

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 106 (1988)
Heft: 18

Artikel: Zwischen Sicherheit und Risiko
Autor: Schneider, Jörg
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-85700>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 16.05.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Sicherheit und Risiko

Zwischen Sicherheit und Risiko

Bhopal, Tschernobyl, Schweizerhalle: Mit wenigen Pinselstrichen ein erschreckendes Bild von den Risiken der Technik. Und dann der Blick zurück: Die Mühle am Bach, Alpgeläut, Abendfrieden, Ruhe, Sicherheit. Leben wir heute, im Zeichen der Technik, gefährlicher als früher?

Ist «Sicherheit» überhaupt ein Thema?

Ein kurzer Blick auf Statistiken [1] mag von Interesse sein. Die Mortalität, das ist die Wahrscheinlichkeit, innerhalb

VON JÖRG SCHNEIDER,
ZÜRICH

der nächsten 365 Tage zu sterben, ist in Bild 1 aufgetragen. Sie ist heute – abgesehen von einer etwas grösseren Rate im ersten Jahr – bis zu einem Lebensalter von etwa 40 Jahren äusserst gering. Danach tritt jedoch ein sich beschleunigender biologischer Alterungsprozess ein, die Mortalität verdoppelt sich etwa alle 8 Jahre. Das war vor hundert Jahren nicht wesentlich anders, nur war die Mortalität der Menschen in allen Lebensabschnitten grösser.

Der Tod ist sicher. Wir können ihn lediglich hinausschieben, den vorzeitigen Tod verhindern. Vorzeitig ist, gemäss Definition, der Tod vor dem 65. Altersjahr. Diese Zahl entspricht nur zufälligerweise unserem Pensionierungsalter. Die Wahrscheinlichkeit, vorzeitig zu sterben, ist auf Bild 2 ersichtlich. Sie ist in den letzten hundert Jahren beträchtlich gesunken [2]. Das ist weitge-

hend auf den Einsatz der Technik zurückzuführen. Geophysikalische Risiken (Überflutung, Dürre, Erdbeben...) haben wir in unserem Lebensbereich zu beherrschen gelernt. Hungerkatastrophen sind für den westlichen Menschen keine Gefahr mehr. Infektionskrankheiten sind praktisch beseitigt. Sie standen vor 60 Jahren mit 20% ganz weit vorne in der Statistik der Todesursachen, heute steht dort weniger als 1%. Die Lebenserwartung eines neugeborenen Kindes stieg von 40 auf über 70 Jahre. Selbst der Anteil der Toten durch Unfall ging im Laufe der Jahre zurück. Wir leben länger und damit weniger gefährlich als unsere Vorfahren. Die Technik fördert Sicherheit.

Freilich beeinträchtigt die Technik gleichzeitig die Sicherheit: Die Vergiftung von Luft, Wasser und Boden nimmt zu. Technologische Risiken und in ihrem Gefolge Krebs und Krankheiten der Atmungsorgane treten als Todesursache an die Stelle traditioneller Risiken. Und auch der Verkehr, und auch Ereignisse wie Bhopal, Tschernobyl und Schweizerhalle fordern ihre Opfer. Doch trotzdem: die Gesamtbilanz ist – rational genommen – positiv. Die Technik rettet mehr Menschenleben als sie, unvermeidlich im Verlaufe ihrer Anwendung, zerstört.

Das hat allerdings, insbesondere wegen verstärkter Massnahmen zur Minimierung und Kompensation technologischer Risiken, einen hohen Preis. Die Kosten für die Bewältigung technologischer Gefahren werden auf 10 bis 15% des Bruttosozialprodukts geschätzt. Die Hälfte davon geht in ärztliche Hilfe, Krankenhäuser, Ambulanzen, Feuerwehr und ähnliche Massnahmen, ein grosser Teil des Restes in technische Massnahmen zur Reinigung von Luft, Wasser und Boden sowie in die Verkehrssicherheit. Sicherheit ist heute «big business» [3]. Gut dran ist die Gesellschaft, die sich das leisten kann.

Übrigens: Lediglich knapp 1 Promille der in den Jahren 1945 bis 1978 vorzeitig verstorbenen Menschen gehen auf das Konto von Katastrophen vom eingangs erwähnten Typus. Katastrophen werden – wenn wir rein rational urteilen – zweifellos von der Gesellschaft bei weitem überbewertet. Ein Charakteristikum der Massenmedien: «Bad news is good news».

Wenn das aber alles so ist, ist dann «Sicherheit» überhaupt noch ein Thema? Ich meine: ja. «Sicherheit» und der dazugehörige polare Begriff «Risiko» sind Themen, über die wir reden müssen, um Sachkenntnis, Übersicht und Einblick zu gewinnen. Nur dann werden wir Entscheide von Rang [4] vorbereiten und fällen und die damit verbundene Verantwortung tragen können.

Es geht dabei um eine ganze Reihe von Fragen. Es geht um Wertungen: wie sollen wir Sicherheit messen, was ist sicher genug, und für wen, auf wessen Risiko erzeugen wir Sicherheit? Es geht um moralische Fragen: Sollen wir wirklich dieses tun, jenes unterlassen? Es geht um die Frage, wer die Verantwortung für die Anwendung der Technik trägt,

Bild 1. Tausendfache Wahrscheinlichkeit, im nächsten Jahr zu sterben, in Funktion des Lebensalters, heute und vor hundert Jahren

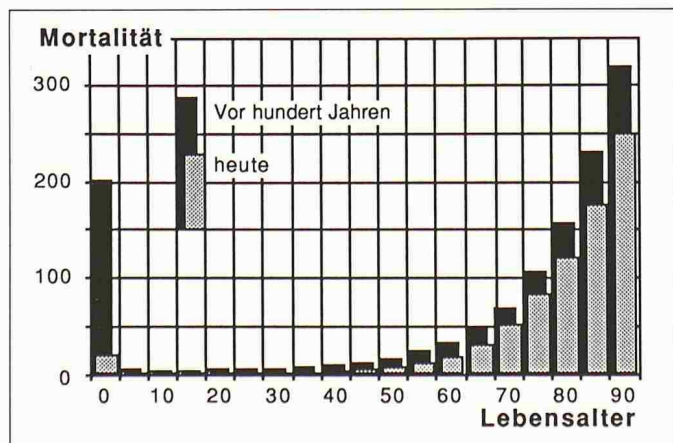
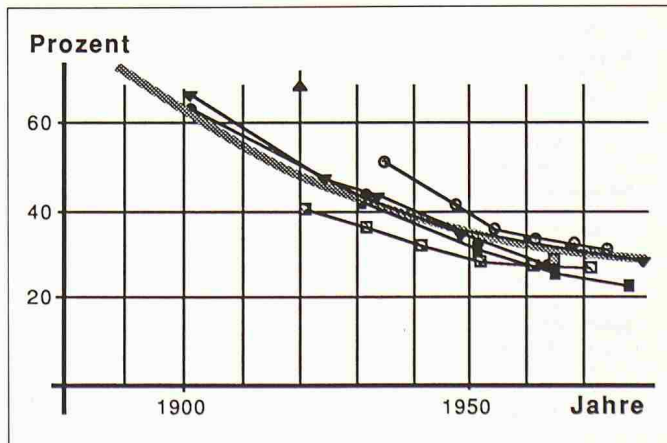


Bild 2. Wahrscheinlichkeit, vor dem Erreichen des 65. Lebensjahres zu sterben. Entwicklung über die letzten hundert Jahre in verschiedenen Ländern



wer die Normen setzt und was ihn dazu berechtigt. Und es geht schliesslich um die Sicherung der Zukunft in einer begrenzten Welt mit begrenzten Ressourcen.

