Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 104 (1986)

Heft: 14

Artikel: Zustandsuntersuchungen an Massivbauten - ein wichtiger Teil der Unterhaltsarbeiten

Autor: Ladner, Marc

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-76124

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 13.07.2025

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

Bestimmung der Bruchenergie des Betons eines gefährdeten Tragwerkes

Die im obigen Abschnitt skizzierte und in [5] ausführlich beschriebene Methode ist in erster Linie dafür gedacht, charakteristische Werte für Beton beliebiger Zusammensetzung zu liefern. In der Praxis kann es vorkommen, dass die Bruchenergie und der abfallende Ast der Dehnungserweichungsfunktion für einen Beton eines zu analysierenden Tragwerkes benötigt wird, dessen Zusammensetzung und Lagerungsbedingungen gar nicht hinreichend genau bekannt sind. Ein willkürlich herausgegriffenes Beispiel hierfür ist eine Talsperre, die durch Setzungen oder Erdbeben beschädigt wurde.

In diesem Fall können aus dem betreffenden Tragwerk Bohrkerne entnommen werden. Aus den Bohrkernen können im Labor Teile gesägt werden, die durch Anbetonieren zu dem im vorherigen Abschnitt gezeigten Biegebalken ergänzt werden können. Dieses Verfahren ist in Bild 6 verdeutlicht. Da in der gewählten Probengeometrie nur die Prozesszone hoch belastet ist, spielt die Qualität der anbetonierten Teile nur eine untergeordnete Rolle.

Auf diese Weise konnten bereits die notwendigen Materialkennwerte für wirklichkeitsnahe Analysen ermittelt werden. Ein Beispiel für einen Talsperrenbeton ist in Bild 7 gezeigt. Der Balken hatte in diesem Falle eine Höhe von 300 mm, eine Breite von 100 mm und eine Länge zwischen den Auflagern von 1450 mm.

Um die in Bild 7 mit Kreisen markierte Funktion berechnen zu können, ist es notwendig, aus dem gemessenen Kraft-Durchbiegungs-Diagramm (durchgezogene Linie) die Materialkennwerte zu ermitteln. Im gewählten Beispiel wurde die Bruchenergie mit Hilfe des oben erwähnten Moduls zu 233 N/m bestimmt. Das zugehörige Spannungs-Rissaufweitungs-Diagramm ist in Bild 8 gezeigt. Mit den in Bild 8 dargestellten Ergebnissen kann das Versagen eines Bauteiles wirklichkeitsnah vorhergesagt werden. Der so berechnete Verlauf ist zum Vergleich in Bild 7 mit Kreisen markiert eingetragen.

Folgerungen

Das neue Konzept zur Beschreibung des Bruchvorganges im Beton ist dem Werkstoff angepasster als die linear elastische Bruchmechanik. Bis heute sind allerdings noch nicht alle Einflüsse auf die Bruchenergie und die Dehnungserweichung hinreichend experimentell untersucht. Ausserdem können die Kennwerte noch nicht im voraus abgeschätzt werden, wenn etwa die Betonzusammensetzung bekannt ist. Die Daten können sinnvoll nur im Rahmen einer Tragwerksanalyse mit Hilfe finiter Elemente verwendet werden. Der neue Weg ist erfolgversprechend. Mehrere Einzelheiten müssen jedoch noch näher untersucht werden, bevor eine breitere Anwendung in Frage kommt.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *F.H. Wittmann*, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, ETH Lausanne.

Literatur

[1] *M.F. Koplan:* Crack Propagation und Fracture of Concrete, "J. ACI" *58*, 591-610 (1961)

[2] *S. Mindess:* The Cracking and Fracture of Concrete: An Annotated Bibliography 1928-1981 in "Fracture Mechanics of Concrete", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1983)

[3] *S. Mindess:* The Cracking and Fracture of Concrete: An Annotated Bibliography 1982-1985, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energy", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1986)

[4] *A. Hillerborg:* Analysis of one Simple Crack in "Fracture Mechanics of Concrete", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1983)

[5] RILEM Draft Recommendation (50-FMC), Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bend Tests on notched Beams, "Matériaux et Constructions" 18, 285-290 (1985)

[6] *P.E. Roelfstra* und *F.H. Wittmann:* Some Aspects of the Concept of Total Fracture Energy, in «Vorträge der 17. Sitzung des Arbeitskreises Bruchvorgänge», Herausgeb. Deutscher Verband für Materialprüfung, Berlin (1985)

[7] *P.E. Roelfstra* und *F.H. Wittmann:* Numerical Method to link Strain Softening with Failure of Concrete, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energy", Herausgeb. F.H. Wittmann, Elsevier Science Publishers, Amsterdam (1986)

[8] *P.E. Roelfstra* und *H. Sadouki:* Fracture Process in Numerical Concrete, erscheint in "Fracture Toughness and Fracture Energey" (siehe Ref. [7])

[9] *F.H. Wittmann, Yiun-Yuan Huang, P.E. Roelfstra, H. Mihashi, N. Nomura* und *Xin-Hua Zhang:* Influence of Age, Water-Cement Ratio, and Rate of Loading on Fracture Energy and Strain Softening of Concrete, erscheint in "Matériaux et Constructions" (1986)

Zustandsuntersuchungen an Massivbauten – ein wichtiger Teil der Unterhaltsarbeiten

Von Marc Ladner, Dübendorf

Die Erfassung des Zustandes eines Tragwerkes ist eine sehr komplexe Tätigkeit und verlangt ein grosses Wissen auf den Gebieten des Bauwerksentwurfes, der Statik, der Ausführung und der Materialwissenschaften. Im vorliegenden Beitrag wird daher versucht, die einzelnen Tätigkeiten etwas zu gliedern und Beurteilungskriterien aus den Befunden aufzuzeigen. Ausserdem wird ein Gedankenmodell für den Entscheidungsvorgang vorgestellt, das die Vorgehensweise anschaulich und übersichtlich widergibt und es darüber hinaus erst noch gestattet, den optimalen Weg zu ermitteln.

Einleitung

Bauwerke werden im allgemeinen so bemessen, dass ihre Tragfähigkeit genügend gross ist, so dass unter normaler Nutzung kein Einsturz zu befürchten ist. Um dieses Ziel zu erreichen, wird sowohl für jeden Bauteil für sich allein als auch für das Bauwerk als ganzes der Tragfähigkeitsnachweis geführt, der in der allgemein gültigen Form lautet [1]:

$$\frac{R}{\gamma_R} \geq S_d$$

wobei R = Widerstand
S_d = Bemessungswert der Einwirkungen
γ_R = Widerstandsfaktor.

