

Masterarbeit

2. Studienstufe

Wintersemester 2009/2010

Erarbeitung eines Leitfadens zur Anwendung der
Fehlerzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA) für
Tragwerke

Bearbeiter:

Dipl.-Ing. Tobias Vogt
Matr.-Nr. 24212722

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Zweiter Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. Friedel Hartmann

Ausgabe am 30. September 2009

Abgabe am 23. Dezember 2009

persönliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe, nur unter Benutzung der angegebenen Fachliteratur, Hilfsmittel und sonstigen Quellen (z.B. Internet) angefertigt wurde. Alle Stellen, die aus den Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Kassel, den 23.12.2009

Dipl.-Ing. Tobias Vogt

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Erläuterungen	5
2.1	Ablauf einer Tragwerk-FMEA	5
2.1.1	Statisches Konzept und Strukturanalyse	5
2.1.2	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung	5
2.2	Weitere Begriffe und Definitionen	9
3	Literatur zum Thema Robustheit	11
3.1	VDI-Richtlinie 6200	11
3.2	Starossek, 2005	15
3.2.1	Möglichkeiten zur Vermeidung eines progressiven Kollapses	15
3.2.2	Notwendigkeit einer Kollapsresistenz	16
3.3	Krätzig u.a., 2007	17
3.4	Plötzl, 1996	19
3.5	Döge u.a., 2006	21
3.5.1	Direkte Methoden	22
3.5.2	Indirekte Methoden	24
3.5.3	Objektschutzmethoden	25
3.6	Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Erdbebensicherheit von Bauwerken (Türkei)	26
3.7	Zusammenstellung der genannten Robustheitsmerkmale	30
4	Umfang der FMEA	33
4.1	Bautechnische Prüfung von Bauwerken	33
4.1.1	Motivation der Autoren	33
4.1.2	Idee der Autoren	34
4.2	Kriterien für den Umfang einer FMEA	35
4.2.1	Gefährdungsklassen	35
4.2.2	Robustheitsklassen	37
4.2.3	Gebäudeklassen	42
4.3	FMEA-Klassen	43
4.4	Einteilung von Beispielbauwerken	47

5	Hilfsmittel	49
5.1	Bewertungszahlen	49
5.1.1	Bedeutung	49
5.1.2	Auftretenswahrscheinlichkeit	50
5.1.3	Entdeckungswahrscheinlichkeit	53
5.1.4	Risikoschranken	57
5.2	Erstellen eines Fehlerkatalogs	57
5.2.1	Fehlerkategorien	57
5.2.2	Beschreibung von Maßnahmen	59
5.2.3	Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten	60
6	Nutzen der FMEA am Beispiel von versagten Bauwerken	63
6.1	Beispiel 1: Eissporthalle in Bad Reichenhall	63
6.1.1	Systembeschreibung und Strukturanalyse	64
6.1.2	Einordnung in FMEA-Klassen	66
6.1.3	Fehleranalyse	68
6.1.4	Risikobewertung	68
6.1.5	Optimierung und Ergebnisse der Sitzung	69
6.1.6	Ergebnisse der Gutachten	71
6.1.7	Einschätzung: Hätte eine FMEA dabei geholfen das Versagen zu verhindern?	71
6.2	Beispiel 2: Messehalle in Kattowitz	72
6.2.1	Systembeschreibung und Strukturanalyse	73
6.2.2	Einordnung in FMEA-Klassen	74
6.2.3	Fehleranalyse	77
6.2.4	Risikobewertung	78
6.2.5	Optimierung und Ergebnisse der Sitzung	79
6.2.6	Ergebnisse Nachuntersuchungen (Gutachten)	81
6.2.7	Einschätzung: Hätte die FMEA dabei geholfen das Versagen zu verhindern?	82
7	Zusammenfassung	83
8	Ausblick	89
	Literaturverzeichnis	91
A	Anhang: Leitfaden „Tragwerk–FMEA“	95
A.1	Gliederung	95
A.2	Vorgehensweise Tragwerk–FMEA	96
A.2.1	Einordnung der Bauwerks in Gefährdungsklassen	96
A.2.2	Statischer Entwurf und Vorbemessung	96
A.2.3	Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen	100

A.2.4	Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen	102
A.2.5	Darstellung des globalen Lastabtrags	102
A.2.6	Fehleranalyse	102
A.2.7	Risikobewertung	107
A.2.8	Optimierung	108
A.2.9	Dokumentation der Ergebnisse	110
A.2.10	Begleitung der weiteren Planung und Ausführung	112
A.3	Fehlerkategorien und Fehlerursachen	112
A.4	Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen	112

Abbildungsverzeichnis

1.1	Bürohaus X: (a) Ansicht, (b) FE-Modell [Tak09]	2
2.1	Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]	8
3.1	Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Beispielen [e.V08]	12
3.2	Consequence Classes nach Eurocode 0 [DIN02]	13
3.3	Schadensfolgeklassen nach ARGEBAU [BKdfS06]	13
3.4	Robustheitsklassen (Robustness Classes) für Bauwerke [e.V08]	14
3.5	Zeitintervalle für die regelmäßigen Überprüfungen [e.V08]	14
3.6	Konstruktionsmaßnahmen zur Erzielung von Robustheit [WK07]	18
3.7	Normierte Robustheitsanteile R^* verschiedener Schädigungsevolutionen [WK07]	19
3.8	Vier Möglichkeiten zur Herstellung eines redundanten Tragwerks [TD06]	24
3.9	Hinweise für die Baukörpergestaltung [TD06]	25
3.10	Maßnahmen zur Gewährleistung von Mindestabständen [TD06]	26
3.11	Vergleich Schäden durch Erdbeben - Anzahl der Geschosse [HS]	27
4.1	Gefährdungsklassen nach Dressel	37
4.2	Vorschlag für Gefährdungsklassen	37
4.3	Robustheitsklassen (Robustness Classes) für Bauwerke [e.V08]	38
4.4	Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklassen	44
5.1	Bedeutung von Fehlern (nach [Var04]) [Lie09]	50
5.2	Matrix zur Ermittlung der Bauteilkategorie [Lie09]	52
5.3	Matrix zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit [Lie09]	52
5.4	Vorschlag zur Ermittlung der Bauteilkategorie (überarbeitet)	54
5.5	Vorschlag zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit (überarbeitet)	54
5.6	Vorschlag zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)	56
6.1	Eissporthalle in Bad Reichenhall, Ansicht der schmalen Front [Sen06]	64

6.2	System des Dachtragwerks in Draufsicht und Querschnitt [Sen06] . . .	65
6.3	(a) Dachtragwerk im Bauzustand; (b) Querschnitt des Dachbinders [Sen06]	65
6.4	Ausschnitt aus der Systembeschreibung der Eissporthalle	66
6.5	Ausschnitt aus der Darstellung des globalen Lastabtrags für vertikale Lasten der Eissporthalle	67
6.6	Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung für einen Binder des Tragwerks	70
6.7	Messehalle Nr. 1 in Kattowitz mit umgebendem Gelände [Wik09] . . .	73
6.8	Isometrie der Stahlkonstruktion der Messehalle [AB06]	74
6.9	Grundriss und Aufriss der Stahlkonstruktion [AB06]	75
6.10	Konstruktion ausgewählter Elemente [AB06]	76
6.11	Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung für einen Unterzug des Tragwerks	80
A.1	Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Gesamtablaufs einer Tragwerk-FMEA	97
A.2	Erläuterungen und Verweise bzgl. Flussdiagramm	98
A.3	Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Beispielen [e.V08]	99
A.4	Ermittlung der Gefährdungsklasse	100
A.5	Schematische Darstellung zur Ermittlung der Klassen eines Bauwerks	103
A.6	Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklassen	103
A.7	Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph, linker Teil [Vog09]	105
A.8	Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph, rechter Teil [Vog09]	106
A.9	Ermittlung der Risikoprioritätszahl in Abhängigkeit der Bewertungszahlen	108
A.10	(a) Ermittlung der Bauteilkategorie; (b) Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)	109
A.11	Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)	110
A.12	Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]	111

Tabellenverzeichnis

3.1	Base Scores in Abhängigkeit der Geschosszahl und des Bodens nach [Özc05]	29
3.2	Penalty Scores in Abhängigkeit der Geschosszahl nach [Özc05]	29
3.3	Penalty-Score-Multiplikatoren nach [Özc05]	29
3.4	Strukturierung von Robustheitsmerkmalen	31
4.1	Honorarzonen nach HOAI	34
4.2	Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken	41
4.3	Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen	42
4.4	Beschreibung der FMEA-Klassen	44
4.5	Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“	45
4.6	Einteilung von Beispielbauwerken in die unterschiedlichen Klassen	48
5.1	Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers	51
5.2	Mögliche Fehlerkategorien und Fehlerursachen [Vog09]	58
5.3	Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung	59
5.4	Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Bauteile	61
6.1	Bewertung der Robustheit	67
6.2	Bewertung der Robustheit	77
A.1	Honorarzonen nach HOAI	99
A.2	Umfang der Vorbemessung in Abhängigkeit der Gefährdungsklasse	99
A.3	Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken	101
A.4	Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen	102
A.5	Beschreibung der FMEA-Klassen	102
A.6	Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“	104
A.7	Definition des bürointernen und erweiterten Teilnehmerkreises an einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung	107
A.8	Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers	109
A.9	Mögliche Fehlerursachen [Vog09]	113
A.10	Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Bauteile	114
A.11	Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung	115

1 Einleitung

Die Tragwerksplanung befindet sich zur Zeit im Wandel: Noch vor einigen Jahren bzw. vor wenigen Jahrzehnten wurden statische Berechnungen überwiegend „per Hand“ auf Grundlage eines meist vereinfachten, aber gut verständlichen statischen Konzepts durchgeführt. Der Umfang der statischen Berechnungen war i.d.R. überschaubar und konnte recht gut geprüft werden. Außerdem war für *alle* Bauwerke eine bautechnische Prüfung vorgeschrieben.

Diese langjährige Situation hat sich aufgrund folgender Punkte z.Tl. grundlegend geändert:

- Seit dem Jahr 2002 ist die bautechnische Prüfung nicht mehr für alle Bauwerke vorgeschrieben. Die Unterscheidung, welche Bauwerke geprüft werden müssen, ist z.Tl. fragwürdig [Dre09].
- Es findet ein zunehmender Kosten- und Termindruck statt. Dadurch wird das Auftreten von Fehlern bei der Tragwerksplanung begünstigt [FH07].
- Der Anteil an 3-dimensionalen Berechnungen nimmt immer mehr zu. Diese bergen, neben vielen Vorteilen, auch einige Gefahren:
 - Die Nachvollziehbarkeit wird reduziert. Dadurch wird das Programm häufig als „Black Box“ verwendet und den Ergebnissen unkritisch vertraut.
 - Fehler bei der Modellbildung und -eingabe sind im fertigen Modell oftmals nur schwer zu finden, die Ergebnisse können durch sie aber stark beeinflusst werden.
 - Aufgrund der Berücksichtigung des 3-dimensionalen Lastflusses sind i.d.R. weniger Systemreserven vorhanden.
- Durch die Verwendung von EDV-Programmen zur statischen Berechnung und Bemessung nimmt die Seitenanzahl einer Statik immer mehr zu. Dadurch fällt es schwer, bei der Prüfung die wichtigen Stellen herauszufinden [FH07].

Unabhängig von den genannten Änderungen ist anzumerken, dass in dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept in den derzeitigen Bemessungsnormen vorausgesetzt wird, dass ein Tragwerk dann standsicher ist, wenn die Nachweise der einzelnen Bauteile auf lokaler Ebene erfüllt werden [Sta05]. Die Robustheit des Gesamttragwerks wird hingegen nicht berücksichtigt.

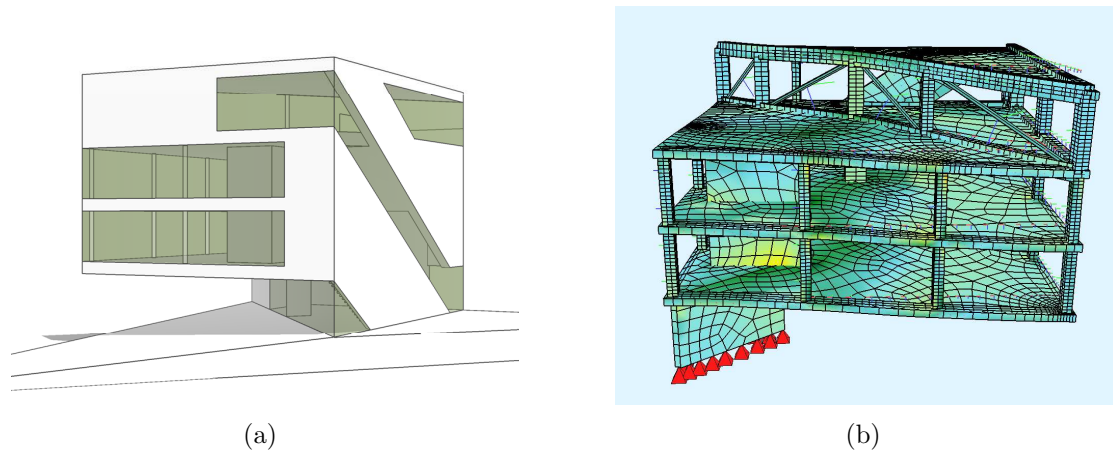


Abbildung 1.1: Bürohaus X: (a) Ansicht, (b) FE-Modell [Tak09]

Einige der genannten Punkte sollen anhand eines Anwendungsbeispiels veranschaulicht werden (vgl. Abb. 1.1).

Das Bürohaus X besteht aus 4 Geschossen und wird in Stahlbeton- bzw. Stahlverbundbauweise hergestellt. Es hat im Grundriss die Abmessungen $16\text{ m} * 14\text{ m}$, die Gesamthöhe beträgt etwa 12 m . Das Besondere an diesem Gebäude ist, dass die Grundrisse des Erd- und Dachgeschosses dreieckig, die Grundrisse des 1. und 2. Obergeschosses hingegen rechteckig sind. Die oberen Geschosse kragen somit zur Hälfte über das Erdgeschoss aus. Es erfolgt in diesem Bereich keine Abstützung.

Die Lasten werden von zwei Vierendeelrahmen in den angrenzenden Außenwänden aufgenommen und in ein Fachwerk im Dachgeschoss aufgehängt. Darüber werden die Lasten dann in die Hauptstütze in der Mitte (Druck) und zwei Zugstützen im hinteren Bereich weitergeleitet.

Bei diesem Gebäude lässt sich einfach erkennen, dass nicht alle Bauteile und Anschlüsse die gleiche Wichtigkeit für den Lastabtrag besitzen. Während im Bereich der Auskragung bereits das Versagen *eines* Bauteils ausreicht, um schwere Schäden oder sogar einen Einsturz hervorzurufen, haben in den anderen Bereichen verschiedene Wände und Stützen nur eine untergeordnete Bedeutung. Unter anderem an diesem Punkt wird deutlich, dass die Gleichbehandlung aller Bauteile im derzeitigen Sicherheitskonzept nicht den Anforderungen an eine globale Standsicherheit gerecht wird. Ein für die Standsicherheit wichtiges Bauteil sollte auch intensiver geprüft und kontrolliert werden als ein auf globaler Ebene weniger wichtiges Bauteil.

Auch in anderen Bereichen, vorwiegend in der Luft- und Raumfahrt sowie dem Maschinenbau, bestehen ähnliche, zum Teil schwierige Herausforderungen für die Ingenieure. Als Reaktion wurde bereits in den 60er Jahren ein System entwickelt, was

die Qualität von Produkten sicherstellen soll: Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Dieses Verfahren wurde seitdem stetig weiterentwickelt und wird heute als System-FMEA z.B. in allen Bereichen des Maschinenbaus angewendet. Die FMEA dient dort als Hilfsmittel, Fehler bei einer Produktherstellung in allen Phasen zu vermeiden. Wenn eine Vermeidung nicht mit einer ausreichenden Sicherheit gewährleistet werden kann, hilft die Festlegung von geeigneten Maßnahmen dabei, die Auswirkung der möglichen Fehler zu reduzieren.

Wenn die FMEA in vielen verwandten Bereichen schon sehr lange und sehr erfolgreich zur Qualitätssicherung und der Vermeidung von Fehlern beiträgt, stellt sich die Frage, ob sie nicht auch im Bauwesen dafür sorgen kann, den genannten Problematiken wirkungsvoll entgegenzuwirken? Um dies zu untersuchen und die Vorzüge einer FMEA auch dem Bauwesen zugänglich zu machen, wurde das Forschungsprojekt *Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Kurztitel: Tragwerk-FMEA)* [FH07] ins Leben gerufen, welches u.a. von der Bundesvereinigung der Prüfindenieure für Bautechnik e.V. (bvpi) gefördert wird.

In der Projektarbeit *Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien* [Vog09] und der Diplomarbeit *Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten FMEA* [Lie09] wurde ein Konzept erarbeitet, nach dem eine FMEA auch im Bauwesen durchgeführt werden kann. Die Anwendung ist in verschiedenen Projektphasen möglich. Im Rahmen des Forschungsprojekts erfolgt eine Beschränkung auf die Tragwerk-FMEA, die nach dem Erstellen des statischen Konzepts und der Vorbemessung zur Anwendung kommt. Einige dieser grundlegenden Überlegungen und Ideen bauen auf den Aufsatz „Qualitätssicherung im konstruktiven Ingenieurbau“ von Eisfeld und Struss [ME08] und auf ein internes Arbeitspapier von Seim [Sei] auf. Das erarbeitete Konzept wurde für das Bürohauses X durchgeführt und entsprechend der gemachten Erfahrungen angepasst.

In dieser Masterarbeit folgen darauf aufbauend weitere Schritte. Der Schwerpunkt liegt auf der Definition von Kriterien, anhand derer der Umfang und der Inhalt einer durchzuführenden FMEA festgelegt werden kann. Außerdem werden Hilfsmittel zum Auffinden von Fehlern und zur Risikobewertung entwickelt. Die erarbeiteten Verfahren sollen dabei kurz und prägnant sein um eine effektive Anwendung der FMEA zu unterstützen.

Die zum Verständnis dieser Masterarbeit notwendigen Grundlagen der FMEA sind im Kapitel 2: *Erläuterungen* aufgeführt. Für weitere Informationen sei an dieser Stelle auf das Heft *FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse* [Var04] und die *DIN EN 60812:2006 – Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen [...]* [DIN06] verwiesen.

Die Robustheit eines Tragwerks spielt eine zentrale Rolle bei der Frage, welche Auswirkungen das Eintreten eines lokalen Fehlers auf das Gesamttragwerk hat. In Kapitel 3 werden daher anhand verschiedener Literaturquellen, die in der Fachwelt üblichen Definitionen und Merkmale der Robustheit aufgeführt. Darüber hinaus wird ein Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Erdbbensicherheit von Bauwerken in der Türkei vorgestellt, das in kurzer Zeit anhand äußerer Gebäudemerkmale durchgeführt werden kann. Es wird untersucht, ob die Robustheit eines Tragwerks auf eine ähnliche Weise ermittelt werden kann. Aufbauend auf die Ergebnisse der verschiedenen Literaturquellen erfolgt eine Zusammenstellung und Auswertung der wichtigen Robustheitsmerkmale für eine qualitative Bewertung der Robustheit.

In Kapitel 4 werden Kriterien zur Bestimmung des notwendigen Umfangs einer FMEA untersucht. Anhand dieser wird ein entsprechendes Verfahren entwickelt, bei dem die Tragwerke in verschiedene Klassen eingeordnet werden.

Die Risikobewertung wird z.Zt. von erfahrenen Ingenieuren subjektiv durchgeführt. Um sie jedoch in einer einheitlichen, vergleichbaren Form vornehmen zu können, wird im 5. Kapitel eine strukturierte Vorgehensweise zur Festlegung der Bewertungszahlen erarbeitet. Zur Unterstützung beim Auffinden von möglichen Fehlern wird darüber hinaus ein Fehlerkatalog für die wichtigsten Bauteile des üblichen Hochbaus erstellt.

In Kapitel 6 wird das entwickelte Verfahren am Beispiel von zwei Bauwerken, bei denen ein Einsturz stattfand, angewendet. Dadurch soll herausgefunden werden, ob die Anwendung einer FMEA dabei geholfen hätte, das Versagen der Tragwerke zu verhindern.

Anschließend erfolgt eine Zusammenfassung und ein Ausblick. Im Anhang wird eine Gliederung des Leitfadens Tragwerk–FMEA vorgestellt und einzelne Kapitel ausgearbeitet.

2 Erläuterungen

2.1 Ablauf einer Tragwerk–FMEA

Die Tragwerk–FMEA wird nach der Vor- und Entwurfsplanung (Leistungsphasen 2 und 3) durchgeführt und dient zur Vermeidung grundlegender Fehler in einem frühen Stadium.

Die Absicht bei der Entwicklung der Tragwerk–FMEA ist es, mit möglichst wenig zusätzlichem Aufwand einen erheblichen Qualitätsgewinn zu erzielen. Dieser beinhaltet neben der höheren Qualität auch das Einsparen von Zeit und Kosten, da ein frühzeitiges Auffinden von Fehlern dafür sorgt, hohen Folgekosten und Bauverzögerungen entgegenzuwirken.

2.1.1 Statisches Konzept und Strukturanalyse

Die Vorbereitung für die Durchführung einer Tragwerk–FMEA erfolgt durch den Tragwerksplaner, der den statischen Entwurf erstellt und die Vorbemessung durchführt. Zuerst entwickelt er ein Tragkonzept und führt eine Vorbemessung durch. Anschließend werden alle am Tragsystem beteiligten Bauteile und Anschlüsse dargestellt (Systembeschreibung). Außerdem erfolgt eine Darstellung des globalen Lastabtrags, aus der das Zusammenwirken der einzelnen Bauteile untereinander hervorgeht. Auf diese Weise können die Auswirkungen der Fehler auf weiterführende Bauteile (Propagierung der Fehler) gut sichtbar gemacht werden. Wichtige Unterlagen wie evtl. Bodengutachten o.ä. werden in dieser Phase gesammelt und ausgewertet.

2.1.2 Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

Vorstellung des Projekts

Der Tragwerksplaner stellt in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung das gesamte Projekt und das statische Konzept vor. Auch die vorbereitete Darstellung der Bauteile sollte vorliegen. An der Sitzung nehmen folgende Personen teil:

- der für die Vorbemessung zuständige Tragwerksplaner,
- der für die weiteren statischen Berechnungen zuständige Tragwerksplaner,
- der Verantwortliche des Projekts (innerhalb des Büros),
- der Konstrukteur,
- sowie der Prüflingenieur (evtl.).

Die Vorbereitung und Moderation der Sitzung kann von einer externen, nicht am Projekt beteiligten Person durchgeführt werden. Wenn in dieser Projektphase noch kein Prüflingenieur feststeht, kann diese Aufgabe ein erfahrener Ingenieur des Büros übernehmen. Wenn beispielsweise für die Entwicklung eines FE-Modells ein weiterer Mitarbeiter des Büros involviert ist, sollte dieser auch an der Sitzung teilnehmen. Wenn bereits nominiert, kann je nach Bauprojekt auch die Teilnahme eines Mitarbeiters der ausführenden Firma sinnvoll sein. Auch die Teilnahme des Architekten wäre wünschenswert.

Alle weiteren Vorgänge erfolgen in einer Teamsitzung.

Fehleranalyse

Den Bauteilen und Anschlüssen werden mögliche Fehler zugeordnet. Für jeden der Fehler (Fehlerarten) werden Fehlerfolgen und Fehlerursachen ermittelt. Insbesondere an diesem Punkt sind alle Sitzungsteilnehmer zur intensiven Mitarbeit aufgefordert, da nur durch die gemeinsamen Erfahrungen und das gemeinsame Wissen alle Fehler erkannt werden können.

Risikobewertung

In diesem Teil erfolgt die Bewertung der gefundenen Fehler. Dafür werden drei Bewertungskriterien verwendet: Die **Bedeutung (B)** der **Fehlerfolgen**, die **Auftretenswahrscheinlichkeit (A)** der **Fehlerursache** und die **Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)** des **Fehlers** bzw. der **Fehlerursache**. Anders als im Maschinenbau kann für die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht auf rechnerische oder durch Versuche abgeleitete Werte zurückgegriffen werden. Die Bewertung basiert im Bauwesen auf Erfahrungswerten und subjektiven Einschätzungen. Aus diesem Grund erscheint ein Bereich von Zahlenwerte zwischen 1 („geringes Risiko“ bzw. „gut“) und 5 („hohes Risiko“ bzw. „schlecht“) sinnvoll. Die Errechnung der Risikoprioritätszahl (RPZ) erfolgt durch Multiplikation der Zahlenwerte, also:

$$\text{RPZ} = \text{B} \cdot \text{A} \cdot \text{E}$$

Somit können die Risiken eines jeden Fehlers durch eine heuristische Bewertung von Fachleuten auf quantitative Art und Weise beschrieben werden.

Die einzelnen Fehler werden nach Größe der Risikoprioritätszahl geordnet. Die Zahlenwerte liegen zwischen 1 (kein bzw. sehr geringes Risiko) und 125 (sehr hohes Risiko). Bei Überschreitung einer festgelegten Grenze müssen nun Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden.

Optimierung

Die Optimierung erfolgt durch Festlegung geeigneter Maßnahmen zur Reduzierung des Risikos. Dies können zum einen Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache und zum anderen Maßnahmen zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache sein. Wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden können oder die festgelegten Maßnahmen nicht ausreichen, ist das statische Konzept zu überarbeiten.

Die Optimierungsmaßnahmen führen zu veränderten Bewertungszahlen. Je nachdem welcher Bereich verbessert wurde, wird die zugehörige Bewertungszahl reduziert.

Ergebnisse der Sitzung

Die Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Optimierung werden sorgfältig in Formblättern nach [DIN06] (vgl. Abb. 2.1) dokumentiert. Für jede der festgelegten Maßnahmen wird ein Verantwortlicher bestimmt, der für die Umsetzung zuständig ist. Auch ein Termin für die Durchführung ist festzulegen.

Wenn in der Sitzung wichtige Punkte festgestellt wurden, die in den nachfolgenden Projektphasen beachtet werden sollten, sind diese in Form von *Hinweisen für nachfolgende Projektphasen* zu dokumentieren. Diese Hinweise sowie *Informationen über kritische Stellen* werden dann den für die Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie den für die Bauausführung zuständigen Ingenieuren ausgehändigt, damit diese weiter verfolgt werden können.

Bauteil / Anschluss		Bewertung der Fehler: - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) - Bedeutung der Fehlerfolge (B) - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)						
Funktion								
Mögliche Fehlerfolgen	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin

Abbildung 2.1: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]

2.2 Weitere Begriffe und Definitionen

Robustheit

„Robustheit ist diejenige Eigenschaft, die es Tragwerken ermöglicht, einer unvorhergesehenen oder außergewöhnlichen Aktion verhaltenszielgerecht zu widerstehen“ [WK07]. Aktionen stehen hier als Verallgemeinerung für Einwirkungen und Tragwerksmodifikationen.

Redundanz

Redundanz beschreibt das Vorhandensein von alternativen Lastpfaden, über die die Lasten in einem Tragwerk bei einem Bauteilausfall „umgeleitet“ werden können.

Fehlerart

Unter Fehlerart versteht man einen möglichen Fehler, der bei den verschiedenen Bauteilen und Anschlüssen auftreten kann. Sie dient dabei der qualitativen Beschreibung des Fehlers.

Fehlerursache

Eine Fehlerursache führt zu einem Fehler. Für jeden Fehler gibt es i.d.R. mehrere mögliche Ursachen. Betrachtet werden bei der Tragwerk-FMEA die Ursachen, die in der Berechnung, der Bemessung und dem Entwurf begründet sind. Es erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit im Rahmen der Risikobewertung.

Fehlerfolge

Die Fehlerfolge beschreibt, welche Auswirkung das Eintreten eines Fehlers hat. Betrachtet wird bei der Tragwerk-FMEA die Auswirkung auf Tragwerksebene, die sehr stark von der entsprechenden Robustheit abhängt. Die Fehlerfolge stellt somit die Verknüpfung zwischen einem lokalen Fehler und der Standsicherheit des Gesamttragwerks dar. Es erfolgt eine Bewertung hinsichtlich der Bedeutung im Rahmen der Risikobewertung.

3 Literatur zum Thema Robustheit

In diesem Kapitel wird unterschiedliche Literatur zum Thema Robustheit von Tragwerken gesichtet und hinsichtlich der Verwendbarkeit für diese Arbeit untersucht. Dabei wird vorwiegend Literatur herangezogen, in der qualitative Robustheitsmerkmale genannt und begründet werden. Darüber hinaus wird eine interessante Methode zur Bewertung der Erdbebensicherheit von Bauwerken in der Türkei anhand äußerer Merkmale vorgestellt.

Die Ergebnisse der Literaturrecherche sollen als Grundlage für die Definition und Festlegung von Robustheitsklassen und Versagenswahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Tragwerke verwendet werden. Eine Zusammenstellung aller genannten Robustheitsmerkmale wird am Ende des Kapitels gegeben.