Zu den Begriffen «Sicherheit» und «Risiko»

«Die Vorstellung, dass jedes Bauwerk, das wir erstellen, von vorneherein mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit des Einsturzes belastet sein soll, ist nicht vereinbar mit dem Verantwortungsbewusstsein des Ingenieurs, und sie ist deshalb untragbar.» Das sagte F. Stüssi 1969 in London am IVBH-Symposium [5]

Die Antwort auf diesen Satz kam von R.E. Rowe: «...I think it is generally accepted that the concept of safety can only be based upon a probability approach, and that the levels of risk which are acceptable must be specified...» [6]

Hier ist ein Widerspruch. Wer hat recht? Ich stimme beiden Aussagen zu, wenn auch jeweils mit gedanklichen Vorbehalten. Im ersten Satz wird der moralische Komplex angesprochen. Die Antwort hingegen spiegelt zweifellos die technisch-wissenschaftliche Seite. Das ist das Feld, das wir rational ergründen müssen. Sicherheit ist der philosophisch-emotional-moralische Begriff, assoziiert mit Standfestigkeit und Harmonie, mit den Adjektiven freundlich, friedfertig, gefühlvoll, aber auch mit konservativ, umständlich, teuer, feige und falsch. Risiko hingegen ist der wissenschaftlich-technische Begriff, assoziiert mit Empfindlichkeit und Spannung, mit feindlich, aggressiv, nüchtern, aber auch mit progressiv, direkt, preisgünstig, mutig, kühn und aufrichtig.

Tabelle 1. Todesfall-Risiken pro Jahr und 100 000 Personen bei normaler Exposition

Über alles:	
200	20-jährig
500	45-jährig
1200	55-jährig
Allgemein:	
200	Rauchen 20 Zigaretten pro Tag
80	Trinken 1 Flasche Wein pro Tag
20	Lungenentzündung
15	Verkehrsunfall
10	Haushaltsunfall
Berufsrisiken:	
100	Holzfällen und Holztransport
80	Bauarbeiter auf Baustelle
15	Chemische Industrie
10	Fabrik
5	Büro
Sport, Könnner, übliche Intensität:	
200	Motorradfahren
120	Auto-Rennfahren
4	Klettern, Fussball
4	Wandern

Die technisch-wissenschaftliche Seite sah natürlich auch Stüssi. Er wusste, wie wir, dass Risiken akzeptiert werden müssen, dass es abzuwägen gilt, was man bewusst als Risiko akzeptieren will. Und Rowe wusste um die moralische Seite der Frage. Beiden war bewusst, dass im Grunde nicht die Bauwerke sicher sein sollen, sondern die Menschen in deren Einflussbereich. Es geht hier, wie letztlich überall, nicht um die Sicherheit der Dinge an sich, sondern um die zeitlich und räumlich weit gefasste Sicherheit der Menschen, die die Dinge nutzen. Und Stüssi wie Rowe wussten um die sogenannten *Restgefahren*, die neben den bewusst akzeptierten Risiken das Geschehen ganz massgebend beeinflussen, ja überschatten: objektiv unbekannte Gefahren, subjektiv unerkannte Gefahren, vernachlässigte Einflüsse, unzureichende und fehlerhaft angewendete Massnahmen. Diese Restgefahren machen im Grunde genommen die Technik unsicher.

Hier sei jedoch nicht auf diese Restgefahren eingegangen. Das kann in einem anderen Heft nachgeholt werden. Hier soll vielmehr diskutiert werden, wie Sicherheit, wie Risiko zu messen sei und wie die Effizienz von Sicherheitsmassnahmen rational zu erfassen ist.

Sicherheit, rational gesehen

Es ist wohl unbestritten, dass wir «Sicherheit» rational an der Wahrscheinlichkeit von Krankheit, Unfall und Tod in einer Gruppe von Menschen messen können. Im vorliegenden Zusammenhang wird Tod als alleiniges Mass für Sicherheit genommen. Das scheint gerechtfertigt, da die drei Merkmale weitgehend parallel verlaufen. Bei der Wertung des Begriffs «Tod» können Merkmale wie Familienstand, Geschlecht, Einkommen, Ausbildung ausser acht gelassen werden, denn sie beeinflussen die hier zu suchenden Antworten kaum. Das Todesalter hingegen spielt bei der Beurteilung von Massnahmen eine Rolle. Es soll deshalb hier Sicherheit gemessen werden an der Wahrscheinlichkeit eines vorzeitigen Todes, wobei wir die eingangs erwähnte Definition beibehalten. Tabelle 1 enthält in diesem Sinne Risiken, denen einzelne von uns oder wir alle ausgesetzt sind. Sie deckt enorme Unterschiede auf, enthält sicherlich auch Überraschungen und gibt Anlass, falsche Einschätzungen zu korrigieren.

Eine oft gestellte und grundsätzlich sinnvolle Frage ist, was denn nun als Risiko akzeptierbar sei. Die Frage ist gut, aber sie löst so viele Zusatzfragen

aus, dass es keine eindeutige Antwort geben kann. Akzeptierbar für wen, für das Individuum, die Gesellschaft, den Auslöser des Risikos, den Betroffenen, den Nutzniesser? Akzeptierbar in freier Wahl oder als aufgezwungenes Risiko?

Das Problem ist komplexer. Wir müssen den Nutzen in Betracht ziehen, den wir mit dem Eingehen von Risiken erkaufen. Das müssen nicht Franken sein. Das kann die Befriedigung persönlicher Wünsche und Bedürfnisse sein, ja auch die Befriedigung von Süchten. Das kann auch die Befriedigung sein, die sich bei demjenigen einstellt, der durch Eingehen persönlicher Risiken andere Menschen sichert. Aber auch hier kommt man – rational – nur schwer weiter. Auch das, was unter Beachtung des jeweiligen Nutzens akzeptierbar ist, kann meines Erachtens jeder nur für sich selbst entscheiden. Und Ängste, Befürchtungen, Hoffnungen und Erwartungen werden dabei mitspielen.

«No risk is the highest risk of all [7].» Das ist nicht nur der Titel eines lesenswerten Artikels, sondern eine tiefe Wahrheit. Allzugrosse Behütung des Menschen führt zu Stagnation in jeder Beziehung. Die Freiheit, Risiken einzugehen oder zu verweigern, gehört zu den wesentlichen Voraussetzungen eines erfüllten Menschenlebens. Wir dürfen diese Freiheit, sofern nicht berechnete Interessen der Gesellschaft das unbedingt fordern, weder nehmen noch uns nehmen lassen.

Wir können und müssen jedoch darüber reden, welche Risiken wir Ingenieure durch die Wahl unserer Massnahmen anderen, dem Einzelnen und der Gesellschaft, zumuten dürfen, zumuten müssen. Was und wer uns dazu berechtigt? Ich meine: ein grösserer Grad von Sachkenntnis, Übersicht und Einblick in die Probleme, verbunden mit hohem Verantwortungsbewusstsein. Das ist es, was die Gesellschaft uns Ingenieuren – immer noch – zubilligt und gleichzeitig von uns erwartet.

Wir muten unseren Mitmenschen beispielsweise Berufsrisiken zu. Wir akzeptieren offenbar, dass einer von 300 Bauarbeitern jährlich schwere Verletzungen davonträgt und einer von 1000 jährlich auf der Baustelle das Leben verliert. Nirgends in der Welt ist das Berufsrisiko des Bauarbeiters so hoch wie in der Schweiz! Seltsam. Aber ich kenne auch kein Land, in dem die Vorschrift, einen Schutzhelm zu tragen, so nachlässig durchgesetzt, so fahrlässig missachtet wird. Kein Wunder, sind die Berufsrisiken auf der Baustelle so gross. Die Helme sind da. Man scheut nicht die Kosten. Doch selbst die Vorgesetzten, die aus besserem Wissen heraus ein

Vorbild geben sollten, tragen sie selten. Tut es etwa unserem Selbstbewusstsein Abbruch, wenn wir vorsichtig sind, gilt es gar als Zeichen von Feigheit, das wir nicht geben wollen? Oder will ich etwa vorgeben, meine Schädeldecke sei stark genug und brauche keinen Schutz, und Helme seien etwas für schwächere Charaktere? Ist das der Ort, wo wir als Gesellschaft dem Risikoträger die Freiheit lassen sollen? Ich glaube: nein!

