Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 116 (1998)
Heft: 3/4

Artikel: Einstürze als Anstösse für Innovationen
Autor: Boutellier, Roman / Ortega, Ilías
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-79448

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: 08.08.2025

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

Roman Boutellier und Ilías Ortega, St. Gallen

Einstürze als Anstösse für Innovationen

Die Publikation dieses Artikels wurde von der Forschungskommission der Universität St. Gallen gefördert.

«Aus den Fehlern anderer lernen»: Eine Maxime, die auch im Ingenieurentwurf eine bedeutende Rolle spielen kann. Anhand mehrerer Fallstudien von Entwurfsfehlern mit paradigmatischem Charakter wird vorgeführt, wie sich Fehler in herkömmliche Entwürfe einschleichen und zu folgenschweren, vermeidbaren Einstürzen führen können.

Aus den Fehlern der Vergangenheit gezogene, möglichst allgemeingültige Lehren können Ingenieuren zumindest unangenehme, wenn nicht sogar tragische Überraschungen bei gewöhnlichen Entwürfen ersparen. Das Studium von Entwurfsfehlern kann nicht nur einen Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit von konventionellen Entwürfen leisten, sondern auch wesentliche Anstösse für bahnbrechende, innovative Entwürfe geben.

Entwerfen als Vermeiden von Katastrophen

«Ein Drittel trägt der Beton, ein Drittel das Eisen, und ein Drittel der liebe Gott. Und fällt der Beton schlecht aus, so übernimmt der liebe Gott zwei Drittel» [1] besagt die «Drittregel» aus der Frühzeit des Stahlbetonbaus. Seitdem hat die Bauingenieurwissenschaft grosse Fortschritte gemacht. Schon zu Beginn des Studiums beschäftigen sich angehende Ingenieure mit Konzepten der Trag- und Gebrauchsfähigkeit. Die Tragsicherheit, die Erhaltung des Gleichgewichts, wird in vielen Fällen mit der statischen Methode der Plastizitätstheorie nachgewiesen. Dabei werden mehrere Arten des Versagens einer Struktur untersucht. Überlegungen zur Gebrauchsfähigkeit überprüfen das Verhalten von Strukturen während der geplanten Nutzungsdauer hinsichtlich Dauerhaftigkeit, Verformungsverhalten usw. Die Trag- und Gebrauchsfähigkeit werden rechnerisch mit Sicherheitskoeffizienten ermittelt. Die Sicherheitskoeffizienten berücksichtigen die Vereinfachungen der mathematischen Bauwerksmodelle und die Modellbelastungen. Wegen seiner Auseinandersetzung mit dem Versagen von Bauwerken kann der Ingenieurentwurf als die Wissenschaft oder sogar Kunst des Vermeidens von Katastrophen angesehen werden.

Weil moderne, computergestützte Verfahren, wie die Methode der finiten Elemente, die Ingenieure heutzutage routinemässig einsetzen, die Tragfähigkeit der ausgefallensten Strukturen ausserordentlich schnell berechnen können, ist die Analysephase des Entwurfs kein Engpass mehr. Entwurfsfehler mit katastrophalen Folgen geschehen seltener auf der Ebene der Berechnung von Kräften und Verformungen durch Computer, sondern eher auf der Ebene der Entwurfslogik. Der Einsatz von Computern kann dabei helfen, arithmetische Fehler zu vermeiden, hat aber die Tendenz, logische, konzeptionelle Fehler zu übersehen. Statt überschlagsmässige Berechnungen anzustellen, verlassen sich jüngere Ingenieure auf computergestützte Detailrechnungen. Der Übergang vom Rechenschieber zum Taschenrechner und später zum Computer entlastet auf der Detailebene des Entwurfs, Ingenieure sind aber nicht mehr gezwungen, grundsätzliche Grössen abzuschätzen.

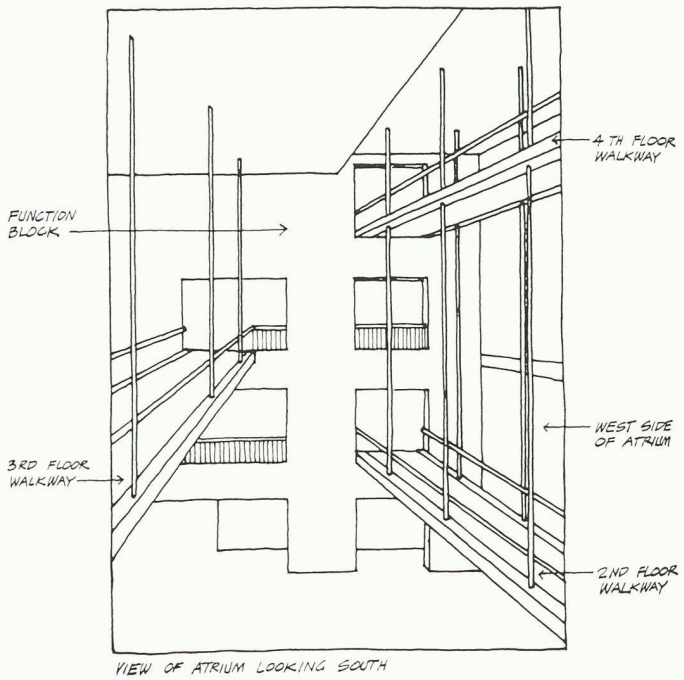
Urteilsvermögen

Schon E. Mörsch hat in seinem klassischen Werk «Der Eisenbetonbau» die Bedeutung des Urteilsvermögens erkannt: «Die Erfahrung zeigt, dass die mathematische Beherrschung der Formeln noch keinen Eisenbetoningenieur macht, und dass nur derjenige schwierige Bauten verantwortlich entwerfen kann, der das Verhalten der Baustoffe unter den verschiedenen statischen Einwirkungen gründlich versteht» [2]. Ein gutes Urteilsvermögen wird den wenigsten Menschen von der Natur gegeben und muss daher gezielt entwickelt werden: Durch eigene, manchmal bittere Erfahrung oder durch das Studium von Beispielen schlechten und guten Urteilsvermögens. Wertvolle Beispiele schlechten Urteilsvermögens sind katastrophale Ereignisse, da jedermann den Einsturz eines Damms oder einer Brücke unmissverständlich feststellen kann. Für Ingenieure ist es auch einfacher, Lehren aus missglückten als aus erfolgreichen Entwürfen zu ziehen, weil an Misserfolgen ersichtlich ist, welche Fehler begangen wurden. Bei erfolgreichen Entwürfen hingegen ist es wesentlich schwieriger festzustellen, auf welchen Eigenschaften ihr Erfolg beruht. Einstürze eignen sich deshalb als Warnungen vor Verstössen gegen physikalische Gesetze, die nicht wiederholt werden sollten. Das Studium von Entwurfsfehlern, wie historische Einstürze von Strukturen, kann Ingenieuren dabei helfen, Schäden bei ihren eigenen Entwürfen zu vermeiden. Paradigmatische Fallstudien von fehlerhaften Entwürfen[1] tragen dazu bei, die Aufmerksamkeit der Ingenieure auf den logischen Ablauf des Entwurfsprozesses zu lenken und damit die Sicherheit ihrer Entwürfe zu erhöhen.

Um aus der Erfahrung anderer lernen zu können, muss diese Erfahrung zugänglich sein. Leider werden in der Baubranche nur die aufsehenerregendsten Kollapse der Öffentlichkeit bekanntgemacht und breit diskutiert. In weniger spektakulären Fällen werden Informationen aus juristischen Gründen oder aus Sorge um das Ansehen der Verantwortlichen geheimgehalten. Auch Versicherungen, die in Schadenersatzprozesse verwickelt sind und über Informationen vergangener Schadensfälle verfügen, verweigern Aussenstehenden die Einsicht in ihre Unterlagen.

