wäre. Ein Argument für eine rechnerische Erhöhung auch der an sich genauer bekannten ständigen Lasten um  $\nu_1 = 1,25$  lässt sich aus der Tatsache gewinnen, dass ständig vorhandene Lasten einen ungleich stärkeren Einfluss auf ein Tragwerk haben als kurzfristige. Der

Begriff der (im allgemeinen niedrigeren) Dauerstandsfestigkeit von Baustoffen weist darauf hin. Gegen das soeben vorgebrachte Argument sprechen methodische Gesichtspunkte, dass nämlich die Seite der Beanspruchung des Sicherheitsbegriffs nicht mit der Seite des Widerstandes vermischt werden sollte. Immerhin besteht die einfachste Möglichkeit, den stärkeren Einfluss dauernder Lasten auf die Sicherheit einer Konstruktion zu berücksichtigen, gerade darin, diese Lasten in der Rechnung angemessen zu erhöhen. Eine Reihe weiterer Argumente eher praktischer Art sprechen ebenfalls für einen einheitlichen Faktor  $\nu_1$ .

Bei der Ermittlung der Beanspruchungen sind des weiteren Annahmen über Form, Abgrenzung und Verhalten des betrachteten Tragwerkes zu machen (z.B. Wahl des statischen Systems usw.). Mit diesen Annahmen kommen Unsicherheiten hinzu, die durch entsprechende Überlegungen zu berücksichtigen sind. Die einfachste Form besteht in einer fallweisen Erhöhung bzw. Abminderung der aus  $L''$  am statischen System ermittelten Beanspruchungen. Berücksichtigt man auch noch den Fall, dass bei der Ermittlung der Beanspruchungen Baustoffeigenschaften eingehen, die nicht zum voraus genau bekannt und deshalb vorsichtig einzusetzen sind, ergibt sich in symbolischer Schreibweise

$$B' = \nu_2 \cdot B [\nu_1 \cdot L \text{ bei } \nu_3 \cdot E]$$

wobei

- $L$  die Nennlast,  $\nu_1 = 1,25$ ,
- $\nu_3 \cdot E$  vorsichtig eingesetzte Baustoffeigenschaften,
- $B$  die Beanspruchung aus [...] im statischen System,
- $\nu_2$  ein Faktor zur Berücksichtigung von Unsicherheiten bei der Ermittlung der Beanspruchungen,
- $B'$  den oberen Grenzwert der wirklichen Beanspruchung bei der vorgesehenen Nutzung

bedeuten. In einfachen – zum Beispiel statisch bestimmten – Tragwerken ist die Ermittlung der Beanspruchungen mit nur geringen Unsicherheiten behaftet, so dass  $\nu_2$  klein sein kann, beispielsweise von der Grössenordnung  $\nu_2 = 1,1$  bzw. 0,9. Die Ermittlung der Beanspruchung wird umso unsicherer, je komplizierter der statische Aufbau des Tragwerkes ist. Jedoch steigen im gleichen Mass mit dem in diesem Fall charakteristischen Grade der statischen Unbestimmtheit auch die sogenannten inneren Reserven des Tragwerkes, so dass eine Erhöhung von  $\nu_2$  normalerweise nicht erforderlich sein dürfte.

In allen Fällen, in denen die Beanspruchungen proportional zu den Lasten sind, kann  $\nu_2$  nun auch auf letztere bezogen werden, womit in symbolischer Schreibweise sich ergibt

$$\nu = \nu_1 \cdot \nu_2$$

$$L' = \nu \cdot L$$

$$B' = B [L' \text{ bei } \nu_2 \cdot E]$$

Die Grösse  $\nu$  wäre demnach ein fester Wert von der Grössenordnung  $\nu = 1,25 \cdot 1,1 = 1,4$  bzw.  $1,00/1,1 = 0,9$  für diejenigen Fälle, in denen eine ständige Last günstig wirkt. Wachsen die Beanspruchungen schneller als die Lasten, ist diese vereinfachte Schreibweise nicht ganz korrekt, auf jeden Fall aber auf der sicheren Seite.