Wir und andere, die ich hier unter die Ingenieure zähle, legen auch sogenannte zulässige Grenzwerte fest, für das Mass der Luft- und Gewässer-Verschmutzung beispielsweise, für den Schwermetallgehalt und die Verstrahlung von Nahrungsmitteln und so weiter und erwarten dann, dass unsere Mitmenschen bedenkenlos akzeptieren, was unter solchen Grenzwerten liegt. Akzeptierbar für wen? Den Gemüsebauern, die Politiker, den Säugling, die Industrie, die Gesellschaft? Wie beurteilen wir die Vertretbarkeit solcher Grenzwerte? Was ist zwischen Sicherheit und Risiko sicher genug?

Wir entscheiden als Ingenieure über Massnahmen, verwerfen diese, wählen jene. Wo sind die Kriterien, die uns dabei in sicherheitstechnischer Hinsicht leiten? Wenn wir auch in diesem Bereich rational handeln wollen, müssen wir nach der sicherheitstechnischen Effizienz jeder Massnahme fragen, nach der Effizienz, mit der sie Menschenleben rettet, konkret: Wieviele Menschenleben sie zum Beispiel für eine Million Franken zu retten in der Lage ist. Wir werden sehen, dass dies je nach Massnahme kaum ein einziges, aber auch 10 oder 100 oder 1000 Leben sein können.

Reduktion von Risiken, zu welchem Preis?

Die von uns ergriffenen Massnahmen dienen in der Regel ganz verschiedenen Zwecken: zunächst dem eigentlichen Zweck einer Sache, dann der Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit der Sache und schliesslich der Sicherheit derjenigen, die mit dieser Sache zu tun haben.

Jede Massnahme kostet Geld. Wir bezeichnen mit «Sicherheitskosten» denjenigen Teil der Kosten, der zur «Risiko-Reduktion» dient. Den Quotienten aus Sicherheitskosten und der durch diesen Aufwand erreichten Risiko-Reduktion nennen wir «Rettungskosten». Zu jeder Sicherheitsmassnahme, aber auch zu Massnahmen, die nur teilweise der Sicherheit dienen, gehören demnach Rettungskosten, ausgedrückt in Geldeinheiten pro gerettetes Menschenleben [8], [9], [10] und [11].

Solche Rettungskosten lassen sich oft leicht abschätzen. Ich will ein Beispiel geben: Eine gefährliche Strassenkreuzung mit jährlich im Mittel vier tödlichen Unfällen, die mit einem Kostenaufwand von 4 Millionen Franken grundlegend saniert und sicher gemacht werden kann. Das entspricht Jahreskosten von etwa 400'000 Franken, mit denen sich im Mittel jährlich vier Menschenleben retten lassen. Die Rettungskosten betragen demnach 100'000 Franken pro Menschenleben. Das ist die Effizienz dieser Sanierung in sicherheitstechnischer Sicht.

Tabelle 2 enthält eine ganze Reihe von Beispielen, die wir aus verschiedenen Quellen zusammengetragen haben. Angesichts der Genauigkeit der Zahlenangaben ist es gleichgültig, ob hier sFr. oder US-\$ stehen. Wir haben die uns zur Verfügung stehenden Zahlen genommen, wie sie sind und dann sinnvoll gerundet. Es hat keinen Sinn, eine nicht vorhandene Genauigkeit vorzutäuschen, die Grössenordnung ist von Interesse. Beachtenswert ist die unglaubliche Bandbreite dieser Grösse. Nicht alle Massnahmen scheinen so ohne weiteres gerechtfertigt. Manche regt zum Denken an, gerade die billigste beispielsweise: Man kann ein Leben

20	Mehrfach-Impfung in 3. Welt
100	
1 000	
2 000	Röntgenanlage
5 000	Helmtagen beim Motorradfahren
10 000	
20 000	Kardiomobil
50 000	Tuberkulose-Überwachung
100 000	Rettungs-Helikopter, Sicherheitsgurte, Sanierung von ...bis...
200 000	Kreuzungen, Tragwerke
500 000	Nieren-Dialyse, Airbags in Autos
1 000 000	Verstärkung gegen Erdbeben
2 000 000	
5 000 000	Sicherheit Bahn
10 000 000	Erdbeben-Norm SIA 160 Schwefeldioxyd-Filter Beleuchtung Zebrastreifen
20 000 000	Sicherheitsmassnahmen in Bergwerken (USA)
50 000 000	DC 10 ausser Betrieb 1979
100 000 000	

Tabelle 2. Rettungskosten verschiedener Massnahmen, in Schweizer Franken (Grössenordnung)

in der Dritten Welt für 20 Fr. retten, doch in welche Zukunft entlässt man dieses Leben?

Menschenleben lassen sich für weniger als hundert Franken retten. Eine ganze Reihe sinnvoller technischer Massnahmen rettet Leben für wenige hunderttausend Fr. Aber auch Millionenbeträge werden ausgegeben, um Menschen-

GLOSSAR

Sicherheit

Gewissheit, vor Gefahr(en) geschützt zu sein («Leib und Leben», aber auch hinsichtlich materieller Güter)

Risiko (im allgemeinen Sinn)

Möglichkeit, einen Schaden zu erleiden; Gefahr

Risiko (im engeren Sinn)

Mass für die Grösse einer Gefahr; Funktion von Wahrscheinlichkeit eines schädigenden Ereignisses und Schadenausmass

Akzeptierbares Risiko (Akzeptables Risiko)

Risikowert, der im normativen Sinn für zumutbar erklärt wird (z. B. im Rahmen eines gesellschaftspolitischen Meinungsbildungsprozesses)

Akzeptiertes Risiko «Objektives» Risiko

Risiko, das unwidersprochen hingenommen wird
Aufgrund eines Tatbestandes mit wissenschaftlichen Methoden feststellbares Risiko

«Subjektives» Risiko

Subjektive Einschätzung der Grösse eines Risikos oder einer Gefahr

Individuelles Risiko

Wahrscheinlichkeit, dass ein Individuum einen bestimmten Schaden erleidet

Kollektives Risiko

Risiko, bzw. Schadenerwartung eines Kollektivs

Freiwilliges Risiko

Risiko, welches freiwillig eingegangen wird (z. B. Klettern)

Aufgezwungenes Risiko (unfreiwilliges Risiko)

Risiko, welchem ein Individuum oder ein Kollektiv ohne eigene Einflussnahme ausgesetzt wird

Restrisiko

Nach Berücksichtigung aller getroffenen Sicherheitsmassnahmen verbleibendes Risiko

Risiko-Aversion

Subjektive Abneigung gegenüber einem Schadenereignis von Katastrophencharakter

Risiko-Analyse

Ermittlung oder Abschätzung eines Risikos mit wissenschaftlichen Methoden, insbesondere der Wahrscheinlichkeit eines schädigenden Ereignisses und des Schadenausmasses

Risiko-Bewertung

Wertung eines Risikos bzw. einer Gefahrensituation aufgrund gesellschaftspolitischer Gesichtspunkte (z. B. im Hinblick auf die Festlegung akzeptierbarer Grenzen)

Schadenpotential

Maximal denkbare Schadenausmass

(Red.)