Damit die Bauwerke aber nicht nur sicher gegen Einsturz sind, sondern auch die ihnen zugedachte Aufgabe erfüllen können, wird bei ihrer Bemessung auch der Gebrauchszustand untersucht. Hierbei wird beispielsweise nachgewiesen, dass keine zu grossen Verformungen entstehen, oder dass keine unerwünschten Schwingungen angeregt werden.

Wie die Erfahrung lehrt, können bei Einhaltung der in den einschlägigen Normen verankerten Anforderungen

bezüglich Trag- und Gebrauchsfähigkeit durchaus Bauwerke verwirklicht werden, die ihren Aufgaben gewachsen sind. Leider zeigt es sich aber immer deutlicher, dass trotz Einhaltung der Trag- und Gebrauchsfähigkeitsanforderungen nicht gleichzeitig auch die Forderung nach der Dauerhaftigkeit der Bauten erfüllt sein muss, so dass das Bedürfnis wächst, in Zukunft den beiden bis jetzt üblichen Nachweisen einen gleichwertigen dritten zur Seite zu stellen, der sich auf die Dauerhaftigkeit bezieht. Dabei könnte im Planungsstadium eines Bauwerkes dieser zusätzliche Nachweis grösstenteils darin bestehen, nachzuweisen, dass gewisse konstruktive Vorschriften eingehalten, und dass geeignete Materialien vorgeschrieben werden. Ausserdem muss dieser Nachweis aber auch durch eine entsprechend gute und vollständige Überwachung der verwendeten Materialien und der Ausführung geführt werden.

Je nach Dauerhaftigkeit eines Bauwerkes verändert sich sein Zustand im Laufe der Zeit. Deshalb muss dieser periodisch überwacht und analysiert werden, damit die ihm ursprünglich zugrunde gelegte Trag- und Gebrauchsfähigkeit während seiner ganzen Lebensdauer aufrecht erhalten bleibt, was letztlich Sinn und Zweck des Unterhaltes von Bauwerken sein sollte. Wie die Erfassung und Beurteilung dieses Zustandes in einer systematischen Art und Weise erfolgen könnte, dazu möchten die nachfolgenden Ausführungen einige Anregungen geben.

Zustandserfassung

Vereinfacht ausgedrückt kann die Zustandserfassung auf drei Niveaus erfolgen, welche sich etwa wie folgt umschreiben lassen:

a) die visuelle Inspektion

b) die visuelle Inspektion, ergänzt mit der Prüfung der am Bauwerk entnommenen Materialproben

c) wie unter Punkt b), wobei diese Arbeiten vervollständigt werden durch weitere, meist sehr umfangreiche Untersuchungen am Bauwerk, wie beispielsweise Öffnen von grösseren Beobachtungsfenstern, statische und/oder dynamische Belastungsversuche, Langzeitmessungen usw.

Es liegt auf der Hand, dass, sozusagen als Grundlage für diese Arbeiten, zuerst eine sorgfältige Überprüfung des Bauwerkes aufgrund der Bemessungs- und Ausführungsunterlagen zu erfolgen hat; denn es kommt immer wieder vor, dass infolge Nutzungsänderung (z.B. Erhöhung der Gebrauchslasten) einzelne Teile eines Bauwerkes schon rechnerisch den neuen Anforderungen nicht mehr zu genügen vermögen und daher verstärkt oder ersetzt werden müssen. Es ist wichtig, dass die mit der Zustandserfassung Beauftragten darüber orientiert sind, welche dieser beiden Varianten als mutmassliche Lösung im Vordergrund steht, damit sie bei ihren Arbeiten entweder die für die Ausarbeitung eines Verstärkungsprojektes notwendigen Daten am Bauwerk gleichzeitig mit der Zustandsaufnahme erheben können, oder aber damit nicht unnötigerweise viel Zeit in die Zustandserfassung eines Bauteils investiert wird, dessen Abbruch schon im voraus feststeht.

Ausgerüstet mit diesen Grundlagen kann man nun mit den eigentlichen Zustandserfassungsarbeiten beginnen. Dabei spielt es zunächst einmal keine Rolle, auf welchem der oben erwähnten Niveaus man einsteigt; auf diese Frage wird weiter unten im Abschnitt «Entscheidungsmodell» näher eingegangen. Fest steht jedoch, dass man, falls nicht auf dem Niveau 1 begonnen wird, alle diejenigen Arbeiten, die schon auf einem früheren Niveau durchzuführen vorgesehen waren, zu Beginn der Arbeiten nachholen muss. Umgekehrt sind, wenn von einem tieferen auf ein höheres Niveau vorgerückt werden muss, nur noch die für das höhere Niveau spezifischen Arbeiten vorzunehmen.

Visuelle Inspektion

Die visuelle Inspektion umfasst die genaue Aufnahme sämtlicher an allen zugänglichen Stellen feststellbarer Schäden und Mängel sowie deren Protokollierung und Vermassung. Zu diesen Schadensbildern gehören bei Massivbauten in erster Linie alle Kiesnester, Betonabplatzungen, Feucht- und/oder Roststellen sowie unter Umständen auch Risse. Obwohl nicht jeder Riss in einem Stahl- oder Spannbetonbauwerk notgedrungenerweise ein Schaden oder Mangel zu sein braucht, ist es trotzdem notwendig, alle Risse ihrem Verlauf und ihrer Breite nach festzuhalten, um so allfällige Veränderungen des Rissbildes, ihrer Breite und Anzahl von einer Beobachtungsperiode zur anderen verfolgen zu können, was als wertvolles Mittel bei der Beurteilung des Langzeitverhaltens eines Bauwerkes eingesetzt werden kann. Überdies gehören zu diesen Beobachtungen am Bauwerk auch Hinweise über Bewegungsmöglichkeiten und Zustand von Lagern und Fugen.

Die Feststellungen sind in einen Plan einzutragen, möglichst mit einem Kennzeichen zu versehen, zu vermessen und zu datieren. Gleichzeitig kann zur Ergänzung eine Foto gemacht werden, wobei man mit Vorteil das Kennzeichen und das Datum auf eine Tafel schreibt und diese mitfotografiert. Ein Kurzkommentar zum festgestellten Schaden, ergänzt mit einer subjektiven Grobbeurteilung (unbedeutend - mässig - schlimm) runden das Protokoll der visuellen Inspektion ab.

Obwohl es auf diesem Niveau der Zustandserfassung nicht vorgesehen ist, eigentliche Materialuntersuchungen vorzunehmen, ist es doch sehr wünschenswert, die einfachsten Prüfungen wie stichprobenartige Überprüfung der Gleichmässigkeit der Betonqualität mit dem Betonhammer oder jene der Betonkarbonatisierungstiefe schon hier durchzuführen.

