

Are we, structural engineers, in effect killing people?

Jörg Schneider

Professor emeritus, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Schweiz

KURZFASSUNG: Absolute Sicherheit gibt es nicht. Und doch können wir alles noch sicherer machen, auch unsere Bauwerke. Doch wollen wir das? Und wenn wir schon wollten: was können wir uns im Streben nach mehr, nach immer noch mehr Sicherheit überhaupt leisten? Die Antwort ist klar: wir liegen ziemlich vernünftig mit den Regeln unserer Bemessungspraxis, sollten aber die Sicherheitsanforderungen nicht weiter erhöhen, denn das würde unverhältnismässig teuer. Eine Ausnahme bildet möglicherweise die Reduktion von Erdbebenrisiken aus bestehender Bausubstanz.

1 EINLEITUNG

Der Titel dieses Aufsatzes stützt sich auf einen Satz aus [1], den ich seit vielen Jahren – aufmerksam die Suche nach mehr Sicherheit, wo auch immer, beobachtend – mit mir herumtrage: “... *if our priorities in managing risks are wrong, if we are spending the available resources in a way that is not cost-effective, we are, in effect, killing people whose premature deaths could be prevented.*”. Der Satz ist hier, da in seiner Krassheit kaum in die deutsche Sprache zu bringen, im Original zitiert.

In der Tat: Wir bemessen unsere Tragwerke nach Normen, die unter anderem auch die Sicherheit von Menschen gewährleisten sollen. Doch Sicherheit hat ihren Preis und die Frage „Wie sicher ist sicher genug?“ ist eine gut gestellte, viel diskutierte und auch im Bauwesen nicht von vorne herein abwegige Frage. Sind wir zu sicher, binden wir Mittel, die an anderem Ort Menschenleben retten könnten. Gewährleisten unsere Normen Sicherheit nicht im nötigen Mass, müssten wir unsere Bemessungsregeln überprüfen.

Der zitierte Satz ruft letzten Endes nach einem disziplin-übergreifenden gesellschaftlichen Konsens bei der Suche nach Sicherheit und den Regeln zur Wahl vernünftiger sicherheitserzeugender Massnahmen. Ein solcher Konsens kann meiner Meinung nach nur über den Vergleich vorhandener Risiken und die Betrachtung der Rettungseffizienz möglicher Massnah-

men gefunden werden. Um hierfür die nötigen Begriffe bereitzustellen, hole ich etwas weiter aus.

2 RISIKO

Der Begriff *Risiko* wird in technischen Zusammenhängen in der Regel als Funktion der *Folgen* eines möglichen Schadenereignisses und dessen *Häufigkeit* verstanden. Die einfachste Funktion zur Verknüpfung entsprechender Zahlenwerte ist das Produkt der sog. Erwartungswerte dieser beiden Grössen.

Freilich sind weder die Ereignis-Folgen noch die Ereignis-Häufigkeit zum voraus genau bekannt. Beides sind – in meiner Sprache zumindest – *unscharfe Grössen*, die insbesondere für seltene Ereignisse statistisch nur schwach untermauert sind. Natürlich ist – wenn schon die Ausgangsgrössen unscharf sind – auch die Grösse des Risikos unscharf. Das gilt es beim Vergleich von Risiken und beim Fällen von Entscheidungen zu beachten.

2.1 *Verschiedene Arten von Risiken*

Man unterscheidet in erster Linie zwischen Personenrisiken und Sachschadenrisiken.

Im Vordergrund stehen, zumindest schon aus ethischen und rechtlichen Gründen, die Personenrisiken. In der Regel werden diese am Todesfallrisiko ge-

Are we, structural engineers, in effect killing people?

messen. Das hat seine Gründe: Zum einen sind Todesfälle eindeutig und einfach zählbar im Gegensatz zu mehr oder weniger schweren Verletzungen, zum anderen steht bei einem Schadenfall mit schweren Schäden an Leib und Leben die Anzahl der Toten oft in einem bestimmten, mehr oder weniger konstanten Verhältnis zur Zahl der Verletzten. In der Folge steht deshalb hier das Todesfallrisiko stellvertretend für das Gesamtrisiko bezüglich Leib und Leben.