Dem Ausnahmecharakter aussergewöhnlicher Einwirkungen auf Bauwerke (Erdbeben, Anprall-Kräfte usw.) oder der Unwahrscheinlichkeit gewisser Lastkombinationen kann im konkreten Fall durch Ermässigung des Faktors  $\nu$  bis auf 1 Rechnung getragen werden.

Es ist im Hinblick auf eine übersichtliche und einfache statische Berechnung (Schnittkraftermittlung) wichtig, dass die Ermittlung von  $B'$  nicht mit weiteren Einflussgrössen belastet,



sondern auf die vorstehende einfache Form gebracht wird. Alle anderen Argumente, die man vielleicht bis hierher vermisst hat, sollten entweder bei der Festlegung der Nennlast  $L$  oder aber dann bei der Festlegung von  $W'$  Berücksichtigung finden.

## 7. Bemerkungen zur Bestimmung von $W'$

Die Festlegung des als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerts des Widerstands einer Konstruktion hat allen voraussehbaren, auf den Widerstand einwirkenden Umständen Rechnung zu tragen. Damit hierbei nicht der Willkür und Fehleinschätzungen Tür und Tor geöffnet sind, müssen jedoch die einschlägigen Normen bis ins einzelne gehende Angaben für die Ermittlung der als sicher zu bezeichnenden Grenzwerte für alle wichtigen Beanspruchungsarten (einschl. Stabilität, Ermüdung, Rissebildung usw.) enthalten.

Als Grundsatz gilt, dass der als sicher zu bezeichnende untere Grenzwert des Widerstands stets kleiner ist als jeder beobachtete Widerstand einer vergleichbaren Situation. Er wird des weiteren je tiefer unter einer Reihe von beobachteten Werten liegen, je stärker diese streuen und je kleiner der Beobachtungsumfang ist. Aus solchen Beobachtungen gewonnene empirische oder theoretisch begründete Beziehungen zwischen den Einflussgrößen unterliegen einer ähnlichen Argumentation.

Bei der Festlegung des als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerts des Widerstands wird man sich in der Regel zunächst Vorstellungen machen müssen über die als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerte der Baustoffeigenschaften wie Festigkeiten, Verformungseigenschaften und dergleichen. Hierbei können die Methoden der Statistik wertvolle Dienste leisten. Vorstellungen über eine zumutbare Sorgfalt bei Herstellung, Auslese und Kontrolle der Baustoffe werden normale Schwankungen der Baustoffeigenschaften von Fehlern unterscheidbar machen. Besondere Beachtung verdient in diesem Zusammenhang die Tatsache, dass Form und Beanspruchung der Baustoffe in der Regel verschieden sind vom Prüfverfahren und von der Form der Probekörper, an denen die Eigenschaften der Baustoffe ermittelt werden. In symbolischer Schreibweise ist damit der untere Grenzwert einer Baustoffeigenschaft

$$\beta' = \alpha_1 (\alpha_2 \cdot \beta)$$

worin

- $\beta$  ein irgendwie festgelegter Nennwert einer Baustoffeigenschaft,
- $\alpha_2$  ein Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Streuungen der Baustoffeigenschaft,
- $\alpha_1$  ein Faktor zur Berücksichtigung des Unterschieds zwischen Verwendung des Baustoffs und Prüfverfahren bedeuten.

Eine weitere Unsicherheit kommt hinein, wenn der Ingenieur versucht, durch eine theoretische Untersuchung den Widerstand vorauszusagen. Er bildet ein Gedankenmodell vom Verhalten der Natur, welches mehr oder weniger zutreffend ist. Die diese Unsicherheiten abdeckende Abminderung wird von der Zuverlässigkeit der Voraussage abhängig gemacht werden müssen. Das gleiche gilt für empirisch ermittelte Formeln für die Voraussage des Widerstands.