Materialuntersuchungen

Die eigentlichen Routinematerialuntersuchungen sind Gegenstand des zweiten Zustandserfassungsniveaus. Dazu gehören insbesondere die Entnahme von Betonproben zur Ermittlung des Chloridgehaltes in verschiedenen Tiefen und das Herausbohren von Betonzylindern zur Bestimmung der Betondruckfestigkeiten. Gleichzeitig kann damit auch stichprobenartig die Messung der Betonüberdeckung und der Bewehrungsstabdurchmesser verbunden werden; für eine systematischere Erfassung dieser Grössen eignen sich hingegen Sondierschlitze besser.

Liegen genügend viele einzelne Betonkernbohrungen vor, dann lassen sich an diesen Zylindern auch noch weitere Untersuchungen wie die Bestimmung des Zement- und des Porengehaltes sowie die Frostbeständigkeit vornehmen. Auch können Abklärungen bezüglich der Zementhydratation und der Ettringitbildung sowie weiterer Grössen durchgeführt werden [2], welche oft wertvolle Hinweise über den Zustand des Betons im Bauwerk geben. Allerdings ist zu beachten, dass diese an sich zwar sehr genauen Aussagen nur gerade für die Stellen im Bauwerk Gültigkeit haben, an der die Proben entnommen worden sind; sie sind daher nicht ohne weiteres auf das ganze Bauwerk übertragbar.

Auch der Stahlbewehrung können Proben entnommen werden; dies gilt für die schlaffe Bewehrung so gut wie für die Spannbewehrung, obwohl es bei der letztgenannten sehr viel seltener vorkommt. An diesen Proben können sowohl die Festigkeitseigenschaften und die Verformungsfähigkeiten als auch der allgemeine Zustand abgeklärt werden. Hier dürfte vor allem auch die Korrosionsformen (flächenhafte Kor-

rosion oder Lochfrass) und das Korrosionsstadium (beginnend oder fortgeschritten) von Interesse sein, da beispielsweise auch bei Spannstahl eine leichte, flächenhaft auftretende Korrosion kaum eine Qualitätsverminderung, weder unter statischer noch unter Ermüdungsbeanspruchung, darstellt, während die durch Lochfrass erzeugten Narben und Kerben eine markante Festigkeitseinbusse bei statischer und insbesondere auch bei Ermüdungsbeanspruchung bewirken [3], [4].

Selbstverständlich sind auch noch weitere Untersuchungen an diesen sowie auch an allen anderen, im Bauwerk verwendeten Materialien denkbar und gegebenenfalls auch notwendig. Wie weit hier die Untersuchungen zu treiben sind, muss jeweils von Fall zu Fall festgelegt werden.

Zustandserfassungsniveau	*Eigenschaft*		
	Tragfähigkeit	*Gebrauchsfähigkeit*	*Dauerhaftigkeit*
Inspektion	Risse, Stauchungen, Ausknicken, Ausbeulen	Risse, Verformungen, Bewegungen, Bewegungsmöglichkeiten	Risse, Kiesnester, feuchte Stellen, Versinterungen, Stalaktitbildung
Materialprüfung	Festigkeit, Verformbarkeit, Ermüdungsfestigkeit, Korrosion	Abnutzung, Verfärbung, Gleit- und Haftreibungsbeiwert z.B. bei Lagern	Korrosion, Karbonatisierung, Chloridgehalt, Porengehalt, Frostbeständigkeit
Umfassende Bauwerksuntersuchung	Ausfall von Spannkabeln, grosse bleibende Verformungen	Verformungen, Schwingungen	Korrosionsformen, Schwinggeschwindigkeiten

Tabelle 1. Beispiele von Befunden als Beurteilungskriterien

Tabelle 2. Angenommene Kosten für Massnahmen und Untersuchungen

Bezeichnung	*Wert kFr.*
Massnahmen:	
Nichtstun KM (i,j,l)	0
Behebung kleinerer unbedeutender Mängel KM (i,j,2)	15
Verstärken, Sanieren KM (i,j,3)	75
Abbruch, Neubau KM (i,j,4)	3500
Untersuchungen:	
Voruntersuchung KU (0,0,1)	25
Visuelle Inspektion KU (1,2,1)	30
Visuelle Insepktion mit Materialprüfung KU (1,2,2)	50
Visuelle Inspektion, Materialprüfung und weitere Untersuchungen KU (1,2,3)	80
Materialprüfung KU (2,2,2)	35
Materialprüfung mit weiteren Untersuchungen KU (2,2,3)	65
Ergänzende Untersuchungen KU(2,5,3)	40
Ergänzende Untersuchungen KU(3,2,3)	40
Folgekosten:	
Aus Massnahme M(i,j,k): KF(i,j,k,1): gutes Bauwerksverhalten:	0
KF(i,j,k,2): Verlust der Gebrauchsfähigkeit:	250
KF(i,j,k,3): Verlust der Tragfähigkeit:	3500

Umfassende Untersuchung

Wenn die bisherigen Untersuchungen über den Bauwerkszustand zu wenig aufschlussreich waren, so dass immer noch keine eindeutige Beurteilung möglich erscheint, dann müssen so lange weitere Abklärungen vorgenommen werden, bis eine Entscheidung getroffen werden kann. Dazu gehören unter anderem das Erstellen von grösseren Beobachtungsöffnungen, der Einsatz von aufwendigen Untersuchungsgeräten, das Durchführen von statischen und/oder dynamischen Belastungsversuchen oder das Anordnen von Verformungsmessungen am Bauwerk, um so sein Langzeitverhalten oder Änderungen in diesem erfassen zu können.

Das Herstellen von grossen Beobachtungsöffnungen gestattet es, die bei kleinen Sondieröffnungen oder an einzelnen Probekörpern festgestellten Befunde auf grossflächige Räume auszudehnen. Sie werden aber nur dann benötigt, wenn der genaue Zustand über eine gewisse Bauwerkszone für deren Beurteilung absolut erforderlich ist, wie das etwa zur genauen Abklärung des Zustandes der Spannbewehrung nötig sein kann. Dass bei dieser Gelegenheit auch noch gerade alle anderen notwendigen und sich gleichsam anbietenden Untersuchungen vorgenommen werden, dürfte eine Selbstverständlichkeit sein.

Der Einsatz besonders aufwendiger Untersuchungsmethoden, wie beispielsweise jene der Gammagraphie bzw. der Gammaskopie, ist sicher nur dort gerechtfertigt, wo auch eine gewisse Erfolgsaussicht besteht, hiermit bessere Angaben über den Bauwerkszustand zu erhalten.