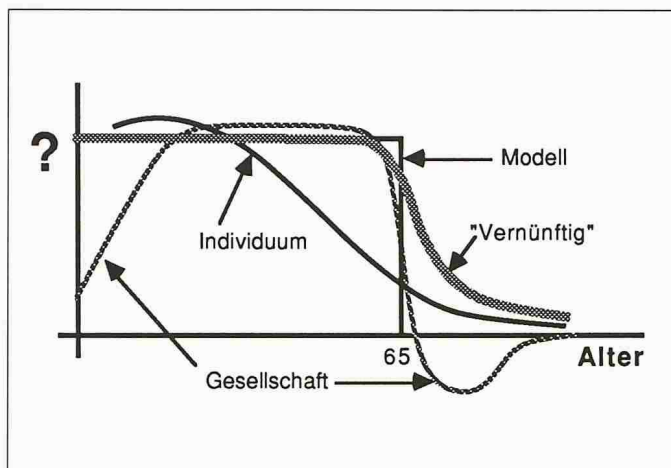


Bild 3. Der Wert eines Menschenlebens, aus verschiedenen Gesichtswinkeln gesehen

leben zu retten. Nicht immer aus rationalen Gründen. Oft wohl lediglich, um Schuldgefühle zu kompensieren.

Die Frage, welche absolute Grösse hier noch vertretbar sei, ist zunächst ganz ohne Belang. Es entspricht ingenieurmässigem Denken, Gelder zweckmässig einzusetzen, also dort, wo sie viel nützen. Billige Massnahmen sind zu bevorzugen, denn eine Geldeinheit rettet dort mehr Menschenleben. Bei beschränkten Mitteln ist es sinnvoll, teure Massnahmen zugunsten billigerer aufzugeben. So lassen sich bei gleichbleibenden Gesamtausgaben mehr Menschenleben retten oder durch Umverteilen der Mittel die Sicherheitskosten reduzieren.

Eine rational begründete Strategie wäre demnach, zur Beurteilung von Sicherheitsmassnahmen die Rettungskosten abzuschätzen und denjenigen Massnahmen den Vorzug zu geben, die Menschenleben mit vergleichsweise niedrigen Kosten retten. D. Okrent sagt: «... 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...» [12]. Das lässt sich in seiner Krassheit schwer in die deutsche Sprache übersetzen, darum lasse ich den Satz so stehen.

Die Frage nach dem gerade noch vertretbaren Grenzwert der Rettungskosten ist die Frage nach dem monetären Wert eines Menschenlebens. Wieder eine Frage, die viele neue Fragen aufwirft und keine eindeutige Antwort zulässt: Wessen Leben in welcher Situation und von wem bewertet? Wir alle wissen aus Erfahrung, dass die Antwort oft «fast unendlich», oft auch schlichtweg «null» ist. Versicherungsgesellschaften und Richter setzen sich in konkreten Einzelfällen mit dieser Frage auseinander. Hier ist sie kaum von Belang.

Qualitativ und in Funktion des Lebensalters müssen wir jedoch Stellung beziehen, denn das kann für die Wahl von Massnahmen, insbesondere im medizinischen Bereich, von Belang sein. In Bild 3 sind, in Anlehnung an [2], vier Antworten auf diese Frage gegeben: die – vielleicht allzu ehrliche – Antwort der Gesellschaft, die in ein Menschenleben investiert hat und den alternden Menschen am Ende seiner Lebensstrecke unterhalten muss, die Antwort des Individuums, das möglicherweise den Wert seines Lebens mehr oder weniger proportional zu den noch verbleibenden Lebensjahren bemisst, eine «vernünftige» Antwort, die einen über die aktiven Jahre praktisch gleichbleibenden und dann einen abnehmenden Wert stipuliert, und schliesslich die brutale, modelhafte «Lösung», die den Wert des nicht mehr im Wirtschaftsleben stehenden Menschen zu null setzt.

Alle diese Antworten sind richtig und falsch zugleich. Sie haben allerdings eines gemeinsam: sie werten in wirtschaftlicher Hinsicht das Menschenleben gegen sein Ende hin geringer. Das spricht gegen aufwendige Massnahmen zur Rettung, zur Verlängerung eines ohnehin nur noch auf kurze Zeit bemessenen Lebens. Und das ist aus vielen, auch aus emotionalen Gründen durchaus richtig. Drückt man in diesem Bereich die Rettungskosten in Geldeinheiten pro gerettetes weiteres Lebensjahr aus, gibt man den Zahlenwerten wieder eine sinnvollere Aussage.

In Tragwerken investierte Rettungskosten

Wie gross sind die in unseren Bauwerken investierten Rettungskosten? Liegen sie im Rahmen? Die Frage ist komplex, haben wir doch zunächst weder Informationen über die in Bauwerke

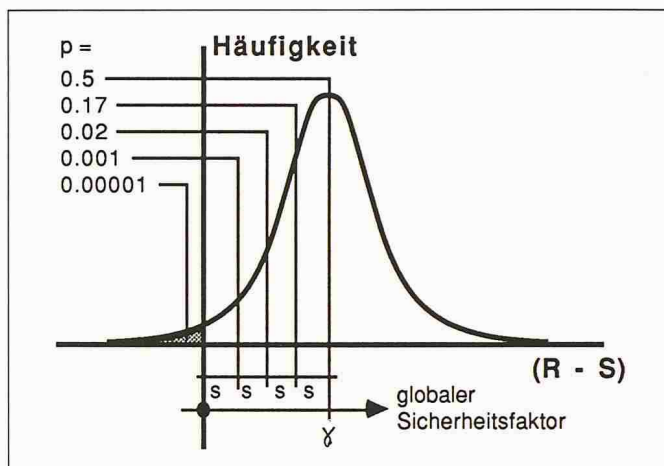


Bild 4. Verteilungsdichte der Differenz von Widerstand R und Beanspruchung S und Versagens-Wahrscheinlichkeiten von Tragwerken

investierten Sicherheitskosten noch einen Überblick über die verschiedenen Risiken, die wir bei der Benützung von Bauwerken eingehen.

Ich möchte mich im folgenden Gedankenexperiment auf *Tragwerke* beschränken, da diese ja zweifellos das Sicherheitsniveau in Bauwerken massgebend mitbestimmen. Auch möchte ich von korrekt und normgemäss bemessenen und erstellten Tragwerken ausgehen, also annehmen, dass die früher erwähnten Restgefahren gebannt seien.

Unter den erwähnten Voraussetzungen haben Tragwerke eine Versagens-Wahrscheinlichkeit in der Grössenordnung von $p = 0,00001$, bezogen auf ihre Lebensdauer. Es mag auch eine Null mehr oder weniger sein hinter dem Komma. So genau wissen wir das, selbst für normgemäss erstellte Tragwerke, leider nicht. Aber wir wollen einmal von dieser Zahl ausgehen. Wir nennen R den Widerstand, S die Beanspruchung des Tragwerks. Beides sind stochastische Grössen, sind also gekennzeichnet durch Mittelwert, Standardabweichung und weitere statistische Masszahlen. Die Differenz $(R-S)$ dieser beiden Grössen hat die in Bild 4 dargestellte Verteilungsdichte. Wir wollen annehmen, dass der Mittelwert dieser Verteilung dem Vierfachen der Standardabweichung s und der dem Versagen zugeordnete Fraktilwert der Verteilungsdichte gerade der oben festgelegten Versagens-Wahrscheinlichkeit entsprechen. Rückt die Kurve nach links, um eine, zwei, drei und vier Standardabweichungen, steigt diese Versagens-Wahrscheinlichkeit p auf 0.001, 0.02, 0.17 und 0.5, um hier, in Anlehnung an eine Normalverteilung, konkrete Werte festzulegen. Das ist der erste Schritt im Gedankenexperiment.