3.1 VDI-Richtlinie 6200

Die VDI-Richtlinie 6200: „Standicherheit von Bauwerken – Regelmäßige Überprüfung“ erschien als Entwurf im Oktober 2008, nachdem Anfang 2006 mehrere Bauwerke in Europa einstürzten und „der Ruf nach technischen Regeln zur Sicherstellung der Standicherheit von Bauwerken immer lauter wurde“ [e.V08]. Sie baut auf die „Hinweise für die Überprüfung der Standicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten“ der Bauministerkonferenz (ARGEBAU) vom September 2006 auf [BKdfS06]. Sie befasst sich damit, auf welche Weise, in welchem Umfang und Häufigkeit und durch welches Fachpersonal regelmäßige Überprüfungen von Bauwerken durchgeführt werden sollen.

Als Kern für diese Festlegung dient die Einteilung der Bauwerke in Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) und Robustheitsklassen (Robustness Classes). Die Einteilung in Schadensfolgeklassen erfolgt in drei Kategorien: CC1 – geringe Folgen, CC2 – mittlere Folgen, CC3 – hohe Folgen (vgl. Abb. 3.1). Grundlage zur Festlegung der Kriterien sind die gleichnamigen Consequence Classes nach Eurocode 0 [DIN02] (vgl. Abb. 3.2) und die Schadensfolgeklassen nach ARGEBAU [BKdfS06] (vgl. Abb. 3.3).

Für die Bewertung der Robustheit werden vier Klassen definiert: RC1 steht hier für Tragwerke mit geringer Robustheit, RC4 für Tragwerke mit einer sehr hohen Robustheit (vgl. Abb. 3.4).

3 Literatur zum Thema Robustheit

Schadens- folgeklasse	Merkmale	Gebäudetypen und exponierte Bauteile	Beispielhafte Bauwerke
CC 3 Kategorie 1 gemäß [1]	hohe Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für sehr viele Men- schen, große Um- weltschäden)	insbesondere: Versammlungsstätten für mehr als 5000 Personen	Stadien, Kongresshallen, Mehrzweckarenen
CC 2 Kategorie 2 gemäß [1]	mittlere Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für viele Menschen, spürbare Umwelt- schäden)	bauliche Anlagen mit über 60 m Höhe Gebäude und Gebäudeteile mit Stützweiten größer 12 m und/oder Auskragungen größer 6 m sowie großflächige Überda- chungen exponierte Bauteile von Gebäu- den, soweit sie ein besonderes Gefährdungspotenzial beinhalten	Hochhäuser, Fernsehtürme Bürogebäude, Industrie- und Gewerbe- bauten, Kraftwerke, Produktionsstätten, Bahnhofs- und Flughafengebäude, Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Museen, Krankenhäuser, Kinos, Theater, Schulen, Diskotheken, Sporthallen aller Art, z. B. für Eislauf, Reiten, Tennis, Radfahren, Leichtathletik große Vordächer, angehängte Balkone, vorgehängte Fassaden, Kuppeln
CC 1	geringe Folgen (Sach- und Vermö- gensschäden, geringe Umwelt- schäden, Risiken für einzelne Menschen)	robuste und erfahrungsgemäß unkritische Bauwerke mit Stütz- weiten kleiner 6 m Gebäude mit nur vorübergehen- dem Aufenthalt einzelner Men- schen	Ein- und Mehrfamilienhäuser landwirtschaftlich genutzte Gebäude

Abbildung 3.1: Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Bei-
spielen [e.V08]

Als Bewertungskriterien werden herangezogen:

- die statische Bestimmtheit des Tragwerks,
- die Art und Redundanz der Verbindungen,
- das Trag- und Verformungsverhalten,
- die Fehlerempfindlichkeit der Systeme,
- sowie der Bemessungsumfang (Überprüfung der Tragfähigkeit bei Ausfall ein-
zelner Bauteile).

Für die regelmäßige Überprüfung erfolgt eine Unterteilung in:

- die Begehung durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten,
- die Inspektion durch eine fachkundige Person,
- und die eingehende Überprüfung durch eine besonders fachkundige Person.

Schadens- folgeklassen	Merkmale	Beispiele im Hochbau oder bei sonstigen Ingenieurbauwerken
CC 3	Hohe Folgen für Menschenleben <u>oder</u> sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z. B. eine Konzerthalle)
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beeinträchtigt wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
CC 1	Niedrige Folgen für Menschenleben <u>und</u> kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z. B. Scheunen, Gewächshäuser)

Abbildung 3.2: Consequence Classes nach Eurocode 0 [DIN02]

1	2	3
Gefährdungspotenzial/ Schadensfolgen	Gebäudetypen und exponierte Bauteile	Beispielhafte, nicht abschließende Aufzählung
Kategorie 1	Versammlungsstätten mit mehr als 5000 Personen	Stadien
Kategorie 2	<ul style="list-style-type: none"> – Bauliche Anlagen mit über 60 m Höhe, – Gebäude und Gebäudeteile mit Stützweiten > 12 m und/oder Auskragungen > 6 m sowie großflächige Überdachungen – Exponierte Bauteile von Gebäuden, soweit sie ein besonderes Gefährdungspotenzial beinhalten 	Fernsehtürme, Hochhäuser Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Mehrzweck-, Sport-, Eislauf-, Reit-, Tennis-, Passagierabfertigungs-, Pausen-, Produktionshallen, Kinos, Theater, Schulen große Vordächer, angehängte Balkone, vorgehängte Fassaden, Kuppeln

Abbildung 3.3: Schadensfolgeklassen nach ARGEBAU [BKdfs06]

Robustheitsklasse	Bauwerk/Nutzung	Beispielhafte Tragwerke
RC 1	statisch bestimmte Tragwerke ohne Systemreserven Fertigteilkonstruktionen ohne nachträgliche redundante Verbindungen imperfektionsempfindliche Systeme Tragwerke mit spröde-elastischem und sprödem Verformungsverhalten	Einfeldträger stützenstabilisierte Hallentragwerke ohne Kopplungen schlanke Schalentragwerke Tragwerke aus Glas Tragwerke mit Gussbauteilen
RC 2	statisch unbestimmte Konstruktionen mit Systemreserven elastisch-plastisches Tragverhalten	Durchlaufträger eingeschossige Rahmenkonstruktionen Stahlkonstruktionen
RC 3	Konstruktionen mit großer Systemredundanz Tragwerksverhalten und/oder Konstruktionen mit großen plastischen Systemreserven fehlerunempfindliche Systeme	mehrgeschossige Rahmenkonstruktionen vielfach statisch unbestimmte Systeme seilverspannte Konstruktionen überschüttete Bogentragwerke
RC 4	Tragwerke, bei denen alternativ berücksichtigte Gefährdungsszenarien und Versagensanalysen ausreichende Robustheit zeigen	Bemessung für Stützensausfall, Bemessung auf Lastfall Flugzeugabsturz

Abbildung 3.4: Robustheitsklassen (Robustness Classes) für Bauwerke [e.V08]

Schadensfolgeklasse	Begehung gem. Abschnitt 10.1.1	Inspektion gem. Abschnitt 10.1.2	Eingehende Überprüfung gem. Abschnitt 10.1.3
CC 3	1 bis 2 Jahre	2 bis 3 Jahre	6 bis 9 Jahre
CC 2	2 bis 3 Jahre	4 bis 5 Jahre	12 bis 15 Jahre
CC 1	3 bis 5 Jahre	nach Erfordernis	

Abbildung 3.5: Zeitintervalle für die regelmäßigen Überprüfungen [e.V08]

Entsprechend der Schadensfolgeklassen werden Zeitintervalle für eine regelmäßige Überprüfung vorgeschlagen (vgl. Abb. 3.5). Die genannten Zeitintervalle sollen als Richtwert dienen. Eine genaue Festlegung muss im Einzelfall erfolgen, u.a. unter Berücksichtigung der jeweiligen Robustheitsklasse. Zusätzlich zur Robustheit werden als Kriterien die Art des Tragwerks, das Alter und der Erhaltungszustand, sowie die Nutzungs- und Umweltbedingungen genannt.

Bewertung und Nutzen

Die VDI-Richtlinie 6200 bietet eine fundierte Grundlage für die qualitative Bewertung der Robustheit eines Bauwerks und für die Bewertung der Auswirkungen eines Schadens. Die genannten Robustheitsmerkmale fließen in die Zusammenstellung der Robustheitsmerkmale am Ende des Kapitels mit ein. In Kapitel 4 werden darüber hinaus die Robustheits- und Schadensfolgeklassen hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit für

die Festlegung des notwendigen Umfangs einer durchzuführenden FMEA geprüft.

3.2 Starossek, 2005

In dem Aufsatz *Progressiver Kollaps von Bauwerken* [Sta05], geht Starossek auf die verschiedenen Arten von Bauteilversagen ein. Er macht deutlich, dass nicht jedes Versagen gleich zu beurteilen ist und stellt den schwerwiegendsten Fall, den progressiven Kollaps, heraus. Dieser beschreibt ein lokales Versagen, das zum Einsturz großer Tragwerksteile oder des gesamten Tragwerks führt.

Er merkt an, dass in den Normen der Grad der Sensitivität eines Bauwerks unberücksichtigt bleibt. Somit wird die Auswirkung von Bauteilversagen nicht berücksichtigt, d.h. die Sensitivität hat keinen Einfluss auf die Art und den Umfang der vorgeschriebenen Bemessung. Die Robustheit, in diesem Kontext die Resistenz gegenüber einem progressiven Kollaps, wird nur in Einzelfällen, bei besonderen Bauwerken und nach freiem Ermessen des jeweiligen Ingenieurs untersucht.

In den derzeitigen Bemessungsverfahren werden die Widerstände nur auf lokaler Ebene, d.h. auf Bauteilebene, betrachtet. Der globale Widerstand des Tragwerks bleibt außer Betracht. Man geht stillschweigend davon aus, dass, wenn die Widerstände auf lokaler Ebene ausreichend sind, auch gleichzeitig die Standsicherheit des gesamten Tragwerks gewährleistet ist. Dem widerspricht Starossek und stellt in diesem Zusammenhang die wesentlichen Parameter für den Widerstand eines Gesamttragwerks dar:

- die statische Bestimmtheit eines Tragwerks,
- die Gestalt und die Ausrichtung des Tragwerks im Raum,
- die konstruktive Ausbildung von Verbindungen,
- und das Baustoffverhalten.

3.2.1 Möglichkeiten zur Vermeidung eines progressiven Kollapses

Bisherige Forschungsaktivitäten in dieser Richtung beziehen sich auf Einzelfälle, eine verallgemeinernde Theorie zu progressivem Kollaps liegt derzeit nicht vor. Umfangreiche Literaturangaben hierzu werden in [Sta05] gegeben. Als Vorschläge zur Vermeidung eines solchen Schadenfalls werden im wesentlichen zwei Alternativen genannt:

- die Einhaltung einer hohen Sicherheit gegenüber lokalem Versagen,
- sowie die Bereitstellung eines alternativen Lastpfades.

Als Bemessungsvorschlag wird empfohlen, kritische Bauteile in der Berechnung (einzeln) zu entfernen und das Tragwerk so auszulegen, dass der Lastabtrag dennoch funktioniert. An dieser Stelle weist Starossek darauf hin, dass ein Bauteilversagen nicht statisch abläuft, sondern eine dynamische Belastung des restlichen Tragwerks auftritt, was in der Bemessung berücksichtigt werden muss.

Sicherheit gegenüber lokalem Versagen

Um ein lokales Versagen von kritischen Bauteilen zu vermeiden, sind zwei Dinge wichtig: Zum Einen müssen die Anforderungen an die Bauausführung erhöht werden um die Qualität der Bauteile sicherzustellen. Dafür ist es wichtig, den Bauleiter rechtzeitig über die kritischen Elemente zu informieren. Auch eine Verstärkung dieser kann sinnvoll sein. Zum Anderen ist der Schutz der kritischen Bauteile wichtig. Dies kann lokal (direkt am Bauteil) oder durch das Verhindern der Zugangsmöglichkeit (z.B. durch Absperrungen) erfolgen.

Wenn ein Verhindern von lokalem Versagen nicht gewährleistet werden kann, müssen dessen Auswirkungen begrenzt werden.

Alternativer Lastpfad

Das Einplanen eines alternativen Lastpfades führt zu einer deutlichen Steigerung der Robustheit eines Systems. Dieser kann sowohl durch zwei vollkommen getrennte Lastpfade, als auch durch die Nutzung plastischer Systemreserven umgesetzt werden. Bei der Bereitstellung von alternativen Lastpfaden ist es besonders wichtig sicherzustellen, dass der zweite Lastpfad die Lasten auch tatsächlich aufnehmen kann. Ansonsten kann die eingebrachte Kontinuität sogar zu einer Ausbreitung des Schadens führen.

3.2.2 Notwendigkeit einer Kollapsresistenz

Eingehend auf die Kollapsresistenz macht Starossek deutlich, dass es nicht möglich ist, nur eindeutig kollapsresistente Gebäude zuzulassen. Zum Einen ist dies aus architektonischen Ansprüchen oft nicht möglich, zum Anderen ist auch nicht von jeder Art von Gebäuden eine Kollapsresistenz zu fordern. Über die bereits beschriebenen Maßnahmen hinaus kann eine ausreichende Kollapsresistenz auch durch eine besonders sichere und sorgfältige Ausführung kritischer Stellen gewährleistet werden.

In Anlehnung an den Eurocodes 1 schlägt Starossek folgende Fragestellung vor:

- Ist bei dem betrachteten Bauwerk eine Kollapsresistenz notwendig?
- Welche Bedeutung hat das betrachtete Bauwerk für die Öffentlichkeit (Infrastruktur, Anzahl gefährdeter Menschen,...)?

Bewertung und Nutzen

Der vorliegende Aufsatz von Starossek stützt den Grundgedanken, der hinter der Stellung des Zuwendungsantrages liegt: Dass in den gültigen Normen die Wichtigkeit eines Bauteils für das Gesamttragwerk nicht berücksichtigt wird. Die von ihm genannten Parameter, die zu einem robusten Tragwerk führen bzw. einen progressiven Kollaps verhindern, werden in die Zusammenstellung der Robustheitsmerkmale am Ende des Kapitels mit aufgenommen. Mit der Anwendung der FMEA im Bauwesen wird auch seiner Forderung Rechnung getragen, die Notwendigkeit einer Kollapsresistenz anhand verschiedener Kriterien, wie der Bedeutung eines Schadens für die Öffentlichkeit, festzulegen.

3.3 Krätzig u.a., 2007

In dem Artikel *Robustheit von Tragwerken - ein vergessenes Entwurfsziel?* [WK07] wird grundsätzlich diskutiert, in wieweit die Robustheit als Tragwerksmerkmal wichtig ist und in welcher Weise sie in die derzeitigen Normen berücksichtigt wird. Es werden qualitative Robustheitsmerkmale beschrieben. Außerdem wird ein Verfahren zur quantitativen Berechnung der Robustheit vorgestellt und diese anhand einiger Beispiele durchgeführt.

Grundlegend mahnen die Autoren an, dass bei dem derzeitigen Entwurf von Tragwerken gemäß aktueller Normen der Frage nach der Robustheit nur eine unzureichende Bedeutung zukommt. Sie wird als Anforderung an ein Tragwerk zwar in der DIN 1055-100 erwähnt, allerdings spiegelt sie sich nicht in den Bemessungsverfahren der entsprechenden Normen wieder. Es findet in der Fachwelt sogar keine einheitliche Verwendung des Begriffs *Robustheit* statt. Als sinnvolle Definition wird von den Autoren folgende Formulierung verwendet:

„Robustheit ist diejenige Eigenschaft, die es Tragwerken ermöglicht, einer unvorhergesehenen oder außergewöhnlichen Aktion verhaltenszielgerecht zu widerstehen.“

Der Begriff „Aktion“ beschreibt an dieser Stelle alle ein Tragwerk gefährdenden Umstände.

Bisher wurden bei der Erstellung von statischen Berechnungen üblicherweise vereinfachte, lineare Bemessungsverfahren verwendet. Die Ergebnisse solcher Bemessungen sind i.d.R. nicht genau, sie weichen immer in Richtung der sicheren Seite vom genauen

Einwirkungen:	Nicht erfaßte / erfaßbare Einwirkungen und denkbare Lastüberschreitungen konstruktiv abdecken: Unfalleinwirkungen, Anprall, Explosionen, Stapellasten. Kritische Einwirkungen vermeiden: Anprallschutz, Maßnahmen zur Lastbegrenzung. Laständerungen? Zulässige Lasten aushängen.
Tragwerk:	Möglichst viele Redundanzen, die auf unterschiedliche Versagenspfade führen. Schädigungstolerant dimensionieren. Einflüsse von Maßimperfektionen verfolgen. Versagensszenarien durchspielen.
Baustoffe, Bauelemente:	Bauglieder und Verbindungen möglichst duktil konstruieren. Besser über- als unterdimensionieren (Soliditätsprinzip). Sprödbrechende Bauelemente unter allen Umständen vermeiden.
Bauweisen:	Massivbauweisen in Ortbeton, geschweißte Stahlbauten. Stahlbetonfertigteile mit Ortbetonverbindungen. Stahl- und Verbundkonstruktionen mit redundanten Verbindungen (Kohärenzprinzip). Unberücksichtigten Zwang vermeiden.
Prüfung und Überwachung:	Baustatische Prüfungen: Modellierung, fehlerfreie Berechnung, konstruktive Details. Bauüberwachung auf plankonforme Ausführung. Kontrolle von Umbaumaßnahmen. Regelmäßige Überprüfung und Wartung während der Nutzungsphase.

Abbildung 3.6: Konstruktionsmaßnahmen zur Erzielung von Robustheit [WK07]

Ergebniss ab. Dadurch waren bisher zusätzliche Reserven in den Tragwerken vorhanden. Durch die, mithilfe entsprechender EDV–Programme zunehmende Durchführung von genaueren, nicht-lineare Berechnungen, werden diese allerdings deutlich verringert. Da gerade sie jedoch zu einem robusten Tragwerk führen, wird auf diese Weise die Robustheit aktueller Bauwerke reduziert.

Am Ende des Artikels werden Konstruktionsmaßnahmen zur Erzielung einer Robustheit vorgestellt. Die entsprechende Tabelle ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Da es das Ziel der Literaturrecherche ist, qualitative Robustheitsmerkmale zu finden, wird das Berechnungsverfahren an dieser Stelle nicht beschrieben. Der wesentliche Grundgedanke soll aber trotzdem erwähnt werden: Die Robustheit wird quantifiziert durch die nicht ausgenutzten Reserven und das grundsätzliche Last–Verformungsverhalten des Tragwerks. Die nicht ausgenutzten Reserven setzen sich aus dem „übrig gebliebenen“ Teil des Ausnutzungsgrades und den durch die Anwendung vereinfachter, auf der sicheren Seite liegender Bemessungsmodelle nicht berücksichtigten Reserven zusammen. Beim Last–Verformungsverhalten wird unterschieden, ob sich das Tragwerk unter Last sehr schnell verformt, oder ob die Verformung nur langsam zunimmt (vgl. Abb. 3.7).

Bewertung und Nutzen

Auch Krätzig sieht die Notwendigkeit, auf die neuen Entwicklungen im Bereich der Tragwerksplanung zu reagieren. Neben den Grundgedanken, auf denen der Berechnungsansatz der Robustheit aufbaut, enthalten auch die vorgeschlagenen Maßnahmen, die zur Erzielung von Robustheit dienen sollen, wichtige qualitative Hinweise zur Definition von Robustheitsmerkmalen.

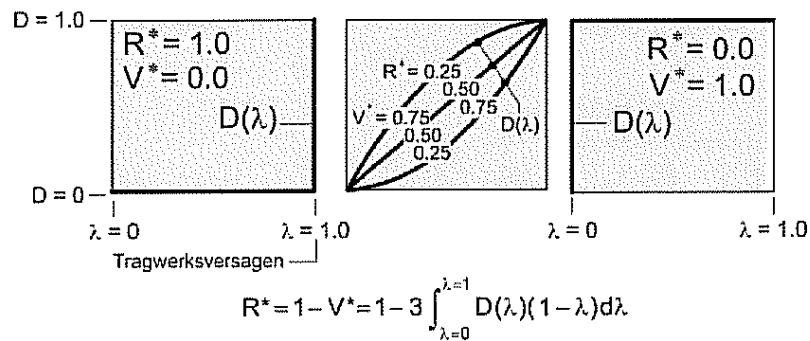


Abbildung 3.7: Normierte Robustheitsanteile R^* verschiedener Schädigungsevolutionen [WK07]

3.4 Plötzl, 1996

In dem Aufsatz *Robuste Tragwerke - Vorschläge zu Entwurf und Konstruktion* [Plö96] stellt der Autor Gründe für die Notwendigkeit von Robustheit bei Bauwerken vor und definiert anschließend Merkmale eines robusten Tragwerks.

Als Grund für die Notwendigkeit einer über die Anforderungen der Normen hinausgehende Robustheit bei Bauwerken werden folgende Aspekte aufgeführt:

- **Defizite der Normen**

Das Einhalten der Anforderungen in den derzeitigen Normen ist noch keine Garantie für „gute Bauwerke“. Zum Einen gibt es gewisse „Abbildungsunschärfen“ auf Einwirkungs-, Widerstands- und Bemessungsseite. Beispielsweise werden Einwirkungen geringer Wahrscheinlichkeit durch das semi-probabilistische Sicherheitskonzept nicht abgedeckt. Außerdem werden die Folgen eines Versagens oder Schadens nicht ausreichend berücksichtigt. Das Anwenden der Bemessungsverfahren in den Normen gewährleistet nicht automatisch den Entwurf von robusten Tragwerken. Die Nachweise erfolgen weitgehend auf lokaler Ebene; aus dieser gehen jedoch keine Hinweise auf die Robustheit hervor. Darüber hinaus wird in den Normen hauptsächlich der „Regelfall“ abgedeckt, Spielraum für Innovationen und den „Sonderfall“ ist nicht ausreichend vorhanden.

- **Gründe für Fehler**

Fehler sind zu 80 % durch den Menschen verursacht; davon liegt ein Großteil der Schadensursachen bereits in der Planungsphase begründet. Außerdem können Fehler in der Ausführung durch eine fehlerunanfällige Planung deutlich reduziert werden. Als Beispiel hierfür nennt Plötzl die symmetrische Bewehrungsanordnung einer biegebeanspruchten Stütze, wodurch ein fehlerhafter Einbau durch überschaubare Mehrkosten vermieden werden kann. Als weitere Gründe für Fehlerquellen nennt er die Unsicherheit aufgrund teilweise nicht quantifizierbarer

Umwelteinflüsse, das Vergessen eines Lastfalls in der Bemessung (unbewusst) und das bewusste Nichtberücksichtigen einer Einwirkung aufgrund zu hoher Kosten für die Verstärkung oder einer zu geringen Auftretenswahrscheinlichkeit.

Ein robustes Bauwerk verhindert ein Versagen aufgrund rechnerisch nicht erfasster bzw. erfassbarer Einwirkungen. Damit sind Einwirkungen gemeint, deren Auftretenswahrscheinlichkeit so gering ist, dass sie nicht erfasst werden, sowie solche, die zwar wahrscheinlich sind, deren Größe aber nicht vorhersehbar ist. Mit dem Sicherstellen der Robustheit bei Bauwerken sollen folgende Ziele verfolgt werden:

- Oberstes Gebot: Probleme möglichst im Vorfeld von Berechnung, Bemessung und konstruktiver Durchbildung eliminieren.
- Robustheit soll Qualitätszuwachs gegenüber den verbindlich vorgeschriebenen Mindestanforderungen bieten.
- Probleme sollen durch konzeptionelle Maßnahmen gelöst, der Blick dabei auf das Gesamttragwerk gerichtet werden.
- Ungünstige Einflüsse sollen vermieden werden.
- Unangekündigtes Versagen soll verhindert werden.
- Das Bauwerk soll gutmütig auf katastrophale Einwirkungen reagieren.
- Geringfügige Abweichungen zu rechnerischen Annahmen dürfen keine Schäden verursachen.
- Planmäßige Einwirkungen sollen so begrenzt werden, dass die vorgesehene Lebensdauer mit angemessenem Unterhaltungsaufwand eingehalten werden kann.

Als Voraussetzung für den Entwurf eines robusten Bauwerks führt Plötzl folgende Punkte auf:

- Redundanz gewährleisten. Diese beschreibt das Bereitstellen alternativer Lastpfade innerhalb der Tragstruktur. Sie geht über die „ γ -Anforderungen“ hinaus und bietet Sicherheit bei unplanmäßigen Beanspruchungen. Notwendig dafür ist u.a. eine statische Unbestimmtheit des Tragwerks.
- Ausfallgefährdete Bauteile vermeiden.
- Duktilität im Tragwerk ermöglichen. Dadurch können systemimmanente Tragreserven genutzt werden. Diese dürfen jedoch noch nicht durch eine plastische Bemessung berücksichtigt sein. Außerdem muss ein Rotationsvermögen zur Fließgelenkbildung ermöglicht werden.
- Verformungsfähigkeit bei Bauwerken gewährleisten, übermäßigen Zwang vermeiden (auch bei statisch unbestimmten Systemen).

- Form bzw. Geometrie kraftflussorientiert entwerfen. Somit kann viel Formänderungsenergie eingespart werden, dadurch weniger Bewehrung usw.
- Kompaktheit: Bauteile mit minimaler Oberfläche konzipieren. Dies führt zu weniger Widerstand gegen Windeinwirkung und einem geringeren Einfluss von physikalischen und chemischen Einwirkungen.
- Sehr anfällige Bauteile vermeiden, Austauschbarkeit stark beanspruchter Bauteile ermöglichen.
- Bauwerke auch für eine mögliche Nutzungsänderung im begrenzten Umfang konzipieren (Anpassungsfähigkeit).
- Tragwerk so entwerfen, dass eine fehlerunanfällige Ausführung möglich ist.

Bewertung und Nutzen

Die Gründe, die Plötzl für die Notwendigkeit der Konstruktion von robusten Tragwerken aufführt, decken sich in wesentlichen Bereichen mit den Hintergedanken des Forschungsantrages: Auch er bemängelt, dass in den Normen die Nachweise nur auf lokaler, bauteilbezogener Ebene durchgeführt werden und das Gesamttragwerk nur unzureichend untersucht wird. Durch die Planung von robusten Tragwerken will er dafür sorgen, dass mögliche Probleme bereits im Vorfeld der Planung und Bemessung beseitigt werden. Auch die FMEA beschäftigt sich damit, mögliche Fehler bereits zu diesem Zeitpunkt zu erkennen. Die Robustheit eines Tragwerks ist sicherlich eine gute Möglichkeit dies zu gewährleisten. Aber auch bei weniger robusten Tragwerken kann durch die Durchführung einer FMEA dieses Ziel erreicht werden. Die genannten Robustheitsmerkmale fließen in die Zusammenstellung am Ende des Kapitels mit ein.

3.5 Döge u.a., 2006

Der Artikel *Tragwerkskonzepte* [TD06] befasst sich mit dem Thema Robustheit und verschiedenen Methoden wie diese sichergestellt werden kann. Untersucht wird in erster Linie der Lastfall *Detonation* und die daraus resultierenden Anforderungen.

Zu Beginn weisen die Autoren darauf hin, dass bei Bauwerken grundsätzlich keine absolute Sicherheit gegenüber allen möglichen Einwirkungen zu erzielen ist. Die Anforderungen beschränken sich in Anlehnung an den Eurocode 0 darauf, „ein Tragwerk so auszubilden und auszuführen, dass durch Ereignisse wie Explosionen, Anprall oder menschliches Versagen keine Schadensfolgen entstehen, die in keinem Verhältnis zur Schadensursache stehen“. Außerdem werden im Eurocode Maßnahmen gefordert, die die mögliche Schädigung begrenzen. Untersucht wird in diesem Fall die *Vermeidung des progressiven Kollapses*.

Es wird darauf hingewiesen, dass die Begriffe Robustheit, Redundanz und Stabilität oft synonym verwendet werden und es erfolgt eine Abgrenzung und Beschreibung dieser:

- **Robustheit** ist das Widerstandsvermögen gegen Belastung unabhängig von der Belastungsart (Schadenstoleranz).
- **Redundanz** bezeichnet im Allgemeinen das mehrfache Vorhandensein funktions-, inhalts- oder wesensgleicher Objekte und im Besonderen die Verfügbarkeit mehrerer Lastpfade für Einwirkungen.
- **Stabilität** ist die Unempfindlichkeit gegenüber kleinen Störungen. Ein stabiles System kehrt nach solchen Störungen wieder in die Ausgangslage zurück.

Bei den Planungsansätzen für den Entwurf und die Bemessung robuster Tragwerke wird in *direkte Methoden* und *indirekte Methoden* unterschieden. Bei den direkten Methoden erfolgt eine *Bemessung* des Tragwerks für besondere, außergewöhnliche Einwirkungen. Die indirekten Methoden liefern *qualitative Empfehlungen* für robuste Tragstrukturen durch entsprechende Planungs-, Bemessungs- und Konstruktionsregeln. Darüber hinaus werden *Objektschutzmethoden* genannt, die verschiedene Maßnahmen beinhalten ein Bauwerk vor Einwirkungen zu schützen.