2.2 Akzeptierbare Personenrisiken

Die Personenrisiken aus versagenden Bauwerken sind offenbar in der Regel sehr klein. Das ist schon daran erkennbar, dass in statistischen Jahrbüchern eine Rubrik fehlt, unter der Tote aus Bauwerksversagen aufgelistet werden könnten. Auch die Tatsache, dass wir bei Gefahr in Gebäude zu flüchten – Erdbeben ausgenommen freilich – weist darauf hin, dass wir Bauwerke als sehr sicher empfinden und in ihnen Schutz suchen.

Das zeigt, dass wir – die Gefahr von Erdbeben wieder einmal ausgeklammert – offenbar ausreichend sicher bauen, denn wäre es anders, hätten wir im Laufe der Zeit andere Reflexe entwickelt. Die Beobachtung legt aber auch den Verdacht nahe, dass wir – Erdbeben wieder beiseite – zu sicher sind. Das wäre zu untersuchen.

Doch was ist sicher genug? Welches auf Tragwerksversagen zurückzuführende individuelle Todesfallrisiko wäre akzeptierbar? Es ginge zu weit, den Weg zur Beantwortung dieser Frage in aller Gründlichkeit an diesem Ort vorzubringen und zu diskutieren. Siehe hierzu z.B. [5].

Hier eine weitgehend akzeptierte Antwort: aus verschiedenen Gründen scheint es vernünftig und angemessen, ein individuelles Risiko, Opfer eines Tragwerksversagens zu werden, in der Größenordnung von 10^{-5} /Jahr als obere Grenze zu betrachten. Ich wähle hier bewusst den Begriff Opfer und schliesse damit Verletzte und Tote ein. Das reine Todesrisiko ist demnach noch etwas kleiner. Zum Vergleich: das Risiko, das ein Einwohner der Schweiz praktisch widerspruchlos trägt, von einem Blitz erschlagen zu werden, liegt bei 10^{-6} /Jahr. Ist im konkreten Einzelfall der Aufenthalt in einem Gebäude mit einem deutlich grösseren individuellen Risiko behaftet, sollte man wohl Massnahmen zur Verminderung dieses Risikos ins Auge fassen.

2.3 Risiken auf der Baustelle

Auf der anderen Seite dürfen wir nicht vergessen, dass das Bauen für die Bauarbeiter auf der Baustelle überaus gefährlich ist, steht doch das Risiko eines Bauarbeiters – nach demjenigen eines Waldarbeiters – ganz oben auf der Liste aller Berufsrisiken.

Um jedoch klar zu bleiben: hier geht es nicht um dieses Risiko bei der Erstellung von Bauwerken, sondern um die Frage, ob wir – für die *Benutzer* von Bauwerken – zu sicher bauen.

3 RETTUNGSKOSTEN

Eine Antwort auf die gestellte Frage ergibt sich aus der Betrachtung der Effizienz der im Bauwesen üblichen Bemessungspraxis und einem Vergleich mit entsprechenden Verhaltensweisen in anderen Lebensbereichen unserer Gesellschaft.

3.1 Grundtatsachen

Jede Massnahme zur Reduktion von Risiken kostet Geld. Bei reinen Sicherheitsmassnahmen sind dies die sog. Sicherheitskosten SK_M . Tragen Massnahmen lediglich teilweise zur Erhöhung der Sicherheit bei, lässt sich ein entsprechender Teil der Gesamtkosten als Sicherheitskosten abspalten. Jede hinsichtlich Sicherheit sinnvolle Massnahme führt auch zu einer Risikoreduktion ΔR_M . Beide Grössen müssen natürlich auf die gleiche Zeiteinheit bezogen werden, also z.B. auf ein Jahr.

Der Quotient dieser beiden Grössen hat die Dimension "Geldeinheit pro vermiedene Schadeneinheit", misst sich also z.B. in Franken pro gerettetes Menschenleben. Dieser Quotient wird mit dem Begriff *Rettungskosten* [2] [5] verbunden und mit RK_M bezeichnet. Die Formel lautet:

$$RK_M = \frac{SK_M}{\Delta R_M}$$

Das Mitführen des Fusszeigers M in allen Grössen der Formel macht deutlich, dass sie sich alle auf eine ganz bestimmte Massnahme M beziehen.