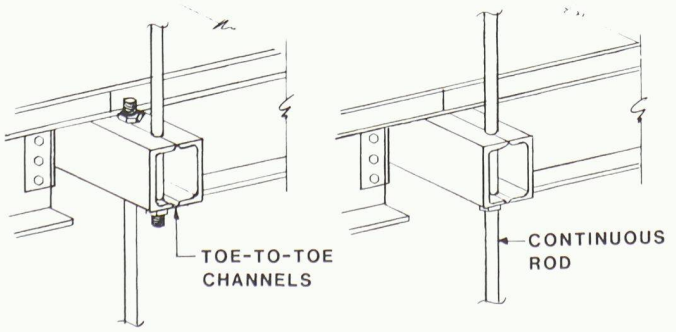
Damit ein möglichst grosser Nutzen aus den Fehlern der Vergangenheit gezogen werden kann, sollten die daraus abgeleiteten Lektionen allgemeingültig sein. Weil aktuelle Fallstudien von Einstürzen normalerweise auf grosses, allgemeines Interesse stossen, können sie auf Fehler aufmerksam machen, die in anderen Bauten verborgen sind. Leider sind die wenigen, nicht geheimgehaltenen Informationen aus aktuellen Fallstudien meist spekulativer Natur, da die genauen Schadensursachen oft noch nicht definitiv ermittelt worden sind. Die Meinungen der in einem Rechtsstreit verwickelten Parteien und der zu Rate gezogenen, unabhängigen Fachexperten gehen oft auseinander. Alle diese Gründe sprechen für die Auswertung von historischen statt aktuellen Fallstudien. Historische Fallstudien haben den Vorzug, dass allfällige Gerichtsverfahren abgeschlossen, viele Informationen bereits öffentlich zugänglich sind und in der Fachwelt über die Schadensursachen umfassend diskutiert worden ist.

Historische Studien von eingestürzten Bauwerken legen die Vermutung nahe, dass trotz ausgedachter Festigkeitstheorien, moderner Berechnungsverfahren, effi-



1
Atrium des Hyatt Regency-Hotels in Kansas City (entnommen aus: Levy M., Salvadori M., «Why Buildings Fall down: How Structures Fail», 1994. Mit freundlicher Genehmigung des W.W. Norton-Verlags)

zienter Rechenanlagen und grosser Fortschritte in der Materialtechnologie Einstürze in den meisten Fällen auf den systematischen Ablauf des Entwurfsprozesses zurückzuführen sind. Dies beginnt mit der Ingenieurausbildung, die ein grösseres Gewicht auf die Anwendung von analytischen Berechnungsverfahren als auf die Entfaltung von kreativen, synthetischen Fähigkeiten, wie die Heranbildung eines ausreichenden Urteilsvermögens, legt. Besonders in Gebieten der Ingenieurpraxis, wie etwa im Erdbau, wo ein gesunder Menschenverstand erforderlich ist, wirkt sich diese Entwicklung nachteilig auf Kosten und Qualität der Bauten aus. Es ist zu befürchten, dass ein grosser Anteil von eingestürzten Erdbauten, wie z.B. Dämme, auf logische Entwurfsfehler und nicht auf den Stand der Technik zurückzuführen ist und deshalb vermeidbar gewesen wäre[2]. Bei vielen Problemen des Erdbaus können Zuverlässigkeit und Kosten der Bauten durch die Anwendung von raffinierten Erdmodellen nur marginal erhöht werden. Vielversprechender ist es hingegen, den logischen Ablauf des Entwurfsprozesses, z.B. durch den Einbau von Kontrollpunkten zur Überprüfung der Plausibilität der benutzten Daten, zu überwachen[3]. Dabei sollten Ingenieure ihre eigenen Berechnungen nicht alleine kontrollieren. Prüfungen durch Drittpersonen helfen, logische Fehler wie Versehen, Widersprüche und arithmetische Fehler, die sich im Entwurf eingeschlichen haben, zu entdecken. Effizientere Verfahren zur Analyse von Strukturen wie schneller konvergierende, genauere Computeralgorithmen, können die Logik des Entwurfsprozesses nicht als Ganzes überprüfen. Dazu ist das Urteilsvermögen der Ingenieure gefragt. Der Ingenieurentwurf ist heute immer noch, genauso wie vor fünftausend Jahren, als die ägyptischen Pyramiden gebaut wurden, eine kreative Aufgabe geblieben. Der Entwurf ist ein kognitiver Prozess, währenddem Ingenieure sogenannte «Wissensobjekte»[4] wie Fakten, Regeln, Hypothesen und Überzeugungen manipulierten, um daraus neue Ideen zu erzeugen[5]. Computerprogramme, wie sie im Ingenieurentwurf heutzutage eingesetzt werden, haben diese Fähigkeiten nicht; sie operieren mit reinen Zahlen statt mit «Wissensobjekten» und sind auch nicht in der Lage, kognitive Prozesse wie Verallgemeinerungen, Schlussfolgerungen und kreative Analogien durchzuführen. Ausserdem beantworten Computerprogramme nur die Fragen, die ihnen gestellt werden. Ob diese Fragen die entscheidenden sind, können Computerprogramme nicht von alleine feststellen. Aus diesem Grund muss die logische Konsistenz des Entwurfsprozesses von den Ingenieuren selbst geprüft werden.



2
Ausgeführter (li.) und geplanter Anschluss (re.) (entnommen aus: Kaminetzky D., «Design and Construction Failures: Lessons from Forensic Investigations», 1991. Mit freundlicher Genehmigung des McGraw-Hill-Verlags)

Wirkung des Massstabs

Eine der bekanntesten, wichtigsten und am meisten missachteten «klassischen» Regeln des Entwurfs ist die Wirkung des Massstabs, die auch in den Entwürfen der lebenden Natur beobachtet werden kann. Diese Entwurfsregel erklärt z.B. anhand von Vergleichen des Energieverbrauchs bei Lebewesen, warum sich einige von ihnen schneller als andere bewegen können. So kann ein Fisch, der achtmal grösser als seine Beute ist, nur doppelt so schnell schwimmen [4]. Dagegen haben kleinere Vögel weniger Schwierigkeiten zu fliegen als grössere. Weil anhaltendes Schweben doppelt so viel Energie verbraucht wie nach vorne Fliegen, ist Schweben sogar auf Lebewesen, die leichter als 20 g sind, beschränkt [4, S. 35].

Der Einfluss des Massstabs ist auch in Ingenieurentwürfen festzustellen, und das Missachten seiner Wirkung hat seit Jahrhunderten zu Entwurfsfehlern mit katastrophalen Auswirkungen geführt. Schon Galileo Galilei (1564–1642) war die Wirkung des Massstabs bekannt, obwohl er sie damals nicht erklären konnte. Beispiele von natürlichen und künstlichen Strukturen gab er in «Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend»: «Hieraus erkennen wir nun, wie weder Kunst noch Natur ihre Werke unermesslich vergrössern können, so dass es unmöglich erscheint, immense Schiffe, Paläste oder Tempel zu erbauen, deren Ruder, Raae, Gebälk, Eisenverkettung und andere Theile bestehen könnten: wie andererseits die Natur keine Bäume von übermässiger Grösse entstehen lassen kann, denn die Zweige würden schliesslich durch das Eigengewicht zerbrechen; auch können die Knochen der Menschen, Pferde, und anderer Thiere nicht übergross sein und ihrem Zweck entsprechen, denn solche Thiere könnten nur dann so bedeutend vergrössert werden, wenn die Materie fe-