3.5.1 Direkte Methoden

Schutzbemessung

Eine Schutzbemessung dient dazu, alle Bauteile eines Tragwerks so auszulegen, dass ein Versagen verhindert werden kann. Eine entsprechende Bemessung wird immer bezogen auf besondere, nicht in der Norm vorgesehene, Einwirkungen durchgeführt. I.d.R. resultieren aus der Schutzbemessung größere Bauteilabmessungen und stabilere Konstruktionen als durch die Bemessung nach Norm. Dadurch entsteht automatisch ein erhöhter Feuerwiderstand, der zu erhebliche Einsparungen beim baulichen Brandschutz führen kann, wodurch Mehrkosten teilweise ausgeglichen werden können.

Alternativ hierzu können Bauteile auch durch Schutzeinrichtungen wie Barrieren oder Schutzverkleidungen geschützt werden. Schutzverkleidungen gegen Detonationsdruck sind derzeit im Forschungsstadium. Bisher stehen nur auf Massenträgheitseffekten basierende Schutzverkleidungen zur Verfügung (z.B. vorgesetzte Stahlbetonschalen), deren Anwendung allerdings nicht wirtschaftlicher als die Durchführung einer Schutzbemessung ist.

Alternative Lastpfadmethode

Grundlage dieser Methode ist es, redundante Tragstrukturen zu entwickeln, die für die Einwirkungen verschiedene Lastpfade bereitstellen. Auf diese Weise soll die Standicherheit eines Bauwerks auch dann gewahrt bleiben, wenn eines seiner Bauteile versagt. Die Herstellung von alternativen Lastpfaden kann durch die Verwendung von statisch unbestimmten Systemen erfolgen, die eine Kraftumlagerung ermöglichen. Wichtig ist, dass die Umlagerungsschnittkräfte auch wirklich aufgenommen werden können. Diese sind, durch die dynamische Wirkung bei einem schlagartigen Versagen, oft größer als die entsprechenden statischen Werte. Es wird empfohlen die Berechnungen dynamisch durchzuführen oder alternativ bei der statischen Berechnung die Kombinationsbeiwerte zu verdoppeln.

An dieser Stelle werden beispielhaft vier Möglichkeiten vorgestellt, wie ein Stützensausfall kompensiert werden kann (vgl. Abb. 3.8). Zum Einen kann der Hauptträger verstärkt werden, um die Lasten direkt durch Biegung zu den benachbarten Stützen weiterzuleiten. Zum Anderen kann ein Geschoss durch ein Fachwerk verstärkt werden. In diesem Fall müssen die Stützen oberhalb der Ausgefallenen auch Zugkräfte aufnehmen können. Ähnlich wie bei der 1. Möglichkeit ist auch eine Verstärkung einiger bzw. aller Träger möglich.

Als Schutz vor dem Lastfall *Detonation* sollte auf jeden Fall die unterste Decke verstärkt werden, da so eine Barriere für häufig auftretende Folgebrände erhalten bleibt. Der Eurocode 1 enthält die Empfehlung, dass eine Schädigung durch einen Stützensausfall nur max. 15% der Geschossfläche zweier benachbarter Stockwerke betreffen darf. Hieraus lassen sich eine Mindeststützenanzahl und Maximalabstände der Stützen ableiten, die hier nicht weiter erläutert werden.

Entkopplung

Als Möglichkeit zur Schadenseingrenzung bei besonderen Bauwerken wird die *Entkopplung in Bauwerksabschnitte* vorgestellt. Diese bewirkt, dass das Versagen eines Bauwerksabschnitts keine Auswirkungen auf benachbarte Abschnitte hat. Es werden zwei Beispiele für dieses Verfahren genannt:

- Beispiel 1 - Confederation Bridge: Bei dieser Brücke wurden an mehreren Stellen Gelenke eingefügt, die bei einem Teilversagen den entsprechenden Abschnitt von dem Resttragwerk trennen. Dadurch wird eine Ausweitung des Versagens auf weitere Brückenteile verhindert. Ein Teilversagen wird somit akzeptiert um dessen Auswirkungen zu begrenzen [Sta05].

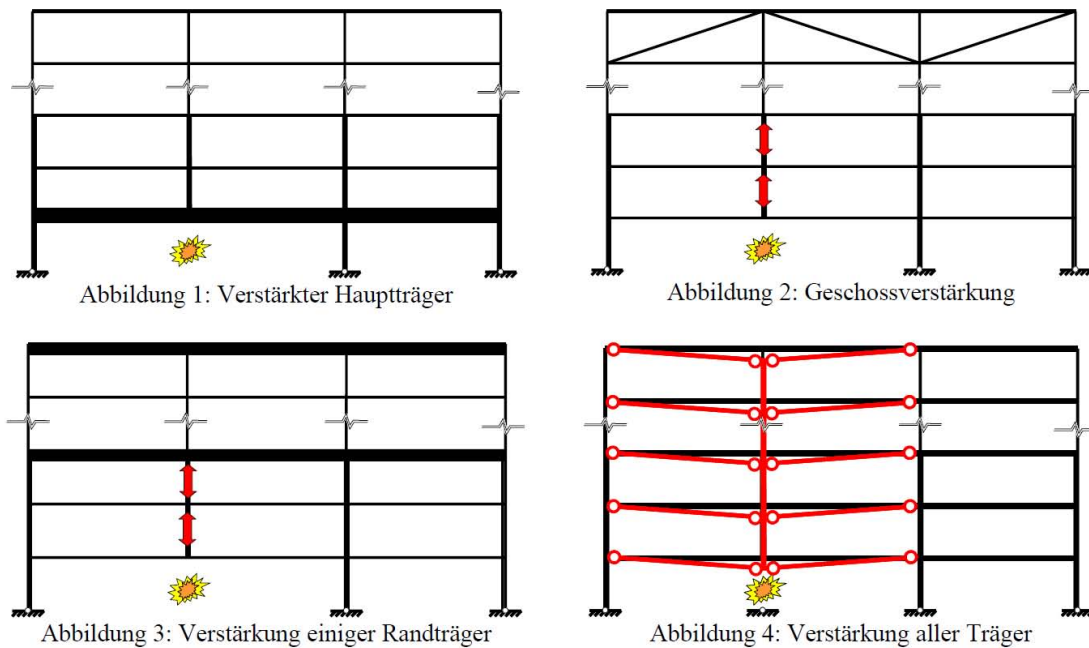


Abbildung 3.8: Vier Möglichkeiten zur Herstellung eines redundanten Tragwerks [TD06]

- Beispiel 2 - eingeschossiger Hallenbau: Um im Brandfall die Auswirkungen zu begrenzen und ein Ausweiten des Feuers zu verhindern, wird das Hauptaugenmerk auf die Funktionsfähigkeit der Brandwände gelegt. Durch eine Entkoppelung des Dachs von den tragenden Brandwänden durch entsprechend gestaltete Anschlüsse, wird bei einem Versagen des Dachtragwerks eine Beeinträchtigung der Brandwände verhindert.

3.5.2 Indirekte Methoden

Die indirekten Methoden zur Sicherstellung einer Robustheit basieren nicht auf einer Berechnung. Sie beschreiben vielmehr grundlegende Vorgehensweisen und Empfehlungen, wie robuste Tragwerke konzipiert werden können. Zum einen können auf diese Weise bestehende Bauwerke anhand von Tragwerksmerkmalen qualitativ bewertet werden. Auf dieser Grundlage kann dann festgelegt werden, ob eine weitere Untersuchung notwendig ist. Zum anderen können aus diesen Bewertungskriterien Planungs-, Bemessungs- und Konstruktionsregeln abgeleitet werden, die ein qualitatives Merkmal für die Mindestrobustheit eines Bauwerks darstellen. Als allgemeine Empfehlungen wird Folgendes genannt:

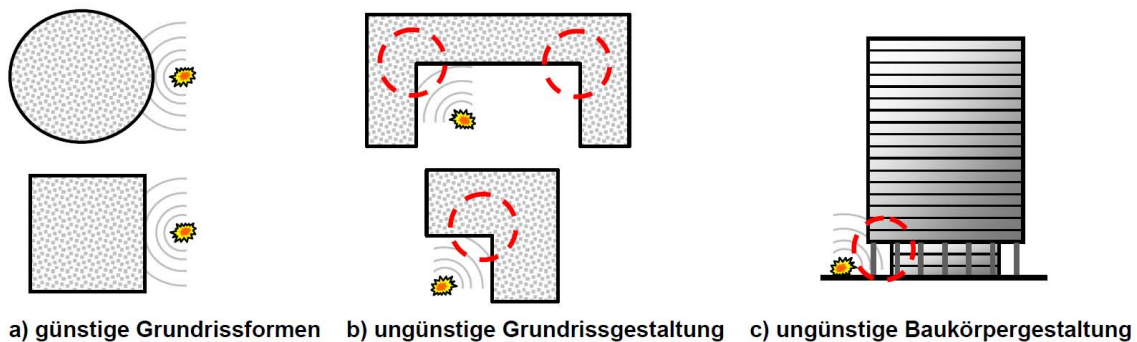


Abbildung 3.9: Hinweise für die Baukörpergestaltung [TD06]

- die Verwendung regelmäßiger Grundrissformen (geringes Oberflächen-/Volumenverhältnis und Vermeidung einspringender Ecken (vgl. Abb. 3.9), gleichmäßige Stützweiten,...),
- die Vermeidung von Unregelmäßigkeiten im Aufriss (vertikale Lastpfade sind stets geradlinig und ununterbrochen bis zur Gründung zu führen, gleichmäßige Horizontalsteifigkeit der Geschossebenen),
- eine Stützweitenbegrenzung bzw. die Begrenzung des Stützweitenverhältnisses benachbarter Tragwerksabschnitte,
- die Auswahl duktiler Bauteilquerschnitte und Anschlusskonfigurationen,
- und die Zusammenschnürung der Tragstruktur mittels horizontaler und vertikaler kontinuierlicher Zugglieder.

3.5.3 Objektschutzmethoden

Die Objektschutzmethoden gewährleisten den Schutz eines gesamten Bauwerks, ohne dass das Bauwerk selbst den entsprechenden Einwirkungen standhalten muss. Diese beschreiben in erster Linie Schutzabstände zur Minimierung von Detonationsdrücken. Schutzabstände lassen sich durch Sekundärbauwerke wie vorgelagerten Mauern oder aber durch natürliche oder künstlich angelegte Geländestufen erreichen (vgl. Abb. 3.10). Zusätzlich zur Sicherstellung eines Schutzabstandes nehmen diese auch einen Teil des Detonationsdrucks auf.

Bewertung und Nutzen

Zur Gewährleistung einer Robustheit erfolgt in diesem Artikel eine Unterteilung in *direkte* und *indirekte Methoden*. Die indirekten Methoden beschreiben qualitative Robustheitsmerkmale, mit denen „passiv“, durch konstruktive Maßnahmen ein robustes

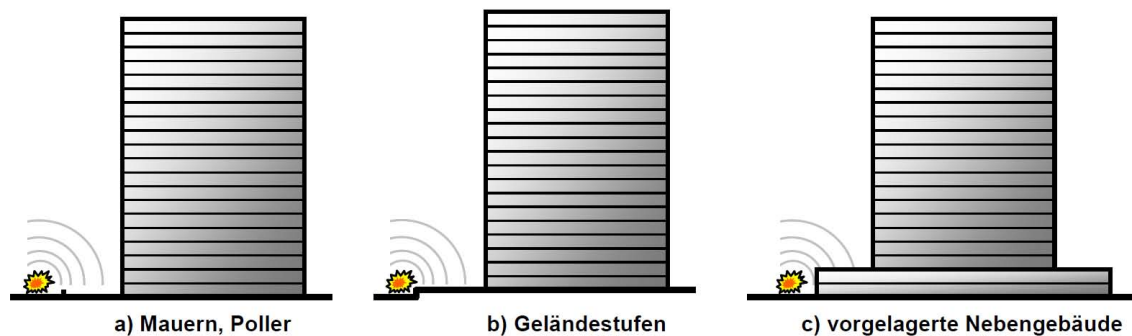


Abbildung 3.10: Maßnahmen zur Gewährleistung von Mindestabständen [TD06]

Tragwerksverhalten erzielt werden kann. Mit den direkten Methoden wird „aktiv“ eingegriffen: Die erwähnte Schutzbemessung kann als Vermeidungsmaßnahme eingesetzt werden, wenn für ein Bauteil ein erhöhtes Risiko besteht. Mit der Entkopplung kann die Bedeutung eines Fehlers reduziert werden. Die Bereitstellung von alternativen Lastpfaden entspricht hingegen direkt einem Robustheitsmerkmal nach der hier verwendeten Definition.

3.6 Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Erdbebensicherheit von Bauwerken (Türkei)

Nachdem in der Türkei im Jahr 1999 in den Provinzen Kocaeli und Düzce zwei große Erdbeben stattfanden, begann man mit intensiven Bemühungen, sich auf kommende Erdbeben so gut wie möglich vorzubereiten [HS] [Özc05]. Ziel war es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die bestehenden Gebäude in erdbebengefährdeten Gebieten hinsichtlich ihrer Erdbebensicherheit bewertet werden können. Die Bewertung eines Gebäudes sollte möglichst wenig Zeit in Anspruch nehmen, da die Anzahl der Gebäude in erdbebengefährdeten Gebieten in der Türkei sehr groß ist (allein in der Stadt Istanbul über eine Million Gebäude). Durch die bei den beiden Erdbeben beschädigten Gebäude stand eine große Datenbasis zur Verfügung, um eine Untersuchung maßgebender Kriterien durchzuführen.

Nach den Beben waren zwar die meisten Gebäude noch intakt, viele wiesen aber leichte bis schwere Schäden auf oder waren komplett eingestürzt. Es erfolgte eine Erfassung von insgesamt 477 Gebäuden, die schwer beschädigt wurden oder eingestürzt waren. Auf Grundlage dieser umfangreichen Datenbasis wurde nun untersucht, welche Eigenschaften diese Gebäude gemeinsam hatten, bzw. was an den Gebäuden anders war, die keine oder nur leichte Beschädigungen aufwiesen. Basierend auf diesen Unter-

3.6 Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Erdbebensicherheit von Bauwerken (Türkei)

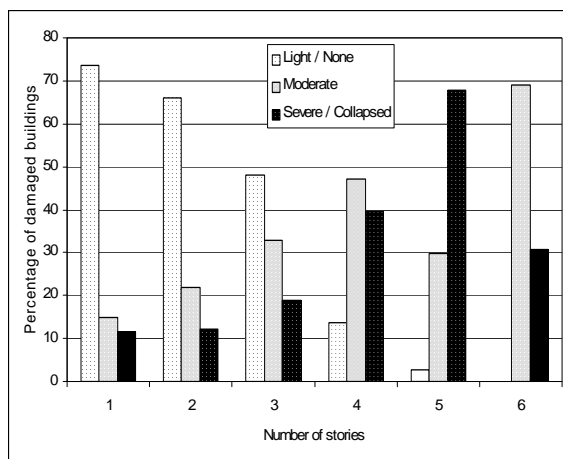


Abbildung 3.11: Vergleich Schäden durch Erdbeben - Anzahl der Geschosse [HS]

suchungen erfolgte eine Definition von Eigenschaften, die aufzeigen, ob ein Gebäude erdbebengefährdet ist oder nicht.

Man stellte fest, dass die höheren Gebäude besonders häufig schwere Schäden aufwiesen. Daraus leitete man die Anzahl der Geschosse eines Gebäudes als wichtigstes Kriterium zur Bewertung der Standsicherheit bei einem Erdbeben ab (vgl. Abb. 3.11). Die weiteren wesentlichen Kriterien werden nun in gewichteter Reihenfolge angegeben:

- die Art und die Eigenschaften des Bodens
- das Vorhandensein eines „Soft Storys“, gemeint ist ein Erdgeschoss, das eine deutlich geringere Steifigkeit aufweist als die darüber liegenden Geschosse
- die augenscheinliche, von außen ersichtliche Qualität bzw. der offensichtliche Zustand des Gebäudes
- das Vorhandensein großer und schwerer Auskragungen (heavy overhangs)
- das Vorhandensein kurzer Stützen (short columns)
- der Abstand zu den Nachbargebäuden, d.h. ob die Möglichkeit eines „Aneinanderschlagens“ im Erdbebenfall besteht (pounding effect)
- die Beschaffenheit des Geländes (topographic effects)

Anhand der durchgeführten Untersuchungen erfolgte eine genaue Wichtung der Kriterien. Auf dieser Grundlage wurde ein Bewertungssystem (Simple Survey Procedures, im Folgenden „einfaches Bewertungsverfahren“ genannt) entwickelt, das es ermöglicht, in maximal zehn Minuten die Erdbebensicherheit eines Gebäudes zu untersuchen. Dafür muss das Gebäude nicht betreten werden, die Methode basiert ausschließlich auf einer äußeren Bewertung.

Die Klassifizierung der Erdbebensicherheit erfolgt über die Berechnung des Building Performance Scores (PS) (vgl. Formel 3.1). Dieser setzt sich zusammen aus

- dem Base Score (BS) nach Tabelle 3.1,
- dem Penalty Score (PS_i) nach Tabelle 3.2
- und dem Penalty Score multiplier (α_i) nach Tabelle 3.3.

$$PS = BS + \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot PS_i \quad (3.1)$$

Je niedriger nun der Wert des Building Performance Scores ist, desto anfälliger ist ein Gebäude für eine Erdbebeneinwirkung. Es erfolgt eine Einteilung in „safe“, „intermediate“ und „unsafe“.

Es wurden insgesamt 2000 Gebäude mithilfe einer genauen Berechnung umfangreich analysiert und bewertet. Anschließend führte man an den selben Gebäuden eine Bewertung nach dem einfachen Bewertungsverfahren durch. Aufbauend auf die Ergebnisse der genauen Untersuchung wurde daraufhin das einfache Bewertungsverfahren kalibriert und Bereichsgrenzen festgelegt. Die Ergebnisse der Kalibrierung sind allerdings nur für Bauwerke ähnlichen Typs verwendbar; in anderen Ländern mit anderen Bauverfahren und einer anderen Art von Gebäuden kann diese nicht einfach übernommen werden.

Wenn ein Gebäude mit diesem Verfahren als unsicher eingestuft wurde, erfolgt eine genauere Untersuchung, bei der das Erdgeschoss und zum Teil das 1. Obergeschoss begutachtet wird. Diese weiterführenden Untersuchungen sollen an dieser Stelle allerdings nicht vorgestellt werden.

Bewertung und Nutzen

Das vorgestellte Verfahren zur Bewertung der Erdbebensicherheit von Bauwerken stellt von der Methodik her eine sehr interessante Möglichkeit dar, anhand einfacher Gebäudemerkmale eine Bewertung vorzunehmen. Dass dies Verfahren funktioniert haben umfangreiche Vergleichsrechnungen gezeigt. Dieser Ansatz wird in der weiteren Arbeit herangezogen, um eine Bewertung der Robustheit nach einem ähnlichen Verfahren durchzuführen. Darüber hinaus stellen einige der Kriterien auch Robustheitsmerkmale dar.

3.6 Bewertungsverfahren zur Ermittlung der Erdbebbensicherheit von Bauwerken (Türkei)

Number of stories	Zone I $60 \leq \text{PGV} \leq 80$		Zone II $40 \leq \text{PGV} \leq 60$		Zone III $20 \leq \text{PGV} \leq 40$	
	1-2	100	130	150		
3	90	120	140			
4	75	100	120			
5	65	85	100			
6-7	60	80	90			

Tabelle 3.1: Base Scores in Abhängigkeit der Geschosszahl und des Bodens nach [Özc05]

Number of stories	Soft Story	Heavy Overhangs	Apparent Quality	Short Column	Pounding Effects	Topographic Effects
1-2	0	-5	-5	-5	0	0
3	-15	-10	-10	-5	-2	0
4	-20	-10	-10	-5	-3	-2
5	-25	-15	-15	-5	-3	-2
6-7	-30	-15	-15	-5	-3	-2

Tabelle 3.2: Penalty Scores in Abhängigkeit der Geschosszahl nach [Özc05]

Vulnerability Parameter	exists	does not exist	
Soft Story	1	0	
Heavy Overhangs	1	0	
Short Column	1	0	
Pounding Effects	1	0	
Topographic Effects	1	0	
Vulnerability Parameter	good	moderate	bad
Apparent Quality	0	1	2

Tabelle 3.3: Penalty-Score-Multipliers nach [Özc05]

3.7 Zusammenstellung der genannten Robustheitsmerkmale

Bei den verschiedenen Autoren herrscht Einigkeit darüber, dass der Robustheit von Tragwerken eine zu geringe Bedeutung in den derzeitigen Bemessungsverfahren zukommt. Auch die Forderung, dass die Begrifflichkeiten in diesem Zusammenhang einheitlich definiert werden sollten, wird von mehreren Autoren genannt. Sie stellen qualitative Merkmale vor, die die Robustheit eines Tragwerks kennzeichnen. Auch die Kriterien, anhand derer die Erdbebensicherheit von Bauwerken ermittelt werden kann, spiegeln z.Tl. Aspekte der Robustheit wieder.

An dieser Stelle soll eine Zusammenstellung der wesentlichen Merkmale erfolgen. Da viele der Merkmale von mehreren Autoren genannt werden, werden diese in der Tabelle 3.4 nun zusammengefasst und strukturiert. In Kapitel 4 wird auf dieser Grundlage die Einteilung in Robustheitsklassen durchgeführt.

3.7 Zusammenstellung der genannten Robustheitsmerkmale

Merkmale	Eigenschaften	Erläuterungen
Redundanz Tragwerk	Alternative Lastpfade	Können Lasten innerhalb des Systems umgeleitet werden?
	Statische Bestimmtheit	Statische Unbestimmtheit ist Voraussetzung für redundantes Tragverhalten
	Sensitivität	Haben lokale Schwächen große Auswirkungen?
Redundanz Verbindungen	Sensitivität gegenüber Ausfall einzelner Verbindungsmittel	Trägt die Verbindung auch wenn einzelne Verbindungsmittel ausfallen?
	Aufnahmemöglichkeit geänderter Lasten	Können geänderte Lasten, die durch veränderte Lastpfade im Tragwerk hervorgerufen werden, aufgenommen werden?
Baustoffverhalten	duktil oder spröde	Tritt ein schlagartiges Versagen ein oder gibt es eine Vorankündigung?
Sicherheit und Wartung	Ausfallgefährdung von Bauteilen	Sind Bauteile ausfallgefährdet?
	Austauschbarkeit beanspruchter Bauteile	Sind beanspruchte Teile zugänglich? Kann eine Beeinträchtigung rechtzeitig erkannt werden? Ist eine Austauschbarkeit gewährleistet?
Bauweise	Baumaterialien	Welche Baustoffe werden überwiegend verwendet?
	Gebäudeart	Um welche Bauwerksart handelt es sich (Skelettbau,...)?
Lastabtrag	Konzentration von Lasten	Sind die Lasten gleichmäßig verteilt oder konzentrieren sie sich an bestimmten Punkten?
	Linearität des Lastabtrags	Ist der vertikale Lastabtrag geradlinig oder gibt es z.B. Versprünge?
Baukörper	Art und Regelmäßigkeit	Werden regelmäßige Grundrissformen verwendet („kompaktes“ Bauwerk, gleichmäßige Stützweiten, ...)?

Tabelle 3.4: Strukturierung von Robustheitsmerkmalen

4 Umfang der FMEA

Bisherige Arbeiten haben gezeigt, aus welchen Gründen die Anwendung einer FMEA im Bauwesen sinnvoll ist und auf welche Weise sie durchgeführt werden kann. Da unterschiedliche Bauwerke allerdings auch unterschiedliche Risikopotenziale beherbergen, erscheint es sinnvoll, die FMEA nicht bei jedem Bauwerk in gleicher Weise durchzuführen. Während beispielsweise bei Bauwerken mit besonderen Anforderungen an die Planung eine umfangreiche FMEA in einem großen Teilnehmerkreis zur Anwendung kommen sollte, ist bei einfachen Bauwerken evtl. gar keine FMEA notwendig.

Daher soll in diesem Kapitel untersucht werden, anhand welcher Kriterien der Umfang einer durchzuführenden FMEA festgelegt werden kann. Es soll ein Verfahren entwickelt werden, das eine sinnvolle Regelung gewährleistet und möglichst alle relevanten Einflussfaktoren berücksichtigt. Dabei werden die wesentlichen Ziele verfolgt, das System so einfach wie möglich zu machen und, soweit möglich, auf bestehendes Fachwissen zurückzugreifen.

4.1 Bautechnische Prüfung von Bauwerken

An dieser Stelle werden Überlegungen von Dressel und Andrä aufgegriffen, die sich mit der Frage beschäftigen, woran man die Notwendigkeit und den Umfang einer bautechnischen Prüfung festmachen kann [Dre09]. Dabei berücksichtigen sie sowohl die Prüfung der Standsicherheit als auch die des vorbeugenden Brandschutzes. Nachfolgend werden die Motivation und die Idee der Autoren beschrieben.

4.1.1 Motivation der Autoren

Aufgrund wirtschaftlicher und politischer Gründe wurde das bautechnische Prüfverfahren vor einigen Jahren gelockert. Die Änderungen sind je nach Landesbauordnung zum Teil recht unterschiedlich. Im wesentlichen umfassen sie folgende Bereiche:

- Bestimmte Gebäude müssen nicht mehr geprüft werden (je nach Gebäudeklasse und gefährdeter Anzahl an Personen).

Honorarzone	Planungsanforderungen
HZ I	sehr gering
HZ II	gering
HZ III	durchschnittlich
HZ IV	überdurchschnittlich
HZ V	sehr hoch

Tabelle 4.1: Honorarzonen nach HOAI

- Die Benennung von Prüfungenieuren kann in manchen Bundesländern auch durch den Bauherren selbst, nicht von der zuständigen Bauaufsichtsbehörde, erfolgen. Darüber hinaus können Prüfungen teilweise auch durch privatrechtlich tätige Sachverständige anstelle von hoheitlich tätigen Prüfungenieuren durchgeführt werden. Dadurch entsteht eine Abhängigkeit des Prüfers vom Bauherrn, was letztendlich zu einem Qualitätsverlust führen kann.

Dressel und Andrä weisen darauf hin, dass die Notwendigkeit einer bautechnischen Prüfung von den Folgen eines möglichen Schadens und vom Schwierigkeitsgrad eines Bauwerks abhängt und entsprechend dieser Kriterien eine Festlegung des Prüfungsumfanges erfolgen sollte.

4.1.2 Idee der Autoren

Um die bautechnische Prüfung von den genannten Kriterien abhängig zu machen, beschreiben sie ein Verfahren, mit dem anhand einfacher und schon vorliegender Bewertungsmechanismen eine Einteilung in aussagekräftige Klassen erfolgen kann.

Die möglichen Folgen, die ein Schaden an einem Bauwerk bis hin zu seinem Versagen verursachen könnte, sind bereits im Eurocode 0 und in der VDI-Richtlinie 6200 beschrieben. Dort findet eine Einteilung von Bauwerken in **Consequence Classes (Schadensfolgeklassen)** statt, die genau diese Gesichtspunkte berücksichtigen. Dressel und Andrä greifen hier auf die Consequence Classes des Eurocodes zurück (vgl. Abb. 3.2).

Der Schwierigkeitsgrad eines Bauwerks ist bereits Grundlage für die Ermittlung der Vergütung, die für Planungsleistungen eines Bauvorhabens angesetzt werden können: Die **Honorarzonen** in der *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure - HOAI* (vgl. Tab. 4.1). Je höher die Honorarzonen, desto größer sind die Anforderungen an die Planung und desto höher sind die Honorare für Architekten und Ingenieure.

In Abhängigkeit der *Consequence Classes (1–3)* und der *Honorarzonen (I–V)* erfolgt die Einteilung von Bauwerken in die Gefährdungsklassen 1 bis 3 nach folgender Definition:

- **Gefährdungsklasse 3: Bauwerke mit hohem Gefährdungspotential**
Bauwerke der Klasse CC3, Sonderbauten im Sinne der Muster-Bauordnung (MBO), Tragkonstruktionen sehr hohen und hohen Schwierigkeitsgrades (Honorarzone V und IV der HOAI)
- **Gefährdungsklasse 2: Bauwerke mit mittlerem Gefährdungspotential**
Bauwerke der Klasse CC2, Gebäude mit einer Evakuierungshöhe von mehr als 7 m (Gebäudeklassen 4 und 5 der MBO), Tragkonstruktionen durchschnittlichen Schwierigkeitsgrades (Honorarzone III der HOAI)
- **Gefährdungsklasse 1: Bauwerke mit geringem Gefährdungspotential**
alle Bauwerke, die nicht in die Gefährdungsklassen 2 und 3 einzustufen sind

Es wird gefordert, dass alle Bauwerke der Gefährdungsklassen 2 und 3 hinsichtlich der Standsicherheit und des Brandschutzes bauaufsichtlich zu prüfen sind. Wiederkehrende Prüfungen könnten sich bei Bestandsbauten auf Bauwerke der Gefährdungsklasse 3 beschränken.

Die entscheidende Idee der Autoren ist es, insgesamt wieder mehr Bauwerke zu prüfen, dabei aber den Umfang der Prüfung zu reduzieren. Insgesamt soll dadurch sichergestellt werden, dass in Zukunft keine prüfungsrelevanten Bauwerke mehr ungeprüft gebaut werden, aber dadurch nicht der Prüfaufwand insgesamt steigt. Also *mehr Bauwerke mit geringerem Aufwand* prüfen. Genau diese Idee wird mit der Einführung einer FMEA mit abgestuftem Umfang aufgegriffen und ein Instrument zur Umsetzung dieser Forderung zur Verfügung gestellt.