Ein wirklichkeitsnahes Bild über das tatsächliche Verhalten und damit über den Zustand eines Tragwerkes liefern gezielt durchgeführte und instrumentierte Belastungsversuche mit statisch oder rollend aufgebrachten Lasten. Dieses verhältnismässig aufwendige Verfahren erlaubt es sich eine gute Vorstellung über die wirkliche Arbeitsweise eines Bauwerkes zu verschaffen. Obwohl damit zwar nur in Ausnahmefällen eine direkte Aussage über die Grösse der wirklichen Traglast bzw. Tragsicherheit eines Bauwerkes gemacht werden kann, lässt sich aber mit diesen Untersuchungsverfahren wenigstens die Gebrauchsfähigkeitsgrenze bestimmen, wenn die Lasten stufenweise erhöht und Zwischenentlastungen mit Verforumungsmessungen durchgeführt werden [5]. Sobald nach einer Entlastung deutliche irreversible Verformungen beobachtet werden, dann ist anzunehmen, dass die unmittelbar vor dieser Entlastung auf das Bauwerk einwirkende Belastung schon über der vom ihm wirklich ertragbaren Gebrauchslast gelegen hat. Ausserdem können bei periodischer Wiederholung von Belastungsversuchen allfällige Veränderungen im Verhalten des Bauwerkes erkannt werden; diese sind umso aussagekräftiger, wenn eine solche Messung auch schon im Neuzustand, also bei Inbetriebnahme des Bauwerkes, vorgenommen worden ist.

Auch Langzeitmessungen am Bauwerk liefern interessante Aufschlüsse über dessen Verhalten. Hier sind es insbesondere die signifikanten Veränderungen der Verformungsgeschwindigkeiten, die wertvolle Hinweise für bevorstehende Veränderungen geben können.

Schliesslich ist jede Art von Untersuchung, die zur Klärung des Zustandes eines Bauwerkes beitragen kann, auf diesem Untersuchungsniveau durchzuführen.

Folgerungen aus den Zustandsuntersuchungen

Wiederum vereinfachend wird davon ausgegangen, dass es nur drei von einander grundsätzlich verschiedene Folgerungen aus den Ergebnissen der Zustandsuntersuchungen abzuleiten gibt, nämlich:

a) das Bauwerk bzw. seine einzelnen Teile sind in einem guten Zustand;

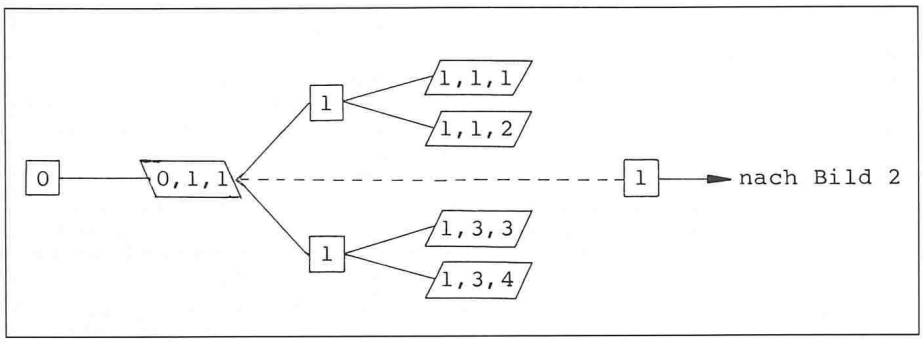


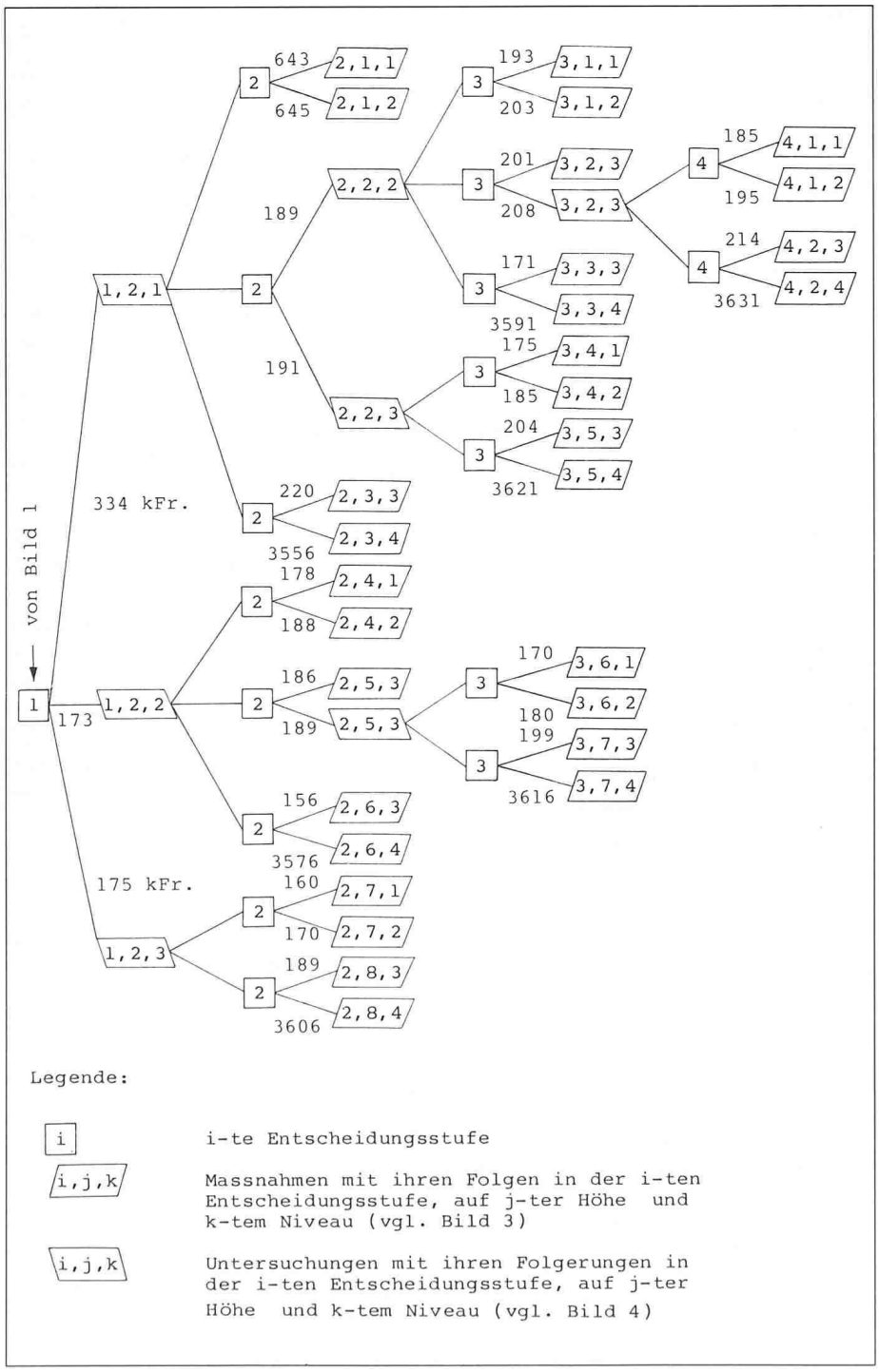
Bild 1. Entscheidungsmodell für Voruntersuchung Legende: siehe Bild 2