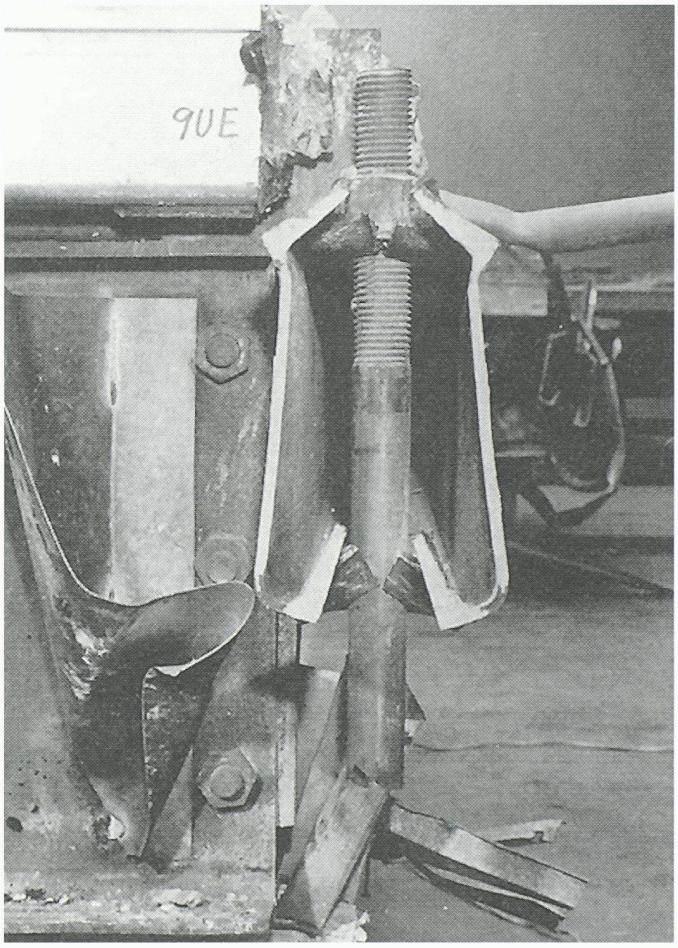
ster wäre und widerstandsfähiger, als gewöhnlich...» [5]. Auch D'Arcy Wentworth Thompson untersucht in seinem Werk «Über Wachstum und Form» zahlreiche Strukturen aus Biologie und Architektur. Dort zeigt er, dass von zwei geometrisch ähnlichen Brücken die grössere die Schwächere ist und zwar im Verhältnis ihrer linearen Dimensionen [6]. Das liegt daran, dass die Tragfähigkeit eines Stahlträgers im Verhältnis zu seiner Querschnittsfläche wächst, während sein Gewicht mit dem Volumen zunimmt. Es gibt aber auch Formen, die unabhängig von ihrer Grösse stabil sind. Thompson bringt das Beispiel zweier Schiffe, ein grosses und ein kleines, die ähnliche Maste und Segel haben. Weil beide, die Tragfähigkeit der Maste und die Druckkraft auf die Segel, im Verhältnis zu ihren Flächen wachsen, eignen sich die Segel in beiden Fällen für die Aufnahme des gleichen Winddrucks [6, S. 18-19].

Die Missachtung der Wirkung des Massstabs hatte nirgendwo so verheerende Folgen wie im Grossbrückenbau. Bekannt ist v.a. der Zusammenbruch der Quebec-Brücke, die eine ungefähr gleich grosse Spannweite wie die erfolgreiche Forth-Brücke überwand, aber wegen der Schlankheit ihrer Druckglieder einstürzte: Die rechteckförmigen Profile der Quebec-Brücke waren rund halb so hoch wie die kreisförmigen der Forth-Brücke [3, S. 43-44].

Die Wirkung des Massstabs erklärt ebenfalls die überraschenden Risse bei den Liberty-Schiffen, die während des zweiten Weltkriegs gebaut wurden. Diese Schiffe sind in der Mitte plötzlich gerissen, weil die kritische Länge der Risse in Stahlplatten eine absolute Grösse ist, unabhängig von den Dimensionen des Schiffs [3, S. 40]. Bei einem grossen Schiff kann deshalb ein verhältnismässig kleiner Riss eine Gefahr bedeuten. Eine zusätzliche Gefahr für die Liberty-Schiffe kam aus ihren geschweissten Anschlüssen, welche die (damals) herkömmlichen Verbindungen mit Nieten ersetzten. Anschlüsse mit Nieten wären in diesem Fall vorteilhafter gewesen, weil die sich überlappenden Platten die Ausweitung von Rissen behindern und einfacher zu reparieren sind als geschweisste Anschlüsse [3, S. 56-57]. Ausserdem erzeugen Schweissnähte Eigenspannungen und Versprödungseffekte im angrenzenden Stahl.

Änderungen von Entwürfen

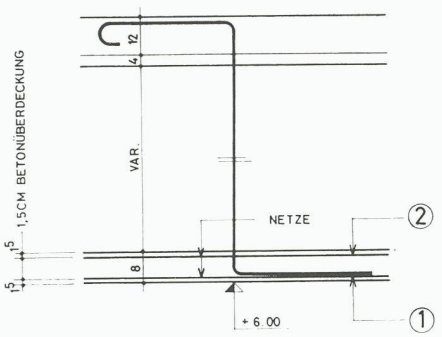
Aus dem Studium des Paradigmas der Liberty-Schiffe leitet Petroski folgende allgemeine Fragestellungen für einen erfolgreichen Entwurf ab [3, S. 57]:



3
Während des Unfalls zerstörter Anschluss (entnommen aus: Kaminetzky D., «Design and Construction Failures: Lessons from Forensic Investigations», 1991. Mit freundlicher Genehmigung des McGraw-Hill-Verlags)

- Wie kann eine Struktur zusammenbrechen?
- Welches Entwurfsmerkmal kann eine Versagensart abwenden, ohne eine andere einzuführen?

Petroski weist mit seinen Fragen darauf hin, dass Änderungen (der Geometrie, der Baustoffe oder der Bauabläufe) des Entwurfs, die ihn eigentlich verbessern sollten, nachteilige Wirkungen haben können, indem sie neue Arten des Versagens einführen oder bereits vorhandene zum Vorschein bringen [3, S. 57]. Ein tragisches Beispiel in dieser Hinsicht ist der Einsturz der Fussgängerbrücken des Hyatt Regency-Hotels in Kansas City, bei dem 114 Menschen ihr Leben verloren und 200 verletzt wurden[6]. Während eines Festes mit mehr als sechzehnhundert Besuchern fielen zwei übereinander hängende Fussgängerbrükken im Atrium des Hotels herunter. Die übereinander liegenden Brücken wurden von Querbalken getragen (Bild 1). Die Querbalken ihrerseits hingen an Stangen, die an der Decke befestigt waren. Der ursprüngliche Entwurf der Verbindung der Querbalken der oberen Brücke mit den hängenden Stangen wurde mit dem Einverständnis aller Beteiligten verändert. Vor der Anpassung wies dieser Anschluss einen Sicherheitsfaktor von zwei auf. Die Änderung schien nur Vorteile zu bringen: Der Anschluss wurde übersichtlicher und einfacher zu vollenden, weil statt einer langen Stange zwei kürzere benutzt werden konnten (Bild 2). Da der veränderte Anschluss nicht überprüft wurde, haben die Verantwortlichen übersehen, dass seine Belastung verdoppelt wurde, denn die Querbalken (der oberen Brücke) hatten nach der Anpassung die Lasten beider Brücken zu tragen. Zum Unglück kam es, weil durch die verdoppelte Last die obere Stange aus einem Querbalken gezogen wurde. Da die übrigen Stangen durch die Last, welche die gebrochene Stange getragen hatte, über ihre Tragfähigkeit hinaus belastet wurden, rissen auch sie (Bild 3). Beide Fussgängerbrücken fielen dann in das Atrium hinunter. Als ursprüngliche Unfallursache konnte die unterlassene Prüfung der Anschlüsse identifiziert werden. Die ungenügende Redundanz des Konstruktionssystems verursachte dann den Einsturz beider Brücken. Wie Petroski bemerkt [3, S. 61], hätte sogar ein Student in den ersten Semestern seines Studiums mit einer überschlagsmässigen Rechnung den Fehler feststellen und den Unfall vermeiden können.



4
Aufhängebügel aus Chromnickelstahl

5
Gebrochene Bügel mit der für Spannungsrisskorrosion typischen spröden Bruchfläche

Fachwissen, Erfahrung und Kontrollen

Zu den grössten Einstürzen in der Schweiz zählt der Fall der untergehängten Decke des Hallenbads Uster. Für das 1972 eingeweihte Hallenbad wurde eine acht Zentimeter dicke, untergehängte Stahlbetondecke entworfen. Diese hing an abgebogenen Stangen aus Chromnickelstahl V2A mit einem Durchmesser von zehn Millimetern (Bild 4). Das begehbare, untergehängte Deckensystem diente dem Luftabzug, damit konnte auf die herkömmlichen Blechschächte verzichtet werden. Die Decke wog 166 Tonnen und war an 207 Stangen aufgehängt. Nach Angaben des entwerfenden Ingenieurs wies die Konstruktion einen Sicherheitskoeffizienten von 2,5 auf. Die Decke wurde aber rund 20% schwerer als ursprünglich geplant, weil sie dicker als vorgesehen ausgeführt wurde. Aus ästhetischen und akustischen Gründen wurde 1981 eine Holzdecke an der untergehängten Decke befestigt.