Ungenauigkeiten in der Ausführung sind auch bei sorgfältiger Arbeit auf der Baustelle nicht zu vermeiden und erfordern eine entsprechende Berücksichtigung bei der Festlegung des unteren Grenzwerts des Widerstands. Hierbei sind insbesondere relativ kleine Querschnitte vorsichtig zu beurteilen, da Ungenauigkeiten in den Abmessungen beispielsweise nicht proportional zu den Abmessungen sind.

Schliesslich empfiehlt es sich, auch der Charakteristik des Versagens bis zu einem gewissen Grade Rechnung zu tragen, wie es zum Beispiel durch die Begriffe des duktilen oder spröden Versagens bereits vorgezeichnet ist.

Fasst man alle vorstehenden Argumente in einem Ausdruck  $\alpha_3$  zusammen, ergibt sich in symbolischer Schreibweise

$$W' = \alpha_3 \cdot W [\alpha_1 \cdot (\alpha_2 \cdot \beta)]$$

Hier bedeuten

- $W$  der vorausgesagte Widerstand unter Annahme der Baustoffeigenschaften [...],
- $W'$  der als sicher zu bezeichnende untere Grenzwert des Widerstands bei zumutbarer Ausführungssorgfalt.

Je nach dem betrachteten Fall lassen sich die Argumente für eine Abminderung  $\alpha_1$  auch an anderer Stelle einführen, um die Ermittlung des Widerstands  $W'$  zu vereinfachen. In symbolischer Schreibweise wären hier zwei wesentliche Möglichkeiten anzuführen:

$$W' = \alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot W [\alpha_2 \cdot \beta]$$

oder

$$W' = W [\alpha_1 \cdot \alpha_3 \cdot (\alpha_2 \cdot \beta)]$$

Welche dieser beiden Schreibweisen zutreffender ist, muss im jeweiligen Fall entschieden werden. Während für Biegung mit Axialkraft im Stahlbetonbau beide Schreibweisen möglich erscheinen, spricht bei der Ermittlung des Schubwiderstands beispielsweise vieles für die erste Form.

Der Vorteil und die Möglichkeiten, die im neuen Begriff des als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerts des Widerstands liegen, werden vor allem dann deutlich, wenn ein noch wenig erforschter Beanspruchungszustand vorliegt: den mutmasslichen effektiven Widerstand vorauszusagen, dürfte wesentlich schwieriger sein als das weniger präventive Unterfangen, einen als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwert für diesen Widerstand festzulegen. So lassen sich auch relativ leicht sichere untere Grenzwerte für die Interaktion verschiedener Schnittkräfte angeben. Zugleich wird auch die Aufgabe des praktisch tätigen Ingenieurs bzw. des Forschers klar: Letzterer hat sich um die Grundlagen für die Festlegung sicherer unterer Grenzwerte des Widerstands zu bemühen. Seine Arbeit führt zu einer Anhebung dieser unteren Grenzwerte; die Verantwortung für die Festlegung der unteren Grenzwerte liegt jedoch (soweit die Norm sie ihm nicht abnimmt) beim praktisch tätigen Ingenieur, der Forscher kann sie ihm nicht nehmen, und der Ingenieur darf sie sich von diesem auch nicht nehmen lassen.

Inwieweit nun zusätzlich noch weitere Argumente bei der Festlegung des Wertes  $W'$  berücksichtigt werden sollen, zum Beispiel die Wichtigkeit des betrachteten Bauteils im Rahmen der gesamten Konstruktion oder beispielsweise die Art der Nutzung (Lagergüter, Menschen, Rückstau von Wasser bei Staumauern usw.) wäre im einzelnen zu prüfen. Auch ist es denkbar, dass gewisse Bauteile wie zum Beispiel Stützen generell vorsichtiger beurteilt werden sollten als gewisse andere Bauteile wie zum Beispiel Platten.

Schliesslich ist festzuhalten, dass es Aufgabe der Normenkommissionen sein muss, direkt und konkret möglichst einfache Anweisungen für die Ermittlung des als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerts der Widerstände bezüglich aller wichtigen Beanspruchungen und bezüglich aller massgebenden Bemessungskriterien anzugeben. Für den praktisch tätigen Ingenieur darf die Schwierigkeit der Arbeit nicht über dasjenige hinausgehen, was ihm heute bereits bei der Berechnung und Bemessung seiner Tragwerke zugemutet wird.

