Zeitschrift: IABSE proceedings = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 13 (1989)
Heft: P-139: Damage analysis of steel structures

Artikel: Schäden an Stahltragwerken: eine Analyse
Autor: Oehme, Peter
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-41974

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: 25.08.2025

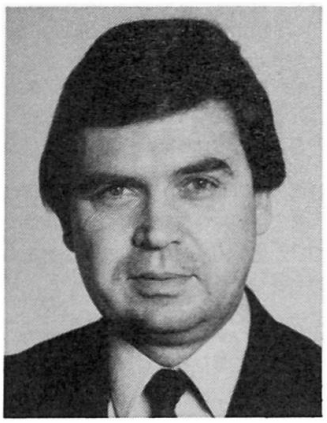
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schäden an Stahltragwerken – eine Analyse

Damage Analysis of Steel Structures

Analyse de dommages à des structures métalliques

Peter OEHME
Dr. sc. techn.
Ing.-Schule für Schwermaschinenbau
Leipzig, DDR



Peter Oehme, geboren 1941, promovierte an der Technischen Universität Dresden. Er ist Leiter der Hauptaussenstelle Leipzig der Ingenieurschule Rosswein und lehrt Baumechanik und Stahlbau. Daneben ist er seit vielen Jahren als Konsulent für Baumechanik an der Karl-Marx-Universität Leipzig tätig. Seit 1981 forscht er auf dem Gebiet der Tragwerksschäden.

ZUSAMMENFASSUNG

Es werden die wichtigsten Ergebnisse einer statistischen Schadenanalyse an hunderten von Stahltragwerken dargelegt. Sie beziehen sich auf die äusseren Erscheinungsbilder der Schäden, die Phasen des Schadeneintrittes, die Schadenursachen, die zum Schaden führenden Belastungs- und Beanspruchungsarten sowie die Schadenfolgen. Daraus werden Schlussfolgerungen für das Sicherheitssystem gezogen.

SUMMARY

The most important results of a statistical damage analysis of hundreds of steel structures are shown. They refer to external appearance, the phases when the damage occurred, causes of damage, loading and stressing types which had caused the damage as well as to the consequences of damage. Conclusions are drawn concerning the safety system.

RÉSUMÉ

Les résultats principaux d'une analyse statistique de dommages survenus à plusieurs centaines de structures métalliques sont exposés. Ils concernent le genre des dommages, les phases de l'apparition des dommages, les causes des dommages, les types de charges et de sollicitations entraînant ceux-ci ainsi que leurs conséquences. L'auteur en tire des conclusions pour un système de sécurité.

1. EINFÜHRUNG

Seit Beginn des 19. Jahrhunderts, als NAVIER den Übergang von der bis dahin üblichen handwerklich-empirischen Bemessung zur heutigen ingenieurmäßigen statischen Berechnung einleitete, hat das Bauingenieurwesen eine gewaltige Entwicklung vollzogen. Diese verlief nicht immer glatt. Die Ingenieure mußten eine Reihe von Rückschlägen in Form von teils schweren Bauschäden hinnehmen. Aber gerade diese Schäden haben in vielen Fällen die Forschung angeregt und damit zur Weiterentwicklung der Theorie beigetragen. Speziell auf dem Gebiet des Stahlbaus sei beispielhaft erinnert, daß

- durch den Einsturz der legendären Eisenbahnbrücke über den Firth of Tay in Schottland 1879 die Ingenieure eindringlich auf das Problem der statischen Windlasten hingewiesen wurden;
- der Einsturz der Münchensteiner Eisenbahnbrücke über die Birs in der Schweiz 1891 starken Einfluß auf die Knickuntersuchungen von ENGESSER und TETMAJER sowie die Entwicklung der Theorie der Nebenspannungen bei Fachwerken durch RITTER hatte;
- der Einsturz der Norddeichfunktürme 1925 in Deutschland die Problematik der Windbeanspruchung bei hohen turmartigen Tragwerken darlegte;
- die zahlreichen Sprödbruchschäden Ende der 30er Jahre dieses Jahrhunderts umfangreiche Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Sprödbruchsicherheit auslösten;
- die Einstürze mehrerer Großbrücken in Kastenträgerbauweise um 1970 das Augenmerk der Stahlbauforschung auf spezielle Beulprobleme lenkten.

Betrachtet man ein Stahltragwerk der heutigen Zeit, so werden an dieses im allgemeinen 3 Forderungen gestellt:

1. Es hat eine bestimmte Funktion zu erfüllen und muß dafür zweckmäßig sein.
2. Schäden an Stahltragwerken können das Leben oder die Gesundheit von Menschen gefährden. Zumindest werden durch solche Schäden (teils hohe) volkswirtschaftliche Verluste verursacht. Ein Stahltragwerk muß daher eine hinreichende Sicherheit aufweisen.
3. Die sparsamste Verwendung des Werkstoffes Stahl - bei gleichzeitig geringer lebendiger Arbeit - ist ein volkswirtschaftliches Gebot. Ein Stahltragwerk muß daher wirtschaftlich sein.

Zur Erstellung eines solchen Tragwerkes stehen dem Ingenieur heute moderne Hilfsmittel zur Verfügung. Hier sind neben hochentwickelten Methoden der Baumechanik, leistungsfähiger Rechentechnik und ausgereiften Verfahren zur Fertigung und Montage an vorderer Stelle die Stahlbauvorschriften (Berechnungs- und Bauvorschriften) zu nennen, die in der DDR im Vereinheitlichten Vorschriftenwerk des Stahlbaus zusammengefaßt sind und - wie in anderen fortgeschrittenen Industriestaaten - den neusten Stand von Wissenschaft und Technik berücksichtigen. Sie bilden den Kern eines umfassenden Systems zur Gewährleistung der bautechnischen Sicherheit der Stahltragwerke. Zum Sicherheitssystem gehören aber auch alle rechtlichen und anderen Bestimmungen zur Regelung der

- Qualitätssicherung,
- Prüfung der Dokumentation,
- Prüfungen und Kontrollen während der Fertigung und Montage,
- Freigabe zur Nutzung sowie
- Kontrollen während der Nutzung.

Das Sicherheitssystem umfaßt des weiteren die Qualitätssicherungssysteme der Betriebe und Kombinate sowie bestimmte staatliche Organe, insbesondere

- das Amt für Standardisierung, Meßwesen und Warenprüfung,
- die Staatliche Bauaufsicht,
- die Oberste Bergbehörde beim Ministerrat der DDR und
- das Staatliche Amt für Technische Überwachung,

zu deren Aufgaben in gesetzlich klar geregelter Abstimmung u.a. die Durchsetzung rechtlicher Vorschriften in Verbindung mit der Erstellung und Nutzung von Stahltragwerken gehört.

Trotz allem kam es in der Vergangenheit und kommt es auch noch heute zu Schäden an Stahltragwerken:

- Hallen stürzten unter Schneelasten ein,
- an Brücken wurden Risse oder schwere Korrosionsschäden festgestellt,
- Brüche an Tagebaugroßgeräten führten zu Havarien,
- Krane stürzten um oder wurden abgetrieben,
- Freileitungsmaste knickten unter Orkanbelastung ab.