Das Unglück begann am 9. Mai 1985, als um 20 Uhr der Cheftrainer des Schwimmclubs Uster einen Knall aus der Decke kommen hörte. Zu der Zeit befanden sich ungefähr 40 Gäste im Hallenbad. Nach dem ersten Knall folgte ein zweiter. Eine Viertelstunde später fiel dann die Decke mit einem reibenden Geräusch, «wie ein Leintuch»[7] überraschend herunter. Der Trainer rief den Schwimmern laut zu, unterzutauchen und zu den Startblöcken zu schwimmen. Er konnte noch rechtzeitig fliehen, zwölf Personen wurden von der Decke erschlagen oder ertranken, gefangen im Schwimmbecken. Die Rettungsarbeiten, an denen ungefähr 350 Personen teilnahmen, dauerten bis am Morgen des nächsten Tages.

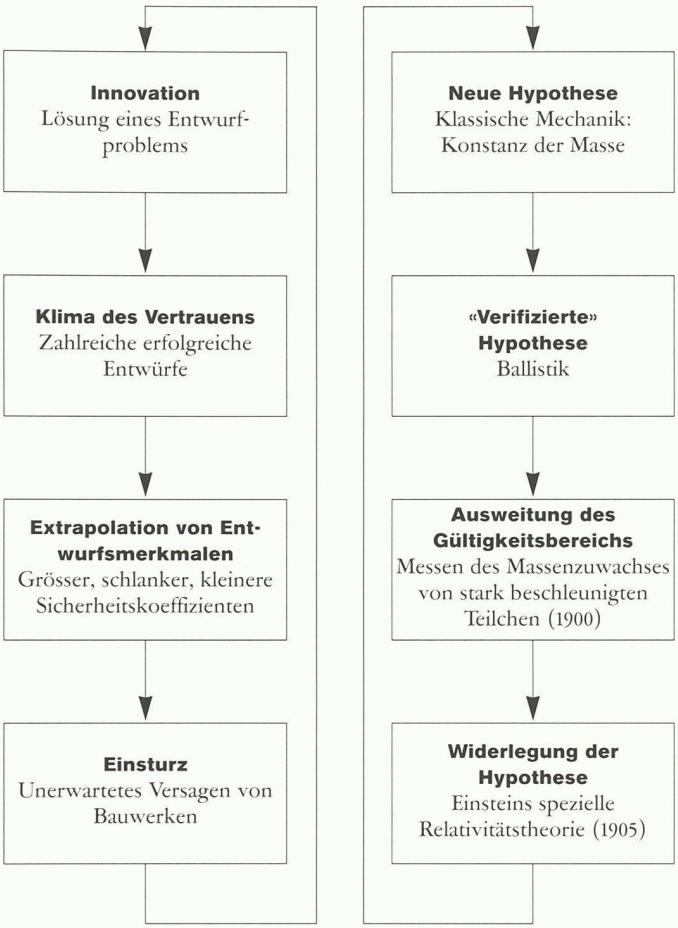
Die Untersuchung der Unglücksursache wurde von der Empa Dübendorf [7] in Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlichen Dienst der Stadtpolizei Zürich durchgeführt. Berechnungen der Empa stellten dabei einen Sicherheitskoeffizienten von 1,3 für die Deckenkonstruktion fest. Für den Zustand nach dem Aufhängen der Holzdecke wurde ein Sicherheitskoeffizient von 1,2 ermittelt. Der vom entwerfenden Ingenieur angegebene Sicherheitskoeffizient von 2,5 konnte nicht bestätigt werden. Obwohl der Sicherheitskoeffizient gering war, kam er als alleinige Unfallursache nicht in Frage. Schon zu Beginn der Untersuchung wurde vermutet, Chlordämpfe aus dem Wasser hätten die Chromstahlträger angegriffen. Im Jahre 1979 wurden zum ersten Mal die Aufhängebügel überprüft, weil die Decke sich stark durchgebogen hatte. Im Inspektionsbericht wurde die Durchbiegung der Decke für ungefährlich befunden. Während verrostete Fensterrahmen repariert wurden, fand 1984 eine zweite, zufällige Kontrolle statt. Damals wurde ein gebrochener Chromstahlbügel gefunden. In der Annahme, es handle sich um einen während der Bauausführung entstandenen Schaden, wurde die gebrochene Stange mit einem angeschweissten Stab repariert. Im Bericht an die Stadt Uster, in dem die Reparatur keine Erwähnung fand, wurde der Zustand der Decke als einwandfrei bezeichnet.

Der Einsturz der Hallenbaddecke wurde durch zwei Einwirkungen ausgelöst: Korrosion und gleichzeitige mechanische Beanspruchung. An der Oberfläche eines Stahls mit mindestens 12% Chromanteil bilden sich schützende Passivschichten [8]. Sie bestehen aus oxidiertem Chrom, bei dem der Sauerstoff aus der Luft oder aus dem Wasser stammen kann. Passivschichten sind leider leicht zu beschädigen, wobei die Beschädigung chemisch, z.B. durch chloridhaltige Luft, oder mechanisch entstehen kann. Unter Zugspannung belastet, wird die chemisch oder mechanisch verursachte Verletzung der Passivschicht, einer Kerbe ähnlich, zum Ausgangspunkt eines Risses. Bedingt durch den kombinierten chemischen und mechanischen Angriff pflanzt sich dann der Riss im Material fort und kann so den Bruch eines Stabes verursachen. Vermutlich wurden zu Beginn des Einsturzes der Decke in Uster einige Chromstahlstangen durch Spannungsrisskorrosion so stark beschädigt, dass sie brachen (Bild 5). Die von den gebrochenen Stangen getragenen Lasten wurden auf die benachbarten übergeben. Einige davon waren durch Spannungsrisskorrosion dermassen geschwächt, dass sie prompt brachen. Weitere Stangen rissen aufgrund schlichter Überlastung. Dieser Vorgang wiederholte sich so lange, bis alle Stangen, ähnlich den Karten eines einstürzenden Kartenhauses, gerissen waren und die Decke auf den Boden fiel.

Im Laufe der Untersuchung des Unglücks stellte sich heraus, dass die verantwortlichen Ingenieure und Architekten keine Erfahrung mit untergehängten Decken gesammelt hatten und Chromstahl für «rostfrei» hielten, obwohl Spannungsrisskorrosion seit mehr als zwanzig Jahren bekannt war. Obgleich mit Chromstahl eine besondere Stahllegierung für die Konstruktion gewählt wurde, wurde kein Fachmann in Materialwissenschaften, der auf die Risiken hätte hinweisen können, zu Rate gezogen. Schon allein die grosse, plötzliche Durchbiegung der Decke hätte, wie bei jeder Konstruktion, die sich sehr schnell stark verformt, die Räumung des Bauwerks und eine eingehende Untersuchung der Konstruktion veranlassen sollen. Noch gravierender ist die Tatsache, dass Kontrollen an dieser für die Verantwortlichen ungewöhnlichen Struktur gar nicht vorgesehen waren, sondern zufällig durchgeführt wurden.