Im zweiten Schritt dieses Gedankenexperiments sind dieser Verschiebung Ko-

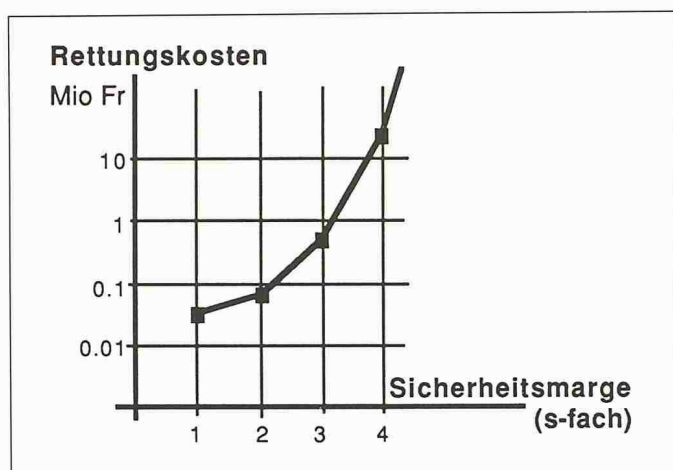


Bild 5. In Tragwerksicherheit investierte Rettungskosten in Funktion der Sicherheitsmarge

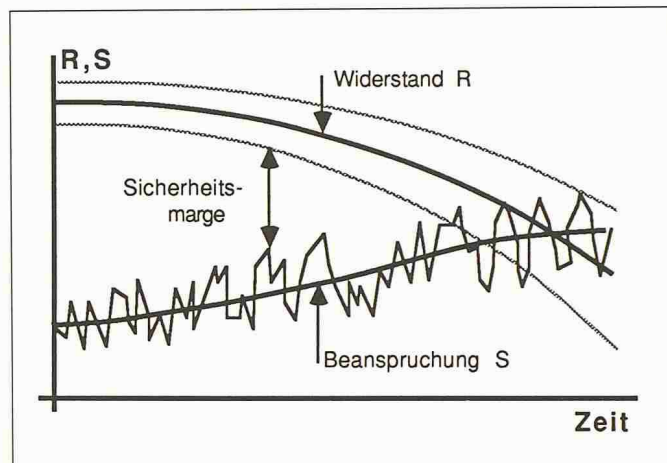


Bild 6. Widerstand, Beanspruchung und Sicherheitsmarge als Funktionen der Zeit

sten zuzuordnen. Die in Bild 4 skizzierte Kurve entspricht voraussetzungs-gemäss einer korrekten Bemessung nach Norm, hat also die übliche Sicherheitsmarge. Eine um vier Standardabweichungen nach links verschobene Kurve entspricht einer Bemessung ohne Sicherheitsmarge, bei der natürlich weniger Mittel investiert werden müssen. Halten wir die Bauhöhe der Tragelemente bei dieser Verschiebung konstant, um z.B. die Gebrauchstauglichkeit nicht wesentlich zu beeinträchtigen, sinkt der Baustoffbedarf nach meiner Schätzung um etwa 30%. Die Kosten des Tragwerks sinken aus verschiedenen Gründen weniger stark. Ich will hier als Schätzwert für die in Tragwerken investierten Sicherheitskosten 20% der Erstellungskosten annehmen. Es kommt hier gar nicht so sehr auf Genauigkeit an.

Das Anlagevermögen in Bauten in der Schweiz liegt – alles grobe Zahlen – bei etwa 600 Milliarden sFr. Auf Tragwerke entfallen dann erfahrungsgemäss etwa 200 Milliarden. Hätten wir ohne Sicherheitsmarge gebaut, hätten wir 20% davon, also 40 Milliarden sFr. weniger investiert. Diese investierten Sicherheitskosten müssen wir nun dem Risiko der Benützer von Bauwerken gegenüberstellen.

Auch hierzu eine Schätzung: In der Schweiz leben 6 Millionen Menschen, von denen sich rund 4 Millionen zu jeder Zeit in oder im Einflussbereich von Bauwerken aufhalten. Würde nun plötzlich die Sicherheitsmarge verschwinden, die Kurve in Bild 4 also um 4 Standardabweichungen nach links rücken, würde die Hälfte aller Tragwerke einstürzen. Dabei wären dann offenbar 2 Millionen Menschen betroffen, von denen vielleicht jeder Fünfte, also 400'000 tödlich verletzt würden. Den investierten Sicherheitskosten von 40 Milliarden sFr. stehen demnach 400'000 gerettete Menschen gegenüber.

Der Quotient aus diesen beiden Zahlen entspricht den Rettungskosten und beträgt unter den getroffenen Annahmen 100'000 Franken. Das ist eine erstaunlich vernünftige Zahl.

Die einer schrittweisen Vergrösserung der Sicherheitsmarge zugeordneten Rettungskosten sind natürlich sehr verschieden. Wir haben die Zahlen an der Hand. Wir können annehmen, dass eine Verschiebung der Kurve um eine Standardabweichung Sicherheitskosten von 10 Milliarden entsprechen. Die Differenzen der Versagens-Wahrscheinlichkeiten p betragen 0.33, 0.15, 0.019 bzw. 0.00099 (siehe Bild 4). Die 400'000 Geretteten sind proportional zu diesen Zahlen aufzuteilen, das sind 264'000, 120'000, 15'200 bzw. 800, jeweils gerettet durch den Einsatz von 10 Milliarden sFr. Das führt zu sehr geringen Rettungskosten von rund 38'000 Franken für den ersten Schritt von einer Standardabweichung, für die beiden nächsten Schritte sind es 83'000 bzw. 658'000 Franken. Im letzten Schritt investieren wir Rettungskosten von 12,5 Millionen und die Investition wird eindeutig fraglich. Bild 5 zeigt die Progression sogar in logarithmischem Massstab.

Freilich: das ganze ist ein Gedanken-Experiment und von den Voraussetzungen, insbesondere von den geschätzten Versagens-Wahrscheinlichkeiten, abhängig. Doch sieht man hier, wie rationale Kriterien angewendet werden können und wie einfach, plausibel und informativ unter Umständen Abschätzungen sind.

Bild 5 gibt im übrigen Anlass zu einer Verallgemeinerung: Die Reduktion von Risiken durch stärkere Bemessung, das heisst durch Vorhalten grösserer Sicherheitsmargen wird je teurer, die Rettungskosten je höher, je höher das bereits erzielte Sicherheitsniveau ist.

Wir dürfen vernünftige Grenzen nicht überschreiten. Tun wir das doch, investieren wir Mittel am falschen Ort, schaden wir über alles gesehen letzten Endes mehr als wir im Detail nützen. Wir haben weiter vorne festgestellt, dass Massnahmen zu bevorzugen sind, die Sicherheit mit niedrigen Rettungskosten schaffen. Ich bin fest überzeugt davon, dass wir im Bauwesen den Aufwand umlagern müssen, von der Bemessung weg zu anderen, rettungskostengünstigeren Sicherheitsmassnahmen. Dazu gehören insbesondere die Elimination von Gefahren am Gefahrenherd selbst, die Wahl sicherer Konzepte, die Ausschöpfung der Möglichkeiten von Kontrolle und Überwachung und die Anstrengungen zur Reduktion menschlicher Fehlleistungen. Es ist erfreulich, dass die neuen SIA-Normen [13] [14] in diese Richtung gehen.

Sicherheit als Prozess

Widerstand und Beanspruchung der Tragwerke und damit auch Sicherheitsmargen sind instationäre stochastische Prozesse. Tragwerkswiderstände sinken im Laufe der Zeit und ihr Streubereich steigt wegen der kumulierten Wirkung der natürlichen und der vom Menschen geschaffenen schädigenden Umwelt. Gleichzeitig steigen die Ansprüche an Bauwerke, die Beanspruchung. Das ist in Bild 6 symbolisch dargestellt [15]. Was bei der Erstellung auf lange Lebensdauer ausgelegt war, erreicht schon weit früher das Ende der technisch möglichen Lebensdauer und muss aus dem Betrieb genommen werden, bevor Sicherheitsmargen unter ein noch vertretbares Minimum absinken. Das muss man rechtzeitig erkennen.