Das führt zwangsläufig zu der Frage nach den Ursachen solcher Schäden. Die Auswertung eines Einzelschadensfalles kann dabei im allgemeinen nur Lehren für den einen konkreten Fall und eventuell ähnliche Umstände erbringen. Das kann, wie die einleitenden Beispiele beweisen, in bestimmten Fällen von großer Bedeutung sein. Weiterführende Erkenntnisse, die allgemeingültige Aussagen und daraus die Herleitung von Strategien zur Verminderung von Schäden insgesamt zulassen, kann einzig eine statistische Schadensanalyse erbringen. Sie setzt eine große Anzahl geklärter Einzelschadensfälle voraus, deren Einzeldaten es dann zulassen, Klassifizierungen vorzunehmen, Quantifizierungen durchzuführen, Häufigkeiten gegenüberzustellen und Kombinationen zwischen den einzelnen Merkmalen aufzustellen. Im folgenden wird von einer solchen Schadensanalyse berichtet, die vom Verfasser in den Jahren 1981 - 1986 durchgeführt wurde.

2. METHODIK UND MATERIAL

Die Analyse bezieht sich auf Stahltragwerke. Dabei wurden sowohl Tragwerke des Bauingenieurwesens als auch solche der Fördertechnik untersucht. Das erschien zweckmäßig, da das Vereinheitlichte Vorschriftenwerk des Stahlbaus der DDR beide Fachgebiete beinhaltet. Es wurden grundsätzlich nur Schäden an der tragenden Konstruktion, also z. B. keine Schäden an Hüll- und Ausbauelementen oder an maschinentechnischen Ausrüstungen, erfaßt. Keine Berücksichtigung fanden Schäden, die auf natürlichen Verschleiß zurückzuführen sind, durch Kriegseinwirkungen entstanden sind oder ihre Ursache in Erdbeben hatten.

Die Erfassung der Schäden erfolgte an Hand eines Fragespiegels, der eigens dafür entwickelt wurde. In ihm waren 14 Fragestellungen vorgegeben, die zum geringerem Teil verbal zu beantworten

waren, während beim größeren Teil Auswahlantworten vorgegeben wurden. Es gelang, insgesamt 448 Schadensfälle zu erfassen, die nach 1945 auf dem Gebiet der DDR aufgetreten sind und für die genügend Einzelinformationen für den Fragespiegel vorlagen. Quellen dieser Schäden waren insbesondere

- Ministerien, Kombinate, Betriebe, Hoch- und Fachschulen;
- Dienststellen der Deutschen Reichsbahn und des Straßenwesens;
- Kontroll- und Überwachungsorgane.

Lediglich 26 Fälle konnten offiziell zugänglicher Fachliteratur entnommen werden.

Die Tragwerke wurden entsprechend ihrer Zweckbestimmung und der für ihre Berechnung maßgebenden Vorschriften in 7 Tragwerksklassen (Tk) eingeteilt:

- Tk A: Hochbauten (Industrie- und Gesellschaftsbauten einschließlich Kranbahnen)
- Tk B: Straßenbrücken (einschließlich Fußgängerbrücken)
- Tk C: Eisenbahnbrücken
- Tk D: Tagebaugroßgeräte
- Tk E: Krane
- Tk F: Maste und Türme (einschließlich Schornsteine)
- Tk G: Sonstige Stahltragwerke.

In Tabelle 1 sind die 448 Schadensfälle den 7 Tragwerksklassen zugeordnet (Anzahl und Prozent).

Tragwerksklasse	Anz.	%
A: Hochbauten	202	45,1
B: Straßenbrücken	39	8,7
C: Eisenbahnbrücken	72	16,1
D: Tagebaugroßgeräte	36	8,0
E: Krane	67	15,0
F: Maste und Türme	26	5,8
G: Sonstige Stahltragwerke	6	1,3
Summe	448	100

Tabelle 1 Schäden nach Tragwerksklassen

Tabelle 2 gibt - in Zehnjahresintervallen zusammengefaßt - Auskunft über die Schadensjahre. Dabei signalisieren die Zahlen keineswegs ein krasses Ansteigen der Schadensfälle in den letzten 40 Jahren. Sie sind vielmehr Ausdruck dafür, daß der Verfasser bei seinen Recherchen mehr Wert auf neuere als auf ältere Schadensfälle gelegt hat, aber auch, daß in neuerer Zeit in verschiedenen Institutionen größeres Interesse zur Erfassung von Schäden besteht als in früheren Jahren.

Die Herstellungsjahre der Tragwerke liegen zwischen 1878 und 1983, wobei mehr als zwei Drittel nach 1945 errichtet wurden.

Schadensjahre	Anz.	%
1945 - 1954	8	1,8
1955 - 1964	83	18,5
1965 - 1974	109	24,3
1975 - 1984	246	54,9
unbekannt	2	0,5
Summe	448	100

Tabelle 2 Schadensjahre

3. ERGEBNISSE

3.1 Vorbemerkungen

Im folgenden werden die Ergebnisse der Schadensanalyse jeweils für alle 448 Tragwerke gesamt und nochmals für 3 Tragwerksgruppen getrennt abgegeben, in denen die 7 Tragwerksklassen wie folgt zusammengefaßt wurden:

- Hochbauten: Tragwerksklassen A, F und G
- Brücken: Tragwerksklassen B und C
- Fördertechnik: Tragwerksklassen D und E.

Alle zur Erläuterung kurz angerissenen Beispiele beziehen sich auf Schäden, die in der Analyse enthalten sind.

3.2 Äußere Erscheinungsbilder der Schäden

Nach ihrem äußeren Erscheinungsbild (E) wurden die Schäden den folgenden 9 Gruppen zugeordnet:

- E1: Einsturz des Tragwerkes (Darunter fallen auch Umsturz, z.B. eines Drehkranes, und Absturz, z.B. eines Brückenkranes von der Kranbahn.);
- E2: Einsturz eines Tragwerksabschnittes (z.B. eines Feldes einer Halle);
- E3: Plastische Deformation des Tragwerkes (Das Tragwerk ist zwar nicht eingestürzt, aber so stark plastisch deformiert, daß es seine Funktion im allgemeinen nicht mehr erfüllen kann.);
- E4: Plastische Deformation eines Tragwerksabschnittes;
- E5: Versagen eines Bauteiles, Anschlusses oder Stoßes, das nicht zu einem Folgeversagen gemäß der 4 ersten Anstriche führte (Bei Nichterkennung des Schadens wäre das Folgeversagen aber zu einem späteren Zeitpunkt mit großer Wahrscheinlichkeit eingetreten.);
- E6: Riß bzw. Risse (sowohl in Bauteilen, als auch in Schweißnähten);
- E7: Plastische Deformation eines Tragwerkselementes (lokale plastische Verformung, z.B. eines Trägers infolge Fahrzeuganpralls oder eines Stabes infolge Stabilitätsversagen);
- E8: Starke Korrosionserscheinung (Es wurden nur solche Schäden erfaßt, die bei Nichtbehebung zu einem späteren Zeit-

punkt mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem Folgeversagen gemäß der vier ersten Gruppen geführt hätten, also keine bloßen "Schönheitsfehler".);

- E9: Sonstiges (Erscheinungsbilder, die sich nicht in die obigen 8 Gruppen einstufen ließen).