Entwurfsformeln

Am Beispiel Galileo Galileis zeigt Petroski, wie eine falsche Hypothese, die nicht kritisch geprüft und empirisch verifiziert wird, «bestätigt» werden kann [3, S. 62 ff.]. Galilei leitet in seinem Werk «Unterredungen und mathematische Demonstrationen» die Tragfähigkeit eines eingespannten und an einem Ende mit einer Einzellast beanspruchten Balkens her. Dabei geht er von einer gleichmässigen Spannung an der Einspannstelle aus. Für die Bruchart nimmt er an, der Balken würde sich um die untere Kante der Einspannstelle drehen. Weil die Spannungsvertei-



6
Zyklische Abfolge von Einstürzen und Innovationen (vgl. [3]). Ein ähnlicher Verlauf ist bei der Entstehung und Widerlegung von wissenschaftlichen Hypothesen festzustellen

lung und die Bruchart, die Galilei angenommen hatte, falsch waren, wurde die von ihm ermittelte Tragfähigkeit dreimal so gross, wie sie in Wirklichkeit war. Da Galilei in seinen Versuchen die relative Tragfähigkeit von Balken ermittelte, konnte er sein Versehen nicht aufdecken. So untersuchte er in einem seiner Versuche die Tragfähigkeit eines Balkens mit dem Verhältnis Höhe zu Breite 5:1 und stellte damals fest, dass der vertikal orientierte Balken eine fünfmal grössere Tragfähigkeit als der horizontal liegende aufwies, was seine Hypothesen zu bestätigen schien. Da sogar bis Mitte des 19. Jahrhunderts Sicherheitsfaktoren zwischen sechs und sieben benutzt wurden, konnten trotz falscher Annahmen, wie diejenigen Galileis, Einstürze von Strukturen wie Eisenbahnbrücken abgewendet werden. Sehr wahrscheinlich hätten erst kleinere Sicherheitsfaktoren den Weg für eine kritische Überprüfung der Hypothesen Galileis gebahnt. Leider verhinderte die Autorität Galileis während mehr als einem Jahrhundert die Verbreitung verbesserter Annahmen über die Spannungsverteilung und die Bruchart eingespannter Balken.

Das Beispiel Galileis zeigt, wie falsche Hypothesen, solange die Sicherheitsfaktoren hoch genug sind, zu sicheren Bauten führen können. Bewähren sich mehrere Konstruktionen im Betrieb, steigt das Vertrauen in die verwendeten Hypothesen, und die benutzten Sicherheitsfaktoren werden explizit oder implizit reduziert. Damit steigt das Risiko der späteren Bauten, und Einstürze beginnen sich zu häufen. Vorerst werden als Kollapsursachen «menschliches Versagen», Material- und Montagefehler usw. vermutet. Erst ein spektakulärer Einsturz wird zu einer Überprüfung der grundlegenden Hypothesen drängen. Damit rückt die wissenschaftliche Durchdringung der Ingenieurprobleme ins Zentrum der Bemühungen.

Dass der Fall Galileis zeitlose Lehren beinhaltet, zeigt ein weiteres Unglück aus der Schweiz. Am 14. Dezember 1996 fuhren ungefähr 35 Personen in der Seilbahn, die von der Riederalp zur Mossfluh fährt[8]. Gegen zehn Uhr morgens brach die 28 cm dicke Achse des unteren Seilführungsrads. Das mehrere Tonnen schwere Rad wurde mehr als 20 m entfernt vom Unfallort gefunden. Infolge des Achsenbruchs erschlafften die Seile, und die Kabinen begannen so stark zu schwingen, dass einige Passagiere aus den Kabinen geworfen wurden. Ein 36jähriger Skilehrer, der aus einer Kabine geworfen und dann von derselben getroffen wurde, verlor dabei sein Leben. 18 Personen wurden schwer verletzt. Experten, die den Unfall untersuchten, vermuteten bei der erst ein Jahr alten Seilbahnanlage einen Ermüdungsbruch der Achse. Die Mitwirkung des Seilbahnherstellers trug zur raschen Aufklärung der Unglücksursache bei: Der Hersteller der Seilbahn teilte bald mit, bei den Berechnungen zur Bemessung der gebrochenen Welle sei ein «methodischer Fehler» unterlaufen[9]. Nachrechnungen des Seilbahnherstellers, des Bundesamts für Verkehr und eines Fachexperten kamen zum selben Ergebnis. Der Seilbahnhersteller teilte ebenfalls mit, die «vorgeschriebene Sicherheitsmarge» hätte gefehlt[9]. Der Unfall veranlasste sodann die rechnerische Überprüfung der Sicherheit von mehr als hundert Seilbahnen. Sechs davon wurden auf Empfehlung des Seilbahnherstellers sofort geschlossen und konnten erst nach Verstärkung der Anlagen wieder in Betrieb genommen werden. Die Abklärungen in diesem Fall sind noch nicht abgeschlossen. Wie Galileis Paradigma zeigt dieser Fall, dass der unkritische, wiederholte Gebrauch von Formeln zu Entwurfsfehlern mit schwerwiegenden Folgen führen kann. Bei der Suche nach den Ursachen eines Kollapses sollten deshalb die grundlegenden Hypothesen kritisch durchleuchtet werden. Die Benutzung von Entwurfsregeln oder -formeln, ohne

Brücke Ort	Art	Wahrscheinliche Ursache	Jahr	Intervall (Jahre)
Dee (England)	Fachwerkträger	Torsionale Instabilität	1847	–
Tay (Schottland)	Fachwerkbrücke	Instabil bei Wind	1879	32
Quebec (Kanada)	Auslegerbrücke	Beulen	1907	28
Tacoma Narrows (USA)	Hängebrücke	Aerodynamische Instabilität	1940	33
Milford Haven (Wales)	Kastenträger	Beulen von Platten	1970	30
?	Schrägseilbrücke?	Instabilität?	2000?	30?

7
Bedeutende Brückeneinstürze[11] und Extrapolation

8
John Hancock-Center, Chicago (Ingenieur: F. Khan, Architekt: B. Graham, 100 Stockwerke). Die innovativen Stahldiagonalen dieses Wolkenkratzers erhöhen die Widerstandsfähigkeit gegen Horizontallasten. Dadurch wurde die strukturell erforderliche Stahlmenge im Vergleich zu herkömmlichen Lösungen um die Hälfte herabgesetzt. Der Kräftefluss ist an der Fassade klar abzulesen (Bild: I. Ortega)

ihre theoretische oder empirische Entstehung und damit ihre Grenzen zu kennen, erhöht das Risiko der Entwürfe und ist deshalb zu vermeiden. Entwurfshypothesen können nicht endgültig bestätigt werden, unabhängig davon, ob sie bei vielen Bauten mit Erfolg angewendet wurden.

Ein einziger Schadenfall oder Einsturz reicht aus, um eine aufgestellte Hypothese zu widerlegen. Auf einen ähnlichen Sachverhalt im Bereich der Wissenschaften hat bereits Popper mit seinem Falsifizierbarkeitskriterium [9] aufmerksam gemacht: «Eine Theorie gehört dann und nur dann zur empirischen Wissenschaft, wenn sie mit möglichen Erfahrungen im Widerspruch steht, also im Prinzip durch Erfahrung falsifizierbar ist.»

Nicht nur in der wissenschaftlichen Forschung spielt das Aufstellen und Widerlegen von Hypothesen eine wichtige Rolle, denn der Ingenieurentwurf kann ebenfalls als Aufstellen von Hypothesen [10] aufgefasst werden. Jedes erstellte Bauwerk kann gemäss dieser Sichtweise als Hypothese ausgelegt werden. Ein Beispiel dazu ist eine Brücke, die bestimmte Verkehrs-, Wind- und Erdbebenlasten während ihrer Nutzungsdauer ohne Schaden aufnehmen muss. Falls dies innerhalb ihrer Nutzungsdauer gelingt, so gilt die Hypothese als bestätigt. Sollte die Brücke während ihrer Nutzungsdauer einen Schaden nehmen oder sogar einstürzen, so kann sie als widerlegte Hypothese gedeutet werden. Die endgültige Bestätigung von Hypothesen vor der geplanten Nutzungsdauer ist gemäss dieser Sichtweise nicht möglich, weil jede Baustruktur infolge unerwarteter Einwirkungen, z.B. infolge Verkehr, Sturm oder Erdbeben, zusammenbrechen kann. Jedes Bauwerk ist deshalb ein Versuch, ein Experiment, um die Gültigkeit einer Hypothese zu prüfen.