Doch wir haben nicht gelernt zu sehen. Wir sehen kaum unsere jeweilige Aufgabe und Verantwortung. Und wir haben Mühe, innerhalb dieser Grenzen

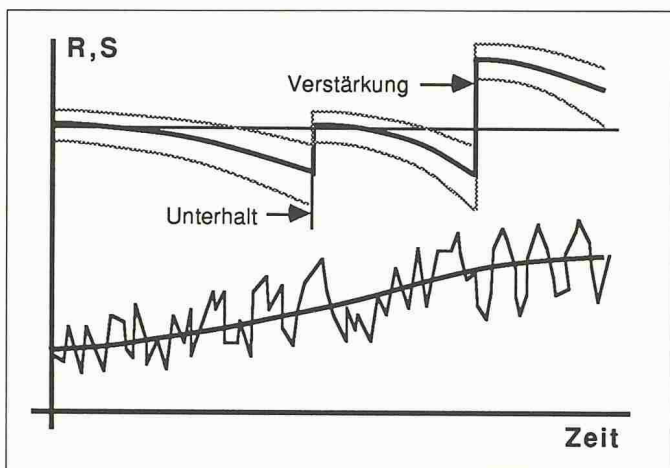


Bild 7. Der Einfluss von Unterhalt und Verstärkung auf die Lebensdauer von Bauwerken

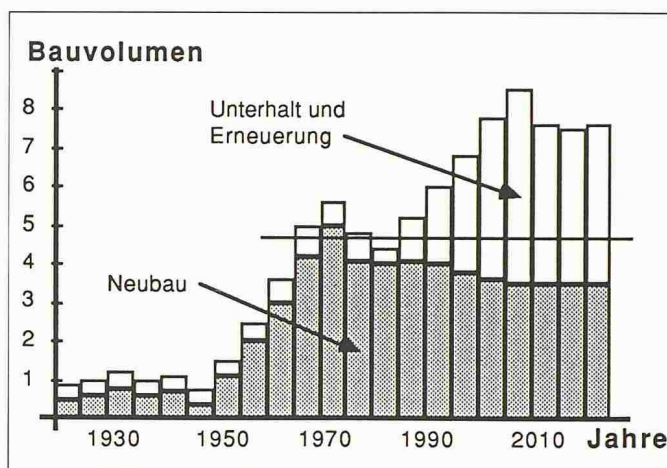


Bild 8. Das Bauvolumen unter Berücksichtigung von Unterhalt und Erneuerung bestehender Bausubstanz

die nötigen Entscheidungen sicher zu fällen. Zugegeben: solche Entscheide sind schwierig. Es fehlen uns rationale Kriterien für die Vorbereitung dieser Entscheide und geeignete Verfahren für die Entscheidungsfindung. Doch was sich unter dem Stichwort «Elmenrütli» in den letzten Jahren abgespielt hat, und was wir im Bereich von Wasser (beispielsweise) im letzten Sommer erlebt haben, war für uns alle sehr lehrreich. Doch nun müssen wir aus diesen Lehren auch die Konsequenzen ziehen.

Das beschleunigte Altern unserer Bauwerke kann und muss aufgehalten werden, nicht nur, um die Sicherheit der Benutzer auch auf Dauer zu gewährleisten, sondern um die Bausubstanz schlechthin zu erhalten. Die Wirkung von sorgfältiger Überwachung und rechtzeitig eingeleiteten Unterhaltmassnahmen zeigt Bild 7.

Rechtzeitiger Unterhalt ist kostengünstig. Kommen wir damit zu spät, wird die Rettung der Anlage teuer, oft unmöglich. Das wissen wir Ingenieure. Doch das müssen wir den politischen Instanzen auch unmissverständlich klarmachen. Da fehlt es uns oft an Mut und Standfestigkeit.

Freilich fehlen uns in diesem Feld auch geordnete und ordnende Prozeduren sowie zuverlässige Verfahren zur Feststellung und Beurteilung des Zustandes bestehender Bausubstanz. Auch die Techniken der Sanierung und die Erfahrungen mit den eingesetzten neuen

Werkstoffen sind auf weiten Strecken noch mangelhaft. Ein wichtiges Feld für Forschung und Lehre.

Wir stehen vor alternden Bauwerken mit einem Anlagevermögen von vielleicht 600 Milliarden Franken. Die eine Hälfte dieser Bauwerke wurde in den letzten 40 Jahren gebaut und kommt jetzt zum ersten Mal in den Revisionszyklus, die andere Hälfte hingegen in ein Alter, wo eine grundlegende Erneuerung nötig wird. Beides erfordert Mittel in der Grössenordnung einiger Prozente jährlich [16]. Das wissen wir. Doch dass dies bald einmal jährlich vielleicht 10 Milliarden Franken sein werden, das müssen wir uns bewusstmachen und die notwendigen Schlüsse daraus ziehen.

In Bild 8 habe ich das Bauvolumen der letzten 80 Jahre aufgetragen und in die Zukunft vorausgeschätzt. Als Mass dient der jährliche Zementverbrauch in Millionen Tonnen. Das ist ein gutes Mass für das gesamte Bauvolumen und bedarf zudem keiner Indexierung. Um 35 Jahre verschoben ist dieses Volumen unter dem Titel «Unterhalt und Erneuerung» noch einmal aufgeführt und dem Bauvolumen überlagert in der Annahme, dass die Erhaltung von Bausubstanz gleichviel Planungs-Kapazität bindet wie der seinerzeitige Neubau. Man kann dies diskutieren und korrigieren, genauso wie das Mass der zeitlichen Verschiebung. An den Schlussfolgerungen ändert das nicht viel. Der Erhaltungsbedarf wird um die Jahrhundertwende rapid ansteigen und die Kapazitäten übersteigen, deren Grenzen wir in den siebziger Jahren erkannt haben. Diese Grenzen sind gegeben durch die zur Verfügung stehenden Mittel, die Kapazität unserer Bauindustrie, vor allem aber durch die Leistungsfähigkeit des Berufsstandes der Ingenieure.

Für den Brückenbau habe ich ein paar charakteristische Zahlen in Tabelle 3 zusammengestellt [17]. Rund 3000 Brücken im Netz der Schweizerischen Bundesbahnen sind nun älter als 50 Jahre und werden um eine grundlegende Erneuerung in den nächsten Jahrzehnten nicht herumkommen. Alle Brücken des Nationalstrassennetzes wurden in den letzten 30 Jahren gebaut und verlangen in den nächsten 30 Jahren wesentliche Erhaltungsmassnahmen. Allein das sind 3000 Brücken, also 100 pro Jahr. Auch die Altersverteilung der Strassenbrücken der Stadt Zürich gibt Hinweise auf das, was ganz generell in dieser Agglomeration auf uns zukommt.

Es geht hier nicht darum, Panik zu erzeugen. Aber wir müssen die Tatsachen der Zukunft sehen und die notwendigen Massnahmen heute treffen. Unser Berufsstand wird nur dann den Anforderungen der Zukunft gewachsen sein, wenn wir uns rechtzeitig rüsten. Von Erhaltung und Erneuerung ist in unseren Studienplänen beispielsweise noch kaum die Rede. Doch damit werden unsere heutigen Studierenden ihr Brot verdienen müssen. Hier tut Handeln not. Eines scheint sicher: Wir werden wieder gefragte Leute sein, gut für uns. Aber ein Feld für Scharlatane tut sich auf, schlecht für die Sache.