Die Schäden wurden im allgemeinen nur einer Gruppe zugeordnet, und zwar der mit dem folgeschwersten Erscheinungsbild. Lediglich beim unabhängigen Auftreten von zwei Schadensbildern (z.B. Risse und starke Korrosionserscheinungen) wurden sie doppelt gezählt. Das Ergebnis ist in Tabelle 3 dargestellt.

Äußeres	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
Erscheinungsbild	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
1: Einsturz	51	10,0	31	11,6	2	1,5	18	16,4
2: Teileinsturz	67	13,1	35	13,1	1	0,8	31	28,2
3: Plast.Deform. Tragwerk	18	3,5	16	6,0	2	1,5	0	0
4: Plast.Deform. Tragw.abschn.	64	12,6	35	13,1	10	7,6	19	17,3
5: Bruch ohne Folgeversagen	37	7,3	16	6,0	10	7,6	11	10,0
6: Riß (Risse)	95	18,6	21	7,8	56	42,4	18	16,4
7: Plast.Deform. Tragw.element	40	7,8	26	9,7	6	4,5	8	7,3
8: Korrosion	98	19,2	57	21,3	40	30,3	1	0,9
9: Sonstiges	40	7,8	31	11,6	5	3,8	4	3,6
Summe	510	100	268	100	132	100	110	100

Tabelle 3 Äußere Erscheinungsbilder der Schäden

Betrachtet man die Gesamtheit der Schadensbilder, stehen starke Korrosions- und Rißerscheinungen in gleicher Größenordnung an vorderer Stelle. Danach rangieren - ebenfalls in gleicher Größenordnung - Einstürze sowie plastische Deformationen von Tragwerksabschnitten. Eine getrennte Betrachtung der 3 Tragwerksgruppen läßt aber große Unterschiede erkennen.

Bei den Hochbauten dominieren die Korrosionsschäden. Aber auch alle anderen Erscheinungsbilder sind in nicht vernachlässigbarer Größenordnung vertreten.

Bei den Brücken sind fast drei Viertel der Erscheinungsbilder Risse oder starke Korrosion. Schwere Schäden (erste 3 Gruppen) traten fast keine auf.

Ganz anders sieht es bei den Stahltragwerken der Fördertechnik aus. Hier treten am häufigsten Einstürze von Tragwerksabschnitten auf. Danach folgen in gleicher Größenordnung plastische Deformationen von Tragwerksabschnitten, Tragwerkseinstürze und Brüche ohne Folgeversagen.

3.3 Phasen des Schadenseintrittes

Die Schäden ereignen sich

- während der Baudurchführung (sowohl in der Werkstatt als auch (hauptsächlich) bei der Montage),
- unmittelbar nach Nutzungsbeginn (das kann z.B. bei einer Halle auch nach mehreren Monaten sein, wenn sie erstmals eine Schneelast aufzunehmen hat) sowie
- während der Nutzungsphase des Tragwerkes.

Eine Einstufung der Schäden in diese 3 Phasen zeigt Tabelle 4 (2 Schäden traten am gleichen Tragwerk in 2 Phasen auf.)

Schadensphase	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
Baudurchführung	47	10,5	39	16,6	7	6,3	1	1,0
Nutzungsbeginn	37	8,2	27	11,5	5	4,5	5	4,9
Nutzung	366	81,3	169	71,9	100	89,3	97	94,2
Summe	450	100	235	100	112	100	103	100

Tabelle 4 Schäden nach der Phase ihres Eintritts

Erwartungsgemäß ereignen sich die meisten Schäden während der Nutzungsphase der Tragwerke, doch ist auch der Anteil der Schäden in der Bauphase sowie unmittelbar nach Nutzungsbeginn bei den Hochbauten relativ hoch. Bei den Tragwerken der Fördertechnik sind in der Bauphase praktisch keine Schäden zu verzeichnen. Das ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, daß es sich hier in vielen Fällen um Serienerzeugnisse mit erprobten Montagetechnologien handelt und ein hoher Vorfertigungsgrad in der Werkstatt erreicht wird.

Die in der Nutzungsphase aufgetretenen Schäden wurden nochmals nach den Nutzungsjahren bis zum Schadenseintritt gegliedert. Das Ergebnis, in Zehnjahresintervalle zusammengefaßt, kann Tabelle 5 entnommen werden.

Der Hauptanteil der Schäden in der Nutzungsphase tritt - verglichen mit den anderen Zehnjahresintervallen - in den ersten 10 Jahren der Nutzung auf. Bei den Tragwerken der Fördertechnik wird offensichtlich, daß ihre projektierte Nutzungsdauer von vornherein kleiner ist als die der Brücken und Hochbauten.

3.4 Schadensursachen

3.4.1 Definition der Ursachenklassen

Das Hauptanliegen der Schadensanalyse war die Untersuchung der Schadensursachen. Dazu war es erforderlich, die einzelnen Schäden zu klassifizieren. Unter Berücksichtigung der Zielstellung der Analyse erwies es sich nach einer Reihe von Voruntersuchungen als zweckmäßig, eine Einteilung in folgende 5 Ursachenklassen (Uk) vorzunehmen:

Nutzungsjahre	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
1 - 10	115	31,4	55	32,5	27	27,0	33	34,0
11 - 20	80	21,9	31	18,3	8	8,0	41	42,3
21 - 30	32	8,7	17	10,1	5	5,0	10	10,3
31 - 40	15	4,1	7	4,1	5	5,0	3	3,1
41 - 50	30	8,2	21	12,4	7	7,0	2	2,1
51 - 60	20	5,5	8	4,7	12	12,0	0	0
61 - 70	29	7,9	9	5,3	20	20,0	0	0
71 - 80	11	3,0	5	3,0	6	6,0	0	0
>80	8	2,2	1	0,6	7	7,0	0	0
unbekannt	26	7,1	15	8,9	3	3,0	8	8,2
Summe	366	100	169	100	100	100	97	100

Tabelle 5 Schäden nach Nutzungsjahren des Tragwerks

- Uk 1: Zufallsereignisse 1. Art
- Uk 2: Zufallsereignisse 2. Art
- Uk 3: Phänomene, die mit dem Stand von Wissenschaft und Technik a priori nicht erkannt werden konnten
- Uk 4: Pflichtverletzungen
- Uk 5: Menschliches Versagen.

Die einzelnen Klassen wurden wie folgt abgegrenzt:

Uk 1: Zufallsereignisse 1. Art

Sie umfaßt die Schadensfälle, die durch Zufallsereignisse im Sinne der probabilistischen Betrachtungsweise der Tragwerkssicherheit ausgelöst wurden (zufällige Überschreitung von in der Berechnung gemäß Vorschrift angesetzten Lasten, Unterschreitung von Werkstoff- oder Querschnittskenngrößen). Die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens (Versagenswahrscheinlichkeit) kann unter der Voraussetzung des Vorliegens entsprechender Wahrscheinlichkeitsverteilungen mittels der Zuverlässigkeitsanalyse abgeschätzt werden.

Typisches Beispiel:

4 Tragmaste einer 220 kV-Hochspannungsleitung mit Höhen zwischen 27 m und 39 m waren oberhalb des untersten Schusses umgebrochen. Ursache war eine örtlich aufgetretene Windhose mit wesentlich höheren Windgeschwindigkeiten, als gemäß Vorschrift angesetzt werden.