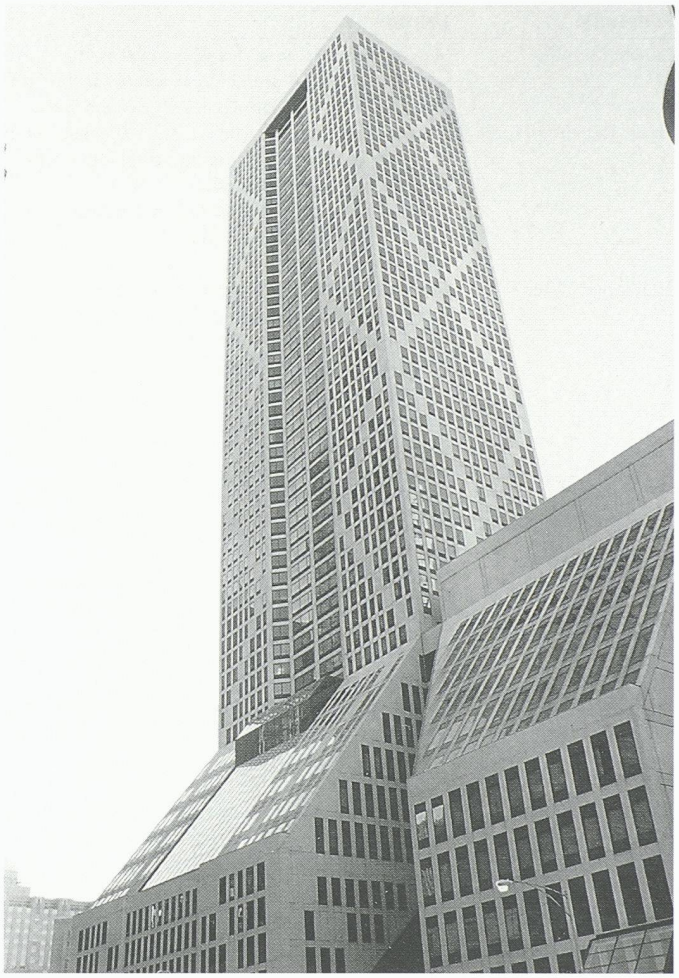
Entwurfsklima

Bewähren sich mehrere Exemplare einer bestimmten Strukturart, wie Hängebrücken, Schiffe, Flugzeuge usw., entsteht ein Entwurfsklima des Vertrauens [3, S. 144 ff.]. Der erzielte Erfolg verstärkt das Vertrauen der Ingenieure; damit werden die danach folgenden Strukturen schlanker entworfen und mit tieferen Sicherheitsfaktoren bemessen. Das Entwurfsklima des Vertrauens veranlasst zur unbedachten Extrapolation über die Grenzen der herkömmlichen Entwürfe hinaus. Die Vergrösserung der linearen Dimensionen einer Struktur kann aber überraschende Folgen haben. Im Fall des Einsturzes der Dee-Brücke (1847) von Robert Stephenson (1803–1859) wird vermutet, dass infolge ihrer geringeren Steifigkeit und ihres tieferen Sicherheitsfaktors eine bei herkömmlichen Entwürfen unbekannte Art des Versagens zum Vorschein kam: Beulen infolge Torsion [3, S. 90]. Dieses Beispiel weist darauf hin, dass bei ausserordentlichen Entwürfen neue Arten des Versagens, die bei herkömmlichen Entwürfen latent sind, auftauchen können. Aussergewöhnliche Entwürfe, deren Dimensionen oder andere Eigenschaften sich ausserhalb des Bereichs des Herkömmlichen befinden, können sich unerwartet verhalten und neue oder überraschende Versagensmechanismen aufzeigen. Solche Mechanismen lassen sich trotz raffinierter Computerprogramme nicht voraussagen, weil sie auf teilweise unbekannten physikalischen Phänomenen beruhen, die von den vorhandenen Computerprogrammen nicht simuliert werden.

Sobald das Klima des Vertrauens durch spektakuläre Einstürze, wie der Zusammenbruch der Dee-Brücke, gestört wird, werden die Ingenieurentwürfe vorsichtiger. Daraufhin entstehen innovative Entwürfe, bei denen die Risiken durch eingehende Analysen begrenzt werden. Mit der Ausführung mehrerer solcher Entwürfe breitet sich von neuem ein Klima des Vertrauens aus, und die Vorbehalte und Gefahren der vorherigen, innovativen Entwürfe werden fortdauernd missachtet, bis wieder ein grösseres Unglück geschieht. Der hier angedeutete zyklische Charakter des Entwurfsklimas wurde von Petroski anhand mehrerer Fallstudien belegt [3, 10]. Es ist zu vermuten, dass auch in der Schweiz Einstürze und Innovationen periodisch ablaufen (Bild 6).

Sibly [11] hat den zyklischen Charakter der Zusammenbrüche von grossen Stahlbrücken untersucht und dabei festgestellt, dass die bedeutendsten Einstürze in einem Entwurfsklima geschahen, das eine Kombination folgender Merkmale aufzeigte: Längere Spannweiten, schlankere Träger, anwachsendes Vertrauen in analytische Methoden oder herabgesetzte Sicherheitsfaktoren [12]. Die von Sibly untersuchten Einstürze sind nicht auf ungenügende Festigkeit der Strukturen, sondern auf das Auftreten von neuen Versagensmechanismen zurückzuführen [3, S. 167]. Sibly und Walker[10] haben eine Periode von dreissig Jahren im Zyklus von bedeutenden Brückeneinstürzen festgestellt (Bild 7).

Ob die dreissigjährige Periode, die von Sibly und Walker festgestellt wurde, zufällig ist und ob der nächste, bedeutende Brückenzusammenbruch um die Jahrtausendwende stattfinden wird, lässt sich nicht mit Bestimmtheit sagen. Sibly und Walker vermuten jedoch, dass die Periode von dreissig Jahren auf «Schwierigkeiten in der Kommunikation zwischen einer Generation von Ingenieuren und der nächsten» zurückzuführen ist[11]. Innovative Konzepte werden vorerst zurückhaltend in die Praxis umgesetzt. Sobald die Generation der Innovatoren Erfahrung mit den neuartigen Konzepten gesammelt hat und sie Bestandteil des herkömmlichen Entwurfs geworden sind, steigt die Gefahr, dass gewagte Bauwerke von unerfahrenen Ingenieuren der nachfolgenden Generation errichtet werden, die die grundlegenden Überlegungen nicht mehr kennen, sondern analytischen Methoden blind vertrauen. Weil damit oft die Grenzen des Herkömmlichen überschritten werden, treten bisher unbekannte Formen von Instabilitäten ein. Dies gibt den Anstoss für weitere Innovationen (Bild 7): Nach jedem grösseren Brückenzusammenbruch ist ein neuer Brückentypus entstanden. Ob der nächste, grössere Brückeneinsturz eine Schrägseilbrücke betreffen wird, ist ungewiss. Weil die Struktur, die Lastfälle und die Bauausführung von Schrägseilbrücken komplex sind, werden sie mit grösster Sorgfalt und meistens von erfahrenen Ingenieuren geplant. Sobald diese Brückenkategorie jedoch weit verbreitet ist, werden längere und schlankere Schrägseilbrücken ausgeführt. Dann kann ein grösserer Einsturz, der eine bisher unbekannte Instabilität offenbart, geschehen [3, S. 175].



9
Onterie Center, Chicago (Ingenieur: F. Khan, Architekt: B. Graham, 58 Stockwerke). Das Konzept der Fachwerkdiagonalen wurde hier erstmals auf Stahlbetonbauten angewandt. Die von Diagonalen durchstossenen Modulfelder wurden dabei ganz geschlossen (Bild: I. Ortega)

Innovativer Entwurf

Kreative Ingenieure sind in der Lage, aus eigenen Misserfolgen nicht nur zu lernen, sondern auch Neues zu entwickeln. Robert Stephenson hat nach dem Einsturz der von ihm entworfenen Dee-Brücke die Zusammenbrüche anderer Hängebrücken systematisch ausgewertet und daraus Impulse für den Entwurf seiner neuartigen rohrförmigen Britania-Brücke (1850) erhalten. John Roebling (1806–1869) untersuchte die Einstürze amerikanischer Hängebrücken und hielt dadurch die Risiken seiner innovativen, schlanken Brooklyn-Brücke (1883) in engen Grenzen. Stephenson und Roebling zeigten, wie das Studium von Fehlern der Vergangenheit zu innovativen und dennoch sicheren Entwürfen führen kann.