Sicherheit auf Kredit?

Eine der brennendsten Fragen im Bereich zwischen Sicherheit und Risiko stellt sich in den Auseinandersetzungen zur Energiewirtschaft: Fossile Energie oder Kern-Energie? Ich komme nicht darum herum, mich auch dazu zu äussern.

Fossile Energie, Kohle, Erdöl und Erdgas: begrenzte Ressourcen, schon beim Abbau Risiken, dann beim Verbrauch

Tabelle 3. Der Bestand an Brücken in verschiedenen Bereichen in den Jahren 1940, 1955, 1970 und heute

	1940	1955	1970	1985
SBB Netz	2910	3191	3502	4000
Nationalstrassen	0	0	1333	2900
Stadt Zürich	56	64	100	150

Schwefeldioxyd und saurer Regen, Stikoxoide und unverbrannte Kohlenwasserstoffe, Rauch und Staub. Kohlendioxyd, Treibhauseffekt und Klimakatastrophe, Anstieg des Meeresspiegels, Überschwemmung weiter Teile der dicht bevölkerten Küstenbereiche [18]. Das sind etwa die Versatzstücke dieses Gefährdungsbildes: Weltuntergang.

Das der *Kernenergie* zugeordnete Gefährdungsbild enthält die schwerwiegenden Problemkreise der Entsorgung abgebrannter Brennstoffe und stillgelegter Anlagen, die Sabotage-Anfälligkeit und schliesslich – als Folge letztlich nie ganz auszuschliessender Unfälle – die weiträumige und langfristige radioaktive Verseuchung des Bodens, der Gewässer, der Nahrung und des Menschen selbst: Weltuntergang auch hier.

Warum wenden wir nicht gerade hier die diskutierten Möglichkeiten einer rationalen Beurteilung und Entscheidung der Frage an? Wo sind die Risiken geringer, wo die Rettungskosten niedriger? Nun, Risikostudien für die eine und die andere Seite, auch vergleichende, gibt es zahlreiche. Viele sind gut, korrekt und aufrichtig, manche offensichtlich einseitig und malen den Weltuntergang als Folge der Option der jeweiligen Gegenseite. Ich halte nicht viel von solchen Studien. Ich meine, Risikostudien sind von zweifelhaftem Wert vor der Frage, welchem Energie-Träger wir den Vorzug geben sollen. Dazu drei Gründe.

Zuerst der einfachste: Weil wir diese Frage im Zuge der Entwicklung der Technik und fasziniert von ihren Möglichkeiten schon längst beantwortet haben, nämlich nicht: «entweder – oder», sondern «sowohl als auch» und weil deshalb solche Studien lediglich Bestätigungs- oder Widerlegungs-Versuche bleiben für etwas, das in dieser Form gar nicht mehr zur Diskussion steht.

Der zweite Grund: Risikostudien versagen vor dem «Null mal Unendlich»-Dilemma. Und dieses liegt bei der Beurteilung der Risiken einer Kernenergie-Wirtschaft vor. Die Eintritts-Wahrscheinlichkeiten denkbarer Ereignisse sind ausserordentlich klein, die denkbaren Folgen hingegen unermesslich und jenseits aller Erfahrung. Wie sollen wir das Produkt werten? Es geht hier eher um die Frage, ob und wie wir ein solches Ereignis, wie wahrscheinlich oder unwahrscheinlich es auch immer sei, überhaupt ertragen könnten. Was auch immer wir vorkehren, jedes denkbare Ereignis wird früher oder später eintreten. Das ist Murphy's Law. Und man sagt, er sei ein Optimist gewesen. «Don't start what you can't stop» steht für den gleichen Gedanken. Wenn wir die denkbaren Folgen einer Technolo-

Literatur

- [1] Statistische Jahrbücher verschiedener Länder und andere statistische Quellen. Zahlenangaben in diesem Aufsatz sind immer als «ungefähr» zu nehmen. Es geht dem Verfasser nicht um minutiöse Genauigkeit, sondern um das Aufzeigen von Beziehungen, Grössenordnungen und Zusammenhängen
- [2] Siddall, E.: «Safety Policy in the Production of Electricity», International Meeting on Thermal Nuclear Reactor Safety, Chicago, 1982
- [3] Harris R.C., Hohenemser, Ch. und Kates, R.W.: «The Burden of Technological Hazards», in «Energy Risk Management», G.T. Goodman und W.D. Rowe, Editors. Academic Press, London 1979
- [4] Schneider, Jörg: «Über den Rang der Entscheidung in der Arbeit des Ingenieurs», Schweizerische Bauzeitung, Heft 1, 1969
- [5] Stüssi, F.: «Geschichtlicher Überblick über die Entwicklung der Bemessungsverfahren im Bauwesen», IVBH Symposium London 1969. Vorbericht, Berichte der Arbeitskommissionen, Band 3, IVBH Zürich, 1969
- [6] Rowe, R.E.: in IVBH Symposium London 1969, Schlussbericht, Berichte der Arbeitskommissionen, Band 4, IVBH Zürich, 1969
- [7] Wildavsky, A.: «No risk is the highest risk of all». American Scientist, Vol 67, 1979
- [8] Siddall, E.: «Control of Spending on Nuclear Safety», Nuclear Safety, Vol. 21, Nr. 4, 1980
- [9] Schneider, Th.: «Sicherheit als sozio-ökonomisches Optimierungsproblem». IVBH Kongress Wien 1980, Einführungsbericht, IVBH Zürich 1979
- [10] Stiefel, U.G. und Schneider, J.: «Was kostet Sicherheit?». Schweizer Ingenieur und Architekt, Heft 47, 1985
- [11] Merz, H.A. und Schneider, Th.: «Who is afraid of Risk Criteria?». Hazard Prevention, Vol 1, 1987
- [12] Okrent, D.: «Comment on Societal Risk». Science, Vol. 208, 1980
- [13] SIA-Norm 160: «Einwirkungen auf Tragwerke», Entwurf SIA, April 1987
- [14] SIA-Norm 162: «Betonbauten», Entwurf SIA März 1987
- [15] Vrouwenvelder, T. und Siemes, T.: «Durability – a Probabilistic Approach». IABSE Periodica, Heft P-85, 1985
- [16] Baschung, M.: «Ungenügende Erneuerungsrate im Bauwesen». Neue Zürcher Zeitung, 28. Oktober 1986
- [17] Heinloth, K.: «Sind fossile Brennstoffe eine Alternative zu Kernenergie?», Nachschrift eines Referates vor der Naturforschenden Gesellschaft Zürich, Neue Zürcher Zeitung, 4. Februar 1987
- [18] Goodin, R.E.: «Uncertainty as an Excuse for Cheating Our Children: The Case of Nuclear Wastes». Policy Sciences, 10, 1978

gie nicht ertragen können, dann müssen wir auf diese Technologie verzichten. Das mag für Kernkraftwerke, je nach ihrem Standort und Konzept, zutreffen.

Der dritte Grund ist vielleicht der entscheidende: Risiko-Studien dieser Art müssen auch die langfristige Zukunft, die Zukunft der folgenden Generationen, einbeziehen. Und da versagen wir, indem wir die Merkmale einer nur unscharf erkennbaren Zukunft immer und immer wieder geringer werten als den deutlichen und bezifferbaren Nutzen in der Gegenwart. Der Spatz in der Hand ist uns lieber als die Taube auf dem Dach. Wir wollen nicht unnötigerweise heute auf etwas verzichten, was unsere Nachkommen möglicherweise morgen gar nicht brauchen. Wir machen uns die Symmetrie nicht bewusst, die in der Umkehrung dieses Satzes steckt, dass nämlich unsere Nachkommen morgen nicht mehr nutzen können, was wir unnötigerweise heute bereits verbraucht haben [19]. Wir müssen der Zukunft Möglichkeiten lassen.