Uk 2: Zufallsereignisse 2. Art

In diese Ursachenklasse wurden die Schadensfälle eingestuft, die durch seltene, außergewöhnliche Zufallsereignisse ausgelöst wurden, für deren Eintreten das Tragwerk nicht bemessen wurde, weil ihr Auftreten nicht oder kaum angenommen werden konnte. Die Wahrscheinlichkeit ihres Auftretens kann im allgemeinen nicht mittels der Zuverlässigkeitsanalyse abgeschätzt werden.

Typisches Beispiel:

Durch einen Rohrreißer im Drucksystem eines Dampferzeugers kam

es zu einer explosionsartigen Verpuffung mit anschließender Druckwelle. Dadurch entstanden plastische Deformationen an mehreren Tragelementen des Dampferzeugergerüstes.

Uk 3: Objektiv unbekannte Phänomene

Die Ursachenklasse beinhaltet Schäden, die insbesondere beim Betreten von wissenschaftlich-technischem Neuland durch objektiv unbekannte Gefährdungen entstehen können.

Typisches Beispiel:

Vor Jahren traten an Tagebaugroßgeräten Ermüdungsbrüche auf, deren Ursache zunächst nicht erklärbar war. Man stieß auf das Phänomen der Flatterschwingungen, das bis zu diesem Zeitpunkt unbekannt war. Erst danach konnten entsprechende Abwehrmaßnahmen ergriffen werden.

Uk 4: Pflichtverletzungen

Hier wurden solche Schäden eingeordnet, die durch bewußte oder unbewußte Pflichtverletzungen von Menschen in den Phasen der Projektierung, der Bauausführung, der Nutzung oder bei anderen Tätigkeiten (z.B. Reparaturen) hervorgerufen wurden, also grundsätzlich vermeidbar gewesen wären.

Typische Beispiele:

- Projektierungsphase: Durch eigenmächtiges Umwandeln eines Laschenstoßes in einen Flanschstoß im Binderuntergurt einer Halle durch einen Konstrukteur, der eine Zulassung vortäuschte, kam es bei der Eindeckung des Daches mit Stahlbetonhohldielen zum Einsturz von 3 Hallenfeldern.
- Bauphase: Bei der Montage einer Metalleichtbauhalle kam es zum Einsturz, als 8 der 12 Felder montiert waren. Der Bauleiter war eigenmächtig vom Montageprojekt abgewichen und hatte auf die Verankerung der Stützenfüße mit dem Fundamentbalken verzichtet.
- Nutzungsphase: Eine Lagerhalle wurde unter Mißachtung der zulässigen Schütthöhen derartig hoch mit Schüttgut (Getreide) ausgefüllt, daß es durch die gegenüber der Berechnung viel zu großen und höher angreifenden Horizontalkräfte zum Einsturz kam.

Uk 5: Menschliches Versagen

Die Ursachenklasse umfaßt Schäden, die von Menschen in den Phasen der Projektierung, der Nutzung, der Bauausführung oder bei anderen Tätigkeiten verursacht wurden, ohne daß bei der den Schaden auslösenden Handlung eine Pflichtverletzung vorliegt. Der Schadensverursacher hat in bester Absicht gehandelt, aber ohne ihm anzulastendes Verschulden z. B. einen Irrtum begangen oder einen Einfluß nicht beachtet.

Typische Beispiele:

- Projektierungsphase: Bereits unmittelbar nach Inbetriebnahme kam es bei einer Signalbrücke zu starken Schwingungserscheinungen. In der statischen Berechnung waren keine Fehler enthalten. Die Schwingungen der relativ leichten Konstruktion wurden vermutlich durch Resonanzerscheinungen hervorgerufen.
- Bauphase: Bei einem Tagebaugroßgerät kam es nach mehrjähriger Nutzung zu einem Dauerbruch einer Schweißnaht. Als Ursache wird ein Mangel in der Ausführung der Schweißnaht angesehen,

der dem Schweißer nicht bewußt war. Für die vorliegende Ausführungsklasse der Schweißnaht war kein Kontrollnachweis erforderlich.

- Nutzungsphase: Durch zu starke Flugstaubablagerung kam es nach vieljähriger Nutzung zum Teileinsturz des Daches einer Halle eines Zementwerkes. Der Nutzer hatte die Gefährdung der Konstruktion infolge dieser Belastung offensichtlich nicht erkannt.

Bei einer Reihe von Schadensfällen gab es mehrere Schadensursachen. Soweit diese der gleichen Ursachenklasse angehörten, wurden sie nur einmal gewertet (z.B. Pflichtverletzung sowohl in Projektierungs- als auch Bauausführungsphase). Waren dagegen zwei verschiedene Ursachenklassen maßgebend (z.B. ein Zufallsereignis 2. Art in Verbindung mit menschlichem Versagen, etwa bei der Nutzung), wurden beide in die Auswertung einbezogen.

3.4.2 Ergebnis der Auswertung

Das Ergebnis der Einstufung der Schadensursachen in die 5 Ursachenklassen ist aus Tabelle 6 ersichtlich.

Pflichtverletzungen als Schadensursache stehen an erster Stelle, sowohl bei der Betrachtung der Gesamtheit der Tragwerke als auch der Tragwerksgruppen im einzelnen. Danach folgt die als "Menschliches Versagen" definierte Ursachenklasse. Addiert man die Prozentwerte dieser beiden Ursachenklassen, deren Grenzen sowieso fließend ineinander übergehen, so kommt man zu der Aussage, daß 75 % der Schadensursachen unmittelbar auf den Faktor Mensch zurückzuführen sind. Bei der Auswertung von 116 Schadensfällen an Stahltragwerken des Auslandes nach 1945, die hauptsächlich deutschsprachiger Literatur entnommen wurden und aus Vergleichsgründen parallel ausgewertet wurden, kam der Verfasser zu einem fast identischen Ergebnis. Interessant ist auch die Tatsache, daß diese für den Stahlbau gefundene Aussage prinzipiell mit derjenigen von MATOUSEK und SCHNEIDER /1/ übereinstimmt. Obwohl diese bei ihrer Analyse von rund 800 Bauwerksschäden von Bauwerken verschiedener Bauweisen andere Auswertungskriterien heranzogen, kamen sie zu dem Ergebnis, daß 75 % der Schäden (und 90 % der Schadenssumme) auf menschliche Fehlleistungen zurückzuführen sind.

Betrachtet man dagegen in Tabelle 6 die Ursachenklassen 1 bis 3, die die Schäden aus akzeptierten bekannten bzw. objektiv unbekannten Gefährdungen repräsentieren, so ist dort die Anzahl der Schadensursachen wesentlich geringer.

Bei einem Vergleich der Ergebnisse der 3 Tragwerksgruppen mit den Gesamtergebnissen werden Unterschiede deutlich.

Bei den Hochbauten weicht die Rangfolge nicht ab, doch liegen sowohl die Pflichtverletzungen als auch beide Zufallsklassen über dem Durchschnitt. Zufallsereignisse 2. Art ergeben sich dabei insbesondere bei Industriebauten aus dem technologischen Prozeß.

Auch bei den Brücken ist die gleiche Rangfolge zu verzeichnen, doch weichen die relativen Häufigkeiten teils erheblich vom Durchschnitt ab. Der relativ hohe Anteil der Ursachenklasse 3 ist insbesondere auf Neukonstruktionen leichterer Bauweise zurückzuführen, bei denen Lehrgeld bezahlt werden mußte.