## 8. Empfehlungen des CEB/FIP

Das generelle Sicherheitsprinzip der «Empfehlungen des CEB/FIP (Comité Européen du Béton/Fédération Internationale de la Précontrainte)» stimmt weitgehend mit dem hier vorgeschlagenen Sicherheitsbegriff überein. So ist vor allem in beiden Fällen das Vergleichsniveau bei erhöhten Gebrauchslasten gewählt worden. Während die Ermittlung des oberen Grenzwerts der Beanspruchung praktisch vollständig identisch ist mit dem Vorgehen nach den Empfehlungen des CEB/FIP (wobei allerdings hier Hinweise für die Festlegung von Nennlasten eingeschlossen sind), dürfte der hier eingeführte Begriff des als sicher zu bezeichnenden unteren Grenzwerts des Widerstands universeller sein als das dort vorgeschlagene Rechenverfahren, welches eigentlich ausschliesslich auf der Einführung reduzierter Festigkeiten beruht. Doch ist auch hier für häufige Beanspruchungsfälle volle Übereinstimmung zu verzeichnen. Der Vorteil des vorgelegten Sicherheitsbegriffs und der Grund, warum dieser trotz formaler Übereinstimmung mit den Empfehlungen des CEB/FIP hier in erheblicher Breite erläutert und begründet wird, ist in der Tatsache zu suchen, dass er dem Ingenieur anstelle abstrakter Koeffizienten konkrete Vorstellungen über die Sicherheit der Konstruktion vermittelt und ihn konkret auf seine Verantwortung im Rahmen vorgängig getroffener Einschränkungen hinweist. Auf diese Weise hat der Ingenieur auch dann noch genügend Anhaltspunkte für eine sichere Bemessung, wenn in der Norm für Sonderfälle die Angaben fehlen.

## 9. Zusammenfassung

Die ausserordentlich komplexe Frage nach der Sicherheit der Tragwerke wird durch die Wissenschaft in vielfältiger Weise beantwortet, wobei das Mass für die Sicherheit nach

neuerer Forschung unter anderem im Mass der Versagenswahrscheinlichkeit gesucht wird. In normativem Sinn ist Sicherheit jedoch im Grunde nicht messbar, sondern eine Qualität: entweder kann das Bauwerk als sicher bezeichnet werden oder es kann nicht als sicher gelten. In den vorliegenden Zeilen wird versucht, auf der Basis ganz konkreter Vorstellungen über Grenzwerte der Beanspruchung bzw. des Widerstands einer Konstruktion einen konkreten Sicherheitsbegriff zu erarbeiten. Hierbei wurde mit der Art der Argumentation bis zu einem gewissen Grad eine Einschränkung auf den Aspekt der Tragfähigkeit vorgenommen, weil diese in der Regel bestimmend ist für die Bemessung der Bauwerke. Dass selbstverständlich eine ganze Reihe von weiteren Aspekten beim Entwurf und der konstruktiven Durcharbeitung von Bauwerken beachtet werden muss, sollte im Grunde genommen keiner Erwähnung bedürfen.

Adresse des Verfassers: Prof. Jörg Schneider, ETH Zürich, Leonhardstrasse 33, 8006 Zürich.

## Literaturverzeichnis

- [1] Basler, E.: Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken. «Schweizer Archiv» 27 (1961) H. 4, S. 133–160.
- [2] Knoll, F.: Grundsätzliches zur Sicherheit der Tragwerke. «Schweizer Archiv» 31 (1966) H. 5, S. 133–154, H. 6, S. 178–194.
- [3] SIA-Norm 162 (1968).
- [4] IVBH: Symposium über neue Aspekte der Tragwerkssicherheit und ihre Berücksichtigung in der Bemessung, London 1969. Herausgeg. vom Sekretariat des IVBH, Zürich.
- [5] CEB/FIP: International recommendations for the design and construction of concrete structures. June 1970.

## Schnellaufzüge im Fernsehturm Moskau

DK 621.876

Über diese Schnellaufzüge wurde in der SBZ 88 (1970), H. 33, S. 741 berichtet. Die drei bisher laufenden Aufzüge haben nach etwa dreijähriger Betriebszeit ihre Bewährungsprobe bestanden. Der vierte Aufzug, der noch nicht in Betrieb genommen werden konnte, weil der für ihn vorgesehene Schacht für andere Zwecke gebraucht wurde, wird derzeit montiert. Dies gab den Herstellern Anlass zu einem Erfahrungsbericht.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die vielen, besonders für diesen Turm konstruierten Bauteile sich ausnahmslos bewährt haben. Auch die Sicherheitseinrichtungen haben die an sie gestellten hohen Anforderungen erfüllt, so auch die wahrscheinlich grössten bisher gebauten Aufsetzpuffer mit einem Hub von knapp über 3 m und die neuen Geschwindigkeitsbegrenzer, die im Gegengewicht eingebaut sind. Sie haben sich als problemloser erwiesen als normale Geschwindigkeitsbegrenzer mit Seiltrieb, da ihre Bremskraft nicht eingestellt zu werden braucht, was bei grossen Seilmassen sehr schwierig ist. Die Überlegungen, die bei der Projektierung und Konstruktion angestellt wurden, haben sich als richtig bestätigt.

Früher wurde einmal erwogen, die Geschwindigkeit der Aufzüge herabzusetzen, wenn sich der Luftdruckunterschied für empfindliche Besucher unangenehm bemerkbar machen sollte. Davon ist jetzt nicht mehr die Rede. Der Luftdruckunterschied zwischen oben und unten (348 m) ist zwar sehr deutlich spürbar, er wird aber keineswegs als unangenehm empfunden.

Die Befürchtung, dass sich wegen der grossen Kälte im russischen Winter der Wassergehalt des Atems der Fahrgäste an den Schienen und in der Schachtgrube als Eis niederschlagen

würde, hat sich nicht bestätigt. Der untere, etwa 60 m hohe betonierete Schachtteil ist von Büro- und Werkstattträumen umgeben, so dass er sich auch bei sehr tiefer Aussentemperatur nie unter 0°C abkühlte. Das darüberliegende Schachtgerüst ist durch Luken in der Turmwand ausreichend belüftet. Hierdurch ist ein Ausgleich der Luftfeuchtigkeit gegeben. Obwohl im oberen Schachtteil im Winter regelmässig Temperaturen unter 0°C anzutreffen sind, wurde deshalb niemals ein Eisniederschlag an den Schienen beobachtet. Die Ausrüstung zur Verhinderung von Eisbildung an Aufzugschienen, Türgehängen und sonstigen mechanischen Teilen brauchte nicht in Aktion zu treten.

Die Schrumpfung des Turmes mit zunehmendem Alter war grösser als vorhergesagt. Die unterschiedliche Längenausdehnung von Turm und Schiene infolge von Temperaturdifferenzen im Schachtinneren und an der Turmaussenhaut waren dagegen geringer; nur am Übergang zwischen Betonschacht und Schachtgerüst in etwa 60 m Höhe wird die vorgesehene Temperaturausgleichsfuge nahezu ausgenutzt.

Da befürchtet werden musste, dass die Seile wegen der Turmschwankungen weit ausschlagen würden, sind im Schacht Seilabweiser angebracht worden, die verhindern, dass diese an Beton- oder Stahlteile anschlagen und so selbst beschädigt werden, oder dass sie gar beim Anschlagen an die Türverschlüsse unbeabsichtigt Schachttüren öffnen. Nach vielen Verschleissversuchen waren Seilabweiser aus imprägnierten Holzleisten hergestellt worden. Diese sind sehr wenig beansprucht worden und werden voraussichtlich Jahrzehnte aushalten.