b) die Ergebnisse sind nicht eindeutig, so dass daraus noch keine Schlüsse gezogen werden können;

c) das Bauwerk bzw. seine einzelnen Teile sind in einem schlechtem Zustand.

Aus der ersten und insbesondere aus der dritten dieser Folgerungen ergibt sich beinahe zwangsläufig, dass gewisse Massnahmen am Bauwerk getroffen werden müssen, während die zweite Folgerung nach einer weiteren Untersuchung ruft, die nun aber auf einem höheren Niveau durchgeführt werden muss.

Bild 2. Entscheidungsmodell für die Zustandserfassung von Massivbauwerken. Bei jeder Entscheidung ist angegeben, mit welchen mutmasslichen Kosten (in kFr.) zu rechnen ist.



Beurteilungskriterien

Um die Beurteilung eines Bauwerkes bezüglich seiner Trag- und Gebrauchsfähigkeit sowie seiner Dauerhaftigkeit vornehmen zu können, sind umfassende Kenntnisse sowohl über die Einwirkungen und die sich daraus ergebenden Bauwerksbeanspruchungen als auch über das Materialverhalten eine notwendige Voraussetzung.

Für die Abschätzung der Tragwerksbeanspruchungen aus den äusseren Einwirkungen steht in erster Linie die Statik als geeignetes Hilfsmittel zur Verfügung. Damit werden die aus den äusseren Kräften, aus ungleichmässigen Setzungen, aus Temperaturänderungen oder aus Vorspannung entstehenden Schnittkräfte bestimmt. Daneben sind aber auch noch andere Einwirkungen auf das Bauwerk, wie beispielsweise chemisch aggressive Agenzien, zu berücksichtigen [6].

Die Beurteilung der Materialien bezüglich ihres Zustandes und bezüglich ihres Verhaltens im Bauwerk im Verlauf von dessen weiteren Betriebszeit erheischt eine grosse Erfahrung auf dem Gebiet der Materialwissenschaften. Während sich die klassische Materialprüfung hauptsächlich damit beschäftigt, eine Materialeigenschaft unter genau definierten Randbedingungen oder die Veränderung dieser Eigenschaft unter genau vorgegebener Variation eines oder mehrerer Versuchsparameter zu bestimmen, liegt im Falle der Beurteilung des Materials aus einem Bauwerk genau die umgekehrte Situation vor, indem hier zwar das Verhalten des Materials bekannt ist, die genauen Bedingungen aber, die zu diesem Materialverhalten geführt haben, lassen sich nur in Ausnahmefällen präzise angeben!

Abhängig vom Niveau, auf welchem die Zustandserfassung durchgeführt wird, und ebenfalls abhängig von der Eigenschaft, die beurteilt werden soll,

können beispielsweise die in Tabelle 1 angegebenen Befunde als Beurteilungskriterien beigezogen werden.

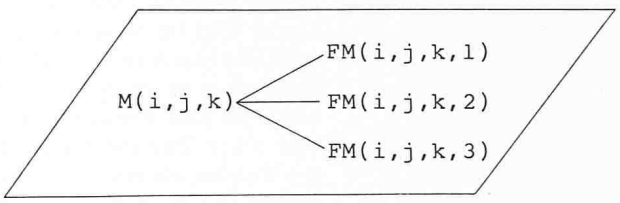
Da es hier nicht möglich ist, auf alle Befunde im einzelnen einzutreten, soll stellvertretend für alle anderen am Beispiel der Risse gezeigt werden, wie diese zur Beurteilung des Tragwerkszustandes herangezogen werden können.

Risse in Stahl- oder Spannbetonkonstruktionen können ganz verschiedene Ursachen haben. So können Risse schon in einem sehr jungen Alter des Betons infolge ungeeigneter oder schlechter Nachbehandlung durch Schwinden auftreten; Schwindrisse können sich aber auch durch unterschiedliches Austrocknen des Betons über den Querschnitt vor allem dann bilden, wenn die Abmessungen des Querschnittes stark veränderlich sind. Infolge äusserer Belastungen oder Zwängungen können im weiteren in der Biegezugzone Risse entstehen, wenn die vorhandene Beton-Biegezugfestigkeit kleiner ist als die dort wirkende Zugspannung. Auch öffnen sich mitunter Risse hinter oder in der unmittelbaren Umgebung von konzentrierten Krafteinleitungsstellen, welche durch das örtliche Spannungsfeld (Spaltzugkräfte hinter der Ankerplatte von Spannkabeln!) hervorgerufen werden. Im Bereich von Auflagern oder bei Stützen in Flachdecken können Schub- oder Durchstanzrisse entstehen. Schliesslich können sich auch Risse längs der Bewehrungsstäbe ausbilden, wenn diese zu rosten beginnen und daher den Beton aufsprengen. Diese durch Rosten der Bewehrung bedingten Risse sind allerdings nicht zu verwechseln mit jenen Rissen im Bereich von Bewehrungsstabenden, die meistens in Gruppen und zur Stabachse leicht geneigt verlaufend auftreten; diese Rissart deutet vielmehr auf einen Verankerungsbruch der Bewehrung hin.

Es ist nun ganz klar, dass die Auswirkungen dieser verschiedenen Rissarten auf das Bauwerk für jede von ihnen eine ganz besondere ist und daher auch besonders beurteilt werden muss. So können Schubrisse und ganz besonders Durchstanzrisse schon deutliche Zeichen dafür sein, dass die Tragfähigkeit des Bauwerkes in Gefahr ist. Schwind- und Biegerisse können hingegen sowohl die Gebrauchsfähigkeit – wenn damit nämlich die Dichtigkeit eines Baus nicht mehr gewährleistet ist – wie auch seine Dauerhaftigkeit in Frage stellen.