Ursachenklasse	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
1: Zufallsereignisse 1. Art	24	4,2	15	5,4	1	0,6	8	7,0
2: Zufallsereignisse 2. Art	31	5,5	24	8,7	5	2,9	2	1,7
3: Unbekannte Phänomene	85	15,0	29	10,5	49	28,0	7	6,1
4: Pflichtverletzungen	294	52,0	157	56,9	62	35,4	75	65,2
5: Menschliches Versagen	132	23,3	51	18,5	58	33,1	23	20,0
Summe	566	100	276	100	175	100	115	100

Tabelle 6 Schadensursachen

Bei den Stahltragwerken der Fördertechnik ist eine veränderte Reihenfolge festzustellen. Auffällig ist die überdurchschnittliche Repräsentanz der Ursachenklasse 4, auf die im nächsten Abschnitt mit eingegangen wird.

In den Ursachenklassen 4 und 5 wurde nochmals eine Aufspaltung nach derjenigen Phase vorgenommen, in der der zum Schaden führende Fehler oder Mangel lag. Wenn dabei innerhalb der gleichen Ursachenklasse Fehler oder Mängel in zwei Phasen auftraten (z.B. sowohl bei der Projektierung als auch bei der Nutzung), wurden beide gewertet.

3.4.3 Spezifikation der Ursachenklasse 4

Das Ergebnis der weiteren Untergliederung der Ursachenklasse 4 (Pflichtverletzungen) zeigt Tabelle 7.

Pflichtverletzung bei	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
Projektierung	56	16,7	46	24,9	5	7,7	5	5,8
Bauausführung	89	26,5	62	33,5	11	16,9	16	18,6
Nutzung	158	47,0	57	30,8	47	72,3	54	62,8
Sonstigem	33	9,8	20	10,8	2	3,1	11	12,8
Summe	336	100	185	100	65	100	86	100

Tabelle 7 Phasen des Bauprozesses der zum Schaden führenden Pflichtverletzungen

Insgesamt gesehen steigen die Pflichtverletzungen von der Projektierungsphase über die Bauphase hin zur Nutzungsphase an. Betrachtet man die Tragwerksgruppen im einzelnen, ergeben sich Unterschiede.

In der Projektierungsphase fällt der hohe Anteil der Fehler bei den Hochbauten auf (46 von 56). Die Begründung ergibt sich aus der Tatsache, daß insbesondere Industriebauten nicht nur von reinen Stahlbaubetrieben projektiert werden, sondern auch von Betrieben und Entwurfsgruppen aus anderen Bereichen. Brücken, Tagebaugroßgeräte und Krane werden dagegen fast ausschließlich von darauf spezialisierten Betrieben berechnet und konstruiert.

Eine weitere Aufspaltung der 56 Projektierungsfehler nach ihrer Quelle ergab folgendes Bild:

- Konstruktion	24 ≙ 42,8 %
- Statische Berechnung	14 ≙ 25,0 %
- Statik und Konstruktion	14 ≙ 25,0 %
- Sonstiges	4 ≙ 7,2 %.

Es führen also mehr Konstruktionsfehler zu Tragwerksschäden als solche in der statischen Berechnung.

Auch in der Bauausführungsphase treten die mit Abstand meisten Fehler und Mängel bei den Hochbaukonstruktionen auf. Die Begründung ist die analoge wie bei der Projektierung.

Die 89 Fehler und Mängel während der Bauausführung wurden weiter untergliedert. Es ergab sich folgende Verteilung:

- Montage	55 ≙ 61,8 %
- Werkstattfertigung	15 ≙ 16,9 %
- Konservierung	10 ≙ 11,2 %
- Sonstiges	9 ≙ 10,1 %.

Die Zahlen weisen auf die große Bedeutung des Montagevorganges bei Stahltragwerken hin, wobei Montagefehler oft drastische Folgen nach sich ziehen. So sind von den 51 Einstürzen (Tabelle 3) 13 und von den 67 Teileinstürzen 12 auf Pflichtverletzungen bei der Montage zurückzuführen.

Die mit Abstand meisten Pflichtverletzungen treten in der Nutzungsphase auf. Eine weitere Aufgliederung der 158 Nutzungsfehler erbrachte das folgende Ergebnis:

- Mangelnde Instandhaltung	84 ≙ 53,2 %
- Eigentliche Nutzungsfehler	69 ≙ 43,7 %
- Sonstiges	5 ≙ 3,1 %.

Betrachtet man dabei die einzelnen Tragwerksgruppen für sich, sind große Unterschiede zu verzeichnen. Während bei den Hochbauten (63,2 %) und den Brücken (74,5 %) mangelnde Instandhaltung dominiert, sind es bei den Stahltragwerken der Fördertechnik mit 74,1 % die eigentlichen Nutzungsfehler. Diese Unterschiede erscheinen verständlich, da es sich z.B. bei Kranen um bewegliche Maschinen handelt und die Wahrscheinlichkeit, bei der eigentlichen Nutzung einen Fehler zu begehen (Überschreitung der Höchstlast, Schrägzug usw.) von vornherein größer ist als z.B. bei einer Brücke.

Die in Tabelle 7 ausgewiesenen 33 Pflichtverletzungen bei Sonstigem beziehen sich insbesondere auf solche bei Reparatur- oder Rekonstruktionsarbeiten, Arbeiten der Ausrüstungsbetriebe bei Industrieanlagen, Fehler bei der Stahlherstellung oder beim Walzvorgang u.a.

3.4.4 Spezifikation der Ursachenklasse 5

Das Ergebnis der weiteren Untergliederung der Ursachenklasse 5 (Menschliches Versagen) ist aus Tabelle 8 ersichtlich.

Menschliches Versagen bei	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
Projektierung	100	65,4	31	50,8	55	83,3	14	53,8
Bauausführung	13	8,5	1	1,6	8	12,1	4	15,4
Nutzung	28	18,3	23	37,7	1	1,5	4	15,4
Sonstigem	12	7,8	6	9,8	2	3,0	4	15,4
Summe	153	100	61	100	66	100	26	100

Tabelle 8 Phasen des Bauprozesses des zum Schaden führenden menschlichen Versagens

Fast zwei Drittel der Schadensquellen liegen hier in der Projektierungsphase. Eine weitere Aufgliederung zeigt folgende Verteilung:

- Konstruktion 68 ≙ 68,0 %
- Statik und Konstruktion 21 ≙ 21,0 %
- Statische Berechnung 5 ≙ 5,0 %
- Sonstiges 6 ≙ 6,0 %.

Es zeigt sich, daß die Schadensquelle weitaus am häufigsten in der Konstruktionsphase liegt. Dabei muß aber nochmals darauf verwiesen werden, daß es sich hierbei nicht um eigentliche Fehler handelt, sondern meist um konstruktive Lösungen, die nach bestem Wissen und Gewissen des Konstrukteurs gefunden wurden, die sich dann aber in der Praxis nicht bewährt haben und zu Schäden führten.

3.5 Zum Schaden führende Belastungs- bzw. Beanspruchungsart

In der für alle Stahltragwerke der DDR geltenden Grundvorschrift des Vereinheitlichten Vorschriftenwerkes des Stahlbaus TGL 13 500 /2/ werden im allgemeinen der

- statische Spannungsnachweis,
- Stabilitätsnachweis,
- Ermüdungsfestigkeitsnachweis,
- Standsicherheitsnachweis und
- Formänderungsnachweis

gefordert.