4.2 Kriterien für den Umfang einer FMEA

Um den Umfang einer durchzuführenden FMEA festzulegen, werden **FMEA-Klassen** definiert. Als mögliche Kriterien wird folgendes untersucht:

- Gefährdungsklassen
- Robustheitsklassen
- Gebäudeklassen

4.2.1 Gefährdungsklassen

Die Gefährdung, die von Bauwerken im Falle von Schäden oder einem Versagen ausgeht, ist je nach Bauwerk und Nutzung sehr unterschiedlich. Daher erscheint die Einführung von Klassen, mit denen eine Aussage über die Gefährdung getroffen werden kann, sinnvoll. Insbesondere im Rahmen einer FMEA stellt sie ein hilfreiches

Kriterium zur Festlegung des notwendigen Umfangs der FMEA dar. Auch das Zugrundelegen der Consequence Classes und der Honorarzonen bietet eine logische Basis, um eine Einteilung in Gefährdungsklassen vorzunehmen. An dieser Stelle sollen einige Detailfragen und verschiedene Möglichkeiten in der Umsetzung diskutiert werden.

Consequence Classes

Zum Einen wurde von Dressel und Andrä auf die Consequence Classes nach Eurocode 0 zurückgegriffen (vgl. Abb. 3.2). In Kapitel 3 dieser Arbeit wurde darüber hinaus eine Einteilung in der VDI-Richtlinie 6200 vorgestellt (vgl. Abb. 3.1). Diese Einteilungen wurden anhand ähnlicher Merkmale durchgeführt, beide beschreiben drei verschiedene Consequence Classes. Es gibt allerdings ein paar Unterschiede im Detail:

- In der VDI-Richtlinie werden wirtschaftliche und soziale Folgen nicht berücksichtigt.
- Der Eurocode richtet sich stärker danach aus, ob und in welcher Intensität bei einem Schaden Folgen für Menschenleben entstehen. Die VDI-Richtlinie orientiert sich ausschließlich an der Anzahl der betroffenen Menschen.
- Im Eurocode werden nur Gebäude in die Klasse CC1 eingeteilt, in denen nicht von einem längeren Aufenthalt von Menschen ausgegangen wird. In der VDI-Richtlinie fallen auch Ein- und Mehrfamilienhäuser in die kleinste Kategorie.

Da die VDI-Richtlinie eine ausgewogenere Unterteilung in Consequence Classes aufweist (bei Verwendung des Eurocodes wären fast alle Gebäude in CC2) und auch eine klarere Beschreibung und Strukturierung stattfindet, werden zur Bestimmung der Gefährdungsklassen die Consequence Classes nach der VDI-Richtlinie verwendet.

Honorarzonen

Die Honorarzonen nach HOAI entsprechen einer bewährten und allgemein anerkannten Bewertung des Schwierigkeitsgrades von Bauwerken. Da sich eine große Anzahl der Bauvorhaben in den Honorarzonen II und III wiederfinden, die anderen hingegen relativ selten vorkommen, kann eine genauere Unterteilung der Honorarzonen II und III erfolgen. Ebenso ist eine Zusammenfassung der Zonen IV und V möglich.

Bei der Einteilung der Gefährdungsklassen findet sich nach dem Verfahren von Dressel und Andrä ein Großteil der Bauwerke in der Gefährdungsklasse 3, die meisten der übrigen in der Gefährdungsklasse 2 wieder (vgl. Abb. 4.1). Da von Ihnen gefordert wird, dass alle Gebäude der Gefährdungsklassen 2 und 3 bautechnisch geprüft werden müssen, ist die Einteilung wahrscheinlich nicht ausgewogen genug. Für eine Festlegung des Umfangs einer FMEA sollte diese ebenfalls etwas detaillierter erfolgen.

		Schwierigkeitsklasse				
		HZ I	HZ II	HZ III	HZ IV	HZ V
Risikoklasse	CC 1	1	1	2	3	3
	CC 2	2	2	2	3	3
	CC 3	3	3	3	3	3

GK 2 + Gebäudeklassen 4 und 5
GK 3 + Sonderbauten nach MBO

Abbildung 4.1: Gefährdungsklassen nach Dressel

		Honorarzonon nch HOAI		
		HZ I/II	HZ III	HZ IV/V
Consequence Classes	CC 1	1	1	2
	CC 2	1	2	3
	CC 3	2	3	3

Abbildung 4.2: Vorschlag für Gefährdungsklassen

Ein Vorschlag für die Einteilung ist in Abbildung 4.2 gegeben. Es erfolgt eine Zusammenfassung der Honorarzonon I und II sowie IV und V. Somit kann eine ebenso einfache wie aussagekräftige Einteilung in die Gefährdungsklassen, auch gemessen an die Vorkommenshäufigkeit der einzelnen Honorarzonon, erfolgen.

4.2.2 Robustheitsklassen

In Kapitel 3 wurden in erster Linie qualitative Merkmale für die Robustheit eines Tragwerks anhand verschiedener Literaturquellen vorgestellt und anschließend ausgewertet und zusammengefasst. An dieser Stelle soll nun ein Vorschlag erarbeitet werden, wie man auf Grundlage diese Merkmale eine Klassifizierung von Bauwerken durchführen kann.

Robustheitsklasse	Bauwerk/Nutzung	Beispielhafte Tragwerke
RC 1	statisch bestimmte Tragwerke ohne Systemreserven Fertigteilkonstruktionen ohne nachträgliche redundante Verbindungen imperfektionsempfindliche Systeme Tragwerke mit spröde-elastischem und sprödem Verformungsverhalten	Einfeldträger stützenstabilisierte Hallentragwerke ohne Kopplungen schlanke Schalentragwerke Tragwerke aus Glas Tragwerke mit Gussbauteilen
RC 2	statisch unbestimmte Konstruktionen mit Systemreserven elastisch-plastisches Tragverhalten	Durchlaufträger eingeschossige Rahmenkonstruktionen Stahlkonstruktionen
RC 3	Konstruktionen mit großer Systemredundanz Tragwerksverhalten und/oder Konstruktionen mit großen plastischen Systemreserven fehlerunempfindliche Systeme	mehrgeschossige Rahmenkonstruktionen vielfach statisch unbestimmte Systeme seilverspannte Konstruktionen überschüttete Bogentragwerke
RC 4	Tragwerke, bei denen alternativ berücksichtigte Gefährdungsszenarien und Versagensanalysen ausreichende Robustheit zeigen	Bemessung für Stützenausfall, Bemessung auf Lastfall Flugzeugabsturz

Abbildung 4.3: Robustheitsklassen (Robustness Classes) für Bauwerke [e.V08]

Robustheitsklassen nach VDI-Richtlinie 6200

Eine Möglichkeit ist es, auf die in der VDI-Richtlinie 6200 vorgestellte Einteilung in die Robustheitsklassen 1–4 zurückzugreifen (vgl. Abb. 4.3).

Die berücksichtigten Merkmale wurden in Kapitel 3 bereits zusammengefasst:

- die statische Bestimmtheit des Tragwerks,
- die Art und Redundanz der Verbindungen,
- das Trag- und Verformungsverhalten,
- die Fehlerempfindlichkeit der Systeme,
- sowie der Bemessungsumfang (Überprüfung der Tragfähigkeit bei Ausfall einzelner Bauteile).

Damit sind wesentliche Kriterien, die eine Robustheit ausmachen, berücksichtigt. Einige Überlegungen hierzu seien an dieser Stelle jedoch erwähnt:

- Bei den aufgeführten Beispieltragwerken sind im Wesentlichen einzelne Bauteile oder Teilsysteme genannt. Eine Robustheit lässt sich bei einem Tragwerk jedoch nur erzielen, wenn die gesamte Tragstruktur robust ist. Man kann nicht automatisch von der Robustheit der Teilsysteme auf die Robustheit des Gesamttragwerks schließen.

- Die Einteilung ist insgesamt relativ grob und unpräzise. Dies ist sicherlich der schweren Erfassbarkeit der Robustheit von Tragwerken anhand einfacher Merkmale geschuldet.
- Die Robustheitsklasse 4 beinhaltet rechnerische Maßnahmen zur Gewährleistung der Robustheit. Maßnahmen werden bei der FMEA allerdings an anderer Stelle betrachtet und sollten in diesem Fall nicht in die Einteilung in Robustheitsklassen mit einfließen.

Vergleich mit Bewertung der Erdbebensicherheit

In Kapitel 3 wurde ein einfaches Bewertungsverfahren zur Beurteilung der Erdbebensicherheit von Bauwerken in der Türkei vorgestellt. Die Frage die sich stellt ist, ob die Bewertung der Robustheit und damit die Einteilung von Bauwerken in Robustheitsklassen nicht in einer ähnlichen Weise erfolgen kann. Dazu wären ebenfalls umfangreiche Untersuchungen zu einer sinnvollen Einteilung sowie für eine Kalibrierung des Systems notwendig.

Vorschlag zur Bewertung der Robustheit in Anlehnung an das „einfache Bewertungsverfahren“

In Kapitel 3 wurden die wesentlichen Robustheitsmerkmale nach den verschiedenen Autoren strukturiert und zusammengestellt (vgl. Tabelle 3.4). Anhand dieser soll nun ein Vorschlag für Bewertungskriterien erarbeitet und eine mögliche Quantifizierung der Kriterien vorgestellt werden.

Die Idee ist es, anhand von Zahlen die einzelnen, für die Robustheit relevanten Merkmale eines Tragwerks zu bewerten. Dies erfolgt durch die Formulierung von Aussagen, die auf robuste Tragwerke zutreffen. Es wird ermittelt, ob diese Aussagen auch auf das zu untersuchende Tragwerk zutreffen. Es erfolgt die Einteilung in „gar nicht“, „wenig“, „mittel“, „viel“ und „absolut“. Je nach Relevanz des jeweiligen Kriteriums sind unterschiedliche Robustheitszahlen (RZ_i) angegeben. Für die Bewertung „mittel“ wird die Zahl „0“ verwendet, schlechtere Eigenschaften mit negativen und überdurchschnittliche Eigenschaften mit positiven Robustheitszahlen versehen. Die jeweiligen Zahlen werden addiert. Die Summe wird nun als „Robustheitszahl RZ“ bezeichnet und gibt an, wie die Robustheit des Tragwerks eingeschätzt wird (vgl. Formel 4.1). Eine entsprechende Einteilung wurde in Tabelle 4.2 durchgeführt. Wenn von den verwendeten Baustoffen und der Art der Gebäude ebenfalls auf eine Robustheit geschlossen werden kann, sollten diese Merkmale in die Tabelle integriert oder in einer anderen Weise berücksichtigt werden.

Wenn zum Zeitpunkt der Bewertung der Robustheit noch nicht alle Merkmale bekannt sind, die für die Bewertung benötigt werden, können entsprechende Robustheitszahlen

RZ_i festgelegt werden. Diese müssen dann bei der weiteren Planung berücksichtigt und ihr Zutreffen gewährleistet werden.

$$RZ = \sum_{i=1}^n RZ_i \quad (4.1)$$

Merkmale	Aussage	trifft zu:				RZ_i
		gar nicht	wenig	mittel	viel	
Redundanz Tragwerk	Alternative Lastpfade sind vorhanden	-4	-2	0	+2	+4
	Es liegt ein statisch unbestimmtes Tragwerk vor	-2	-1	0	+1	+2
Redundanz Verbindungen	lokale Schwächen haben keine großen Auswirkungen	-4	-2	0	+2	+4
	Die Verbindungen tragen auch wenn einzelne Verbindungsmittel ausfallen	-4	-2	0	+2	+4
	Die Verbindungen können auch Lasten aufnehmen, die durch das Anspringen alternativer Lastpfade hervorgerufen werden	-4	-2	0	+2	+4
Baustoffverhalten	Die Bauteile haben eine ausreichende Duktilität, so dass ein Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden kann	-8	-4	0	+4	+8
Sicherheit der Bauteile	Es sind keine Bauteile vorhanden, bei denen mit einer erhöhten Ausfallgefährdung zu rechnen ist	-8	-4	0	+4	+8
Wartungsfreundlichkeit	Wartungsrelevante Bauteile und Anschlüsse sind gut zugänglich und gut überwachbar	-6	-3	0	+3	+6

Tabelle 4.2: Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken

Robustheitsklasse	Robustheitszahl
1	< -10
2	-10 bis +10
3	> +10

Tabelle 4.3: Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen

Eine Einteilung in Robustheitsklassen kann nun durch die Festlegung von Grenzwerten der Robustheitszahlen erfolgen. Ein Vorschlag für die Einteilung wird in Tabelle 4.3 gegeben.

4.2.3 Gebäudeklassen

Wie bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben, findet derzeit die Festlegung des Prüfungsumfanges von Bauwerken in erster Linie in Abhängigkeit der zugehörigen Gebäudeklasse statt. Daher sollen auch an dieser Stelle die Gebäudeklassen aus der Musterbauordnung (MBO) dahingehend untersucht werden, ob sie für die Festlegung der durchzuführenden FMEA mitberücksichtigt werden können.

Die Gebäudeklassen werden in der MBO, §2 (3) wie folgt definiert:

- Gebäudeklasse 1:
 - a freistehende Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m^2 und
 - b freistehende land- oder forstwirtschaftlich genutzte Gebäude,
- Gebäudeklasse 2:
Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m und nicht mehr als zwei Nutzungseinheiten von insgesamt nicht mehr als 400 m^2 ,
- Gebäudeklasse 3:
sonstige Gebäude mit einer Höhe bis zu 7 m,
- Gebäudeklasse 4:
Gebäude mit einer Höhe bis zu 13 m und Nutzungseinheiten mit jeweils nicht mehr als 400 m^2 ,
- Gebäudeklasse 5:
sonstige Gebäude einschließlich unterirdischer Gebäude.

Anmerkung zu Gebäudeklassen:

Höhe im Sinne des Satzes 1 ist das Maß der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, über der Geländeoberfläche im Mittel. Die Grundflächen der Nutzungseinheiten im Sinne dieses Gesetzes sind die Brutto-Grundflächen; bei der Berechnung der Brutto-Grundflächen nach Satz 1 bleiben Flächen in Kellergeschossen außer Betracht.

Insgesamt lässt sich zusammenfassen, dass die Gebäudeklasse bei zunehmender Höhe und zunehmender Fläche der Nutzungseinheiten eines Gebäudes steigt. Diese Klassen beziehen sich letztendlich auf die Gefährdung der Gebäudenutzer im Brandfall. Die Höhen definieren sich durch die Anleiterbarkeit und Zugangsmöglichkeiten der Feuerwehr, die Flächenangaben der Nutzungseinheiten basieren auf der Eindämmung eines Feuers durch Brandabschnitte.

Die Gefährdungsklassen sind ein wesentlicher Bestandteil, um die Anforderungen an den baulichen Brandschutz festzulegen. Eine Berücksichtigung im Rahmen der FMEA erscheint allerdings nicht sinnvoll und wird hier nicht weiter verfolgt.

4.3 FMEA–Klassen

In den vorherigen Abschnitten wurden verschiedene Kriterien vorgestellt, die für die Festlegung des Umfangs einer durchzuführenden FMEA wichtig sein könnten. Um die wesentlichen Kriterien strukturiert anzuwenden, werden *FMEA–Klassen* definiert. Die Gebäudeklassen erschienen an dieser Stelle als nicht relevant für die Beurteilung. Daher erfolgt die Festlegung der FMEA–Klassen anhand der vorgestellten **Gefährdungs- und Robustheitsklassen**.

Die beiden genannten Klassen beschreiben jeweils andere Eigenschaften eines Bauwerks. Die Gefährdungsklasse beschreibt, wie *gefährdet* ein Bauwerk in Abhängigkeit des Schwierigkeitsgrades und der möglichen Schadensfolgen ist, bzw. welche Gefahr von diesem Bauwerk für die Allgemeinheit ausgeht. Daher ist eine Erhöhung der Genauigkeit der Betrachtung eines Tragwerks bei steigender Gefährdungsklasse entscheidend. Die Robustheitsklasse auf der anderen Seite beschreibt, wie *anfällig* bzw. *sensitiv* ein Tragwerk auf lokale Schwächen oder ein örtliches (Bauteil-)Versagen reagiert. Bei einer geringeren Robustheitsklasse sollte also dafür gesorgt werden, dass definitiv *kein einziges* Bauteil bzw. *kein einziger* Anschluss versagt. Dies kann durch die Erfassung von einer größeren Anzahl bis hin zu allen Bauteilen und Anschlüssen gewährleistet werden.

Aufbauend auf diese Überlegungen erfolgt die Einführung der FMEA–Klassen 1–4. Es wird unterschieden hinsichtlich der *Genauigkeit der Betrachtung* und der *Anzahl zu erfassender Elemente* (vgl. Tab. 4.4). Die Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“ ist in Tabelle 4.5 gegeben. Der Zusatz „g“ bei der Klasse 3 steht hier für eine

FMEA– Klasse	Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung	Anzahl zu erfassender Elemente
1	–	–
2	gering	gering
3g	hoch	gering
3r	gering	hoch
4	hoch	hoch

Tabelle 4.4: Beschreibung der FMEA–Klassen

		Robustheitsklasse		
		RK 3	RK 2	RK 1
Gefährdungsklasse	GK 1	1	2	3r
	GK 2	2	2	3r
	GK 3	3g	3g	4

Abbildung 4.4: Festlegung der FMEA–Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklassen

erhöhte Gefährdungsklasse, der Zusatz „r“ hingegen für eine erhöhte Robustheitsklasse. Wenn eine hohe Gefährdungsklasse vorliegt wird eine genaue Betrachtung der Elemente durchgeführt, wenn eine geringe Robustheitsklasse vorliegt steigt die Anzahl der zu erfassenden Elemente. Die Aufteilung der FMEA–Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklasse ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Ausformuliert lassen sich die vier FMEA–Klassen wie folgt beschreiben:

- **FMEA–Klasse 1**

In dieser Klassen ist keine Durchführung einer FMEA erforderlich. Es wird dennoch empfohlen, eine bürointerne Besprechung des statischen Konzepts und eine Betrachtung des Tragwerks hinsichtlich möglicher Schwächen vorzunehmen. In diesem Fall sollte ein kurzes Protokoll angefertigt werden.

- **FMEA–Klasse 2**

Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, andere Projektbeteiligte können mit einbezogen werden. Normale Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des

Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung	
gering:	Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, andere Projektbeteiligte können mit einbezogen werden. Normale Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung, Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragelemente. Mittlere Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ).
hoch:	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis, möglichst unter Einbeziehen des Architekten, Prüfingenieurs, des Bauleiters der ausführenden Firma und evtl. des Bauherrens. Umfangreiche Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bereits im Vorfeld der Sitzung Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall). Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung aller Tragelemente. Niedrige Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ).
Anzahl zu erfassender Elemente	
gering:	Beschränkung auf kritische Bauteile
hoch:	alle wesentlich am Lastabtrag beteiligten Bauteile berücksichtigen

Tabelle 4.5: Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“

statischen Entwurfs und der Vorbemessung, Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragelemente. Gemeinsame Besprechung, Auffinden von kritischen Bauteilen und möglicher Fehler, Definition von Fehlerursachen und -folgen. Festlegen von Bewertungszahlen. Dokumentation der Ergebnisse in Formblättern. Mittlere Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ). Es erfolgt eine Beschränkung auf die kritischen Tragwerkselemente.

- **FMEA–Klasse 3g**

Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis unter Einbeziehen des Architekten, Prüfingenieurs, des Bauleiters der ausführenden Firma und evtl. des Bauherrns. Umfangreiche Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bereits im Vorfeld der Sitzung Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall). Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung aller Tragelemente. Gemeinsame Besprechung, Auffinden von kritischen Bauteilen und möglicher Fehler, Definition von Fehlerursachen und -folgen. Festlegen von Bewertungszahlen. Dokumentation der Ergebnisse in Formblättern. Niedrige Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ). Es erfolgt eine Beschränkung auf die kritischen Tragwerkselemente.

- **FMEA–Klasse 3r**

Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, andere Projektbeteiligte können mit einbezogen werden. Normale Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung, Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragelemente. Gemeinsame Besprechung, Auffinden von kritischen Bauteilen und möglicher Fehler, Definition von Fehlerursachen und -folgen. Festlegen von Bewertungszahlen. Dokumentation der Ergebnisse in Formblättern. Mittlere Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ). Alle wesentlich am Lastabtrag beteiligten Tragwerkselemente werden berücksichtigt.

- **FMEA–Klasse 4**

Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis unter Einbeziehen des Architekten, Prüfingenieurs, des Bauleiters der ausführenden Firma und evtl. des Bauherrns. Umfangreiche Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bereits im Vorfeld der Sitzung Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall). Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung aller Tragelemente. Gemeinsame Besprechung, Auffinden von kritischen Bauteilen und möglicher Fehler, Definition von Fehlerursachen und -folgen. Festlegen von Bewertungszahlen. Dokumentation der Ergebnisse in

Formblättern. Niedrige Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ). Alle wesentlich am Lastabtrag beteiligten Tragwerkselemente werden berücksichtigt.

4.4 Einteilung von Beispielbauwerken

Zur Überprüfung der Anwendbarkeit des Bewertungssystems und zur Verdeutlichung der Vorgehensweise wurde eine Einteilung in die FMEA-Klassen anhand einiger Beispielbauwerke durchgeführt. Dabei erfolgt die Zuordnung der entsprechenden Consequence Classes und Honorarzonen zu den jeweiligen Bauwerken und daraufhin die Einteilung in die Gefährdungsklassen. Die Robustheitsklassen sind nicht direkt von der Bauwerksart abhängig zu machen. Um eine Einteilung entsprechend der Robustheitsmerkmale durchzuführen, müssten tatsächlich geplante oder bestehende Gebäude entsprechend ihrer jeweiligen Eigenschaften untersucht werden. Daher werden für jedes Bauwerk alle drei Robustheitsklassen und die jeweils aus diesen resultierenden FMEA-Klassen aufgeführt (vgl. Tabelle 4.6). Beispielhaft werden mögliche Robustheitsklassen ausgewählt und, gemeinsam mit den daraus resultierenden FMEA-Klassen, fett dargestellt.

Objekt	Consequence Class	Honorarzone	Gefährdungs- klasse	Robustheits- klasse	FMEA- Klasse
Carpport	CC 1	HZ I	GK 1	RK 3	FK 1
				RK 2	FK 2
				RK 1	FK 3r
Einfamilienhaus	CC 1	HZ II	GK 1	RK 3	FK 1
				RK 2	FK 2
				RK 1	FK 3r
Mehrfamilienhaus	CC 1	HZ II	GK 1	RK 3	FK 1
				RK 2	FK 2
				RK 1	FK 3r
Hochhaus, ca. 50m (Bürogebäude)	CC 2	HZ III	GK 2	RK 3	FK 2
				RK 2	FK 2
				RK 1	FK 3r
große Lagerhalle	CC 2	HZ III	GK 2	RK 3	FK 2
				RK 2	FK 2
				RK 1	FK 3r
Braunkohlekraftwerk	CC 3	HZ V	GK 3	RK 3	FK 3g
				RK 2	FK 3g
				RK 1	FK 4
Stadion (20.000 Sitzplätze)	CC 3	HZ IV	GK 3	RK 3	FK 3g
				RK 2	FK 3g
				RK 1	FK 4

Tabelle 4.6: Einteilung von Beispielbauwerken in die unterschiedlichen Klassen

5 Hilfsmittel

5.1 Bewertungszahlen

Um das Risiko, das von einem Fehler ausgeht bewerten zu können, werden

- die **Bedeutung** der Fehlerfolgen,
- die **Auftretenswahrscheinlichkeit** der Fehlerursache
- sowie die **Entdeckungswahrscheinlichkeit** des Fehlers bzw. der Fehlerursache

untersucht und mit Zahlen zwischen 1 und 5 bewertet (vgl. Kapitel 2). An dieser Stelle werden Hilfsmittel zur Verfügung gestellt, die das Festlegen der jeweiligen Bewertungszahlen und somit der Risikoprioritätszahl unterstützen sollen. Die hier vorgestellte Einteilung soll die „grobe Richtung“ aufzeigen, die letztendliche Bewertung und Festlegung der Bewertungszahlen erfolgt aber immer von den entsprechenden Ingenieuren.

In seiner Diplomarbeit beschäftigt sich Liening [Lie09] ebenfalls mit der Thematik der Risikobewertung. Verschiedene Aspekte aus seinen Überlegungen, insbesondere bei der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit, werden hier herangezogen.

5.1.1 Bedeutung

Die Bedeutung eines Fehlers wird beurteilt, indem die Bedeutung der Fehlerfolge untersucht wird. Liening greift an dieser Stelle auf eine Herangehensweise aus dem Maschinenbau zurück, bei der die Reaktion des „Kunden“ als Bewertungskriterium dient. Daher verwendet er nur die höchste Bewertungsstufe zur Beschreibung einer Beeinträchtigung der Tragfähigkeit, alle anderen beziehen sich auf Aspekte der Gebrauchstauglichkeit (vgl. Abb. 5.1). Da sich die Tragwerk-FMEA allerdings auf den Gesichtspunkt der Tragfähigkeit beschränkt, werden zur Bewertung an dieser Stelle folgende Kriterien herangezogen:

- die Beeinträchtigung des Tragwerks bzw. des betroffenen Teilsystems
- die Möglichkeit der weiteren Nutzung

Ausfall führt zu	Erläuterung	Bewertung
Versagen der nächst höheren Ebene oder eines Elementes der gleichen Ebene	führt zum Betriebsausfall der nächst höheren Ebene oder beeinträchtigt möglicherweise die Sicherheit und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften	5
Verlust der Gebrauchstauglichkeit	löst große Verärgerung des "Kunden" aus	4
große Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit	löst Unzufriedenheit beim "Kunden" aus. Der "Kunde" fühlt sich belästigt oder ist verärgert. Er wird die Beeinträchtigung des Systems bemerken	3
geringe Einschränkung der Gebrauchstauglichkeit	Die Auswirkung ist unbedeutend, und der "Kunde" wird sich nur geringfügig betroffen fühlen. Er wird wahrscheinlich nur eine geringe Beeinträchtigung des Systems bemerken	2
keine Auswirkungen	Der "Kunde" wird den Fehler wahrscheinlich nicht bemerken	1

Abbildung 5.1: Bedeutung von Fehlern (nach [Var04]) [Lie09]

- die Möglichkeit und Notwendigkeit von Instandsetzungsmaßnahmen

Eine Möglichkeit für eine Zuordnung und Wichtung dieser Kriterien wird in Tabelle 5.1 gegeben.

Auch wenn die *Möglichkeit der weiteren Nutzung* sehr nach Gebrauchstauglichkeit klingt, dient sie an dieser Stelle doch als wichtiges Kriterium um das Ausmaß der Schädigung zu beschreiben.

5.1.2 Auftretenswahrscheinlichkeit

Liening stellt ein Verfahren zur Festlegung der Bewertungszahl der Auftretenswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache vor, bei dem drei Kriterien berücksichtigt und folgendermaßen begründet werden:

- **der Ausnutzungsgrad des Bauteils**
Je höher ein Bauteil ausgenutzt ist, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Planungs- oder Ausführungsfehler zum Überschreiten der zulässigen Beanspruchung führt.
- **die Erfahrungen aller Beteiligten mit der Bauteilart**
Je öfter ein Bauteil geplant und gefertigt wird, desto mehr Kenntnisse haben die Beteiligten über mögliche Schwachstellen. (Problem: Steigende Erfahrung kann

Beschreibung der Fehlerfolgen	Bewertungszahl
Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5
- große Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung nicht mehr möglich, - keine (wirtschaftliche) Instandsetzung durchführbar	4
- mittlere Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung eingeschränkt möglich, - Instandsetzung mit mittlerem Aufwand verbunden	3
- geringe Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung weiterhin möglich, - kleinere Instandsetzungsmaßnahmen notwendig	2
keine Beeinträchtigung des Tragwerks oder eines Teilsystems	1

Tabelle 5.1: Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers

aber auch zu Nachlässigkeiten und damit zu einem erhöhten Fehleraufkommen führen)

- **die Art und der Ort der Herstellung**

Bauteile, die in einem Werk gefertigt werden, haben i.d.R. ein höheres Qualitätsniveau und eine geringere Streuung der Festigkeiten als auf der Baustelle gefertigte Bauteile.

Um aus den genannten Kriterien eine Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache ableiten zu können, geht Liening folgendermaßen vor: Im ersten Schritt werden **Bauteilkategorien** definiert, die aufbauend auf die *Erfahrungen aller Beteiligten mit der Bauteilart* und der *Art und dem Ort der Herstellung* mithilfe einer Matrix definiert werden (vgl. Abb. 5.2). Anhand der Bauteilkategorien und dem *Ausnutzungsgrad des Bauteils* erfolgt über eine zweite Matrix die Festlegung der Bewertungszahl (vgl. Abb. 5.3).

Abschließend weist Liening darauf hin, dass die Einteilung vorerst intuitiv vorgenommen wurde und schlägt eine Kalibrierung der Matrizen anhand von Bauschadensdatenbanken vor.