Massnahmen aus den Folgerungen

Schliesslich sollen noch kurz die Massnahmen erläutert werden, die sich aus

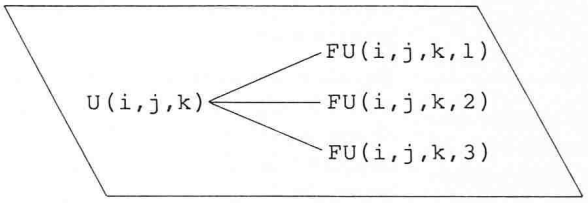


M(i,j,k) = Massnahme in der i-ten Entscheidungsstufe auf der Höhe j und auf dem Niveau k

FM(i,j,k,m) = Folge der Massnahme M(i,j,k) vom Typ m
mit m = 1: Bauwerk verhält sich gut
m = 2: Bauwerk verliert Gebrauchsfähigkeit
m = 3: Bauwerk verliert Tragfähigkeit

Bild 3. Massnahmen und ihre Folgen

Bild 4. Untersuchungen mit ihren daraus abgeleiteten Folgerungen



U(i,j,k) = Untersuchung in der i-ten Entscheidungsstufe auf der Höhe j und auf dem Niveau k

FU(i,j,k,m) = Folgerungen aus der Untersuchung U(i,j,k) vom Typ m, mit
m = 1: Bauwerk scheint in Ordnung zu sein
m = 2: keine klare Folgerung möglich (k = 3)
m = 3: Bauwerk scheint defekt zu sein

Tabelle 3. Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Folgen aus Massnahmen

PFM(2,1,1,1) = 0.60
PFM(2,1,1,2) = 0.25
PFM(2,1,1,3) = 0.15

PFM(2,1,2,1) = 0.65
PFM(2,1,2,2) = 0.20
PFM(2,1,2,3) = 0.15

PFM(2,3,3,1) = 0.90
PFM(2,3,3,2) = 0.08
PFM(2,3,3,3) = 0.02

PFM(2,3,4,1) = PFM(2,6,4,1) = PFM(3,3,4,1) = 0.9990
PFM(2,3,4,2) = PFM(2,6,4,2) = PFM(3,3,4,2) = 0.0009
PFM(2,3,4,3) = PFM(2,6,4,3) = PFM(3,3,4,3) = 0.0001

PFM(2,4,1,1) = PFM(3,1,1,1) = 0.85
PFM(2,4,1,2) = PFM(3,1,1,2) = 0.13
PFM(2,4,1,3) = PFM(3,1,1,3) = 0.02

PFM(2,4,2,1) = PFM(3,1,2,1) = 0.87
PFM(2,4,2,2) = PFM(3,1,2,2) = 0.11
PFM(2,4,2,3) = PFM(3,1,2,3) = 0.02

PFM(2,5,3,1) = PFM(3,2,3,1) = 0.920
PFM(2,5,3,2) = PFM(3,2,3,2) = 0.075
PFM(2,5,3,3) = PFM(3,2,3,3) = 0.005

PFM(2,6,3,1) = PFM(3,3,3,1) = 0.988
PFM(2,6,3,2) = PFM(3,3,3,2) = 0.011
PFM(2,6,3,3) = PFM(3,3,3,3) = 0.001

PFM(2,7,1,1) = PFM(3,4,1,1) = PFM(3,6,1,1) = PFM(4,1,1,1) = 0.910
PFM(2,7,1,2) = PFM(3,4,1,2) = PFM(3,6,1,2) = PFM(4,1,1,2) = 0.080
PFM(2,7,1,3) = PFM(3,4,1,3) = PFM(3,6,1,3) = PFM(4,1,1,3) = 0.010

PFM(2,7,2,1) = PFM(3,4,2,1) = PFM(3,6,2,1) = PFM(4,1,2,1) = 0.930
PFM(2,7,2,2) = PFM(3,4,2,2) = PFM(3,6,2,2) = PFM(4,1,2,2) = 0.060
PFM(2,7,2,3) = PFM(3,4,2,3) = PFM(3,6,2,3) = PFM(4,1,2,3) = 0.010

PFM(2,8,3,1) = PFM(3,5,3,1) = PFM(3,7,3,1) = PFM(4,2,3,1) = 0.990
PFM(2,8,3,2) = PFM(3,5,3,2) = PFM(3,7,3,2) = PFM(4,2,3,2) = 0.008
PFM(2,8,3,3) = PFM(3,5,3,3) = PFM(3,7,3,3) = PFM(4,2,3,3) = 0.002

PFM(2,8,4,1) = PFM(3,5,4,1) = PFM(3,7,4,1) = PFM(4,2,4,1) = 0.9990
PFM(2,8,4,2) = PFM(3,5,4,2) = PFM(3,7,4,2) = PFM(4,2,4,2) = 0.0009
PFM(2,8,4,3) = PFM(3,5,4,3) = PFM(3,7,4,3) = PFM(4,2,4,3) = 0.0001

den Untersuchungsergebnissen und deren Folgerungen für das Bauwerk ergeben.

Wird aufgrund der vorliegenden Untersuchungsergebnisse der Zustand des Bauwerks als gut beurteilt, dann besteht kein Grund dafür, grössere Arbeiten vorzunehmen; die Massnahmen «Nichtstun» zw. «Behebung kleinerer unbedeutender Mängel» dürften in diesem Falle wohl die richtigen sein.

Ist der Bauwerkszustand hingegen schlecht, dann lauten die zu treffenden Massnahmen notgedrungenerweise entweder «Verstärken, Sanieren» oder im Extremfall sogar «Abbruch, Ersatz, Neubau».

Entscheidungsmodell

Die hier beschriebenen Vorgänge lassen sich einfach und übersichtlich in einem Gedankenmodell zusammenfassen [7], [8], [9], welches in den Bildern 1 bis 4 dargestellt ist und nachfolgend noch kurz erläutert werden soll.

Dieses Modell besteht im wesentlichen darin, dass verschiedene Entscheidungsstufen aneinander gereiht werden, wobei grundsätzlich vor jeder Entscheidung eine Untersuchung durchgeführt wird; der Entscheidung folgt dann entweder eine Massnahme oder eine weitere, genauere Untersuchung. Das bedeutet somit, dass man sich bei Entscheidungen immer auf konkrete Ergebnisse aus Untersuchungen stützen kann; erst dann werden Massnahmen ergriffen. Sollten es die vorliegenden Ergebnisse jedoch noch nicht erlauben, eindeutige Schlüsse über den Bauwerkszustand zu ziehen, dann entschliesst man sich für das Durchführen von weiteren Untersuchungen.