Stahltragwerke können weiter insbesondere durch

- Sprödbruch (Absicherung durch entsprechende Auswahl der Stahlsorte),
- Umwelteinwirkung (Absicherung durch Auswahl des entsprechenden Korrosionsschutzsystems) und
- Wärmeeinwirkung (Absicherung durch verschiedene Maßnahmen)

gefährdet werden.

Tabelle 9 vermittelt einen Überblick, durch welche Einwirkungen die Schäden ausgelöst wurden, wobei in einigen Fällen zwei Einwirkungen gleichzeitig maßgebend waren.

Einwirkung	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
Stat. Festigkeit	161	29,7	102	33,6	19	14,8	40	36,0
Stabilität	87	16,0	62	20,4	11	8,6	14	12,6
Ermüdungsfest.	92	16,9	8	2,6	49	38,3	35	31,5
Standsicherheit	44	8,1	25	8,2	2	1,6	17	15,3
Elast.Verformung	15	2,8	14	4,6	1	0,8	0	0
Sprödbruch	15	2,8	9	3,0	5	3,9	1	0,9
Umwelt	101	18,6	59	19,4	41	32,0	1	0,9
Wärme	23	4,2	23	7,6	0	0	0	0
Sonstige	5	0,9	2	0,7	0	0	3	2,7
Summe	543	100	304	100	128	100	111	100

Tabelle 9 Zum Schaden führende Einwirkung

- Es zeigt sich, wie erwartet, daß die maßgebenden zum Schaden führenden Einwirkungen stark von der jeweiligen Tragwerksgruppe abhängig sind. Das wird noch deutlicher, wenn man die einzelnen Tragwerksklassen getrennt betrachtet. So treten z.B. Ermüdungsrisse bei den Eisenbahnbrücken wesentlich häufiger auf als bei den Straßenbrücken und Standsicherheitsfragen spielen bei den Kranen natürlicherweise eine größere Rolle als bei den Tagebaugroßgeräten.

Auf eine weitere Kommentierung von Tabelle 9 kann verzichtet werden.

3.6 Schadensfolgen

Ein Tragwerksschaden ist zunächst immer ein Sachschaden, der in einem Geldwert ausgedrückt werden kann (z.B. Reparaturkosten). Bei den in der Analyse enthaltenen Fällen liegt dieser zwischen einigen wenigen Mark (z.B. bei einem Riß, der nur angebohrt, aber ansonsten belassen wird) bis zu mehreren Millionen Mark. In den meisten Fällen ziehen Tragwerksschäden aber noch Folgeschäden nach sich.

Als am häufigsten vorkommende Folgeschäden wurden in der Analyse für die einzelnen Tragwerksklasse ermittelt:

- Hochbauten:
  - Produktionsausfall (bei Industriebauten mit Abstand häufigster Folgeschaden)
  - Nutzungsunfähigkeit oder -einschränkungen (z.B. von Lagerhallen, aber auch Gesellschaftsbauten)
  - Energieausfall (z.B. bei Dampferzeugergerüsten)
- Straßenbrücken:
  - Verkehrseinschränkungen (z.B. Geschwindigkeitsbeschränkungen, Sperrung einer Spur, Tragfähigkeitsbeschränkungen)

- totale oder zeitweilige Sperrungen

- Eisenbahnbrücken:
  - Verkehrseinschränkungen (insbesondere Langsamfahrstellen und Teilsperrungen)
  - kurzfristige Vollsperrungen

- Tagebaugroßgeräte:
  - Produktionsausfall an Kohle bzw. Abraum

- Krane:
  - Produktionsausfall (bzw. Terminverzögerungen auf Baustellen)
  - Beschädigung weiterer Objekte (z.B. bei Umstürzen)

- Maste und Türme:
  - Energieausfall (bei Freileitungsmasten)
  - Produktionsausfall (bei Schornsteinen).

Wie die Betrachtung der Einzelfälle zeigt, können die in Geldwert ausgedrückten Folgeschäden die Sachschäden um ein vielfaches übertreffen. Das sollen die folgenden Beispiele belegen:

- Deformationsschaden an einem Gewächshaus (dadurch Herausfallen der Hüllelemente)
  Sachschaden: geringfügig
  Folgeschaden: vernichtete Nelkenkulturen im Wert von etwa 1 Million Mark

- Anprallschaden an einer Straßenbrücke über einen Fluß
  Sachschaden: 50 000 M
  Folgeschaden: 3 Millionen Mark (geschätzte Umleitungskosten für den Schwerverkehr)

- Beschädigung der Hauptschwinge einer Abraumförderbrücke
  Sachschaden: 130 000 M
  Folgeschaden: Produktionsverlust an Kohle und Abraum von etwa 6 Millionen Mark

- Umsturz eines Mobildrehkranes
  Sachschaden: 45 000 M
  Folgeschaden: 1 700 000 M (Produktionsausfall).

Die wirkliche Größe eines Schadens kann daher nur durch die Summe K des in Geldwert ausgedrückten Sach- und Folgeschadens dargestellt werden. Dazu wurden 4 Schadensklassen (Sk) mit folgender Definition gebildet:

- Sk I	: kleiner Schaden		$K < 10\,000$ M
- Sk II	: mittlerer Schaden	$10\,000$ M	$\leq K < 100\,000$ M
- SK III	: großer Schaden	$100\,000$ M	$\leq K < 1\,000\,000$ M
- SK IV	: sehr großer Schaden	$1\,000\,000$ M	$\leq K$

Eine Einstufung der 448 Schadensfälle in die 4 Schadensklassen erbrachte das Ergebnis der Tabelle 10.

Tabelle 10 widerspiegelt nicht die Verteilung der wirklich aufgetretenen Schäden, da insbesondere kleine Schäden - die im Rahmen der Analyse in die Schadensklasse I gehören würden - oft nur wenigen Personen bekannt und hier nicht enthalten sind. Sie repräsentiert aber überschlägig den gesamtvolkswirtschaftlichen Verlust, der durch die in der Analyse enthaltenen Schadensfälle verursacht wurde.

Schadensklasse	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
I : klein	97	21,7	39	16,7	27	24,3	31	30,1
II : mittel	203	45,3	108	46,2	59	53,2	36	35,0
III : groß	105	23,4	68	29,1	13	11,7	24	23,3
IV : sehr groß	43	9,6	19	8,1	12	10,8	12	11,6
Summe	448	100	234	100	111	100	103	100

Tabelle 10 Schadensfälle nach Schadensklassen

Interessant erschien eine Kombination der Schadensursachen mit den Schadensklassen. Während Tabelle 6 die Schadensursachen bezogen auf die Anzahl der Schäden zeigte, gehen aus Tabelle 11 die Schadensursachen bezogen auf die Schadenssumme hervor. Im Vergleich mit der ersten Spalte der Tabelle 6 zeigt Tabelle 11, daß eine Wichtung der Schadensursachen nach den Schadenssummen bei den Ursachenklassen 1 und 4 praktisch keine und bei der Ursachenklasse 5 geringfügige (Abnahme) Veränderungen erbringt. Bei der Ursachenklasse 2 ist eine Zunahme und bei der Ursachenklasse 3 eine Abnahme deutlich. Letzteres bedeutet, daß Zufallsereignisse 2. Art häufiger, dagegen unbekannte Phänomene weniger zu schwerwiegenden Schäden führen.