Eine solche genaue Untersuchung ist sicherlich sinnvoll und erstrebenswert. Zur Verbesserung des Systems sollen jedoch an dieser Stelle bereits einige Überlegungen diskutiert und ein darauf aufbauender, weiterer Vorschlag vorgestellt werden.

Häufigkeit der Verwendung abnehmend --->	erstmalig	II	III	V	V
	selten	II	III	IV	IV
	häufig	I	II	III	IV
	quasi ständig	I	II	II	III
		Katalog Bauteil	Fertigteil	Halbfertigteil	Ortbauweise
		Herstellungsqualität abnehmend --->			

Abbildung 5.2: Matrix zur Ermittlung der Bauteilkategorie [Lie09]

Ausnutzungsgrad	> 98 %	5	5	4	4	3
	95-98 %	5	4	4	3	2
	90-95 %	4	3	3	2	2
	75-90 %	3	2	2	1	1
	< 75 %	2	1	1	1	1
		V	IV	III	II	I
		Bauteilkategorie				

Abbildung 5.3: Matrix zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit [Lie09]

Vorschlag zur Überarbeitung des Bewertungssystems

Grundsätzlich muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit auf die Fehlerursache bezieht. Die hier vorgestellte Beurteilung erfolgt allerdings nur bauteilbezogen, d.h. die ermittelte Bewertungszahl ist für alle möglichen Fehler und deren Ursachen an einem Bauteil gleich. Daran wird deutlich, dass die ermittelte Bewertungszahl als „Tendenzwert“ zu verstehen ist. Eine genaue, an die jeweilige Fehlerursache angepasste Festlegung erfolgt entsprechend in der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung.

Der Ausnutzungsgrad liegt bei der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung häufig noch nicht genau vor, da zu diesem Zeitpunkt nur die Vorbemessung durchgeführt wurde. Aufbauend auf diese können jedoch schon Größenordnungen genannt und verwendet werden. Anderenfalls können in der Sitzung Maximalwerte des Ausnutzungsgrades festgelegt (und dokumentiert!) werden, anhand derer die Bewertung durchgeführt wird. Bei der zu diesem Zeitpunkt noch recht ungenauen Datenbasis ist die vorgeschlagene Unterteilung zu eng gewählt. Außerdem spiegeln, je nach verwendetem Bemessungsverfahren, die errechneten Ausnutzungsgrade nicht immer die tatsächlichen Reserven eines Bauteils wieder. Im Stahlbau beispielsweise macht es einen erheblichen Unterschied, ob ein Ausnutzungsgrad durch eine elastische oder eine plastische Bemessung ermittelt wurde.

Bei der Einteilung von Klassen und Einstufungen wird in dieser Arbeit eine Begrenzung auf drei Stufen favorisiert. Dies erfolgt in Anlehnung an verschiedene Klassen in der Literatur wie den Consequence Classes und trägt bestimmten Unsicherheiten und Ungenauigkeiten in der Definition und Einteilung Rechnung.

Aufbauend auf den genannten Überlegungen erfolgt ein Vorschlag für die Anpassung der Matrizen in folgender Weise:

- Die Anzahl an Klassen und jeweiligen Stufen wird auf jeweils drei reduziert.
- Die Einstufung der Ausnutzungsgrade wird an den Planungsstand und die Durchführbarkeit angepasst.

Die veränderten Matrizen sind in den Abbildungen 5.4 und 5.5 dargestellt. Die Einteilung der jeweiligen Ausnutzungsgrade erfolgt intuitiv und sollte, aufbauend auf genauere Untersuchungen, angepasst werden.

5.1.3 Entdeckungswahrscheinlichkeit

Liening merkt in seiner Diplomarbeit an, dass die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit eines Fehlers bzw. der Fehlerursache eine besondere Herausforderung

		Herstellungsqualität		
		Fertigteil	Halbfertigteil	Ortbauweise
Häufigkeit der Verwendung	häufig	I	I	II
	selten	I	II	III
	erstmalig	II	III	III

Abbildung 5.4: Vorschlag zur Ermittlung der Bauteilkategorie (überarbeitet)

		Bauteilkategorie		
		I	II	III
Ausnutzungsgrad	< 60 %	1	2	3
	60-85 %	2	3	4
	> 85 %	3	4	5

Abbildung 5.5: Vorschlag zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit (überarbeitet)

darstellt. Bisher steht weder eine Datenbasis zur Verfügung, anhand derer die Häufigkeit des Auftretens von Fehlern analysiert werden kann, noch kann eine Aussage darüber getroffen werden, zu welchem Zeitpunkt bisher welche Fehler entdeckt wurden und welche Auswirkungen sie dann schon zur Folge hatten. Daher beschränkt er sich auf die Benennung und Beschreibung von drei allgemeinen Punkten, von denen die Wahrscheinlichkeit abhängt, einen Fehler zu entdecken:

- **Die Phase, in der ein Fehler entsteht**

Die Planung eines Bauwerks durchläuft im Allgemeinen die drei Phasen der Entwurfs-, Genehmigungs- und Ausführungsplanung. Je früher ein Fehler auftritt, desto mehr Kontrollinstanzen sind vorhanden, durch die dieser aufgefunden werden kann.

- **Die Komplexität der Systems**

Je komplexer ein System ist, desto schwieriger ist die Entdeckung von Fehlern.

- **Das Vorhandensein und die Qualität der Prüfmechanismen**

Fehler können nur dann entdeckt werden, wenn entsprechend effektive und unabhängige Prüfmechanismen vorhanden sind.

Aufbauend auf die Überlegungen von Liening sollen die drei Kriterien untersucht und durch weitere Punkte ergänzt werden. Ziel ist es, auch für die Entdeckungswahrscheinlichkeit eine Anwendung von Bewertungszahlen zu ermöglichen.

Grundsätzlich ist dem ersten Punkt zuzustimmen, die *Phase in der ein Fehler entsteht* hat einen Einfluss auf die Entdeckbarkeit. Da die Tragwerk-FMEA und somit die Risikobewertung allerdings immer nach der Entwurfsphase durchgeführt wird, kann dieses Kriterium hier nicht berücksichtigt werden. Die *Komplexität der Systeme* hingegen ist ein wichtiges Kriterium, das verwendet werden kann um eine Aussage über die Entdeckungswahrscheinlichkeit zu treffen. Da die Komplexität letztendlich beschreibt, wie groß der Schwierigkeitsgrad eines Planungsprozesses ist, werden für diese Bewertung wieder die Honorarzonen nach HOAI herangezogen. Der letzte Punkt, das *Vorhandensein und die Qualität von Prüfmechanismen*, legt eine Verwendung der FMEA-Klassen zur Beurteilung nahe. Die FMEA-Klassen legen fest, mit welcher Genauigkeit und in welchem Umfang die FMEA, mit anderen Worten der Prüfmechanismus, durchgeführt wird.

Als ergänzendes Kriterium wird die Überwachbarkeit des Bauteils bzw. des Anschlusses hinzugefügt. Zwar befasst sich die Tragwerk-FMEA mit Fehlern, die in der Planungsphase auftreten können. Diese Fehler führen allerdings i.d.R. erst während der Nutzungsphase zu Schäden, so dass eine spätere Überwachung auch dazu führen kann, Fehler, die in der Planungsphase begründet liegen, rechtzeitig zu entdecken um auf sie reagieren zu können. Die Überwachbarkeit eines Bauteils oder Anschlusses lässt sich durch folgende Maßnahmen gewährleisten:

		FMEA-Klasse		
		4	3g/r	2/1
Honorarzone	HZ I/II	1	2	3
	HZ III	2	3	4
	HZ IV/V	3	4	5

Abbildung 5.6: Vorschlag zur Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

- Sicherstellung der Zugänglichkeit, so dass die Möglichkeit besteht eventuelle Verstärkungs- oder Sanierungsmaßnahmen durchführen zu können.
- Gewährleistung der Sichtbarkeit, so dass mögliche Schäden und Beeinträchtigungen festgestellt werden können.
- Überwachung kritischer Stellen z.B. durch Verformungsmessungen, die zu einer Meldung bei Überschreitung einer festgesetzten Grenze führen. Dies ist insbesondere dann sinnvoll, wenn eine Zugänglichkeit und Sichtbarkeit nicht gewährleistet werden kann oder bereits kleine, nicht ohne weiteres erkennbare Verformungen oder Dehnungen zu einem erheblichen Schaden führen können.

Die genannten Punkte, mit denen eine Überwachbarkeit gewährleistet werden kann, werden nicht direkt in die Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit mit einbezogen. Sie können aber als Maßnahmen verwendet werden, um eine Erhöhung der Entdeckungswahrscheinlichkeit zu bewirken und somit die Bewertungszahl zu reduzieren.

Eine Möglichkeit, anhand der Honorarzonen und der FMEA-Klassen eine Bewertung der Entdeckungswahrscheinlichkeit durchzuführen, ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Diese erfolgt bauwerksbezogen, d.h. jeder Fehler bzw. jede Fehlerursache liefert bei einem bestimmten Bauwerk die gleiche Bewertungszahl. Ähnlich wie bei der Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit sind diese Zahlen wieder als „Tendenzwert“ zu verstehen. Die endgültige Bewertung muss, darauf aufbauend, bauteil- und fehlerursachenbezogen durchgeführt werden.

Anzumerken ist, dass die Honorarzone über die Gefährdungsklasse einen direkten Einfluss auf die Bestimmung der FMEA-Klasse hat. Somit resultiert aus einer hohen

Honorarzone meistens auch eine hohe FMEA–Klasse und umgekehrt. Dieser Sachverhalt sollte berücksichtigt werden und unterstreicht das Verständnis der resultierenden Bewertungszahl als „Tendenzwert“.

5.1.4 Risikoschranken

Auf eine Festlegung von Risikoschranken wird in dieser Arbeit verzichtet. Um eine sinnvolle Einteilung vornehmen zu können sind wesentlich mehr Untersuchungen notwendig, als im Rahmen dieser Masterarbeit und vorausgegangener Arbeiten durchgeführt werden konnten. Die FMEA–Klassen beinhalten bereits Formulierungen, die die Größenordnung definieren. Für eine Festlegung von genauen Zahlen muss die FMEA erst bei vielen verschiedenen Bauwerken angewendet werden.

5.2 Erstellen eines Fehlerkatalogs

Die Tragwerk–FMEA befasst sich mit dem Auffinden und der Bewertung von Fehlern im statischen Konzept und der Vorbemessung. Im Rahmen einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung werden dabei die Bauteile und Anschlüsse eines Tragwerks untersucht. In der Sitzung wird zweigeteilt vorgegangen: Zum Einen wird das bestehende statische Konzept besprochen und auf schon vorhandene Fehler und Schwächen hin untersucht. Zum Anderen wird diskutiert, welche Fehler bisher möglicherweise unentdeckt geblieben sind bzw. welche Fehler im weiteren Verlauf noch auftreten können. Um diesen Prozess zu unterstützen und zu erleichtern, soll ein bauteilbezogener Fehlerkatalog für die möglichen *Fehlerarten* erarbeitet werden (vgl. Definition Kapitel 2). Die Betrachtung beschränkt sich auf die wesentlichen, typischen Bauteile des üblichen Hochbaus. Darüber hinaus sollen in diesem Abschnitt, aufbauend auf Fehlerkategorien, auch Hilfsmittel zur Formulierung von Fehlerursachen und Entdeckungsmaßnahmen gegeben werden.

5.2.1 Fehlerkategorien

Die bereits erarbeiteten Fehlerkategorien unterteilen verschiedene Bereiche, in denen Fehler verursacht werden können (vgl. Tab. 5.2). Im Rahmen der Tragwerk–FMEA werden die möglichen Ursachen untersucht, die im statischen Entwurf und der Vorbemessung begründet sind.

Fehlerkategorie	Mögliche Fehlerursachen
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	<ul style="list-style-type: none">- Versteckte Kinematiken im Tragkonzept- Unzureichende Aussteifung des Gebäudes- Der Lastfluss stellt sich in der Realität anders ein, als im Tragkonzept geplant wurde- Mangelnde Robustheit, d.h. unzureichende Reserven bei kleineren Bauteilversagen und Sensitivität gegenüber unplanmäßigen Störungen wie nicht eingeplante Anpralllasten oder Explosionen
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	<ul style="list-style-type: none">- Falsch ermittelte Lasten- Nichtberücksichtigung einer maßgebenden Einwirkung- Nichtberücksichtigung der maßgebenden Lastfallkombination
Fehler in Modellierung	<ul style="list-style-type: none">- Fehler bei der Eingabe des Modells- Das Modell entspricht nicht der Realität (z.B. Momentengelenk statt Rotationsfeder,...)
Fehler in Berechnung und Bemessung	<ul style="list-style-type: none">- Die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt- Es ist ein Fehler in der Bemessung vorhanden
Fehler in Details	<ul style="list-style-type: none">- Die Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt- Die Details sind nicht ausführbar

Tabelle 5.2: Mögliche Fehlerkategorien und Fehlerursachen [Vog09]

Fehlerkategorie	Mögliche Entdeckungsmaßnahmen
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	statischen Entwurf auf globaler Ebene auf Tragfähigkeit überprüfen (1. Schritt der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung)
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	Lastermittlung und Lastfallkombinationen überprüfen durch: - Checkliste mit allen Einwirkungen - Kontrolle der maßgebenden Lastfallkombinationen, insbesondere an kritischen Stellen
Fehler in Modellierung	Modell nach Eingabe überprüfen durch: - erneute Eingabe (Vergleich) - Kontrolle jedes Knotens und Elements - 2. Ingenieur (bürointern)
Fehler in Berechnung und Bemessung	Schnittgrößenermittlung und Bemessung überprüfen durch: - 2. Programm oder einfache Handrechnung - 2. Ingenieur (bürointern) - Checkliste mit allen notwendigen Nachweisen

Tabelle 5.3: Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung

5.2.2 Beschreibung von Maßnahmen

Bei den Maßnahmen zur Risikoreduzierung wird unterschieden in *Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache* und *Maßnahmen zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache*:

- **Vermeidungsmaßnahmen**

Wenn ein Fehler und die entsprechende(n) Ursache(n) bereits im Rahmen der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung entdeckt werden, können Maßnahmen zur Vermeidung des Fehlers ergriffen werden. Darüber hinaus können Vermeidungsmaßnahmen dazu dienen, dass durch grundsätzliche Vorkehrungen das Auftreten einer Fehlerursache vermieden wird (z.B. die Verwendung von Checklisten zur Gewährleistung der Vollständigkeit der Nachweise u.a.).

- **Entdeckungsmaßnahmen**

Mögliche Entdeckungsmaßnahmen können den verschiedenen Fehlerkategorien zugeordnet werden. Eine Auswahl ist in Tabelle 5.3 gegeben.

5.2.3 Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten

Für die Erstellung des Fehlerkatalogs werden folgende Bauteile betrachtet:

1. Stütze
2. Wandscheibe
3. Unterzug
4. Decke
5. Wandartiger Träger
6. Bodenplatte
7. Fundament

In der Tabelle 5.4 sind grundsätzliche Fehlerarten, die bei den jeweiligen Bauteilen auftreten können, aufgeführt. Diese sollten später firmenintern ergänzt werden.

1. Stütze <ul style="list-style-type: none"> - Stabilitätsversagen (Knicken) [s] - Druckversagen [s] - Zugversagen (Zugstütze) [d] - Biegeversagen [d/s] - zu starke Verformungen [d] - wird verschieblich (selten) [d] - Schubversagen (z.B. kurze Stützen bei Erdbeben) [s] 	2. Wandscheibe <ul style="list-style-type: none"> - Druckversagen (der Druckstebe) [s] - Zugversagen (im Auflagerber.) [d/s] - zu starke Verformungen [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s]
3. Unterzug <ul style="list-style-type: none"> - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - zu starke Verformungen [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s] 	4. Decke <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] - Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]
5. Wandartiger Träger <ul style="list-style-type: none"> - Druckversagen (der Druckstrebe) [s] - Zugversagen (in Zugzone) [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s] 	6. Bodenplatte <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] - Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]
7. Fundament <ul style="list-style-type: none"> - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - Versagen einer Zugverankerung (Einleitung der Kräfte) [d/s] - zu geringe Lagesicherheit [d/s] - bei Einzelfundament: Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung] (den Boden betreffende Fehler, wie Grundbruch, werden hier nicht berücksichtigt)	
d = duktileres Materialverhalten s = sprödes Materialverhalten	

Tabelle 5.4: Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Bauteile

6 Nutzen der FMEA am Beispiel von versagten Bauwerken

Wie zu Beginn der Arbeit bereits beschrieben, ist es das Ziel einer FMEA, potentielle Fehler bereits in einem frühen Planungsstadium zu erkennen, um diese zu vermeiden oder deren Auswirkung durch geeignete Maßnahmen gering zu halten. Ob sie in der Lage ist, dieses Ziel auch zu erreichen, kann am Besten an Schadensfällen untersucht werden, bei denen unterschiedliche Fehler zu einem Versagen des Tragwerks geführt haben. Daher wird in diesem Kapitel anhand von zwei Versagensfällen eine nachträgliche, „simulierte“ FMEA durchgeführt. Dabei erfolgt eine Beschränkung auf die Bauteile, bei denen die entscheidenden Fehler aufgetreten sind. Es soll herausgefunden werden, ob das jeweilige Versagen auch eingetreten wäre, wenn man eine FMEA durchgeführt hätte.

Nach einem Versagensfall ist es immer leicht zu sagen, welche Fehler zum Versagen des Tragwerks geführt haben. Auch lässt es sich schnell herausfinden, welche Maßnahmen den Einsturz verhindert hätten. Eine unvoreingenommene Betrachtung des Tragwerks und der entscheidenden Bauteile ist daher kaum möglich. Dennoch ist es unumgänglich, den Nutzen eines Qualitätssicherungssystems anhand von Versagensbeispielen zu testen und sich die Frage zu stellen, ob das System den Anforderungen, die an es gestellt werden, gerecht wird.

6.1 Beispiel 1: Eissporthalle in Bad Reichenhall

Am 2. Januar 2006 stürzte das Dach der Eissporthalle in Bad Reichenhall (vgl. Abb. 6.1) aufgrund eines Versagens der Dachkonstruktion ein. Das Versagen trat in einem der Binder ein, der daraufhin einstürzte. Die darauf folgende Belastungszunahme der benachbarten Binder führte wiederum zu einem Versagen dieser. Auf diese Weise trat ein progressiver Kollaps des gesamten Dachtragwerks ein.

Es erfolgt eine Beschreibung des Bauwerks. Anschließend wird es, soweit es die vorliegenden Informationen ermöglichen, in die zugehörige FMEA-Klasse eingeordnet. Das Bauteil, durch welches das Versagen hervorgerufen wurde, wird exemplarisch auf



Abbildung 6.1: Eissporthalle in Bad Reichenhall, Ansicht der schmalen Front [Sen06]

mögliche Fehler untersucht und diese entsprechend des entwickelten Bewertungssystems bewertet. Abschließend wird diskutiert, welchen Nutzen die Durchführung einer FMEA hinsichtlich der Standsicherheit des Tragwerks gehabt hätte.

Die Beschreibung des Gebäudes und die genannten Fehler und Versagensursachen beziehen sich auf die offizielle „Presseerklärung der Staatsanwaltschaft Traunstein zum Einsturz der Eishalle in Bad Reichenhall“ [Vor06] und ein Gutachten von Sennwald [Sen06].

6.1.1 Systembeschreibung und Strukturanalyse

Die Halle ist ca. 75 m lang und etwa 46 m breit. Das Dach wird durch 2,87 m hohe und 28 cm breite Holzbinder getragen. Diese sind als Hohlkastenträger in Kämpfsteg-Bauweise ausgeführt. Der Abstand untereinander beträgt 7,50 m. Die Kippaussteifung erfolgt durch sogenannte K-Binder (ebenfalls Hohlkästen), die etwa alle 9,20 m angeordnet sind. Eine schematische Darstellung des Systems ist in Abbildung 6.2 gegeben. Das Dachtragwerk und der Binderquerschnitt können der Abbildung 6.3 entnommen werden.

6.1 Beispiel 1: Eissporthalle in Bad Reichenhall

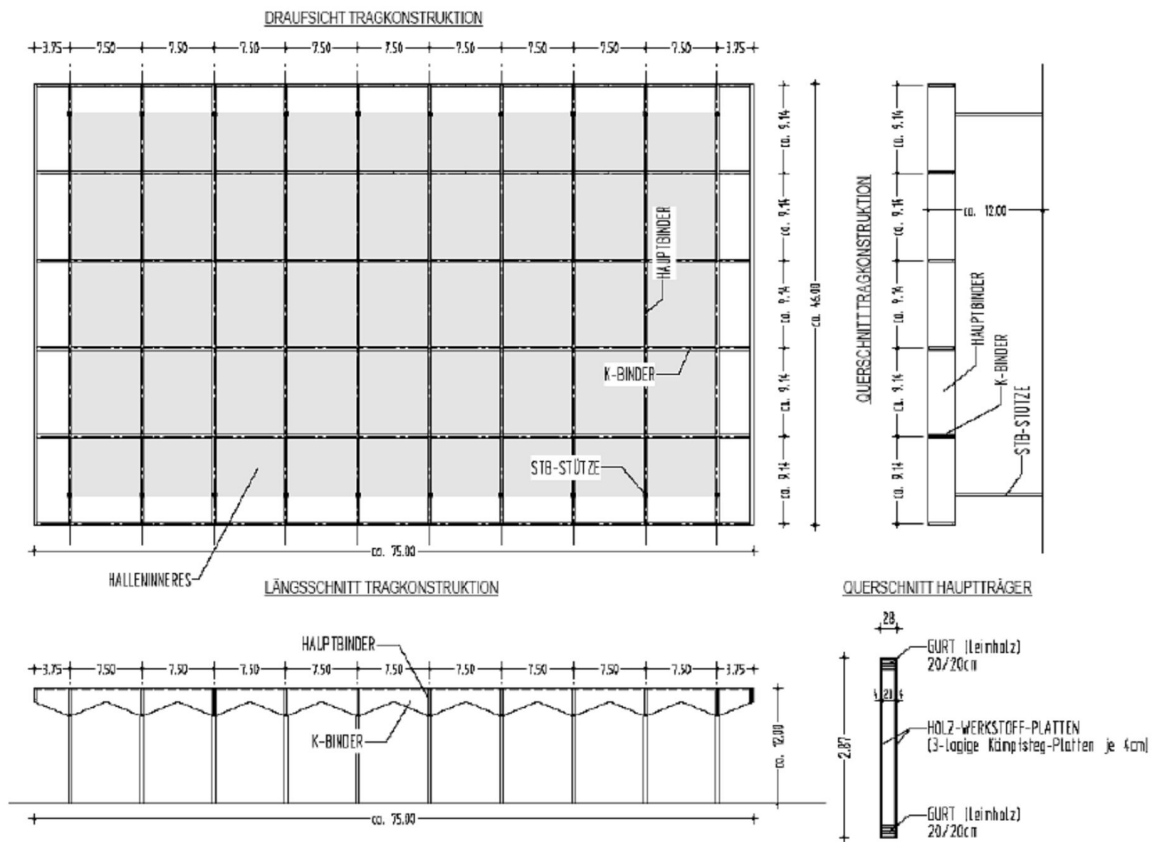


Abbildung 6.2: System des Dachtragwerks in Draufsicht und Querschnitt [Sen06]



(a)



(b)

Abbildung 6.3: (a) Dachtragwerk im Bauzustand; (b) Querschnitt des Dachbinders [Sen06]

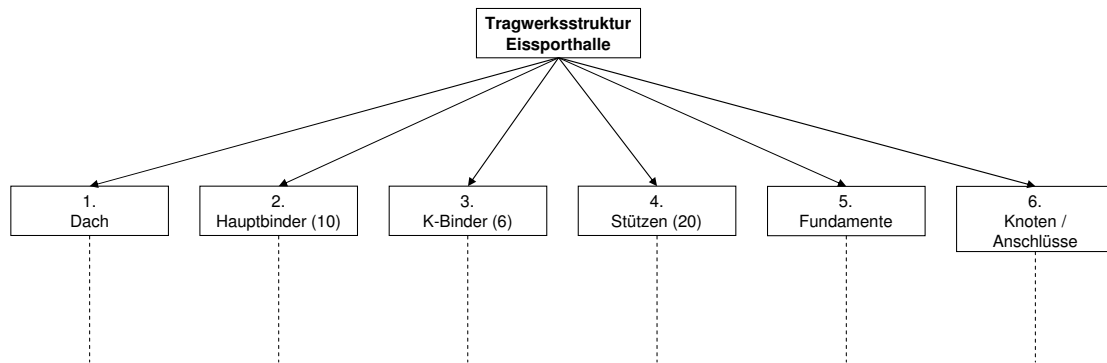


Abbildung 6.4: Ausschnitt aus der Systembeschreibung der Eissporthalle

In der Abbildung 6.4 ist ein Ausschnitt aus der Systembeschreibung abgebildet, in dem alle am Lastabtrag beteiligten Bauteile und Anschlüsse aufgeführt werden. Abbildung 6.5 enthält einen wesentlichen Ausschnitt der Darstellung des globalen Lastabtrags in vertikaler Richtung.

6.1.2 Einordnung in FMEA-Klassen

Gefährdungsklasse

Für eine Halle dieser Art erscheint die Verwendung der Honorarzone IV nach HOAI angemessen. Als Consequence Class wird die Klasse 2 (mittlere Schadensfolgen) herangezogen. Daraus lässt sich nach Abbildung 4.2 die Gefährdungsklasse 3 ermitteln.

Robustheitsklasse

Die Bewertung der Robustheit erfolgt nach dem in Tabelle 4.2 beschriebenen System (vgl. Tab. 6.1). Daraus folgt nach Tabelle 4.3 die Einteilung in die Robustheitsklasse 1.

FMEA-Klasse

Aus der Gefährdungsklasse 3 und der Robustheitsklasse 1 ergibt sich nach Abbildung 4.4 die FMEA-Klasse 4. Somit ist die notwendige Genauigkeit der Betrachtung und die Anzahl der zu erfassenden Elemente „hoch“ (vgl. Tabellen 4.4 und 4.5).

6.1 Beispiel 1: Eissporthalle in Bad Reichenhall

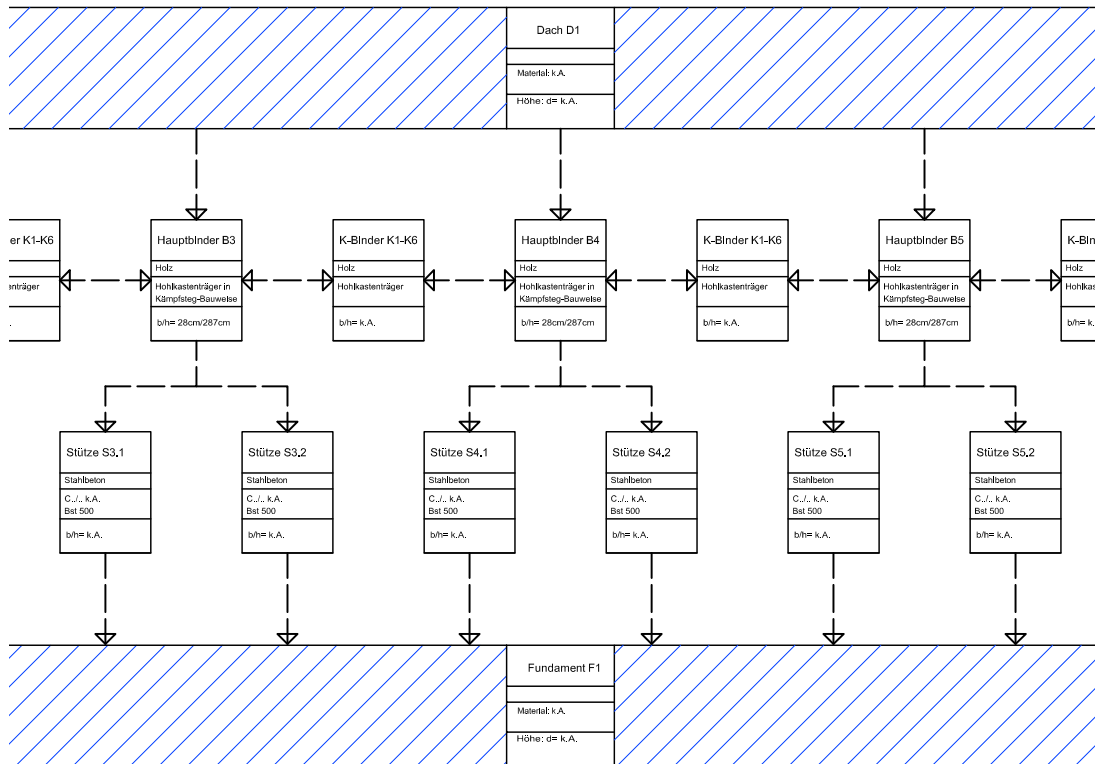


Abbildung 6.5: Ausschnitt aus der Darstellung des globalen Lastabtrags für vertikale Lasten der Eissporthalle

Robustheitszahl	Bewertung
RZ_1	-2
RZ_2	-1
RZ_3	-2
RZ_4	0
RZ_5	-2
RZ_6	-8
RZ_7	-4
RZ_8	+3
RZ_{ges}	-16

Tabelle 6.1: Bewertung der Robustheit

6.1.3 Fehleranalyse

Ohne das Tragwerk im Detail zu untersuchen, kann mit hoher Sicherheit vermutet werden, dass als kritische Bauteile mindestens die Binder, die Stützen und die Aussteifungselemente definiert worden wären. Diese Haupttragelemente sind immer entscheidend und wären auch hier aufgeführt worden.