Gemäss diesem Modell wird zu Beginn eine Voruntersuchung vorgenommen, welche im Bild 1 mit U (0,1,1) bezeichnet ist und im wesentlichen darin besteht, die Statik und die Bemessung des Bauwerkes zu überprüfen. Dies gilt sowohl für alte Bauwerke, die das erste Mal einer Zustandskontrolle unterzogen werden, als auch für neue, wobei in diesem Falle natürlich die Ausführungsstatik bzw. deren Kontrolle durch den Prüfstatiker anstelle dieser Nachprüfung tritt. Bei neuen Bauwerken wird aus diesen Untersuchungen normalerweise gefolgert werden können, dass das Bauwerk den Anforderungen genügt bzw. dass es nicht genügt. Dementsprechend ist zu entscheiden, welche der vier möglichen Massnahmen «Nichtstun», «Beheben kleinerer unbedeutender Mängel», «Verstärken, Sanieren» bzw. «Ersetzen, Neuerstellen» getroffen werden soll.

Bei alten Bauwerken schliesst sich hier nun die eigentliche Zustandsuntersuchung an (Bild 2), sofern nicht schon aufgrund der Voruntersuchung ein Abbruch des Tragwerkes entschieden wurde. Die Zustandsaufnahme beginnt wiederum mit einer Untersuchung, die entweder auf dem Niveau 1, 2 oder 3 vorzunehmen ist. Je nach gewähltem Niveau und je nach Befund werden Folgerungen abgeleitet, aufgrund derer man sich für eine bestimmte Massnahme oder aber für das Weiteruntersuchen entscheiden kann. Im letzten Fall wird dieser Vorgang so lange wiederholt, bis schliesslich eine Massnahme angeordnet werden kann.

Im Modell sollen allgemein für die Massnahmen, unabhängig von der Entscheidungsstufe i und von der Höhe j, folgenden Bezeichnungen gelten:

M(i,j,1) = Nichtstun
M(i,j,2) = Beheben kleiner unbedeutender Mängel
M(i,j,3) = Verstärken, Sanieren
M(i,j,4) = Ersatz, Abbruch, Neubau.

Jede der getroffenen Massnahmen zieht selbstverständlich auch entsprechende Folgen nach sich, welche, wiederum allgemein, folgendermassen umschrieben werden können:

FM(i,j,k,1) = Bauwerk verhält sich wie erwartet gut
FM(i,j,k,2) = Bauwerk wird gebrauchsunfähig
FM(i,j,k,3) = Bauwerk verliert Tragfähigkeit und wird einsturzgefährdet.

Diese sich aus den Massnahmen möglicherweise ergebenden Folgen sind selbstverständlich beim Entscheidungsprozess gebührend zu berücksichtigen.

Sollte man sich aber - bei Neubauten wegen Schwierigkeiten, die sich während der Bauausführung ergeben haben, oder, bei alten Bauten, wegen Unklarheiten über deren effektiven Zustand - dazu entschliessen, Abklärungen am Bauwerk selber vorzunehmen, dann muss eine Untersuchung angeordnet werden. Dabei hat man sich für das Niveau, auf welchem diese Untersuchung durchzuführen ist, zu entscheiden. Zur Auswahl stehen, wie erwähnt, die drei Niveau «Visuelle Inspektion», «Materialprüfung» und «Umfassende Bauwerksprüfung»; im Modell sollen sie, wiederum unabhängig von der Entscheidungsstufe i und von der Höhe j, die zusätzlichen Indices 1, 2 und 3 erhalten und lauten dann:

U(i,j,1) = Visuelle Inspektion
U(i,j,2) = Materialprüfung
U(i,j,3) = Umfassende Bauwerksprüfung.

Nach Durchführung der Untersuchungen und nach Analyse der dabei gewonnenen Erkenntnisse sind Folgerungen abzuleiten, die, ebenfalls allgemein, wie folgt bezeichnet werden sollen:

FU(i,j,k,1) = Ergebnis ist eindeutig und lässt darauf schliessen, dass das Bauwerk

Tabelle 4. Wahrscheinlichkeiten für das Eintreten von Folgerungen aus Untersuchungen

PFU(1,2,1,1) = 0.30
PFU(1,2,1,2) = 0.40
PFU(1,2,1,3) = 0.30
PFU(1,2,2,1) = 0.33
PFU(1,2,2,2) = 0.34
PFU(1,2,2,3) = 0.33
PFU(1,2,3,1) = 0.50
PFU(1,2,3,3) = 0.50
PFU(2,2,2,1) = 0.25
PFU(2,2,2,2) = 0.40
PFU(2,2,2,3) = 0.35
PFU(2,2,3,1) = 0.45
PFU(2,2,3,3) = 0.55
PFU(2,5,3,1) = 0.35
PFU(2,5,3,3) = 0.65
PFU(3,2,3,1) = 0.20
PFU(3,2,3,3) = 0.80

Literatur

[1] Norm SIA 162, Vernehmlassungsentwurf 1985

[2] *Springenschmid, R.; Volkwein, A.:* Ursachen und Folgen einer Ettringit-Anreicherung in Beton und Spannkanal. In: Auffinden und Bewerten von Schäden an Massivbrücken, Grazer Kongress 21.06.83. Technische Universität Graz

[3] *Jungwirth, D.:* Einfluss von Korrosionsschäden auf die Spannstahleigenschaften. In: Auffinden und Bewerten von Schäden an Massivbrücken, Grazer Kongress 21.06.83. Technische Universität Graz

[4] *Neubert, B.; Nürnberger, U.:* Einflüsse von Korrosionseffekten auf die Gebrauchseigenschaften von Spannstählen. In: Auffinden und Bewerten von Schäden an Massivbrücken, Grazer Kongress 21.06.83. Technische Universität Graz

[5] *Ladner, M.:* In-situ Load Testing of Concrete Bridges in Switzerland. American Concrete Institute, Fall Convention 1984 New York (ACI SP-88, 1985)

[6] Korrosion von Stählen im Bauwesen. Referate der SIA-Studientagung vom 12. November 1985, Zürich. SIA-Dokumentationsband Nr. 98 (1985)

[7] *Warner, R.F.; Dandy, G.C.:* Multistage Decision Models for Assessment of Structural Defects. IABSE Proceedings P-83/85 (1985)

[8] *Poineau, D.:* Diagnostic et processus de decision. CEB, Bulletin d'information No. 163 (1984)

[9] *Shirole, A.M.; Hill, J.J.:* Decision making system for Bridge Rehabilitation or Replacement. Colloque international sur la gestion des ouvrages d'art. Bruxelles-Paris (1981) Vol. III, p. 219/230

[10] *Bühlmann, H.; Loeffel, H.; Nievergelt, E.:* Entscheidungs- und Spieltheorie. Springer Berlin-Heidelberg-New York (1975)

intakt ist
FU(i,j,k,2) = Ergebnis ist nicht eindeutig
FU(i,j,k,3) = Ergebnis ist eindeutig und führt zum Schluss, dass das Bauwerk ungenügend ist.