Ursachenklasse	Schadensklasse							
	I klein		II mittel		III groß		IV sehr groß	
	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
1: Zufallsereignisse 1. Art	4	3,5	10	3,7	8	6,4	2	3,7
2: Zufallsereignisse 2. Art	2	1,7	13	4,8	8	6,4	8	14,8
3: Unbekannte Phänomene	18	15,5	47	17,3	14	11,2	6	11,1
4: Pflichtverletzungen	61	52,6	138	50,9	68	54,4	27	50,0
5: Menschliches Versagen	31	26,7	63	23,3	27	21,6	11	20,4
Summe	116	100	271	100	125	100	54	100

Tabelle 11 Schadensursachen nach Schadensummen

Bei 22 der 448 Schadensfälle waren Personenschäden (25 Verletzte, 20 Tote) zu beklagen. 21 dieser 22 Fälle traten in Verbindung mit den Schadensbildern Einsturz, Teileinsturz sowie Absturz von Elementen (in Tafel 3 in Gruppe 9 enthalten) auf. Mit 65 % der

Schadensursachen sind Pflichtverletzungen noch stärker vertreten als bei der Betrachtung aller Fälle (52 %, Tabelle 6). Auf eine weitere statistische Untersuchung dieser doch relativ geringen Anzahl von Fällen wird verzichtet.

3.7 Schadensverursacher

Unabhängig von den Schadensursachen, die im Unterkapitel 3.4 dargelegt sind, wurde der Verursacher des jeweiligen Schadens ermittelt. Darunter wird diejenige juristische Person in Form eines Betriebes oder einer anderen Institution verstanden, die das Stahltragwerk projektiert, gefertigt oder montiert hat bzw. es nutzt und in deren Verantwortungsbereich der Ursprung des Schadens (z. B. Fehler oder Mangel) liegt. Schadensverursacher kann auch eine Einzelperson sein (z.B. ein LKW-Fahrer, der bei der Überfahrt oder Durchfahrt eine Brücke beschädigt). Ein Schadensverursacher im Sinne dieser Auswertung liegt immer dann vor, wenn es sich um einen Schaden der Ursachenklasse 4 (Pflichtverletzung) oder 5 (Menschliches Versagen) handelt. Bei Schäden der Ursachenklasse 2 (Zufallsereignis 2. Art) kann ein Verursacher vorliegen (z.B. Nutzer), muß aber nicht vorhanden sein. Bei Schäden der Ursachenklassen 1 (Zufallsereignis 1. Art) und 3 (objektiv unbekannte Phänomene) wurde kein Schadensverursacher eingetragen. Es muß noch betont werden, daß zwischen dem Schadensverursacher im Sinne dieser Auswertung und einer rechtlichen Verantwortlichkeit desselben kein kausales Verhältnis besteht. Die Ergebnisse der Einstufung sind in Tabelle 12 dargelegt.

	Gesamt		Hochbau		Brücken		Fördert.	
Schadensverursacher	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%	Anz.	%
Projektierungsbetrieb	156	30,7	76	28,8	60	43,5	20	18,7
Fertigungsbetrieb	36	7,1	13	4,9	12	8,7	11	10,3
Montagebetrieb	68	13,4	51	19,3	8	5,8	9	8,4
Rechtsträger	202	39,7	99	37,5	42	30,4	61	57,0
Nutzer (wenn ≠ Rechtsträger)	11	2,2	0	0	11	8,0	0	0
Sonstige	35	6,9	25	9,5	5	3,6	6	5,6
Summe	509	100	264	100	138	100	107	100

Tabelle 12 Schadensverursacher

Bei der Betrachtung dieser Tabelle ist zu beachten, daß der Begriff Projektierungsbetrieb im erweiterten Sinne sowohl den Ersteller des eigentlichen Projekts (Projektzeichnungen, statische Berechnung) als auch den der Konstruktionsunterlagen beinhaltet, obwohl Projektierung und Konstruktion teilweise nicht vom gleichen Betrieb durchgeführt werden. Die in der 5. Zeile aufgeführten Nutzer, die nicht gleichzeitig Rechtsträger sind, gibt es nur bei Brückenbauten.

Das Gesamtergebnis weist die Rangfolge Rechtsträger - Projektierungsbetrieb - Montagebetrieb - Fertigungsbetrieb auf, während

es bei der Betrachtung der Tragwerksgruppen im einzelnen Unterschiede gibt.

3.8 Schadensbehebung

Im Fragespiegel war nach der Art der Schadensbehebung bei den 448 Schadensfällen gefragt. Die teils sehr unterschiedlichen Maßnahmen können wie folgt zusammengefaßt werden:

- In 299 Fällen (66,7 %) konnte der Schaden durch Reparaturmaßnahmen beseitigt werden, wobei unter diesem Begriff im erweiterten Sinne auch Verstärkungsmaßnahmen, Hilfsabstützungen u.ä. verstanden werden sollen.
- 49mal (10,9 %) war ein Neubau, also eine Ersatzinvestition notwendig.
- 23mal (5,1 %) war ein Wiederaufbau des vorhandenen (im allgemeinen eingestürzten) Tragwerkes möglich.
- In 19 Fällen (4,2 %) wurde das beschädigte Tragwerk abgerissen, ohne daß es durch ein neues ersetzt wurde.
- 15mal (3,4 %) mußte ein Tragwerksabschnitt ersetzt werden.
- In 10 Fällen (2,2 %) war der Schaden zum Zeitpunkt der Schadenserfassung noch gar nicht behoben.
- 5mal (1,1 %) wurde das Tragwerk umgebaut.
- In weiteren 5 Fällen (1,1 %) wurden sonstige Behebungsmaßnahmen ergriffen.
- Bei 23 Fällen (5,1 %) konnte die Art der Schadensbehebung nicht ermittelt werden.

3.9 Sonstige Ergebnisse

Es wurden einige wichtige Ergebnisse der Schadensanalyse dargelegt. Die vollständige Analyse ist wesentlich umfassender /3/. In ihr sind die Ergebnisse der Tabellen 3 bis 10 sowie 12 bis auf die Tragwerksklassen aufgeschlüsselt. Eine Anzahl dieser Ergebnisse wurden noch weiter untergliedert. Des weiteren sind u.a. Aussagen über die Erkennung der Schäden sowie Fragen rechtlicher Verantwortlichkeit enthalten. Zu allen Ergebnissen sind konkrete Beispiele angegeben. Die Analyse enthält auch - wie im Unterkapitel 3.4 bereits angedeutet wurde - die Ergebnisse sämtlicher Auswertungen für 116 ausländische Schadensfälle sowie für 30 Schäden, die sich vor 1945 ereignet haben.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die Schadensanalyse hat nachgewiesen, daß sich die Bemessung und Ausführung von Stahltragwerken nach dem Vereinheitlichten Vorschriftenwerk des Stahlbaus der DDR bewährt hat. In der Analyse ist nur eine äußerst geringe Anzahl von Schäden enthalten, die infolge fehlender oder zu günstiger Festlegungen in den Vorschriften entstanden sind. In diesen Fällen wurde sofort reagiert. Dagegen konnten auf der Grundlage gesicherter Forschungsergebnisse in der zweiten (1972) und in der dritten Vorschriftengeneration (1983) solche Änderungen eingearbeitet werden (z.B. Erhöhung von zulässigen Spannungen, Ausnutzung von plastischen Reserven), die noch wirtschaftlichere Konstruktionen zuließen, ohne daß daurch Schäden auftraten. Das spricht für die Konti-

nuität bei der Weiterentwicklung der Stahlbauvorschriften, die sich im derzeitigen Übergang zur Bemessung nach Grenzzuständen mit Teilsicherheitsfaktoren fortsetzt /4/.