Im Rahmen der Schätzgenauigkeiten für Sicherheitskosten und Risikoreduktion sind die einer Massnahme M zugehörigen Rettungskosten RK_M eine objektive Grösse. Rettungskosten werten nicht und entsprechen insbesondere und ausdrücklich auch nicht dem Wert eines Menschenlebens. Gewertet wird erst bei der Auswahl und der Festlegung der Massnahmen, die zur Gewährleistung von Sicherheit ergriffen werden.

1.2 Ein Zahlenbeispiel

Ein Zahlenbeispiel soll zeigen, dass die einer Massnahme M zugeordneten Rettungskosten RK_M grundsätzlich sehr einfach ermittelt werden können. Ich wähle ein Beispiel, das jeder versteht: Auf einer bestimmten Strassenkreuzung einer Gemeinde erleiden jährlich im Durchschnitt 2 Menschen als Folge von Verkehrsunfällen den Tod. Eine vollständige Sanierung der Kreuzung durch eine kreuzungsfreie Verkehrsführung kann diese Zahl praktisch auf Null bringen. Die Sanierung kostet 80 Millionen österreichische Schilling und löst demnach Jahreskosten von rund 8 Millionen S aus. Davon müssen – das habe eine kleine Untersuchung ergeben – 75% als Sicherheitskosten gewertet werden, während der Rest der Sanierungskosten dem erhöhten Komfort, weniger Lärm aus Bremsen und Anfahen usw. anzurechnen ist. Das ergibt die folgenden Rettungskosten:

$$RK_M = (0.75 \times 8 \text{ Mio S}) : 2 = 3 \text{ Mio S./ gerettetes Menschenleben}$$

Wird die Sanierung der Kreuzung vom Gemeinwesen beschlossen, hat es auf diese Art und Weise mehr oder weniger bewusst einen Konsens darüber erzielt, dass es bereit ist, zur Vermeidung eines Verkehrsopfers auf der fraglichen Kreuzung mindestens diesen Betrag aufzuwenden.

Dabei ist die hier vorgestellte Denkweise nicht auf die Abwehr von Schäden am Schutzgut "Leib und Leben von Menschen" beschränkt. Man kann durchaus auch andere Schutzgüter in Betracht ziehen, z.B. die direkten und indirekten Sach- und Folgeschäden von Erdbeben. Da sich diese in Geldeinheiten messen, ergeben sich die Rettungskosten in der Dimension Franken pro Franken. Die Antwort auf die Frage, was akzeptierbar sei, liegt auf der Hand: wohl niemand wird mehr als einen Franken ausgeben wollen, um einen Franken zu retten.

1.3 Ein Blick in andere Bereiche

Analog lassen sich die Rettungskosten anderer Sicherheitsmassnahmen beziffern. Dabei kann man zunächst im Bereich des Bauingenieurwesens bleiben. Dann geht es z.B. um die Höhe von Dämmen in den Niederlanden, oder um die Frage, ob die Anordnung von Brandmeldeanlagen und das Bereithalten einer Feuerwehr vernünftiger wäre als die Installation von Sprinklern.

Aber weit über die Bereiche des Bauwesens hinaus muss man schauen, wenn man prüfen will, inwieweit die Regeln der Baupraxis verträglich sind mit

den Verhaltensweisen in anderen Bereichen. Die Tabelle 1 zeigt Beispiele für die Grössenordnung von Rettungskosten verschiedener Massnahmen in Schweizer Franken. Erstaunlich ist zunächst die grosse Bandbreite der Zahlenwerte.