Fossile Energie oder Kernkraft: das ist, so meine ich, zuallererst eine moralische Frage und erst in zweiter Linie

eine sicherheits-technische oder ökonomische. Das müssen wir erkennen und akzeptieren. Wir haben diese moralische Frage – fasziniert von den Möglichkeiten der Technik – bereits entschieden, ohne sie uns überhaupt bewusst zu stellen. Wir können diesen Entscheid – wenn wir das wollen – nur langsam, langfristig und schrittweise zurücknehmen. Was mit einem Weiterausbau der Kernenergie oder letztlich bei einem Verzicht auf Kernenergie auf uns zukommt, verdient eine tiefgreifende Diskussion, die das rationale, aber auch das emotionale Argument gelten lässt und achtet. Nur so kann der letztlich nötige Entscheid verantwortet werden.

Was ist zu tun?

Wir bemühen uns, den Bereich zwischen Sicherheit und Risiko rational zu sehen und sinnvoll zu bewältigen. Was rational erfassbar ist, müssen wir Ingenieure auch rational erfassen. Und da ist noch Raum für die Entwicklung neuer Gedankengänge und Methoden. Wir sollen allerdings skeptisch sein, wenn jemand ausdrücklich mit rationa-

len Argumenten kommt und mit eindeutigen Antworten. Die komplexe Wirklichkeit lässt eindeutige Antworten selten zu.

Eine Zukunft mit weniger Technik kann nicht sicherer sein. Technik, verantwortungsbewusst eingesetzte Technik, schafft Sicherheit. Wir Ingenieure tragen Verantwortung für den Einsatz der Technik. Unsere Entscheide können nicht immer richtig sein, auch mit besseren Theorien und unserem besten Willen nicht. Wenn unsere Entscheide allerdings das Lebensfreundliche fördern und das Lebensfeindliche hemmen, sind sie nicht falsch. Das kann ein Leitsatz sein. Wir müssen der Zukunft Möglichkeiten lassen.

Technik braucht, mehr noch als früher, den vielseitigen, den souveränen Men-

schen. Wir müssen die intelligente, die kreative, die interessierte Jugend wieder für die Technik begeistern. Allzu viele junge Menschen weichen auf die Naturwissenschaft, die Geisteswissenschaft und die Juristerei aus in der Meinung, Technik sei eine schmutzige Angelegenheit. Dieses Vorurteil müssen wir ausräumen.

Wir müssen schliesslich lernen, auch den emotionalen Standpunkt zu verstehen. Auch Angst, Furcht und Sorge, Hoffnung und Erwartung sind berechtigte Reaktionen des Menschen. In diesem Sinne erwartet die Gesellschaft von uns Ingenieuren «Sicherheit». Sie nimmt uns mit Recht von der emotionalen, von der moralischen Seite und ist angesichts von Bhopal, Tschernobyl und Schweizerhalle verunsichert und

geängstigt, hat das Vertrauen in uns verloren. Doch selbst dann, wenn wir uns in aller Ernsthaftigkeit um Sicherheit bemühen, ist «Risiko» in allem, was wir Ingenieure bieten. Dass dieses Risiko Sicherheit genug ist, dafür sind wir verantwortlich. Das Vertrauen der Gesellschaft, dass wir diese Verantwortung tragen können, müssen wir zurückgewinnen, indem wir uns mehr als bis heute auch den ethischen Fragen unserer Tätigkeit stellen.

Bisherige Artikel sind erschienen im «Schweizer Ingenieur und Architekt», Heft 15/88, Seiten 415-428

Adresse des Verfassers: Prof. Jörg Schneider, ETHZ, Institut für Baustatik und Konstruktion, 8093 Zürich.

Piezometer

Geber für Grundwassermessungen

Das Grundwasser hat als Trinkwasserreservoir grosse wirtschaftliche Bedeutung. Ob ein solches Reservoir nutzbar ist, hängt weitgehend von der Durchlässigkeit des Untergrundes ab. Bautechnisch kann das Grundwasser zu erheblichen Schwierigkeiten führen. In diesem Falle ist neben der Durchlässigkeit auch der Druck, den dieses Porenwasser aufweist, d. h. die Porenwasserspannung, wichtig.

Wurden früher zur Grundwassererkundung vorwiegend gelochte Rohre verwendet, braucht man zum Messen der Porenwasserspannungen punktuelle Geber. Es soll hier auch gezeigt werden, dass die alten Gasrohre kein taugliches Mittel zur Erfassung der Grundwasserverhältnisse sind.

Grundwasser als Potentialfeld

Jede Flüssigkeit, die der Schwere unterliegt, stellt in einem porösen, gesättigten Medium in ruhendem oder fliessenden

VON JACHEN HUDER,
ZÜRICH

dem Zustand ein Potentialfeld dar. Ist dieses Medium homogen und isotrop, kann das Feld relativ einfach berechnet werden, früher aufgrund der elektrischen Analogie, heute durch Grossrechner. Dazu werden die Spannungen von Punkt zu Punkt abgegriffen resp. für ein Punktenetz rechnerisch ermittelt. Daraus kann das Potentialfeld dargestellt werden. Es ist im homogenen, isotropen Raum unabhängig von der Durchlässigkeit des Mediums. Bei unterschiedlichen Durchlässigkeiten in den verschiedenen Richtungen sind deren Verhältnisse zueinander für die Veränderungen des Potentialbildes massgebend.

Nicht anders verhält sich das Grundwasser im homogenen, isotropen Boden oder Fels. Die Lösung dieses Problems ist das bekannte Strömungsnetz, das auch graphisch ermittelt werden kann. Das mathematisch einfache Modell – homogen und isotrop – mit den verschiedensten wohldefinierten Randbedingungen ist aber in der Natur nur in den seltensten Fällen gegeben. Gerade diese Randbedingungen spielen aber für die hydrologischen Verhältnisse im Baugrund eine wichtige Rolle.

Die Porenwasserdrücke haben einen entscheidenden Einfluss auf Böschungsstabilität, Bauausführung usw. Deren Missachtung ist Ursache für manchen Misserfolg.

In jedem Punkt ist das Potential gegeben durch die Gleichung:

$$h = z + u/\gamma_w + v^2/2g \quad (\text{Bild 1});$$

wobei z = Bezugshöhe zum Referenzhorizont, u/γ_w = Standrohrspiegelhöhe oder piezometrische Höhe, $v^2/2g$ = An-

teil der kinetischen Energie und γ_w = Raumgewicht des Wassers.

Der technische Ausdruck Piezometer wird hier analog dem englischen oder französischen Sprachgebrauch verwendet. Die genaue Übersetzung wäre Druckgeber für Porenwasser. Wesentlich dabei ist, dass die Ausbildung des Messgebers die Bedingungen, die an die Referenzzeit gestellt werden, erfüllt.

Bei laminarer Strömung ist der Anteil $v^2/2g$ sehr klein, in der Grössenordnung < 1 cm und kann vernachlässigt werden. Der Gradient i ist der Quotient der Potentialdifferenz Δh zweier Punkte zum Strömungsweg Δl , d. h. $i = \Delta h / \Delta l$. Die Potentialdifferenz verursacht die Strömung, der Potentialverlust wird als Strömungskraft S auf das Korngerüst übertragen und wirkt in Richtung der Strömung.

$$S = i \gamma_w \Delta l \Delta b l = \gamma_w \Delta h \Delta b l$$

oder pro Volumeneinheit:

$$s = S / \Delta V = i \gamma_w, \text{ der Strömungsdruck.}$$

Bild 1. Schematische Darstellung einer Stromröhre mit zwei Piezometern zur Erfassung des Potentialunterschiedes