Es ist heute eine anerkannte Tatsache, daß Schäden an Stahltragwerken - wie an Tragwerken aus jedem anderen Baustoff - niemals ganz ausgeschaltet werden können. Jedem Tragwerk wohnt eine bestimmte - wenn auch äußerst geringe - Versagenswahrscheinlichkeit inne. In der Analyse wurden die Ursachen solcher Schäden als Zufallsereignisse 1. Art (Ursachenklasse 1) bezeichnet. Tabelle 6 hat gezeigt, daß ihre Anzahl wirklich sehr klein ist.

Die Anzahl der Schäden aus den Zufallsereignissen 2. Art (Ursachenklasse 2) ist ebenfalls äußerst gering. Auch sie sind künftig nicht völlig ausschaltbar. Es muß aber versucht werden, durch Maßnahmen bestimmte Gefährdungen dieser Art von vornherein vom Tragwerk abzuhalten oder aber die Größe des möglichen Schadens in Grenzen zu halten (Ausschalten von Kettenreaktionen).

Die Schäden aus objektiv unbekannten Phänomenen (Ursachenklasse 3) weisen eine relative Häufigkeit von 15 % auf, sind aber, wie Untersuchungen zeigen, stetig rückläufig. Solange es aber eine Weiterentwicklung des Stahlbaus gibt (neue Stahlsorten, neue Konstruktionsprinzipien usw.), werden auch Schäden dieser Ursachenklasse niemals ganz ausgeschlossen werden können.

Die eigentlichen Ansatzpunkte zur Reduzierung von Schadensfällen liegen auf der Hand. Es wurde gezeigt, daß 75 % der Schadensursachen auf Pflichtverletzungen (Ursachenklasse 4) oder menschliches Versagen (Ursachenklasse 5) zurückzuführen sind. Die Schäden der Uk 4 gilt es völlig auszuschalten, die der Uk 5 weitgehend zu reduzieren.

Für die Hersteller von Stahltragwerken heißt das, die Qualitätssicherungssysteme von der Phase der Projektierung bis zur Übergabe des Objektes an den Nutzer konsequent durchzusetzen. Große Bedeutung kommt dabei einer permanenten Kontrolltätigkeit zu. In der Analyse sind zahlreiche Beispiele enthalten, die aufzeigen, wie schwere Schäden durch nicht erkannte grobe Fehler entstanden sind. Aber auch mehrere an sich kleinere Fehler und Mängel können in ihrer Summe zu Schäden führen. Sowohl große als auch kleine Fehler sowie Mängel können nur durch eine wirksame Kontrolltätigkeit ausgeschaltet werden. Es ist volkswirtschaftlich effektiver, mehr Geld für Kontrollen auszugeben, also für die Verhütung von Schäden, als nachträglich für Reparaturen und die Beseitigung der Folgeschäden (abgesehen von der zusätzlichen Gefährdung von Personen).

Wesentlich können auch die Nutzer der Stahltragwerke selbst zur Reduzierung von Schäden beitragen. Das bedeutet einmal, daß den Fragen der planmäßigen Instandhaltung der Stahltragwerke in einigen Bereichen eine größere Bedeutung beigemessen werden muß. Zum anderen müssen die von den Herstellern übergebenen Nutzer- bzw. Bedienungsanleitungen exakt eingehalten werden, d.h. das Tragwerk darf nur dafür eingesetzt werden, wofür es vorgesehen und berechnet wurde.

Insbesondere in den letzten Jahren wurde in der DDR viel unternommen, um höchsten Qualitätsansprüchen noch besser gerecht zu werden. Dazu wurden u.a. eine Reihe von rechtlichen Bestimmungen, die die Qualitätssicherung und die bautechnische Sicherheit - nicht nur von Stahltragwerken - betreffen, präzisiert bzw. neu

erstellt. Zusammen mit allen bereits länger existierenden relevanten Bestimmungen stellen sie ein hervorragendes System von Rechtsvorschriften dar, welches das Vereinheitlichte Vorschriftenwerk des Stahlbaus flankiert. Es besteht keine Notwendigkeit, neue diesbezügliche Bestimmungen zu erlassen, sondern die bestehenden in einigen Fällen noch konsequenter einzuhalten bzw. durchzusetzen.

5. ABSCHLUSSBEMERKUNGEN

Wenn im Aufsatz 448 Schäden an Stahltragwerken analysiert wurden, so mag diese Zahl absolut gesehen zunächst hoch erscheinen. Zieht man von dieser Zahl aber diejenigen Schadensfälle ab, die durch Pflichtverletzungen oder menschliches Versagen bei der Nutzung entstanden sind sowie diejenigen, die an Tragwerken auftraten, die vor 1945 errichtet wurden, so wird die Schadensanzahl halbiert. Und vergleicht man diese Anzahl mit der immensen Anzahl von Stahltragwerken, die - teils schon seit Jahrzehnten - ihre Funktion erfüllen, ohne jeglichen Schaden aufzuweisen (deren Größe kaum abschätzbar ist), so ist es eine relativ sehr kleine Zahl, die sicher auch internationalen Vergleichen standhält.

Zusammenfassend kann folgendes Fazit gezogen werden:

Ein Stahltragwerk, das von einem erfahrenen Stahlbaubetrieb nach den Stahlbauvorschriften und unter Beachtung aller anderen maßgebenden Bestimmungen berechnet, konstruiert, gefertigt und montiert wurde, erfüllt seine Funktion, ist hinreichend sicher und wirtschaftlich. Wenn diese Tragwerke entsprechend ihrer Zweckbestimmung genutzt und gemäß der Erfordernisse gewartet werden, können Tragwerksschäden mit großer Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Abschließend nutzt der Verfasser die Gelegenheit, allen Institutionen und Fachkollegen, die ihm bei der vorliegenden Forschungsarbeit unterstützt haben und ohne die das Gelingen nicht möglich gewesen wäre, herzlich zu danken, allem voran dem VEB Metallleichtbaukombinat Leipzig, der das Forschungsthema finanzierte.

LITERATURVERZEICHNIS

1. MATOUSEK M., SCHNEIDER J., Untersuchungen zur Struktur des Sicherheitssystems bei Bauwerken. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, 1976.
2. TGL 13 500 STAHLBAU; Stahltragwerke; Berechnung und bauliche Durchbildung. April 1982.
3. OEHME P., Analyse von Schäden an Stahltragwerken aus ingenieurwissenschaftlicher Sicht und unter Beachtung juristischer Aspekte. Dissertation B, Technische Universität Dresden, Fakultät für Bau-, Wasser- und Forstwesen, 1987.
4. GLAS H.-D., Zur künftigen Nachweisform der Bemessung nach Grenzzuständen im Stahlbau der DDR. Informationen des VEB Metalleichtbaukombinat, Leipzig 22 (1983) 2, S. 15 - 20.