Weil die Versagensmechanismen neuartiger Konstruktionen schwer vorauszusagen sind, benutzen kreative Ingenieure, wie Heinz Isler (geb. 1923) bei seinen Schalenkonstruktionen, massstäbliche Modelle, um Aussagen über das statische Verhalten ihrer Entwürfe zu gewinnen. Schon durch einfaches Berühren können bei einfachen Modellen empfindliche Stellen festgestellt werden. An genaueren Modellen können später Belastungsversuche und Simulationen in Windkanälen durchgeführt werden.

Innovatoren kombinieren mathematische Verfahren mit Modellversuchen. Isler [13] meint: «Theoretische Überlegungen und Ableitungen hinken meistens weit hinter der Wirklichkeit her, sind vom momentanen Wissensstand abhängig. Ja, manchmal sind sie sogar Modeströmungen unterworfen. Und in jedem Fall basieren sie immer nur auf starker Vereinfachung der Voraussetzungen. In Routinefällen sind natürlich Formeln, Tabellen und Elektronikprogramme sehr praktisch und bequem. Aber auf neuen Gebieten und bei Vorstössen in Neuland hinein sind sie eminent gefahrvoll. Gerade im Schalenbau belegen gravierende Rückschläge diese Aussage. Eine weitere Gefahr bei Elektronikprogrammen liegt noch darin, dass der Computer nur die Frage beantwortet, die wir ihm gestellt haben. Er ist nicht in der Lage, auf Fragen hinzuweisen, die wir noch gar nicht gestellt haben, falls wir die Probleme noch gar nicht erkannt oder erfahren haben. Das ganzheitliche Modell hingegen kann das.»

Das Verformungsverhalten von ungewöhnlichen Strukturen kann zu unerwarteten Schäden oder sogar Einstürzen führen. Deshalb sollten die Verformungen von innovativen Entwürfen während der Bauausführung und im Gebrauchszustand in regelmässigen Abständen gemessen werden. Bei hochgradig statisch unbestimmten Bauwerken, wie Islers Schalen, können Richtung und Ausmass der Durchbiegungen nicht genau vorausgesagt werden. Aus diesem Grunde, und weil die Verteilung der inneren Spannungen vom Verformungszustand abhängig ist, sollte das Verformungsverhalten solcher Strukturen periodisch überprüft werden.

Die Wirkung des Massstabs, die zum Einsturz unzähliger Bauwerke führte, konnte von kreativen Ingenieuren zur Entwicklung innovativer Entwürfe herangezogen werden. Fazlur Khan (1929-1982), einer der ideenreichsten Ingenieure des

Fallstudie	Lektion
Liberty-Schiffe	Wegen der Wirkung des Massstabs ist die kritische Länge von Rissen eine absolute Grösse, unabhängig von den Dimensionen der Struktur.
Hyatt Regency-Hotel	Änderungen von Entwürfen, die Verbesserungen sein sollten, sind sorgfältig auf mögliche nachteilige Wirkungen zu prüfen.
	Gebäude, die grosse Spannweiten überbrücken, haben ein bestimmtes Mass an Redundanz aufzuweisen.
Hallenbad Uster	Plötzliche Verformungen von Strukturen sollten sofort und eingehend untersucht und überwacht werden.
	Beim Einsatz von ungewöhnlichen Baustoffen sind Fachleute zu Rate zu ziehen.
	Entwürfe von ungewöhnlichen Konstruktionen müssen von Experten oder erfahrenen Ingenieuren geprüft werden.
	Die Durchbiegungen von ungewöhnlichen Konstruktionen sind in regelmässigen Abständen zu messen.
	Gebäude, die grosse Spannweiten überbrücken, sollten ein bestimmtes Mass an Redundanz aufweisen.
Galileis Hypothese	Hypothesen, auch wenn sie «naheliegend» scheinen, sind durch Versuche zu bestätigen.
Seilbahn Riederalp	Der Gebrauch von Entwurfsregeln oder -formeln, ohne deren theoretische oder empirische Entstehung und damit Grenzen zu kennen, ist zu vermeiden.
Dee-Brücke	Aussergewöhnliche Konstruktionen können infolge von neuen oder überraschenden Versagensmechanismen zusammenbrechen.

10
Fallstudien und daraus abgeleitete Lektionen

Jahrhunderts, hat Galileis These, dass verschiedene Grössenordnungen verschiedene Strukturen erfordern, mit der Vollendung von revolutionären, sehr hohen Bauwerken von ausgeprägter Effizienz und kraftvoller, poetischer Erscheinung, in die Tat umgesetzt. Mit Meilensteinen der Hochhausarchitektur, wie das John Hancock Center (Bild 8) und der Sears Tower, hat Khan nicht nur zwei neue, strukturell effiziente Typen von Tragsystemen entwickelt, sondern auch Formen für ein neues architektonisches Vokabular gefunden (Bild 9). Er führte das Konzept des Denkens in Gesamtsystemen [14] für den Ingenieurentwurf ein. Gemäss dieser Entwurfsphilosophie existiert für jede Gebäudehöhe ein optimales strukturelles System. Entscheidend für den Entwurf ist dabei die Auswahl des Systems und nicht die Optimierung der Untersysteme oder Elemente des Systems. Interessanterweise waren viele der Entwürfe Khans Ausgangspunkt für wissenschaftliche Untersuchungen – und nicht andersherum[12].

Weitere grosse Ingenieure, wie Fritz Leonhardt im Falle seiner Leoba-Spannglieder, haben ihre neuen Ideen «vor der Anwendung durch Versuche erprobt und von Schwächen befreit» [15] und liessen sich dabei von Forschern von Materialprüfungsanstalten beraten. Die unbekannte Wirkung des Massstabs legt in einigen Fällen sogar Versuche mit grösstmöglichen Modellen nahe: «Weil bei einer Eisenbahnbrücke ein Versagen viel schlimmere Folgen hat als bei einer Strassenbrücke» [15, S. 161], wurden vor dem Bau der ersten Spannbetonbrücken der deutschen Bundesbahn Grossversuche an 20 m langen Balken durchgeführt.

Schlussfolgerungen

Leider spielt die Geschichte der Ingenieurwissenschaft immer noch nicht die Rolle, die sie in der Ausbildung und Praxis der Ingenieure verdient. Die Geschichte der Bauingenieurkunst ist keine stetige Abfolge von gefeierten, spektakulären Konstruktionen, sondern wurde oft von katastrophalen, zum Teil vermeidbaren Rückschlägen unterbrochen. Die systematische Auswertung von solchen Rückschlägen kann in Form der in diesem Beitrag untersuchten Fallbeispiele geschehen. Das aus solchen Auswertungen gewonnene Wissen sollte systematisch organisiert und allen Interessierten zur Verfügung gestellt werden, z.B. in Form von Internet-Seiten[13]. Bild 10 zeigt die hier bearbeiteten Fallstudien mit den daraus abgeleiteten Lektionen.

Unabhängige, staatliche Einrichtungen wie Hochschulen und Materialprüfungsanstalten eignen sich am besten für die wissenschaftliche Untersuchung von Einstürzen. Dies nicht nur wegen ihrem unparteiischen Verhalten, sondern auch wegen der hohen volkswirtschaftlichen Bedeutung, die die Bausubstanz eines Landes besitzt und den mit solchen Untersuchungen verbundenen hohen Kosten. Die Diffusion der aus solchen Untersuchungen gezogenen Lehren sollte möglichst schnell geschehen. Ein Beispiel dazu ist die Empa-Tagung über Korrosion, die wenige Monate nach dem Unfall im Hallenbad Uster stattfand.