Um den Umfang der Untersuchungen an dieser Stelle gering zu halten, wird nur der Binder, also das Bauteil an dem das Versagen eintrat, herausgegriffen.

Mögliche Fehler, die bei diesem Bauteil naheliegen, sind ein *Biegeversagen*, ein *Schubversagen* und *sehr starke Verformungen*. Betrachtet wird weiterhin nur das Biegeversagen als zu untersuchende Fehlerart.

Die Fehlerfolge eines Biegeversagens ist zwangsläufig ein „Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems“.

Die in der Planung und dem Entwurf begründeten Fehlerursachen könnten sein:

- Die angreifenden Lasten wurden falsch ermittelt,
- eine maßgebende Einwirkung wurde nicht berücksichtigt,
- eine maßgebende Lastfallkombination wurde nicht berücksichtigt,
- die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt,
- oder es wurde ein Fehler in der Bemessung durchgeführt.

6.1.4 Risikobewertung

Bedeutung

Für die Bewertung der Bedeutung der Fehlerfolge ist es unerheblich, ob die Möglichkeit eines progressiven Versagens der anderen Binder in Betracht gezogen wird, da sowohl das Versagen des gesamten Tragwerks als auch das Versagen eines Teilsystems nach Tabelle 5.1 mit „5“ bewertet wird.

Auftretenswahrscheinlichkeit

Zur Bestimmung der Auftretenswahrscheinlichkeit wird in Abhängigkeit der „Häufigkeit der Verwendung“ und der „Herstellungsqualität“ eine Bauteilkategorie bestimmt.

Auch wenn die Binder im Werk gefertigt werden, folgt die Beurteilung der Herstellungsqualität als „Halbfertigteil“, da die Qualität des „Fertigteils“ durch die Stöße mittels Keilverzinkung verringert wird. Da die Hohlkastenprofile in Kämpfbauweise in

diesen Abmessungen nicht zugelassen waren, wird die „Häufigkeit der Verwendung“ mit „erstmalig“ bezeichnet. Daraus folgt nach Abbildung 5.4 die Bauteilkategorie III.

Die Festlegung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit erfolgt in Abhängigkeit der Bauteilkategorie und des Ausnutzungsgrades des Bauteils. Da dieser nicht vorliegt wird von einem mittleren Ausnutzungsgrad im Bereich von 60–85 % ausgegangen. Nach Abbildung 5.5 ergibt sich somit die Bewertungszahl „4“.

Entdeckungswahrscheinlichkeit

Die Bewertungszahl der Entdeckungswahrscheinlichkeit wird nach Abbildung 5.6 in Abhängigkeit der Honorarzone und der FMEA–Klasse bestimmt. Mit der Honorarzone IV und der FMEA–Klasse 4 folgt die Bewertungszahl „3“.

Risikoprioritätszahl

Aus den genannten Bewertungszahlen lässt sich nun die Risikoprioritätszahl (RPZ) bestimmen:

$$\begin{aligned} RPZ &= B \cdot A \cdot E \\ &= 5 \cdot 4 \cdot 3 \\ &= 60 \end{aligned}$$

6.1.5 Optimierung und Ergebnisse der Sitzung

In der FMEA–Klasse 4 wird eine niedrige Risikoschranke gefordert. Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine Festlegung von Zahlenwerten für die Risikoschranken erfolgt, kann doch gesagt werden, dass eine sinnvolle Größenordnung zwischen 20 und 30 liegen müsste. Somit ist für die betrachtete Fehlerart die Ergreifung von Maßnahmen notwendig.

Eine Übersicht und Dokumentation dieser Bewertung ist in einem Formblatt festgehalten (vgl. Abb. 6.6).

Bauteil / Anschluss		Binder								
FMEA-Klasse		4								
Mögliche Fehlerfolgen		B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems		5	Biegeversagen	...	...	...	...	...	...	...
				Fehler in der Bemessung	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	4	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	3	60	
			
			

Bewertung der Fehler:
 - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
 - Bedeutung der Fehlerfolge (B)
 - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)

Abbildung 6.6: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung für einen Binder des Tragwerks

6.1.6 Ergebnisse der Gutachten

Die Gutachten, die nach dem Einsturz der Eishalle erarbeitet wurden, stellen verschiedene Fehler und Versäumnisse fest, die in der Summe das Versagen verursachten bzw. begünstigten. Dies sind:

1. Die verwendete „Kämpfbauweise“ für die Hohlkastenprofile waren nur bis zu einer Höhe von 1,20 m zugelassen, eine Zustimmung im Einzelfall für die verbaute Höhe von 2,87 m erfolgte nicht.
2. Die statische Berechnung dieses Alternativvorschlags der bauausführenden Firma wurde nicht bautechnisch geprüft.
3. Die Berechnung beinhaltete zwei Fehler: Zum einen wurde kein Nachweis der Zugspannungen im Schwerpunkt der Gurte geführt. Zum anderen wurde die Schwächung an den Stößen durch Keilverzinkungen nicht berücksichtigt.
4. Die verwendeten Harnstoffharzleime hätten aufgrund ihres spröden Verhaltens bei den zum Teil sehr dicken Fugen nicht verwendet werden dürfen. Eine andere Problematik mit diesem Klebstoff ist, dass er im feuchten Umgebungsklima durch biologische Prozesse zersetzt wird. Dass durch die Kälteabstrahlung der Eisfläche in Eishallen ein solches ungünstiges Klima hervorgerufen wird, war zum damaligen Zeitpunkt allerdings allgemein noch nicht bekannt.
5. Eine Instandhaltung wurde nicht oder nur unzureichend durchgeführt. Jahrelange Undichtigkeiten in der Dachhaut wurden nicht dauerhaft beseitigt, wodurch der Kleber wahrscheinlich zusätzlichen Schaden nahm.

Das Versagen des ersten Binders fand vermutlich in Höhe eines der „Generalstöße“, also im Drittelspannungspunkt des Binders im Bereich einer der beiden Keilverzinkungen, statt. Die sehr steife Verbindung zu den überproportional dimensionierten „K-Bindern“, die die Kippaussteifung gewährleisten sollten, führte zu einer Kraftumlagerung auf die benachbarten Binder, wodurch es zu einem progressiven Kollaps des Dachtragwerks kam. Die Frage, ob bei einer anderen Kippaussteifung eine Begrenzung des Versagens auf einen Binder hätte reduziert werden können, kann jedoch nicht beantwortet werden.

6.1.7 Einschätzung: Hätte eine FMEA dabei geholfen das Versagen zu verhindern?

Bei einer sachgerechten Anwendung der FMEA hätten bei einer Einordnung des Tragwerks in die FMEA-Klasse 4 grundsätzlich folgende Rahmenbedingungen eingehalten werden müssen:

- Die Durchführung der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis. Dies bedeutet, dass durch die Sitzung die Informationen zwischen dem Architekten, dem Prüfenieur, dem Bauleiter und dem Tragwerksplaner ausgetauscht worden wären. Wenn der Bauherr nicht an der Sitzung teilgenommen hätte, wäre er durch ein Protokoll und die Formblätter über die Ergebnisse informiert worden.
- Eine Änderung des Tragwerkskonzepts (wie die Umsetzung eines von der ursprünglichen Statik abweichenden Alternativvorschlags) hätte eine erneute Sitzung mit allen Beteiligten erfordert.

Darüber hinaus hätten, aufgrund der ermittelten Risikoprioritätszahl des hier betrachteten Fehlers, folgende Reaktionen erfolgen müssen:

- Das Ergreifen von Maßnahmen zur Risikoreduzierung.
- Ein Hinweis für die ausführende Firma und den Bauherren, dass dieses Bauteil besonders sorgfältig ausgeführt und später überwacht werden muss (z.B. durch regelmäßige Kontrollen).

Eine abschließende Aussage, ob bei Anwendung einer FMEA das Versagen der Eishalle verhindert worden wäre, soll an dieser Stelle nicht erfolgen. Es kann beispielsweise nur spekuliert werden, ob die notwendigen Maßnahmen zum Auffinden der Fehler in der statischen Berechnung geführt hätten. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass alleine das gemeinsame Gespräch mit allen Beteiligten in der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung zu einer Sensibilisierung der Verantwortlichen für die kritischen Stellen des Tragwerks geführt hätte. Das Versäumnis der Prüfung des letztendlich gebauten Alternativvorschlags sowie das Versäumnis der Einholung der Zustimmung im Einzelfall für die Kämpfbauweise der Binder wären darüber hinaus unwahrscheinlicher geworden.

Nach diesem tragischen Unglück wurde begonnen, verstärkt Gebäude, insbesondere Hallen, hinsichtlich ihrer Standsicherheit regelmäßig zu überprüfen. Eine Übersicht der wesentlichen, kritischen Stellen, die bei einer FMEA sowohl für die Ausführung als auch für den Bauherren angefertigt wird, kann dabei maßgebend dazu beitragen, eine solche Überprüfung gleichermaßen kostengünstig und wirksam durchführen zu können.



Abbildung 6.7: Messehalle Nr. 1 in Kattowitz mit umgebendem Gelände [Wik09]

6.2 Beispiel 2: Messehalle in Kattowitz

Am 28. Januar 2006 stürzte das Dach der Messehalle Nr. 1 in Kattowitz ein. Das Versagen trat zuerst in einem erhöhten Dachbereich in der Mitte der Halle ein, später stürzte auch fast der gesamte restliche Teil ein. Das Bauwerk war erst im Jahr 2000 fertiggestellt worden. Abbildung 6.7 enthält eine Luftbildaufnahme der Halle und des umgebenden Geländes.

Es erfolgt eine Beschreibung des Bauwerks. Anschließend wird es, soweit es die vorliegenden Informationen ermöglichen, in die zugehörige FMEA-Klasse eingeordnet. Eines der Bauteile, dessen Versagen den Gesamteinsturz ausgelöst haben könnte, wird exemplarisch auf mögliche Fehler untersucht. Einer dieser Fehler wird entsprechend des entwickelten Bewertungssystems bewertet. Abschließend wird diskutiert, welchen Nutzen die Durchführung einer FMEA hinsichtlich der Standsicherheit des Tragwerks gehabt hätte.

Die Informationen zu dem Tragwerk und über die festgestellten Mängel und Schwachstellen stammen aus dem Fachartikel „Zum Einsturz der Messehalle in Kattowitz“ von Biegus und Rykaluk [AB06].

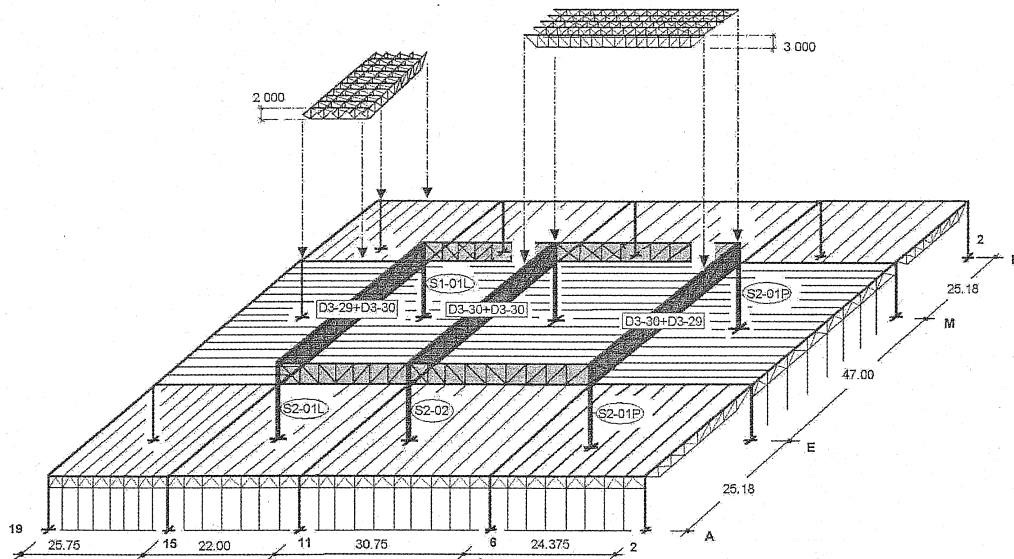


Abbildung 6.8: Isometrie der Stahlkonstruktion der Messehalle [AB06]

6.2.1 Systembeschreibung und Strukturanalyse

Die Messehalle ist 97,36 m breit und 102,88 m lang. Im mittleren Teil der Halle ist das Dach erhöht (13,2 m), im restlichen Teil beträgt die Höhe 10,2 m. Die Unterkonstruktion besteht aus sechs Hauptstützen (erhöhter Teil) und 66 Stützen im niedrigeren Teil. Die Hauptstützen bestehen aus vier Stielen (Stahlrohre 219,1 x 10 [mm]), die durch Rahmenstäbe (Stahlrohre 101,6 x 6,3 [mm]) im Abstand von 1 m miteinander verbunden sind. Auf jeweils zwei Hauptstützen liegt ein Hauptunterzug des Hallendachs mit einer Spannweite von 46,25 m auf. Diese bestehen aus jeweils zwei Fachwerkträgern, die durch eine vierendeelartige Konstruktion miteinander verbunden sind. In den Knoten der Obergurte liegen die Binder und Pfetten des erhöhten Dachteils, in den Knoten der Untergurte die Binder des niedrigeren Dachteils. Die Dacheindeckung besteht aus einem Trapezblech mit der Bauhöhe 77 mm und der Dicke 0,75 mm. In den Abbildungen 6.8 und 6.9 werden eine Isometrie und ein Grund- und Aufriss mit Positionsbezeichnungen wiedergegeben. Die verwendeten Träger können Abbildung 6.10 entnommen werden.

6.2.2 Einordnung in FMEA-Klassen

Gefährdungsklasse

Für eine Halle dieser Art erscheint die Verwendung der Honorarzone IV nach HOAI angemessen. Als Consequence Class wird die Klasse 3 (hohe Schadensfolgen) herangezogen. Daraus lässt sich nach Abbildung 4.2 die Gefährdungsklasse 3 ermitteln.

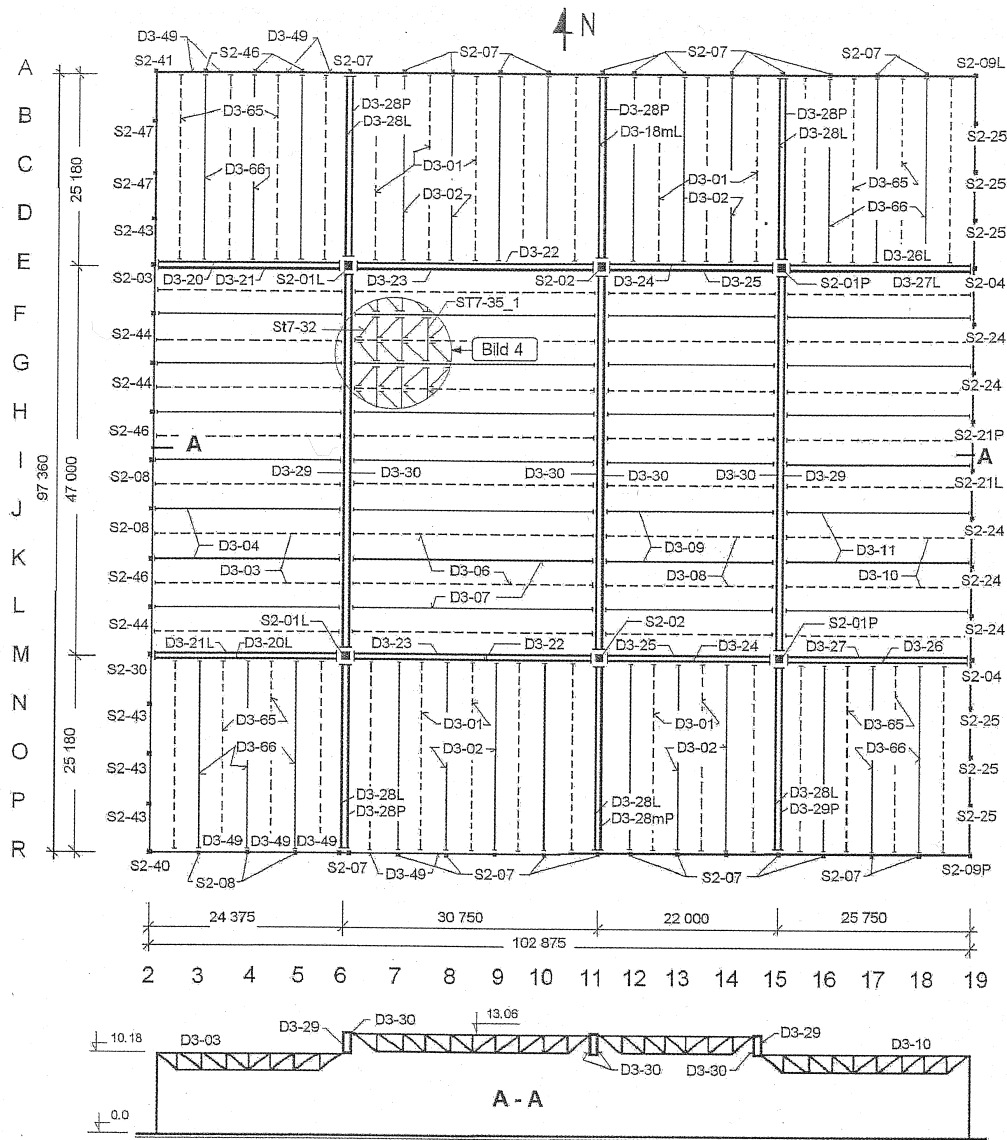


Abbildung 6.9: Grundriss und Aufriss der Stahlkonstruktion [AB06]

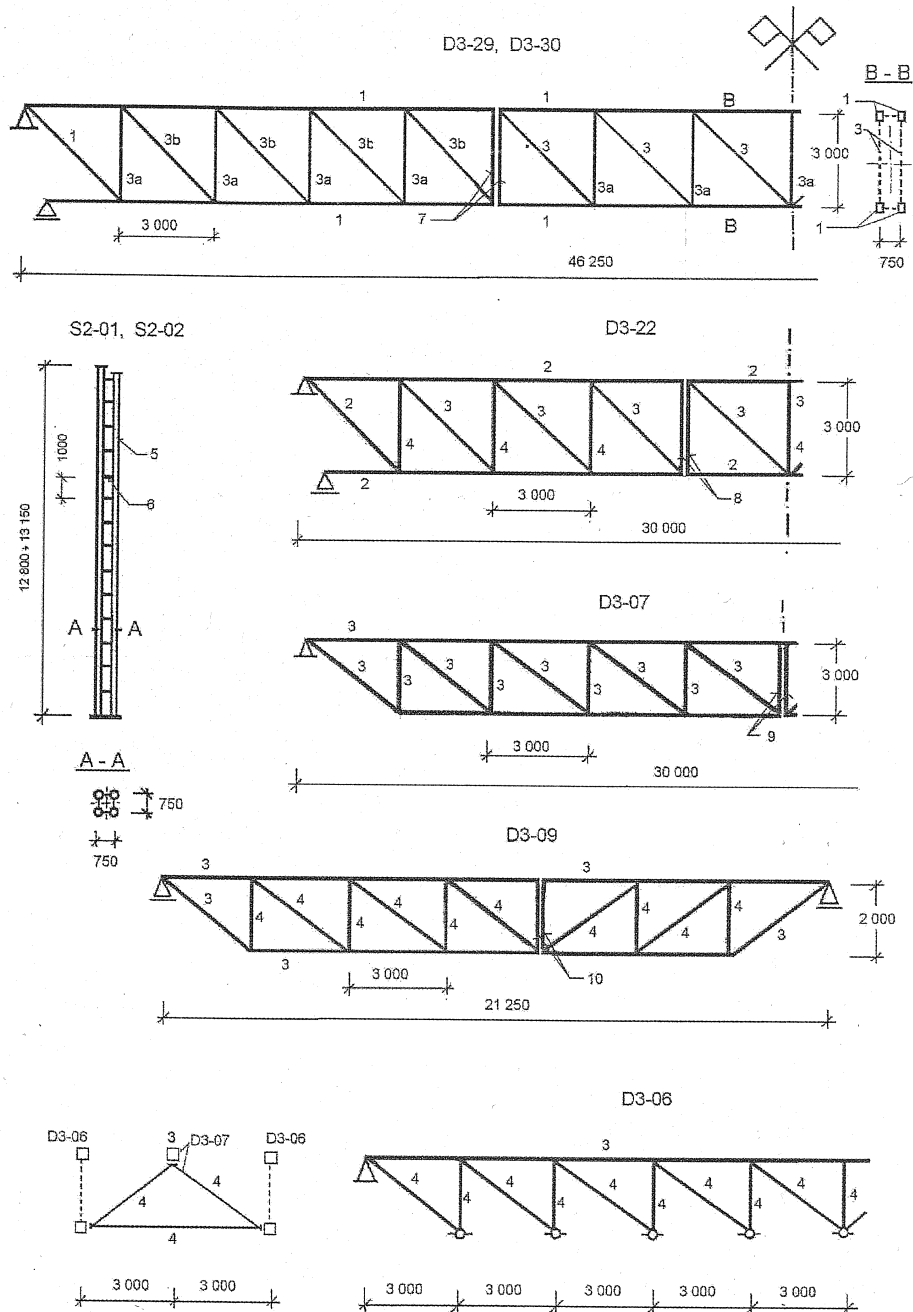


Abbildung 6.10: Konstruktion ausgewählter Elemente [AB06]

Robustheitszahl	Bewertung
RZ_1	-4
RZ_2	-1
RZ_3	-2
RZ_4	-2
RZ_5	-2
RZ_6	0
RZ_7	-4
RZ_8	0
RZ_{ges}	-15

Tabelle 6.2: Bewertung der Robustheit

Robustheitsklasse

Die Bewertung der Robustheit erfolgt nach dem in Tabelle 4.2 beschriebenen System (vgl. Tab. 6.2). Daraus folgt nach Tabelle 4.3 die Einteilung in die Robustheitsklasse 1.

FMEA-Klasse

Aus der Gefährdungsklasse 3 und der Robustheitsklasse 1 ergibt sich nach Abbildung 4.4 die FMEA-Klasse 4. Somit ist die notwendige Genauigkeit der Betrachtung und die Anzahl der zu erfassenden Elemente „hoch“ (vgl. Tabellen 4.4 und 4.5).

6.2.3 Fehleranalyse

Es wird im Folgenden davon ausgegangen, dass das erste Versagen in einem Element eines der Fachwerkunterzüge des Dachtragwerks eintrat. Die anderen möglichen Stellen sind für die Bewertung sehr ähnlich, daher wird an dieser Stelle exemplarisch eine Bewertung des Unterzugs durchgeführt.

Mögliche Versagensarten des Unterzugs sind:

- Druckversagen des Obergurts (Knicken),
- Zugversagen des Untergurts,
- Überschreitung der Torsionstragfähigkeit,
- oder das Versagen eines der Anschlüsse.

Untersucht wird das Knicken des Obergurts. Die Fehlerfolge ist das „Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems“.

Die in der Planung und dem Entwurf begründeten Fehlerursachen könnten sein:

- Die angreifenden Lasten wurden falsch ermittelt,
- eine maßgebende Einwirkung wurde nicht berücksichtigt,
- eine maßgebende Lastfallkombination wurde nicht berücksichtigt,
- die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt,
- oder es wurde ein Fehler in der Bemessung durchgeführt.

6.2.4 Risikobewertung

Bedeutung

Das Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems wird nach Tabelle 5.1 mit der Bewertungszahl „5“ belegt.

Auftretenswahrscheinlichkeit

Die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit erfolgt nach Abbildung 5.5. Zur Bestimmung der hierfür benötigten Bauteilkategorie wird Abbildung 5.4 herangezogen.

Die „Häufigkeit der Verwendung“ kann den vorliegenden Informationen nicht entnommen werden. Daher wird die mittlere Kategorie „selten“ angesetzt. Die „Herstellungsqualität“ hängt davon ab, ob das Bauteil auf der Baustelle oder im Werk gefertigt wurde. Da der Stahl im Werk gefertigt wird, aber das Zusammensetzen und einige Schweißarbeiten und die Herstellung der Anschlüsse vor Ort erfolgt, wird hier die Bezeichnung „Halbfertigteil“ verwendet. Dies ergibt die Bauteilkategorie II.

Die nachfolgend durchgeführte Berechnung des Ausnutzungsgrades ergibt eine Überlastung zwischen 70 und 100 % aller Binder, Pfetten und Unterzüge. Es wird daher angenommen, dass auch bei der ursprünglichen Statik ein hoher Ausnutzungsgrad von über 85 % ermittelt wurde. Daraus folgt die Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit „4“.

Entdeckungswahrscheinlichkeit

Aus der Honorarzone IV und der FMEA-Klasse 4 ergibt sich für die Entdeckungswahrscheinlichkeit nach Abbildung 5.6 die Bewertungszahl „3“.

Risikoprioritätszahl

Aus den ermittelten Bewertungszahlen wird nun die Risikoprioritätszahl (RPZ) berechnet:

$$\begin{aligned} RPZ &= B \cdot A \cdot E \\ &= 5 \cdot 4 \cdot 3 \\ &= 60 \end{aligned}$$

6.2.5 Optimierung und Ergebnisse der Sitzung

In der FMEA-Klasse 4 wird eine niedrige Risikoschranke gefordert. Auch wenn im Rahmen dieser Arbeit keine Festlegung von Zahlenwerten für die Risikoschranken erfolgt, kann doch gesagt werden, dass eine sinnvolle Größenordnung zwischen 20 und 30 liegen müsste. Somit ist für die betrachtete Fehlerart die Ergreifung von Maßnahmen notwendig.

Eine Übersicht und Dokumentation dieser Bewertung ist in einem Formblatt festgehalten (vgl. Abb. 6.11).

Bauteil / Anschluss		Unterzug							
FMEA-Klasse		4							
		<p align="center">Bewertung der Fehler:</p> <p align="center">- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) - Bedeutung der Fehlerfolge (B) - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)</p>							
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5	Stabilitätsversagen (Knicken) der Fachwerkkobergurts	...		...		...	...
			Schnittgrößen-ermittlung falsch durchgeführt	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	4	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	3	60	
			Fehler in der Bemessung	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	4	Festlegung einer Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahme notwendig!	3	60	
			

Abbildung 6.11: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung für einen Unterzug des Tragwerks

6.2.6 Ergebnisse Nachuntersuchungen (Gutachten)

Die Untersuchungen über Gründe und Hergang des Halleneinsturzes ergaben folgende Fehler bzw. Mängel an dem Tragwerk:

1. **Schnee- und Eislasten**

Durch mangelndes Gefälle des Dachs und den dadurch hervorgerufenen Wasseransammlung kam es zu überhöhten Schnee- und Eislasten. Daraus resultierte bereits 2002 ein Schaden, der vermutlich zu einer Ovalisierung der Bohrlöcher in den Trapezblechen führte. Auch zum Zeitpunkt des Einsturzes war die Schneelast im Vergleich zur polnischen Norm lokal um das 2-fache überschritten.

2. **horizontaler Lastabtrag**

Es erfolgte keine Berechnung des horizontalen Lastabtrags. Die in der polnischen Stahlbaunorm vorgeschriebenen horizontalen und vertikalen Aussteifungsverbände wurden nicht ausgeführt. Die horizontale Aussteifung wurde in Dachebene durch Trapezbleche und weiterführend durch sechs eingespannte Hauptstützen erreicht.

3. **konstruktive Durchbildung und Baustoff**

Als ungünstig erwies sich die geringere Tragfähigkeit der Montagestöße der Untergurte im Verhältnis zu den angeschlossenen Stäben. Außerdem wurden die Rahmenstäbe der Hauptstützen nicht, wie vorgeschrieben, an die Kopfplatte im Stützenkopf angeschlossen. Der verwendete Stahl (unberuhigter Stahl S235) ist für Hallen dieser Art ungeeignet.

4. **Unterzüge**

Es erfolgte keine Überhöhung der Unterzüge wie nach polnischer Norm vorgeschrieben. Bei der Bemessung wurden die konstruktiven Ausmitten und die Torsion der Tragelemente nicht berücksichtigt.

5. **Vergleichsrechnung**

Nach einer jetzt durchgeführten Vergleichsrechnung weisen die Pfetten, Binder und Unterzüge eine rechnerische Überlastung von 78,5 bis 104,2 % auf.

Das Versagen des ersten Teils des Hallendachs (erhöhter Teil in der Mitte) wurde vermutlich durch das Versagen eines Binders, einer Pfette oder eines Unterzugs ausgelöst. Die dadurch hervorgerufene horizontale Ersatzlast konnte von den Rahmenstäben der Stützen nicht aufgenommen werden. Auch die unzureichende aussteifende Wirkung der Trapezbleche durch die vermutete Ovalisierung der Bohrlöcher beeinflusste diesen Effekt negativ. Welches der genannten Bauteile letztendlich zuerst versagte, kann nicht abschließend geklärt werden.