Zu bemerken ist noch, dass auf dem Niveau k = 3 selbstverständlich so lange untersucht werden muss, bis eine der Folgerungen FU(i,j,k,1) oder FU(i,j,k,3) auftritt (Bild 4).

Damit sind nun die einzelnen Teile des Gedankenmodelles erklärt, und anhand der Darstellungen in den Bildern 1 bis 4 kann der Ablauf der Entscheidungsvorgänge leicht nachvollzogen werden.

Zum Schluss bleibt noch die Frage zu beantworten, welcher der möglichen Wege der beste sei. Dazu muss zuerst geklärt werden, welches Kriterium hierfür herangezogen werden soll. Wie wohl nicht anders zu erwarten, scheint jener Weg der beste zu sein, welcher die kleinsten mutmasslichen Kosten verursacht.

Um nun diesen optimalen Weg zu finden, müssen die einzelnen Untersuchungen, Massnahmen und Folgen mit ihren zugehörigen Kosten versehen werden:

KU(i,j,k) = Kosten der Untersuchungen
KM(i,j,k) = Kosten der Massnahmen
KF(i,j,k,m) = Kosten der Folgen aus den Massnahmen.

Ausserdem sind für das Eintreten der möglichen Folgen aus den Massnahmen und für jenes der möglichen Folgerungen aus den Untersuchungen noch Wahrscheinlichkeiten anzunehmen:

PFU(i,j,k,m) = Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer bestimmten Folgerung aus einer Untersuchung
PFM(i,j,k,m) = Wahrscheinlichkeit für das Eintreten einer bestimmten Folge aus einer Massnahme.

Damit lässt sich nun mit Hilfe der Entscheidungstheorie der optimale Weg, der die kleinsten Kosten verursachen sollte, im voraus berechnen [10].

Ein einfaches Beispiel, welchem die in Tabelle 2 angegebenen Kosten und die in den Tabellen 3 und 4 aufgeführten a-priori-Wahrscheinlichkeiten PFU(i,j,k,m) und PFM(i,j,k,m) zugrunde gelegt sind, zeigt die Anwendung dieses Modells in der Praxis. Wie die in Bild 2 ebenfalls eingetragene Analyse ergibt, ist es unter diesen Voraussetzungen gleichgültig, ob die Untersuchungen auf dem Niveau 2 oder 3 begonnen werden, da die Erwartungswerte für die Kosten bei Start auf Niveau 2 mit 173 kFr. nur unwesentlich von jenen bei Start auf Niveau 3, welche mit 175 kFr. errechnet worden sind, abweichen; zur besseren Unterscheidung dieser beiden Wege müssten genauere Analysen gemacht werden. Mit einem deutlich höhereren Kostenaufwand, nämlich mit 334 kFr., ist hingegen dann zu rechnen, wenn mit den Untersuchungen auf dem Niveau 1 begonnen würde.

Adresse des Verfassers: Dr. *M. Ladner*, EMPA, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf.

Randbemerkungen zur Betonschadens-Diskussion

Von Dr. H. Eichenberger, Zürich

Grundsätzliches

Bauschäden sind für Juristen Vermögensminderungen an Geld und Gut. Die Schadenshöhe ergibt sich in der Regel aus der Differenz zwischen gegenwärtig geschädigtem Zustand einzelner Bauten und ihrer Erhaltung ohne Schädigung im Blick auf bestimmte Funktionen. Kleine Mängel als Ursachen können grosse Schädigungen hervorrufen. Im Falle Uster führte eine eng begrenzte Stahlbügel-Korrosion zum Tode junger Menschen und damit auch zu unersetzlich hohem *tort morale*! Reine Sachschäden können sich zudem mittelbar und objektiv bis subjektiv höchst unterschiedlich auswirken, je nachdem, ob z.B. die Benützung oder der Betrieb eingestellt, zudem ein minderbemittelter Bauherr oder der Bund/Kanton betroffen ist. Setzt man die Höhe der Betonschäden der letzten Jahre ins Verhältnis zur gesamten schweizerischen Wohnsubstanz, so zeigt sich die Relativität dieser Schadensereignisse. Die 1,1 Mio Wohnbauten der eidgenössischen Volkszählung 1980 mit rund 3 Mio Wohnungen erreichen heute Wiederbeschaffungswerte von weit über 500 Mrd Fr. Zu ihnen stossen etwa gleichviel Milliarden an öffentlichem und gewerblichem Bauvolumen und weitere 150 Mrd Fr. an Strassenbauten. Vor solchen Wertvolumina nehmen sich (Beton-) Bauschäden, die den Regeln der Baukunde und der natürlichen Alterung und Entwertung aus Umwelteinwirkungen über Jahrzehnte nicht entsprechen, eher bescheiden aus. Diejenigen Journalisten und Fachleute, welche den Fall Uster zu einem generellen Angriff auf die moderne Architektur und die konstruktive Baupraxis Schweiz emporstilisieren, sind Opfer der momentanen Stimmungslage. Es gilt, klar zwischen einzelnen Schadensbildern, im Betonbau vorab der mangelnden Überdeckung oder Abdeckung mit Korrosionsfolgen beim Stahlbeton, und einer emotionalen Schwarzmalerei mit Angstappellen *à la Betonkrebs* und Biobetonreklame zu unterscheiden.

Strassenbau- und Brückenschäden

Im Strassenbau legen die Kostenschätzungen kantonaler Tiefbauämter sowie die Rechnungen des Bundesamtes für Strassenbau eine sichere Basis. Die Kostenschätzung für baulichen Unterhalt von etwa 1 bis 1,5% des Anlagewertes für Nationalstrassen dürfte nur unter Einbezug der Ausrüstungen zutreffen. Auch die Brückenschäden, das gegenwärtige Sorgenkind Nummer 1, mit seinen Erneuerungen der Deckbeläge bis ganzer Tragkonstruktionen, verlieren angesichts der obigen Milliardenbeträge oder etwa des gesamten Unterhaltsvolumens der schweizerischen Bausubstanz von über 12 Mrd Fr. erheblich an Bedeutung. Die Öffentlichkeit nimmt zu wenig davon Kenntnis, dass im Ge-