Weil die unbekannten Versagensmechanismen vieler neuartiger Konstruktionen nicht an elektronischen Rechenanlagen simuliert werden können, führen innovative Ingenieure Modellversuche durch. Solche Versuche sind nicht nur kostenintensiv, sondern erfordern spezialisiertes Wissen und Erfahrung mit komplexen Prüfmaschinen und -methoden. Die staatliche Förderung von Versuchsanstalten kann deshalb einen bedeutenden Beitrag dazu leisten, die Innovationsfähigkeit im Ingenieurentwurf voranzutreiben und die Sicherheit von bestehenden und zukünftigen Bauwerken zu erhöhen. In diesem Zusammenhang wird oft vergessen, dass Technologie nicht in allen Fällen angewandte Wissenschaft ist, sondern dass Technologien oft entwickelt werden, bevor die wissenschaftlichen Grundlagen überhaupt vorhanden sind. Hängebrücken aus Seilen werden z.B. seit Jahrhunderten gebaut, obwohl die theoretischen Grundlagen für ihre Berechnung jüngeren Alters sind. Auch Flugzeuge flogen, bevor die Theorie der Aerodynamik entwickelt worden war. In beiden Fällen waren es technologische Entwicklungen, die den Anstoss für neue wissenschaftliche Disziplinen gaben. Ähnlich kann gezeigt werden, dass technologische Schwierigkeiten mit aussergewöhnlichen Strukturen, wie die Liberty-Schiffe, die Entstehung der Wissenschaft der Bruchmechanik anregten.

Der synthetischen Seite des Entwurfs wird in der Ausbildung und Praxis des Ingenieurs eine zu geringe Bedeutung beigemessen. Stattdessen werden vor allem analytische Fähigkeiten gefördert: Moderne Computeranlagen können ja alles berechnen. Diese Denkweise blockiert nicht nur die Entstehung von Innovationen, sondern zerstört den Reiz des Ingenieurberufs: «Der Ingenieur degradiert sich auf diese Weise zum Rechenknecht und macht sich mit fortschreitender Anwendung moderner Informations-Verarbeitungs-Technologie selbst überflüssig. Sture, sich oft

wiederholende Bemessungsaufgaben können allein vom Computer gelöst werden. Er [der Ingenieur, Anm. d. Verf.] muss ingeniös, das heisst erfinderisch, in Zusammenarbeit mit dem Architekten die der jeweiligen Aufgabe angemessene Lösung finden. Er muss sich zurückbesinnen, ein Baumeister zu sein, wie es die römischen Baumeister, die Kirchenbaumeister des Mittelalters und die Baumeister der Neuzeit wie Pier Luigi Nervi waren. Ein Baumeister ist von der Idee über den Entwurf bis zur Ausführung zuständig. Er kann sich für eine misslungene Gestaltung eines Bauwerks genauso wenig aus der Verantwortung stehlen, wie er es für einen durch fehlerhafte Berechnung oder Ausführung verursachten Einsturz kann» [16]. Teil dieser ethischen Verantwortung ist die Verpflichtung, aus den Fehlern anderer zu lernen und sogar Neues daraus zu erschaffen.

Adresse der Verfasser:
Roman Boutellier, Prof. Dr., Direktor Institut für Technologiemanagement, Universität St. Gallen, und *Ilías Ortega*, dipl. Bauing. ETH, lic. oec. HSG, Institut für Technologiemanagement, Abteilung für Innovation, Universität St. Gallen, Unterstrasse 22, 9000 St. Gallen

Anmerkungen

[1] Hier wird das Wort «paradigmatisch» im vor-Kuhnschen Sinne von Petroski verwendet, d.h. «paradigmatisch» mit der Bedeutung «beispielhaft». Siehe *Kuhn Th. S.*: The Structure of Scientific Revolutions. Second Edition, enlarged. The University of Chicago Press, Chicago 1970

[2] *Peck R.B.*: Where has all the Judgement gone? Norges Geotekniske Institutt, Publikasjon no. 134, 1981 in op. cit. [3], S. 8. Der Fall eines vermeidbaren, katastrophalen Dammbruchs ist in *Perrow Ch.*: Normal Accidents: Living with High-Risk Technologies. Basic Books, New York, 1984, S. 232-241, beschrieben.

[3] *Hauser R.*: Lessons from European Failures. In: Concrete International, S. 21-25, 1979, in op. cit. [3], S. 8-9

[4] Dasgupta benutzt nicht das Wort «Wissensobjekt», sondern «token», siehe dazu *Dasgupta S.*: Technology and Creativity. Oxford University Press, Oxford 1996, S. 32-33, wo er als Beispiele für «tokens» die Bewegungsgesetze von Kepler nennt.

[5] Dasgupta, op. cit., S. 183

[6] Siehe dazu *Levy M., Salvadori M.*: Why Buildings Fall down: How Structures Fail. Norton, New York 1994, S. 221-230; Petroski, op. cit. [3], S. 58 ff.; *Kaminetzky D.*: Design and Construction Failures: Lessons from Forensic Investigations. McGraw-Hill Inc., New York 1991, S. 217-220

[7] 40 Personen waren im Bad, als die Decke «wie ein Leintuch» sank. In «TagesAnzeiger», 21.05.1985

[8] Siehe dazu in «Neue Zürcher Zeitung»: Schweres Seilbahnunglück auf der Riederalp (16.12.1996), Technischer Fehler als Ursache des Seilbahnunglücks (17.12.1996) und Fehlkonstruktion Ursache des Seilbahnunglücks (18.12.1996)

[9] NZZ, 18.12.1996

[10] Sibly, Walker in: Petroski, op. cit. [3], S. 169

[11] Sibly, Walker in: Petroski, op. cit. [3], S. 168

[12] *Billington D.P., Goldsmith M.* in op. cit. [14], S. ix

[13] z.B. «Engineering Disasters: Learning from Failure» auf http://dol1.eng.sunysb.edu/disaster/

Literatur

[1]
Buchheim G., Sonnemann R. (Hrsg.): Geschichte der Technikwissenschaften. Birkhäuser Verlag, Basel 1990, S. 261

[2]
Mörsch E. (Hrsg.): Der Eisenbetonbau: Seine Theorie und Anwendung. Verlag von Konrad Wittwer, Stuttgart 1923, S. III

[3]
Petroski H.: Design Paradigms. Case Histories of Error and Judgment in Engineering. Cambridge University Press, Cambridge 1994

[4]
French M.: Invention and Evolution. Design in Nature and Engineering. Cambridge University Press, Cambridge 1994, S. 38

[5]
Galilei G.: Unterredungen und mathematische Demonstrationen über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend: Erster bis sechster Tag. Arcetri, 6. März 1638. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1985, S. 108-109

[6]
Thompson D.W.: On Growth and Form. Cambridge University Press, Cambridge 1995, S. 18

[7]
Peyer B.: Untersuchungsergebnisse zum Unglück im Hallenbad Uster. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 8, 1987, S. 184-185

[8]
Theiler F.: Korrosionsverhalten nichtrostender Stähle im Bauwesen. Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 45, 1985, S. 1113-1116

[9]
Popper K.: Alles Leben ist Problemlösen: Über Erkenntnis, Geschichte und Politik. Piper, München 1996, S. 36

[10]
Petroski H.: To Engineer is Human: The Role of Failure in Succesful Design. Vintage Books, New York 1992, S. 43 ff.

[11]
Sibly P.G.: The Prediction of Structural Failure. Dissertation, London University, London 1977 in: Petroski, op. cit. [3], S. 166 ff.

[12]
Sibly P.G., Walker A.C.: Structural Accidents and Their Causes. Proceedings of the Institution of Civil Engineers, Nr. 62, S. 191-208 in: Petroski, op. cit. [3], S. 166-167

[13]
Isler H.: Moderner Schalenbau. In «Gestalten in Beton: Zum Werk von Felix Candela. Die Kunst der leichten Schalen». Köln: Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln 1989, S. 61

[14]
Iyengar H.: Structural and Steel Systems. In Billington D.P., Goldsmith M. (Hrsg.) «Technique and Aesthetics in the Design of Tall Buildings: Fazlur Khan Memorial Session». Institute for the Study of the High-Rise Habitat, Lehigh University, Bethlehem, PA., 1986, S. 57

[15]
Leonhardt F.: Baumeister in einer umwälzenden Zeit: Erinnerungen. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1984, S. 159

[16]
Duda H., König G.: Ingenieurbauten aus Beton. Geschichte und Perspektive. In «Gestalten in Beton: Zum Werk von Pier Luigi Nervi». Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH, Köln 1989, S. 19-20