6.2.7 Einschätzung: Hätte die FMEA dabei geholfen das Versagen zu verhindern?

Die Einordnung des Tragwerks in die FMEA-Klasse 4 hätte die Durchführung einer umfangreichen FMEA notwendig gemacht. Inwieweit ein Informationsaustausch zwischen den am Projekt Beteiligten stattgefunden hat und in welcher Form das Bauwerk geprüft wurde, ist an dieser Stelle nicht bekannt. Die Fehleranalyse- und Optimierungssitzung hätte allerdings einen geeigneten Rahmen zur Verfügung gestellt, in dem sich das Fachpersonal aus den unterschiedlichen Bereichen über das Konzept an sich und mögliche Schwächen und Fehler ausgetauscht und das gesamte Tragwerk kritisch untersucht hätte. Die Wahrscheinlichkeit, dass einige der Fehler in der statischen Berechnung gefunden worden wären, insbesondere die unzureichende Aussteifung, ist dadurch relativ hoch.

Wenn die konstruktiven Ausmittigkeiten durch die Anschlüsse an die Unterzüge bei der Erstellung der Statik noch nicht bekannt waren, wären sie durch die notwendige Vordimensionierung der Anschlüsse und die Besprechung dieser Detailpunkte in der Sitzung sicherlich entdeckt worden.

Das Auffinden der anderen beschriebenen Fehler, insbesondere das fehlende Gefälle des Dachs, hätten durch die FMEA evtl. auch entdeckt werden können. Eine genauere Aussage zu diesem Punkt ist allerdings nicht möglich.

Darüber hinaus hätten, aufgrund der ermittelten Risikoprioritätszahl des hier betrachteten Fehlers, folgende Reaktionen erfolgen müssen:

- Das Ergreifen von Maßnahmen zur Risikoreduzierung.
- Ein Hinweis für die ausführende Firma und den Bauherren, dass dieses Bauteil besonders sorgfältig ausgeführt und später überwacht werden muss (z.B. durch regelmäßige Kontrollen).

Eine abschließende Aussage, ob bei Anwendung einer FMEA der Einsturz der Messehalle verhindert worden wäre, soll auch bei diesem Beispiel nicht erfolgen. Das Versagen wurde, wie fast immer bei einem Versagensfall, durch die Summe vieler verschiedener Fehlerursachen hervorgerufen. Daher ist grundsätzlich davon auszugehen, dass, wenn auch nicht alle, so doch genug Fehler gefunden und Maßnahmen ergriffen worden wären, um den Einsturz als schlimmsten Fall in einer Verkettung verschiedener Fehlerursachen zu verhindern.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Verfahren und Hilfsmitteln, die die Durchführung einer Tragwerk-FMEA ermöglichen bzw. unterstützen sollen. Dies umfasst in erster Linie:

- Die Bestimmung eines sinnvollen Umfangs einer durchzuführenden FMEA,
- die Erarbeitung eines Verfahrens, das die Bestimmung der Bewertungszahlen und damit der Risikoprioritätszahl (RPZ) unterstützt,
- sowie die Erarbeitung von Hilfsmitteln zur Auffindung möglicher Fehler und Fehlerursachen.

Aufgrund der großen Bedeutung der Robustheit eines Tragwerks hinsichtlich der Standsicherheit wurde unterschiedliche Literatur ausgewertet, die das Auffinden von qualitativen Robustheitsmerkmalen unterstützen soll.

Anhand von zwei Beispielen, bei denen ein Tragwerksversagen eingetreten ist, wurde die Vorgehensweise bei der Tragwerk-FMEA deutlich gemacht. Es erfolgte eine Bewertung des Bauteils bzw. des Fehlers, durch den das Versagen verursacht wurde. Darauf aufbauend wurde eine Einschätzung gegeben, ob das Versagen auch bei der Anwendung einer FMEA eingetreten wäre.

Außerdem wurden einzelne Kapitel für den Leitfaden „Tragwerk-FMEA“ ausgearbeitet. Dies umfasst in erster Linie den Bereich „Vorgehensweise Tragwerk-FMEA“, in dem das hier entwickelte Verfahren in den Ablauf der FMEA eingebunden wurde. Die erarbeiteten Kapitel sind im Anhang enthalten.

Robustheit als wesentliche Tragwerkeigenschaft

Ein sehr wichtiges Kriterium für die Standsicherheit eines Tragwerks ist dessen Robustheit. Viele Autoren haben sich bereits mit der Fragestellung beschäftigt, was man unter Robustheit verstehen kann und welche Merkmale ein Tragwerk robust werden lassen. In dieser Arbeit wird die Definition von Krätzig u.a. [WK07] herangezogen: „Robustheit ist diejenige Eigenschaft, die es Tragwerken ermöglicht, einer unvorhergesehenen oder außergewöhnlichen Aktion verhaltenszielgerecht zu widerstehen“. Aktionen stehen hier als Verallgemeinerung für Einwirkungen und Tragwerksmodifikationen.

In Tabelle 3.4 werden die genannten Robustheitsmerkmale strukturiert und zusammengefasst. In Anlehnung an ein System zur Bewertung der Erdbebensicherheit von Bauwerken in der Türkei wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem anhand einfacher Tragwerksmerkmale eine Bewertung der Robustheit vorgenommen werden kann (vgl. Tab. 4.2). Darin werden verschiedene Robustheitsmerkmale genannt und es erfolgt eine Einschätzung, ob diese für das Tragwerk zutreffen oder nicht. Durch die Verwendung unterschiedlicher Zahlenraster zur Bewertung der einzelnen Robustheitsmerkmale, kann die Wichtigkeit der einzelnen Kriterien einfach angepasst werden.

Festlegung des Umfangs einer FMEA

Um einen sinnvollen Umfang einer durchzuführenden FMEA zu ermitteln, wurden drei Kriterien herangezogen:

- Der **Schwierigkeitsgrad** des Bauwerks. Herangezogen werden hierfür die Honorarzonen nach HOAI (vgl. Tab. 4.1).
- Die **Folgen**, die ein Schaden am Bauwerk für die Umgebung (Menschenleben, finanzielle und ökologische Folgen) hat. Diese werden durch die Consequence Classes nach der VDI-Richtlinie 6200 beschrieben (vgl. Abb. 3.1).
- Die **Robustheit** des Tragwerks. Es erfolgt eine Bewertung anhand der Robustheitsmerkmale, die in der Literaturrecherche in Kapitel 3 gefunden wurden (vgl. Tab. 4.2).

Anhand der Honorarzone und der Consequence Class wird die Gefährdungsklasse nach Abbildung 4.2 ermittelt. Aus der Bewertung der Robustheit erfolgt die Einordnung des Tragwerks in die Robustheitsklassen (vgl. Tab. 4.3).

Aus der Gefährdungsklasse und der Robustheitsklasse kann nun nach Abbildung 4.4 die FMEA-Klasse abgeleitet werden. Diese enthält die genauen Anforderungen an die durchzuführende FMEA (vgl. Tab. 4.4 und 4.5).

Verfahren zur Bestimmung der Bewertungszahlen

Die Bewertungszahlen zur Ermittlung der RPZ werden von den Teilnehmern in der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung festgelegt. Zur Unterstützung dieses Prozesses wurde ein einfaches Verfahren entwickelt, dass die Bestimmung der Bewertungszahlen begleitet:

- Die Bewertungszahl für die Bedeutung (B) der Fehlerfolge lässt sich nach Tabelle 5.1 bestimmen.
- Die Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache erfolgt über die Ermittlung einer Bauteilkategorie (vgl. Abb. 5.4) nach Abbildung 5.5. Als Kriterien dienen hierbei die Erfahrungen der Beteiligten mit der Bauteilart, die Herstellungsqualität und der Ausnutzungsgrad des Bauteils.

-
- Zur Bestimmung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) werden die Honorarzone und die ermittelte FMEA–Klasse herangezogen (vgl. Abb. 5.6).

Anzumerken ist, dass die ermittelten Bewertungszahlen nach den genannten Abbildungen und Tabellen nur „Tendenzwerte“ liefern, eine genaue Festlegung erfolgt durch die Teilnehmer der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung.

Fehlerkatalog und Fehlerkategorien

In Kapitel 5.2 wurde ein bauteilbezogener Fehlerkatalog erstellt (vgl. Tab. 5.4). Außerdem wurden Fehlerkategorien vorgestellt, anhand derer mögliche Fehlerursachen kategorisiert werden können (vgl. Tab. 5.2). Darüber hinaus wurden Beispiele für Entdeckungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Fehlerkategorien aufgeführt (vgl. Tab. 5.3).

Beispielbewertung für die Eissporthalle in Bad Reichenhall

Um den Nutzen der Tragwerk–FMEA zu untersuchen, wurde anhand der Eissporthalle in Bad Reichenhall, bei der ein Versagen eintrat, eine nachträgliche, „simulierte“ FMEA durchgeführt. Es sollte festzustellen werden, ob durch die Anwendung der FMEA ein solcher Schaden hätte vermieden werden können. Bei der Untersuchung und Bewertung erfolgte eine Beschränkung auf die maßgebenden Fehler, durch die das Versagen hervorgerufen wurde.

Zuerst wurde im Rahmen der **Strukturanalyse** eine Systembeschreibung und die Darstellung eines Ausschnitts des globalen Lastabtrags erstellt (vgl. Abb. 6.4 und 6.5). Darauf folgte die Einordnung des Tragwerks in die FMEA–Klassen nach der beschriebenen Systematik. Daraus ergab sich:

- die Gefährdungsklasse 3 durch die Einordnung in die Honorarzone IV und die Consequence Class 2,
- die Robustheitsklasse 1 entsprechend der vorhandenen Robustheitsmerkmale,
- und daraus die FMEA–Klasse 4.

Nach der Einteilung in die FMEA–Klassen wurde die **Fehleranalyse** durchgeführt. Da nur der zum Versagen geführte Fehler betrachtet werden soll, erfolgte die Risikobewertung für ein *Biegeversagen* an einem der *Hauptbinder*. Als Fehlerfolge wurde das „Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems“ festgelegt. Von den möglichen Fehlerursachen wurde ein „Fehler in der Bemessung“ herausgegriffen.

Im Anschluss daran folgte die **Risikobewertung**. Die *Bedeutung* der Fehlerfolge wurde mit „5“ bewertet. Aus der ermittelten Bauteilkategorie III und einem angenommenen mittleren Ausnutzungsgrad im Bereich zwischen 60–85 % folgte die Bewertung der

Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache mit „4“. Für die Bewertung der *Entdeckungswahrscheinlichkeit* des Fehlers bzw. der Fehlerursache wurde in Abhängigkeit der Honorarzone IV und der FMEA–Klasse 4 die Zahl „3“ ermittelt. Daraus ergibt sich die $RPZ = 5 \cdot 4 \cdot 3 = 60$.

Auch wenn bisher keine genauen Risikoschranken für die RPZ festgelegt wurden, kann dennoch gesagt werden, dass bei den Anforderungen aus der FMEA–Klasse an dieser Stelle eine **Optimierung** erfolgen müsste um das Risiko zu reduzieren.

Die **Ergebnisse** aus der Fehleranalyse und der Risikobewertung wurden in einem Formblatt festgehalten (vgl. Abb. 6.6).

Die **Gutachten**, die nach dem Einsturz der Eissporthalle beauftragt wurden, kommen zu folgenden Ergebnissen:

- Die verwendete „Kämpfbauweise“ war für die verwendeten Abmessungen nicht zugelassen.
- Es erfolgte keine bautechnische Prüfung der statischen Berechnung des ausgeführten Dachtragwerks.
- Es wurden zwei Fehler in der Bemessung gemacht.
- Der verwendete Harnstoffleim hätte nicht eingebaut werden dürfen.
- Es fand keine ausreichende Instandhaltung statt.

Aufbauend auf die durchgeführte FMEA und die Ergebnisse der Gutachten wurde daraufhin eine **Einschätzung** gegeben, ob die FMEA dabei geholfen hätte das Versagen zu vermeiden:

- Die Änderung des Dachtragwerks durch den Alternativvorschlag der ausführenden Firma hätte eine erneute Sitzung erfordert. Durch die notwendige Anwesenheit des Prüfenieurs wäre vermutlich eine Prüfung durchgeführt worden. Dies hätte die Wahrscheinlichkeit, dass die beiden Fehler in der statischen Berechnung gefunden worden wären, deutlich erhöht.
- Ob festgestellt worden wäre, dass für die verwendete Kämpfbauweise keine Zulassung vorlag und dass der Harnstoffleim ungeeignet war, kann an dieser Stelle nicht herausgefunden werden. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass alleine das gemeinsame Gespräch mit allen Beteiligten in der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung zu einer Sensibilisierung der Verantwortlichen für die kritischen Stellen des Tragwerks geführt hätte.
- Durch die Dokumentation der Ergebnisse der Sitzung und die Hinweise für den Bauherren wäre außerdem eine regelmäßige Instandhaltung und Kontrolle der Binder wahrscheinlicher geworden.

An diesem Beispiel wird deutlich, dass die Anwendung einer FMEA im Bauwesen einen erheblichen Mehrwert für die Qualität und die Standsicherheit eines Tragwerks liefert. Durch einen überschaubaren zusätzlichen Aufwand kann:

- viel Zeit und Kosten für die nachträgliche Behebung von Fehlern eingespart,
- der Informationsaustausch zwischen den am Projekt Beteiligten deutlich verbessert,
- und das Risiko eines katastrophalen Versagens, aber auch kleinerer Schäden, wesentlich reduziert werden.

8 Ausblick

In vorherigen Arbeiten wurde bereits die Möglichkeit der Einführung einer FMEA im Bauwesen untersucht [Vog09] [Lie09]. Darin erfolgten erste Schritte und die grundsätzliche Anpassung des Systems an die Besonderheiten und die Belange des Bauwesens.

In dieser Masterarbeit wurden darauf aufbauend Verfahren und Hilfsmittel erarbeitet, die die Durchführung einer Tragwerk-FMEA weiter unterstützen sollen.

Es sind eine Reihe weitere Schritte sinnvoll, die z.Tl. bereits im Rahmen des Forschungsprojekts *Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Kurztitel: Tragwerk-FMEA)* [FH07] in Vorbereitung sind:

- Aufbauend auf die entwickelten Fehlerkategorien wäre eine detailliertere Bestimmung möglicher Fehlerursachen hilfreich. Darin sollten die Bereiche Berechnung, Bemessung und Entwurf abgedeckt sein.
- Die Tragwerk-FMEA sollte an einigen verschiedenen Bauwerken unterschiedlicher Art durchgeführt werden. Dadurch lassen sich zum einen eventuelle Schwächen des Systems erkennen und es kann eine Anpassung und Kalibrierung der hier erarbeiteten Verfahren und Hilfsmittel erfolgen. Zum anderen können daraus Beispiele herausgegriffen werden, die die Anwendung der FMEA deutlich machen und interessierte Büros bei der Einführung unterstützen.
- Weiterhin ist die Überprüfung der Anwendbarkeit der Sensitivitätsanalyse zur schnellen und anschaulichen Ermittlung der Auswirkung von lokalen Fehlern auf weiterführende Bauteile und letztlich auf das gesamte Tragwerk sinnvoll. Die auf dem Verfahren der Einflusslinien basierende Analyse wurde bereits von Takunov im Rahmen einer Diplomarbeit auf das in der Einleitung beschriebene, 3-dimensionale FE-Modell angewendet [Tak09]. Weitere Entwicklungen sind hier derzeit in Arbeit.
- Auch die Entwicklung einer Software zur Ermittlung des globalen Lastabtrags und damit des grundsätzlichen Zusammenwirkens der Bauteile untereinander ist in Planung. In diesem Zusammenhang soll auch die Darstellung des globalen Lastabtrags automatisiert werden.

Literaturverzeichnis

- [AB06] A. BIEGUS, K. RYKALUK: *Zum Einsturz der Messehalle in Kattowitz*. Bauingenieur, Springer VDI-Verlag:517–522, 2006.
- [BKdfS06] STÄDTEBAU, BAU-UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN SENATOREN DER LÄNDER (ARGEBAU) BAUMINISTERKONFERENZ KONFERENZ DER FÜR: *Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer/Verfügungsberechtigten*. In: *www.is-argebau.de*, 2006.
- [DIN02] *Eurocode 0 - Grundlagen der Tragwerksplanung; Deutsche Fassung DIN EN 1990: 2002*. 2002.
- [DIN06] *DIN EN 60812:2006; Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. 2006.
- [Dre09] DRESSEL, B.: *Die Rolle des Prüflingenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr*. Stahlbau 78, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag:214–220, 2009.
- [e.V08] E.V., VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Herausgeber): *Entwurf der VDI-Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung*. VDI-Gesellschaft Bautechnik, 2008.
- [FH07] F. HARTMANN, M. EISFELD: *Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. genehmigter Zuwendungsantrag, 2007.
- [HS] H. SUCUOGLU, U. YAZGAN: *Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment in Urban Building Stocks*. Technischer Bericht, Dept.of Civil Eng., Middle East Technical University, Ankara, Turkey.
- [Lie09] LIENING, D.: *Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten FMEA. Diplomarbeit*. Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Fachgebiet Baumechanik und Baustatik, 2009.
- [ME08] M. EISFELD, P. STRUSS: *Qualitätssicherung im konstruktiven Ingenieurbau*. Jahrbuch Bautechnik 2009, VDI-Verlag, 2008.

- [Plö96] PLÖTZL, M.: *Robuste Tragwerke - Vorschläge zu Entwurf und Konstruktion*. Bauingenieur 71, Springer-Verlag:481–488, 1996.
- [Sei] SEIM, W.: *Hinweise für die Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) im Bereich der Tragwerksplanung*. unveröffentlicht, 2009.
- [Sen06] SENNEWALD, R.: *Der Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall - Wie hätte er verhindert werden können?* 2006.
- [Sta05] STAROSSEK, U.: *Progressiver Kollaps von Bauwerken*. Beton- und Stahlbetonbau, Ernst & Sohn Verlag:2–15, 2005.
- [Tak09] TAKUNOV, B.: *Sensitivitätsanalyse an dem FE-Modell eines Bürogebäudes*. Diplomarbeit. Universität Kassel, Fachgebiet Baustatik, 2009.
- [TD06] T. DÖGE, N. GEBBEKEN, M. KEUSER-I. MANGERIG O. ZAPFE M. ROMANI: *Tragwerkskonzepte*. Workshop BauProtect, 2006.
- [Var04] VARWIG, J.: *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse*. Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (DGQ), Frankfurt; Beuth Verlag GmbH, 2004.
- [Vog09] VOGT, T.: *Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien*. Projektarbeit. Universität Kassel, Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau, 2009.
- [Vor06] VORDERMAYER, H.: *Presseerklärung der Staatsanwaltschaft Traunstein zum Einsturz der Eishalle in Bad Reichenhall*. 2006.
- [Wik09] www.wikipedia.org, Stand: Dezember 2009.
- [WK07] W. KRÄTZIG, R. HARTE, Y. PETRYNA: *Robustheit von Tragwerken - ein vergessenes Entwurfsziel?* Bautechnik 84, Ernst & Sohn Verlag:225–234, 2007.
- [Özc05] ÖZCEBE, G.: *Seismic safety assessment on regional scale*. In: *International summer university - introduction to earthquake-engineering*. University of Kassel, 2005.

Verwendete Software

MikTeX Version 2.7 *2007*

TeXnicCenter 1.0 Stable Release Candidate 1 *2008*

JabRef 1.8.1 *2005*

Microsoft Excel 2007 *2007*

Adobe Acrobat 9 Pro Extended Version 9.1.2 *2009*

Autodesk: AutoCAD 2005 *2005*

A Anhang: Leitfaden „Tragwerk–FMEA“

Im Rahmen des Forschungsprojekts *Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Kurztitel: Tragwerk–FMEA)* [FH07] soll ein Leitfaden verfasst werden, anhand dem eine Tragwerk–FMEA im Bauwesen durchgeführt werden kann. Im Folgenden wird eine Gliederung für diesen Leitfaden vorgestellt. Anschließend werden einzelne Kapitel ausgearbeitet.

A.1 Gliederung

1. *Vorbemerkungen*
2. *Einleitung*
 - Hintergrund, grundsätzliche Überlegungen
 - Abgrenzung der Tragwerk-FMEA gegenüber anderen möglichen FMEA-Arten und Einordnung in Leistungsphasen
3. *Anwendungsbereich*
 - Bauwerksarten
 - Ermittlung der Anwendungsnotwendigkeit und des Umfangs in Abhängigkeit der Gefährdungsklasse
4. *Verweisungen*
5. *Begriffe*
6. *Zweck und Aufgabenstellung, Zielspezifikation*
7. *Vorgehensweise Tragwerk–FMEA*
 - Einordnung der Bauwerke in Gefährdungsklassen
 - Statischer Entwurf und Vorbemessung

- Einordnung der Bauwerke in Robustheitsklassen
- Einordnung der Bauwerke in FMEA–Klassen
- Darstellung des globalen Lastabtrags
- Fehleranalyse
- Risikobewertung
- Optimierung
- Dokumentation der Ergebnisse
- Begleitung der weiteren Planung und Ausführung

8. Fehlerkategorien

9. Fehlerarten und Fehlerursachen

10. Literaturhinweise

A.2 Vorgehensweise Tragwerk–FMEA

Nachdem die Vorplanung und der Entwurf des Bauwerks durch den Bauherren und den Architekten abgeschlossen ist, beginnt die Arbeit des Tragwerksplaners und damit die Vorbereitung und Durchführung der Tragwerk–FMEA.

In Abbildung A.1 ist der Gesamttablauf einer Tragwerk–FMEA als Flussdiagramm dargestellt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in Abbildung A.2 kurz erläutert. Außerdem findet ein Verweis auf die zugehörigen Abschnitte, Abbildungen und Tabellen statt.

A.2.1 Einordnung der Bauwerks in Gefährdungsklassen

Das Bauwerk wird anhand der Honorarzone (vgl. Tab. A.1) und der Consequence Class (vgl. Abb. A.3) in die entsprechende Gefährdungsklasse eingeordnet (vgl. Abb. A.4).

A.2.2 Statischer Entwurf und Vorbemessung

Entsprechend der Anforderungen aus der Gefährdungsklasse (vgl. Tab. A.2) wird ein Tragkonzept entwickelt und die Vorbemessung durchgeführt.

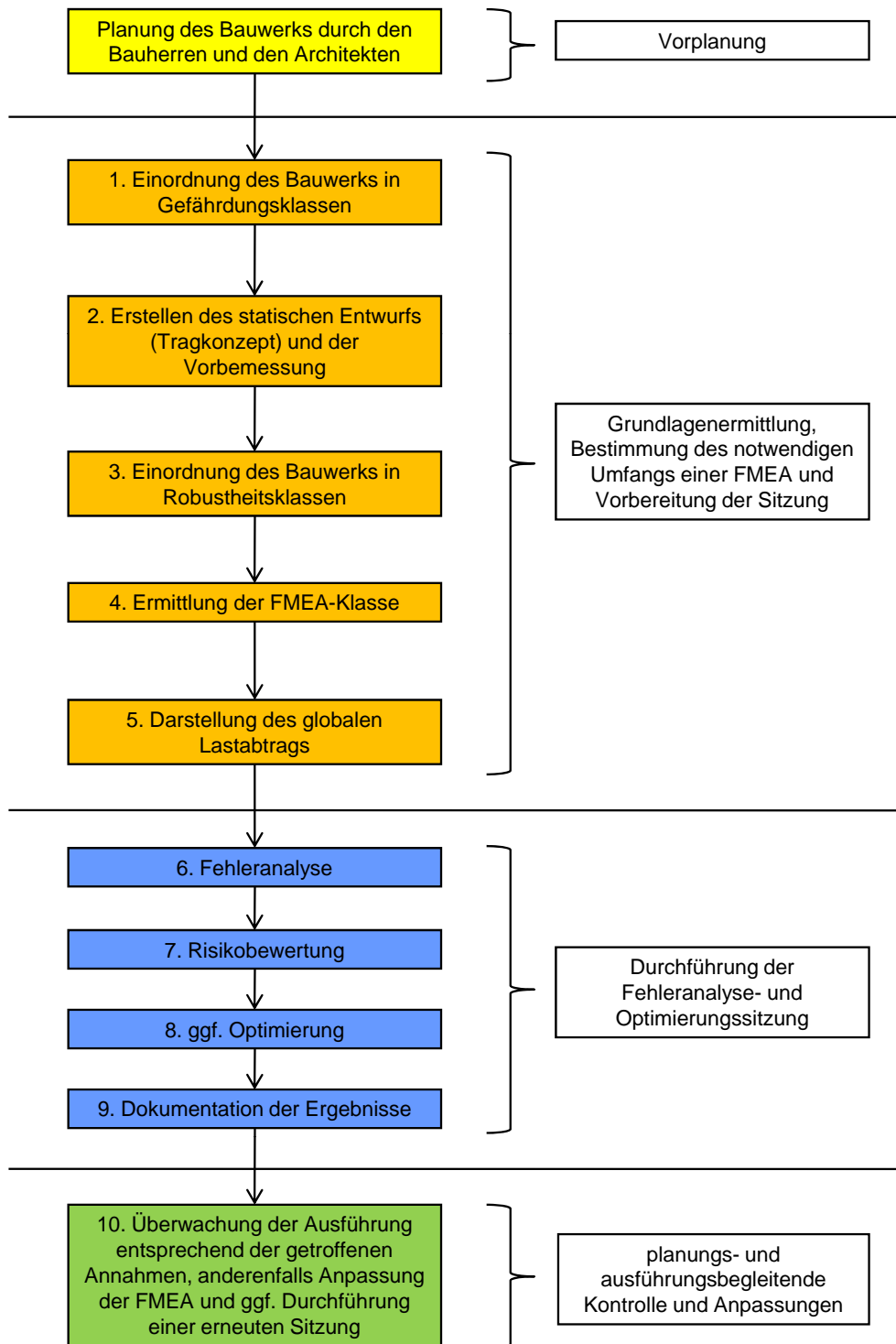


Abbildung A.1: Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Gesamtablaufs einer Tragwerk-FMEA

Zeile	Bearbeitungsschritt	Zweck	Beteiligte	zugehörige Informationen
1	Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen	Ermittlung der notwendigen Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung bei der Durchführung der FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt A.2.1
				Abb. A.3, A.4
				Tab. A.1
2	statischer Entwurf und Vorbemessung	Ermittlung eines geeigneten Tragkonzepts und der notwendigen Bauteilabmessungen	Tragwerksplaner	Abschnitt A.2.2
				-
				Tab. A.2
3	Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen	Ermittlung der notwendigen Anzahl zu erfassender Elemente bei der Durchführung der FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt A.2.3
				-
				Tab. A.3, A.4
4	Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen	Ermittlung des notwendigen Umfangs einer durchzuführenden FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt A.2.4
				Abb. A.5, A.6
				Tab. A.5, A.6
5	Darstellung des globalen Lastabtrags	Unterstützung bei der Ermittlung der Auswirkung von Fehlern auf weiterführende Bauteile (Propagierung der Fehler)	Tragwerksplaner	Abschnitt A.2.5
				Abb. A.7, A.8
				-
6	Fehleranalyse	Auffinden möglicher Fehler, sowie der entsprechenden Ursachen und Folgen	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt X.X	Abschnitt A.2.6
				-
				Tab. A.6, A.9, A.10
7	Risikobewertung	Feststellung, ob das vorhandene Risiko die vorgegebenen Grenzen einhält	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt X.X	Abschnitt A.2.7
				Abb. A.9, A.10, A.11
				Tab. A.8
8	Optimierung	Reduzierung des Risikos, wenn die vorgegebenen Grenzen nicht eingehalten sind	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt X.X	Abschnitt A.2.8
				-
				Tab. A.9, A.11
9	Dokumentation der Ergebnisse	Festhalten der wichtigen Informationen und Weiterverwendung dieser in den weiteren Phasen	Protokollführer der Sitzung nach Abschnitt X.X, Bestätigung durch Teilnehmer	Abschnitt A.2.9
				Abb. A.12
				-
10	Begleitung der weiteren Planung und Ausführung	Überwachung, ob zugrundegelegte Kriterien eingehalten werden und ggf. Anpassung der FMEA an neue Gegebenheiten	Festlegung eines Verantwortlichen, z.B. Prüflingenieur	Abschnitt A.2.10
				-
				-

Abbildung A.2: Erläuterungen und Verweise bzgl. Flussdiagramm

Honorarzone	Planungsanforderungen
HZ I	sehr gering
HZ II	gering
HZ III	durchschnittlich
HZ IV	überdurchschnittlich
HZ V	sehr hoch

Tabelle A.1: Honorarzonen nach HOAI

Schadensfolgeklasse	Merkmale	Gebäudetypen und exponierte Bauteile	Beispielhafte Bauwerke
CC 3 Kategorie 1 gemäß [1]	hohe Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für sehr viele Menschen, große Umweltschäden)	insbesondere: Versammlungsstätten für mehr als 5000 Personen	Stadien, Kongresshallen, Mehrzweckarenen
CC 2 Kategorie 2 gemäß [1]	mittlere Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für viele Menschen, spürbare Umweltschäden)	bauliche Anlagen mit über 60 m Höhe Gebäude und Gebäudeteile mit Stützweiten größer 12 m und/oder Auskragungen größer 6 m sowie großflächige Überdachungen exponierte Bauteile von Gebäuden, soweit sie ein besonderes Gefährdungspotenzial beinhalten	Hochhäuser, Fernsehtürme Bürogebäude, Industrie- und Gewerbebauten, Kraftwerke, Produktionsstätten, Bahnhofs- und Flughafengebäude, Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Museen, Krankenhäuser, Kinos, Theater, Schulen, Diskotheken, Sporthallen aller Art, z. B. für Eislauf, Reiten, Tennis, Radfahren, Leichtathletik große Vordächer, angehängte Balkone, vorgehängte Fassaden, Kuppeln
CC 1	geringe Folgen (Sach- und Vermögensschäden, geringe Umweltschäden, Risiken für einzelne Menschen)	robuste und erfahrungsgemäß unkritische Bauwerke mit Stützweiten kleiner 6 m Gebäude mit nur vorübergehendem Aufenthalt einzelner Menschen	Ein- und Mehrfamilienhäuser landwirtschaftlich genutzte Gebäude

Abbildung A.3: Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Beispielen [e.V08]

Gefährdungsklasse	notwendiger Umfang der Vorbemessung
GK 1/2	Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung in üblicher Weise
GK 3	Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall).