Rettungskosten	
Fr. pro gerettetes Menschenleben	
100	Mehrfachimpfung 3. Welt
1·10 ³	
2·10 ³	Installation Röntgenanlage
5·10 ³	Tragen Motorradhelm
10·10 ³	Bereithalten Kardiomobil
20·10 ³	Tuberkulose-Überwachung
50·10 ³	Bereithaltung Helikopter für Notfalleinsätze
100·10 ³	Sicherheitsgurte in Autos
bis	Sanierung von Strassenkreuzungen
	Bereitstellen von Nieren-Dialyse
500·10 ³	Tragkonstruktionen von Bauwerken
1·10 ⁶	
2·10 ⁶	
5·10 ⁶	S-Bahn Zürich, AlpTransit
10·10 ⁶	Erdbebensicherung bestehender Bauten
20·10 ⁶	Bergwerksicherheit USA
50·10 ⁶	DC 10 ausser Betrieb
100·10 ⁶	Hochhäuservorschrift GB
1·10 ⁹	Asbest-Sanierung Schulen

Tabelle 1 Rettungskosten, in Schweizer Franken

Weiter ist zu beachten, dass solche Zahlen unscharf sind und lediglich eine Grössenordnung zeigen. Die Angabe der Währung ist deshalb nicht so streng zu nehmen; es könnten auch US Dollars oder Euros sein. Eine Umrechnung in S darf ohne weiteres mit einem Faktor 10 erfolgen.

4 WERTUNGSFRAGEN

Die Frage, welche Rettungskosten im Einzelfall noch vertretbar sind, ist eine Wertungsfrage, die von der an Sicherheit interessierten Gesellschaft beantwortet werden muss.

4.1 Eine Frage des Kontexts

Diese Wertung wird nicht einheitlich sein: in Bangladesh beispielsweise wird der Blickwinkel anders sein als bei uns, und auch die eingangs gestellte Frage wird anders beantwortet werden.

Auch in unserer Welt ist es nicht einfach: wir sind offensichtlich nicht in der Lage, die vielfältigen Sicherheitsprobleme unserer Gesellschaft gesamtheitlich anzugehen. Wir bewegen uns im Gesundheitswesen beispielsweise anders als in technischen Bereichen. Und auch hier diskutieren wir die Fragen

der Verkehrssicherheit losgelöst von den Fragen der Tragwerkssicherheit. Und selbst in diesem vergleichsweise homogenen Bereich gelingt es uns kaum, einheitliche Massstäbe anzuwenden.

Hier bei Dir, lieber Lutz, oder in der benachbarten Schweiz, beim Bau der S-Bahn Zürich beispielsweise, hat man Massnahmen mit Rettungskosten unter 3 Mio Fr. pro gerettetes Menschenleben ohne langes Überlegen realisiert. Bei Massnahmen mit Rettungskosten über 10 Millionen hat man gezögert. Auch bei der Projektierung der europäischen Alpentransversalen, vom französisch-italienischen Gemeinschaftswerk auf der Strecke Lyon-Turin, über die schweizerischen Tunnels am Lötschberg und am Gotthard bis hin zum Brennerprojekt gelten ähnliche Kriterien.

4.2 Eine Frage der Prioritätensetzung

Doch wie auch immer: es ist optimal, bei begrenzt verfügbaren finanziellen Mitteln die Gelder zunächst für diejenigen Sicherheitsmassnahmen einzusetzen, denen kleine Rettungskosten zugeordnet sind, die also pro Geldeinheit eine grosse Risikoreduktion, einen grossen Sicherheitszuwachs bewirken. So lassen sich bei gleichbleibenden Gesamtausgaben mehr Menschenleben retten. Und das entspricht der Forderung im eingangs zitierten Text.

5 RETTUNGSKOSTEN IM STATISCH-KONSTRUKTIVEN BEREICH

Doch zurück zur Frage: Machen wir *structural engineers* unsere Bauwerke zu sicher? Betrachten wir doch einmal ganz einfach die Rettungskosten, die den üblichen Sicherheitsfaktoren unserer Bemessungspraxis zugeordnet sind.

5.1 Sicherheitskosten

Ich basiere das folgende auf der im Grunde völlig absurden Vorstellung [5], dass plötzlich sämtliche Tragwerke der Schweiz gleichzeitig mit einer Versagenswahrscheinlichkeit der Grösse p_f versagen.

Die Bausubstanz der Schweiz hat heute einen Wert von rund 1'800 Milliarden Fr. Ich schätze, dass etwa ein Drittel dieses Werts, also vielleicht 600 Milliarden in den entsprechenden Tragwerken liegt. Das ist eine Erfahrungszahl aus manchen Bauabrechnungen und Kostenvoranschlägen, die ich gesehen habe. Wer hier anderer Meinung ist, kann ja in das folgende seine eigenen Zahlen einsetzen.

Ich schätze weiter, dass 20% bis 40% dieser Tragwerkskosten in die Schaffung von Tragsicherheit investiert wurden, also als Sicherheitskosten abzuspalten wären. Diese Schätzung ergibt sich aus dem Vergleich der Kosten von Tragelementen, die ich einmal mit einem globalen Sicherheitsfaktor $\gamma = 2.0$ und anschliessend mit einem Faktor 1.0 bemessen habe. Letztere haben, wie man leicht einsieht, eine überaus grosse Versagenswahrscheinlichkeit von etwa 0.5, während die mit $\gamma = 2.0$ bemessenen Elemente die übliche Tragsicherheit bzw. die hinter den Bemessungsregeln verborgene sehr kleine Versagenswahrscheinlichkeit aufweisen, aber natürlich teurer sind, eben 20% bis 40%.

Natürlich ist dieser die Sicherheitskosten erfassende Prozentsatz von der Bauweise abhängig, für Stahl eher klein, für Holz grösser. Wer das nachvollziehen will, kann das leicht tun. Es wären z.B. die Kosten von Stahlprofilen zu vergleichen, deren Widerstandsmomente um den Faktor 2 auseinanderliegen, oder die Kosten entsprechender Holzbalken ähnlicher Proportionen, oder die Kosten von Beton und Stahl von Stahlbetonplatten, deren Tragvermögen um den Faktor 2 auseinander liegen.

Ich gehe in der Folge – wir wollen hier ja nicht allzusehr in die Details gehen – von 30% aus, also von etwa 200 Milliarden Franken, die in die Bauwerke der Schweiz für die Erzeugung der üblichen Tragsicherheit investiert wurden und hier als Sicherheitskosten SK_M angesprochen werden..

1.2 Personenrisiko

Die Schweiz hat 7 Millionen Einwohner. Ich schätze, dass sich – über einen Tag gemittelt – etwa 4 Millionen Menschen in einem Bauwerk befinden. Schliesslich schätze ich, dass beim stipulierten kollektiven Einsturz aller Bauwerke der Schweiz etwa drei Millionen verletzt würden und vielleicht eine Million Menschen sterben müssten. Dieser – wie bereits erwähnt absurde und die ganze Schweiz überziehende – Einsturz von Bauwerken habe die Wahrscheinlichkeit p_f . Das Personenrisiko ist dann $R = 10^6 \cdot p_f$, gemessen in Menschenleben.

1.3 Sicherheitsfaktoren und Versagenswahrscheinlichkeiten

Die Sicherheitsmassnahme zur Reduktion dieses Risikos ist hier natürlich das Vorhalten einer Sicherheitsreserve, der sog. Sicherheitsmarge M . Diese ist bekanntlich definiert als $M = R - S$, worin R für den Tragwiderstand und S für die Beanspruchung der

massgebenden Tragwerksteile stehen. Es sei angenommen, dass M normalverteilt sei. Die Verhältnisse zeigt Abbildung 1.

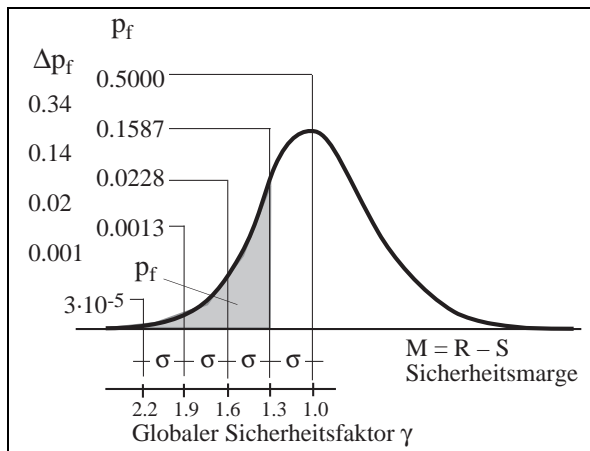


Abbildung 1 Sicherheitsmarge M und Versagenswahrscheinlichkeiten

Aus Abbildung 1 geht insbesondere der markierte Fall hervor, der bei einem globalen Sicherheitsfaktor von beispielsweise $\gamma = 1.3$ die Versagenswahrscheinlichkeit – korrekt einer Normalverteilung entsprechend – mit $p_f = 0.1587$ beziffert.

1.4 Sicherheitsfaktor und Risikoreduktion

Die Massnahme "Erhöhung des Sicherheitsfaktors von $\gamma = 1.0$ auf $\gamma = 1.3$ " bringt dann eine Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit von $\Delta p_f = (0.5 - 0.16) = 0.34$. Die weiteren Schritte zu den Faktoren $\gamma = 1.6, 1.9$ und 2.2 bringen der Reihe nach Reduktionen um Δp_f von $0.14, 0.02$ und 0.001 .

Weiter sei angenommen, dass ein globaler Sicherheitsfaktor von $\gamma = 2.2$ zu einer Sicherheitsmarge gehört, die dem Vierfachen ihrer Standardabweichung entspricht. Damit wäre – in der Sprache der Zuverlässigkeitstheorie und von Hasofer/Lind [6] – der Sicherheitsindex $\beta = 4$ und die Versagenswahrscheinlichkeit rund $p_f = 3 \cdot 10^{-5}$.

1.5 Rettungskosten

Nun lassen sich die entscheidenden Zahlen in der Formel für die Rettungskosten zusammentragen. Dem Schritt vom Sicherheitsfaktor $\gamma = 1.0$ zu einem Faktor von $\gamma = 2.2$ entsprechen Sicherheitskosten von $SK_M = 200$ Mia Fr. Diese bewirken eine Reduktion der Versagenswahrscheinlichkeit von 0.5 auf 0.001 , also von rund 0.5 . Multipliziert mit der Anzahl der bei diesem – wie gesagt absurden – Ereignis möglicherweise zu Tode kommenden Million Menschen, bewirkt die Berücksichtigung eines Sicher-

heitsfaktors von $\gamma = 2.2$ eine Risikoreduktion von $\Delta R_M = 0.5 \cdot 1 \text{ Mio} = 500'000$ geretteten Menschenleben.

Der Quotient dieser beiden entscheidenden Zahlen entspricht den Rettungskosten, die der Berücksichtigung dieses Sicherheitsfaktors zugeordnet sind. Es ergibt sich

$$RK_M = 200'000'000'000 / 500'000 = 400 \text{ kFr./gerettetes Menschenleben.}$$

Das ist – nach einem Blick auf die Zahlen der Tabelle 1 – gar nicht so unvernünftig. Im übrigen kommt die dort für Tragwerke angegebene Zahl aus diesem hier geschilderten Beispiel.

1.6 Rasch ansteigende Rettungskosten

Interessant ist die Entwicklung der Rettungskosten mit steigendem Sicherheitsfaktor. Zu jeder Standardabweichung, d.h. zu jedem der vier Schritte eines von $\gamma = 1.0$ auf $\gamma = 2.2$ steigenden Sicherheitsfaktors, gehören Sicherheitskosten von jeweils einem Viertel der vorher genannten 200 Milliarden, also etwa 50 Millionen kFr.

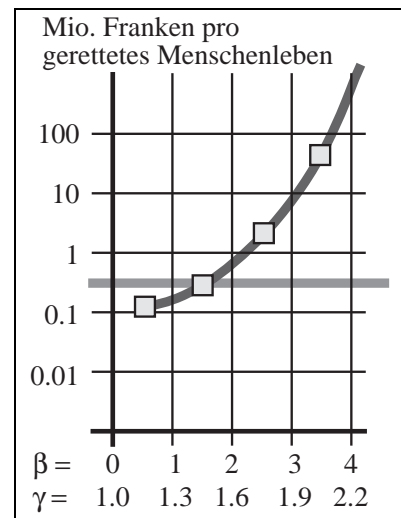


Abbildung 2 Mehr Sicherheit wird immer teurer

Eine Steigerung des Sicherheitsfaktors von $\gamma = 1.0$ auf 1.3 entspricht einer Senkung der Versagenswahrscheinlichkeit von 0.5 auf 0.159 , also einer Differenz von 0.34 . Zu diesem Schritt gehören demnach Rettungskosten von nur

$$RK_M = 50'000'000 / 340'000 = 147 \text{ kFr./gerettetes Menschenleben.}$$

Der erste Schritt in Richtung grösserer Sicherheit ist billig.

Den weiteren Schritten entsprechen 357 bzw. $2'500$ kFr, während dem letzten Schritt von $\gamma = 1.9$ auf 2.2

Rettungskosten von rd. 50 Millionen Fr./Menschenleben zugeordnet sind.

Selbst in logarithmischem Massstab der Abbildung 2 wird das mit steigendem Sicherheitsfaktor steiler und steiler. Zusätzliche Sicherheit wird – wenn etwas schon sehr sicher ist – immer kostspieliger.

Wie man erkennt, ist eine weitere Steigerung des Sicherheitsfaktors aus der dargestellten Sicht absolut unvernünftig. Eher sollten wir – zumindest für konventionelle Bemessungsprobleme – unsere Ansprüche zurückschrauben.

6 RISIKO AUS ERDBEBEN

Eingangs habe ich die Frage der Sicherheit von Menschen bei Erdbeben ausgeklammert. Dieses Thema wäre nun noch einmal aufzugreifen. Es geht im wesentlichen um die Festlegung von Regeln, auf Grund derer neue Bauten auf Erdbeben zu bemessen und bestehende Bauten hinsichtlich der Gefahren aus Erdbeben zu beurteilen sind.

6.1 Neue Bauwerke

Es ist zweifellos richtig, neue Bauwerke nach den gültigen Erdbebennormen zu bemessen – in der axiomatischen Annahme, dass diese optimal im Sinne des Vorstehenden seien. Das kostet insbesondere dann nicht viel, wenn das Bauwerkskonzept einigen wenigen einfachen Regeln gerecht wird. Im Hochbau wäre dies in erster Linie Sache des Architekten. Bis der Ingenieur ins Spiel kommt, hat der Architekt jedoch mangels Einsicht und Kenntnis oft schon die entscheidenden konzeptionellen Fehler gemacht. Und die sind in dieser Phase bekanntlich kaum noch rückgängig zu machen. Dem Ingenieur bleibt dann nur noch mit oft aufwendigen Massnahmen die möglichen Folgen der Fehler zu mildern. Man müsste also versuchen, die Architekten anzusprechen und zu überzeugen und nicht in erster Linie die Ingenieure.

6.2 Bestehende Bauwerke

Bei der Beurteilung bestehender Bauwerke darf man jedoch die Einhaltung der für Neubauten geltenden Normen nicht kategorisch fordern. Das wäre in vielen Fällen mit übergroßem Aufwand verbunden und daher viel zu teuer. Hier muss man die Rettungseffizienz der möglichen Sicherungsmassnahmen abschätzen und die Prioritäten entsprechend setzen. Die Umsetzung dieser Forderung ist im

Prinzip einfach, im Detail aber recht komplex.

Hier zunächst die Prinzipien: Bei der Überprüfung und Realisierung einer angemessenen Erdbebensicherheit bestehender Bauwerke könnte das folgende gelten:

- Es ist das individuelle Risiko eines durchschnittlichen Benützers einzuschätzen, Opfer eines Erdbebens zu werden. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich dieser in der Regel nicht während 24 Stunden und 365 Tagen pro Jahr im betrachteten Gebäude befindet.
- Ist dieses individuelle Risiko grösser als etwa 10^{-5} /Jahr, sollten Massnahmen zur Reduktion des Risikos ins Auge gefasst werden.
- Allfällige Sicherungsmassnahmen sollen robust sein, d.h., sie sollen die Risiken aus Erdbeben um mindestens eine Zehnerpotenz senken. Es macht keinen Sinn, viel Geld für eine kleine Verbesserung auszugeben.
- Es sind die Rettungskosten der in Betracht gezogenen Massnahmen einzuschätzen. Es soll im Prinzip die Massnahme mit den kleinsten Rettungskosten zuerst realisiert werden. Ist das geschehen, muss man die veränderte Situation erneut überprüfen.
- Alle Zahlenwerte sollen auf ihre Unschärfen untersucht werden, z.B. durch wahlweises Einsetzen unterer und oberer Schätzwerte der Grössen. Auch Methoden der Zuverlässigkeitstheorie können hierzu herangezogen werden. Damit gewinnt man wichtige Einsichten in die Zusammenhänge, bevor man Entscheidungen fällt.
- Auf die Realisierung von Massnahmen, deren Rettungskosten etwa $RK_M = 10$ Millionen Franken pro gerettetes Menschenleben übersteigen, sollte, ja muss in der Regel verzichtet werden, denn sonst würde man wohl die im Titel dieses Aufsatzes gestellte Frage bejahen müssen. Man muss in diesem Fall schlicht und einfach mit dem gegebenen und schon seit der Errichtung des betrachteten Bauwerks bestehenden Risiko leben.

6.3 Geltungsbereiche

Die vorstehenden Regeln können für einzelne Bauwerke gelten, aber auch für ganze Bauwerksbestände wie z.B. alle im Besitz und unter der Sorgfaltspflicht des Bundes, eines Landes, einer Stadt, eines Betriebs oder einer Versicherung stehenden Bauten.

6.4 Schwierigkeiten

Du hegst Zweifel, lieber Lutz, an der Realisierbarkeit dieser Vorschläge, zu Recht. Auch mir ist klar, dass diese Regeln weit einfacher klingen, als ihre Anwendung im konkreten Fall ist oder sein wird.

Die Schwierigkeiten liegen dabei nicht beim Entwickeln sogenannter robuster Massnahmen. Die findet man in vielen Fällen leicht. Auch deren Kosten, die in der Regel direkt den Sicherheitskosten entsprechen, sind nicht allzuschwer einzuschätzen. Relativ leicht ist auch die Abschätzung des Personenschadens im Falle des Einsturzes eines Bauwerks bei einem Erdbeben. Was schwierig ist, ist die Abschätzung der Einsturzwahrscheinlichkeit eines bestehenden Gebäudes und der Reduktion dieser Wahrscheinlichkeit durch die Realisierung einer robusten Massnahme. Der Nenner in der Formel für die Rettungskosten ist die bei weitem unschärfste Grösse.

6.5 Verantwortung

Schwierig oder nicht: die von uns geplanten und realisierten Massnahmen müssen letztlich auf einer solchen risiko-orientierten und auf Kosteneffizienz ausgerichteten Strategie beruhen und in übergeordnete Zusammenhänge eingebunden werden, denn irgendwann einmal müssen wir *structural engineers* uns und das Regelwerk unseres beruflichen Verhaltens gegenüber der Gesellschaft verantworten.

7 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Okrent, D.: "Comment on Societal Risk"; Science, Vol. 208, April 1980
- [2] Stiefel, U., Schneider, J.: "Was kostet Sicherheit?"; Schweizer Ingenieur und Architekt, 47, 1985
- [3] Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Der Risikokatalog"; Verlag TÜV Rheinland, 1992
- [4] Fritzsche, A.F.: "Wie sicher leben wir? Risiko-bewertung und -bewältigung in unserer Gesellschaft"; Verlag TÜV Rheinland, 1986
- [5] Schneider, J., Schlatter, H.P.: "Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen – Grundwissen für Ingenieure"; 2. Auflage, B.G. Teubner, Stuttgart, 1996
- [6] Hasofer, A.M., Lind, N.C.: "Exact and Invariant Second-Moment Code Format"; Proc.

ASCE, Journal of the Eng. Mech. Division, Vol. 100, No. EM 1, 1974

- [7] Kölz, E., Schneider, J.: "Verfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit bestehender Gebäude". Tagung der SGEB und des SIA vom 7./8. Sept. 2000, Zürich, 2000