Tabelle A.2: Umfang der Vorbemessung in Abhängigkeit der Gefährdungsklasse

		Honorarzonen nch HOAI		
		HZ I/II	HZ III	HZ IV/V
Consequence Classes	CC 1	1	1	2
	CC 2	1	2	3
	CC 3	2	3	3

Abbildung A.4: Ermittlung der Gefährdungsklasse

A.2.3 Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen

Anhand von Tabelle A.3 wird das Bauwerk hinsichtlich seiner Robustheit bewertet. Darauf aufbauend erfolgt die Einordnung in Robustheitsklassen nach Tabelle A.4.

Merkmale	Aussage	trifft zu:				RZ_i
		gar nicht	wenig	mittel	viel	
Redundanz Tragwerk	Alternative Lastpfade sind vorhanden	-4	-2	0	+2	+4
	Es liegt ein statisch unbestimmtes Tragwerk vor	-2	-1	0	+1	+2
Redundanz Verbindungen	lokale Schwächen haben keine großen Auswirkungen	-4	-2	0	+2	+4
	Die Verbindungen tragen auch wenn einzelne Verbindungsmittel ausfallen	-4	-2	0	+2	+4
	Die Verbindungen können auch Lasten aufnehmen, die durch das Anspringen alternativer Lastpfade hervorgerufen werden	-4	-2	0	+2	+4
Baustoffverhalten	Die Bauteile haben eine ausreichende Duktilität, so dass ein Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden kann	-8	-4	0	+4	+8
Sicherheit der Bauteile	Es sind keine Bauteile vorhanden, bei denen mit einer erhöhten Ausfallgefährdung zu rechnen ist	-8	-4	0	+4	+8
Wartungsfreundlichkeit	Wartungsrelevante Bauteile und Anschlüsse sind gut zugänglich und gut überwachbar	-6	-3	0	+3	+6

Tabelle A.3: Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken

Robustheitsklasse	Robustheitszahl
1	< -10
2	-10 bis +10
3	> +10

Tabelle A.4: Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen

FMEA-Klasse	Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung	Anzahl zu erfassender Elemente
1	–	–
2	gering	gering
3g	hoch	gering
3r	gering	hoch
4	hoch	hoch

Tabelle A.5: Beschreibung der FMEA-Klassen

A.2.4 Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen

In Abhängigkeit der Gefährdungsklasse und der Robustheitsklasse erfolgt die Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen (vgl. Abb. A.6). Diese legen den Umfang fest, mit dem eine FMEA durchgeführt werden muss (vgl. Tab. A.5 und A.6). Eine schematische Darstellung der Ermittlung der Klassen eines Bauwerks ist in Abbildung A.5 gegeben.

A.2.5 Darstellung des globalen Lastabtrags

Entsprechend den Anforderungen aus der FMEA-Klasse werden entweder alle oder nur die wesentlichen Elemente des Tragwerks in einer „Darstellung des globalen Lastabtrags“ dargestellt. Darin wird der Lastfluss innerhalb eines Tragwerks von Bauteil zu Bauteil durch Pfeile visualisiert. Anhand dieser soll die Auswirkung von Fehlern auf weiterführende Bauteile und somit die Bedeutung der Fehler auf Tragwerksebene sichtbar gemacht werden. Ein Beispiel hierfür ist in den Abbildungen A.7 und A.8 gegeben.

A.2.6 Fehleranalyse

Im Rahmen einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung wird das Tragwerk und die einzelnen Bauteile und Anschlüsse auf mögliche Fehler, die auftreten können, untersucht.

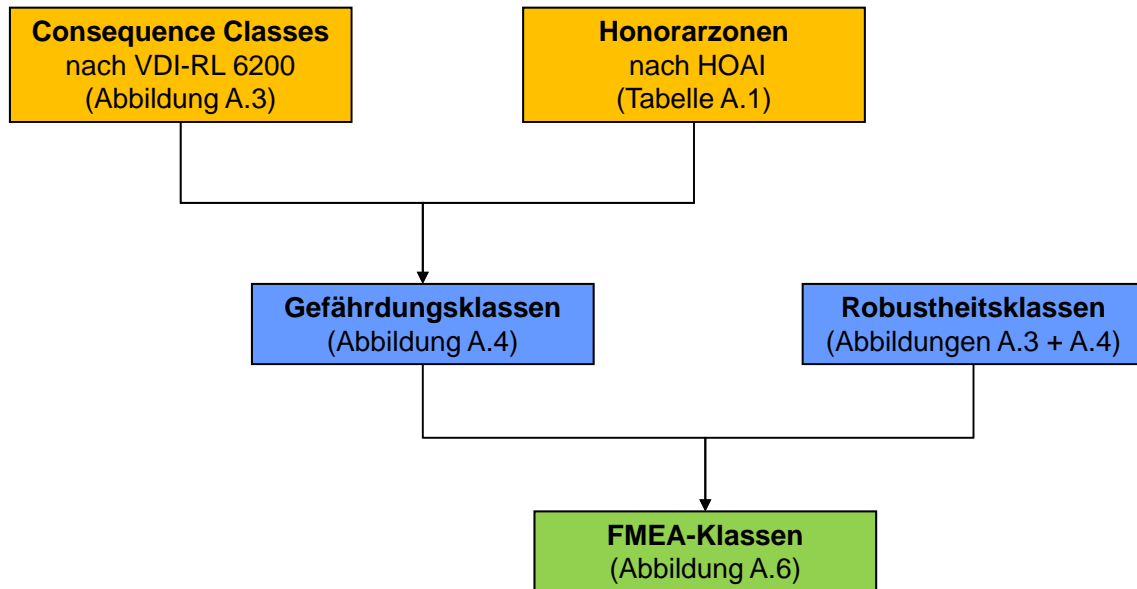


Abbildung A.5: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Klassen eines Bauwerks

		Robustheitsklasse		
		RK 3	RK 2	RK 1
Gefährungsklasse	GK 1	1	2	3r
	GK 2	2	2	3r
	GK 3	3g	3g	4

Abbildung A.6: Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährungs- und der Robustheitsklassen

Genauigkeit/Tiefe der Betrachtung	
gering:	Bürointerne Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, andere Projektbeteiligte können mit einbezogen werden. Normale Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und der Vorbemessung, Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung der wesentlichen Tragelemente. Mittlere Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ).
hoch:	Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im erweiterten Personenkreis, möglichst unter Einbeziehen des Architekten, Prüfingenieurs, des Bauleiters der ausführenden Firma und evtl. des Bauherrns. Umfangreiche Vorbereitung der Sitzung: Erstellen des statischen Entwurfs und Durchführung einer genauen Vorbemessung, Vordimensionierung der Anschlüsse und Verbindungen. Bereits im Vorfeld der Sitzung Bestimmung der kritischen Elemente durch Vergleichsrechnungen (Bemessung für Bauteilausfall). Darstellung des globalen Lastabtrags unter Berücksichtigung aller Tragelemente. Niedrige Grenze für Risikoprioritätszahl (RPZ).
Anzahl zu erfassender Elemente	
gering:	Beschränkung auf kritische Bauteile
hoch:	alle wesentlich am Lastabtrag beteiligten Bauteile berücksichtigen

Tabelle A.6: Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“

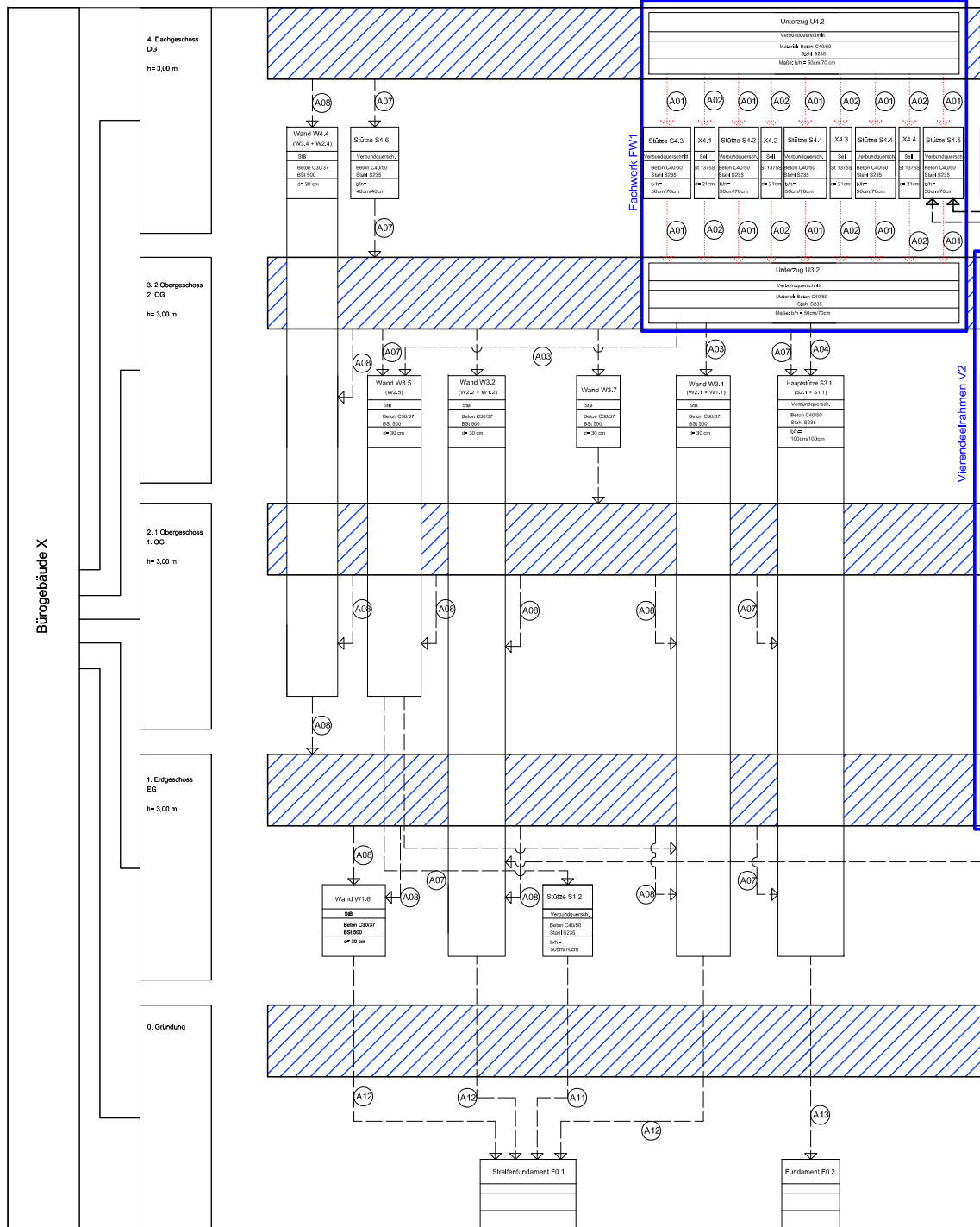


Abbildung A.7: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph, linker Teil [Vog09]

A Anhang: Leitfaden „Tragwerk-FMEA“

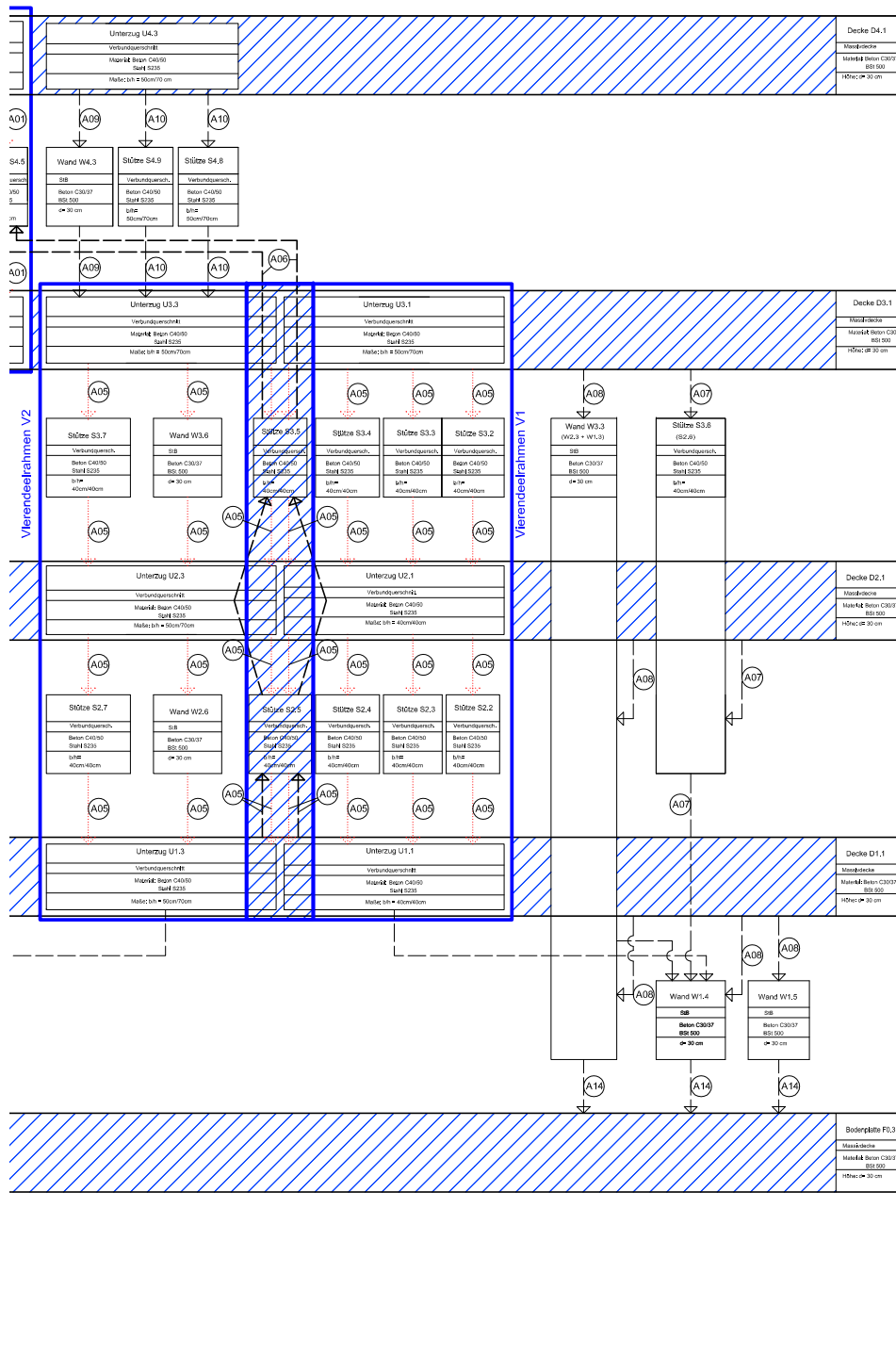


Abbildung A.8: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph, rechter Teil [Vog09]

büointerner Teilnehmerkreis
- Tragwerksplaner, der statischen Entwurf erstellt und Vorbemessung durchgeführt hat
- Verantwortlicher des Projekts (Vorgesetzter des Tragwerksplaners)
- Konstrukteur
- andere büointern am Projekt Beteiligte
zusätzlich im erweiterten Teilnehmerkreis
- Prüflingenieur
- Architekt
- Bauleiter der ausführenden Firma
- andere am Projekt Beteiligte (z.B. Bodengutachter)
- evtl. Bauherr

Tabelle A.7: Definition des büointernen und erweiterten Teilnehmerkreises an einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

Die Sitzung findet, entsprechend den Anforderungen aus der FMEA–Klasse, entweder büointern oder in einem erweiterten Teilnehmerkreis statt (vgl. Tab. A.6). In Tabelle A.7 werden die beiden genannten Teilnehmerkreise genauer definiert.

Für die aufgefundenen möglichen Fehler (Fehlerarten) werden mögliche Fehlerursachen sowie Fehlerfolgen gesucht und dokumentiert. Zur Unterstützung dieses Prozesses werden in den nächsten Abschnitten Hilfsmittel in Form von Fehlerkategorien, Beispielen für Fehlerursachen und einem Fehlerkatalog vorgestellt.

A.2.7 Risikobewertung

Die Bewertung des Risikos, welches durch mögliche Fehler hervorgerufen wird, erfolgt durch die Teilnehmer der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung im Konsens. Das vorhandene Risiko wird durch die Risikoprioritätszahl (RPZ) beschrieben, die sich aus folgenden drei Bewertungskriterien zusammensetzt:

- **Bedeutung der Fehlerfolge** nach Tabelle A.8
- **Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache**
Anhand der vorhandenen Erfahrung der Beteiligten mit einem bestimmten Bauteil und der erwarteten Bauteilqualität in Abhängigkeit des Herstellungsortes wird eine Bauteilkategorie nach Abbildung A.10a bestimmt. Zusammen mit dem errechneten Ausnutzungsgrad des Bauteils ergibt diese eine bauteilbezogene Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit nach Abbildung A.10b.

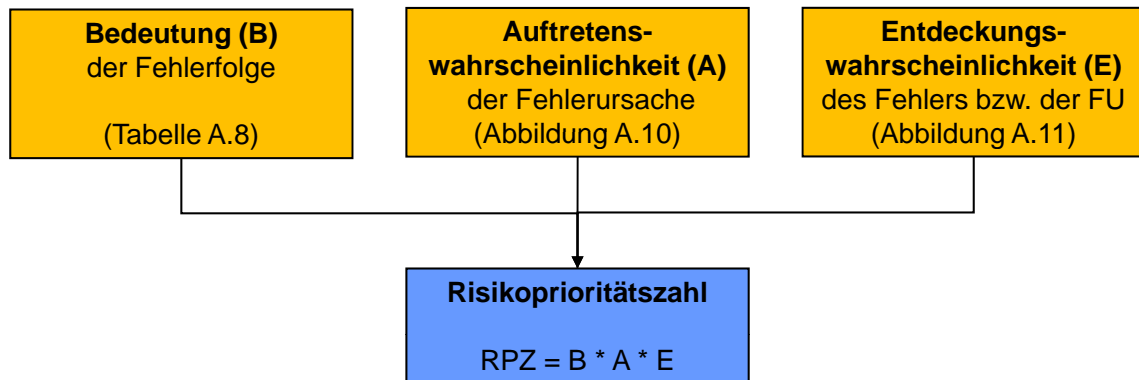


Abbildung A.9: Ermittlung der Risikoprioritätszahl in Abhängigkeit der Bewertungszahlen

Diese ermittelte Zahl entspricht einem „Tendenzwert“, eine genaue Festlegung erfolgt durch die Sitzungsteilnehmer.

- **Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers bzw. der Fehlerursache**

In Abhängigkeit der Honorarzone und der ermittelten FMEA-Klasse wird eine tragwerksbezogene Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit ermittelt (vgl. Abb. A.11). Auch diese entspricht einem „Tendenzwert“, eine genaue Festlegung erfolgt durch die Sitzungsteilnehmer.

Die Bewertung erfolgt durch Zahlen zwischen 1 („geringes Risiko“ bzw. „gut“) und 5 („hohes Risiko“ bzw. „schlecht“). Die RPZ errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen, also $RPZ = B \cdot A \cdot E$. Sie liegt somit im Bereich zwischen 1 und 125. Eine schematische Darstellung des Bewertungssystems kann Abbildung A.9 entnommen werden.

A.2.8 Optimierung

Wenn eine ermittelte RPZ eine vorgegebene Risikoschranke überschritten hat, wird eine Optimierung durch das Ergreifen geeigneter Maßnahmen erforderlich. Dies können zum einen Maßnahmen zur Vermeidung der Fehlerursache und zum anderen Maßnahmen zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache sein. Durch das Ergreifen von Maßnahmen wird daraufhin, je nachdem welcher Bereich verbessert wurde, die zugehörige Bewertungszahl reduziert. Wenn keine geeigneten Maßnahmen gefunden werden können oder die festgelegten Maßnahmen nicht ausreichen, ist das statische Konzept zu überarbeiten. Eine Auswahl möglicher Entdeckungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Fehlerkategorien ist in Tabelle A.11 gegeben.

Beschreibung der Fehlerfolgen	Bewertungszahl
Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5
- große Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung nicht mehr möglich, - keine (wirtschaftliche) Instandsetzung durchführbar	4
- mittlere Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung eingeschränkt möglich, - Instandsetzung mit mittlerem Aufwand verbunden	3
- geringe Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem, - Nutzung weiterhin möglich, - kleinere Instandsetzungsmaßnahmen notwendig	2
keine Beeinträchtigung des Tragwerks oder eines Teilsystems	1

Tabelle A.8: Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers

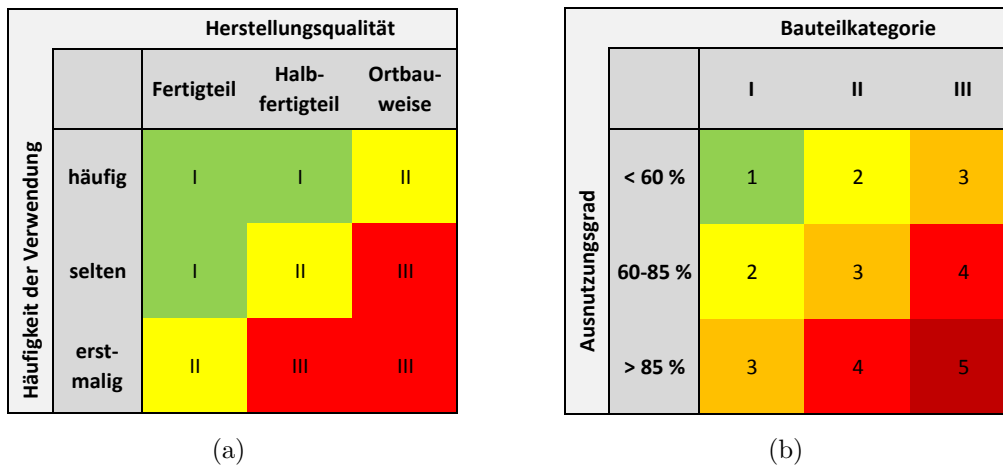


Abbildung A.10: (a) Ermittlung der Bauteilkategorie; (b) Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

		FMEA-Klasse		
		4	3g/r	2/1
Honorarzone	HZ I/II	1	2	3
	HZ III	2	3	4
	HZ IV/V	3	4	5

Abbildung A.11: Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

A.2.9 Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Optimierung werden sorgfältig in Formblättern nach [DIN06] (vgl. Abb. A.12) dokumentiert. Für jede der festgelegten Maßnahmen wird ein Verantwortlicher bestimmt, der für die Umsetzung zuständig ist. Auch ein Termin für die Durchführung ist festzulegen.

Wenn in der Sitzung wichtige Punkte festgestellt wurden, die in den nachfolgenden Projektphasen beachtet werden sollten, sind diese in Form von *Hinweisen für nachfolgende Projektphasen* zu dokumentieren. Diese Hinweise sowie *Informationen über kritische Stellen* werden dann den für die Genehmigungs- und Ausführungsplanung sowie den für die Bauausführung zuständigen Ingenieuren ausgehändigt, damit diese weiter verfolgt werden können.

Bauteil / Anschluss																	
Funktion																	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin								

Bewertung der Fehler:
 - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
 - Bedeutung der Fehlerfolge (B)
 - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)

Abbildung A.12: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]

A.2.10 Begleitung der weiteren Planung und Ausführung

Während des Planungs- und Ausführungsprozesses treten häufig Änderungen auf, sei es durch Planungsänderungen des Architekten oder die Umsetzung von Alternativvorschlägen der ausführenden Firma. Wenn solche Änderungen auftreten, müssen diese nachträglich in die FMEA eingearbeitet werden. Ab einem gewissen Umfang ist eine erneute Fehleranalyse- und Optimierungssitzung erforderlich. Darüber hinaus muss überwacht werden, ob die getroffenen Annahmen und Vorgaben in entsprechender Art und Weise umgesetzt werden.

A.3 Fehlerkategorien und Fehlerursachen

Um das Auffinden von Fehlern und deren Ursachen zu unterstützen, erfolgt eine Einteilung möglicher Fehlerursachen in Kategorien. Diese beschränken sich auf die Bereiche Berechnung, Bemessung und Entwurf (vgl. Tab. A.9).

A.4 Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen

Für eine Auswahl typischer Bauteile im üblichen Hochbau wird in Tabelle A.10 ein Fehlerkatalog mit möglichen Fehlerarten vorgestellt. Dieser kann als Grundlage für die Erstellung von firmeninternen oder auch frei zugänglichen Fehlerkatalogen verwendet werden.

Tabelle A.11 enthält mögliche Entdeckungsmaßnahmen, die ebenfalls auf die erstellten Fehlerkategorien aufbauen.

Fehlerkategorie	Mögliche Fehlerursachen
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	<ul style="list-style-type: none"> - Versteckte Kinematiken im Tragkonzept - Unzureichende Aussteifung des Gebäudes - Der Lastfluss stellt sich in der Realität anders ein, als im Tragkonzept geplant wurde - Mangelnde Robustheit, d.h. unzureichende Reserven bei kleineren Bauteilversagen und Sensitivität gegenüber unplanmäßigen Störungen wie nicht eingeplante Anpralllasten oder Explosionen
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> - Falsch ermittelte Lasten - Nichtberücksichtigung einer maßgebenden Einwirkung - Nichtberücksichtigung der maßgebenden Lastfallkombination
Fehler in Modellierung	<ul style="list-style-type: none"> - Fehler bei der Eingabe des Modells - Das Modell entspricht nicht der Realität (z.B. Momentengelenk statt Rotationsfeder,...)
Fehler in Berechnung und Bemessung	<ul style="list-style-type: none"> - Die Schnittgrößenermittlung wurde falsch durchgeführt - Es ist ein Fehler in der Bemessung vorhanden
Fehler in Details	<ul style="list-style-type: none"> - Die Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt - Die Details sind nicht ausführbar

Tabelle A.9: Mögliche Fehlerursachen [Vog09]

<p>1. Stütze</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilitätsversagen (Knicken) [s] - Druckversagen [s] - Zugversagen (Zugstütze) [d] - Biegeversagen [d/s] - zu starke Verformungen [d] - wird verschieblich (selten) [d] - Schubversagen (z.B. kurze Stützen bei Erdbeben) [s] 	<p>2. Wandscheibe</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckversagen (der Druckstebe) [s] - Zugversagen (im Auflagerber.) [d/s] - zu starke Verformungen [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s]
<p>3. Unterzug</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - zu starke Verformungen [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s] 	<p>4. Decke</p> <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] - Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]
<p>5. Wandartiger Träger</p> <ul style="list-style-type: none"> - Druckversagen (der Druckstrebe) [s] - Zugversagen (in Zugzone) [d] - Versagen bei Öffnungen [d/s] 	<p>6. Bodenplatte</p> <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] - Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung]
<p>7. Fundament</p> <ul style="list-style-type: none"> - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - Versagen einer Zugverankerung (Einleitung der Kräfte) [d/s] - zu geringe Lagesicherheit [d/s] - bei Einzelfundament: Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung] <p>(den Boden betreffende Fehler, wie Grundbruch, werden hier nicht berücksichtigt)</p>	
<p>d = duktileres Materialverhalten s = sprödes Materialverhalten</p>	

Tabelle A.10: Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Bauteile

Fehlerkategorie	Mögliche Entdeckungsmaßnahmen
Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)	statischen Entwurf auf globaler Ebene auf Tragfähigkeit überprüfen (1. Schritt der Fehleranalyse- und Optimierungssitzung)
Fehler in Ermittlung der Einwirkungen	Lastermittlung und Lastfallkombinationen überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> - Checkliste mit allen Einwirkungen - Kontrolle der maßgebenden Lastfallkombinationen, insbesondere an kritischen Stellen
Fehler in Modellierung	Modell nach Eingabe überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> - erneute Eingabe (Vergleich) - Kontrolle jedes Knotens und Elements - 2. Ingenieur (bürointern)
Fehler in Berechnung und Bemessung	Schnittgrößenermittlung und Bemessung überprüfen durch: <ul style="list-style-type: none"> - 2. Programm oder einfache Handrechnung - 2. Ingenieur (bürointern) - Checkliste mit allen notwendigen Nachweisen

Tabelle A.11: Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung