

Michael Eisfeld, Friedel Hartmann, Jörg Dietz, P. Jahn, Dominik Liening, Tesfaye Regassa, Werner Seim, Alexander Steffens, Peter Struss, Borys Takunov, Tobias Vogt

Forschungsprojekt Tragwerk-FMEA

Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse

F 2803

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlußberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2012

ISBN 978-3-8167-8691-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Bitte beachten:

Fehlende Seiten sind **Leerseiten**,
die bei Erstellung
der PDF-Datei für den Download nicht
berücksichtigt wurden

Fraunhofer IRB Verlag

Abschlussbericht

Forschungsprojekt Tragwerk-FMEA

Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits-und Einflussanalyse

Projektleiter:

Dr.-Ing. Michael Eisfeld MSc
Professor Dr.-Ing. Friedel Hartmann

Autoren:

Dr.-Ing. Jörg Dietz
Dr.-Ing. Dr. P. Jahn
Dr.-Ing. Michael Eisfeld MSc
Professor Dr.-Ing. Friedel Hartmann
Dipl.-Ing. Dominik Liening
Dr. Tesfaye Regassa
Professor Dr.-Ing. Werner Seim
Dr.-Ing. Alexander Steffens
Professor Dr. Peter Struss
Dipl.-Ing. Borys Takunov MSc
Dipl.-Ing. Tobias Vogt

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: Z 6 – 10.08.18.7-08.26/II 2 – F20-08-112). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Vorwort

Das Forschungsprojekt Tragwerk-FMEA entwickelt ein präventives Qualitätssicherungssystem für die frühen Phasen der Tragwerksplanung und die bautechnische Prüfung. Zunächst wird erläutert, warum solch ein System fester Bestandteil der zukünftigen Planungspraxis sein sollte. Anhand eines kurzen Beispiels wird die Fragestellung für das Forschungsprojekt abgeleitet und gezeigt, dass in der heutigen Praxis diese Art von Unterstützung fehlt. Das erarbeitete Konzept der Tragwerk-FMEA ist zweistufig angelegt, da es zum einen auf einer systematischen Prüfmethodik in Form eines Leitfadens und zum anderen auf einem entwickelten Software-Prototypen für die Tragwerk-FMEA basiert. Dieser Abschlussbericht fasst die erarbeiteten Ergebnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Fragestellungen.

Alle Projektpartner danken dem Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung für die finanzielle Unterstützung des Projektes durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau. Weiterhin danken die Projektpartner der Bundesvereinigung der Prüfsingenieure e. V. für ihre finanzielle Unterstützung sowie der SOFiSTiK AG und der OCC'M GmbH zur Bereitstellung ihrer Software.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	II
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Definiton der Fragestellung	3
1.3 Forschungshypothese	4
1.4 Struktur des Abschlussberichtes	4
2 Ist-Zustand und Zielspezifikation	1
2.1 Motivation	1
2.2 Skizze – Tragwerk-FMEA	4
2.3 System-FMEA auf Basis eines Modells	6
2.4 Problemstellung - Ist-Zustand	9
2.5 Zielspezifikation	12
Literaturverzeichnis	14
Anhang A: Dokumentation der Umfrageergebnisse	A1
3 Selbsttests	1
3.1 Vorbereitende Überlegungen zur Tragwerk-FMEA	1
3.2 Beschreibung der Fallstudie „Bürohaus X“	4
3.3 Durchführung der Tragwerk-FMEA an dem Bürohaus X	6
3.4 Erkenntnisse und Anforderungen für FMEA-Sitzung	9
Literaturverzeichnis	11
Anhang A: Globaler Lastabtrag Bürohaus X	A1
Anhang B: Sitzungsmappe	B1
Anhang C: Ergebnisse Eisfeld Ingenieure	C1
Anhang D:Ergebnisse WTM Engineers	D1
4 Leitfaden mit Praxisbeispielen	1
4.1 Einleitung	1
4.1.1 Vorbemerkungen	1
4.1.2 Begriffe	2
4.2 Vorgehensweise Tragwerk-FMEA	3
4.2.1 Einordnung des Bauwerks in Gefährungsklassen	3
4.2.2 Tragwerksentwurf und Vorbemessung	7
4.2.3 Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen	7
4.2.4 Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen	9
4.2.5 Darstellung des globalen Lastabtrags	11
4.2.6 Fehleranalyse	14
4.2.7 Risikobewertung	15
4.2.8 Optimierung	17
4.2.9 Dokumentation der Ergebnisse	17
4.2.10 Begleitung der weiteren Planung und Ausführung	19
4.2.11 Fehlerkategorien und Fehlerursachen	19
4.2.12 Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen	19

4.3 Anwendungsbeispiele	23
4.3.1 Anleitung zur Durchführung der FMEA mit Anwendungsbeispielen	23
4.3.2 Beispiel Mauerwerksbau	27
4.3.3 Formblätter zu Mauerwerksbau	33
4.3.4 Beispiel Holzbau	41
4.3.5 Formblätter zu Holzbau	46
Literaturverzeichnis	27
Anhang 1: Mauerwerksbau	A1.1
Anhang 2: FMEA-Formblätter	A2.1
Anhang 3: Holztafelbau	A3.1
Anhang 4: FMEA-Formblätter	A4.1
5 Fallstudien	1
5.1 Fallstudie WTM Engineers	1
5.1.1 Projekt	1
5.1.2 FMEA-Sitzung	2
5.2 Fallstudie Werner Sobek	5
5.2.1 Einleitung	5
5.2.2 Projektbeispiel FMEA	6
5.2.3 Isometrie Tragwerk	8
5.2.4 Durchführung FMEA	9
5.2.5 Diskussion der Strukturanalyse im Projektteam	10
5.2.6 Erkenntnisse	10
5.2.7 Zusammenfassung	10
Anhang A: Formblätter	A1
6 Bauteilkatalog	1
7 Modellierung	1
7.1 Das FMEA-Modell	1
7.2 Konzepte	1
7.3 Diagramme	4
7.4 Beziehung zur FMEA-Tabelle	6
7.5 Fehler und Effekte	6
7.5.1 Fehlerursachen, Effekt(typen), Fehlertypen	6
7.5.2 Fehlerklassifikation	8
7.6 Beispiele	8
7.7 Weitere Objekte	9
8 Standsicherheitsnachweise mit finiten Elementen	1
8.1 Einleitung und Methode mit Hintergrundwissen	1
8.1.1 Was finite Elemente sind und nicht sind	3
8.1.2 Vergleich des gerechneten Lastfalls mit dem eingegebenen Lastfall	7
8.1.3 Adaptive Verbesserung	7
8.1.4 Einflussfunktionen – der Schlüssel zu den finiten Elementen	11
8.1.5 Statik ist angewandte Kinematik	16
8.1.6 Abklingverhalten	18
8.1.7 Dipole und Monopole oder warum Querkräfte ungenauer sind als Momente	20

8.1.8 Einflussfunktionen, die mit dem Abstand vom Aufpunkt wachsen	24
8.1.9 Singularitäten	27
8.1.10 Oszillierende Lagerkräfte	28
8.1.11 Pollution	29
8.1.12 Maxwell und die Folgen	30
8.1.13 Das wahre Tragwerksmodell	32
8.1.14 Ist 3-D genauer als 2-D?	33
8.1.15 Hierarchie der Werte	35
8.1.16 Zahlengläubigkeit	37
8.1.17 Biege- und Diskontinuitätsbereiche	39
8.1.18 Auskragende Bauteile	40
8.1.19 Lagerkräfte	41
8.1.20 Lagersteifigkeiten	42
8.1.21 Ausrunden der Momente?	44
8.1.22 Lagerkräfte von Scheiben	45
8.1.23 Stützen	47
8.1.24 Unterzüge	51
8.1.25 Mängel in der Konstruktion	52
8.1.26 Gleichgewicht	55
8.1.27 Die Konsequenzen für die Statik	61
9 Sensitivitätsanalyse	1
9.1 Einleitung und Methode mit Validierung	1
9.1.1 Validierung, Verifizierung und Einflussfunktionen	4
9.1.2 Wie wird die Sensitivitätsanalyse angewandt?	7
9.1.3 Implementierung der Sensitivitätsanalyse	8
9.1.4 Änderungen und Steifigkeiten	8
9.1.5 Kurze Einführung	11
9.1.6 Anwendungsskizze - Frage 1	13
9.1.7 Anwendungsskizze - Frage 2	16
9.1.8 Rechentechnische Umsetzung	20
9.1.9 Nachgiebige Lager	23
9.1.10 Kollaps von Tragwerken – kritischer Pfad	25
10 Softwarebeschreibung	1
10.1 Funktionalität	1
10.2 Benötigte Fremdsoftware	1
10.3 Funktionale Anforderungen	1
10.4 Allgemeiner Lösungsansatz, Architektur	5
10.4.1 Lösungsideen	5
10.4.2 Struktur und Ablauf der Software	7
10.4.3 Entwurf und Schnittstellen	9
10.5 Datenstrukturen	13
10.5.1 Konzeptionelle Klassen	13
10.5.2 Datenaustausch mit Modulen zur numerischen Berechnung und Visualisierung	14
10.5.3 Datenaustausch mit QFE	15
10.5.4 Datenaustausch mit dem TableEditor	16

11 Softwareprototyp	1
12 Zusammenfassung	1
12.1 Schlussfolgerungen	1
12.2 Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf	1
12.3 Ergebnisse und deren Veröffentlichung	2

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen führen zu verkürzten Planungs- und Genehmigungsverfahren. Gleichzeitig steigt die Komplexität beim Planen stetig an. Ursache dafür sind die Zunahme der Schnittstellen zwischen den Beteiligten, die Vielzahl der Normen und die Computerisierung der Tragwerksplanung mit ihrer Informationsflut. Das führt bei immer stärker werdendem Kosten- und Termindruck zur steigenden Zahl von Bauschäden. Die Mehrheit dieser Schäden wird durch menschliche Planungsfehler verursacht und aufgrund der vorhandenen Komplexität ist die Tendenz steigend.

Ein Begriff, der in der öffentlichen Diskussion immer wieder fällt, um präventiv das Risiko für diese Schäden zu minimieren, ist der Begriff der *Qualitätssicherung (QS)*. Sie wird in der heutigen Planungspraxis durch projektbezogene interne Büroaudits, die in QS-Handbüchern festgeschrieben sind, oder durch die bautechnische Prüfung und Bauüberwachung nach dem Vier-Augen-Prinzip, welche für größere Bauvorhaben durch die Genehmigungsverfahren in den Landesbauordnungen vorgeschrieben sind, realisiert. Bei beiden Qualitätssicherungsmaßnahmen handelt es sich um das heuristische Aufdecken von Fehlern und das Bewerten der damit verbundenen Risiken. Die QS hängt somit sehr stark vom Erfahrungsschatz der beteiligten Personen, der Bürogröße und der Konsequenzklasse des zu planenden Bauwerks ab. Dies hat folgende wesentliche Nachteile:

- Intuitive QS ohne objektives Risikomaß,
- Unzureichende Nachvollziehbarkeit für Dritte,
- Erhöhte Arbeitsbelastung bei komplexen Projekten für Beteiligte an der QS.

Obwohl die bei der Qualitätssicherung durchgeführten Schritte von Büro zu Büro und von Prüferingenieur zu Prüferingenieur oberflächlich betrachtet verschieden sind, besteht ein breiter Konsens unter Praktikern, was eine gute QS fern ab von „zeitlichen Nöten“ des Prüfenden auszeichnet.

Vor diesem Hintergrund ist es Ziel des Forschungsprojektes „Tragwerk-FMEA“, ein modellbasiertes Qualitätssicherungssystem (QS-System) für die computerunterstützte Tragwerksplanung auf Grundlage der bekannten und sehr erfolgreich eingesetzten FMEA-Methode (DIN EN 60812) im Maschinenbau zu entwickeln.

Modellbasiert bedeutet, dass dem Entscheidungsprozess bei einer FMEA-Sitzung ein mechanisches Modell zu Grunde liegt, um die Auswirkungen von Bauteilfehlern auf andere Bauteile zu berechnen. Dieses Modell wird umso wichtiger, je komplexer der Lastabtrag des Bauwerks ist, da selbst erfahrene Ingenieure kaum noch in der Lage sind, im Vorhinein das Tragverhalten zu prognostizieren. Dies gilt insbesondere bei Bauteilschwächungen.

Die *FMEA* (Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse) ist eine sehr einfache analytische Methode, um qualitativ die Auswirkungen eines Bauteilfehlers auf die Zuverlässigkeit des Gesamt- oder eines Teilsystems zu bestimmen. Solch einem Ausfallszenario wird ein Risiko zugeordnet, welchem der Ingenieur dann präventiv durch eine Fehlervermeidungsstrategie begegnen kann. Hierdurch kann die Robustheit des Systems schon in frühen Phasen der Entwicklung systematisch überprüft werden.

Das gesteckte Ziel ist zweistufig: zuerst wird eine Prüfmethodik (Tragwerk-FMEA Leitfaden mit Beispielen aus dem Hochbau) entwickelt, die unabhängig vom Computer angewendet werden kann und zur Gewährleistung der Standsicherheit dient, da statisch-konstruktive Fehler oft der Auslöser für Schäden sind. Anschlie-

End wird für die erarbeitete Methodik prototypisch eine Software implementiert, die das Planungsteam unterstützt, eine Tragwerk-FMEA für größere Bauwerke teilautomatisiert durchzuführen.

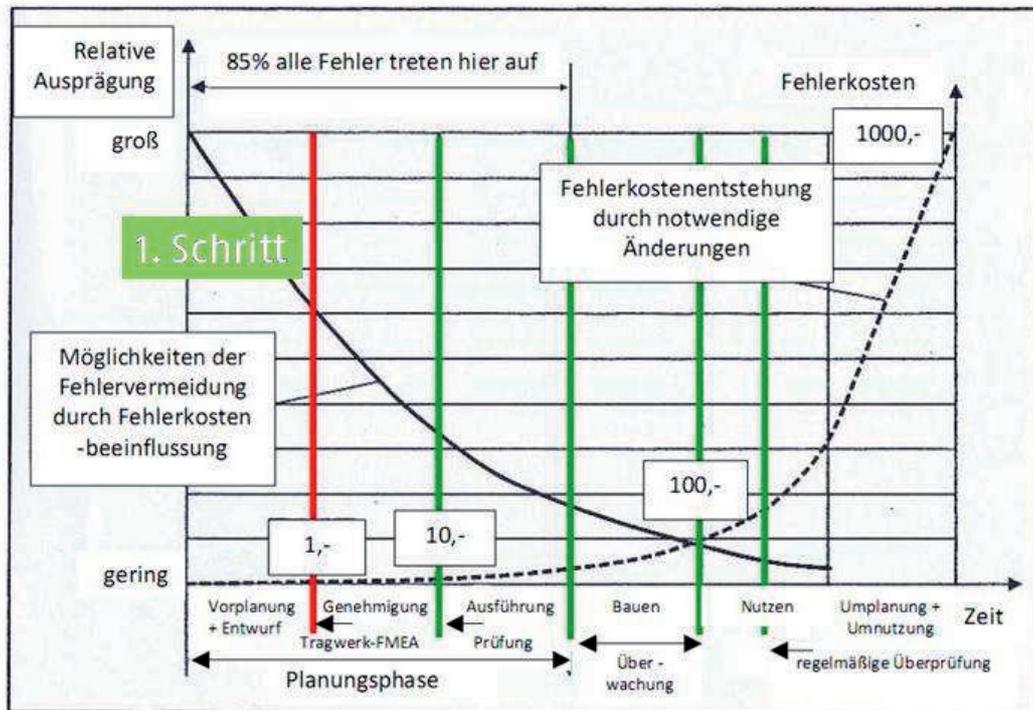


Abbildung 1: Einfluss von Fehlern auf Kosten über die Bauwerkslebensdauer

Im Folgenden werden die Fragestellungen für das Forschungsprojekt am Beispiel eines Bürohauses herausgearbeitet. Die Betrachtung wird auf die HOAI-Leistungsphasen 2 bis 4 sowie die bautechnische Prüfung in diesem Projekt beschränkt, da Fehler in frühen Planungsphasen den größten Einfluss auf Kosten bzw. Schäden haben. Eine Umsetzung der Forschungsergebnisse für spätere Leistungsphasen sowie Gutachten nach Errichtung des Bauwerks ist wünschenswert, um das volle Potential der Ergebnisse auszunutzen.

Beispiel für die Beurteilung des statischen Konzeptes in einer Teamsitzung: für das dargestellte Bürogebäude wird gewöhnlich in einer Teamsitzung das erste statische Konzept durchgesprochen. Dabei werden zum einen mögliche Auswirkungen eines Ausfalls von Traggliedern infolge einer außergewöhnlichen Einwirkung (zum Beispiel infolge von Terroranschlägen oder Fahrzeuganprall) auf die Standsicherheit untersucht, zum anderen für das Tragwerk kritische Stellen bewertet. Da der Tragwerksentwurf maßgeblich die Robustheit bestimmt, führen die Beteiligten eine selektive und intuitive Beurteilung des Konzeptes durch. Eine typische Schwachstelle ist hierbei der Stützensausfall. Die Auswirkungen für diesen Ausfall werden entweder durch eine im Voraus durchgeführte linear-elastische 3D-Berechnung des geschwächten Tragwerks analysiert oder intuitiv durch eine Einschätzung von Lastumlagerungsmöglichkeiten für das geschwächte Tragwerk in der Teamsitzung. Das Ergebnis ist eine qualitative Einschätzung der Robustheit des statischen Konzeptes. Dies wird in einem Bericht festgehalten.

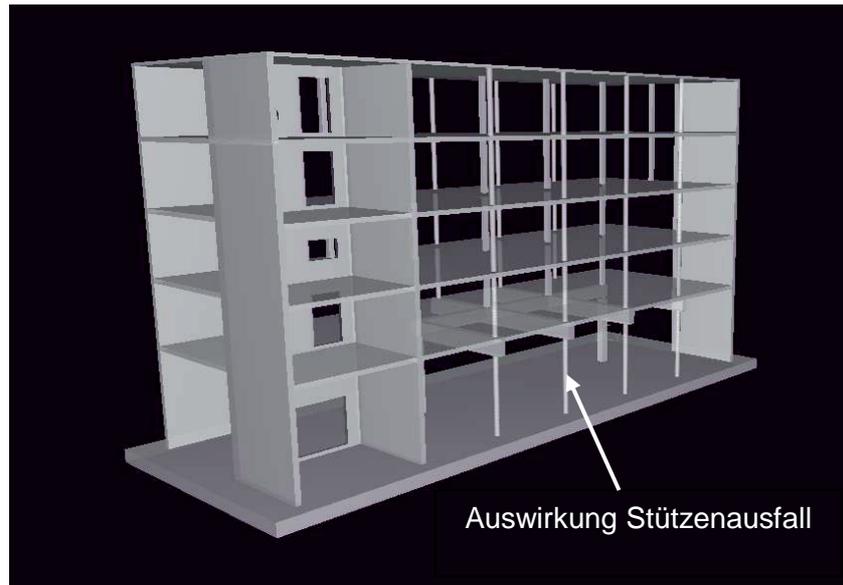


Abbildung 2: Tragwerk eines üblichen Bürohauses

In Zeiten von klar strukturierten Tragkonzepten, bei denen Einzelpositionen zu Teiltragsystemen und diese nachträglich zum Gesamttragwerk mit wohldefinierten Schnittstellen zusammengefügt wurden, konnten grobe Fehler und damit schlimmere Folgen für die Standsicherheit auf Grundlage der Erfahrung des Planungsteams oder des Prüfindgenieurs ausgeschlossen werden. Bei außergewöhnlichen Einwirkungen infolge neuer Gefahrenszenarien oder aber auch architektonischen Entwürfen, die einen dreidimensionalen Lastabtrag erfordern, stoßen die Planungsbeteiligten bei der Beurteilung des Tragwerks hinsichtlich seiner Robustheit an ihre Grenzen.

1.2 Definition der Fragestellung

Vor dem Hintergrund des oben beschriebenen Beispiels sowie der unter den Prüfindgenieuren im Forschungsprojekt durchgeführten Umfrage lassen sich folgende Fragestellungen für das Forschungsvorhaben ableiten, die nicht nur für den üblichen Hochbau von Interesse sind:

- 1) Wie können Risiken bzgl. der Standsicherheit qualitativ auf Basis der Tragwerksrobustheit und der FMEA-Methode in frühen Planungsphasen eingeschätzt werden?
- 2) Wie kann eine systematische QS ausgestaltet sein, damit sie sich in den heutigen Arbeitsprozess einfügt?
- 3) Wie sollte eine Dokumentation der o. g. Teamsitzung aussehen, um Risiken über den Planungsforschritt zu verfolgen?
- 4) Wie muss eine bauteilbezogene Lastpfadmethode mit integralen Schnittgrößen ausgestaltet werden, um das Tragverhalten – auch von Fehlverhalten – abzubilden, zu simulieren und um die Robustheit des Bauwerks zu beurteilen?
- 5) Wie sieht eine EDV-gestützte Teamsitzung aus, die auf der im Projekt entwickelten Tragwerk-FMEA beruht?

Die Fragestellungen unterscheiden sich von anderen Forschungsansätzen insoweit, dass eine qualitative Ermittlung der Robustheit herangezogen wird, um Auswirkungen von Fehlern auf die Standsicherheit in frühen Phasen der Planung abzuschätzen. Dabei kommt marktübliche Berechnungssoftware zum Einsatz die Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der konsistenten Dokumentation der FMEA-Ergebnisse, damit diese auch im weiteren Planungsprozess genutzt werden können.

1.3 Forschungshypothese

Das modellbasierte QS-System „Tragwerk-FMEA“, das in diesem Forschungsprojekt erarbeitet wird, unterstützt den Ingenieur bei den oben genannten Fragestellungen. So kann er bereits in frühen Phasen die Qualität des statischen Konzeptes hinsichtlich des Robustheit gegenüber Fehlern durch ein qualitatives Maß bewerten. Das QS-System bringt dem Praktiker folgende Vorteile:

- Die Tragwerk-FMEA führt zu qualitativen Risikomaßen für einen Entwurf.
- Es werden nachvollziehbar Maßnahmen zur Risikoreduzierung festgelegt.
- Die Tragwerk-FMEA dokumentiert normgerecht die Teamsitzung als QS-Maßnahme.
- Die modellbasierte Lösung ermöglicht die Berechnung der Sensitivität des Tragwerkes.
- Die modellbasierte Lösung erlaubt die vereinfachte Berechnung von Kollapsvorgängen mit marktüblicher FE-Software.
- Tragwerke können wirtschaftlicher entworfen werden, da Reserven der Bauteilwiderstände durch eine iterative Lastumlagerung bei der modellbasierten Lösung ausgenutzt werden können.
- Es können bauteilorientiert die kritischen Stellen des Tragwerks entdeckt werden, die maßgeblich die Robustheit und damit das Schadensausmaß infolge eines Bauteilversagens bestimmen.

Dies sind die Ergebnisse, die das Arbeitsprogramm des durchgeführten Forschungsprojektes bestimmt haben, und die Struktur des Abschlussberichtes festlegen.

1.4 Struktur des Abschlussberichtes

Im zweiten Kapitel werden zu Beginn die Ergebnisse einer Umfrage, die im Projekt unter Prüflingen durchgeföhrt wurde, zum Stand der QS und der vorherrschenden Fehler in der Praxis ausgewertet. Auf dieser Grundlage wird, basierend auf der Methode der System-FMEA, ein Vorschlag zur präventiven QS (Leitfaden Tragwerk-FMEA) skizziert. Um die Arbeitsschritte des Ingenieurs beim Schlussfolgern über das qualitative Tragverhalten formal auf ein berechenbares Modell abzubilden, wird die qualitative Verhaltensmodellierung eingeföhrt. Sie ist Grundlage für die Teilautomatisierung von Arbeitsschritten des Ingenieurs. Abschließend wird das QS-System in Hinblick auf die softwaretechnische Umsetzung unter den gegebenen Arbeitsbedingungen grob spezifiziert.

Im dritten Kapitel werden von zwei Ingenieurbüros FMEA-Analysen an einem Referenzbeispiel durchgeföhrt. Die aus der Auswertung der beiden Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Ableitung einer einheitlichen Methodik, die die Grundlage zur Erarbeitung des Leitfadens „Tragwerk-FMEA“ bildet. Die Prüfmethdik wird bezogen auf das Anwendungsgebiet „Tragwerksplanung“ kurz erläutert. Das Augenmerk liegt auf einer sinnvollen Organisation der Team-Sitzung, einer schnellen Erstellung der erforderlichen Unterlagen für die Tragwerk-FMEA sowie der Darstellung des ingenieurmäßigen Schlussfolgerns zur Bestimmung der Fehlerfolgen auf System- und Tragwerksebene.

Das vierte Kapitel umfasst den erarbeiteten Leitfaden zur Durchführung einer Tragwerk-FMEA. Im Leitfaden werden erstmals Arbeitsschritte und Regeln zur Durchführung einer FMEA im Bauwesen bis zur Leistungsphase 4 formuliert. Dabei werden die Konsequenzklasse, der Schwierigkeitsgrad und die Robustheit eines Tragwerks als diejenigen Parameter definiert, aus denen sich der Umfang der FMEA ableiten lässt. Tabellarische Hilfsmittel, die auf typische Projekte in der Tragwerksplanung anwendbar sind, werden zur Verfügung gestellt.

Im fünften Kapitel werden die Ergebnisse der bei den beteiligten Büros WTM und Werner Sobek durchgeführten Tragwerk-FMEA vorgestellt und die Anwendung der neuen Methode in der Teamsitzung mit ihren Vor- und Nachteilen beschrieben.

Das sechste Kapitel umfasst die Bauteilbibliotheken für einen Carport und das vorgenannte Bürogebäude. Die Bibliotheken stellen systematisch für einzelne Tragelemente und deren Anschlüsse an benachbarte Bauteile (Lasteinleitung, Lastweiterleitung) die dazugehörigen Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen in Form von dar. Jedes Datenblatt enthält eine isometrische Darstellung des betrachteten Tragelementes mit allen erforderlichen Kraft-Steifigkeitsbeziehungen. Diese werden im Folgenden genutzt, um qualitativ das Verhalten des geschwächten Tragwerks in Verbindung mit der Methode der Einflussfunktionen zu analysieren.

Im siebten Kapitel wird das Modellkonzept der Tragwerk-FMEA mit seinen relevanten Eigenschaften erarbeitet, das als Basis für einen Softwareprototypen dient. Es werden formal die benötigten Repräsentationen und ihre Beziehungen untereinander definiert. Danach werden die zentralen Konzepte für „Fehler“, „Effekt“ und die darzustellenden Informationen als Ergebnisse der Analyse in Form der FMEA-Tabelle beschrieben.

Im achten Kapitel wird die FE-Methode als Grundlage für die Einflussfunktionen eingeführt, da die Einflussfunktionen genutzt werden, um Schwächungen durch das Tragwerk zu propagieren. Die Güte der Propagierung hängt entscheidend von den Grenzen der numerischen Modellbildung ab und bestimmt somit maßgebend die Korrektheit der berechneten Ergebnisse. Darauf aufbauend beschreibt das neunte Kapitel die Grundlagen der Sensitivitätsanalyse von Tragwerken mittels finiten Elementen und Einflussfunktionen. Es zeigt auf, wie die Sensitivitätsanalyse dazu eingesetzt werden kann, um die maßgebenden Lastpfade in einem Tragwerk zu berechnen und die Änderungen von Schnittkräften infolge Steifigkeitsabfällen global zu beschreiben. Beides ist im Sinne der Tragwerk-FMEA zur Beurteilung eines statischen Konzeptes als Ganzes erforderlich.

Das zehnte Kapitel beschreibt die Softwarearchitektur, die auf dem zuvor im Projekt erarbeiteten Fehleranalysemodell und der Lastpfadmethode mittels Einflussfunktionen beruht. Abschließend werden die verschiedenen GUI-Komponenten und Module der Software erläutert. Das letzte Kapitel fasst die Ergebnisse und offenen Fragen zusammen.

2 Ist-Zustand und Zielspezifikation

2.1 Motivation

Unser Technologiefortschritt manifestiert sich im Bauwesen in besseren und umfangreicheren Normen, die den Stand der Technik repräsentieren, sowie immer versierterer Berechnungs- und Bemessungssoftware mit höherer Rechenleistung, die uns erlauben, immer größere und anspruchsvollere Bauwerke zu planen und zu bauen. Man würde erwarten, dass mit diesem Fortschritt eine erhöhte Qualität der Bauwerke einhergeht, das heißt die Sicherheit gegenüber Schäden bzw. Einstürzen sich erhöht. Das Gegenteil ist der Fall, was vermehrte Einstürze von Bauwerken belegen.



Abbildung 1: Informationsflut in der Praxis eines Tragwerksplaners

Die Zunahme von weltweit spektakulären Bauunfällen und Einstürzen [AuD07] sowie die Zunahme von Bedrohungsszenarien (Explosion infolge Terroranschlägen, etc.) für Versammlungsstätten wie Stadien und großen Hallen oder auch für Hochhäuser [Die08] geben Anlass, die momentane Qualitätssicherung (QS), die auf der unabhängigen bautechnischen Prüfung oder einer internen Bürokontrolle in der Tragwerksplanung (TP) sowie der Bauüberwachung bei der Ausführung basiert, zu überdenken bzw. an die heutigen Anforderungen anzupassen.

Der Fortschritt hat eine Informationsflut mit sich gebracht hat, die kaum mehr von Ingenieuren und Prüfindingenieuren durch die traditionelle Arbeitsweise zu beherrschen ist, da ein Instrument zur Fokussierung auf die wesentlichen mit Risiko behafteten Teile des Tragwerkes fehlt. Eine systematische Fokussierung ist heutzutage auf Grundlage der deutschen Normen (Grundlage ist DIN 1055-100) nur eingeschränkt möglich, da der quantitative Sicherheitsbegriff ($p = 1 - A$ mit $A =$ Auftretenswahrscheinlichkeit des Versagens) auf Bauteil- und Anchlussebene keine Aussage über den Beitrag eines Bauteils oder Anschlusses zur globalen Standsicherheit und dem damit verbundenen Risikos für Schadensszenarien machen kann. Sicherheit wird in der aktuellen Normengeneration dadurch definiert, dass für alle Bauteile und Anschlüsse die auftretenden Einwirkungen zu jeder Zeit durch die vorhandenen geplanten Beanspruchbarkeiten aufgenommen werden können und nur in seltenen Fällen Beanspruchbarkeiten von Einwirkungen überschritten werden. Da alle Bauteile und Verbindungen a priori gleich wichtig für die Standsicherheit des Bauwerks sind, wird das Versagen eines Bauteils oder einer Verbindung mit dem globalen Versagen des Tragwerks gleichgesetzt. Dies

entspricht allerdings nicht der Realität, da zum einen Bauteile ohne nennenswerten Beitrag zum globalen Lastabtrag ausfallen können, ohne das dies einen Einsturz zur Folge hat, zum anderen da fast alle Tragwerke - gerade Hochbauten - Redundanzen im Lastabtrag besitzen, welche auch nach einem Ausfall bzw. Teilversagen einzelner Tragglieder weiterhin die Standsicherheit gewährleisten. Es kann somit für die Standsicherheit bzw. Kollapssensitivität des Bauwerks keine quantitative Aussage auf dem semi-probabilistischen Sicherheitskonzept abgeleitet werden, da die meisten Bauwerke einen komplexen seriellen und parallelen Lastabtrag besitzen [Wey04]. Anzustreben ist daher eine qualitative statische Aussage bezüglich der Standsicherheit und Robustheit eines Tragwerkes, die in Abhängigkeit der Wichtigkeit von Bauteilen und Anschlüssen in Bezug auf ein globales Bauwerksversagen oder Teilversagen formuliert werden sollte.

Bei der Untersuchung oben genannter Aspekte ist zu berücksichtigen, dass solch eine Bewertung des Tragwerkes meist in einem frühen Projektstadium (nach Vor- und Entwurfsplanung) durchgeführt werden muss, in dem meistens keine detaillierten Berechnungsmodelle vorhanden sind und daher eine Bewertung nur rein qualitativ erfolgen kann. Dies grenzt unseren Ansatz von Untersuchungen zum progressiven Kollapsverhalten von Bauwerken ab, die sich mit der realistischen nicht-linearen Analyse (gegebenenfalls auch als flexible dynamische Mehrkörpersysteme) des entworfenen Tragwerks infolge Bauteilausfällen befassen [Sta00]. Nichts desto trotz greifen wir qualitative Ansätze aus diesem Bereich auf, sofern sie für die qualitative Bewertung des Einflusses eines Bauteils auf die Standsicherheit des Bauwerks in der frühen Planungsphase anwendbar sind. Wir verwenden dabei die Einteilung von Bauwerken in Robustheitsklassen aus der VDI-Richtlinie 6200 „Standsicherheit von Bauwerken“ an (siehe Tabelle 1), welche entsprechende Hinweise hinsichtlich der Fehleranfälligkeit in Abhängigkeit von Tragsystemen und Nutzungen gibt. Ein Ziel dieses Projektes wird es sein, aus den vorhandenen Beispielen und Fallstudien aus der Praxis, statische Eigenschaften von Tragwerken zu definieren, die ihre Robustheit bzw. ihrer Tragsysteme festlegen.

Robustheitsklasse	Bauwerk/Nutzung	Beispielhafte Tragwerke
RC 1	Statisch bestimmte Systeme ohne Tragreserven Fertigteilkonstruktionen ohne nachträgliche redundante Verbindungen Imperfektionempfindliche Systeme Tragwerke mit spröde-elastischem und sprödem Verformungsverhalten	Einfeldträger Stützenstabilisierte Hallentragwerke ohne Kopplungen Schlanke Schalentragwerke Tragwerke aus Glas oder Gussbauteilen
RC 2	Statisch unbestimmte Konstruktionen mit Systemreserven Elastisch-plastisches Tragverhalten	Durchlaufträger Eingeschossige Rahmenkonstruktionen Stahlkonstruktionen
RC 3	Konstruktion mit großer Systemredundanz Tragwerksverhalten und/oder Konstruktionen mit großen plastischen Reserven Fehlerunempfindliche Systeme	Mehrgeschossige Rahmenkonstruktionen Vielfach statisch unbestimmte Systeme Seilverspannte Konstruktionen Überschüttete Bogentragwerke
RC 4	Tragwerke, bei denen alternative berücksichtigte Gefährdungsszenarien und Versagensanalysen ausreichende Robustheit zeigen	Bemessung für Stützensausfall Bemessung auf Lastfall Flugzeugabsturz

Tabelle 1: Robustheitsklassen (Robustness Classes) für Bauwerke aus VDI Richtlinie 6200

Eine fehlende Bewertung der Bedeutung einzelner Tragglieder und –systeme in Bezug auf die Standsicherheit schlägt heutzutage umso mehr ins Gewicht, da die Komplexität der Bauwerke zunimmt und häufig nur noch durch Nachweisverfahren an 3-dimensionalen Berechnungsmodellen erschlagen bzw. durch die bautechnische Prüfung wichtiger Bauteile sichergestellt werden kann. In Verbindung mit der neuen Normengeneration, die von praktizierenden Ingenieuren im Alltag nicht mehr zu bewältigen ist [Ste08], ist der vorherrschenden Computergläubigkeit bzw. –abhängigkeit, durch ein geeignetes Instrument, wie sie die Trag-

werk-FMEA darstellt, entgegenzuwirken. Weyer geht sogar soweit [Wey04], dass er unter anderem folgende ingenieurmäßige intuitive Arbeitsschritte aus seiner Berufserfahrung nennt, um die Sicherheit von Bauwerken zu gewährleisten:

- Entwurf risikoarmer Tragwerkskonzepte,
- Zutreffende Abbildung der Konzepte auf übersichtliche statische Systeme,
- Überprüfung elektronischer Berechnungen durch alternative anschauliche Verfahren der Baustatik,
- Unabhängige Überprüfung der oben genannten Punkte durch einen kompetenten Prüferingenieur.

Dabei fällt auf, dass all die o. g. Punkte auf eine qualitative Beurteilung des geplanten Tragwerkes abzielen, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem quantitativen Berechnungsmodell und Nachweisformaten stehen. Diesen Gedankengang wollen wir in unserem Projekt aufgreifen, wobei wir die Begriffe „risikoarm“ und „zutreffende Abbildung“ genauer festlegen werden. Letzter Punkt stellt dabei die unabhängige Überprüfung als wesentlichen Punkt bei der präventiven QS heraus. Das 4-Augen Prinzip wird ebenso explizit in der DIN 1055-100 gefordert, da die Sicherheitsbeiwerte keine Planungs- und Berechnungsfehler bzw. Abbildungsfehler zwischen Konzept und Modell abdecken, welche laut Schneider einen Großteil von Schäden verursachen [Sne07].

Den Umfang der QS festzulegen, obliegt dabei den verantwortlich handelnden Personen. Er sollte in Abhängigkeit der Konsequenzklassen der DIN EN 1990 und der Honorarklassen der HOAI festgelegt werden. [AuD07] führen hierzu die so genannte Gefährdungsklassen ein, die für den Schwierigkeitsgrad (Komplexität des geplanten Bauwerks mit seinem Lastabtrag und der erforderlichen Berechnung) und für das vorhandene Risiko bei Tragwerksversagen in Form des auftretenden Schadens steht. Somit sollte der Umfang der durchgeführten QS mit der Komplexität des Lastabtrages und seiner Berechnung sowie dem Schadensrisiko ansteigen. In Tabelle 2 werden Gebäudetypen und beispielhafte Bauwerke den Konsequenzklassen zugeordnet, die für das vorhandene globale Risiko (Risiko = A x F mit F = Schadensfolge) stehen.

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Gebäudetypen und exponierte Bauteile	Beispielhafte Bauwerke
CC 3	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	Mittlere Folgen (Schäden an Leben und Gesundheit für viele Menschen, spürbare Umweltschäden)	Bauliche Anlagen über 60 m Höhe Gebäude und -teile mit Stützweiten größer 12 m und/oder Auskragungen größer 6 m sowie großflächige Überdachungen Exponierte Bauteile von Gebäuden, soweit sie ein besonderes Gefahrenpotenzial beinhalten	Hochhäuser, Fernsehtürme Bürogebäude, Industrie- und Gewerbebauten, Kraftwerke, Produktionsstätten, Bahnhof- und Flughafengebäude, Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Museen, Krankenhäuser, Kinos, Theater, Schulen, Diskotheken, Sporthallen aller Art 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 Personen	Ein- und Mehrfamilienhäuser Landwirtschaftlich genutzte Gebäude

Tabelle 2: Schadensfolgeklassen für Bauwerke mit Beispielen (nicht vollständig) aus DIN EN 1990

Dieser Ansatz sollte um das systematische Vorgehen der Tragwerk-FMEA [And04] sowie die Festlegung von risikobehafteten Traggliedern ergänzt werden. Dabei sollte auch wenn nur heuristisch die Auftretens-

wahrscheinlichkeit eines Schadens infolge eines Fehlers und die Einstufung eines Tragwerkes in seine Robustheitsklasse Berücksichtigung finden.

2.2 Skizze – Tragwerk-FMEA

Die systematische QS sollte so früh wie möglich in den bestehenden Planungsprozess mit Tragwerksplaner und Prüfingenieur integriert werden, um wichtigen Fehler zu entdecken und die Risiken, im schlimmsten Fall Personenschäden, so gering wie möglich zu halten. Bild 2 stellt anhand der sogenannten 10-Regel [DQM04] die Zusammenhänge für die TP dar, wobei die bautechnische Prüfung und Bauüberwachung im Sinne einer präventiven Qualitätssicherung zu bewerten ist. In diesem Forschungsprojekt liegt der Schwerpunkt auf der System-FMEA, die nach der Leistungsphase 2 und 3 durchgeführt werden kann und dazu dient, kritische Bauteile zu identifizieren und Maßnahmen für den Planungs- und Ausführungsprozess festzulegen, um Fehler an diesen zu vermeiden.

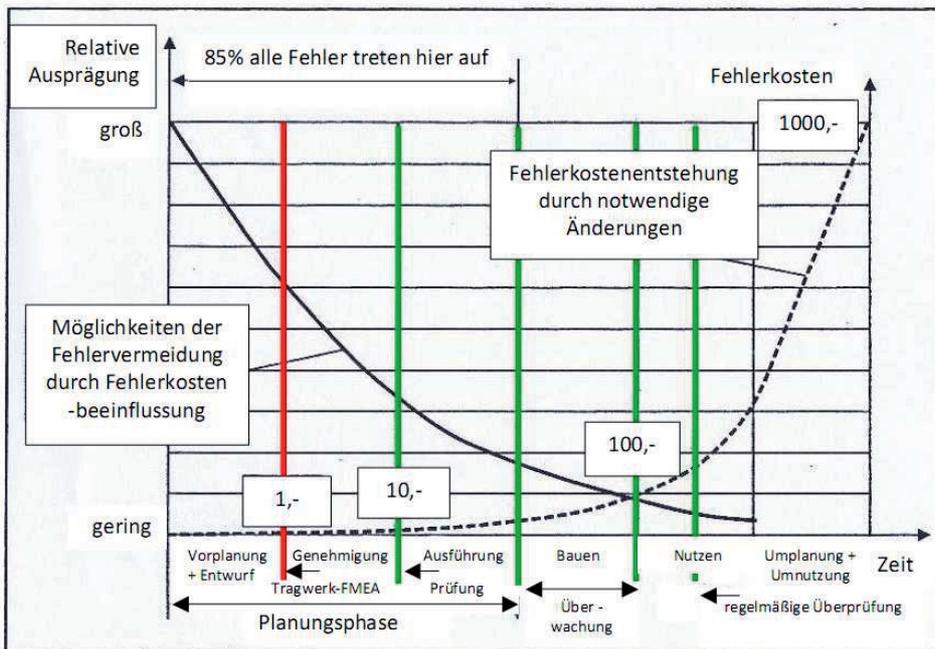


Abbildung 2: Aufwandsvergleich der Fehlerbehebung in verschiedenen Lebensdauerphasen

Hervorzuheben ist, dass die bautechnische Prüfung systematisch als eine Art Risikobetrachtung durchgeführt werden sollte. Dadurch ist eine transparente, selektive und risikobezogene Prüfung erst möglich, die über die Kontrolle von statischen Berechnungen – häufig durch unabhängige Vergleichsrechnungen, die zur gleichen Informationsflut beim Kontrollierenden führen, hinausgeht.

Fehlerfreiheit und Nachvollziehbarkeit entsteht bei der QS durch ein systematisches Vorgehen sowie eine genormte Dokumentation der Ergebnisse. Bei der Tragwerk-FMEA sind folgende Schritte dafür abzuarbeiten, deren Abhängigkeiten in Bild 3 dargestellt sind.

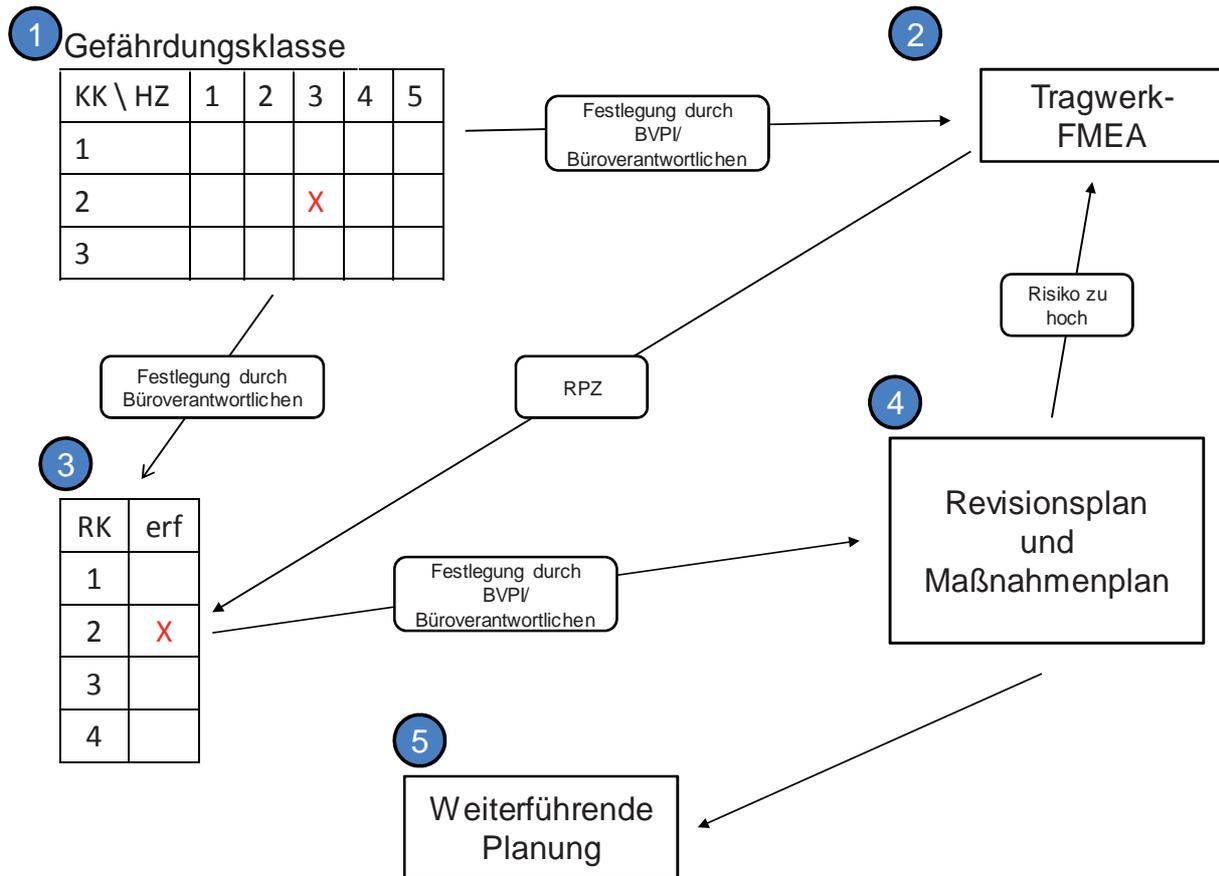


Abbildung 3: Grundsätzliches Vorgehen bei der Tragwerk-FMEA

1. Festlegen des erforderlichen Umfangs der Tragwerk-FMEA anhand der vorhandenen Konsequenzklasse und Honorarzone,
2. Durchführung der Tragwerk-FMEA zur qualitativen Bestimmung des globalen Risikos in Abhängigkeit von vorhandenen Risiken (B x A x E) auf Traggliederebene,
3. Einstufung in eine erforderliche Robustheitsklasse (RK) in Abhängigkeit des vorhandenen Risikos,
4. Festlegen von Maßnahmen (M) zur Risikoreduzierung, die entweder korrektiv zur Änderung am Tragkonzept (Revisionsplan) oder präventiv zur Fehlervermeidung (Maßnahmenplan) im weiteren Prozessablauf benutzt werden,
5. Beginnen bei Schritt 2 bei Revision des Tragkonzeptes,
6. Weiterführung in abfolgenden Planungsphasen soweit Tragkonzept oder Maßnahmen geändert werden.

Die Schritte 1.-4. werden Inhalt der Richtlinie „Tragwerk-FMEA“ sein. Dabei kann die bautechnische Prüfung und Bauüberwachung als Fehlervermeidungsmaßnahme gedeutet werden. Ihre Umfänge richten sich nach dem Ergebnis der Tragwerk-FMEA aus, genauso wie der Umfang und die Regelmäßigkeit der Überprüfung des Bauwerks. Schritt 2 sollte außerdem nach der Vor- und Entwurfsplanung durchgeführt werden und als Ergebnis in einer Dokumentation mit Revisions- und Maßnahmenplan münden, da ab der Genehmigungsplanung die wesentliche Arbeit der Nachweisführung anfällt, und weitere Fehler vermieden werden sollten. Das Forschungsprojekt beschränkt sich auf die oben genannten Schritte, an die eine weiterführende

Qualitätssicherung, ähnlich wie in anderen Industrien anschließen kann [DQM04]. Schwerpunkt dieser Forschung ist die Entwicklung der Tragwerk-FMEA. Sie modifiziert die System-FMEA für die Anforderungen aus dem Bauwesen, bei dem Bauwerke als Unikate und nicht als seriell gefertigte Produkte hergestellt werden. Wir werden in diesem Forschungsprojekt nur Risiken für die Standsicherheit, d.h. Tragfähigkeit einzelner Bauteile und Tragsysteme sowie große Verformungen betrachten, da die meisten größeren Schäden aus Planungsfehlern bei den o. g. Punkten resultieren.

2.3 System-FMEA auf Basis eines Modells

Die Vorteile der Anwendung der System-FMEA liegen in der frühzeitigen Erkennung und Vermeidung von Planungsfehlern sowie der frühen Durchführung notwendiger Änderungen. Beides ist für die Robustheit und Zuverlässigkeit maßgebend, da gerade kritische Stellen durch ein methodisches Vorgehen herausgefunden werden und gegebenenfalls modifiziert werden können bzw. durch geeignete Maßnahmen ihr zuverlässiges Funktionieren sichergestellt werden kann. Die FMEA ist als Methode zur präventiven Fehlervermeidung genormt [DIN06] und besitzt einen hohen Verbreitungsgrad in unterschiedlichen Industriebereichen, im Besonderen im Maschinenbau und der Automobilindustrie, wo sie seit Jahren erfolgreich angewendet wird [DQM04]. Ziel der FMEA ist die qualitative Untersuchung von Systemelementen (SE) auf Fehlerarten (FA) und deren Auswirkungen auf das übergeordnete System als Fehlerfolgen (FF) sowie das Auffinden ihrer Fehlerursachen (FU). Es handelt sich also um eine induktive Methode, bei der durch Betrachtungen von SE auf FF übergeordneter Systeme geschlossen wird [Ber04]. Als Ergebnis erhält man ein qualitatives Maß des Risikos, welches sich anhand der Multiplikation der Einzelrisiken auf Bauteilebene ergibt, den sogenannten Risikoprioritätszahlen (RPZ). Maßnahmen dienen dann im folgenden dafür, bei hohen RPZ das Risiko zu reduzieren, solange ein akzeptables Risiko vorhanden ist.

Bei der FMEA wirken verschiedene Personen mit, um ein optimales Ergebnis zu erzielen. Als Grundlage für die Durchführung einer FMEA sowie die Erfassung von FA dienen verschiedene Informationen, wie zum Beispiel Lastenhefte, Zeichnungen, Fehlerkataloge, Schadensstatistiken und Normen. Eine konkrete FMEA umfasst in Abhängigkeit der Zieldefinition, welche den Umfang sowie die Randbedingungen beschreibt, folgende Arbeitsschritte:

1. Strukturbeschreibung: Auflistung aller SE und deren Schnittstellen sowie deren Synthese zu Teilsystemen und dem betrachteten Gesamtsystem.
2. Funktionsanalyse: Bestimmung der Abhängigkeiten zwischen den SE in Form eines Funktionsnetzes für ein- und ausgehende Zustandsgrößen und Erstellung von Funktionsbäumen für übergeordnete Teilsysteme (Bild 4 verdeutlicht für ein SE die Zusammenhänge).
3. Fehleranalyse: Bestimmung der FU – z. Bsp. Material, unzulässige Belastung, falsche Auslegung, zu geringe Kontrolle - und der FF für jede potentielle FA sowie die Auswertung der daraus resultierenden FF auf das übergeordnete Teilsystem bzw. das Gesamtsystem.
4. Risikobewertung: Berechnung des Risikos über die Risikoprioritätszahl $RPZ = B \times A \times E$ nach Bedeutung (B) der FF, Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der FU und gegebener Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) der FU und FA.
5. Optimierung: Verringerung des Risikos durch mögliche Maßnahmen zur Reduzierung der A oder FF, was zur Revision des Systementwurfes führen kann.

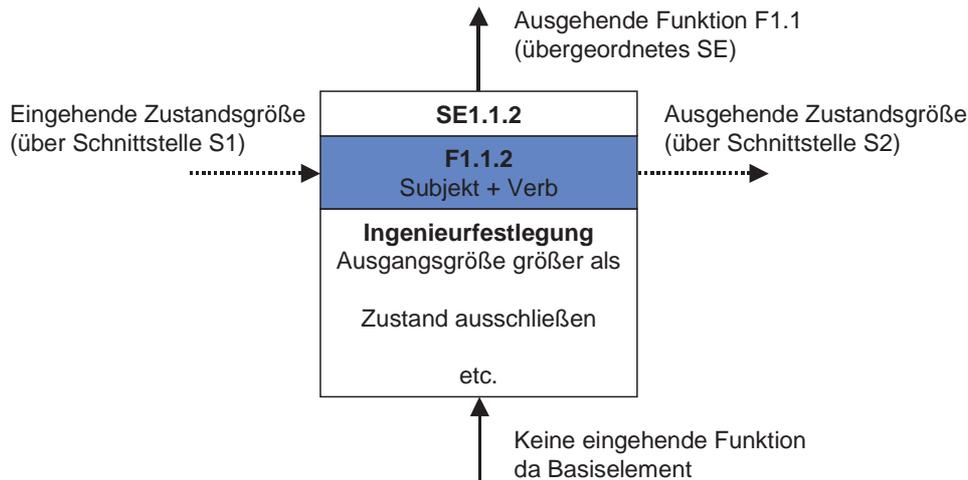


Abbildung 4: Funktionsbeschreibung für SE

Die obigen Arbeitsschritte werden solange durchlaufen, bis eine vorher festgelegte Risikogrenze für RPZ nicht mehr überschritten wird. Das Ergebnis wird in standardisierten Formblättern erfasst, in denen Maßnahmen, Verantwortliche und erstellte Dokumentationen festgehalten werden. Dokumentationen umfassen Ziele der FMEA, Übersicht der Systemstruktur, Funktionsnetze und -bäume, Teammitglieder sowie die Bewertungskataloge für B, A und E [EuS08].

Es existieren computergestützte Werkzeuge für diesen Prozess. Die derzeit verwendeten erfüllen im wesentlichen die Funktion von Editoren zum Erfassen der Analyseergebnisse und automatisieren lediglich deren Strukturierung. Der Kern der Aufgabe, die Ableitung der Auswirkungen von Komponentenfehlern, liegt weiter damit bei den menschlichen Experten und ist somit trotz dieser Unterstützung aufwändig und sehr zeitintensiv, da die eigentliche Analyse von Fachleuten händisch und (zumindest in der Theorie) bei Entwurfsänderungen erneut durchzuführen ist. Die Art des Schlussfolgerns ist jedoch wiederholend, aber schwierig für Experten, da diese Abhängigkeiten zwischen FA, FU und FF auf verschiedenen Hierarchieebenen des Systems gleichzeitig berücksichtigen müssen. Mit Verfahren des modellbasierten Schließens [Str08] eröffnet sich die Möglichkeit der Unterstützung und Automatisierung auch dieses Kerns. Im EU-Verbundprojekt AUTAS wurde von Firmen der Luftfahrtindustrie, sowie Software-Anbietern und Forschungseinrichtungen ein generisches Werkzeug für die modellbasierte Erzeugung von FMEA-Tabellen entwickelt [PCB04]. Für die Tragwerksplanung sind diese erarbeiteten Werkzeuge jedoch nur bedingt geeignet, da es sich bei Bauwerken um Unikate handelt und die Bestimmung von Fehlerfolgen entlang des Lastabtrages nicht-trivial ist und zum Teil auf Basis numerischer Berechnungspakete durchgeführt wird.

Wesentlich ist das Prinzip der kompositionellen Modellierung: eine Modellbibliothek umfasst Modelle von elementaren mechanischen Komponenten (für Normal- und Fehlverhalten). Hieraus wird auf der Grundlage einer Beschreibung der Systemstruktur (für jeden möglichen Komponentenfehler) ein Modell des Gesamtsystems automatisch generiert. Auf der Basis dieses Verhaltensmodells wird durch einen generischen (d.h. system- und sogar gebietsunabhängigen) Algorithmus automatisch ermittelt, ob der angenommene Komponentenfehler bestimmte vordefinierte Effekte nach sich zieht (siehe Bild 5). Dies geschieht ggf. für verschiedene angenommene Szenarien (charakterisiert durch exogene Größen und interne Zustände).

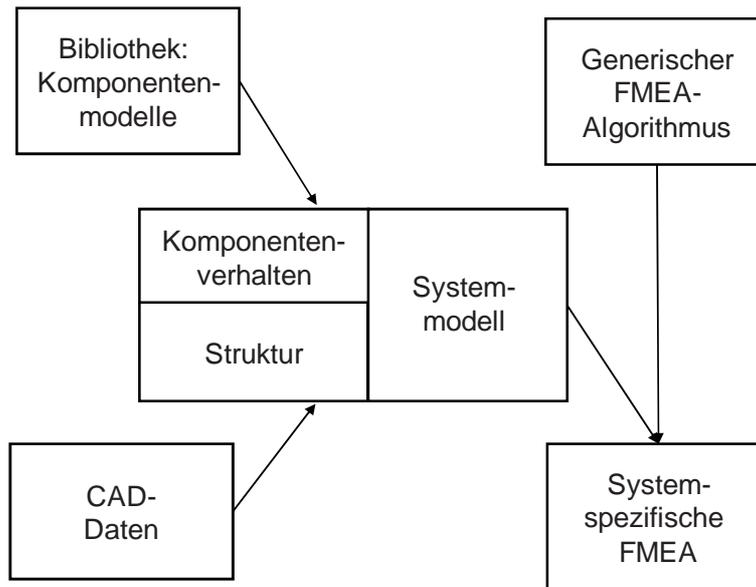


Abbildung 5: qualitativer Berechnungsvorgang

Aus logischer Sicht entspricht dies der Prüfung, ob das Modell und die Szenariobeschreibung einen Effekt impliziert („Effekt tritt definitiv ein“), inkonsistent mit ihm sind („Effekt trifft definitiv nicht ein“) oder keines von beidem gilt („Effekt tritt möglicherweise ein“).

Eine Repräsentation durch eine endliche Relation ist oft möglich, weil die Aufgabe FMEA sowohl im Hinblick auf die Fehler als auch die Effekte nicht an numerischen, sondern nur an qualitativen Unterscheidungen interessiert ist (z.B. im Bereich der Luftfahrtindustrie „Pumpe liefert verringerten Druck“, „Fahrgestell fährt nicht aus“) und die Modelle daher nur eine endliche Menge von Fällen beschreiben („Abweichung des Drucks $\Delta p \in \{-, 0, +\}$ “). Oft basiert die Analyse dann auf der Fortpflanzung solcher qualitativer Abweichungen im Systemmodell.

Das Projekt Tragwerk-FMEA zielt darauf, diesen Ansatz in modifizierter Form auf Strukturen zu übertragen:

- Die Systemkomponenten sind die Elemente und Verbindungen, d.h. Stützen, Wände, Deckenunterzüge etc. und die zugehörigen Anschlüsse.
- Die Strukturbeschreibung eines konkreten Tragwerks ergibt sich aus den verwendeten Elementen und ihren Anschlüssen.
- Die Verhaltensmodelle der Elemente in der Bibliothek beschreiben den Lastabtrag.
- Fehler sind z.B. Abweichungen in der Steifigkeit von Elementen.
- Effekte sind Überlastungen, unzulässige Verformungen etc., d.h. bestimmt durch gewisse Schwellwerte.
- Szenarien könne durch unterschiedliche Lasten oder Lastverteilungen gegeben sein.

Im Unterschied zur rein qualitativen Analyse, z.B. in AUTAS, kann bei Tragwerken jedoch eine (numerische) Neuberechnung von Teilstrukturen durch ein FE-Modell nötig sein, dessen Resultat wieder in den FMEA-Prozess eingespeist und qualitativ ausgewertet werden muss. Dabei ist der erforderliche Mehraufwand durch sinnvolle Integration des Frameworks in den Planungsalltag und der vorliegenden Daten- bzw. Informationsquellen so gering wie möglich zu halten. Wie das Framework in den Planungsprozess integriert wird, wird im letzten Kapitel erläutert.

2.4 Problemstellung – Ist-Zustand

Um den Ist-Zustand bei der Qualitätssicherung im Zusammenhang mit der Tragwerksplanung einzugrenzen sowie den Bedarf für neue Werkzeuge und Hilfsmittel in der Praxis festzustellen, wurde mit Unterstützung des Internationalen Zentrums für Hochschulforschung der Universität Kassel (INCHER) im April und Mai 2009 eine Online-Umfrage bei Prüfsingenieuren und Tragwerksplanern durchgeführt.

Die Einladung an der Befragung teilzunehmen, wurde per E-Mail an etwa 150 im VDI-Nordhessen organisierte Bauingenieure und an die 650 Mitglieder des Verbandes der Prüfsingenieure (vpi) verschickt. Insgesamt 109 Prüfsingenieure nutzten den Link mit dem zugehörigen Passwort, um die Online-Befragung aufzurufen. Allerdings füllten nur 49 Teilnehmer ihren Fragebogen vollständig aus. Der Rücklauf aus dem Kreis des VDI war zu gering, um daraus eine sinnvolle Auswertung aufzubauen. Die vergleichsweise geringe Rücklaufquote lässt darauf schließen, dass bei den direkt Befragten eine vergleichsweise geringe Bereitschaft besteht, an einer Studie zur Qualitätssicherung teilzunehmen. Bei den 49 Teilnehmern, die den Fragebogen vollständig ausgefüllt hatten, zeigten insbesondere die Einträge in den „freien Feldern“ der Befragung ein hohes Interesse und eine gute Sachkompetenz.

In den Bildern A-1 bis A-3 sind die Antworten auf die Eingangsfragen zur regionalen Herkunft, zum Lebensalter und zur Bürostruktur ausgewertet.

Der Fragenkatalog zu den Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung wurde zwischen „Fehlern“ und „schwerwiegenden Fehlern“ unterschieden. In den Bildern A-4 und A-5 sind die Häufigkeitsverteilungen unterschiedlicher Fehlerarten dokumentiert. Außerhalb der vorgegebenen Fehlerarten wurden mehrfach folgende Fehler benannt:

- Übertragungsfehler, Schnittstellen,
- „blinde Programmanwendung“,
- Modellbildung, statische Systeme,
- Nicht ausführbare Anschlüsse (einschl. Bewehrung).

In den Bildern A-6 und A-7 werden die unterschiedlichen Fehlerarten hinsichtlich der Häufigkeit der Nennung gewichtet. „Spitzenreiter“ bei den „Fehlern“ und bei den „schwerwiegenden Fehlern“ ist die „Tragsicherheit von Anschlüssen zwischen Bauteilen“.

Weit vorne liegt auch bei beiden Fehlerkategorien die „räumliche Aussteifung“. Bei den „normalen“ Fehlern gibt es dann so etwas wie eine „Mittelgruppe“ mit „Gebrauchstauglichkeit“, „Lastannahmen“, „Schnittgrößen“, „Lastabtrag“ und „Tragsicherheit von Tragelementen“. Bei den schwerwiegenden Fehlern finden sich in der Mittelgruppe „Bauzustände“, „Gebrauchstauglichkeit“, „Tragsicherheit von Tragelementen“, „Gründung“ sowie „Lastabtrag“.

Die Häufigkeit unterschiedlicher Fehler bei den Konstruktionszeichnungen ist in den Bildern A-8 und A-9 dokumentiert. Die Einschätzung (Bild A-10), dass die häufigsten schwerwiegenden Fehler bei der Genehmigungs- und bei der Ausführungsplanung auftreten, kann auch dahingehend interpretiert werden, dass die schwerwiegenden Fehler in dieser Leistungsphase entdeckt werden. Diese Deutung wird durch Bild A-11 gestützt. Dort wird dokumentiert, dass der präventiven Fehlervermeidung schon bei der Entwurfsplanung eine große Rolle zukommt.

Wie die einzelnen Prüfsingenieure bei der bautechnischen Prüfung vorgehen ist in Bild A-12 dokumentiert. Man kann aus den Antworten schlussfolgern, dass eine gute Intuition des Prüfsingenieurs und seines Sachbearbeiters eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche bautechnische Prüfung ist. Als Stichworte zum Vorgehen werden u.a. genannt:

- Checklisten, QM-System
- Ablaufschema, schriftlich formulierte Arbeitsanweisung
- Gesamtdurchsicht der Unterlagen, Lastabtrag
- Regelmäßige Gespräche zwischen Sachbearbeiter und Vorgesetztem
- Prüfung nur durch erfahrene Ingenieure

Zusammenfassend kann man folgendes aus der Umfrage hinsichtlich der durchgeführten Qualitätssicherung in der Praxis feststellen:

- knapp 30% ermitteln kritische Stellen und Robustheit intuitiv,
- ca. 50% überprüfen Berechnungsergebnisse per Hand,
- ca. 23% bzw. 30% sind für eine QS nach LP 3 bzw. 4,
- ca. 33% sehen Büropräsentation des Konzeptes als präventive QS an.

Die Antworten auf die Fragen zum Vorgehen bei der Tragwerksplanung (Bilder A-13 bis A-16) legen den Schluss nahe, dass die meisten Ingenieure noch sehr stark mit den traditionellen Verfahren verhaftet sind (Handrechnung versus 3-D-Gesamtmodell) und dass hinsichtlich der Dokumentation des Planungsprozesses unterschiedliche Standards vorhanden sind, die sehr wahrscheinlich von den Traditionen und Erfahrungen der jeweiligen Büros geprägt sind. Zu den Themen kritische Stellen und Robustheit des Tragwerks werden folgende Stichworte genannt:

- Kenntnis der häufigsten Fehler, Erfahrung
- Redundanz, Umlagerung, stat. Bestimmtheit bzw. Unbestimmtheit
- Ausnutzungsgrad von Bauteilen

Auch bei der bürointernen Qualitätssicherung dominiert das intuitive Vorgehen (Intuition gegenüber standardisiertem Vorgehen, siehe Bilder A-17 und A-18).

Eine besondere Bedeutung bei der internen Prüfung wird dem Lastabtrag und der Detailausbildung (Bild A-18) zugewiesen. Dies steht in einem logischen Zusammenhang mit den häufigsten Fehlerkategorien (Bild A-6 und A-7). Stichworte sind hier:

- Ingenieurverstand, Vergleichsobjekte
- Plausibilitätskontrollen
- Handrechnung, Lasteinzugsflächen

Die Antworten auf die Frage, wie sich Fehler im Planungsprozess am besten vermeiden lassen, beziehen sich überwiegend auf organisatorische Belange:

- Frühzeitige Abstimmung zwischen Architekt und Statiker
- mehr und vor allem frühere Dialogbereitschaft der Architekten
- reger Informationsaustausch in jeder Leistungsphase zwischen allen Planungsbeteiligten und dem Bauherrn
- Regelmäßige Projektgespräche mit den Mitarbeitern
- kein Zeitdruck bei der Berechnung- vernünftige Planungsunterlagen
- Einhaltung der Abläufe nach dem Muster der HOAI, die einen guten "Fahrplan" vorgibt
- auskömmliches Honorar, leistungsgerechte Honorierung
- Durchgängige Planung vom Tragwerksentwurf bis zur Ausführungsplanung aus einem Büro
- brauchbare Kommentare und Beispielsammlungen zu den Normen, anwendbare Normen

- in dem man sorgfältig arbeitet
- auf keinen Fall mit digitalen 3-D-Modellen, die extrem unübersichtlich sind
- Leistungsphasen abschließen, bei Planungsänderungen die Leistungsphasen wiederholen und entsprechend honorieren
- Weiterbildung, qualifizierte Mitarbeiter, interne Überwachung und Kontrolle der Mitarbeiter durch Vorgesetzten oder das Team
- Vorab Gesamtsystem und Lastabtrag überdenken, System- und Detailskizzen von Hand, Durchsprache wichtiger Punkte mit Kollegen, Vermerk aller wichtigen Punkte in der Statik für die Ausführungsplanung, Zeichnung wichtiger Detailpunkte in der Ausführungsplänen, Durchsicht der Statik und der Zeichnungen durch Kollegen,
- ungestörtes Arbeiten
- Erfahrung - Verständnis der mechanischen Prinzipien, DIN-Normen nicht als Dogma, sondern notwendigen Rahmen verstehen. Blindes Anwenden der DIN-Normen vermeiden. Rigoroses Kürzen der DIN-Normen. Forschung zum Aufstellen praxisgerechter Anleitungen nutzen und nicht wie heutzutage für die Aufstellung neuer (vielfach überflüssiger) Regelungen insbesondere europäischer Normen.
- Straffung und Vereinfachung unserer Normenwerke bei Beibehaltung der Sicherheitslevels

Dass in der Abschlussfrage nach der größten Arbeitsbelastung für den Tragwerksplaner mit Abstand am häufigsten eine „Unterstützung bei der Nutzung der mannigfaltigen DIN-Normen“ gewünscht wird, kann auch dahingehend interpretiert werden, dass die Anwendung der DIN-Normen derzeit unangemessen viel Zeit in Anspruch nimmt. Zeit, die man sowohl bei der Tragwerksplanung als auch bei der bautechnischen Prüfung besser und mit größerem Nutzen für Tragwerkskonzepte und Details einbringen sollte.

Vergleicht man die Umfrageergebnisse mit den Erhebungen von Scheer [Sch00] über Ursachen von Bauwerkseinstürzen, so ist zu erwähnen, dass ein Großteil der Ursachen deckungsgleich mit unseren Umfrageergebnissen ist. Entwurfs- und Konstruktionsfehler sowie Ausführungsfehler bei der Montage sind dabei die Hauptfehlerquellen (ca. 45% von allen Ursachen), die einer präventiven Vermeidung zugänglich sind. Einstürze infolge außergewöhnlicher wetterabhängiger Lasten dagegen werden selbst durch ein ausgefeiltes QS-System nicht vermeidbar sein. Einen Hauptgrund für Montagefehler ist nach Scheer in der fehlenden Kommunikation zwischen Planer und Ausführendem zu sehen, wodurch der Entwurf mit seinem Lastabtrag sowie sensitiven Stellen dem Ausführenden nur bedingt verständlich hinsichtlich des Lastflusses erscheint. Dieser Umstand nimmt umso stärker zu, je mehr Analyse- und Bemessungsprogramme Einzug in die Tragwerksplanung halten und dadurch ein schlechter von einem guten Entwurf nur noch sehr schwierig zu unterscheiden ist, da es keine allgemeingültigen Bewertungen über Robustheit und Sensitivität hinsichtlich von Imperfektionen gibt. Als wichtigen Aspekt zur Vermeidung von Tragwerksversagen nennt Scheer eine offene Kritik über Tragwerke, um aus aufgetretenen Fehlern zu lernen. Dies deckt sich mit der Zielsetzung des Forschungsvorhabens, das die FMEA-Sitzung als bürointerne Kritik am Entwurf ansieht, bei der alle an der Planung beteiligten Personen auf die oben genannten Punkte wie kritische Bauteile, vorhandenen Lastfluss aufmerksam gemacht werden.

2.5 Zielspezifikation

Die Tragwerk-FMEA wird wie oben erwähnt nach der LP 3 und vor der LP 4 durchgeführt. Dabei greift sie auf die vorhandenen Daten und Dokumente des Projektes zurück. Folgende Informationen sind in Abhängigkeit des Büros vorhanden:

- a) Technischer Bericht über Vorplanung,
- b) Handskizzen,
- c) Linien- und punktbasierte Grundrisse in dwg- oder dxf Format mit Bauteilen auf verschiedenen Layern,
- d) Datensätze der selektiv berechneter Positionen, gegebenfalls als 3D-Modell, des Tragkonzeptes (auch FEM),
- e) Bauwerksmodelle in ifc-Format mit geomtrischen Informationen.

Aus diesen Informationen muss das statische Konzept manuell oder automatisch abgeleitet werden, wobei fehlende Informationen über den Lastabtrag ergänzt werden müssen. Selbiges gilt für die Beschreibung der statischen Systeme, die nur im Kopf des Ingenieurs oder in den berechneten Positionen implizit abgespeichert sind. Aus diesem Sachverhalt leitet sich der erste Werkzeugbedarf ab:

1. Erstellung eines elektronischen Tragkonzeptes (Struktur mit globalem Lasabtrag) durch entwerfenden Ingenieur (Schritt 1 und 2 der FMEA):

- a) und b) = Graphenbasierter Editor bzw. Tool zur Eingabe des Tragkonzeptes,
- c) = Aufsatz für Zeichenprogramme zum automatischen Ableiten des Konzeptes,
- d) = Add-on zum Mappen von Positionsdaten auf das ifc-Format,
- e) = Add-on für BIM-Software zur Vervollständigung des Tragkonzeptes aus dem Bauwerksmodell,

Im Forschungsprojekt werden a) und b) durch die Entwicklung geeigneter Tools abgedeckt, da dies die vorherrschende Praxis darstellt. Über eine Schnittstelle, die das Tragkonzept und die statischen Systeme als ifc-Modell beschreibt, können dann die Daten für das Werkzeug bei der Teamsitzung genutzt werden. Diese kann damit auch von BIM-Software für den Fall e) benutzt werden, insofern diese Software die erforderlichen Daten liefert. Selbiges gilt für Berechnungssoftware.

2. Durchführung einer Team-Sitzung (Schritt 3 und 4 der FMEA):

Da dieser Schritt bisher nur sehr unterschiedlich in den Büros anhand von Checklisten und brainstorming sessions oder gar nicht durchgeführt wird, kann im Projekt nur bedingt auf vorhandene Information über Fehlerkataloge, Auftretenswahrscheinlichkeiten, etc. zurückgegriffen werden. Daher sind hier diverse Werkzeuge für die Team-Sitzung sowie für die Erstellung von Bauteilbibliotheken mit Fehlerkatalogen, etc. zu entwickeln. Zur Durchführung der Fehleranalyse und Bestimmung der RPZ's wird ein interaktiver 3D-viewer implementiert, der das Festlegen von Fehlern und die visuelle Verfolgung seiner Konsequenzen auf die übrige Struktur erlaubt. Das automatische Ableiten der Fehlerfolgen auf Modellebene erfordert die Integration des qualitativen Schlussfolgerns mit numerischen Berechnungen mit Hilfe von Einflussfunktion [Har04], die aus den Berechnungsdatsätzen der Positionen gewonnen werden. Hierfür wird ein Algorithmus entwickelt, der eine konsistent und vollständig Fehlerpropagierung auf verschiedenen Hierarchieebenen sicherstellt. Der Datenaustausch erfolgt über eine Standard-Tabellenformat.

3. Dokumentation der FMEA Ergebnisse (Nachlaufend der FMEA):

Die automatisch erstellten FMEA-Formblätter können danach in einem Tabellenkalkulationsprogramm bearbeitet werden. Zur bauteil- bzw. systembezogenen Visualisierung soll abschließend eine Annotation des Tragkonzeptes mit den Formblättern erfolgen.

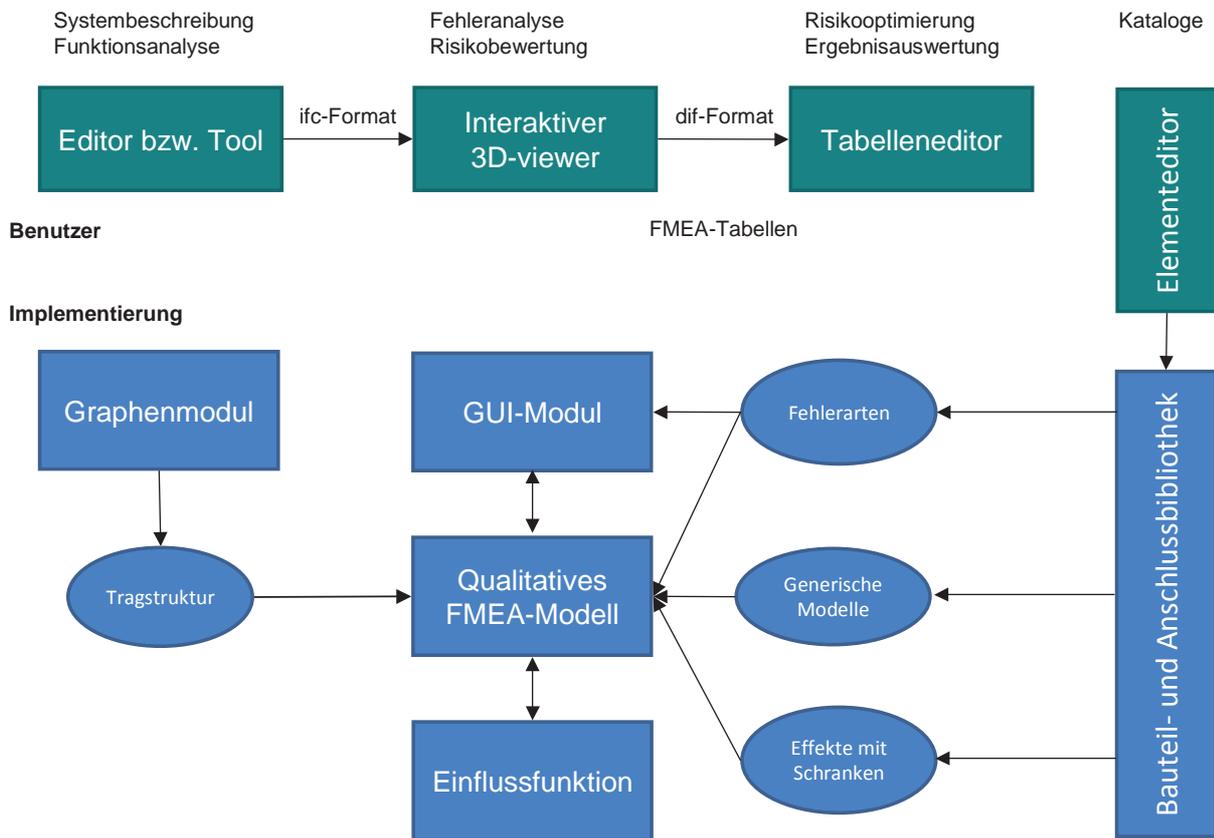


Abbildung 7: Werkzeuge für Tragwerk-FMEA mit Softwaremodulen

Literaturverzeichnis

- [And04] Andrä, H.-P. Der Prüfmgenieur in Deutschland – ein Modell für die Europäische Union. Fachzeitschrift: Der Prüfmgenieur (2004), Nr. 15, S. 4-5
- [AuD07] Andrä, H., Dressel, B. Uniform Concept for Structural Stability and Fire Protection IABSE Symposium Weimer, 2007
- [Die08] Dietz J., persönliche Kommunikation, 2008
- [Ber04] Bertsche, B., Lechner, G. Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer Verlag, 2004
- [DIN01] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung - Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, 2001
- [DIN06] DIN EN 60812: Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA), Beuth Verlag, 2006
- [DQM04] Deutsche Gesellschaft für Qualität. FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. DGQ-Band 13-11, 3. Auflage, Beuth Verlag, 2004
- [Dre08] Dressel, B. Die Rolle des Prüfmgenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr Beitrag, 2008
- [EN19] DIN EN 1990:2002: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung, 2002
- [ES08] Eisfeld, M., Struss, P. Qualitätssicherung im konstruktiven Ingenieurbau. Jahrbuch Bautechnik 2009, VDI-Verlag, 2008
- [Har04] Grätsch, T., Hartmann, F., Katz, C. Einflussfunktionen und finite Elemente Bauingenieur 11/2004, 2004
- [HOA01] HOAI: Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, Werner Verlag, 2001
- [Nis07] NISTIR 7396 Best Practice for Reducing the Potential for Progressive Collapse in Buildings U.S. Department of Commerce, 2007
- [PCB04] C. Picardi, L. Console, F. Berger, J. Breeman, T. Kanakis, J. Moelands, S. Collas, E. Arbaretier, N. De Domenico, E. Girardelli, O. Dressler, P. Struss, B. Zilbermann: AUTAS: a tool for supporting FMECA generation in aeronautic systems. In: Valencia, Spain, pp. 750-754, 2004
- [Sch00] Scheer, J. Versagen von Bauwerken Band 1 und 2, Ernst und Sohn, 2000
- [Sne07] Schneider, J. Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen – Grundwissen für Ingenieure, B. G. Teubner, 1996
- [Sta07] Starossek, U. Progressiver Kollaps von Bauwerken (Progressive collapse of structures) Betonkalender 2008, Part VII, Wiley-VCH, Berlin, 2007
- [Ste08] Steiner, J. Fehlerempfindliche Wechselwirkung: Neue Normen und Computergläubigkeit Baustatik-Baupraxis 10, 2008
- [Str08] Struss, P. Model-based Problem Solving. In: van Harmelen, F., Lifschitz, V., and Porter, B.(eds.). Handbook of Knowledge Representation, Elsevier, 2008
- [VDI08] VDI-Richtlinie 6200 Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung, 2008
- [Wey04] Weyer, U. Anspruch auf Wirklichkeit semi-probabilistischen Bemessungskonzepte Stahlbau 73 (2004), Heft 9, Ernst & Sohn, 2007

Anhang A Dokumentation der Umfrageergebnisse

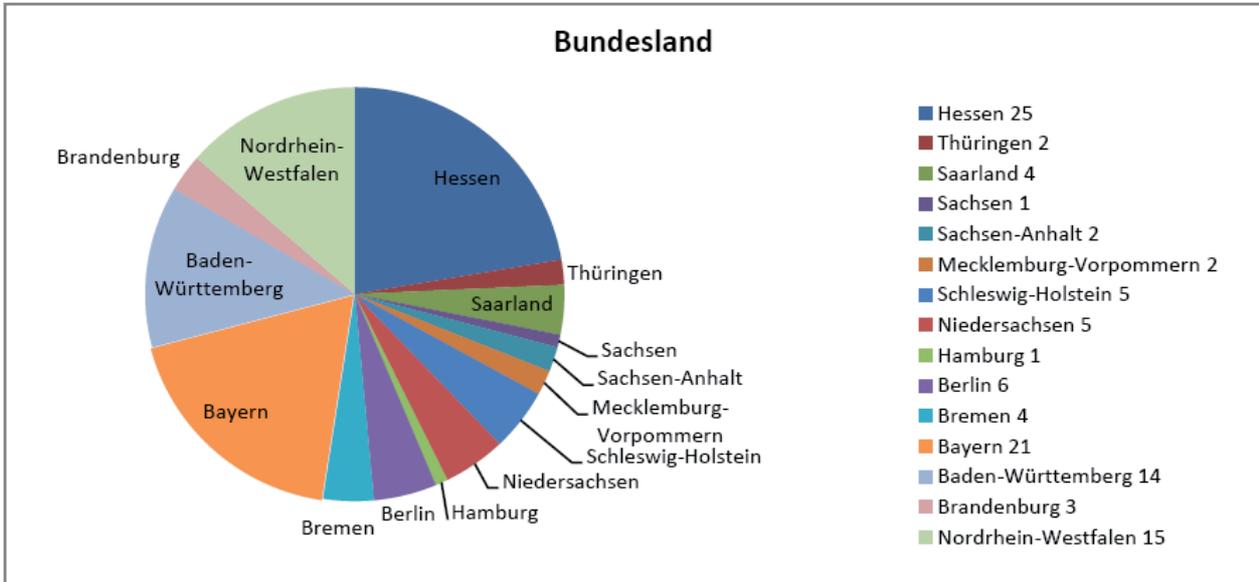


Abbildung A-1: Teilnehmer an der Umfrage nach Bundesländern

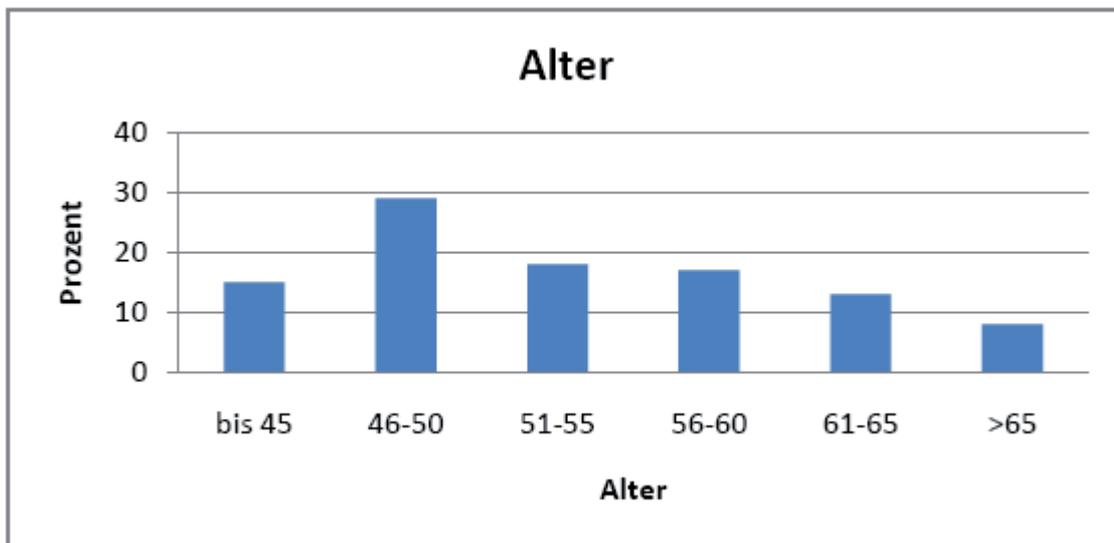


Abbildung A-2: Teilnehmer an der Umfrage nach Alter

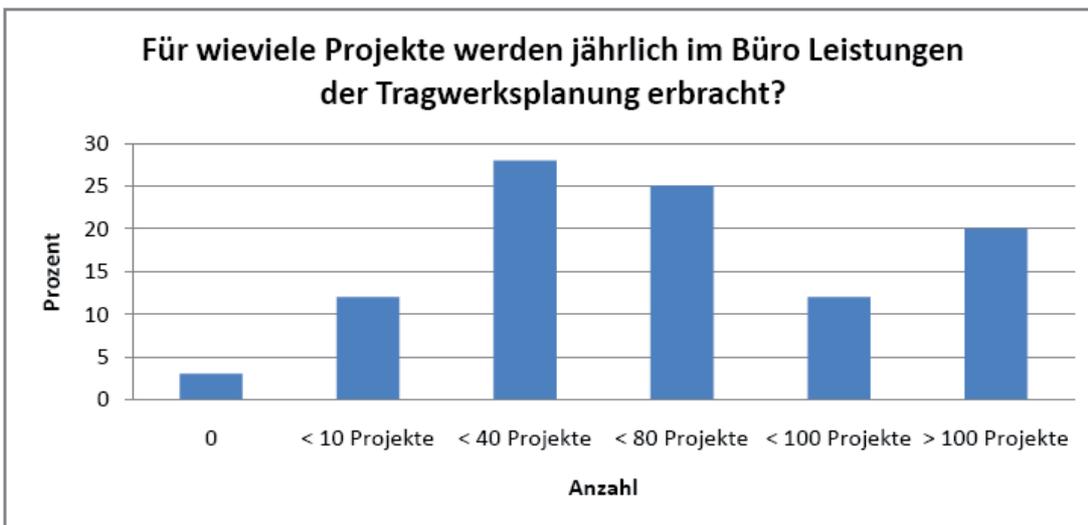
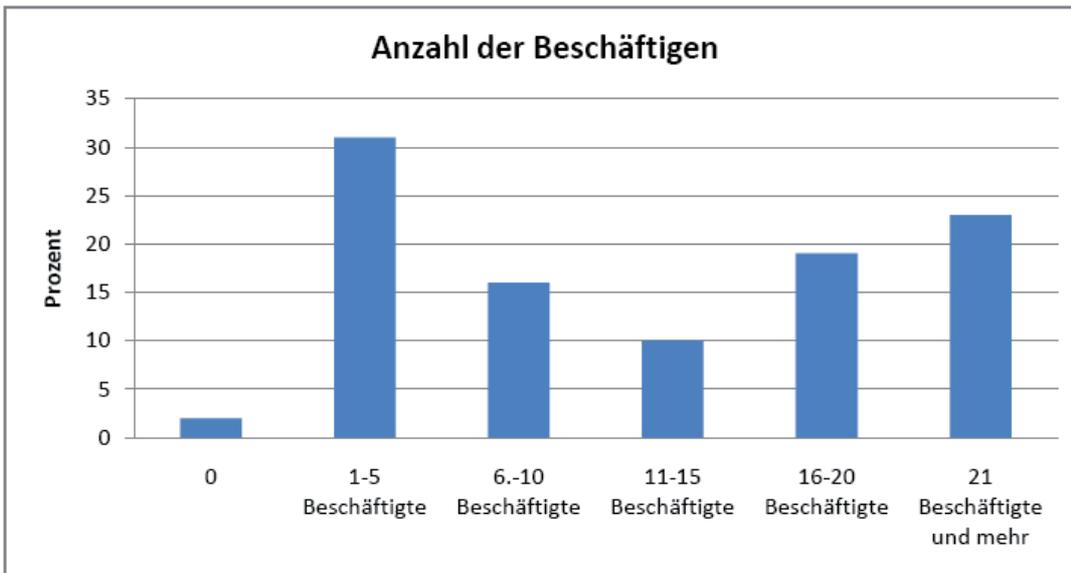
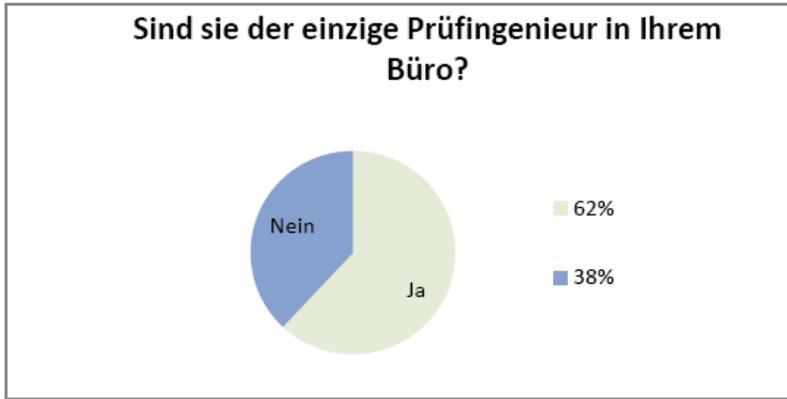


Abbildung A-3: Fragen zur Bürostruktur

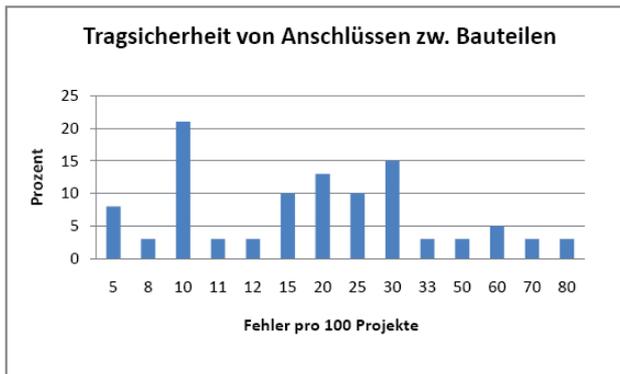
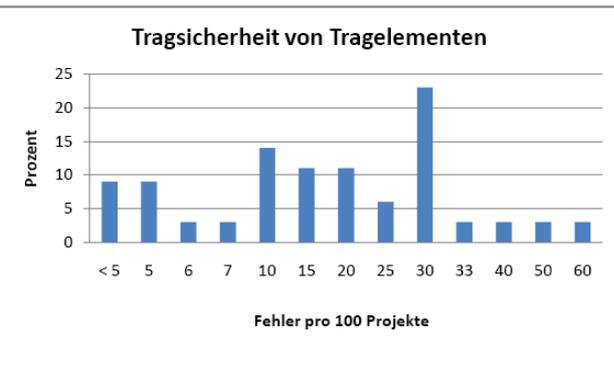
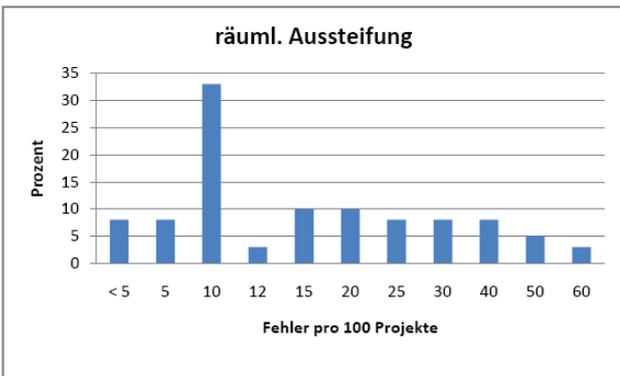
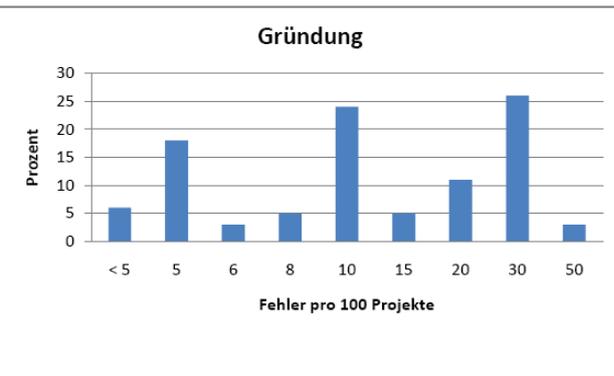
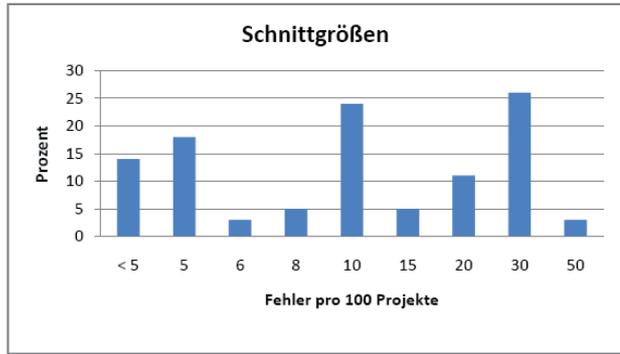
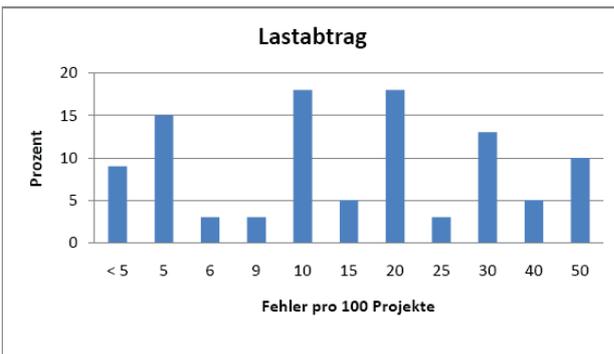
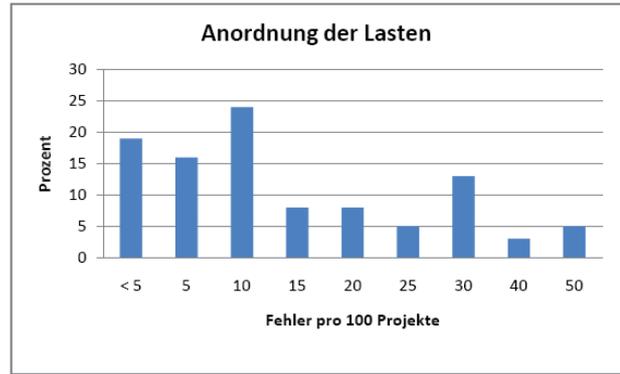
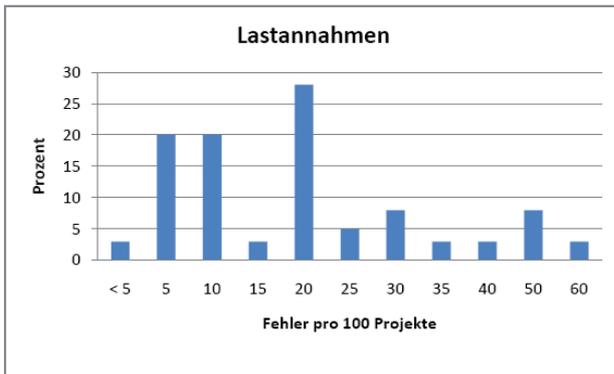


Abbildung A-4: Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – Fehler pro 100 Projekte

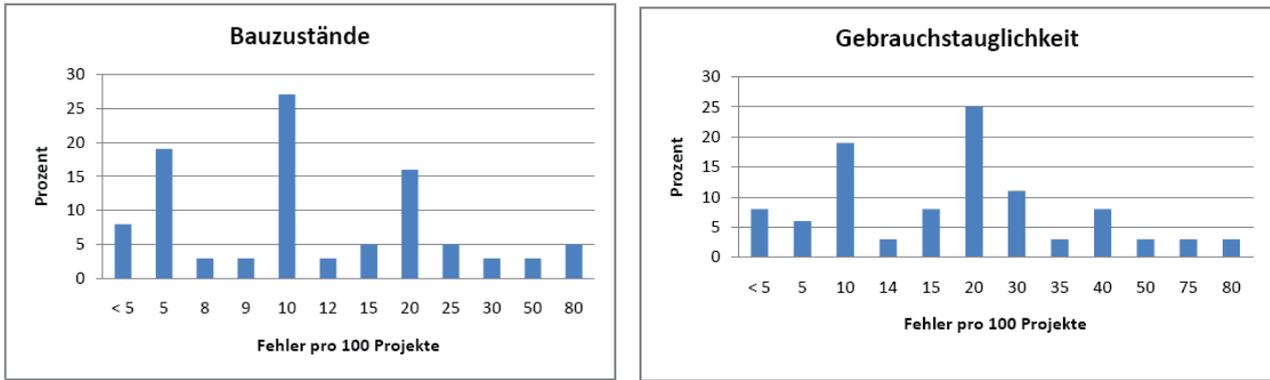


Abbildung A-4 (Fortsetzung): Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – Fehler pro 100 Projekte

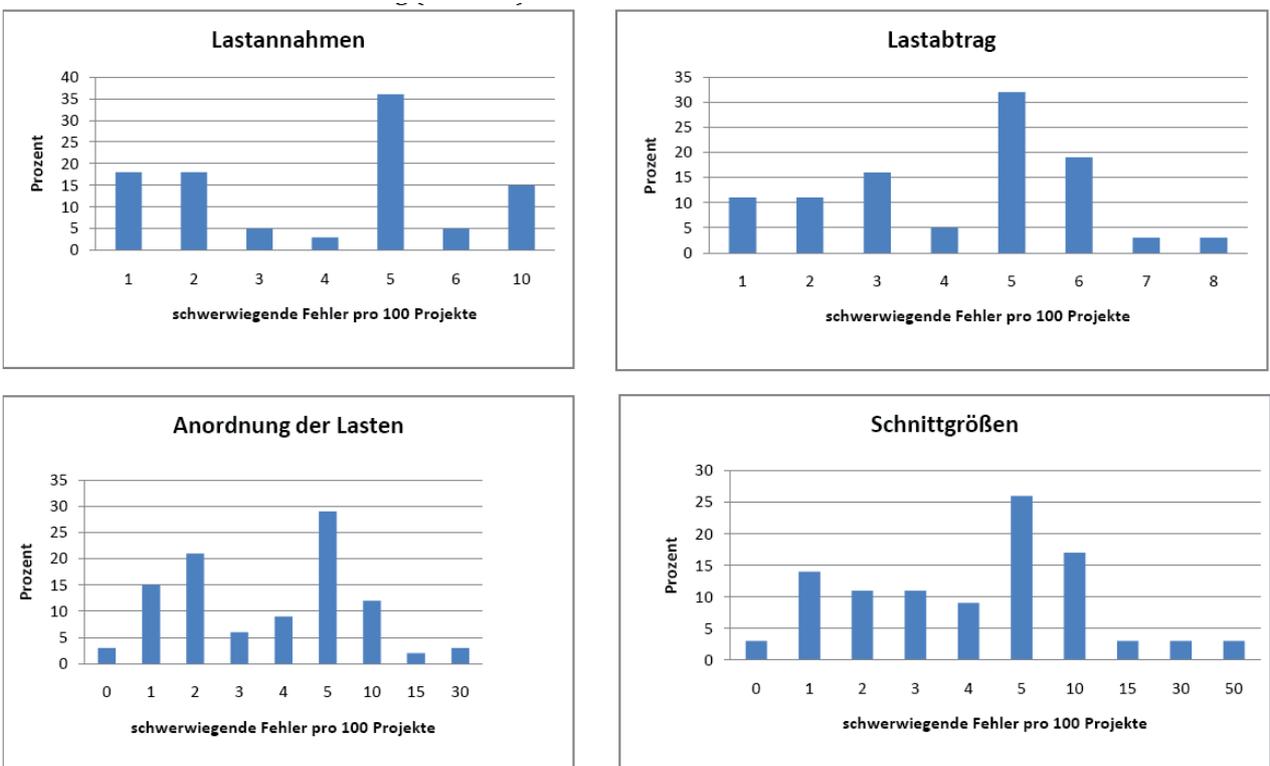


Abbildung A-5: Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – schwerwiegende Fehler pro 100 Projekte

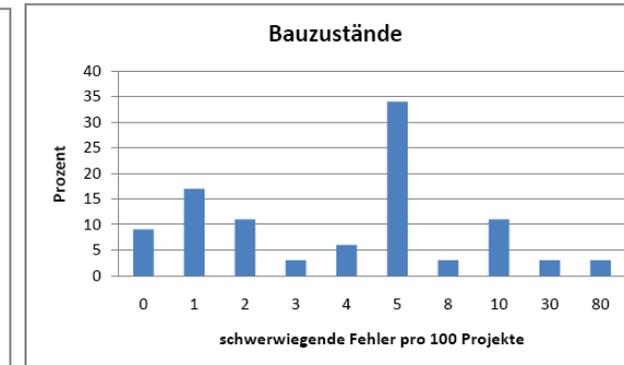
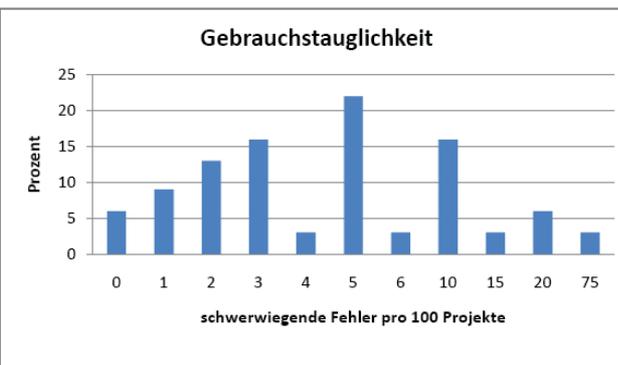
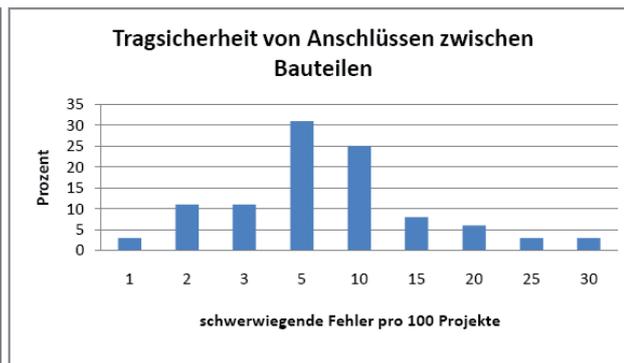
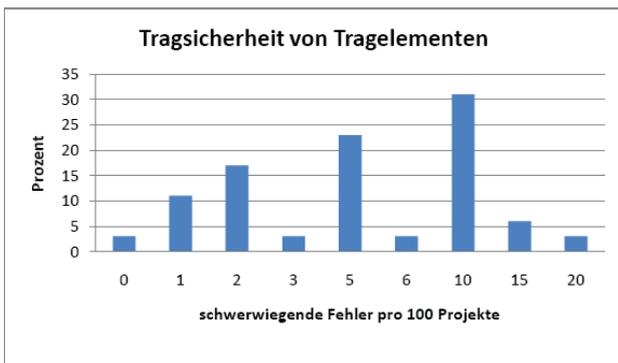
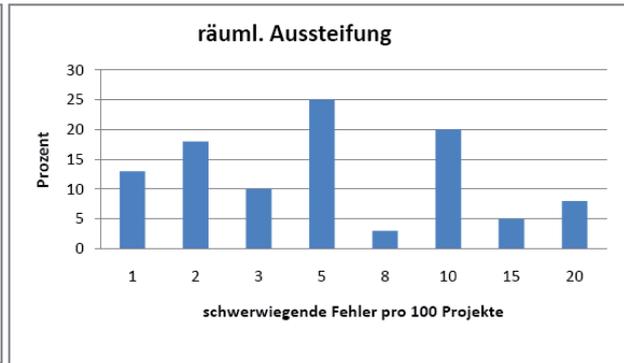
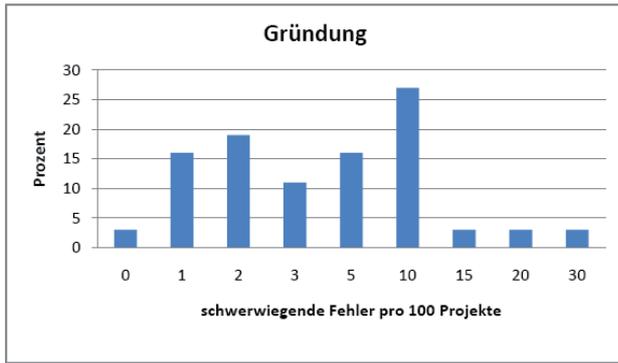


Abbildung A-5 (Fortsetzung): Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – schwerwiegende Fehler pro 100 Projekte

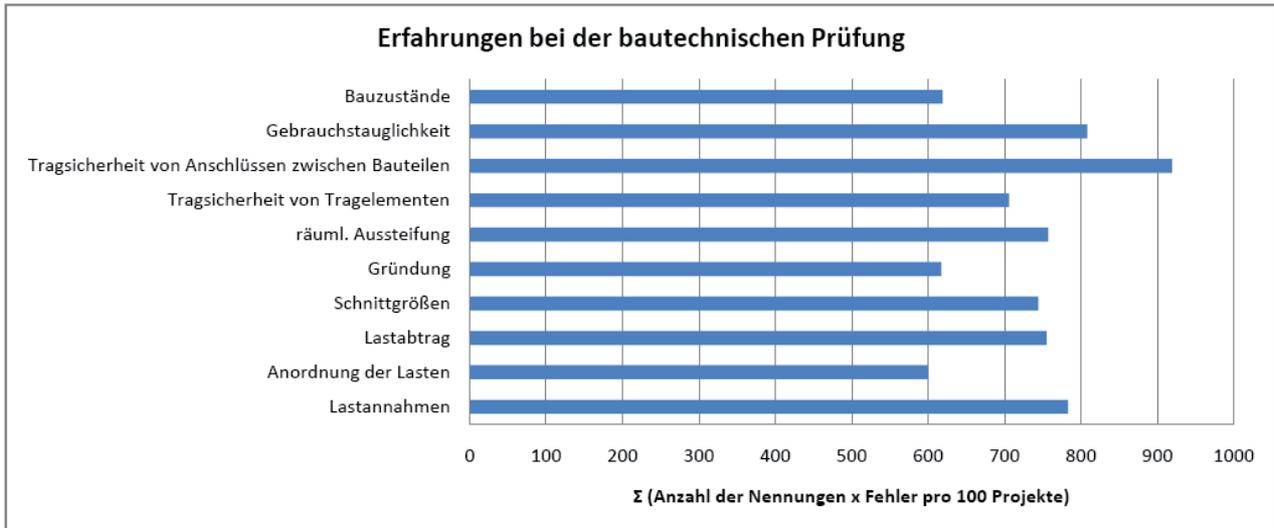


Abbildung A-6: Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – Fehler pro 100 Projekte, Fehlerarten im Vergleich

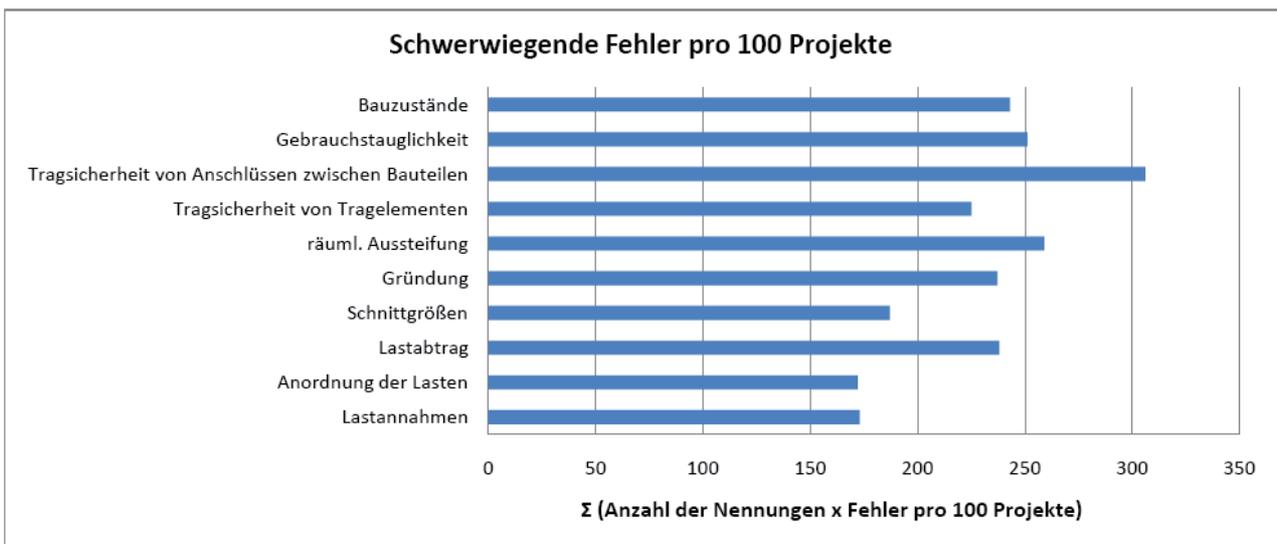


Abbildung A-7: Erfahrungen bei der bautechnischen Prüfung – schwerwiegende Fehler pro 100 Projekte, Fehlerarten im Vergleich

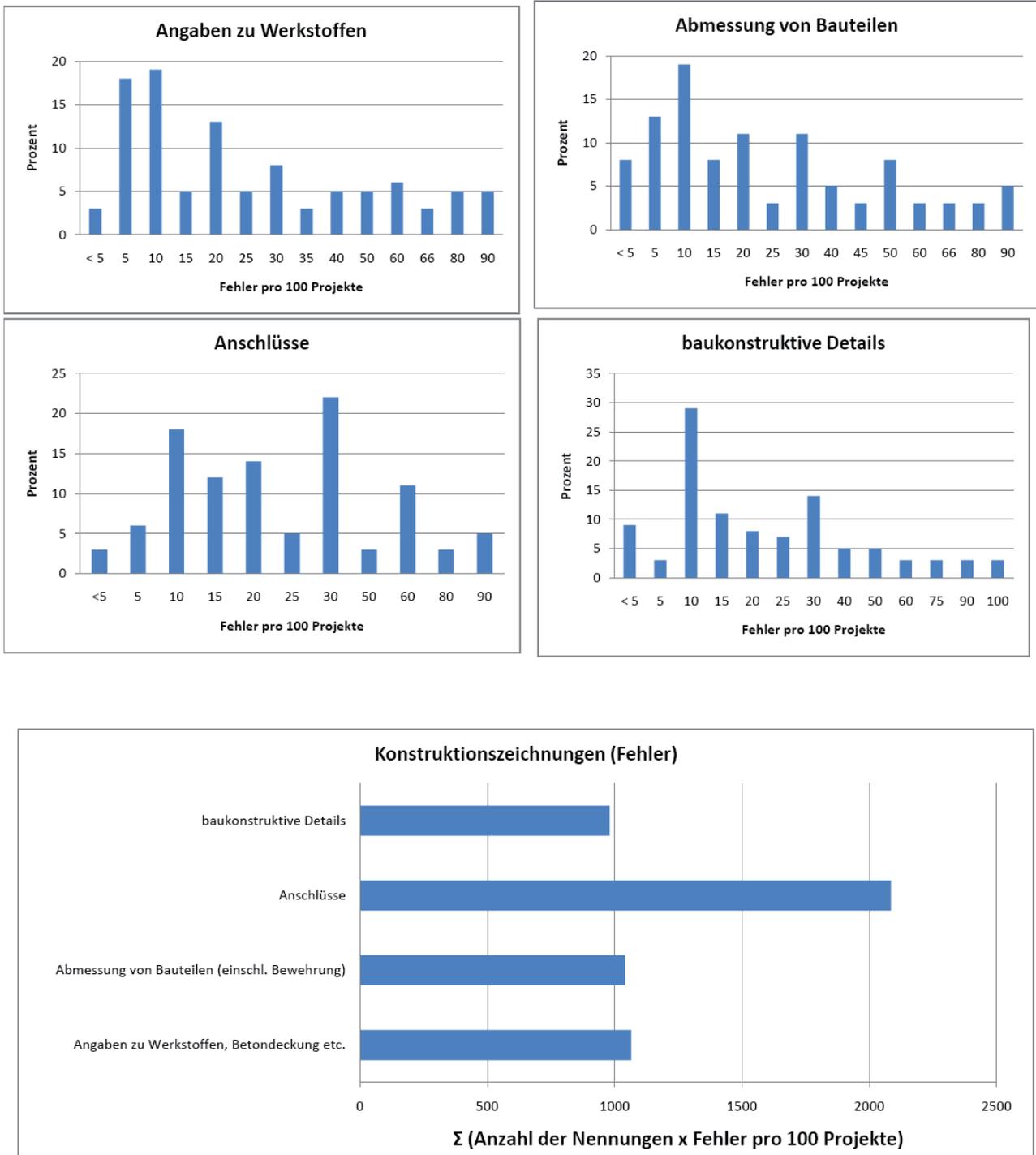


Abbildung A-8: Konstruktionszeichnungen – Fehler pro 100 Projekte, Fehlerarten im Vergleich

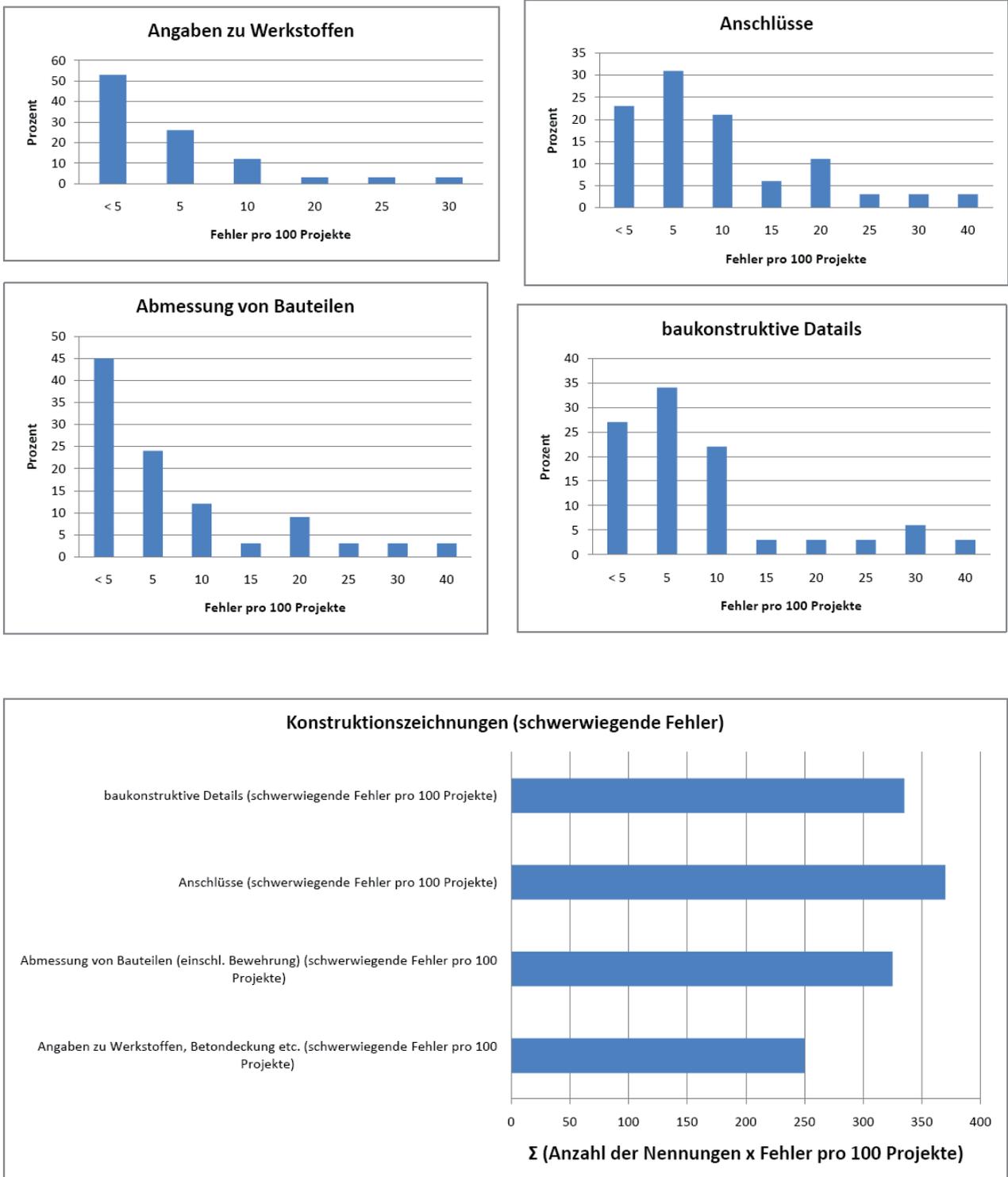


Abbildung A-9: Konstruktionszeichnungen – schwerwiegende Fehler pro 100 Projekte, Fehlerarten im Vergleich

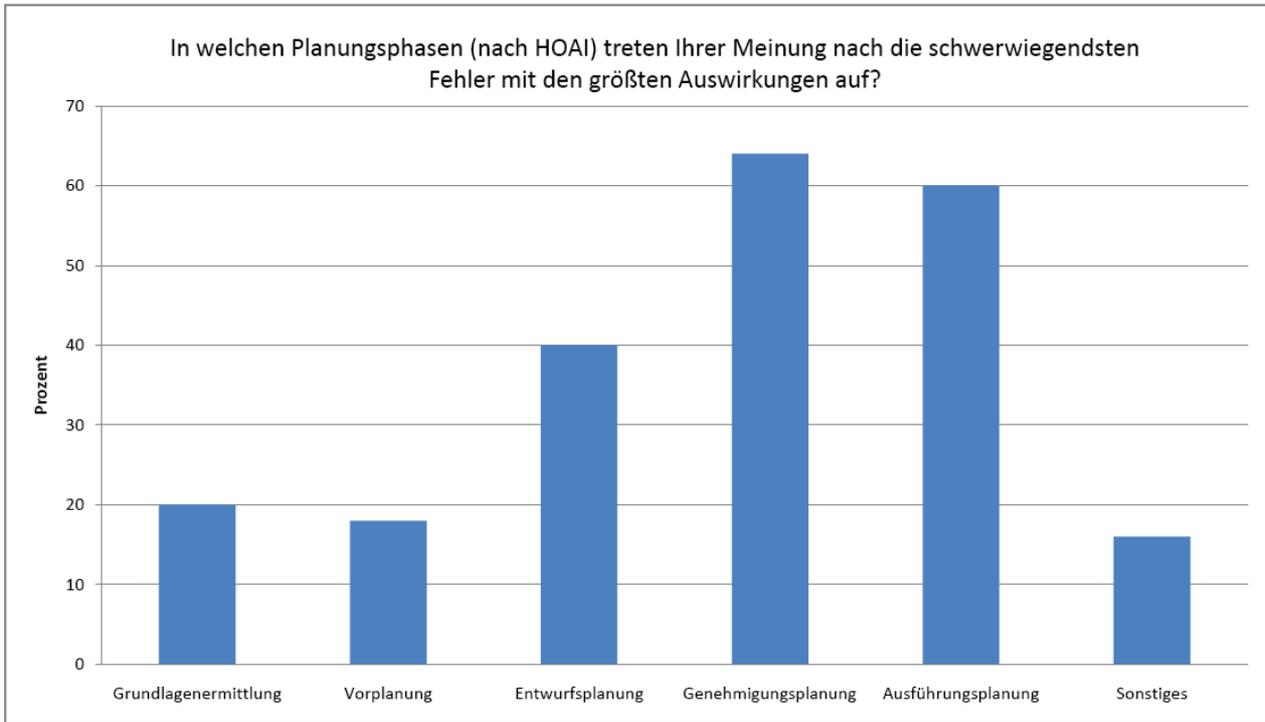


Abbildung A-10: Schwerwiegende Fehler nach Planungsphasen

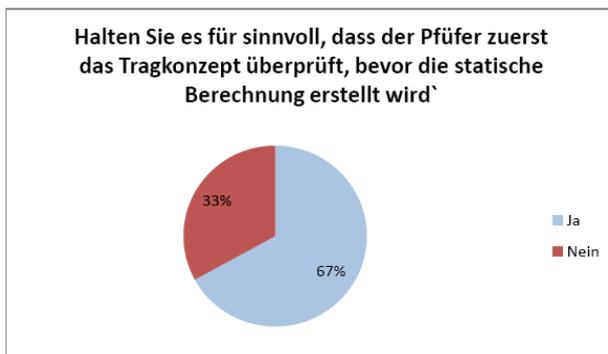
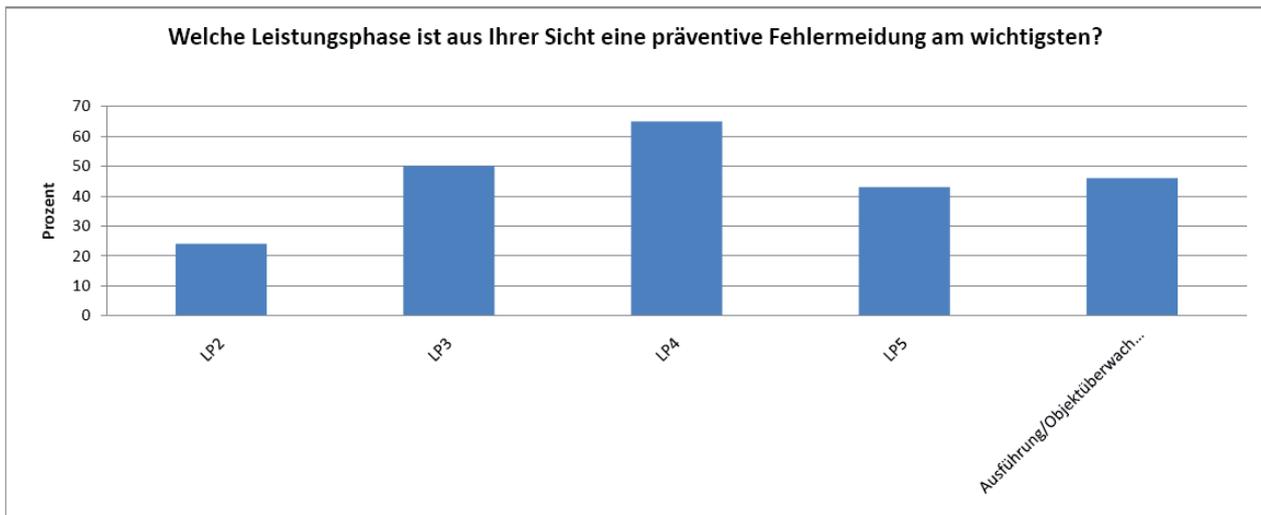


Abbildung A-11: Präventive Fehlervermeidung in unterschiedlichen Leistungsphasen

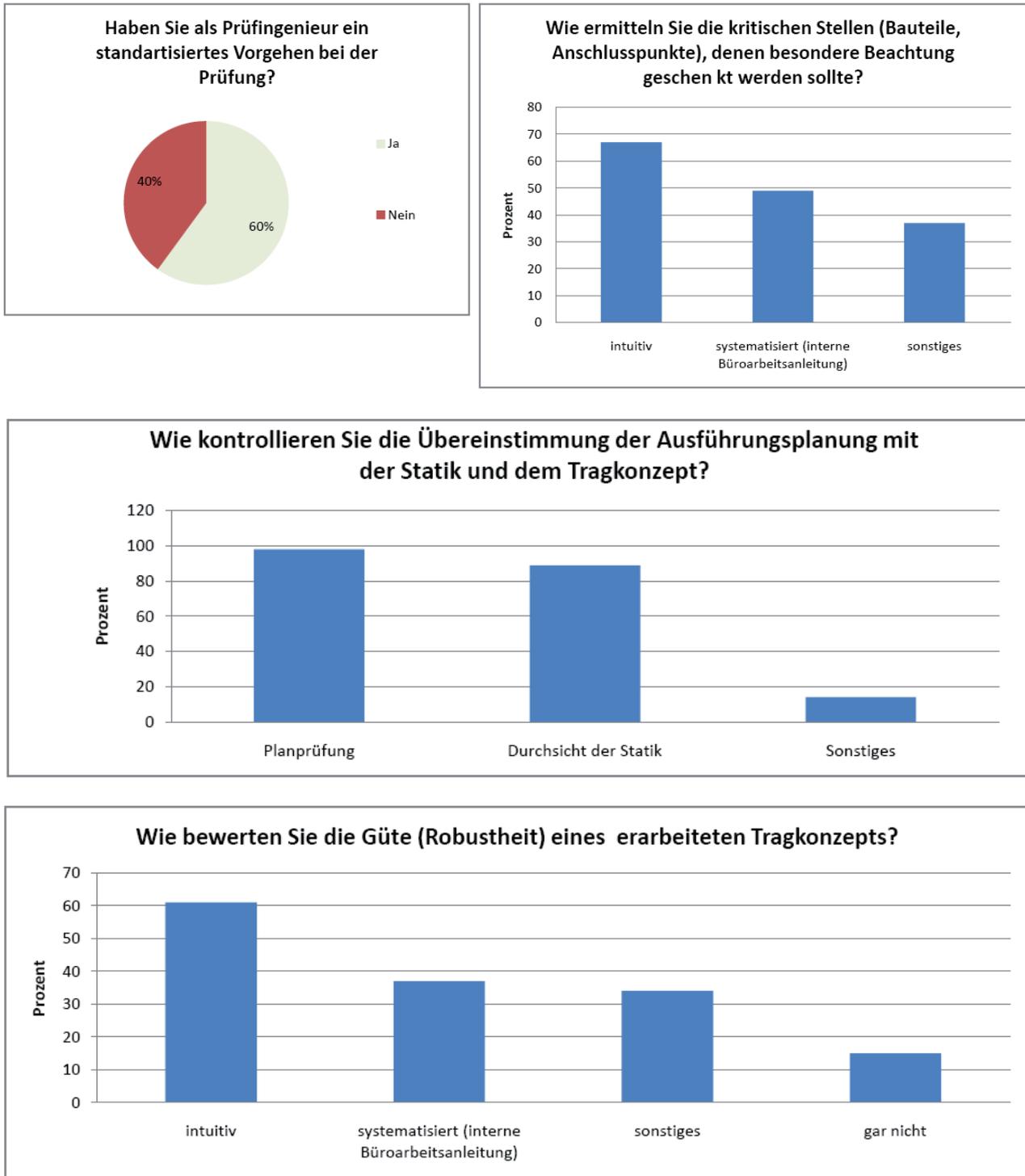


Abbildung A-12: Vorgehen bei der bautechnischen Prüfung

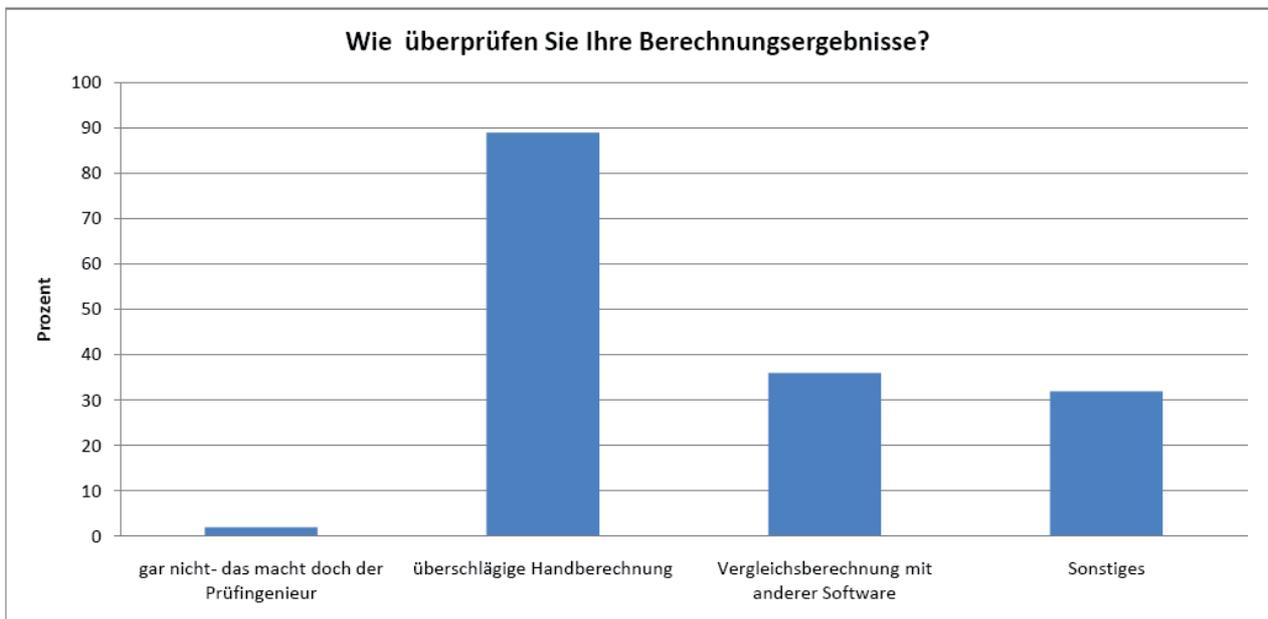
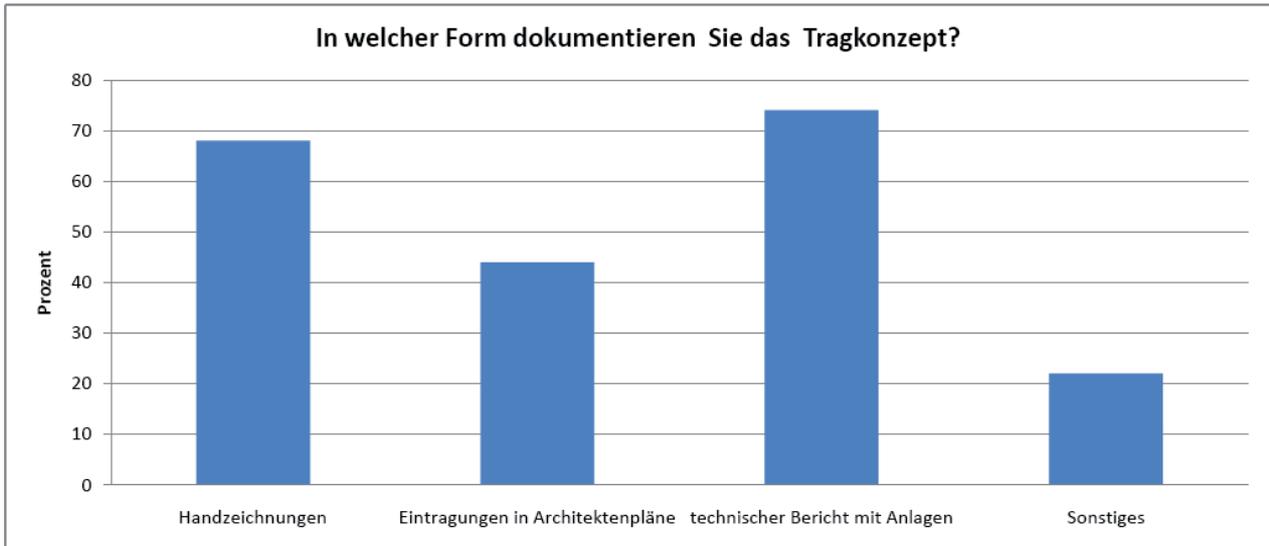


Abbildung A-13: Entwurf und Berechnung von Tragwerken – Dokumentation und Selbstkontrolle

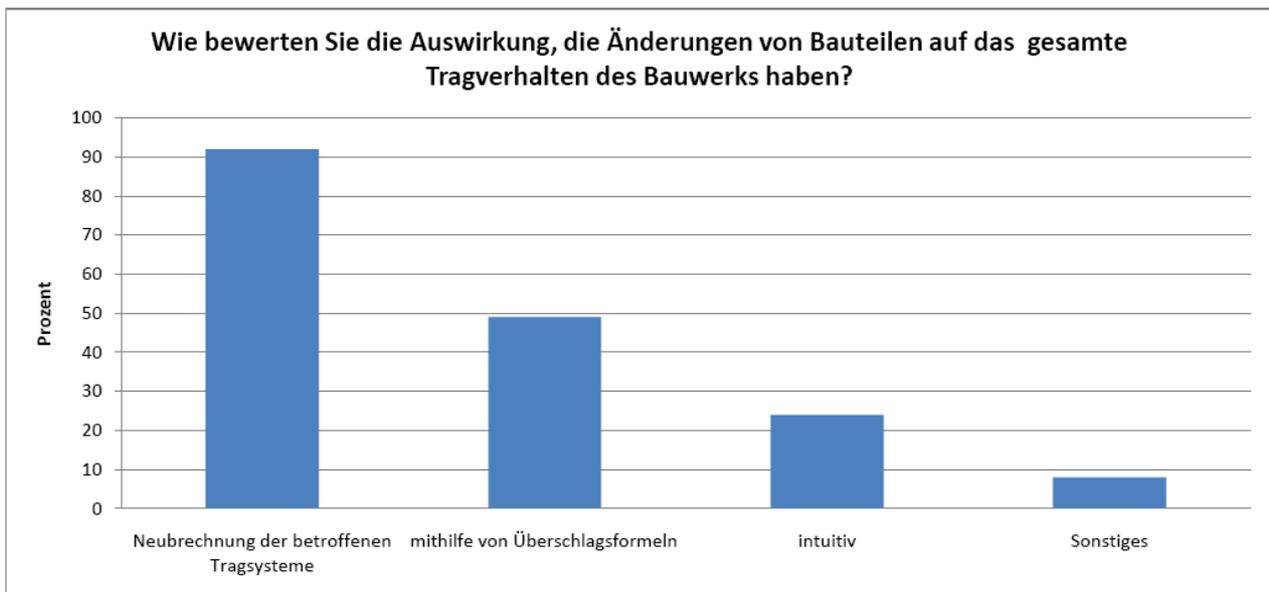
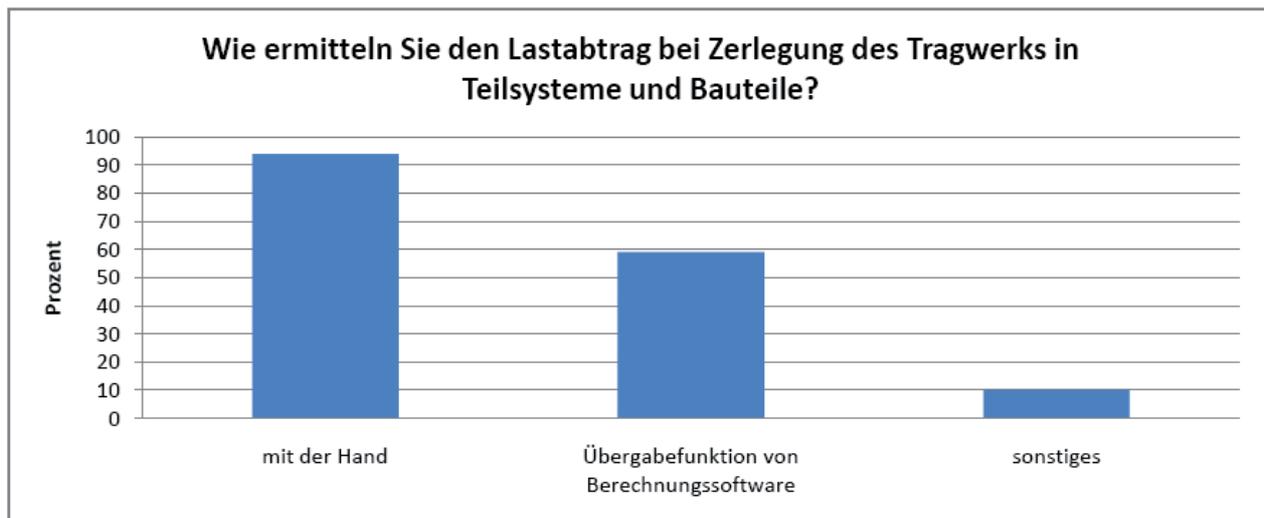
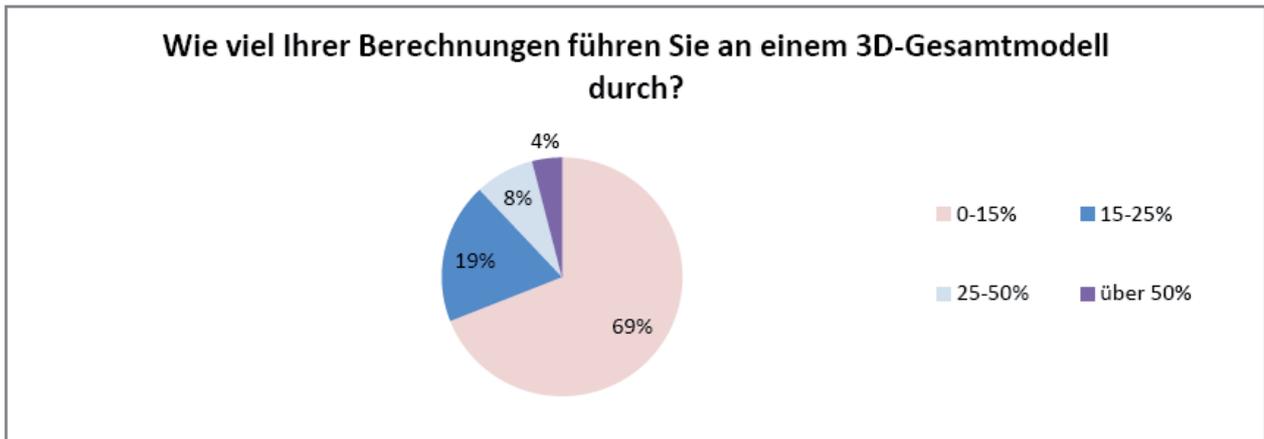


Abbildung A-14: Entwurf und Berechnung von Tragwerken – Lastabtrag

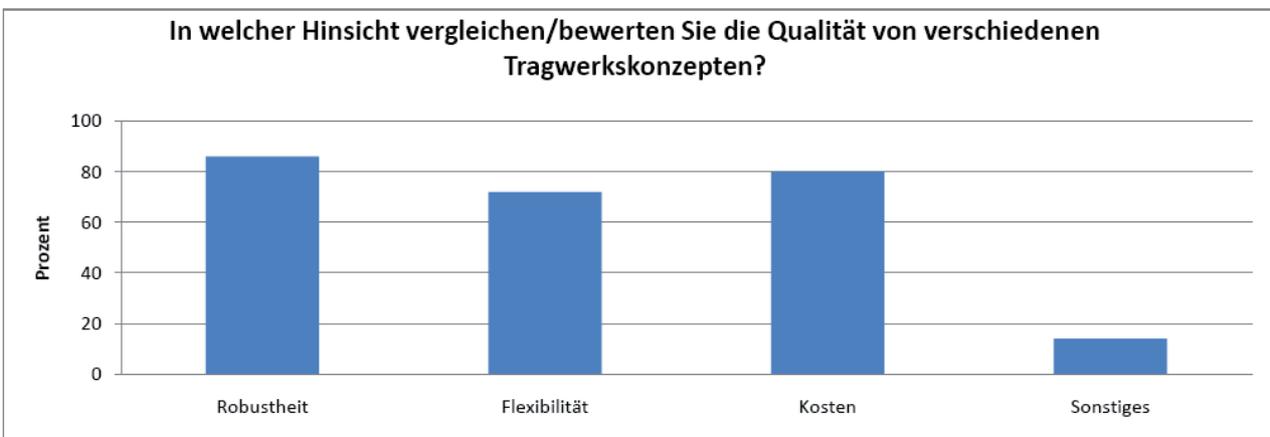
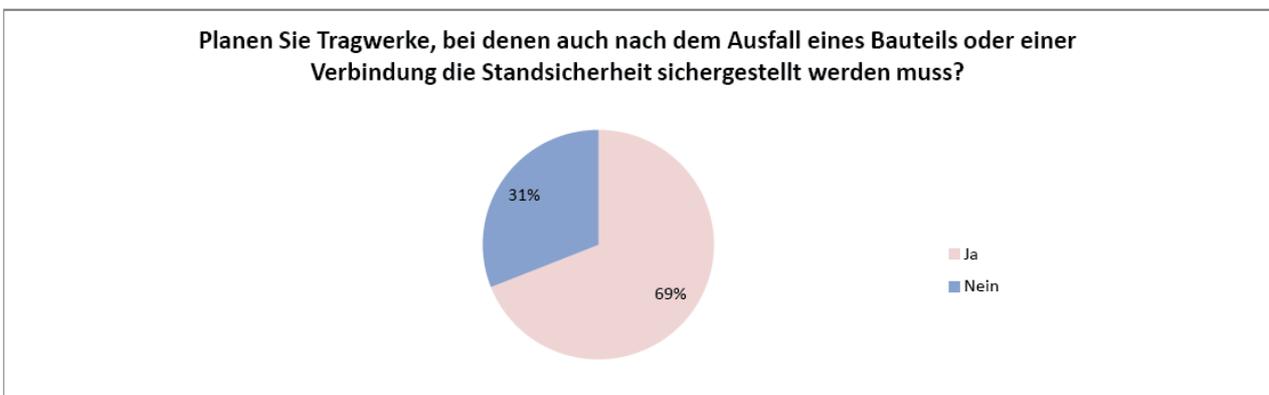
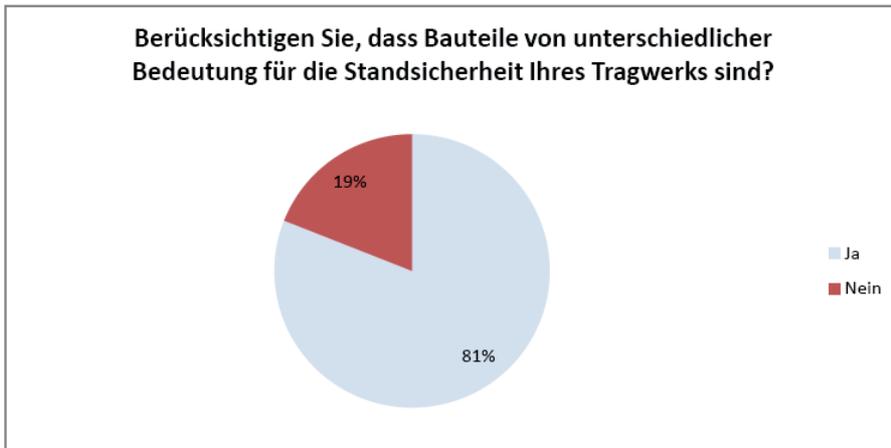


Abbildung A-15: Entwurf und Berechnung von Tragwerken – Bewertung von Tragwerkskonzepten

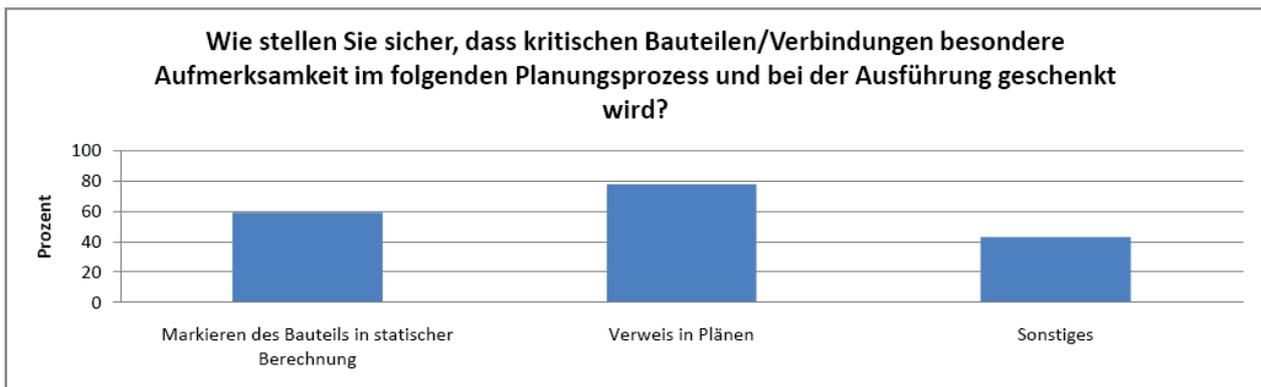
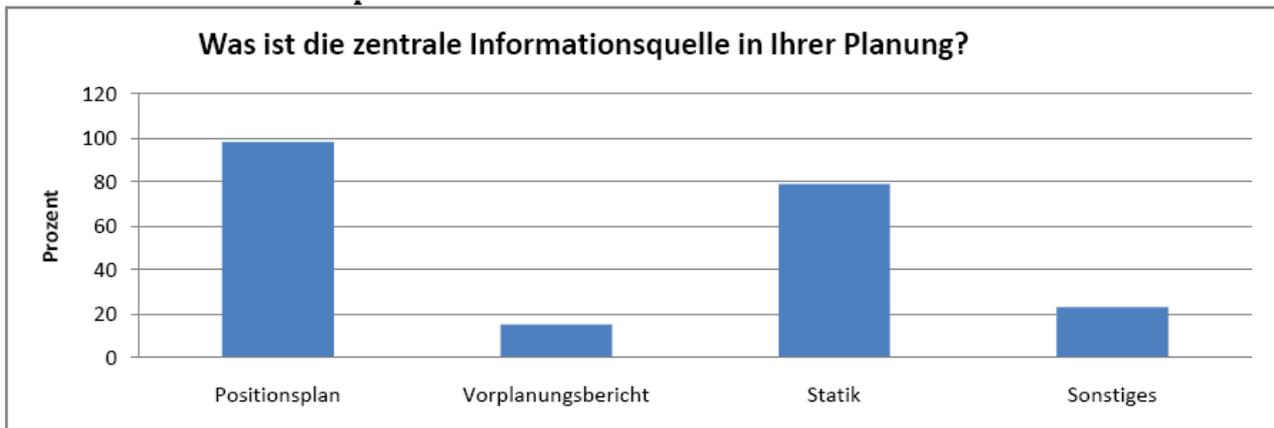
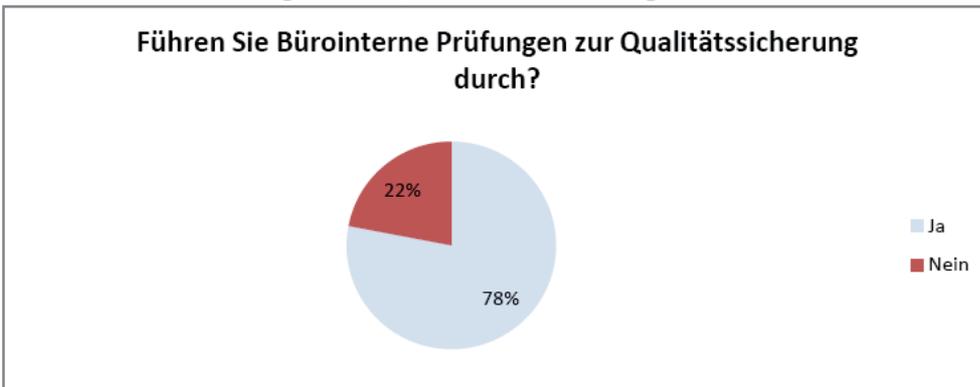


Abbildung A-16: Entwurf und Berechnung von Tragwerken – Dokumentation von Konzepten und Zwischenergebnissen



Haben Sie einen standartisierten Prozess zur Aufdeckung von Planungsfehlern in Ihrem Büro?

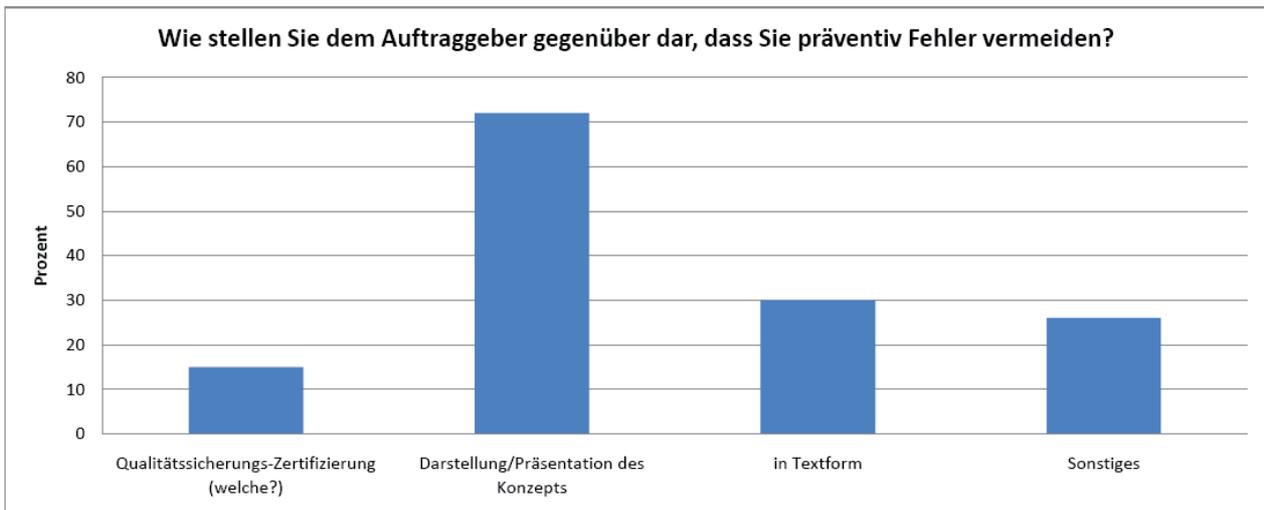
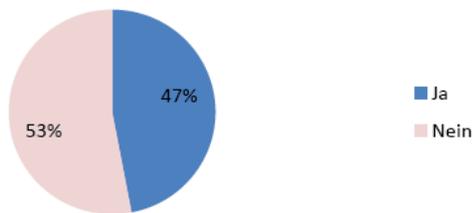


Abbildung A-17: Qualitätssicherung - Bürointerne Prüfung

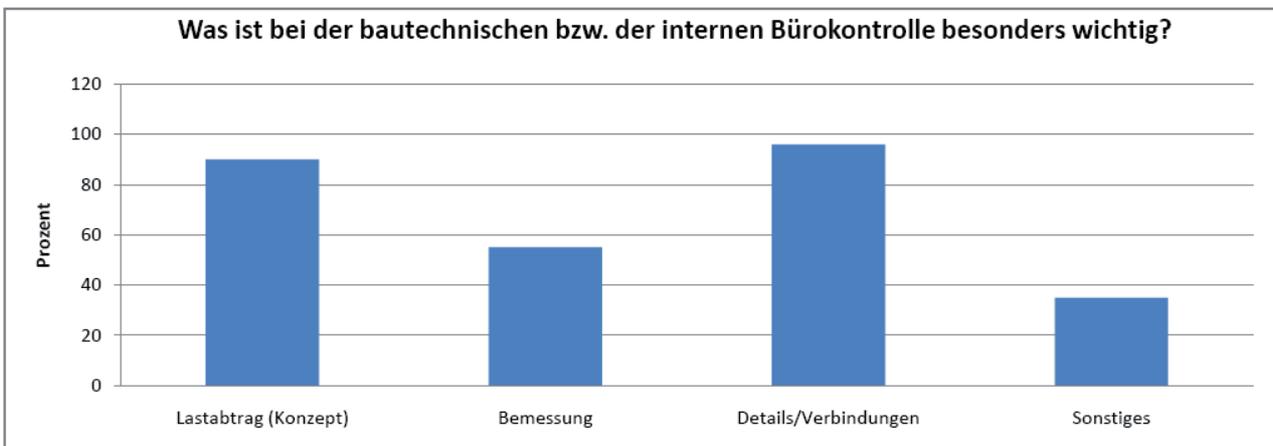
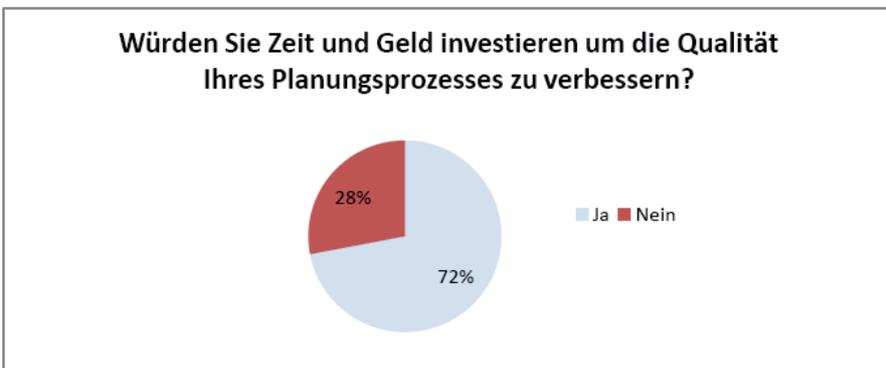
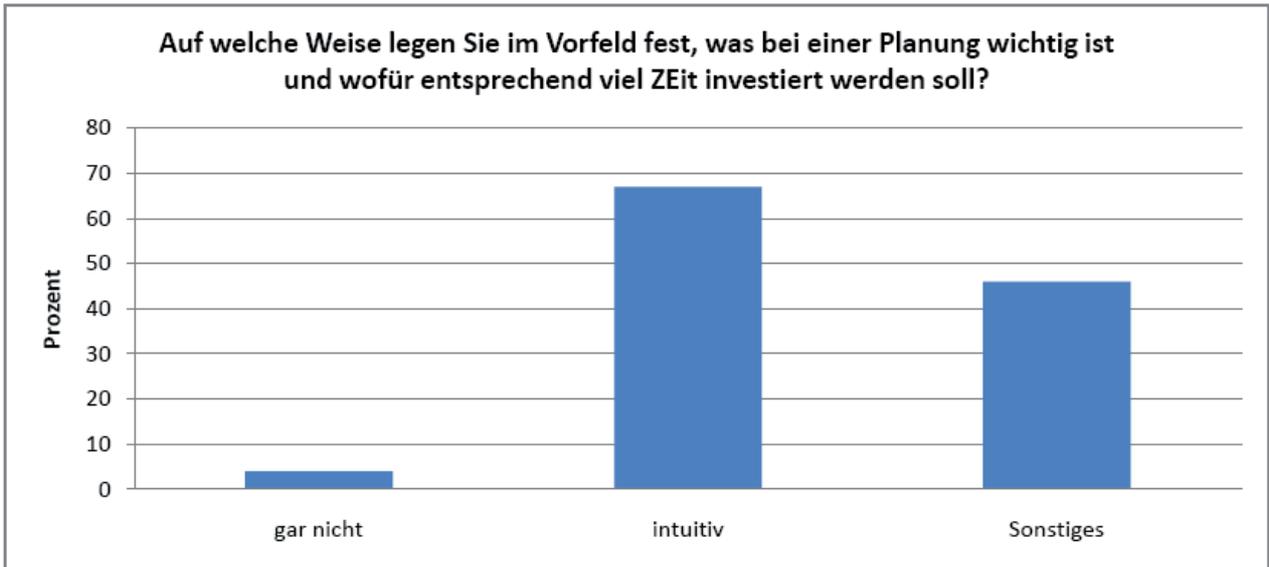


Abbildung A-18: Qualitätssicherung – Festlegung von Prioritäten

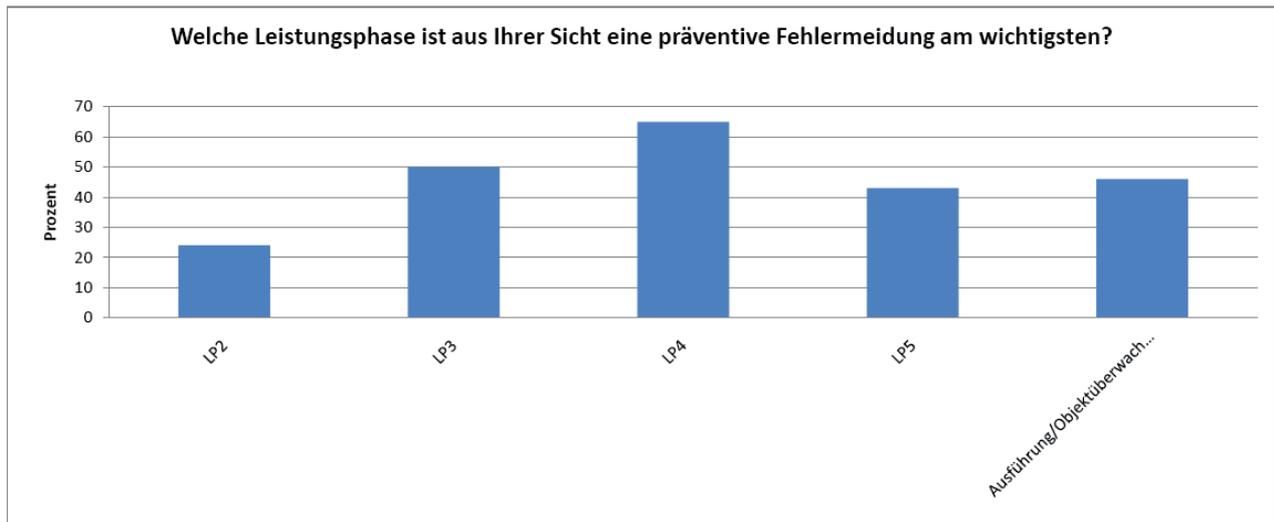
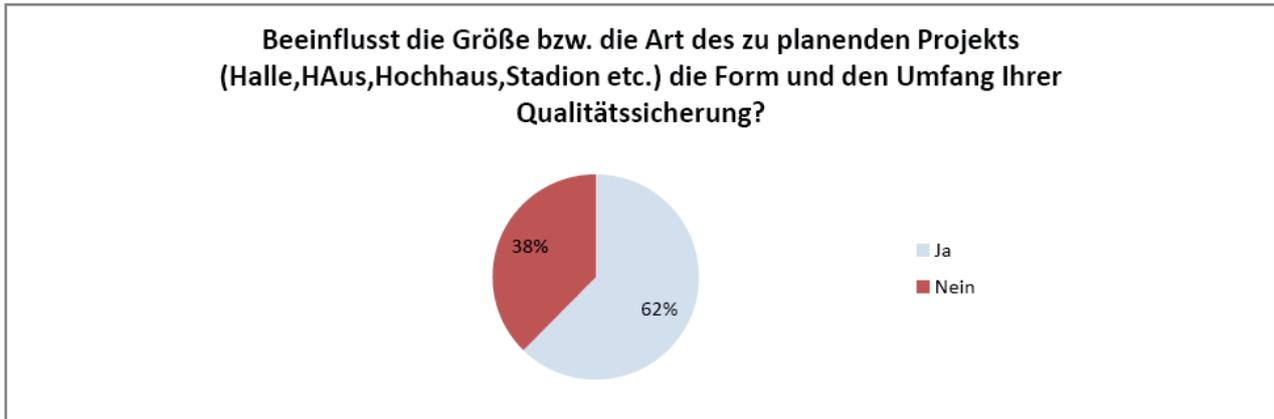


Abbildung A-18 (Fortsetzung): Qualitätssicherung – Festlegung von Prioritäten

3 Selbsttests

3.1 Vorbereitende Überlegungen zur Tragwerk-FMEA

Mit der Einführung der FMEA im Bauwesen soll die Qualität von Bauprojekten sichergestellt werden. Sie ergänzt das Sicherheitskonzept in den Normen dahingehend, dass sie mögliche Fehler im Tragkonzept, in der Berechnung, in der Anwendung von Programmen aber auch in der Anwendung der Normen und Richtlinien aufgreift und versucht, diese im Vorfeld zu vermeiden bzw. deren Auswirkungen auf spätere Leistungsphasen zu minimieren.

Die Anwendung der FMEA ist in verschiedenen Projektphasen sinnvoll [Ber04]. Die Tragwerk-FMEA für den Entwurf und die Bemessung nach der Leistungsphase 3 bettet sich in den üblichen Projektablauf ein. Der Aufsteller des Entwurfs entwickelt ein statisches Konzept und führt eine Vorbemessung durch. Danach erstellt der Ingenieur die Systembeschreibung, die die Tragstruktur mit allen Bauteilen und Anschlüssen, an der der globale Lastabtrag mit Hilfe von Pfeilen sichtbar wird, umfasst. Der Lastabtrag kann als Systemanalyse angesehen werden, da er die gerichtete Wirkbeziehung zwischen den Bauteilen und Tragsystemen repräsentiert.

Anschließend erfolgt eine Fehleranalyse- und Optimierungssitzung, in der der Aufsteller des Entwurfs das Projekt, sein statisches Konzept und die Vorbemessung vorstellt. An der Sitzung nehmen der Aufsteller des Tragkonzeptes, der Verantwortliche des Projekts, der Konstrukteur, der Prüflingenieur sowie andere am Projekt beteiligte Mitarbeiter oder Externe teil. Nachdem alle Sitzungsteilnehmer mit dem aktuellen Entwurf vertraut gemacht wurden, erfolgt die Fehleranalyse, bei der allen (bzw. den wesentlichen) Bauteilen und Anschlüssen die jeweiligen Fehlerarten zugeordnet werden. Diese werden in den Formblättern dokumentiert und die Fehlerfolgen mit ihrem Schweregrad in einer Diskussion unter den Teilnehmern abgeleitet.

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Bauteil / Anschluss									
Funktion									

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

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

Abbildung 1: Formblatt der Tragwerk-FMEA

Anschließend erfolgt eine Risikobewertung hinsichtlich der Standsicherheit, bei der die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache und die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache mit Bewertungszahlen zwischen 1 und 5 intuitiv bewertet werden. Das Gesamtrisiko eines jeden Fehlers entspricht der Risikoprioritätszahl (RPZ), die sich aus der Multiplikation der Bewertungszahlen ergibt.

$$RPZ = A * B * E$$

Die Größe des Maximalwertes der Risikoprioritätszahl hängt somit von der Höhe der Einzelfaktoren ab. Anders als im Maschinenbau kann für die Auftretenswahrscheinlichkeit nicht auf rechnerische oder durch Versuche abgeleitete Werte zurückgegriffen werden. Die Einschätzung 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 erfolgt durch Multiplikation der Zahlenwerte, also:

$$RPZ = B * A * E.$$

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. Die Bewertungszahlen werden ebenfalls in die Formblätter übernommen. Wichtig ist hierbei, dass nur die größte Bewertungszahl für die Bedeutung der einzelnen Fehlerfolgen zur Berechnung der Risikoprioritätszahlen verwendet wird. Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit wird jeweils unter Einbeziehung der festgelegten Maßnahmen für jede Fehlerursache definiert. So entstehen für jede Fehlerart mehrere RPZ. Durch eine Beschränkung des Wertebereiches auf 1 bis 5 ergibt sich somit eine maximale Risikoprioritätszahl von:

$$RPZ = A * B * E = 5 * 5 * 5 = 125.$$

Sie dient als Orientierungsgröße und zur Schwerpunktbildung (Rangfolge) der Fehlerrisiken. Eine Verbesserung der Situation ist vorrangig für solche Fehlerursachen vorzuschlagen, die eine hohe Prioritätszahl erhalten haben und/oder hohes Auftreten bzw. hohe Bedeutung haben. Die RPZ sollte aber nie alleiniges Entscheidungskriterium sein, sondern immer im Zusammenhang mit den Einzelbewertungen stehen. So sollten hohe Einzelbewertungen A oder B ≥ 4 immer vermieden werden.

Bei alleiniger Betrachtung der Risikoprioritätszahl würde man zuerst die erste Möglichkeit mit durchschnittlicher Einzelbewertung untersuchen und verbessern. Eine Bewertung der Bedeutung mit 5 Punkten „führt zum Betriebsausfall der nächsthöheren Ebene oder beeinträchtigt möglicherweise die Sicherheit und/oder die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften“ und ist somit nicht akzeptabel. Daher sollte die Risikoprioritätszahl immer in Verbindung mit der Bewertung der Schwere betrachtet werden.

Da die Bewertung der einzelnen Faktoren A, B und E, trotz des Versuches, einheitliche Beurteilungskriterien zu schaffen, von der subjektiven Einschätzung der Teammitglieder abhängig bleibt, sollte die Bewertung in einem Projekt immer von denselben Personen durchgeführt werden, um unterschiedliche Grundeinschätzungen zu vermeiden.

Außerdem sollten die Verbesserungsvorschläge immer erst dann diskutiert werden, wenn die Bewertung der Einzelfaktoren A, B und E für alle zu betrachtenden Bauteile abgeschlossen ist. Dies verhindert, dass die

FMEA-Sitzung durch Betrachtung vermeintlich „kleiner“ Fehler in die Länge gezogen wird, und für die Verbesserung der als riskant eingestuften Bauteile nicht genügend Zeit eingeräumt werden kann.

Bei Überschreitung einer festgelegten Grenze der RPZ müssen Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Dies können Maßnahmen zur Modifizierung des Tragkonzeptes oder auch zur Entdeckung des Fehlers bzw. der Fehlerursache in einer späteren Projektphase sein. Anschließend erfolgt eine Reduzierung der Bewertungszahlen entsprechend der gewählten Maßnahmen. Wenn die RPZ dennoch zu groß ist, muss die kritische Stelle im Tragkonzept verändert werden. Die Ergebnisse der Sitzung werden sorgfältig in den Formblättern dokumentiert und Verantwortliche für die Umsetzung der Maßnahmen bestimmt. Dabei sollten für die als riskant erachteten Bauteile Verbesserungsmaßnahmen erarbeitet und in die Systemstruktur übernommen werden. Durch eine erneute FMEA-Sitzung ist dann der Erfolg der Änderungen zu kontrollieren. Die Betrachtungstiefe ist von der Art der Verbesserungsmaßnahme und deren Auswirkungen auf das Gesamtsystem oder Teilsysteme abhängig und sollte für jeden Einzelfall neu definiert werden. Eine Erfolgskontrolle ist daher wichtig, da Änderungen, z. B. in der Systemstruktur, vorher nicht in Betracht gezogene, negative Auswirkungen auf andere Bereiche des Systems haben können.

Eine FMEA stellt somit einen iterativen Prozess da. Die Entscheidung, wie oft die FMEA-Sitzung wiederholt werden muss, ist zum einen davon abhängig, wie effektiv die erarbeiteten Verbesserungsmaßnahmen waren und zum anderen, welches Risiko der Verantwortliche, z. B. die Geschäftsleitung, als annehmbar erachtet.

Die alte Risikoanalyse darf nicht gelöscht werden, da sie als Datenbasis für spätere Projekte dienen soll und der Nachvollziehbarkeit der Arbeits- und Verbesserungsschritte dient. Zudem gilt die FMEA als Nachweis, dass eine kritische Auseinandersetzung mit dem jeweiligen Bauteil stattgefunden hat, und leistet somit einen Beitrag zum Qualitätsmanagement des Unternehmens.

Um die Anwendbarkeit der FMEA auf das Bauwesen zu prüfen und wichtige Erkenntnisse für eine sinnvolle Vorbereitung und Durchführung der Fallstudien an realen Projekten der Praxispartner im Forschungsprojekt zu gewinnen, wurde eine Tragwerk-FMEA an dem Anwendungsbeispiel "Bürohaus X" bei Eisfeld Ingenieure und WTM Engineers unabhängig voneinander durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Sitzungen werden im nächsten Abschnitt vorgestellt.

3.2 Beschreibung der Fallstudie „Bürohaus X“

Im Vorfeld der Sitzung bei „Eisfeld Ingenieure“ (Anhang A) wurden allen Beteiligten Sitzungsmappen zur Verfügung gestellt. Diese informierten die Teilnehmer über die FMEA im Allgemeinen, die Vorgehensweise, Ziele und Methodik des Verfahrens. Ebenso enthielt die Mappe ausführliche Informationen zu dem Bauwerk, das im Sinne der Tragwerks-FMEA untersucht werden sollte: eine genaue Beschreibung des Modells und des Lastabtrags, die verwendeten Baustoffe und sonstige Gegebenheiten des Bauwerks, die für die Teilnehmer von Bedeutung sein könnten.

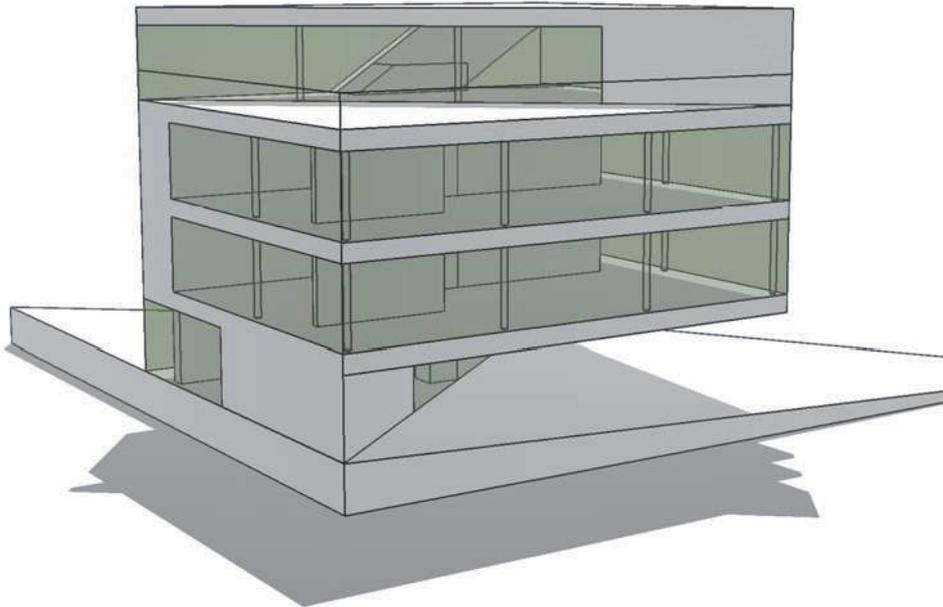


Abbildung 2: Bürohaus X

Das betrachtete Bauwerk ist ein viergeschossiges Bürogebäude aus Stahlbeton. Das Gebäude hat im Grundriss die Abmessungen 16 x 14 m. Jedes Geschoss hat die Höhe von 3 m, die Gesamte Höhe beträgt somit 12 m. Der Grundriss des 1. und 2. OG ist rechteckig, die von EG und DG sind rechtwinklige Dreiecke, die das halbe Flächeninhalt von den Regelgeschossen aufweisen. Das besondere an diesem Gebäude ist, dass die oberen drei Geschosse zur Hälfte in der Luft schweben, d.h. sie gehen über das Erdgeschoss hinaus und werden nicht gestützt. Daher wurde das Bauwerk als 3D-Modell berechnet (siehe Abbildung 3), um den komplexen Lastabtrag zwischen den Tragsystemen abzubilden.

Die Decken sind aus Stahlbeton C30/37 und BSt500 Bewehrung ausgeführt. Die Dicke der Decken beträgt 30 cm. Die frei hängenden Teile der Decke im 1 und 2 OG werden als Cobiaxdecken ausgeführt, was zum Gewichtsersparnis führt, wobei die Tragfähigkeit nicht maßgebend abgemindert ist. Alle Stützen und die Unterzüge werden als Verbundquerschnitte aus C40/50 und S235 ausgeführt. Die Wände sind aus Beton C30/37 in der Dicke $d = 30$ cm. Die Zugdiagonalen im DG sind als Seile ausgeführt. Die Unterzüge sind auch Verbundquerschnitte. Die Hauptstütze hat den Vollquerschnitt 100 x 100 cm.

Das Gebäude ist hauptsächlich durch innere und äußere Wände ausgesteift, die sich in den oberen Geschossen fast ausschließlich im Bereich des Treppenhauses befinden. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Hauptstütze, die sich in der Mitte des Gebäudes befindet und durch alle Geschosse durchgeht.

Im 3. OG sind folgende Elemente zur Aussteifung angesetzt worden: Außenwand, Stützen, Unterzüge. Als wesentlich, ist in diesem Geschoss das Fachwerk zu bezeichnen. Es besteht aus vertikalen Pendelstützen und den Zugdiagonalen, die als Seile ausgeführt werden. Dieses System ist von primärer Bedeutung für das Tragkonzept des Gebäudes. Vor allem ist die äußere Diagonale über dem abgehängtem Teil, und die Hauptstütze in der Mitte des Hauses sehr stark auf Normalkraft beansprucht. Dieses verhindert eine übermäßige Absenkung der Auskragung und leitet deren Last als Normalkraft in die Hauptstütze.

Im 1. Und 2. OG sind besonders die Vierendeelrahmen zu erwähnen. Die Rahmen gehen über zwei Geschosse und haben drei Felder. Sowohl die Riegel als auch die Stiele sind rechteckige Verbundquerschnitte, die biegesteif miteinander verbunden sind. Die Vierendeelrahmen dienen auch dem Abfangen des auskragenden Gebäudeteils. Im Gegensatz zum Fachwerk im obersten Geschoss trägt der Rahmen die Belastung nicht durch Normalkraft, sondern überwiegend durch Biegung ab. Die größten Momente entstehen in den Stützen im Bereich der Anschlüsse. Das Erdgeschoss wird durch Außenwände und die Hauptstütze aussteift.

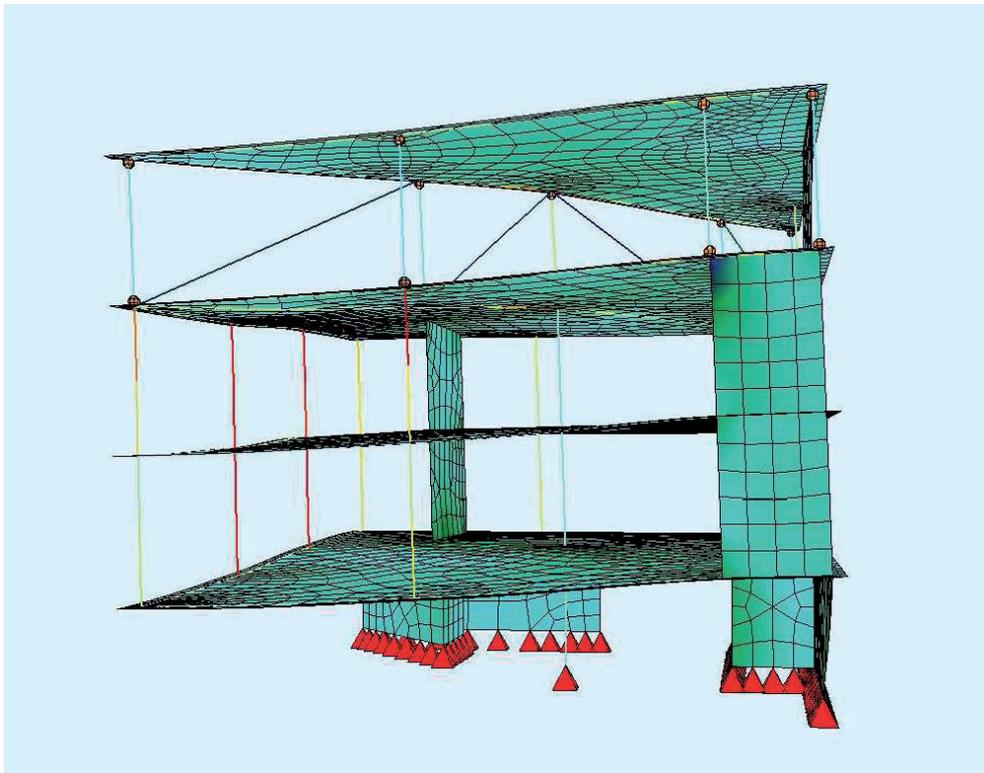


Abbildung 3: FE-Modell des Referenzbeispiels

Eine genauere Beschreibung des Tragwerks sowie des Modells (siehe auch [Tak09]) ist in im Anhang A zu finden.

3.3 Durchführung der Tragwerk-FMEA an dem Bürohaus X

An dem oben beschriebenen Musterbeispiel wurden unabhängige Sitzungen zur Tragwerks-FMEA durchgeführt. Eine Sitzung fand bei Eisfeld Ingenieure in Kassel, die andere bei WTM Engineers in Hamburg statt. Diese wurden im Rahmen von einer Projektarbeit [Vog09] und einer Diplomarbeit [Lie09] vorbereitet, durchgeführt und ausgewertet. Die wichtigsten Ergebnisse werden hier zusammengefasst und vorgestellt.

3.3.1 Eisfeld Ingenieure

An der FMEA-Analyse nahmen mehrere Personen teil. Jeder einzelne hat eine andere Sichtweise auf das Projekt, wodurch sichergestellt wurde, dass möglichst alle Planungsaspekte berücksichtigt werden und eine vollständige und korrekte Bewertung des Bauwerkes erfolgt. Es waren insgesamt sechs Personen an der Sitzung beteiligt: der Entwerfer des Konzeptes, der Projektleiter, der Prüf-Ingenieur, der Konstrukteur, der Aufsteller des FE-Modells und der Leiter der Sitzung. Im Anschluss an die Vorstellung des statischen Konzeptes anhand der Sitzungsmappe wurde mit der Diskussion begonnen.

Bauteil / Anschluss	Gründung / Einzelfundament unter Hauptstütze F0.2
Funktion	Aufnahme der Lasten aus dem Gebäude und Weiterleitung in den Boden

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Stärkere Setzung der Hauptstütze	1	große Setzung des Fundaments unter der Hauptstütze	falsche Bodenkennwerte zugrundegelegt		3	genauere Bodenuntersuchungen durchführen	2	18	Michael Eisfeld 10.07.2009
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	2		Fundament nicht ausreichend dimensioniert	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	1	6	Michael Eisfeld 10.07.2009
			Lasten aus Hauptstütze größer als erwartet	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	2	12	Michael Eisfeld 10.07.2009
Auflagerabsenkung für Fachwerk	1								
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-rahmen)	3								

Abbildung 4: Formblatt mit Auswertung für Einzelfundament unter Hauptstütze

Bei der Sitzung wurden zahlreiche Ergebnisse über das betrachtete Konzept erzielt, die sowohl die Stärken als auch die Schwächen des Tragkonzeptes verdeutlichten. Zur Beurteilung der Fehlerfolgen auf andere Bauteile wurde dafür der globale Lastabtrag wie im Anhang dargestellt benutzt. Es handelt sich beim Lastabtrag um einen Graphen, der die Belastungsbeziehungen zwischen Bauteilen, Systemen und selektiv

zwischen den Verbindungen darstellt. Als kritische Stellen des Konzeptes wurden die Bauteile und Anschlüsse wie in Tabelle 1 dargestellt eingestuft. Obwohl die Hauptstütze ein wesentlicher Bestandteil des

gesamten Tragkonzepts ist, wurde sie in der Sitzung als nicht besonders kritisch eingestuft, da sie durch ihre großen Abmessungen und die vergleichsweise geringe Auslastung nicht besonders risikobehaftet ist. Sie wurde dennoch in die Formblätter mit aufgenommen.

Ergebnisse der Sitzung vom 18.06.2009

kritische Stellen:	Fachwerk: Bauteile, Anschlüsse Vierendeelrahmen Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk Zugverankerung Fachwerk - Wand Hauptstütze		
Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart	Fehlernr.
Hauptstütze	S3.1 (S2.1, S1.1)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	01a 01b
Gründung / Einzelfundament	F0.2	große Setzung	02
Vierendeelrahmen-Stütze	(S.2.2, S.2.3, S2.4, S2.5, S2.7, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.7)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	03a 03b
Vierendeelrahmen-Riegel	(U1.1, U1.3, U2.1, U2.3, U3.1, U3.3)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	04a 04b
Fachwerk-Gurt	(U3.2, U4.2)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	05a 05b
Fachwerk-Stütze	(S4.1, S4.2, S4.3, S4.4, S4.5)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	06a 06b
Fachwerk-Diagonale	(X4.1, X4.2, X4.3, X4.4)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett	07a 07b
Anschluss Vierendeelrahmen: Riegel-Stütze	(A05)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	08a 08b 08c
Anschluss Vierendeelrahmen - Fachwerk	(A06)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	09a 09b 09c
Anschluss Fachwerk an zugbeanspruchte Wand	(A03)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	10a 10b 10c
Anschluss Fachwerk: Gurt- Stütze	(A04)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	11a 11b 11c
Anschluss Fachwerk: Diagonale- Gurt	(A02)	gibt nach (Verformungen) versagt komplett nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	12a 12b 12c

Abbildung 1: Kritische Bauteile und Anschlüsse

Die Funktionen und die möglichen Fehlerarten wurden besprochen und dokumentiert. Jedem Bauteil wurde eine Funktion zugeordnet und verschiedene Fehlerarten gefunden. Zur Vereinheitlichung wurden in der Nachbearbeitung folgende Definitionen getroffen: Für Bauteile erfolgt eine Einteilung in die Fehlerarten "gibt nach" (Verformungen) und "versagt komplett". Auf diese Weise soll die Betrachtung nicht nur auf ein vollständiges Versagen beschränkt, sondern auch auf mögliche Auswirkungen von Nachgiebigkeiten ausgeweitet werden. Die möglichen Fehlerarten der Anschlüsse werden noch um den Punkt "nicht ausführbar" (zu

hohe Lasten) ergänzt. Nachdem alle Sitzungsteilnehmer angehört und keine weiteren möglichen Fehler gefunden wurden, erfolgte für jeden Fehler die Definition der Fehlerfolgen und -ursachen. Hierfür wurde jeder Fehler auf ein eigenes Formblatt (siehe Anhang B) übertragen und die Ursachen und Folgen eingetragen. Für die Gründung wird die Fehlerart "große Setzung" betrachtet. Beispielhaft ist hier die Analyse für das Einzelfundament in der der Tabelle 2 dargestellt.

Bauteil / Anschluss	Hauptstütze S3.1 (S2.1, S1.1)								
Funktion	Aufnahme der Lasten aus Decken und Fachwerk und Weiterleitung in die Fundamente								

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	2	Hauptstütze gibt nach (Verformungen)	fehlerhafte Lastermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Lastannahmen sorgfältig dokumentieren und mit erfahrenem Kollegen durchsprechen	2	12	Uwe Wolf 30.06.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
Auflagerabsenkung für Fachwerk	1		fehlerhafte Schnittgrößen-ermittlung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung und allgemein auf Plausibilität prüfen	2	12	
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-rahmen)	3		fehlerhafte Bemessung	Zertifizierte Programme verwenden	2	Ergebnisse durch Handrechnung oder 2. Programm überschlägig prüfen	2	12	
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Abbildung 5: Formblatt mit Auswertung für Einzelfundament unter Hauptstütze

Beispielhaft ist für die im Anhang B zu findenden Beurteilungstabellen die Bewertung der Hauptstütze zu nennen (siehe Tabelle 3): Bei dem Fehler Hauptstütze gibt nach (Verformungen) wird die Bedeutung der Absenkung für die Decken mit "2" bewertet, da eine Umlagerung der Lasten auf benachbarte Bauteile möglich und von keiner starken Nachgiebigkeit der Hauptstütze auszugehen ist. Die Bedeutung für das Fachwerk ist minimal, da es statisch bestimmt gelagert ist. Die reduzierte Steifigkeit des Fachwerks als Gesamttrag-element hat die größte Auswirkung auf die Abhängung und wird mit "3" bewertet. Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten werden jeweils mit "2" bewertet.

3.3.2 WTM Engineers Hamburg

Bei WTM Engineers Hamburg wurde ebenso eine unabhängige Analyse des Tragwerks im Sinne der FMEA durchgeführt. Um die Übersicht zu verbessern, wurde ein Positionsplan erstellt, ebenso wie eine Gesamtübersicht über das Tragverhalten des Bauwerks mit den gegenseitigen Abhängigkeiten verschiedener Bauteile und Bauteilsysteme. Dadurch wurde eine nötige Übersicht über das Tragverhalten für die Analyse sichergestellt.

Die Ergebnisse dieser Sitzung werden hier ebenfalls kurz dargestellt und mit denen von Eisfeld Ingenieure darauffolgend verglichen, um ein methodisches Vorgehen abzuleiten. Für die kompletten Ergebnisse mit Formblättern wird auf Anhang C verwiesen. Die Funktionsanalyse bei WTM Engineers wurde auf ähnliche Weise mit dem Lastabtrag erstellt. Die Fehlerfolgen wurden jedoch durch eine nochmalige Berechnung des Tragwerks bestimmt, indem die erhöhte Ausnutzung der Bauteile infolge des Fehlers betrachtet wurde. Daraus resultierte eine erhöhte Aussagekraft der Ergebnisse, die allerdings mit einem erhöhten Zeitbedarf erkauft werden. Im Anhang C ist wieder die Liste der kritischen Elemente dargestellt.

Die Beurteilung der einzelnen Bauteile erfolgte wieder über die Formblätter. Die Untersuchung wird beispielhaft für die Wand (W1.3), die als nicht kritisch eingestuft wurde, und für die Diagonale X4.4, deren Ausfall für das Gesamttragverhalten für bedeutend erachtet wurde, erörtert.

Der Lastabtrag der Wandscheiben W2.3 und W3.3 inkl. ihrer Lasteinzugsbereiche aus den Decken über dem 1. und 2. Obergeschoss erfolgt zum größten Teil über die sich im Erdgeschoss befindende Wandscheibe W1.3, welche sich direkt unterhalb der beiden anderen Wände befindet. Ein Ausfall dieser Wandscheibe hätte vermutlich geringe Auswirkungen, da durch die zusätzliche Auflagerung von W2.3 auf die Wandscheiben W1.5 und W1.4 ein alternativer Lastpfad zur Verfügung steht.

Als ein entscheidendes und sehr kritisches Bauteil kann die Zugdiagonale X4.4, die ein Element des sich im Dachgeschoss befindenden Teilsystems Fachwerk FW1 bildet, angesehen werden. Fällt dieses Bauteil aus, verlieren die Vierendeelrahmen jeweils eines der beiden Auflager. Da für den Lastabtrag kein alternativer Lastpfad zur Verfügung steht, würde dies wohl zum Versagen des kompletten, auskragenden Teils des Systems führen.

Die Beurteilung der Robustheit des Tragwerks beschränkten sich bei den beiden o.g. Fällen auf die Untersuchung der Auswirkungen von Totalausfällen (System-FMEA) von Bauteilen aus den Teilsystemen FW1, VR1 und VR2. Besonders interessant erscheinen dabei Ausfälle der Stützen S2.5 und S3.5 als Eckstützen der Vierendeelrahmen, S3.4 als Mittelstütze des Teilsystems VR1, die Stütze S4.1 sowohl als Teil des Fachwerkträgers als auch der zentralen Stütze und der Zugdiagonale X4.4. Unter Berücksichtigung der Lastpfade wurden die Ausfälle der Bauteile in den Vierendeelrahmen nur für die jeweiligen Teilsysteme untersucht, da anzunehmen ist, dass der Ausfall der Eckstützen S2.5 und S3.5 auf den Fachwerkrahmen eher entlastend wirkt. Der Ausfall der Bauteile des Fachwerkträgers spielte für die Vierendeelrahmen hingegen eine entscheidende Rolle, da der Fachwerkträger als lastabtragendes Teilsystem für VR1 und VR2 diesen nachgeschaltet ist.

3.4 Erkenntnisse und Anforderungen für FMEA-Sitzung

Aus den gemachten Erfahrungen lässt sich ableiten, dass die Tragwerk-FMEA gut im Bauwesen im Bereich der Tragwerksplanung angewendet werden kann. Es sind allerdings einige wesentliche Dinge zu beachten (s. nachfolgende Stichpunkte), um ein erfolgreiche und zeiteffiziente Sitzung sicherzustellen. Hier sind zunächst Punkte, die bei der Sitzung gut funktioniert haben, zu nennen:

- Die Sitzungsmappe: Die Teilnehmer waren bei der Sitzung bereits gut mit dem Projekt vertraut und hatten sich schon einige Gedanken gemacht.
- Die Analyse: Während der Sitzung entwickelte sich eine lebhaft Diskussion, an der sich alle Teilnehmer beteiligten. Dadurch konnten viele kritische Stellen definiert und mögliche Fehler erkannt werden.
- Statisches Konzept: Eine mögliche Schwierigkeit in der Lagerung des Fachwerks konnte gleich erkannt und eine rechnerische Untersuchung beschlossen werden.

- Alle Sitzungsteilnehmer haben sich gut eingebracht. Nur so kann auf die Erfahrungen und das Wissen aller Bereiche zurückgegriffen, und ein Übersehen möglicher Fehler vermieden werden.

Andere Bereiche der Sitzung sind eher negativ aufgefallen:

- Diskussion: Manchmal war die Diskussion an einem Punkt festgefahren und wich etwas vom eigentlichen Thema ab. Dadurch ging Zeit für wichtige Punkte verloren.
- Definition: Die Definition der Fehlerfolgen war oft zu unpräzise. Als Folge wurde häufig genannt: "Gebäude stürzt ein", gefolgt von der Bewertungszahl "5".
- Fehlerursachen und Bewertung: Die Fehlerursachen wurden nur unzureichend betrachtet. Dadurch fiel auch die Bewertung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit häufig weg.

Unter Berücksichtigung dieser Aspekte lassen sich einige Punkte definieren, unter Berücksichtigung derer ein effizienteres und reibungsloses Verlaufe der Sitzung gefördert werden kann. Diese können dann, soweit es softwaretechnisch möglich ist unterstützt werden.

Es ist sehr wichtig, dass die Teilnehmer schon im Vorfeld der Sitzung einige Kenntnisse über das Bauwerk und die FMEA-Analyse haben, damit sich die Beteiligten auf die Besprechung vorbereiten können. Dadurch wird eine detailliertere und gründlichere Analyse sichergestellt. Eine präzise Führung durch eine erfahrenen Person hilft, die Diskussion in die richtige Richtung zu lenken und stellt die Einhaltung des vorgegebenen Zeitrahmens und der umfassenden Analyse der wichtigen Bauteile sicher. Die Zeiteinteilung ist ebenso von großer Bedeutung, da die Effizienz der FMEA-Analyse nur dann gewährleistet werden kann, wenn für die wichtigen Punkte des Tragwerkes genügend Zeit zur Diskussion eingeräumt wird. Ebenso wichtig ist es, dass zum Zeitpunkt der Sitzung eine Darstellung des globalen Lastabtrages vorhanden ist. Dies erleichtert die Propagierung der Fehlerfolgen durch das Bauwerk und sorgt für eine Veranschaulichung des Tragverhaltens bei der Definition der Fehlerursachen und -folgen. Eine gute Vorbereitung auf die Sitzung ist sehr wichtig. Den Sitzungsteilnehmern sollten schon im Vorfeld Informationen zu dem Projekt ausgehändigt werden, damit sie sich auf die Sitzung vorbereiten können.

Die Ergebnisse beider Sitzungen waren größtenteils übereinstimmend. Zwar wichen manche Bewertungszahlen voneinander ab, aber die qualitative Einschätzung der Robustheit des betrachteten Tragwerks ist zu äquivalenten Aussagen gekommen. Damit die Tragwerk-FMEA in der Praxis eingesetzt wird, muss ein verträglicher Zeitrahmen einhalten werden, wobei darunter die Qualität der Ergebnisse nicht leiden sollte. Dies ist nur durch eine softwaretechnische Unterstützung möglich, da die Ableitung des Lastabtrages - und sei es nur für einen Teil des Graphen - sowie die Verfolgung der Fehlerpropagierung sehr zeitaufwändig und teilweise per Hand nicht möglich sind. Diese Aussage ist durch die Analyse bei Eisfeld Ingenieure motiviert, da die Auswirkungen der Fehler schwierig differenziert eingeordnet werden konnten. Die Aussagen über die Fehlerfolgen waren weiterhin zu grob und konnten ohne explizite Neuberechnung des Systems nicht genau bestimmt werden, was als globale Fehlerfolge oft zur Aussage „Einsturz“ führte. Bei WTM Engineers hingegen wurden Neuberechnungen für die betrachteten Systemschwächungen durchgeführt. Dies führt zunächst zu genaueren Aussagen aber auch zu einem sehr hohen Zeitaufwand.

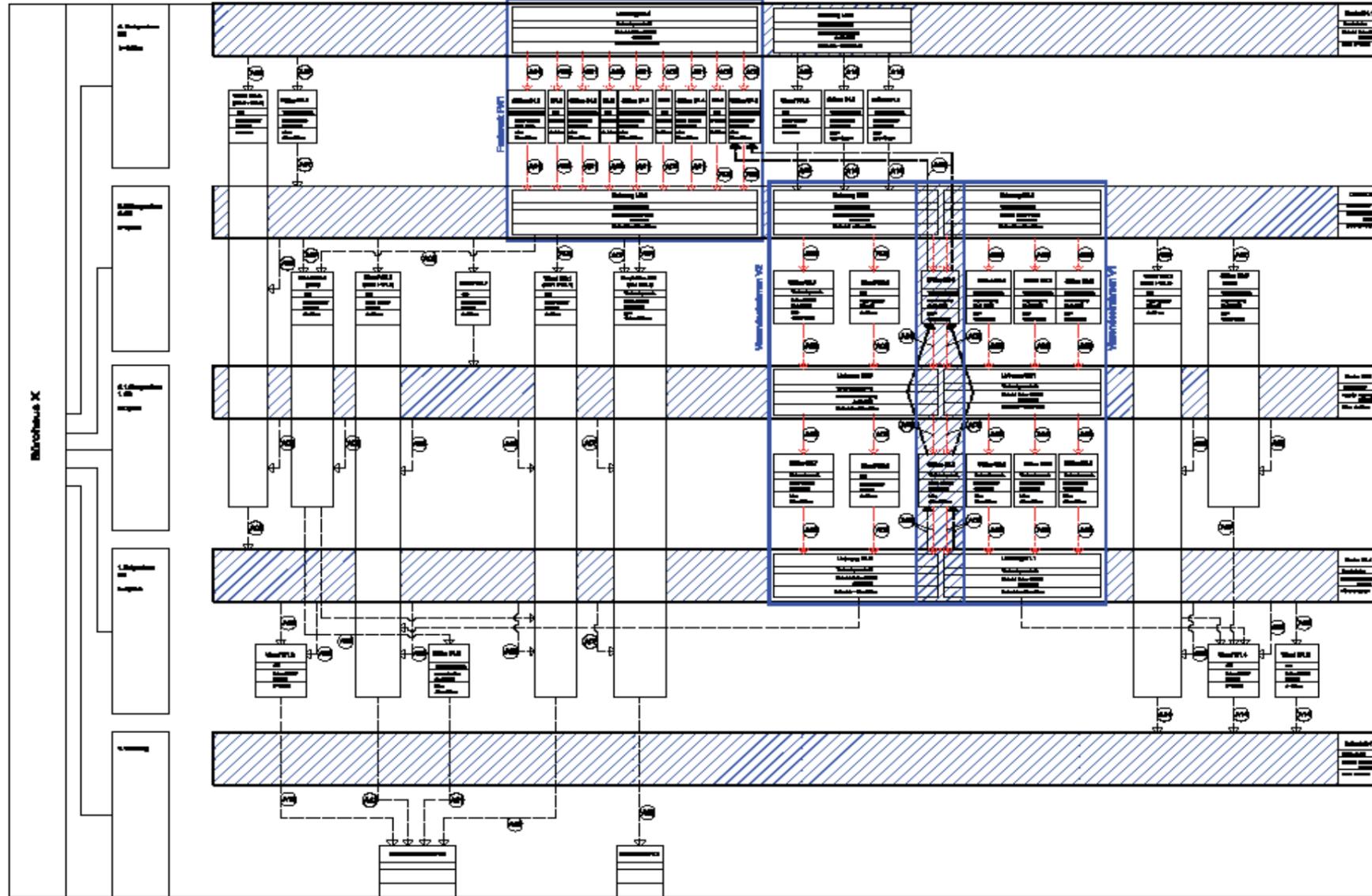
Das Ziel sollte daher wie im Deliverable 1 formuliert, eine Unterstützung des Ingenieurs und des Teams durch diverse Softwarewerkzeuge sein. Hier ist zusätzlich zu den genannten Werkzeugen die Entwicklung eines Moduls zu nennen, das soweit wie möglich automatisch die Fehlerfolgen durch ein qualitatives Verhaltensmodell aus den mechanischen Fehlerursachen für die kritischen Elemente ableitet. Die Spezifikation für dieses Modul zur Beurteilung der Robustheit wird im Deliverable 3 beschrieben, wobei auf Methoden der Einflussfunktionen und des qualitativen modellbasierten Schließens, wie sie in den Deliverables 4 und 5 beschrieben werden, zurückgegriffen wird.

Literaturverzeichnis

- [Ber04] Bertsche, B., Lechner, G. Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Springer Verlag, 2004
- [Lie09] Liening, D.: Beurteilung der Robustheit von Tragwerken mit Hilfe der modellbasierten Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Diplomarbeit im Fachbereich 3 Lehrgebiet Bau-mechanik und Baustatik der Hochschule Ostwestfalen-Lippe, 2009
- [Tak09] Takunov, B.: Sensitivitätsanalyse an dem FE-Modell eines Bürogebäudes. Diplomarbeit am Fachgebiet Baustatik im Fachbereich 14 der Universität Kassel, 2009
- [Vog09] Vogt, T.: Durchführung einer Tragwerk-FMEA für ein Bürogebäude und Erarbeitung von Fehlerkategorien. Projektarbeit am Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau im Fachbereich 14 der Universität Kassel, 2009

Anhang A

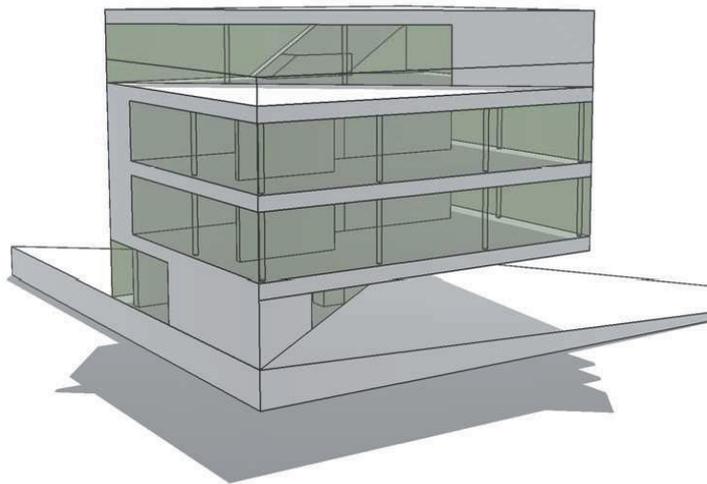
globaler Lastabtrag Bürohaus X



Anhang B – Sitzungsmappe

Einladung zu einer
Fehleranalyse- und Optimierungssitzung
im Rahmen des Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse – Projekts (FMEA-Projekt)
am 18.06.2009 um 13:00 Uhr in unserem Besprechungsraum.

Grundlage der Sitzung ist die Planung des Projekts „Bürohaus X“.



Informationen zur FMEA

Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) – was ist das?

Das Ziel einer FMEA ist es, potentielle Fehler frühzeitig zu erkennen, um diese schon im Vorfeld auszuschließen bzw. deren Folgen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Sie ist grundsätzlich als allgemeingültiges Konzept konstruiert, die eine Anwendung in vielen unterschiedlichen Bereichen ermöglicht.

Wofür wurde sie entwickelt und in welchen Bereichen findet sie heute Anwendung?

Entwickelt wurde die FMEA Anfang der 60er Jahre von der NASA, um eine Qualitätssicherung für die Apollo-Missionen zu gewährleisten. Nach dem Einsatz in der Luft- und Raumfahrtindustrie wurde sie 1977 erstmals auch in der Automobilindustrie, bei der Ford Motor Company, eingesetzt. Eine Norm existiert in Deutschland seit 1980. Insbesondere durch die Automobilindustrie findet eine stetige Weiterentwicklung statt. Mittlerweile wird sie vermehrt auch in der Dienstleistung und im Projektmanagement angewendet.

FMEA im Bauwesen: wo und wie wendet man sie an?

Neben einigen anderen Bereichen die später folgen, soll im ersten Schritt eine System-FMEA für den Entwurf und die Bemessung (Planungsphase) entwickelt werden. Sie wird nach dem Erstellen des statischen Konzepts angewendet (nach den HOAI-Leistungsphasen 2 und 3, vor LP 4). Der Schwerpunkt liegt auf der Sicherstellung der Standsicherheit.

Welches Ziel wird damit verfolgt?

Mit der Einführung der FMEA im Bauwesen soll die Qualität bei Bauprojekten sichergestellt werden. Viele erfahrene Ingenieure haben im Laufe Ihres Arbeitslebens ein intuitives Verständnis für Tragwerke und wesentliche, kritische Stellen entwickelt, das sich oftmals nur schwer erklären und in Worte fassen lässt. Die FMEA bietet eine Plattform, auf der auch insbesondere diese Erfahrungen genutzt werden können.

Konkret sollen mögliche Fehler in der Planung bereits vor Baubeginn erkannt und behoben werden. Auch für evtl. erst später erkannte bzw. erkennbare Fehler sollen mögliche Maßnahmen entwickelt werden um deren Auswirkungen zu minimieren.

Wer ist an diesem Projekt beteiligt und von wem wird es gefördert?

Beteiligt an dem Forschungsprojekt „Tragwerk-FMEA zur präventiven Fehlervermeidung“ sind wir (die Eisfeld Ingenieure), gemeinsam mit den Ingenieurbüros WTM Engineers Hamburg und Werner Sobek Frankfurt für die Praxis sowie die Uni Kassel und die TU München für die Forschung. Das Projekt läuft über 21 Monate mit 65 Mannmonaten und hat im Januar 2009 begonnen, es wird unter anderem vom bvpi (Bundesvereinigung der Prüferingenieure) gefördert.

Was erwarten wir uns von einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung?

Diese Sitzungen haben sich bereits stark bewährt und bilden den eigentlichen Kern des Systems. Hier wird das Projekt einem bereichsübergreifend zusammengesetzten Team vorgestellt und ausführlich erörtert. Somit kann ein Einbringen aller Erfahrungen und allen Wissens aus den verschiedenen an der Produktentstehung beteiligten Abteilungen/Bereichen sichergestellt werden. Bei einseitig zusammengestellten Teams haben sich in der Praxis z.Tl. erhebliche Mängel gezeigt, da häufig nur aus einer eingeschränkten Sichtweise heraus gedacht und wichtige kritische Punkte übersehen wurden.

In dieser Sitzung soll das Tragkonzept des Gebäudes vorgestellt werden. Im Anschluss daran folgt eine Diskussion aller Beteiligten über mögliche Fehler in der Planung. Diese werden dokumentiert. Es erfolgt die Bewertung aller aufgezeigten möglichen Fehler hinsichtlich der Auftretenswahrscheinlichkeit, Bedeutung (Auswirkung) und der Entdeckungswahrscheinlichkeit.

Die Sitzung dauert ca. 2 Stunden.

Wer ist an dieser Sitzung beteiligt?

Uwe Wolf	aus Sicht des Aufstellers
Michael Eisfeld	aus Sicht des Verantwortlichen
Wolfgang Eisfeld	aus Sicht des Prüfers
Yousef Salamah	aus Sicht des Konstrukteurs
Borys Takunov	Berechnung des FE-Modells
Tobias Vogt	Organisation und Vorbereitung der Sitzung

Vorstellung des Projekts „Bürohaus X“

1.1 Beschreibung

Geschossanzahl: 4

Material: Stahlbeton, Verbundbauweise (Stützen, Unterzüge), Stahlseile (Diagonalen Fachwerk)

Geschosshöhe: 3 m (Gesamthöhe 12 m)

Grundrissform: Erd- und Dachgeschoss dreiecksförmig, 1. und 2. Obergeschoss rechteckig

Besonderheit: Auskragung der oberen Geschosse über Erdgeschoss (ohne Abstützung)

Decken: Dicke = 30 cm, im Bereich der Auskragung Cobiaxdecken

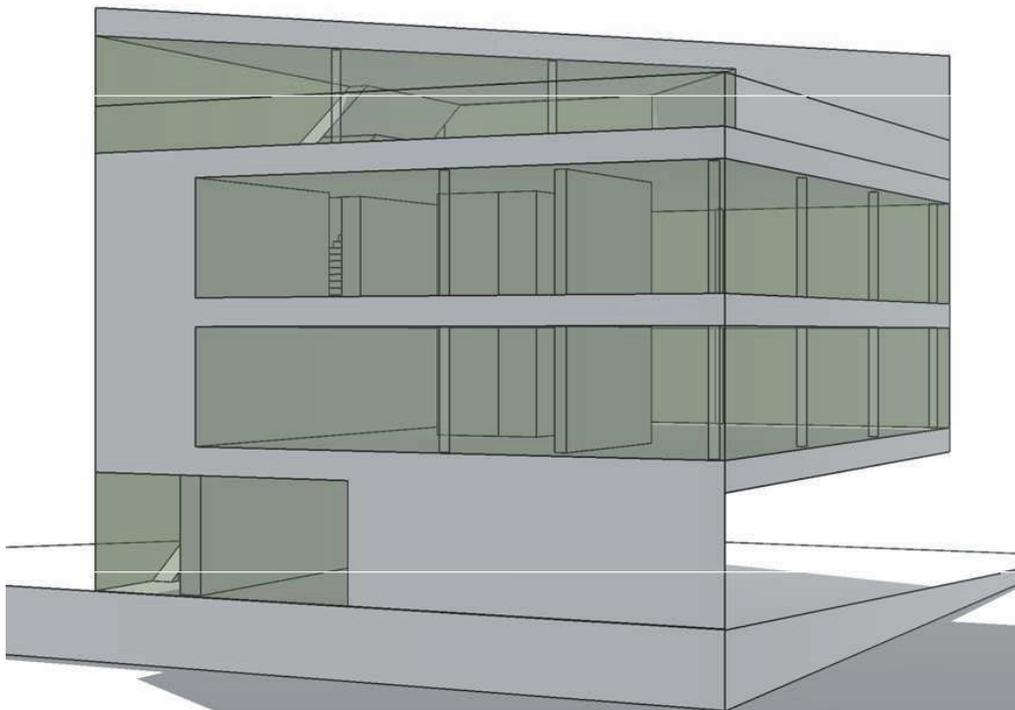
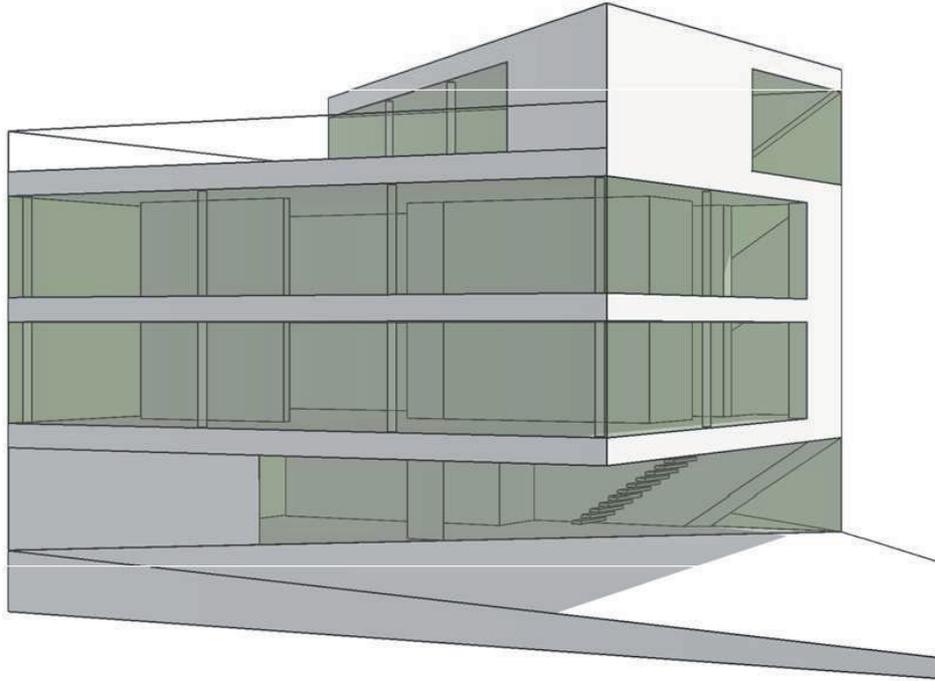
1.2 Statisches Konzept und globaler Lastabtrag

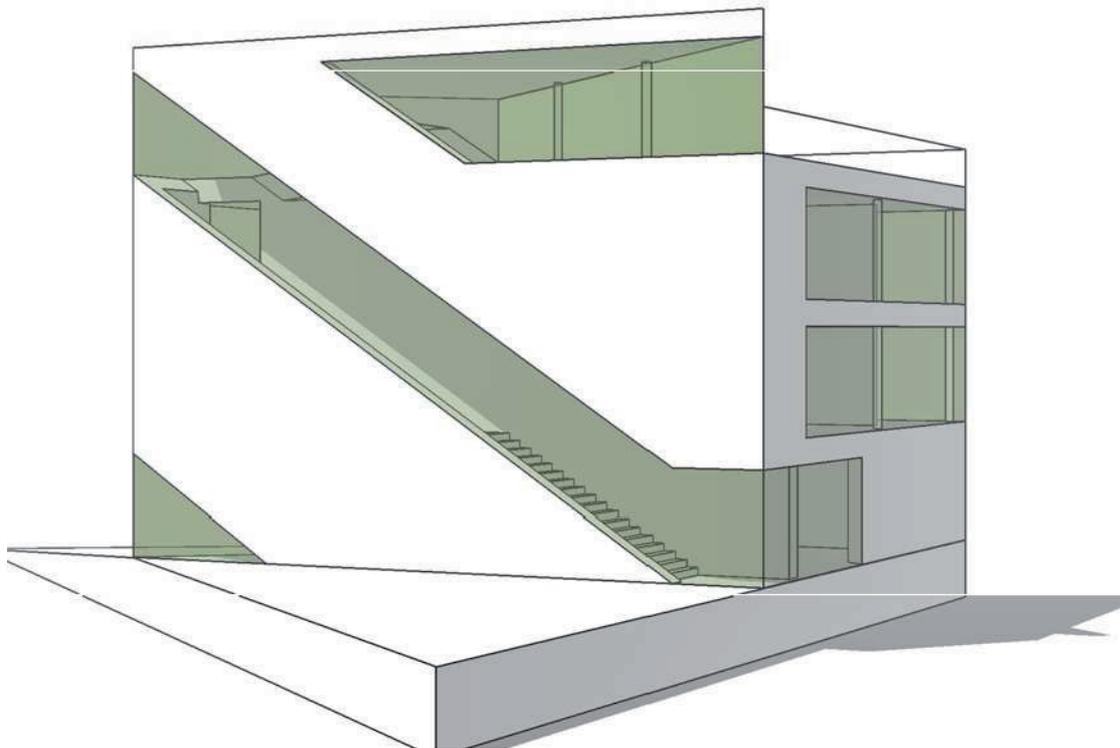
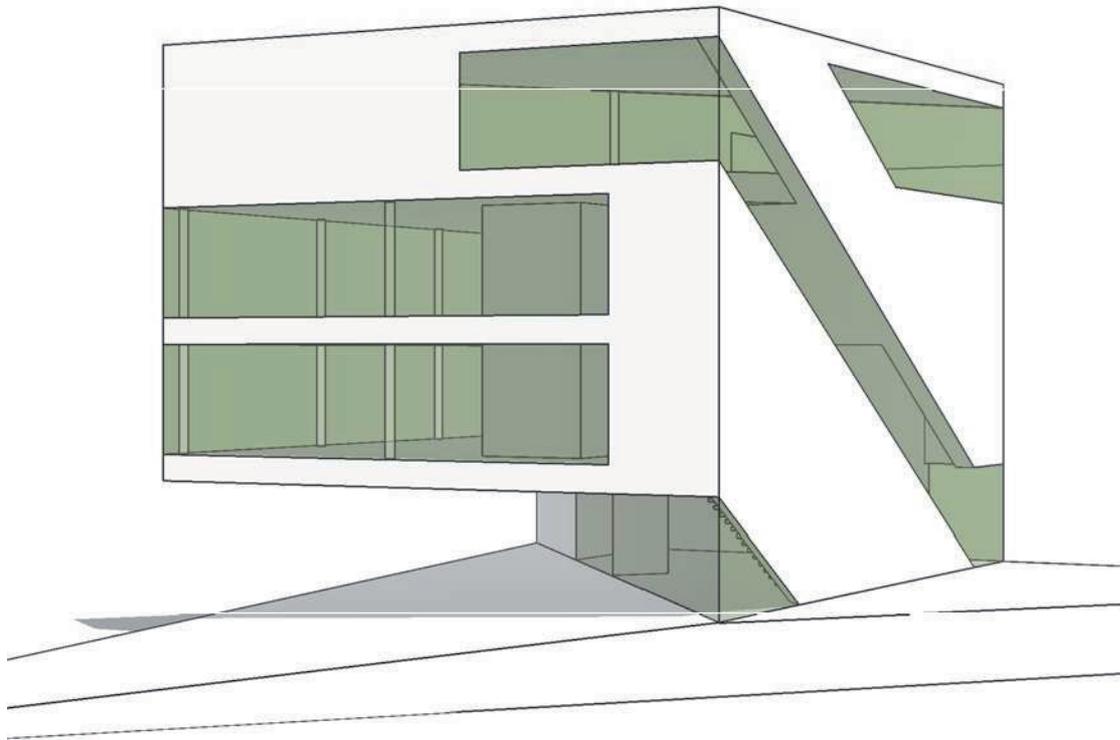
Aussteifung: innere und äußere Wände, vorwiegend im Bereich der Treppe (s. Grundrisse)

Vertikale Lasten: Aufnahme durch (Dach-)decken, Abtragung über Stützen und Wände in Fundamente

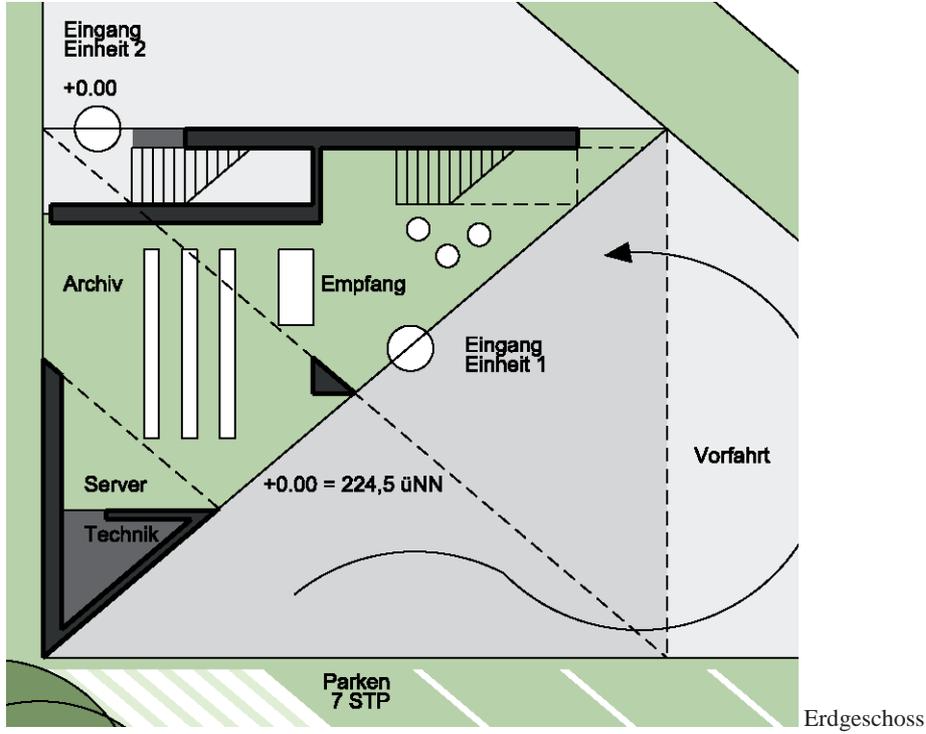
Auskragung: Aufnahme durch Vierendeelrahmen, Abtragung durch Fachwerk (s. Bauteilzeichnungen)

Ansichten

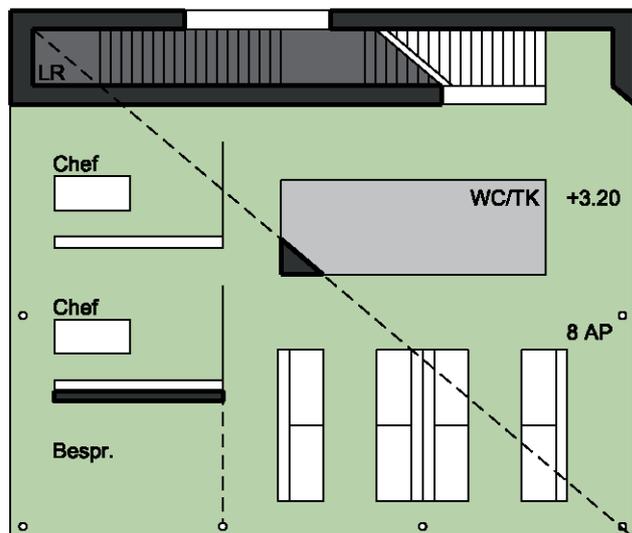




Grundrisse und Schnitt

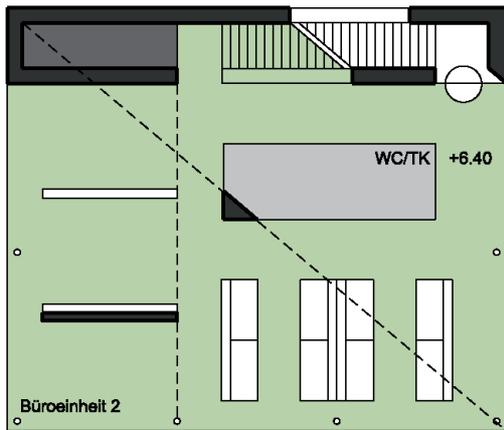


Erdgeschoss



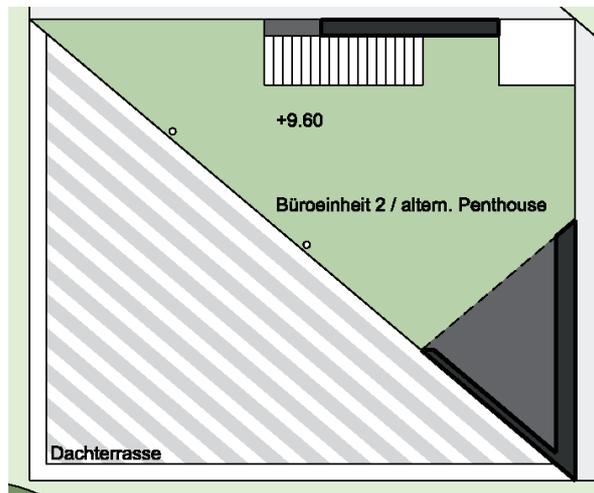
Obergeschoss E1
BGF = 211 qm

1. Obergeschoss

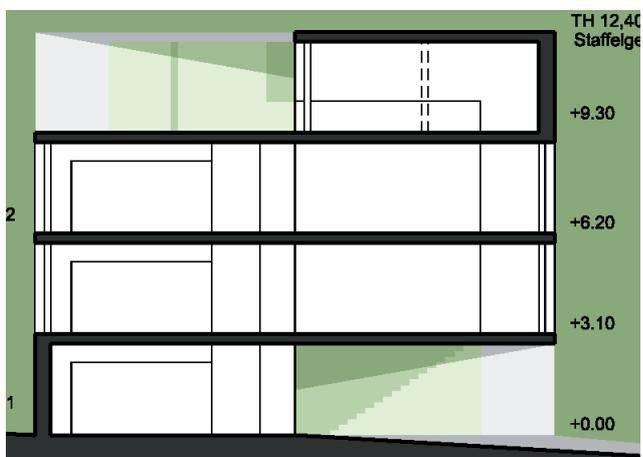


Obergeschoss E2
BGF = 228 qm

2. Obergeschoss

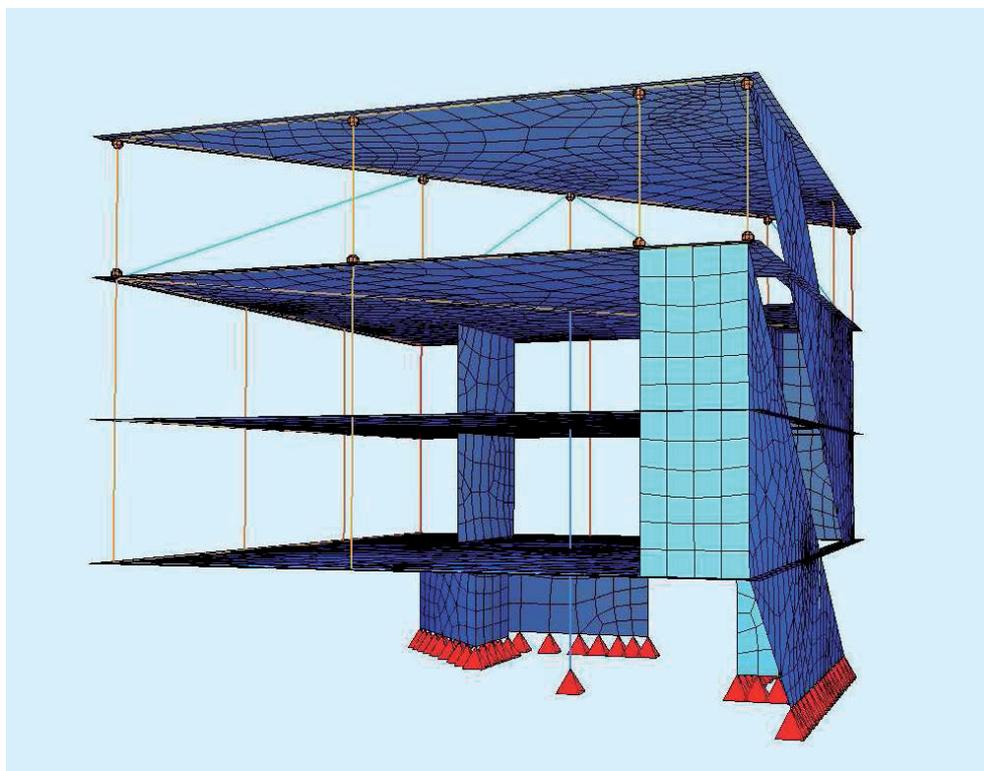
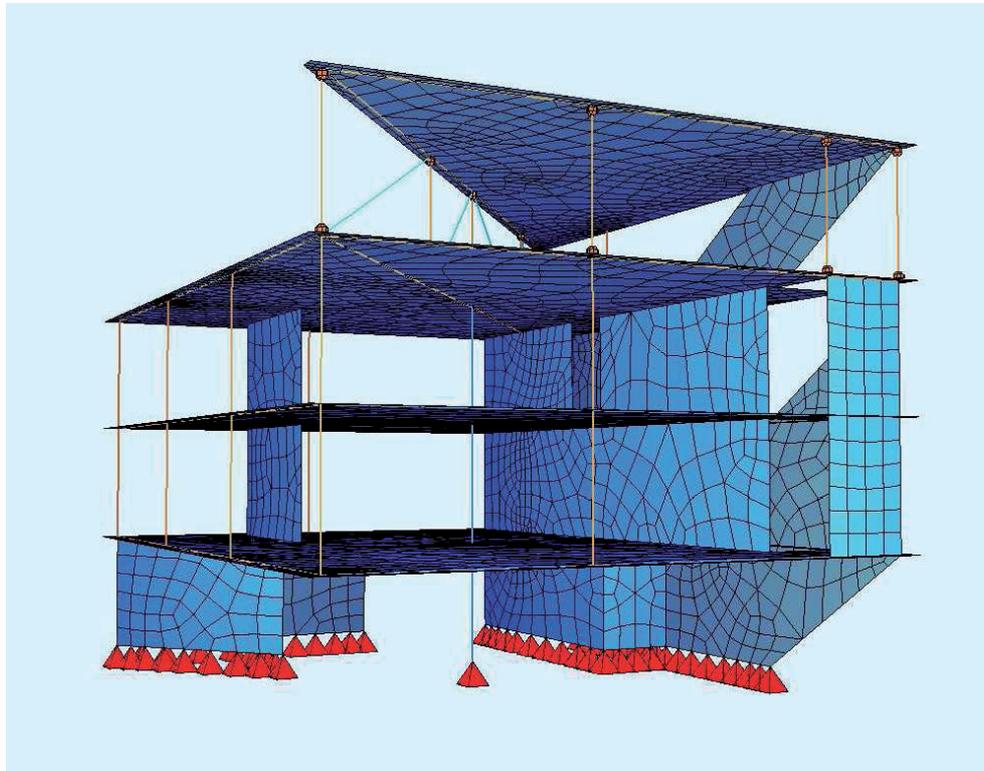


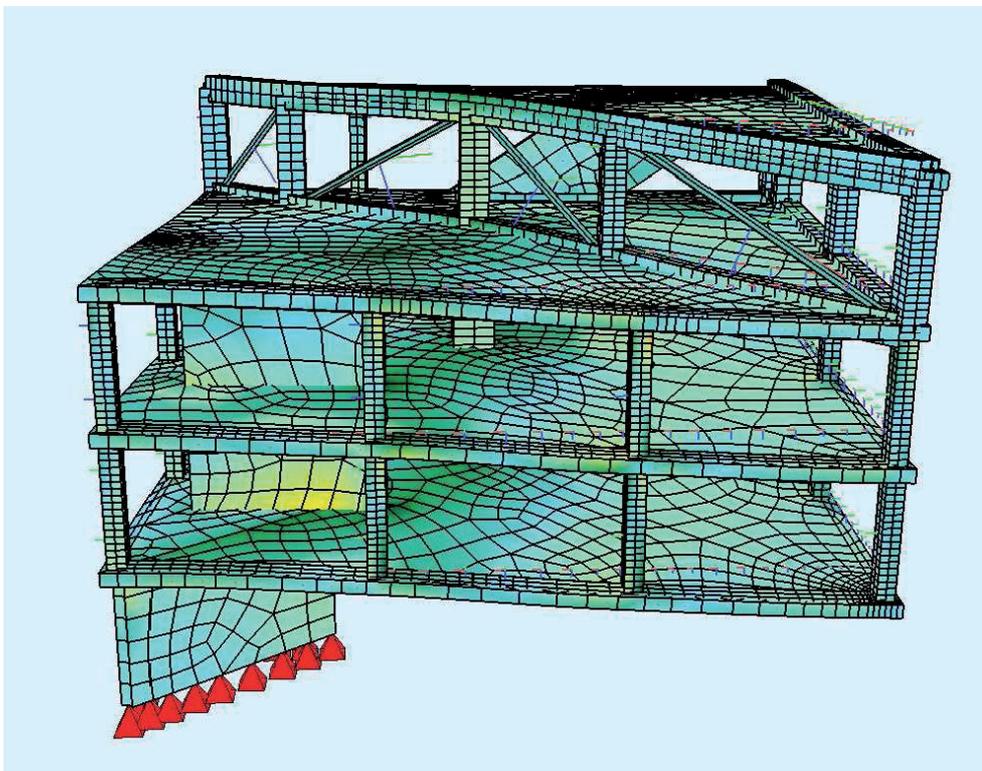
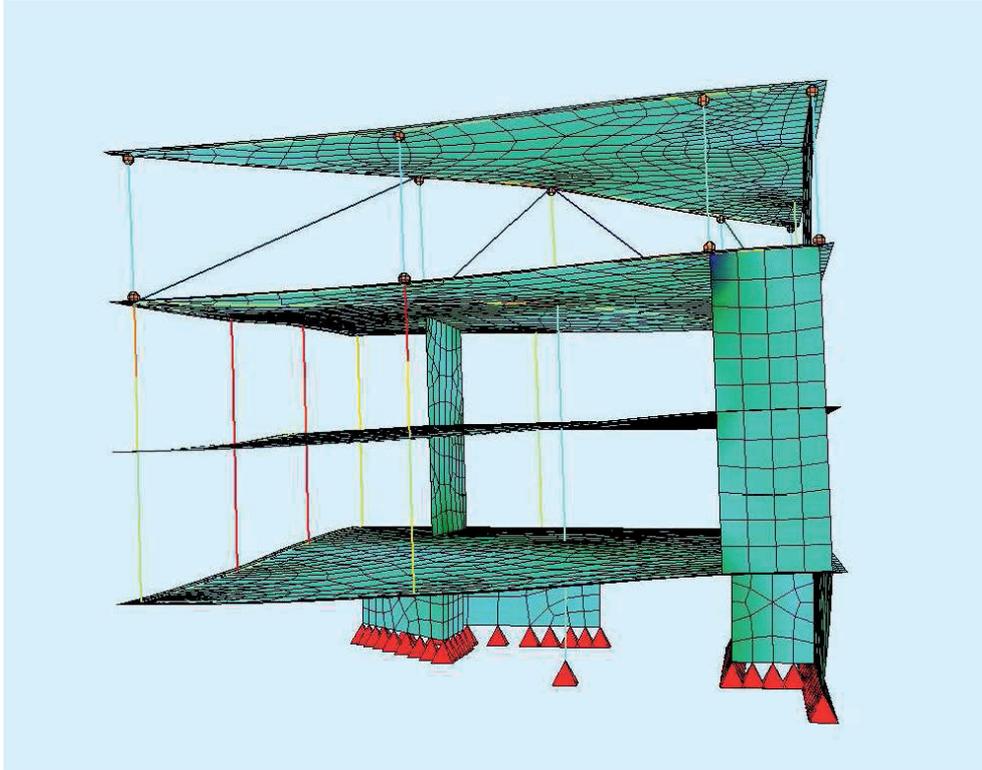
Dachgeschoss



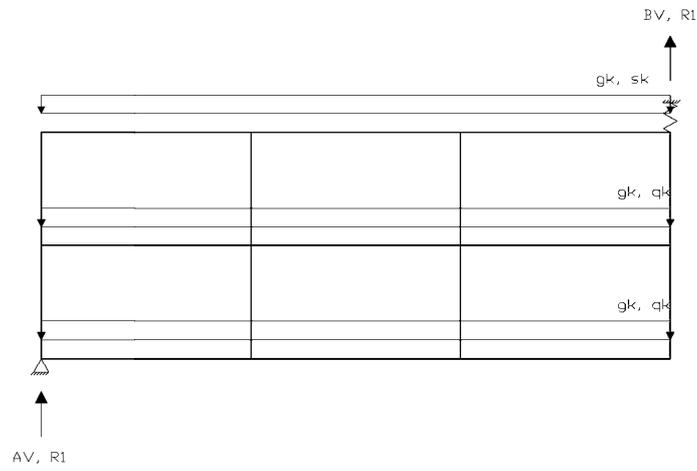
Schnitt

FE-Modell

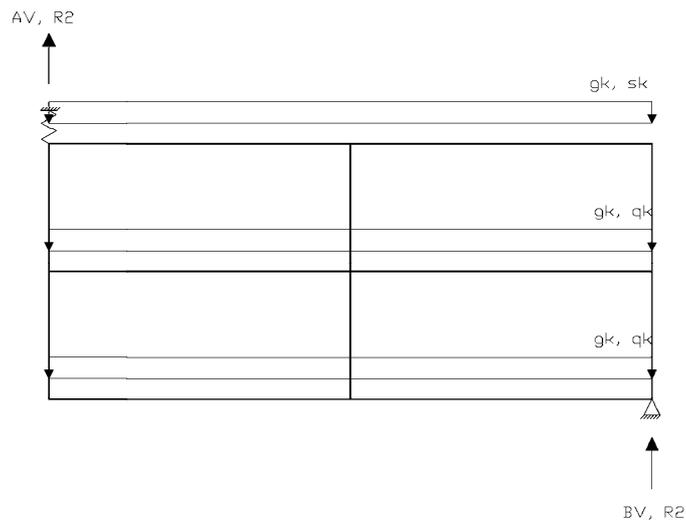




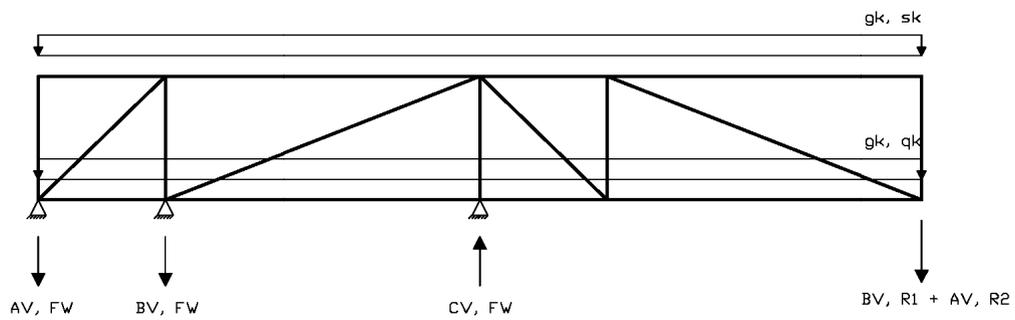
Lastabtrag Rahmen und Fachwerk



Vierendelrahmen 1



Vierendelrahmen 2



Fachwerk

Anhang C Ergebnisse Einfeld Ingenieure

Sammlung möglicher Fehlerarten

Ergebnisse der Sitzung vom 18.06.2009

kritische Stellen:	Fachwerk: Bauteile, Anschlüsse Vierendeelrahmen Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk Zugverankerung Fachwerk - Wand Hauptstütze		
Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart	Fehlernr.
Hauptstütze	S3.1 (S2.1, S1.1)	gibt nach (Verformungen)	01a
		versagt komplett	01b
Gründung / Einzelfundament	F0.2	große Setzung	02
Vierendeelrahmen-Stütze	(S.2.2, S.2.3, S2.4, S2.5, S2.7, S3.2, S3.3, S3.4, S3.5, S3.7)	gibt nach (Verformungen)	03a
		versagt komplett	03b
Vierendeelrahmen-Riegel	(U1.1, U1.3, U2.1, U2.3, U3.1, U3.3)	gibt nach (Verformungen)	04a
		versagt komplett	04b
Fachwerk-Gurt	(U3.2, U4.2)	gibt nach (Verformungen)	05a
		versagt komplett	05b
Fachwerk-Stütze	(S4.1, S4.2, S4.3, S4.4, S4.5)	gibt nach (Verformungen)	06a
		versagt komplett	06b
Fachwerk-Diagonale	(X4.1, X4.2, X4.3, X4.4)	gibt nach (Verformungen)	07a
		versagt komplett	07b
Anschluss Vierendeelrahmen: Riegel-Stütze	(A05)	gibt nach (Verformungen)	08a
		versagt komplett	08b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	08c
Anschluss Vierendeelrahmen - Fachwerk	(A06)	gibt nach (Verformungen)	09a
		versagt komplett	09b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	09c
Anschluss Fachwerk an zugbeanspruchte Wand	(A03)	gibt nach (Verformungen)	10a
		versagt komplett	10b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	10c
Anschluss Fachwerk: Gurt- Stütze	(A04)	gibt nach (Verformungen)	11a
		versagt komplett	11b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	11c
Anschluss Fachwerk: Diagonale- Gurt	(A02)	gibt nach (Verformungen)	12a
		versagt komplett	12b
		nicht ausführbar (zu hohe Lasten)	12c

Bauteilbezogene FMEA-Tabelle

Fehlernummer: 02

Bauteil / Anschluss	Gründung / Einzelfundament unter Hauptstütze F0.2
Funktion	Aufnahme der Lasten aus dem Gebäude und Weiterleitung in den Boden

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

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Stärkere Setzung der Hauptstütze	1	große Setzung des Fundaments unter der Hauptstütze	falsche Bodenkennwerte zugrundegelegt		3	genauere Bodenuntersuchungen durchführen	2	18	Michael Eisfeld 10.07.2009
Auflagerabsenkung für Decken -> veränderte Deckenbelastung, Umlagerung auf benachbarte Bauteile	2		Fundament nicht ausreichend dimensioniert	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	1	6	Michael Eisfeld 10.07.2009
			Lasten aus Hauptstütze größer als erwartet	Fundamente etwas überdimensionieren	2	Berechnung prüfen	2	12	Michael Eisfeld 10.07.2009
Auflagerabsenkung für Fachwerk	1								
geringere Federsteifigkeit für Abhängung (Vierendeel-rahmen)	3								

Anhang D – Ergebnisse WTM Engineers

Projekt:	Forschungsprojekt FMEA	Datum:	21.07.2009
Projekt-Nr.:	11161	erstellt von:	Liening
Gebäude:	Musterhaus Bürogebäude X		

Bauteil	Pos.-Nr.	Fehlerart
Fundament	F0.2; F0.1	große Setzungen
Hauptstütze	SS1 (S3.1; S2.1; S1.1)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Wände	WS1 (W3.7; W3.1; W2.1; W1.1) WS2 (W3.2; W2.2; W1.2) WS3 (W3.3; W2.3; W1.3) WS4 (W4.4; W3.4; W2.4) WS5 (W3.5; W2.5) W4.3; W1.6; W1.5; W1.4	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Stützen	S4.9; S4.8; S4.6; S3.6; S2.6; S1.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Gurt	FW1 (U4.2; U3.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Stütze	FW1 (S4.5; S4.4; S4.3; S4.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Fachwerk - Diagonale	FW1 (X4.4; X4.3; X4.2; X4.1)	totales Versagen
Vierendeelrahmen - Riegel	VR1 (U3.3; U2.3; U1.3) VR2 (U3.2; U2.2; U1.2)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Vierendeelrahmen - Stütze	VR1 (S3.4; S3.3; S3.2; S2.4; S2.3; S2.2) VR2 (S3.7; S2.7; S3.5; S2.5)	totales Versagen (Knicken) große Verformungen
Anschluss Vierendeelrahmen Riegel - Stütze		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Vierendeelrahmen an Fachwerk		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Fachwerk Gurt - Stütze		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Anschluss Fachwerk Gurt - Diagonale		totales Versagen große Verformungen nicht ausführbar
Decken		totales Versagen große Verformungen

Ausnutzungsgrad der Bauteile in den Teilsystemen

Fachwerktr.: FW1

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U4.2	0,658	0,672	-	-	-	-	0,421	0,540
U3.2	0,847	0,857	-	-	-	-	1,960	0,676
S4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
S4.4	0,065	0,066	-	-	-	-	0,100	0,042
S4.1	0,239	0,245	-	-	-	-	-	0,231
S4.2	0,079	0,081	-	-	-	-	0,143	0,055
S4.3	0,013	0,297	-	-	-	-	0,000	0,000
X4.4	0,140	0,144	-	-	-	-	0,124	-
X4.3	0,162	0,017	-	-	-	-	0,000	0,199
X4.2	0,184	0,188	-	-	-	-	0,000	0,148
X4.1	0,136	0,140	-	-	-	-	0,153	0,098

Vierendeelr.: VR1

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.1	0,567	0,580	0,595	0,597	0,454	0,663	-	0,649
U2.1	0,691	0,646	0,654	0,736	0,735	0,698	-	0,783
U1.1	0,436	0,434	0,444	0,501	0,558	0,410	-	0,486
S3.5	0,486	0,479	0,569	0,391	0,546	-	-	0,837
S3.4	1,030	1,050	1,150	1,020	-	1,030	-	1,350
S3.3	0,978	1,210	0,945	1,000	0,908	1,030	-	1,090
S3.2	0,383	0,431	0,383	0,382	0,401	0,386	-	0,409
S2.5	0,213	0,212	0,131	-	0,188	0,588	-	0,420
S2.4	0,931	0,962	-	1,140	1,150	1,080	-	1,170
S2.3	1,180	-	1,190	1,180	1,200	1,190	-	1,300
S2.2	0,257	0,266	0,275	0,271	0,235	0,275	-	0,286

Vierendeelr.: VR2

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.5
U3.3	0,666	0,663	0,673	0,690	-	0,679	-	0,699
U2.3	0,411	0,409	0,413	0,444	-	0,373	-	0,469
U1.3	0,313	0,309	0,311	0,376	-	0,268	-	0,347
S3.5	0,486	0,478	0,569	0,392	-	-	-	0,837
S3.7	0,585	0,595	0,613	0,555	-	0,558	-	0,751
W3.6	-	-	-	-	-	-	-	-
S2.5	0,213	0,212	0,131	-	-	0,588	-	0,420
S2.7	0,611	0,613	0,603	0,823	-	0,732	-	0,807
W2.6	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 3.9: Ausnutzungsgrade von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich

Durchbiegung der Bauteile [mm]

Fachwerkr.: FW1

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U4.2	25,900	26,400	-	-	-	-	34,600	31,000
U3.2	25,800	26,400	-	-	-	-	34,500	31,000
S4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
S4.4	9,710	9,920	-	-	-	-	17,100	9,340
S4.1	1,140	1,160	-	-	-	-	-	1,070
S4.2	0,174	0,175	-	-	-	-	0,497	0,152
S4.3	-1,310	-1,330	-	-	-	-	-1,890	-1,380
X4.4	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.3	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.2	-	-	-	-	-	-	-	-
X4.1	-	-	-	-	-	-	-	-

Vierendeelr.: VR1

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.1	26,500	27,100	27,100	25,800	27,300	25,000	-	31,900
U2.1	26,200	26,800	27,000	25,500	26,900	29,900	-	31,500
U1.1	26,300	26,900	27,000	34,800	27,100	29,800	-	31,700
S3.5	25,800	26,400	26,700	25,200	26,600	-	-	31,000
S3.4	19,400	20,300	19,200	19,500	-	19,700	-	21,700
S3.3	6,820	7,710	6,520	6,800	6,530	6,870	-	7,340
S3.2	0,238	0,249	0,241	0,239	0,245	0,241	-	0,251
S2.5	25,900	26,400	26,700	-	26,600	29,200	-	31,000
S2.4	19,400	20,400	-	19,600	20,400	19,800	-	21,700
S2.3	6,790	-	6,500	6,770	6,530	6,840	-	7,310
S2.2	0,166	0,172	0,169	0,167	0,199	0,196	-	0,176

Vierendeelr.: VR2

Bauteil	Ausgangs- system	Ausfall						
		S2.3	S2.4	S2.5	S3.4	S3.5	S4.1	X4.4
U3.3	26,500	26,400	26,800	25,800	-	25,000	-	31,900
U2.3	26,200	26,400	26,800	25,500	-	29,900	-	31,500
U1.3	26,300	26,500	26,700	34,800	-	29,800	-	31,700
S3.5	25,800	26,400	26,700	25,200	-	-	-	31,000
S3.7	19,300	19,600	19,800	19,600	-	19,600	-	21,500
W3.6	-	-	-	-	-	-	-	-
S2.5	25,900	26,400	26,700	-	-	29,200	-	31,000
S2.7	19,400	19,600	19,800	19,600	-	19,700	-	21,500
W2.6	-	-	-	-	-	-	-	-

Abb. 3.10: Durchbiegung von Bauteilen bei Bauteilausfällen im Kragbereich

FMEA - Formblatt

Bauteil: Vierendeelr. VR1 (S2.3)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1	Erstellt am: 08.08.2009	11161-SB-V-02
	Bauteilkategorie: II	

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	5	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,1 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	30		
		Kontrollliste mit allen Lasten								
	Fehler in Schnittgrößen-ermittlung	geeignetes Programm verwenden	5	Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 26,5 \text{ mm}$	2	unabhängige Kontrollberechnung	3	30		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten								
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	5		2	unabhängige Kontrollberechnung	3	30		
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten								

FMEA - Formblatt

Bauteil: Vierendeelr. VR1 (S2.4)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1	Erstellt am: 08.08.2009	11161-SB-V-02
Bauteilkategorie: II		

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin	
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	2	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,1 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	12			
		Kontrollliste mit allen Lasten									
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	2		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 26,8 \text{ mm}$	2	unabhängige Kontrollberechnung	3			12
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten									
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	2			2	unabhängige Kontrollberechnung	3			12
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten									

FMEA - Formblatt

Bauteil: Vierendeelr. VR1/VR2 (S2.5)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Weiterleitung der Lasten aus U3.1 und U3.3 in Fachwerk	Erstellt am: 08.08.2009	11161-SB-V-02
Bauteilkategorie: II		

Bewertungskriterien:

(A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(B) Bedeutung der Fehlerfolge

(E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache

(RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin	
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. $u_z = 34,8 \text{ mm}$	3	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	9			
		Kontrollliste mit allen Lasten									
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	1			Verformung Vierendeelrah. $u_z = 34,8 \text{ mm}$	3	unabhängige Kontrollberechnung			3
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten									
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1		Verformung Vierendeelrah. $u_z = 34,8 \text{ mm}$	3		unabhängige Kontrollberechnung			3
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten									

FMEA - Formblatt

Bauteil: Vierendeelr. VR1 (S3.4)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Weiterleitung der Lasten im Vierendeelrahmen VR1	Erstellt am: 08.08.2009	11161-SB-V-02
	Bauteilkategorie: II	

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	5	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 27,3 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	30		
		Kontrollliste mit allen Lasten								
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	5	Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 27,3 \text{ mm}$	2	unabhängige Kontrollberechnung	3	30		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten								
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	5		2	unabhängige Kontrollberechnung	3	30		
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten								

FMEA - Formblatt

Bauteil: Vierendeelr. VR1/VR2 (S3.5)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Weiterleitung der Lasten aus U3.1 und U3.3 in Fachwerk	Erstellt am: 08.08.2009	11161-SB-V-02
Bauteilkategorie: II		

Bewertungskriterien:
 (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
 (B) Bedeutung der Fehlerfolge
 (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
 (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin	
Stütze Versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 29,9 \text{ mm}$	1	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	6			
		Kontrollliste mit allen Lasten									
	Fehler in Schnittgrößenermittlung	geeignetes Programm verwenden	1		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 29,9 \text{ mm}$	2	unabhängige Kontrollberechnung	3			6
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten									
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1				unabhängige Kontrollberechnung	3			6
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten									

FMEA - Formblatt

Bauteil: Fachwerkträger FW1 (X4.4)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr:
Funktion: Aufnahme der Lasten aus VR1 und VR2 und weiterleiten in FW1	Erstellt am: 02.08.2009	11161-SB-V-02
	Bauteilkategorie: I	

Bewertungskriterien:

- (A) Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (B) Bedeutung der Fehlerfolge
- (E) Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache
- (RPZ) Risikoprioritätszahl = A x B x E

Fehler - Art	Fehler - Ursache	Verhütungsmaßnahmen	A	Fehler - Folge	B	Entdeckungsmaßnahme	E	RPZ	Empfohlene Maßnahme	Verantwortlicher Termin
Seil versagt	Fehler in Lastermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Vierendeelrah. 1 $u_z = 31,9 \text{ mm}$	2	mit weiteren weiteren Ingenieuren besprechen Lasten dokumentieren	3	15		
		Kontrollliste mit allen Lasten		Verformung Vierendeelrah. 2 $u_z = 31,9 \text{ mm}$	3					
	Fehler in Schnittgrößen-ermittlung	geeignetes Programm verwenden	1	Verformung Fachwerk $u_z = 31,0 \text{ mm}$	3	unabhängige Kontrollberechnung	3	15		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten		Versagen S3.4	5					
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1	Versagen S2.3	5	unabhängige Kontrollberechnung	3	15		
		Kontrollliste mit Bemessungsschritten								

4 Leitfaden mit Praxisbeispielen

4.1 Einleitung

4.1.1 Vorbemerkungen

Im Bauwesen wird durch Normen und Richtlinien die Vorgehensweise bei der Erstellung von statischen Berechnungen festgelegt. Durch vorgeschriebene Lastannahmen wird außerdem vorgegeben, in welcher Weise die Einwirkungen auf ein Gebäude berücksichtigt werden müssen. Die notwendigen Sicherheiten werden durch das semi-probabilistische Sicherheitskonzept geregelt. Diese beziehen sich allerdings nur auf die Unsicherheiten seitens der Einwirkungen und der Bauteilwiderstände. Bei der Kontrolle von statischen Berechnungen hinsichtlich der Richtigkeit der Anwendung der Normen und Richtlinien sowie der Fehlerfreiheit des Tragkonzepts und der Berechnungen verlässt man sich auf die Prüfung durch einen qualifizierten Prüfsingenieur oder bei kleineren Bauvorhaben auf nicht näher spezifizierte, interne Qualitätssicherungsmechanismen. Diese Prüfung erfolgt allerdings ohne allgemeingültige Systematik und ist oftmals nicht hinreichend nachvollziehbar. Außerdem werden die Fehler auf diese Weise erst zu einem späten Zeitpunkt aufgefunden, wodurch die Behebung oftmals zeitaufwendig und kostenintensiv ist.

Die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) wird angewendet, um die Qualität von Produkten sicherzustellen. Es sollen mögliche Fehler in einem frühen Stadium erkannt werden, um diese bereits im Vorfeld zu vermeiden bzw. deren Folgen durch geeignete Maßnahmen zu minimieren. Sie findet im Bereich des Maschinenbaus, insbesondere in der Luft- und Raumfahrt sowie der Automobilindustrie, bereits seit einigen Jahrzehnten Anwendung und hat sich seitdem vielfach bewährt. Mittlerweile bildet sie dort, gerade in der Entwicklungsphase, eine wichtige Grundlage aller Projekte. Für Automobilkonzerne beispielsweise ist die Durchführung einer FMEA in ihren Zulieferbetrieben Voraussetzung für eine gemeinsame Zusammenarbeit. Auch Versicherungen setzen eine FMEA zunehmend voraus bzw. vergeben deutlich bessere Konditionen an Betriebe die eine solche durchführen.

Weitere Gründe für die Notwendigkeit einer optimierten Qualitätssicherung werden im Artikel *Die Rolle des Prüfsingenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr* von Dressel [Dre09] genannt. Ein guter grundlegender Überblick zum Stand der Technik bzgl. der FMEA ist im Heft *FMEA - Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse* [Var04] zu finden.

Im vorliegenden Leitfaden werden erstmals Regeln zur Durchführung einer FMEA im Bauwesen formuliert. Dabei werden der Schwierigkeitsgrad und die Robustheit eines Tragwerks als diejenige Parameter definiert, aus denen sich der Umfang der FMEA ableiten lässt.

4.1.2 Begriffe

FMEA–Arten Maschinenbau/Luft- und Raumfahrtindustrie

- **System–FMEA:** Sie betrachtet das Zusammenwirken von Systemen bzw. Systemkomponenten und sorgt für eine Transparenz des Gesamtsystems.
- **Konstruktions–FMEA:** Sie geht eine Ebene tiefer und analysiert das System detaillierter. Die Fehlerursachen in der System–FMEA werden hier als Fehlerarten betrachtet und deren Ursachen verfolgt.
- **Prozess–FMEA:** Sie befasst sich mit den Fehlern, die bei der Produktherstellung entstehen können.

FMEA–Arten Bauwesen

- **Tragwerk–FMEA:** Sie wird nach der Vor- und Entwurfsplanung (Leistungsphasen 2 und 3) durchgeführt und dient zur Vermeidung grundlegender Fehler in einem frühen Stadium.
- **Konstruktions–FMEA:** Sie erfolgt nach der Genehmigungs- und Ausführungsplanung und zielt auf eine Sicherstellung der Richtigkeit der endgültigen statischen Berechnungen und der Konstruktionszeichnungen.
- **Ausführungs–FMEA:** Sie soll die richtige Ausführung gewährleisten und Fehler in dieser Phase vermeiden.
- **Nutzungs–FMEA:** Sie hat die Aufgabe in der Nutzungsphase kritische Bereiche zu überwachen und die Dauerhaftigkeit von Gebäuden sicherzustellen.

Ablauf System–FMEA

- **Strukturanalyse:** Alle Systemelemente sowie deren Schnittstellen (Verbindungen, Zusammenhänge und Abhängigkeiten) werden erkannt, analysiert und dokumentiert. Es erfolgt eine Darstellung in geeigneter Form.
- **Funktionsanalyse:** Die jeweiligen Funktionen der Systemelemente werden analysiert und diesen auf verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet.
- **Fehleranalyse:** Ein Fehler ist definiert als „Nichterfüllung einer Funktion“. Somit kann für jede Funktion ein möglicher Fehler formuliert werden. In diesem Schritt werden außerdem deren Ursachen und Folgen beschrieben. Die Analyse erfolgt heuristisch, d.h. intuitiv und auf Erfahrung basierend.
- **Risikobewertung:** Um eine Abschätzung für das tatsächliche Risiko vorzunehmen, werden in der verbreitetsten Form der Risikobewertung jeweils 3 verschiedene Kriterien mit Zahlenwerten zwischen 1 und 10 bewertet. Dies sind die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache sowie die

Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache. Die Risikoprioritätszahl (RPZ) gibt das Risiko an, welches von einem Fehler ausgeht und errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen, also:

$$RPZ = B * A * E.$$

Je größer die RPZ, desto wichtiger ist es für diesen Fehler eine Optimierung durchzuführen, d. h. desto höher ist die *Priorität* diesen Fehler zu betrachten. Die möglichen Ergebnisse liegen zwischen 1 (kein bzw. sehr geringes Risiko) und 1000 (sehr hohes Risiko).

- **Optimierung:** Auf dieser Grundlage können dann im Team für die erkannten Risiken geeignete Maßnahmen zur Entdeckung bzw. Vermeidung der Fehler erarbeitet werden. Die festgelegten Maßnahmen werden dann bei der Bewertung der Kriterien berücksichtigt und führen zu einer Reduzierung der RPZ.

4.2 Vorgehensweise Tragwerk–FMEA

In Abbildung 4.1 ist der Gesamtablauf einer Tragwerk–FMEA als Flussdiagramm dargestellt. Die einzelnen Bearbeitungsschritte werden in Abbildung 4.2 kurz erläutert. Außerdem findet ein Verweis auf die zugehörigen Abschnitte, Abbildungen und Tabellen statt.

4.2.1 Einordnung des Bauwerks in Gefährdungsklassen

Das Bauwerk wird anhand der Honorarzone (vgl. Tab. 4.1) und der Consequence Class (vgl. Abb. 4.3) in die entsprechende Gefährdungsklasse eingeordnet (vgl. Abb. 4.4).

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

Vorgehen Tragwerk-FMEA (Gesamtablauf)

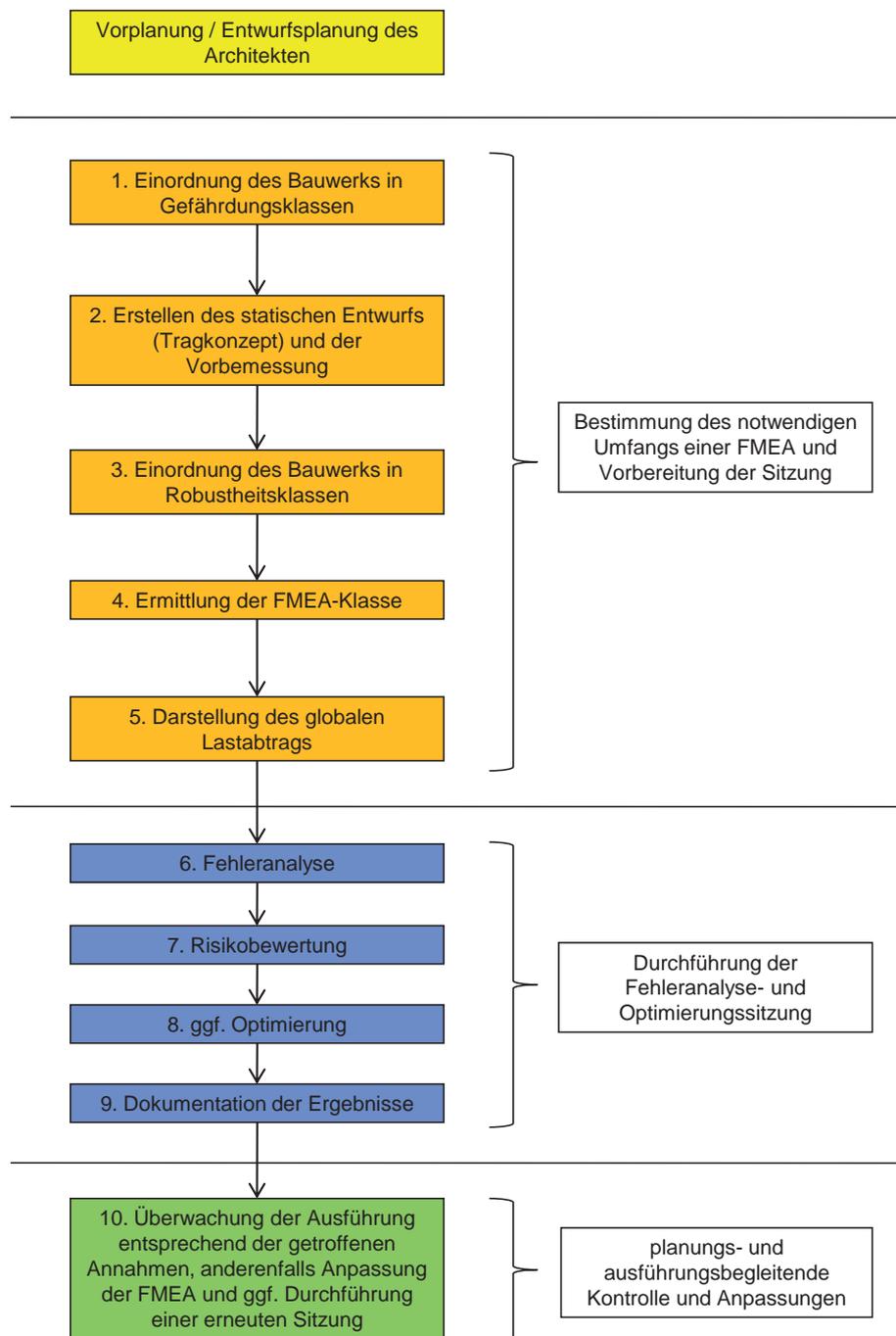


Abbildung 4.1: Flussdiagramm zur Veranschaulichung des Gesamtablaufs einer Tragwerk-FMEA

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 2.1
				Abb. 2.3, 2.4
				Tab. 2.1
2	statischer Entwurf und Vorbemessung	Ermittlung eines geeigneten Tragkonzepts und der notwendigen Bauteilabmessungen	Tragwerksplaner	
3	Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen	Ermittlung der notwendigen Anzahl zu erfassender Elemente bei der Durchführung der FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt 2.3
				-
				Tab. 2.3, 2.4
4	Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen	Ermittlung des notwendigen Umfangs einer durchzuführenden FMEA	Tragwerksplaner, evtl. Festlegung durch Prüfinstanz	Abschnitt 2.4
				Abb. 2.5, 2.6
				Tab. 2.5, 2.6
5	Darstellung des globalen Lastabtrags	Unterstützung bei der Ermittlung der Auswirkung von Fehlern auf weiterführende Bauteile (Propagierung der Fehler)	Tragwerksplaner	Abschnitt 2.5
				Abb. 2.7, 2.8
				-
6	Fehleranalyse	Auffinden möglicher Fehler, sowie der entsprechenden Ursachen und Folgen	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.6
				-
				Tab. 2.6, 2.9, 2.10
7	Risikobewertung	Feststellung, ob das vorhandene Risiko die vorgegebenen Grenzen einhält	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.7
				Abb. 2.9, 2.10, 2.11
				Tab. 2.8
8	Optimierung	Reduzierung des Risikos, wenn die vorgegebenen Grenzen nicht eingehalten sind	Teilnehmer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6	Abschnitt 2.8
				-
				Tab. 2.9, 2.11
9	Dokumentation der Ergebnisse	Festhalten der wichtigen Informationen und Weiterverwendung dieser in den weiteren Phasen	Protokollführer der Sitzung nach Abschnitt 2.4 bzw. 2.6, Bestätigung durch Teilnehmer	Abschnitt 2.9
				Abb. 2.12
				-
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. Prüfsingenieur	Abschnitt 2.10
				-
				-

Abbildung 4.2: Erläuterungen und Verweise bzgl. Flussdiagramm

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, Disotheken, 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 4.3: Schadensfolgeklassen (Consequence Classes) für Bauwerke mit Beispielen [e.V08]

		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 4.4: Ermittlung der Gefährdungsklasse

4.2.2 Tragwerksentwurf und Vorbemessung

Entsprechend der Anforderungen aus der Gefährdungsklasse (vgl. Tab. 4.2) wird ein Tragkonzept entwickelt und die Vorbemessung durchgeführt.

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 4.2: Umfang der Vorbemessung in Abhängigkeit der Gefährdungsklasse

4.2.3 Einordnung des Bauwerks in Robustheitsklassen

Anhand von Tabelle 4.3 erfolgt die Einteilung des Bauwerks in Robustheitsklassen. Die Robustheitszahl wird nach Tabelle 4.4 bestimmt.

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

Tabelle 4.3: Vorschlag zur Einteilung in Robustheitsklassen

Merkmale	Aussage	trifft zu:				RZ_i	
		gar nicht	wenig	mittel	viel		
Redundanz Tragwerk	Alternative Lastpfade sind vorhanden	-4	-2	0	+2	+4	2
	Es liegt ein statisch unbestimmtes Tragwerk vor	-2	-1	0	+1	+2	1
	lokale Schwächen haben keine großen Auswirkungen	-4	-2	0	+2	+4	0
Redundanz Verbindungen	Die Verbindungen tragen auch, wenn einzelne Verbindungsmittel ausfallen	-4	-2	0	+2	+4	2
	Die Verbindungen können auch Lasten aufnehmen, die durch das Anspringen alternativer Lastpfade hervorgerufen werden	-4	-2	0	+2	+4	2
Baustoff/- verhalten	Die Bauteile haben eine ausreichende Duktilität, so dass ein Versagen ohne Vorankündigung ausgeschlossen werden kann	-8	-4	0	+4	+8	4
Sicherheit der Bauteile	Es sind keine Bauteile vorhanden, bei denen mit einer erhöhten Ausfallgefährdung zu rechnen ist	-8	-4	0	+4	+8	4
Wartungs- freundlichkeit	Wartungsrelevante Bauteile und Anschlüsse sind gut zugänglich und gut überwachbar	-6	-3	0	+3	+6	0
Robustheitszahl $RZ = \sum RZ_i =$						15	

Tabelle 4.4: Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken

4.2.4 Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen

In Abhängigkeit der Gefährdungsklasse und der Robustheitsklasse erfolgt die Einordnung des Bauwerks in FMEA-Klassen (vgl. Abb. 4.5). Diese legen den Umfang fest, mit dem eine FMEA durchgeführt werden muss (vgl. Tab. 4.5 und 4.6). Eine schematische Darstellung der Ermittlung der Klassen eines Bauwerks ist in Abbildung 4.6 gegeben.

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

Abbildung 4.5: Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der 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 4.5: Beschreibung der FMEA-Klassen

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, Prüfengeieurs, 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 4.6: Definition der Bezeichnungen „gering“ und „hoch“

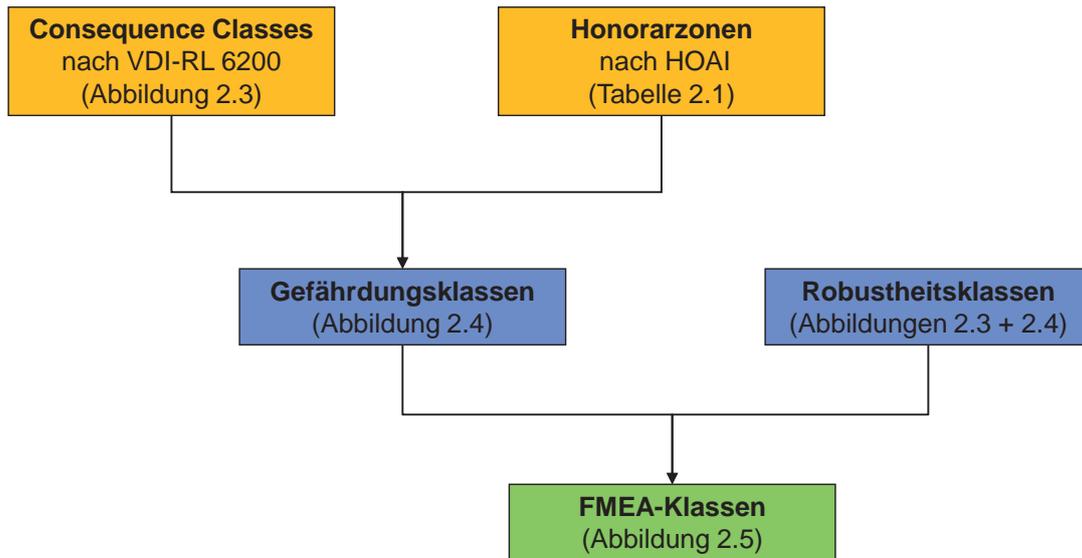


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung zur Ermittlung der Klassen eines Bauwerks

4.2.5 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 4.7 und 4.8 gegeben.

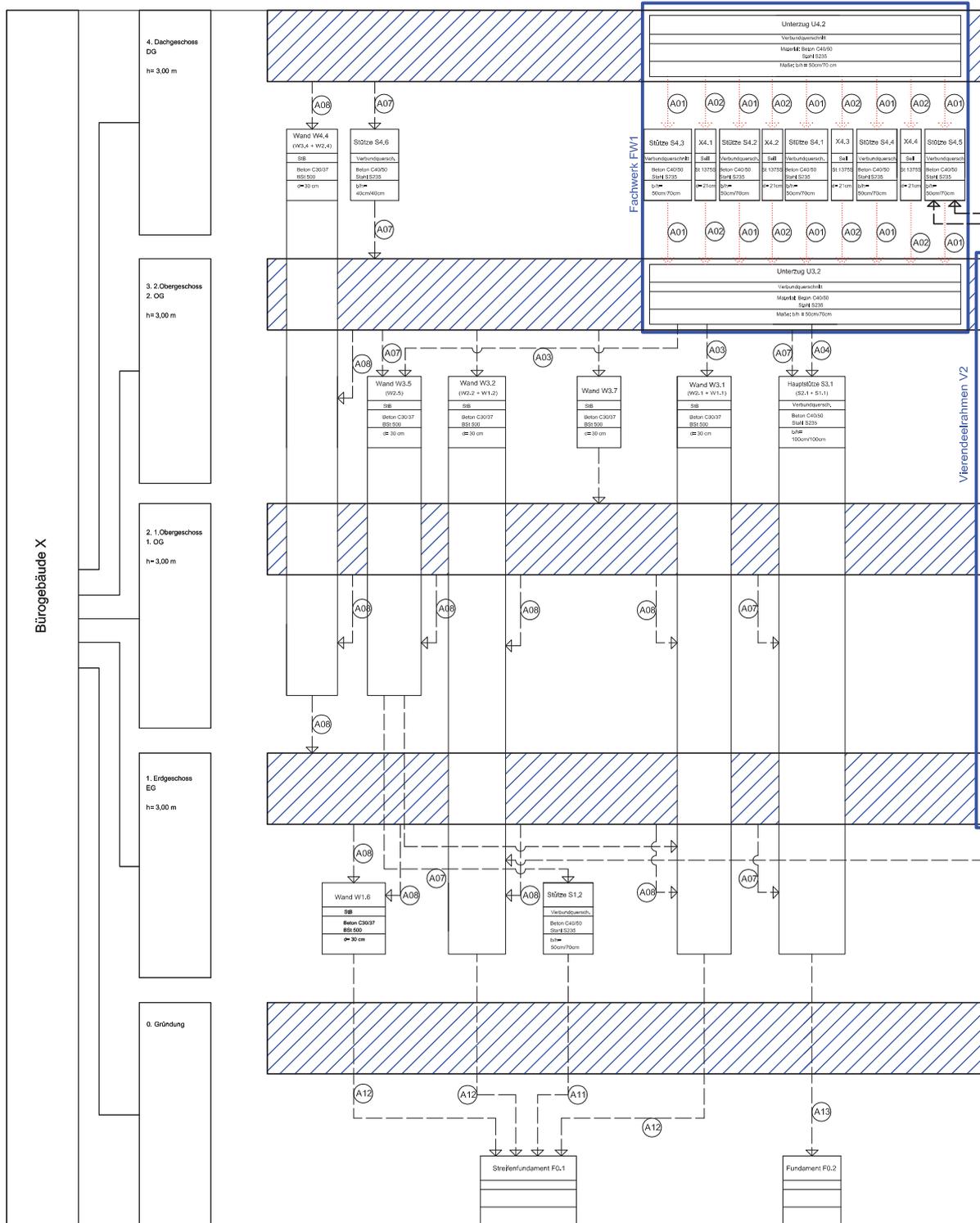


Abbildung 4.7: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph[Vog09]

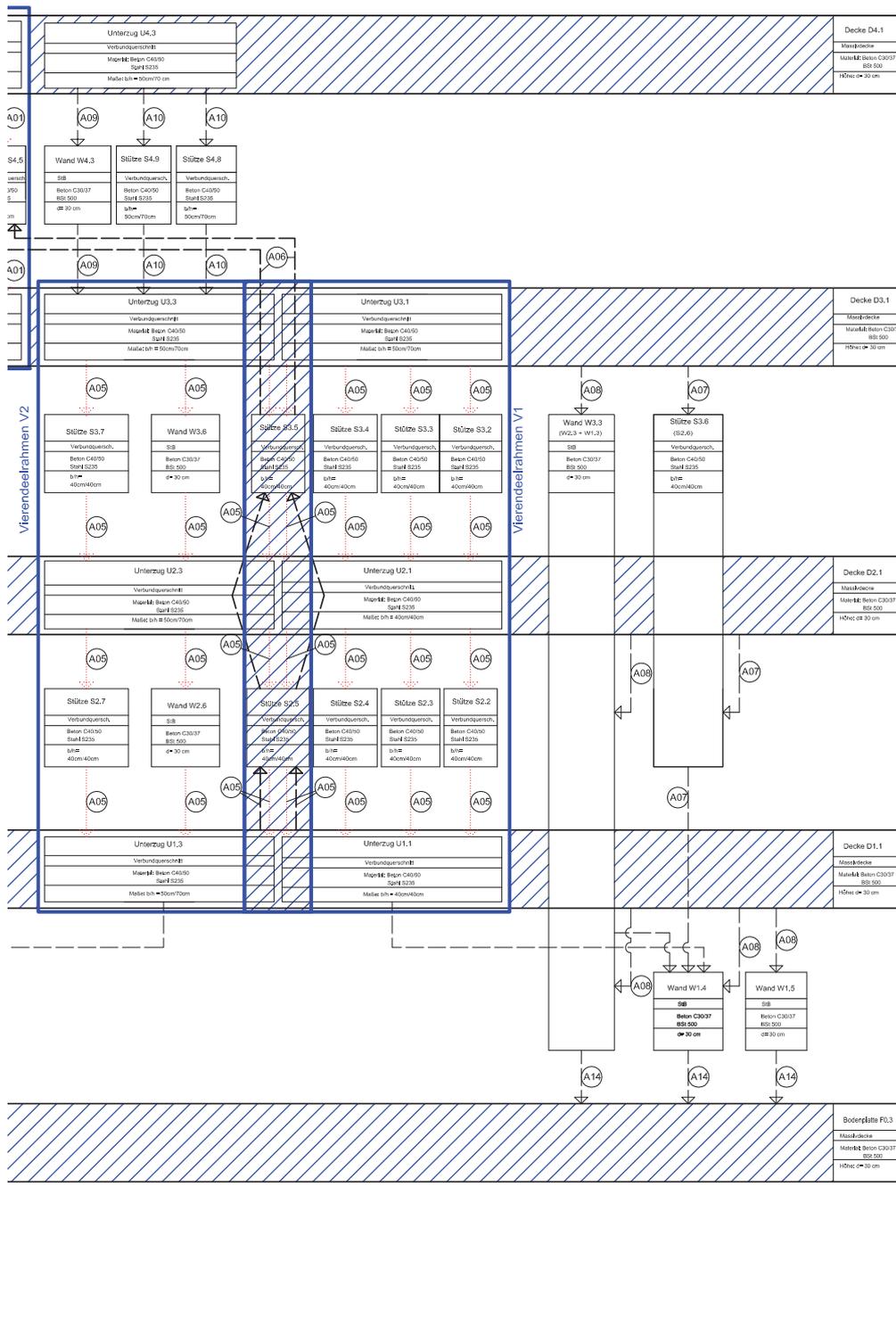


Abbildung 4.8: Darstellung des globalen Lastabtrags für ein Bürogebäude als strukturierter Graph (Fortsetzung) [Vog09]

4.2.6 Fehleranalyse

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

Die Sitzung findet, entsprechend den Anforderungen aus der FMEA-Klasse, entweder bürointern oder in einem erweiterten Teilnehmerkreis statt (vgl. Tab. 4.6). In Tabelle 4.7 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.

bürointerner Teilnehmerkreis

- Tragwerksplaner, der statischen Entwurf erstellt und Vorbemessung durchgeführt hat
 - Verantwortlicher des Projekts (Vorgesetzter des Tragwerksplaners)
 - Konstrukteur
 - andere bürointern am Projekt Beteiligte
-

zusätzlich im erweiterten Teilnehmerkreis

- Prüfsingenieur
 - Architekt
 - Bauleiter der ausführenden Firma
 - andere am Projekt Beteiligte (z.B. Bodengutachter)
 - evtl. Bauherr
-

Tabelle 4.7: Definition des bürointernen und erweiterten Teilnehmerkreises an einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung

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

Tabelle 4.8: Bewertung der Bedeutung eines Fehlers bzw. der Folge eines Fehlers

4.2.7 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 4.8
- **Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache**
Wird anhand der vorhandenen Erfahrung der Beteiligten mit einem bestimmten Bauteil und der erwarteten Bauteilqualität in Abhängigkeit des Herstellungsortes wird eine Bauteilkategorie nach Abbildung 4.9a bestimmt. Zusammen mit dem errechneten Ausnutzungsgrad des Bauteils ergibt diese eine bauteilbezogene Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit nach Abbildung 4.9b. 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. 4.10). 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 4.11 entnommen werden.

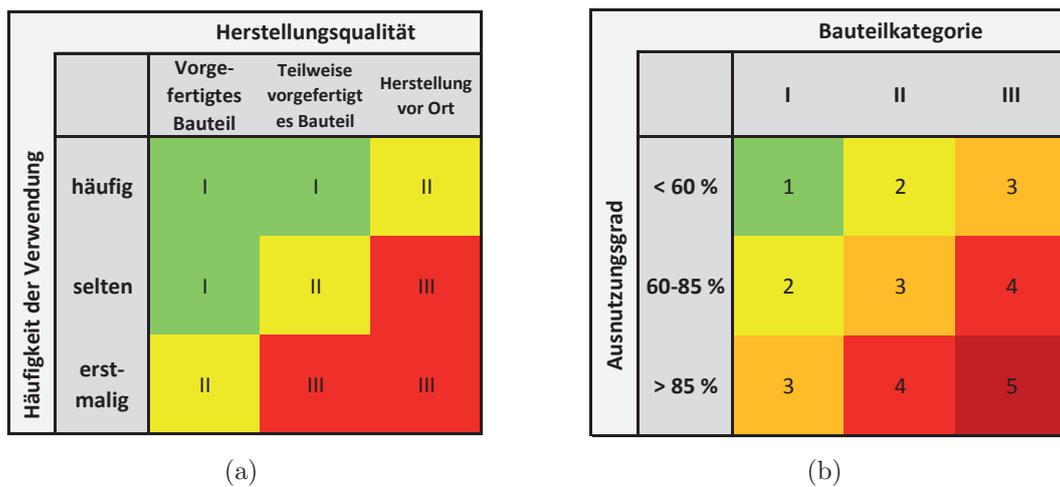


Abbildung 4.9: (a) Ermittlung der Bauteilkategorie; (b) Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

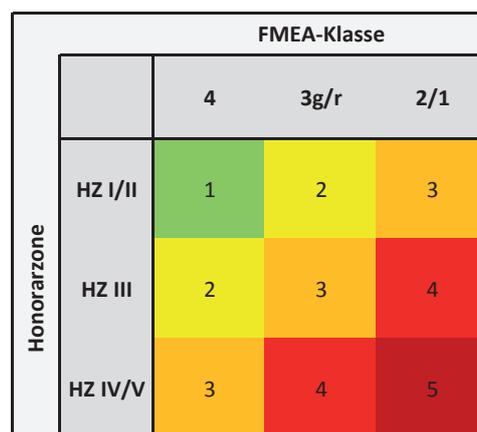


Abbildung 4.10: Ermittlung der Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit („Tendenzwert“)

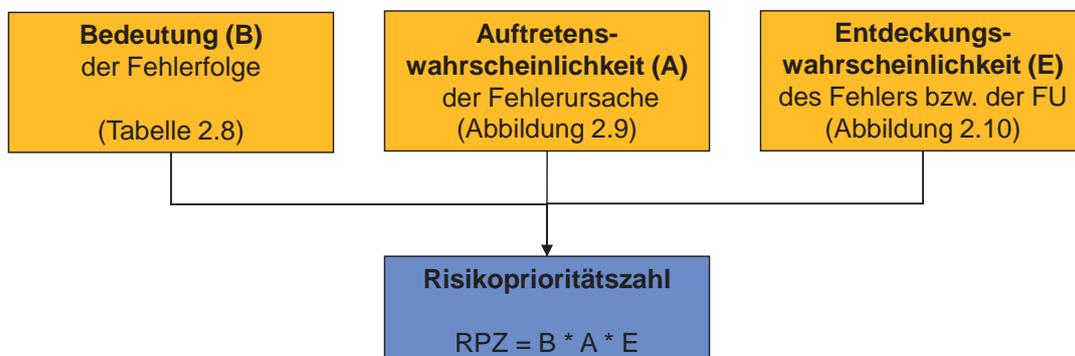


Abbildung 4.11: Ermittlung der Risikoprioritätszahl in Abhängigkeit der Bewertungszahlen

4.2.8 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, so kann der Wert RPZ auch durch ein verändertes Tragwerkskonzept reduziert werden. Eine Auswahl möglicher Entdeckungsmaßnahmen in Abhängigkeit der Fehlerkategorien ist in Tabelle 4.11 gegeben.

4.2.9 Dokumentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Analyse, Bewertung und Optimierung werden sorgfältig in Formblättern (vgl. Abb. 4.12) 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	<p style="text-align: center;">Bewertung der Fehler:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A) - Bedeutung der Fehlerfolge (B) - Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E) 									
Funktion										
Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin	

Abbildung 4.12: Formblatt zur Fehlerbewertung in einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung nach [DIN06]

4.2.10 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.

4.2.11 Fehlerkategorien und Fehlerursachen

Um das Auffinden von Fehlern und deren Ursachen zu unterstützen, erfolgt eine Einteilung möglicher Fehlerursachen in Kategorien. Diese beschränken sich derzeit auf die Bereiche Berechnung, Bemessung und Entwurf (vgl. Tab. 4.9).

4.2.12 Fehlerarten und Entdeckungsmaßnahmen

Für eine Auswahl typischer Bauteile im üblichen Hochbau wird in Tabelle 4.10 ein Fehlerkatalog mit möglichen Fehlerarten vorgestellt. Dieser kann als Grundlage für die Erstellung von firmeninternen oder auch frei zugänglichen Fehlerkatalogen verwendet werden.

Tabelle 4.11 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 - 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 - Der Tragwiderstand wurde falsch berechnet
Fehler bei Anschlüssen und Details	<ul style="list-style-type: none"> - Die Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt - Die Details sind nicht ausführbar

Tabelle 4.9: Mögliche Fehlerursachen

<p>1. Stütze</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilitätsversagen (Knicken) [s] - Druckversagen [d/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. Deckenplatte</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 = duktiles Materialverhalten s = sprödes Materialverhalten</p>	

Tabelle 4.10: Fehlerkatalog für mögliche Fehlerarten verschiedener Stahlbeton-bauteile

4.3 Anwendungsbeispiele

4.3.1 Anleitung zur Durchführung der FMEA mit Anwendungsbeispielen

Hintergrund, Verweise

Bei der „Tragwerk-FMEA“ handelt es sich um eine Qualitätssicherungsmethode, die das Ziel hat potentielle Fehler bei einem Bauwerk frühzeitig zu erkennen, zu bewerten und ggf. durch geeignete Maßnahmen zu verhindern.

Um eine einfache Anwendung für ungeübte Nutzer zu ermöglichen, wurde die Tragwerk-FMEA an einem typischen Mauerwerksbau beispielhaft durchgeführt. Die hierfür verwendeten Formblätter sind so konzipiert, dass diese direkt für ähnliche Bauwerke verwendet werden können. Eine Anpassung und Erweiterung der Formblätter hinsichtlich möglicher Fehlerarten, -ursachen und -folgen, weiterer Maßnahmen sowie eine Anwendung auf andere Bauteile kann in der vorgestellten Systematik individuell erfolgen.

Die entwickelten Tabellen beruhen auf dem „Leitfaden Tragwerk-FMEA“ [1]. In diesem werden die Hintergründe der FMEA und die Durchführung ausführlich erläutert, so dass er sehr gut für eine vertiefte Betrachtung zu Rate gezogen werden kann.

Die vorliegenden Beispiele gehen über den „Leitfaden Tragwerk FMEA“ hinaus, indem sie auch die Leistungsphasen Ausführungsplanung und Überwachung der Ausführung berücksichtigen.

[1] Seim, W.; Vogt, T.: Leitfaden Tragwerk-FMEA (im Abschlussbericht des Forschungsprojekts „Präventive Qualitätssicherung in der computerbasierten Tragwerksplanung durch Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse“). Kassel; 2011.

Allgemeine Erklärung und Hinweise

(vgl. Anhang 3 und 5)

Erklärung der Tabellenspalten

- Spalte „Mögliche Fehlerfolgen“

Mögliche Fehlerfolgen, die durch die jeweiligen Fehlerarten hervorgerufen werden können:

Beschreibung der Fehlerfolgen	B
- Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5
- große Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem	4
- Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet	
- keine (wirtschaftliche) Instandsetzung durchführbar	
- mittlere Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem	3
- Tragfähigkeit ist eingeschränkt	
- Instandsetzung zur Gewährleistung der Tragfähigkeit mit mittlerem Aufwand verbunden	
- geringe Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem	2
- Tragfähigkeit kaum beeinträchtigt	
- kleinere Instandsetzungsmaßnahmen notwendig	
- keine Beeinträchtigung des Tragwerks	1

Die Fehlerfolgen beziehen sich direkt auf die jeweilige Fehlerart.

- Spalte „B“

Bewertungszahl für die Bedeutung der Fehlerfolge. Je größer die Zahl, desto größere Auswirkungen hat das Eintreten der zugehörigen Fehlerart.

- Spalte „Mögliche Fehlerarten“

Mögliche Fehlerarten, die bei dem Bauteil auftreten können. Die gesamte Bewertung baut auf diese auf, die zugehörigen Fehlerfolgen und Fehlerursachen werden ermittelt und bewertet.

- Spalte „Mögliche Fehlerursachen“

Mögliche Fehlerursachen, die zu den genannten Fehlerarten führen können. Die Fehlerursachen können nicht direkt einer bestimmten Fehlerart zugewiesen werden; jede Fehlerursache kann zu jeder Fehlerart führen.

- Spalte „Vermeidungsmaßnahmen“

Maßnahmen, die das Ziel haben die Entstehung der jeweiligen Fehlerursache zu vermeiden. In der Regel werden Maßnahmen erst ergriffen, wenn durch die Risikoprioritätszahl ein zu hohes Risiko diagnostiziert wurde.

- Spalte „Ausnutzungsgrad“

Ausnutzungsgrad des Bauteils. Ein hoher Ausnutzungsgrad erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass eine Fehlerursache auch einen Fehler und damit eine Fehlerfolge nach sich zieht.

- Spalte „A“

Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache. Je nach Ausnutzungsgrad und durchgeführter Vermeidungsmaßnahme variiert der Wert. Genauere Hintergründe der Zahlen können Kapitel 2.7 des Leitfadens entnommen werden.

- Spalte „Entdeckungsmaßnahmen“

Maßnahmen, die das Ziel haben bereits entstandene Fehler noch in der jeweiligen Projektphase zu entdecken. In der Regel werden Maßnahmen erst ergriffen, wenn durch die Risikoprioritätszahl ein zu hohes Risiko diagnostiziert wurde.

- Spalte „E“

Bewertungszahl für die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache. Einflussgrößen sind u.a. die Komplexität des Bauteils und die durchgeführten Entdeckungsmaßnahmen. Genauere Hintergründe der Zahlen können Kapitel 2.7 des Leitfadens entnommen werden.

- Spalte „RPZ“

Ermittlung der Risikoprioritätszahl (RPZ): $RPZ = B * A * E$. Je höher die Zahl, desto größer ist das Risiko das von dem betrachteten Bauteil ausgeht. Zur Berechnung werden die jeweils größten Werte aus den Spalten B, A und E verwendet. Wenn die RPZ zu hoch ist, können Maßnahmen ergriffen werden um die Zahl zu reduzieren (s. Formblätter).

- Spalte „Verantwortlicher/Termin“

Bestimmung einer Person, die für die Durchführung der Maßnahme bis zu einem Stichtag verantwortlich ist.

Hinweise zu Inhalten der Formblätter

Die aufgeführten Fehlerursachen sind unterteilt in die Bereiche Entwurf- und Ausführungsplanung, Erstellung der Ausführungsunterlagen (farblich abgehoben) und Ausführungsphase. Die angegebenen Bewertungszahlen A und E (Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten) berücksichtigen bereits die Eigenschaften eines typischen mehrgeschossigen Mauerwerksbaus. Somit können unter Angabe des Ausnutzungsgrads und der Maßnahmen die durchgeführt werden sollen, diese beiden Bewertungszahlen direkt abgelesen werden. Die Festlegung der Bewertungszahl B für die Bedeutung der Fehlerfolgen ist bauwerksspezifisch und muss individuell erfolgen.

4.3.2 Beispiel Mauerwerksbau

Beschreibung des betrachteten Gebäudes

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus mit einer Unterkellerung (vgl. Abb. A1 bis A6). Das Dach des Gebäudes hat eine Neigung von 25° und die Dachkonstruktion wird in Holzbauweise erstellt. Die Außenwände bestehen aus wärmedämmenden Hochlochziegeln (LHLzW 8–0,8) mit Leichtmörtel (LM 21), die tragenden Innenwände aus Hochlochziegeln (HLz 12-1,2) mit Normalmörtel (NM IIa). Die 18cm dicken Stahlbetondecken wirken als aussteifende Deckenscheiben. Die Auflagertiefe der Decken auf den Außenwänden beträgt 18cm. Im Bereich der Deckenaufleger ist auf der Unter- und Oberseite jeweils eine Trennlage (besandete Bitumendachbahn nach DIN 52128-R500) angeordnet.

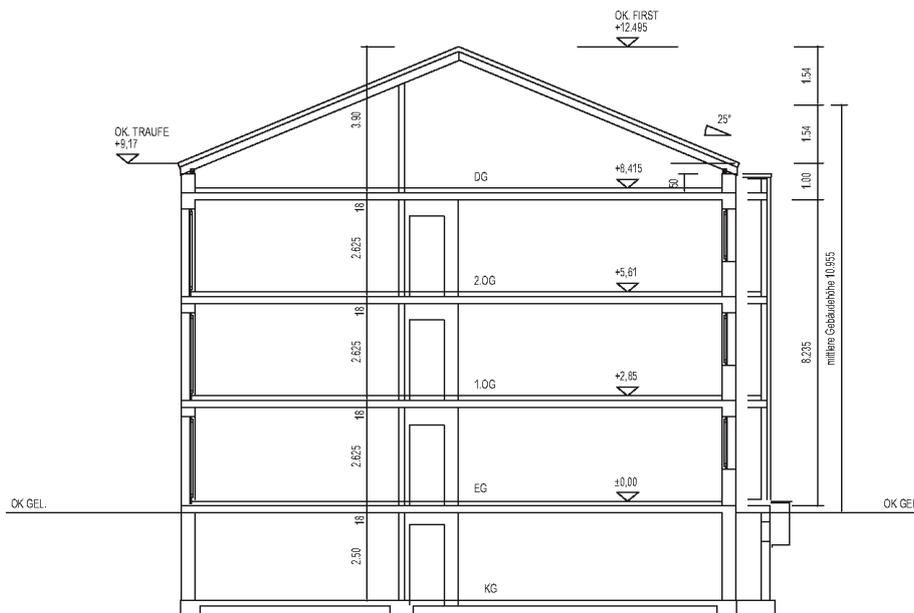


Abbildung A1: Schnitt des Mehrfamilienhauses [2]

[2] Brauer, N.; Ehmke, J.; Figge, D.; Meyer, U.: Bemessung von Ziegelmauerwerk. Hrsg.: Arbeitsgemeinschaft Mauerziegel im Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e.V., Bonn; 2006.

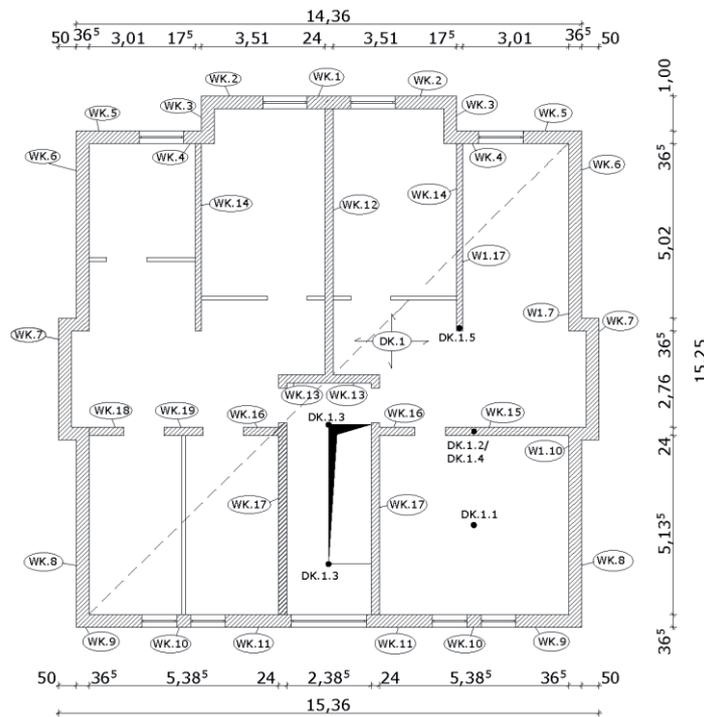


Abbildung A2: Grundriss des Kellergeschosses nach [2]

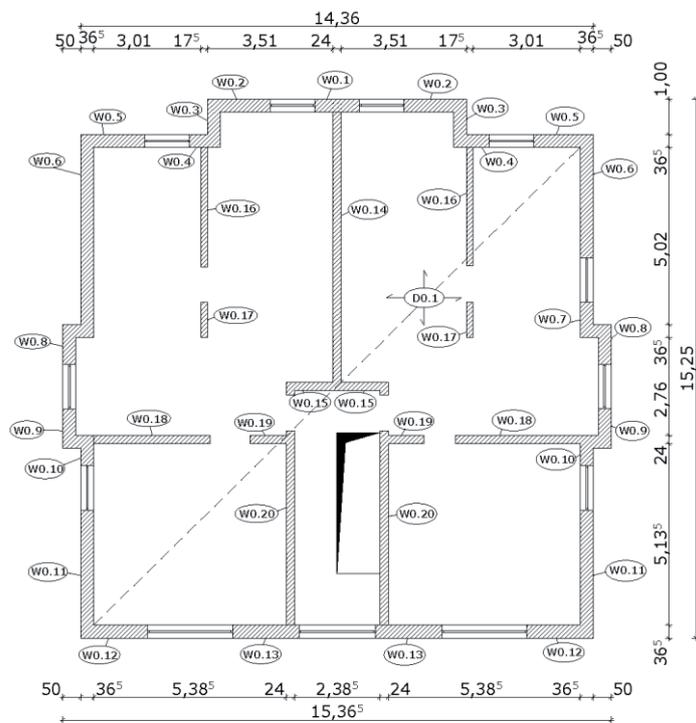


Abbildung A3: Grundriss des Erdgeschosses nach [2]

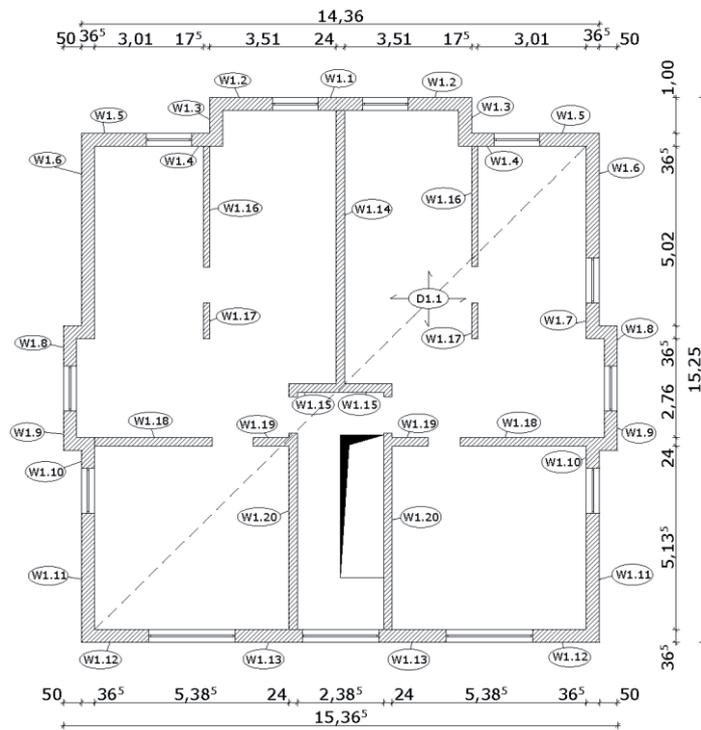


Abbildung A4: Grundriss des 1. Obergeschosses nach [2]

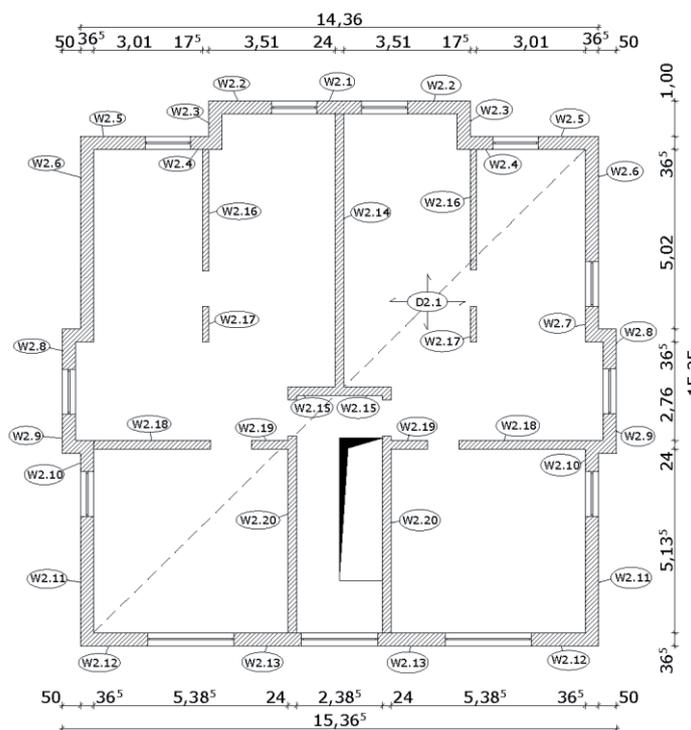


Abbildung A5: Grundriss des 2. Obergeschosses nach [2]

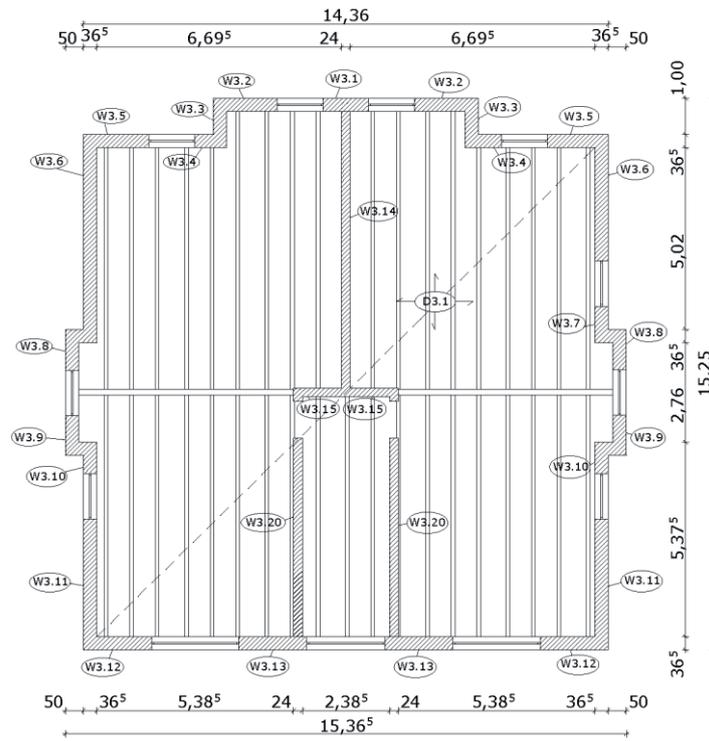


Abbildung A6: Grundriss des Dachgeschosses nach [2]

Durchführung der FMEA

Bei der Anwendung der Tragwerk-FMEA müssen grundsätzlich erst einmal alle Bauteile betrachtet werden. Es kann allerdings eine Gruppierung ähnlicher Bauteile erfolgen. Die Risikobewertung muss dann nur für die in einer jeweiligen Gruppierung maßgebenden Bauteile durchgeführt werden. Wenn bei diesen Bauteilen Maßnahmen ergriffen werden, gelten diese automatisch auch für die offensichtlich weniger beanspruchten Bauteile. Wenn dies nicht gewünscht ist muss für die betroffenen Bauteile ein eigenes Formblatt erstellt werden.

Im betrachteten Anwendungsbeispiel sind die Grundrisse und die verwendeten Materialien des Erdgeschosses und der darüber liegenden Geschosse identisch. Die Risikobewertung wird für das Erd- und das Kellergeschoss durchgeführt. Die Bauteile des Anwendungsbeispiels können in folgender Weise gruppiert werden:

Art des Bauteils	maßgebendes Bauteil	weniger beanspruchte Bauteile
Außenwand EG	W0.13	W0.1 – W0.12
Innenwand (stützenartig) EG	W0.17	W0.15
Innenwand EG	W0.18	W0.14, W0.16, W0.19, W0.20
Stahlbetondecke KG	DK.1	-
Außenwand KG	WK.11	WK.1 – WK.10
Innenwand (stützenartig) KG	WK.13	-
Innenwand KG	WK.15	WK.12, WK.14, WK.16 – WK.19

Auf den Formblättern wurden die Bewertungszahlen für dieses Bauwerk ermittelt. Daraus wurden die zugehörigen Risikoprioritätszahlen berechnet. Der Maximalwert der RPZ wurde auf 40 festgelegt. Aufgrund der Überschreitung des Wertes bei den meisten betrachteten Bauteilen, wurden verschiedene Vermeidungsmaßnahmen ergriffen um das Risiko zu reduzieren. Dadurch konnte die RPZ auf maximal 36, also unterhalb der Grenze von 40, reduziert werden.

4.3.3 Formblätter zu Mauerwerksbau

Mauerwerkswand W0.13		Außenwand, vertikale und horizontale Beanspruchung					Mögliche Fehlerursachen		Vermeidungsmaßnahmen		Ausnutzungsgrad		A		Entdeckungsmaßnahmen		E		RPZ		Verantwortlicher/ Termin	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher/ Termin												
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vorwiegend vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% <input type="checkbox"/> 5 60-85% <input type="checkbox"/> 4 < 60% <input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	36	N.N., 20.06.2011												
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druckversagen im Auflagerbereich		zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1																
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	36													
					> 85% <input type="checkbox"/> 5 60-85% <input type="checkbox"/> 4 < 60% <input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4														
			Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input type="checkbox"/> 3	36	N.N., 20.06.2011												
			falsche Verwendung von Steinen und/oder Mörtel	einfache Plausibilitätskontrolle Stein- und Mörtelklassen in Zeichnungen deutlich hervorheben Stein- und Mörtelklassen im Bauwerk nicht variieren	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3														

Mauerwerkswand W0.17		stützenartige Innenwand, vertikale Beanspruchung							Verantwortlicher/ Termin
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vorwiegend vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druckversagen im Auflagerbereich		Lastmaßnahmen auf Vollständigkeit prüfen zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßeignbarkeit prüfen	60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	X 3	36 N.N., 20.06.2011
	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1			einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
			Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen	X 3	36 N.N., 20.06.2011
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
			Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	X 3	36 N.N., 20.06.2011
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3	
			falsche Verwendung von Steinen und/oder Mörtel	Stein- und Mörtelklassen in Zeichnungen deutlich hervorheben Stein- und Mörtelklassen im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Steine und Mörtel vor Verwendung gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 2	36

Mauerwerkswand W0.18		Innenwand, vertikale und horizontale Beanspruchung					Verantwortlicher/ Termin		
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vorwiegend vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druckversagen im Auflagerbereich		Lastmaßnahmen auf Vollständigkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	<input type="checkbox"/> 3	36 N.N. 22.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen	<input type="checkbox"/> 3	36
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
			Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input checked="" type="checkbox"/> 3	36 N.N. 22.06.2011
			falsche Verwendung von Steinen und/oder Mörtel	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 3	
				Stein- und Mörtelklassen in Zeichnungen deutlich hervorheben	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Steine und Mörtel vor Verwendung gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 2	27
				Stein- und Mörtelklassen im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1			

Stahlbetondecke DK.1		Decke u.a. mit Aussparung und stützenartiger Lagerung						Verantwortlicher/ Termin	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Feld (maßgebend Bereich DK.1.1)	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Auflagerbereich (maßgebender Bereich DK.1.2)		Lastannahmen auf Vollständigkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	X 3	36 N.N. 22.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Bereich von Aussparungen (maßgebender Bereich: DK.1.3)	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßeignbarkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Schubversagen im Auflagerbereich (maßgebender Bereich DK.1.4)		einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Durchstanzen im Bereich stützenartiger Wände (maßgebender Bereich: DK.1.5)		"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input type="checkbox"/> 3	36 N.N. 22.06.2011
			keine ausreichende Verdichtung des Betons an kritischen Stellen	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3	
			falsche Bewehrung bzw. Bewehrung falsch angeordnet	Verwendung von selbstverdichtendem Beton	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Überwachung der Betonierarbeiten	<input type="checkbox"/> 2	27
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3	
				Kontrolle der Bewehrungs- zeichnungen auf Eindeutigkeit und leichte Verständlichkeit	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Überprüfung der Bewehrung vor dem Betonieren	<input type="checkbox"/> 2	27

Mauerwerkswand WK.11		Außenwand, vertikale und horizontale Beanspruchung						Verantwortlicher/ Termin	
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vorwiegend vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druckversagen im Auflagerbereich		Lastannahmen auf Vollständigkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	<input type="checkbox"/> 3	N.N. 20.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung		zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1			N.N. 20.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegedruck- oder Plattenschubversagen infolge Plattenbeanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	keine Maßnahme	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	keine Maßnahme	<input type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Gleiten in der Fuge zu Bodenplatte		vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen	<input checked="" type="checkbox"/> 3	N.N. 20.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1			einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1		Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input type="checkbox"/> 3	N.N. 20.06.2011
			falsche Verwendung von Steinen und/oder Mörtel	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 3	
				Stein- und Mörtelklassen in Zeichnungen deutlich hervorheben	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Steine und Mörtel vor Verwendung gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 2	36
				Stein- und Mörtelklassen im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1			
			falsche Verfüllung der Baugrube (zu hoher Erddruck)	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 3	
				Hinweise zum richtigen Verfüllen auf Zeichnungen angeben	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Überwachung der Verfüllungsarbeiten	<input type="checkbox"/> 2	N.N. 20.06.2011

Mauerwerkswand WK.13		stützenartige Innenwand, vertikale Beanspruchung										Verantwortlicher/ Termin
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Mögliche Fehlerarten Stabilitätsversagen: Knicken infolge vorwiegend vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle Lastannahmen auf Vollständigkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4				
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Mögliche Fehlerarten Druckversagen im Auflagerbereich		zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßeiglichkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1						
			Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4				
					> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4				
			Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	X 3	36		N.N. 20.06.2011	
			falsche Verwendung von Steinen und/oder Mörtel	einfache Plausibilitätskontrolle Stein- und Mörtelklassen in Zeichnungen deutlich hervorheben	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3				
				Stein- und Mörtelklassen im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1	Steine und Mörtel vor Verwendung gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 2	27			

4.3.4 Beispiel Holzbau

Beschreibung des betrachteten Gebäudes

Bei dem Gebäude handelt es sich um ein dreigeschossiges Einfamilienhaus mit einer Unterkellerung (vgl. Abb. A7 bis A11). Bei dem Dach handelt es sich um ein Flachdach, wobei sich das oberste Geschoss nur über die Hälfte erstreckt, der restliche Bereich wird als Dachterasse genutzt. Die Außenwände bestehen aus beidseitig beplankten Holztafelelementen, die nichttragenden Innenwände aus einer Leichtbaukonstruktion. Die Decken werden als Brettstapeldecke ausgeführt. In der Mitte des Erd- und Obergeschosses ist jeweils ein durchgehender Unterzug aus Holz angeordnet, der auf zwei Stahlstützen und den Außenwänden aufliegt. Der Keller besteht aus Stahlbetonwänden mit einer Stahlbetondecke.

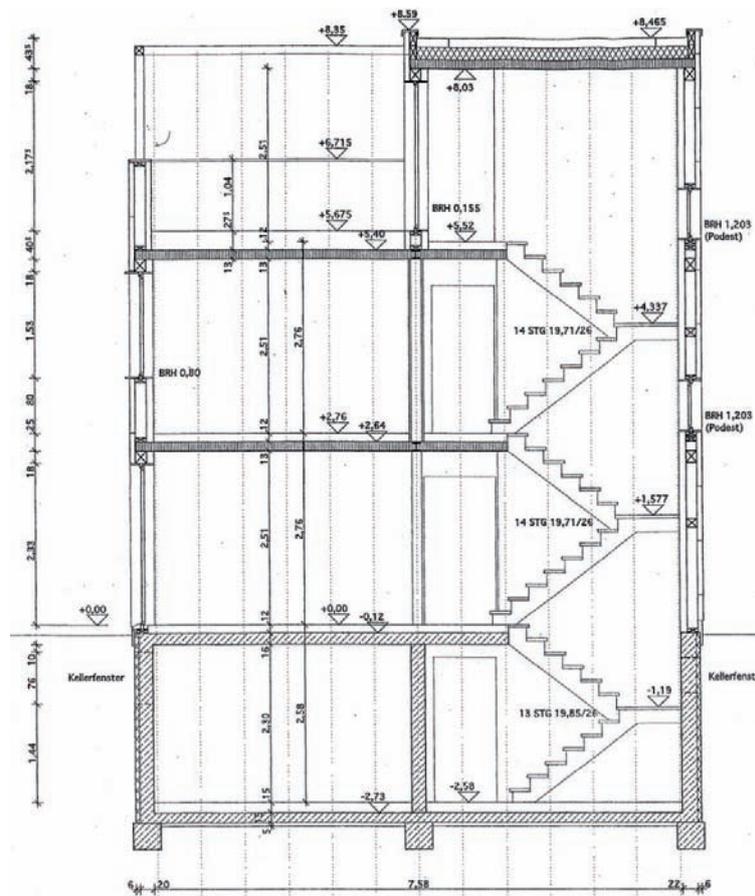


Abbildung A7: Schnitt des Würfelhauses

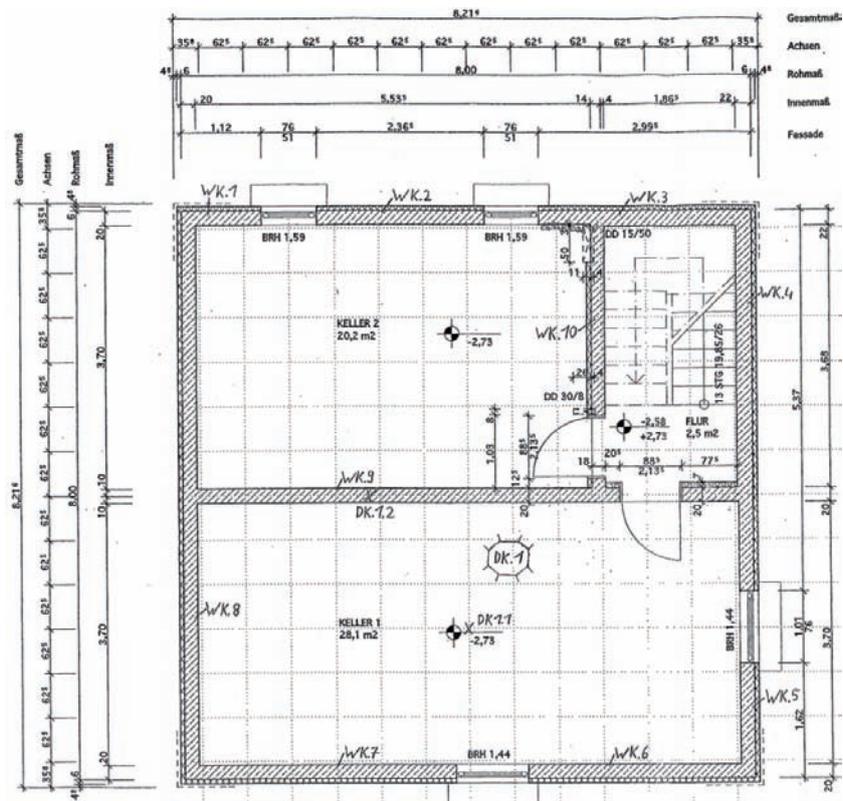


Abbildung A8: Grundriss Kellergeschoss

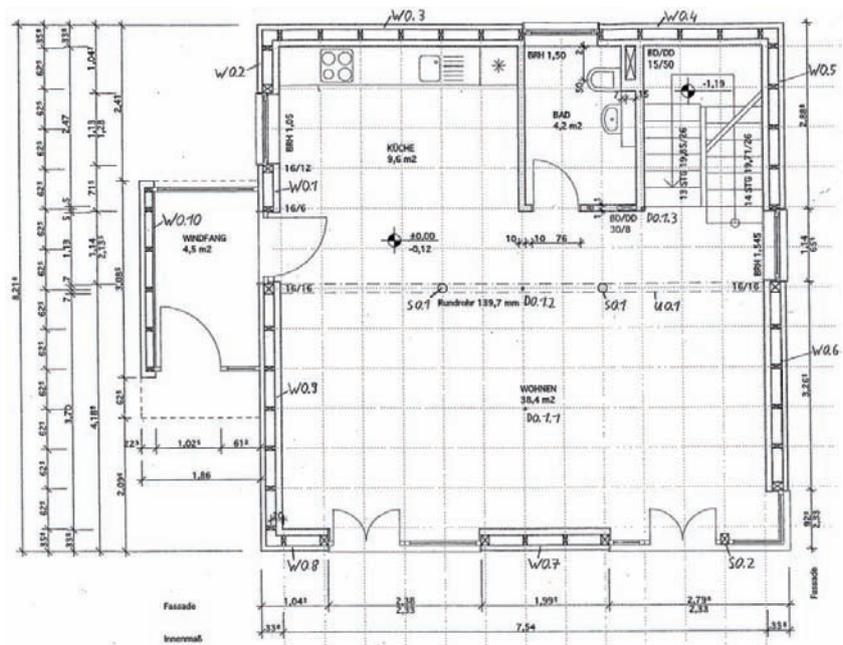


Abbildung A9: Grundriss Erdgeschoss

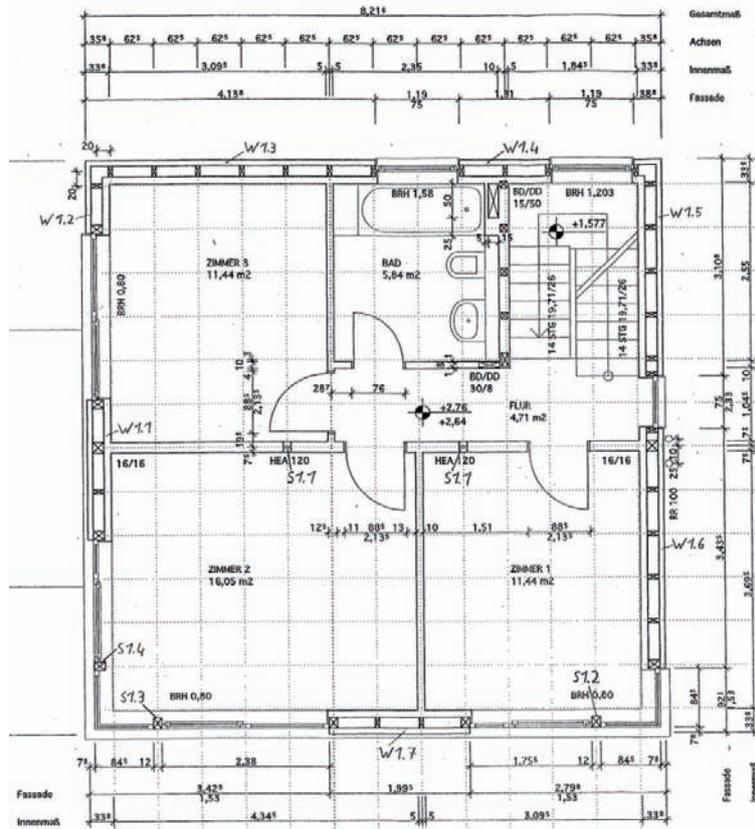


Abbildung A10: Grundriss Obergeschoss

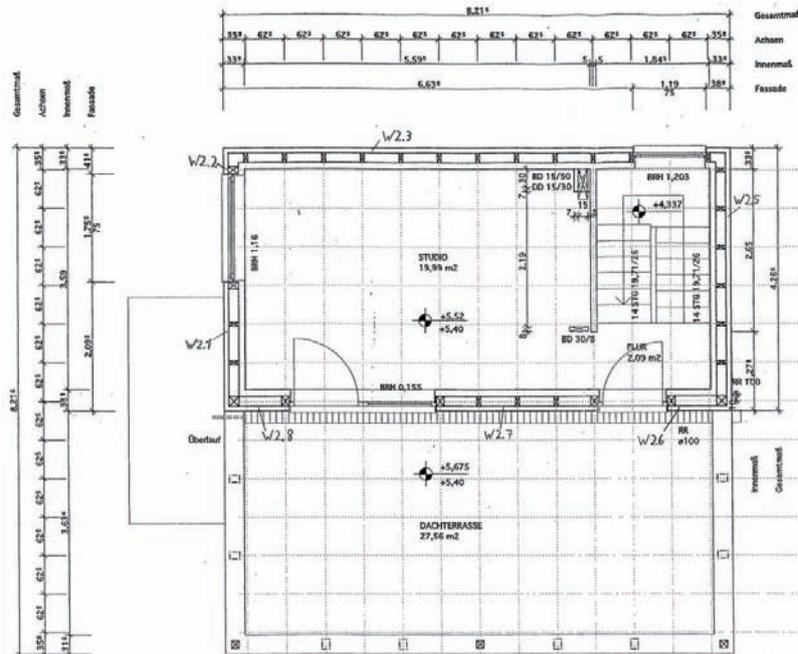


Abbildung A11: Grundriss Dachgeschoss

Durchführung der FMEA

Bei der Anwendung der Tragwerk-FMEA müssen grundsätzlich erst einmal alle Bauteile betrachtet werden. Es kann allerdings eine Gruppierung ähnlicher Bauteile erfolgen. Die Risikobewertung muss dann nur für die in einer jeweiligen Gruppierung maßgebenden Bauteile durchgeführt werden. Wenn bei diesen Bauteilen Maßnahmen ergriffen werden, gelten diese automatisch auch für die offensichtlich weniger beanspruchten Bauteile. Wenn dies nicht gewünscht ist muss für die betroffenen Bauteile ein eigenes Formblatt erstellt werden.

Im betrachteten Anwendungsbeispiel sind die Grundrisse und die verwendeten Materialien des Erdgeschosses und der darüber liegenden Geschosse im Wesentlichen identisch. Die Risikobewertung wird für das Erd- und das Kellergeschoss durchgeführt zu werden. Die Bauteile des Anwendungsbeispiels können in folgender Weise gruppiert werden:

Art des Bauteils	maßgebendes Bauteil	weniger beanspruchte Bauteile
Außenwand EG	W0.7	W0.1 – W0.6, W0.8 – W0.10, S0.2
Holzbalkenunterzug EG	U0.1	-
Stahlstütze EG	S0.1	-
Brettstapeldecke EG	D0.1	-
Stahlbetondecke KG	DK.1	-
Außenwand KG	WK.2	WK.1, WK.3 – WK.8
Innenwand KG	WK.9	WK.10

Auf den Formblättern wurden die für dieses Bauwerk Bewertungszahlen ermittelt. Daraus wurden die zugehörigen Risikoprioritätszahlen berechnet. Der Maximalwert der RPZ wurde auf 40 festgelegt. Aufgrund der Überschreitung des Wertes bei einigen der betrachteten Bauteile, wurden verschiedene Vermeidungsmaßnahmen ergriffen um das Risiko zu reduzieren. Dadurch konnte die RPZ auf maximal 36, also unterhalb der Grenze von 40, reduziert werden.

4.3.5 Formblätter zu Holzbau

Stahlbetonwand WK.2		Außenwand, vertikale und horizontale Beanspruchung						RPZ	Verantwortlicher/ Termin
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% <input type="checkbox"/> 5 60-85% <input type="checkbox"/> 4 < 60% <input type="checkbox"/> 3	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druck- bzw. Schubversagen infolge horizontaler und vertikaler Beanspruchung		zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	<input type="checkbox"/> 3	N.N. 20.06.2011
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegedruck- oder Plattenschubversagen infolge Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenmittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Risse aus Schwinden und Abfließen der Hydratationswärme	Fehler in Ausführungszeichnungen	einfache Plausibilitätskontrolle "Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	
			falsche Bewehrung bzw. Bewehrung falsch angeordnet	einfache Plausibilitätskontrolle Kontrolle der Bewehrungszeichnungen auf Eindeutigkeit und leichte Verständlichkeit	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	
			falsche Verfüllung der Baugrube (zu hoher Erddruck)	einfache Plausibilitätskontrolle Hinweise zum richtigen Verfüllen auf Zeichnungen angeben	> 85% <input type="checkbox"/> 4 60-85% <input checked="" type="checkbox"/> 3 < 60% <input type="checkbox"/> 2	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	

Brettstapeldecke DO.1		Decke u.a. mit Aussparung		Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher/ Termin
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher/ Termin	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Feld (maßgebend Bereich DO.1.1)	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Auflagerbereich (maßgebender Bereich DO.1.2)	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	Lastmaßnahmen auf Vollständigkeit prüfen zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	X 3	36	N.N. 22.06.2011	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Bereich von Aussparungen (maßgebender Bereich: DO.1.3)	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle vollständige Vergleichsberechnung durchführen	X 4 <input type="checkbox"/> 3	36	N.N. 22.06.2011	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Schubversagen im Auflagerbereich (maßgebender Bereich DO.1.2)	Fehler in Ausführungszeichnungen	einfache Plausibilitätskontrolle "Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	X 4 <input type="checkbox"/> 3	36	N.N. 22.06.2011	
			Falsche Konstruktion der Auswechslung im Bereich der Treppenöffnung	einfache Plausibilitätskontrolle Kontrolle der Zeichnungen auf Eindeutigkeit und leichte Verständlichkeit	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle Überwachung der Arbeiten im Bereich der Treppenöffnung	<input type="checkbox"/> 4 X 3	36	N.N. 22.06.2011	
			keine ausreichende Übergreifungslänge der Bretterstöße	einfache Plausibilitätskontrolle Kontrolle der Zeichnungen auf Eindeutigkeit und leichte Verständlichkeit	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle stichprobenartige Überprüfung der Deckenarbeiten	<input type="checkbox"/> 4 X 3	36	N.N. 22.06.2011	

Holztafelwand W0.7		Außenwand, vertikale und horizontale Beanspruchung					Verantwortlicher/ Termin		
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen infolge horizontaler Beanspruchung (Versagen der VM, Beulen der Beplankung)	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßeignbarkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	<input type="checkbox"/> 3	36
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen der Zugverankerung am Fußpunkt		einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen aufgrund Schwellenpressung am Fußpunkt		vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1	vollständige Vergleichsberechnung durchführen	<input type="checkbox"/> 3	24
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
			Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input type="checkbox"/> 3	24
			falsche Verbindungsmittel bzw. Abstände nicht eingehalten	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
			Verwendung unsachgemäßer Materialien (zu hoher Feuchtegehalt in Holz, falsche Güte der Beplankung)	Art und Abstände der Verbindungsmitel in Zeichnungen deutlich Art und Abstände der Verbindungsmitel im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Art der Verbindungsmittel vor Verwendung gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 3	36
				einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4	
				maximalen Feuchtegehalt bei Bestellung ausdrücklich angeben	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1	Feuchtegehalt auf der Baustelle vor Verwendung bestimmen	<input type="checkbox"/> 3	24
				Bauteilgütern im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 1 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1	Bauteilgütern gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 2	

Stahlstütze S0.1		Rundrohr, nur vertikale Beanspruchung					Verantwortlicher/ Termin		
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Druckversagen (Auflager) infolge vertikaler Beanspruchung	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Stabilitätsversagen: Knicken infolge vertikaler Beanspruchung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder gewählte statische Modell auf Querschnittsbemessung	Lastmaßnahmen auf Vollständigkeit prüfen zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	X 3	36 N.N., 20.06.2011
				vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	
					> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen	<input type="checkbox"/> 3	36
					> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 4	
				"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Kontrolle der Zeichnungen vor Weitergabe durch Statiker	<input type="checkbox"/> 3	36
					> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3	
				Verwendung der falschen Stahlgüte oder zu geringer Materialdicken	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Materialgüten und Querschnittsabmessungen gezielt mit Zeichnungen	<input type="checkbox"/> 2	27
				Materialgüten im Bauwerk nicht variieren	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 2 <input checked="" type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 1			
				unsachgemäße Ausführung der Verbindung zu Stahlbetondecke (unten)	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	einfache Plausibilitätskontrolle	X 3	
					> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input checked="" type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	genaue Vorgabe der Detailausführung	<input type="checkbox"/> 2	27

Holzbalkenunterzug U0.1		3-Feld-Träger, stützenartig gelagert		Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher/ Termin
Mögliche Fehlerfolgen	B	Mögliche Fehlerarten	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	Ausnutzungsgrad	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher/ Termin	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Feld	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	einfache Plausibilitätskontrolle	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Biegeversagen im Bereich der Innenstützen	Fehler in Lastermittlung und Lastkombination	Lastmaßnahmen auf Vollständigkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	vollständige Vergleichsberechnung durchführen (alle LK)	<input checked="" type="checkbox"/> 3	36	N.N. 20.06.2011	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Schubversagen im Auflagerbereich	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	zusätzlich mehrere mögliche Lastkombinationen auf Maßgeblichkeit prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	Fehler in Schnittgrößenermittlung oder Querschnittsbemessung	einfache Plausibilitätskontrolle vor der Berechnung das gewählte statische Modell auf Plausibilität prüfen	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	Fehler in Ausführungszeichnungen	"Übergabebesprechung" zwischen Statiker und Zeichner	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	Fehler in Ausführungszeichnungen	keine Maßnahme	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2	keine Maßnahme	<input checked="" type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	zu große Querverpressung aufgrund zu kleiner Kopfplatten	Abmessungen und Dicke der Kopfplatten in Zeichnungen deutlich hervorheben	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Abmessungen und Dicke der Kopfplatten vor Einbau gezielt mit Zeichnungen abgleichen	<input type="checkbox"/> 3	36	N.N. 20.06.2011	
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	zu geringe Auflagertiefe am Rand	einfache Plausibilitätskontrolle exakte Längen und Feuchtegehalt des Unterzugs sowie Auflagertiefen angeben	> 85% 60-85% < 60%	<input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	einfache Plausibilitätskontrolle	<input checked="" type="checkbox"/> 4			
Versagen große Schäden mittlere Schäden geringe Schäden keine Beeinträchtigung	<input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 4 <input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Versagen im Auflagerbereich aufgrund zu hoher Querverpressung	zu geringe Auflagertiefe am Rand	einfache Plausibilitätskontrolle exakte Längen und Feuchtegehalt des Unterzugs sowie Auflagertiefen angeben	> 85% 60-85% < 60%	<input checked="" type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 1	Einbau des Unterzugs überwachen	<input type="checkbox"/> 3	36	N.N. 20.06.2011	

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 4.11: Mögliche Entdeckungsmaßnahmen zur Risikoreduzierung

Literaturverzeichnis

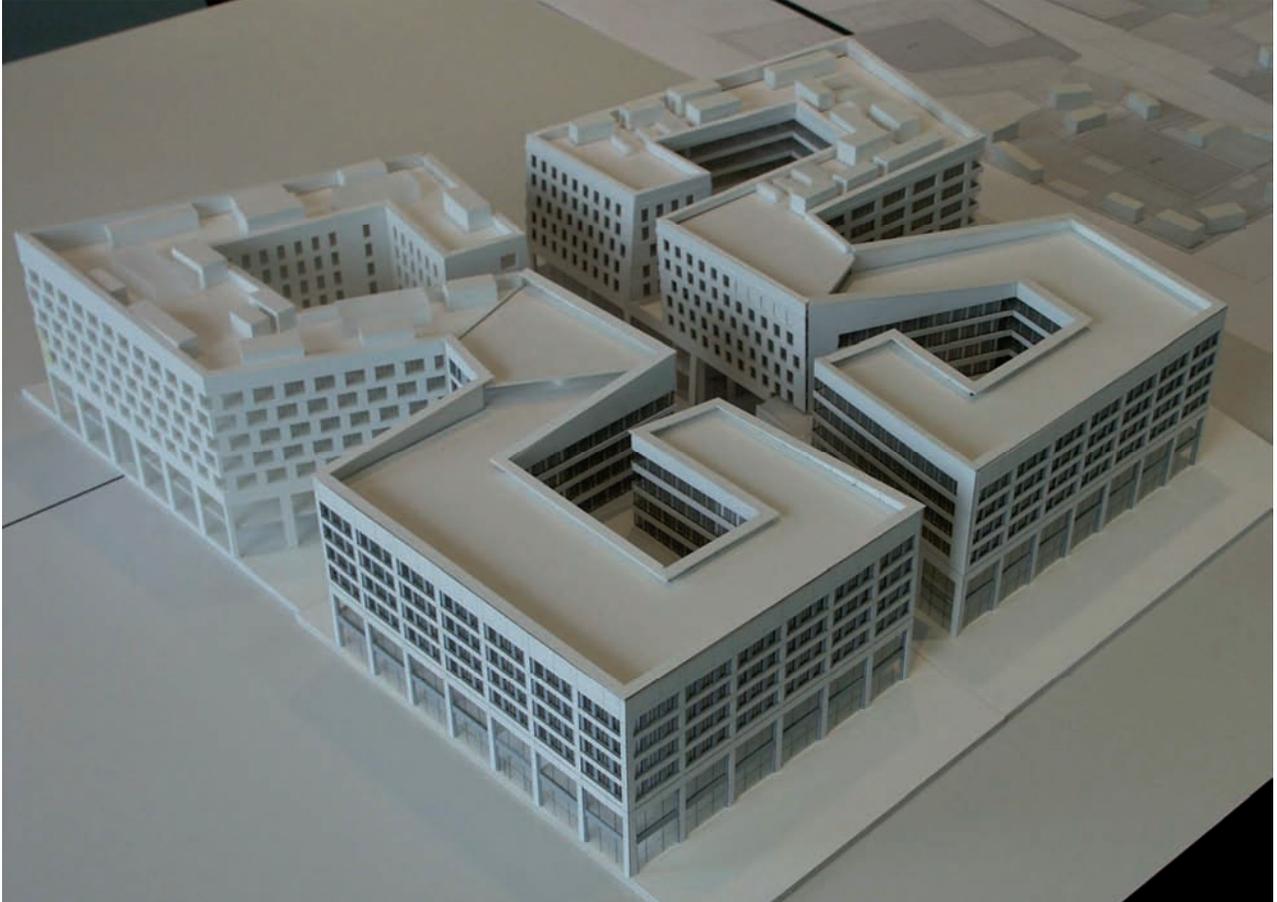
- [DIN06] *DIN EN 60812:2006; Analysetechniken für die Funktionsfähigkeit von Systemen - Verfahren für die Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA)*. 2006.
- [Dre09] DRESSEL, B.: *Die Rolle des Prüflingenieurs im System der vorbeugenden Gefahrenabwehr*. Stahlbau 78, Heft 3, Ernst & Sohn Verlag:214–220, 2009.
- [e.V08] E.V., VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (Herausgeber): *Entwurf der VDI-Richtlinie 6200: Standsicherheit von Bauwerken - Regelmäßige Überprüfung*. VDI-Gesellschaft Bautechnik, 2008.
- [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 (als Download unter www.tragwerk-fmea.de), 2009.

5 Fallstudien Ingenieurbüros

5.2 Bericht zur FMEA-Sitzung im Teilprojekt WTM

5.2.1 Projekt

Das von der WTM Engineers GmbH betrachtete Projekt besteht aus dem mehrgeschossigen Büro- und Geschäftshauskomplex SPV 17-20 in der HafenCity Hamburg.



Das auf einer separat geplanten Tiefgarage errichtete siebengeschossige Gebäudeensemble besteht aus vier einzelnen Baukörpern, die jeweils als fugenloser Stahlbetonskelettbau konzipiert sind. In den Bürogeschossen 2. OG bis 6. OG sind die Baukörper 17 und 19 sowie 18 und 20 durch brückenartige Konstruktionen miteinander verbunden, die über dem 1. OG abgefangen werden.

Die vertikale Aussteifung der Gebäude erfolgt durch die Stahlbetonwandscheiben der Treppenhaus- und Aufzugskerne. Die aussteifenden Bauteile werden in der Regel bis auf die Pfahlgründung geführt. Alle tragenden Innenwände werden aus Stahlbeton hergestellt.

In den Bürogeschossen kommen Stahlbetonflachdecken zum Einsatz, in den Retailgeschossen aufgrund der großen Spannweiten Stahlbetonbalkendecken. Das Tragwerksraster in den unteren beiden Geschossen (EG und 1. OG) ist auf eine effektive Aufstellung der PKW-Stellplätze in der Tiefgarage sowie auf die Retailflächen ausgerichtet. Es beträgt 8,10 x 11,20 m. Für die unterzuglosen Bürogeschosse ist ein Wechsel des Tragwerksrasters auf ca. 5,40 bis 8,10 m vorgesehen. Oberhalb des 1. Obergeschosses ist eine Abfangebene mit bis zu 1,70 m hohen Unterzügen für die darüber liegenden Bürogeschosse geplant. Das Erdgeschoss erhält aus Flexibilitätsgründen Balkendecken mit bis zu 0,85 m Höhe.

Das Dachtragwerk, auf dem die Haustechnik platziert wird, besteht analog zu den Bürogeschossdecken aus punktgestützten Flachdecken aus Stahlbeton. Die Attika wird aus Stahlbeton hergestellt, um die Windkräfte der bis zu 3,2 m hohen Auskragungen aufnehmen zu können.

Die Außenwände sind im Bereich der Ladennutzung in großen Flächen verglast. Die Außenwände der Bürogeschosse ab dem 2. Obergeschoss bestehen aus tragenden Stahlbetonwandscheiben (Lochfassade) mit einer Vorsatzschale aus Ziegelmauerwerk bzw. einer Betonsteinverkleidung und sind teilweise geneigt. In Teilbereichen ist die Ausbildung der Außenwände als Stützenkonstruktion mit nicht tragenden Ausfachungen geplant.



Um die Stahlbetonstützen und Stahlbetonwände in ihren Abmessungen zu optimieren, werden hochwertige Betone eingesetzt. In den Retailgeschossen können auch Verbundstützen zum Einsatz gelangen, um ein Maximum an Verkaufsfläche zu erhalten.

5.2.2 FMEA-Sitzung

Auf der Grundlage zweier im Rahmen des Gesamtprojektes erstellter Diplomarbeiten wurde für das im Teilprojekt der WTM Engineers GmbH bearbeitete SPV 17-20 im Januar 2010 eine FMEA-Sitzung durchgeführt. In den Diplomarbeiten wurde anhand eines Referenzbeispiels eine einheitliche Methodik für die Tragwerk-FMEA, die unter Praxisbedingungen benutzt werden kann, entwickelt. Dabei lag das Augenmerk auf einer sinnvollen Organisation der FMEA-Sitzung, einer schnellen Erstellung der zusätzlich erforderlichen Unterlagen zur Durchführung der Tragwerk-FMEA sowie der Darstellung des ingenieurmäßigen Schlussfolgerns zur Bestimmung der Fehlerfolgen auf System- und Tragwerksebene. Diese Methodik sollte anschließend in einem tatsächlich in Planung befindlichen Projekt erprobt werden.

Die FMEA-Sitzung wurde kurz vor Abschluss der Leistungsphase 3 – Entwurfsplanung durchgeführt. Der Tragwerksentwurf war zu diesem Zeitpunkt in den wesentlichen Teilen vom Planungsteam durchgearbeitet und sollte im Zuge der Qualitätssicherung vor der Weitergabe an den Auftraggeber und die Fachplaner entsprechend geprüft werden. Als Unterlage für die Vorstellung des Tragwerksentwurfes dienten die Zeichnung des Architekten, in die handschriftlich die wesentlichen Konstruktionen eingetragen waren, sowie skizzenhafte Darstellungen besonderer Konstruktionsdetails. Vorgestellt wurde der Entwurf von der Projektleiterin und dem sie bei der Erstellung des Entwurfes unterstützenden Kollegen. Weitere Teilnehmer waren zwei erfahrene Ingenieure und ein Mitglied der Geschäftsleitung. Die Sitzung wurde in dem anhängenden Protokoll niedergeschrieben. Für die Dokumentation der Diskussionsergebnisse wurden die FMEA-

Formblätter aus der Diplomarbeit von Herrn Liening verwendet. Die Bewertungskriterien zur Ermittlung der Risikoprioritätszahl werden ebenfalls der Diplomarbeit von Herrn Liening entnommen.

Aus der Diskussion während der FMEA-Sitzung ergeben sich für die Weiterentwicklung der Tragwerk-FMEA zwei wesentliche Fragestellungen.

- Wie lässt sich die Zuordnung der Bewertungskriterien, insbesondere für die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, die offensichtlich stark von der persönlichen Einschätzung jeden Teilnehmers abhängig sind, objektivieren?
- Wie können die in den Formblättern festgehaltenen Maßnahmen wirksam über alle Leistungsphasen bis zur Ausführung verfolgt werden?

Tragwerksentwurfsvorstellungen als kritische Durchsicht der entwickelten Entwürfe sind bei der WTM Engineers GmbH ein wesentlicher Bestandteil des Qualitäts-Management-Systems. Die in den oben erwähnten Diplomarbeiten entwickelte Methodik kann in jedem Falle dazu dienen, diese Qualitätssicherungsmaßnahme besser zu strukturieren und zu dokumentieren.

FMEA-Sitzungs-Protokoll

Projekt	SPV 17-20	
Projektnummer	10750	
Datum	13.01.2010	09:00 – 11:00
Teilnehmer	Frau Dr.-Ing. Thiesemann	Projektleiterin
	Frau Dipl.-Ing. Luft	erfahrene Ingenieurin
	Herr Dipl.-Ing. Schöne	Aufsteller
	Herr Dipl.-Ing. Lüdders	erfahrener Ingenieur
	Herr Dr.-Ing. Steffens	Geschäftsleitung

Einführung

Frau Dr. Thiesemann stellt zu Beginn der Besprechung in kurzer Form die Grundsätze der FMEA, die Ziele des Forschungsprojekts sowie unsere Erwartungen an diese FMEA-Sitzung vor.

Projektvorstellung

Nach einer kurzen Einführung in die Rahmenbedingungen des Gesamtprojektes stellen Frau Dr. Thiesemann und Herr Schöne die wesentlichen Konstruktionen des Projektes vor. Als Grundlage dienen die aktuellen Architektenpläne, Architektenpläne älteren Datums mit handschriftlichen Eintragungen der Konstruktionen sowie skizzenhafte Darstellungen besonderer Konstruktionsdetails.

Diskussion

Im Zuge der Projektvorstellung werden die folgenden Konstruktionen als kritisch herausgegriffen und diskutiert:

- Technik-Einhausung Erfassung der Lasten aus den Technik-Fundamenten, Abhängigkeit von der Wahl der Abdichtungsvarianten (Durchdringung der Abdichtungsschicht für Sogsicherung, WU-Dach, Umkehrdach)
- Flachdecken in Bezug auf die Deckendurchbiegungen kritisch, Randeinspannung in Randstützen und Kernwände angesetzt, Betonkernaktivierung: kritisch im Durchstanzbereich, häufig erst spät große Aussparungen für Einfädellung durch Haustechnikplaner
- Randunterzüge häufig Querschnittsschwächung im Zuge der Ausführungsplanung z.B. durch Aussparungen für Sonnenschutz
- Unterzüge der Abfangebene durch Haustechnikplaner spät geplante Durchbrüche, Probleme der Ausführbarkeit

- Gebäudebrücke Übergang Brücke – Gebäude kritisch, Auflagersituation auf filigranen Randstützen, Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich
- Stützen Ausführungsfehler, Setzungsdifferenzen
- Schnittstelle Unterzug – Stütze Torsion durch Exzentrizitäten

Im Anschluss an die Diskussion werden die herausgearbeiteten kritischen Bauteile und die Empfehlungen für das weitere Vorgehen in die FMEA-Formblätter aus der Diplomarbeit von Herrn Liening übertragen. Die Bewertungskriterien zur Ermittlung der Risikoprioritätszahl werden ebenfalls der Diplomarbeit von Herrn Liening entnommen. Schwierig gestaltet sich dabei die Zuordnung der Bewertungskriterien, insbesondere für die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache. Diese sind offensichtlich stark von der persönlichen Einschätzung jeden Teilnehmers abhängig. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass sich die Einschätzung im Laufe mehrerer FMEA-Sitzungen schärft. Abschließend wird überlegt, wie die in den Formblättern festgehaltenen Maßnahmen wirksam über alle Leistungsphasen bis zur Ausführung verfolgt werden können. Zwingend erforderlich ist die Weitergabe insbesondere an die Konstrukteure, die mit der Erstellung der Planunterlagen betraut sind sowie alle neu zu dem Projekt stoßenden Kollegen.

5.2 Fallstudie WERNER SOBEK

5.2.1 Einleitung

Die zunehmenden Anforderungen an die Aufgabenstellungen im Bereich der Tragwerksplanung erfordern die Anwendung neuer Methoden der Qualitätssicherung. Im Interesse der Standsicherheit neuer Gebäude werden zunehmend komplexere Fragen hinsichtlich der zu erwartenden Standsicherheit gestellt. Fragestellungen nach dem zu erwartenden Versagen einer Tragstruktur können dem entwerfenden Ingenieur wichtige Hinweise liefern, um die Schwachstellen des Tragwerks zu verbessern. Aufgrund der heute üblichen Bauweisen, die sich an den Grenzen des technisch machbaren orientieren, gewinnt die Bedeutung solcher Untersuchungen an Bedeutung.

Durch die Anwendung der FE-Methode bei der Ermittlung der Schnittgrößen kann es durchaus passieren, dass Ingenieure mit geringen Erfahrungen den Überblick für den Kraftfluss im Tragwerk verlieren. Moderne Rechenprogramme versetzen uns also in die Lage, Tragwerke zu berechnen, deren Tragverhalten wir nicht mehr durchschauen können. Somit ist auch das Erkennen und die Einschätzung versagensrelevanter Bauteile nur noch schwer möglich.

Um hier den Überblick zu bewahren, werden bei WERNER SOBEK umfangreiche Reviews erstellt. Diese werden von erfahrenen Ingenieuren durchgeführt, die den Kraftfluss auch in komplexen Strukturen analysieren können und darüber hinaus auch über Kenntnisse verfügen, wie sich Bauteile bei einer Überbeanspruchung verhalten.

Bei großen sehr komplexen Tragwerken, wie z.B. Raumfachwerken, kann die Analyse des Tragverhaltens im Review auch für den erfahrenen Ingenieur relativ aufwändig werden.

Die Anwendung entsprechender Checklisten während der einzelnen Arbeitsschritte der Tragwerksplanung ist ein Aspekt im derzeit praktizierten Qualitätssicherungssystem. Alle bisher angewandten Systeme basieren auf aktiver Anwendung oder Umsetzung einer Maßnahme durch den Tragwerksplaner. Somit unterliegen diese Methoden dem Einfluss des menschlichen Fehlers. Von ganz besonderem Interesse wäre eine Methode, die weitestgehend automatisiert eine Analyse des Tragwerks ermöglicht, deren Aussagekraft linear elastisch ermittelte Spannungen übersteigt. Das Forschungsprojekt Tragwerk-FMEA bildet eine geeignete Methode zur präventiven Qualitätssicherung, die bereits für die frühen Phasen der Tragwerksplanung automatisierte Sensitivitätsanalysen ermöglicht.

Im Zuge des Forschungsvorhabes wurde die Anwendung der FMEA Methode bei einem konkreten Projekt durchgeführt.

5.2.2 Projektbeispiel FMEA

Im folgenden Beispiel wurde die Anwendung der FMEA Methode im Zuge der Tragwerksplanung für ein Gebäude durchgeführt. Das exemplarisch dargestellte Gebäude wurde als Gesamtmodell abgebildet. Die Tragstruktur ist über die Ebenen veränderlich, somit befinden sich in fast allen Ebenen lastverteilende und abfangende Bauteile im Gebäude

5.2.2.1 Bauwerksbeschreibung

Der geplante Neubau wird als Passivhaus in Massivbauweise erstellt. Das Gebäude besteht aus einem zurückspringenden Sockelgeschoss, einem Erdgeschoss und 2 Obergeschossen im Bereich des zweispännigen Teils. Der einspännige Teil, in dem sich die Fachklassenräume befinden, verfügt lediglich über das Sockelgeschoss, ein Erdgeschoss und ein Obergeschoss.

Das Sockelgeschoss wird als Weiße Wanne in Stahlbeton ausgeführt. Tragende Wände werden soweit statisch möglich in Mauerwerk ausgeführt. Mauerwerkswände $d=11,5$ cm werden nicht als tragend berücksichtigt.

5.2.2.2 Gründung

Das Gebäude wird entsprechend der Empfehlung des Bodengutachtes als Flachgründung mittels einer elastisch gebetteten Bodenplatte $d=30$ cm ausgeführt. Die Abmessungen betragen etwa 48×21 m.

Das Sockelgeschoss wird in der Bauart Weiße Wanne hergestellt. Die Wandstärke der erdberührenden Außenwände beträgt $d=25$ cm. Die versteifende Wirkung der Stahlbetonwände wird bei der Bemessung des Kellerkastens berücksichtigt.

Angaben zu den zulässigen Bettungswerten wurden dem Bodengutachten entnommen. Zusätzlich wird der Einfluss der Perimeterdämmung auf die Bettung berücksichtigt.

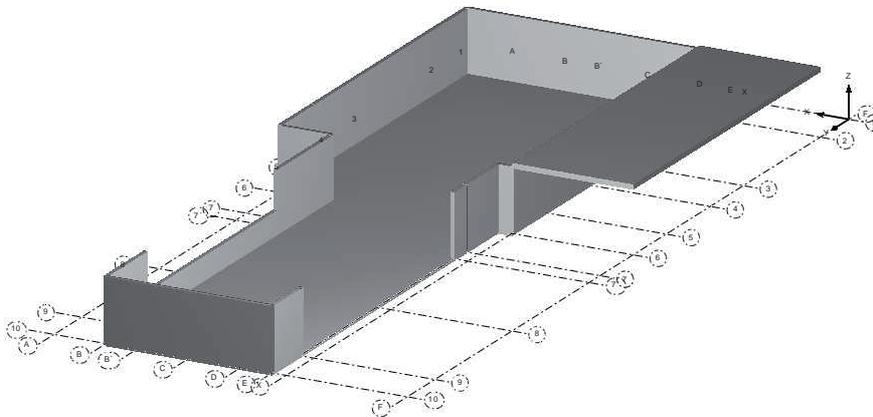


Abbildung 1: Weiße Wanne im Sockelgeschoss (WU-Bauteile)

5.2.2.3 Decken

Die Decken werden als Flachdecken mit einer Deckenstärke von 25 cm bemessen. In Teilbereichen wird die Decke abgesenkt und auf 20 cm reduziert. Die Deckenplatten werden nur konstruktiv in die Kerne eingespannt.

5.2.2.4 Räumliche Steifigkeit

Die räumliche Steifigkeit des Gebäudes wird durch eine ausreichende Anzahl an tragenden Wandscheiben aus Mauerwerk sichergestellt. Horizontallasten aus Wind und Schiefstellung der Stützen werden über die Deckenscheiben in die aussteifenden Wände eingeleitet.

5.2.2.5 Stützen und Wandpfeiler

Stützen und Wandpfeiler werden in Stahlbeton ausgeführt. Die Mindestabmessung der kürzeren Seite der Stütze beträgt 20 cm.

5.2.2.6 Wände

Der Aufzugschacht wird komplett in Stahlbeton $d=20$ cm hergestellt.

Alle tragenden Wände der aufgehenden Bauteile werden ebenfalls $d=20$ cm ausgeführt.

Tragende Mauerwerkswände sind ebenfalls $d=20$ cm in großformatigem KS-XL geplant.

Nichttragende Wände werden entweder als 11,5 cm Mauerwerk oder als Trockenbauwände mit Gipskartonbepunktungen hergestellt. Trockenbauwände, die parallel zur Tragrichtung verlaufen, müssen verschieblich angeschlossen werden.

Die detaillierte Darstellung der Abmessungen und Werkstoffgüten aller tragenden Bauteile ist den Positionsplänen zu entnehmen.

Die folgenden Abbildungen zeigen die wandartigen Träger und die in Stützen aufgelösten Wandscheiben in Achse C, D und E.

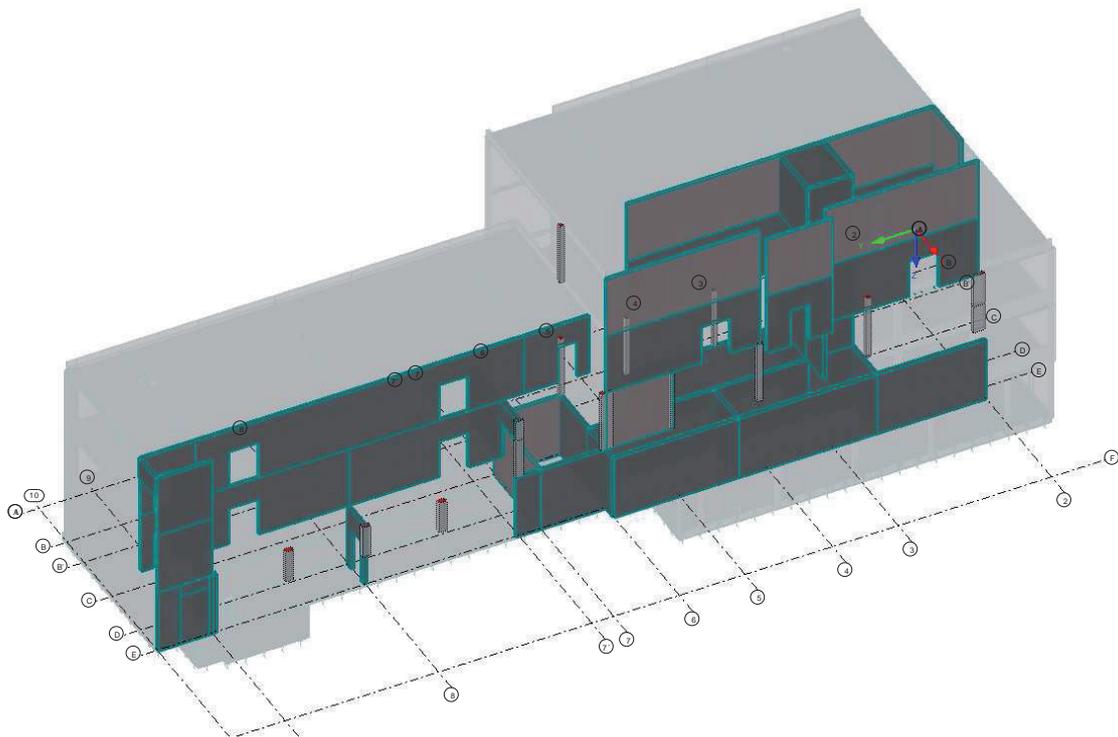


Abbildung 2: Ansicht der inneren Abfangebene von Süd-Ost

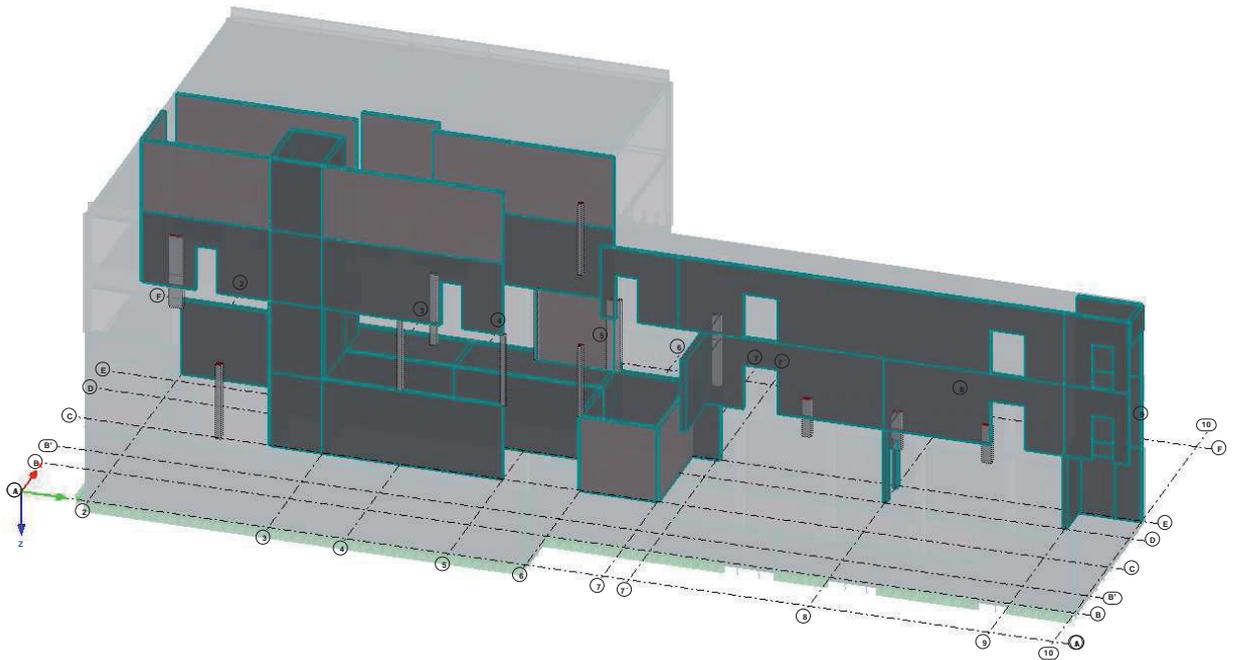


Abbildung 3: Ansicht der inneren Abfangebene von Süd-West

5.2.2.7 Brandschutz

Für die tragenden Bauteile des Hochhauses gilt die Feuerwiderstandsklasse F-30 B. Diese Anforderung wird im Regelfall durch die vorhandene F-90 Bauweise erfüllt.

5.2.3 Isometrie Tragwerk

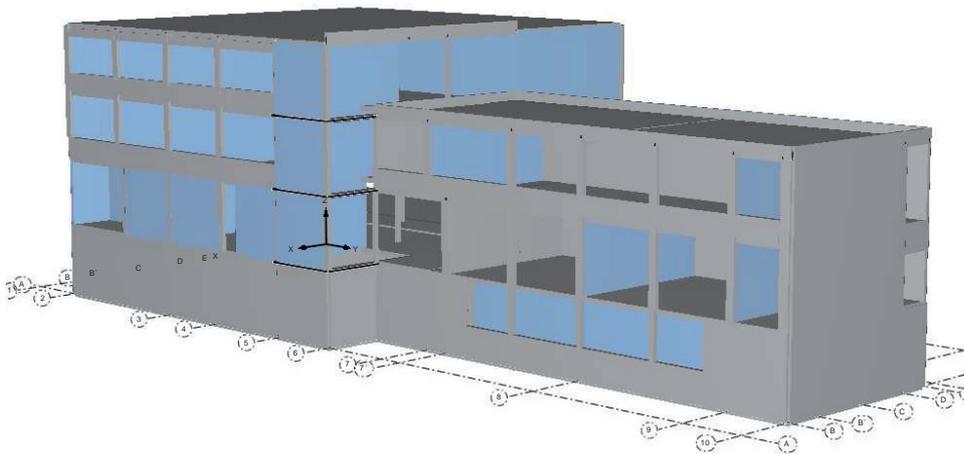


Abbildung 4: Isometrische Ansicht von Süd-West

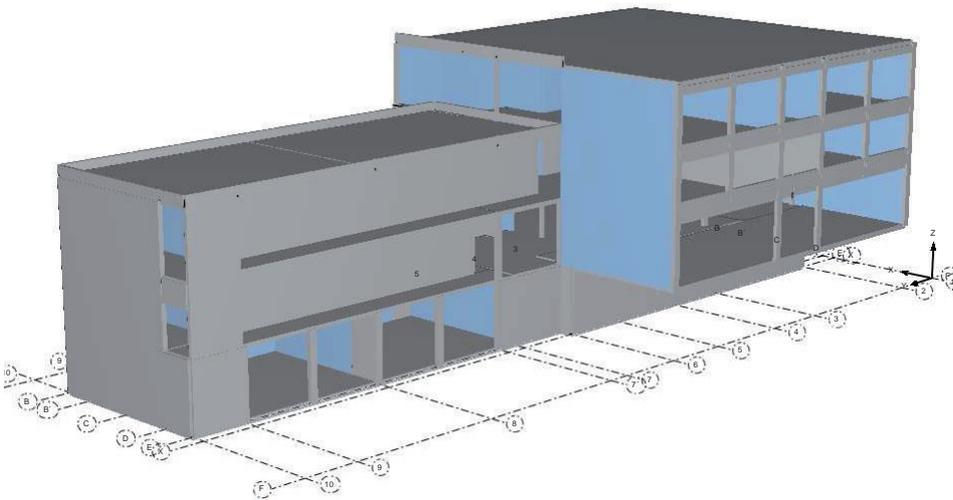


Abbildung 5: Isometrische Ansicht von Süd-Ost

5.2.4 Durchführung FMEA

Zum Abschluss der Entwurfsplanung wird im Rahmen der Qualitätssicherung ein Review durchgeführt. Dieses Review wurde mit der Durchführung einer FMEA-Sitzung verbunden.

Entsprechend dem Ablauf einer System-FMEA werden folgende Phasen unterschieden:

- **Strukturanalyse:** alle Systemelemente sowie deren Schnittstellen (Verbindungen, Zusammenhänge und Abhängigkeiten) werden erkannt, analysiert und dokumentiert. Es erfolgt eine Darstellung in geeigneter Form.
- **Funktionsanalyse:** die jeweiligen Funktionen der Systemelemente werden analysiert und diesen auf verschiedenen Hierarchieebenen zugeordnet.
- **Fehleranalyse:** ein Fehler ist definiert als „Nichterfüllung einer Funktion“. Somit kann für jede Funktion ein möglicher Fehler formuliert werden. In diesem Schritt werden außerdem deren Ursachen und Folgen beschrieben. Die Analyse ist auf Erfahrung basierend.
- **Risikobewertung:** um eine Abschätzung für das tatsächliche Risiko vorzunehmen, werden in der verbreitetsten Form der Risikobewertung jeweils 3 verschiedene Kriterien mit Zahlenwerten zwischen 1 und 5 bewertet. Dies sind die Bedeutung (B) der Fehlerfolgen, die Auftretenswahrscheinlichkeit (A) der Fehlerursache sowie die Entdeckungswahrscheinlichkeit (E) des Fehlers bzw. der Fehlerursache. Die Risikoprioritätszahl (RPZ) gibt das Risiko an, welches von einem Fehler ausgeht und errechnet sich durch die Multiplikation der Bewertungszahlen. Je größer die RPZ, desto wichtiger ist es, für diesen Fehler eine Optimierung durchzuführen, d. h. desto höher ist die Priorität diesen Fehler zu betrachten. Die möglichen Ergebnisse können zwischen 1 (kein bzw. sehr geringes Risiko) und 125 (sehr hohes Risiko) liegen.
- **Optimierung:** für erkannte Risiken kann eine geeignete Maßnahme zur Entdeckung bzw. Vermeidung des Fehlers erarbeitet werden. Die festgelegten Maßnahmen werden dann bei der Bewertung der Kriterien berücksichtigt und führen zu einer Reduzierung der RPZ.

5.2.5 Diskussion der Strukturanalyse im Projektteam

Aufgrund der Besonderheiten der Tragkonstruktion werden folgende Punkte als kritisch empfunden und ausführlich diskutiert:

1. Das Gebäude verfügt über eine Teilunterkellerung, daher wird die Gründung auf zwei Ebenen verteilt.
2. Im südlichen Bauteil wird ein zweigeschossiger wandartiger Träger über eine Querwand abgefangen. Diese Querwand ist zusätzlich im Flurbereich noch mit einer Türöffnung versehen.
3. Im nördlichen Bauteil werden im EG Wände in Stützen aufgelöst.
4. Im Bereich des Speisesaals wird ein stützenfreier Raum durch wandartige Träger im 1.OG erreicht. Die wandartigen Träger werden durch im Mauerwerk integrierte Stahlbetonstützen abgetragen.
5. Die Stützengeometrie im Speisesaal ist auf ein Minimum zu begrenzen.
6. Randbalken werden als Überzüge ausgeführt und in die Brüstungen integriert.
7. Attikabalken im Dachbereich werden aus bauphysikalischen Gründen auf statisch erforderliche Bereiche minimiert.

Die diskutierten Bauteile werden mit der Zielsetzung einer Optimierung nach FMEA-Methode näher untersucht. Hierzu werden die im Anhang dargestellten Bewertungen mittels der FMEA-Formblätter durchgeführt.

5.2.6 Erkenntnisse

Die Tragwerk-FMEA ermöglicht eine systematische Abarbeitung schwieriger Punkte eines Tragwerks bis hin zur Erstellung einer Vermeidungsstrategie. Die Methode bildet somit eine wertvolle Basis zur Qualitätssicherung über alle Leistungsphasen hinweg. Mit zunehmender Erfahrung kann die Methodik weiter verfeinert werden.

5.2.7 Zusammenfassung

Die Anwendung der Methode der Tragwerk-FMEA auf die in der Anlage beschriebenen Bauteile hat ansatzweise gezeigt, wie FMEA funktionieren kann. Um tatsächlich eine verbesserte Qualitätssicherung zu erzielen, ist eine größere Bearbeitungstiefe erforderlich. Bei der FMEA-Methode sind hierzu Erfahrungen eines Ingenieurs bei der Abschätzung der Auftretenswahrscheinlichkeit unverzichtbar. Die Methode eignet sich als Qualitätssicherungsplan für bereits im Vorfeld erkannte Problemstellungen. Durch die systematische Untersuchung von Problemstellungen gehen entdeckte Fehler oder kritische Bauteile nicht mehr verloren. Inwieweit die Methode zur Auffindung unentdeckter Fehler geeignet ist, kann nach dieser Testanwendung nicht beurteilt werden. Von großem Interesse ist die Weiterentwicklung der Methode auf Grundlage automatisierter Algorithmen, die den Tragwerksplaner anschließend in die Lage versetzt, die kritischen Punkte seiner Konstruktion zu erkennen. Bisher stellt der erfahrene Ingenieur eines der wichtigsten Glieder der Qualitätssicherung in der Tragwerksplanung dar, daran wird vermutlich auch die Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse nichts ändern. Trotzdem kann durch eine methodische Anwendung die Qualität weiter verbessert werden.

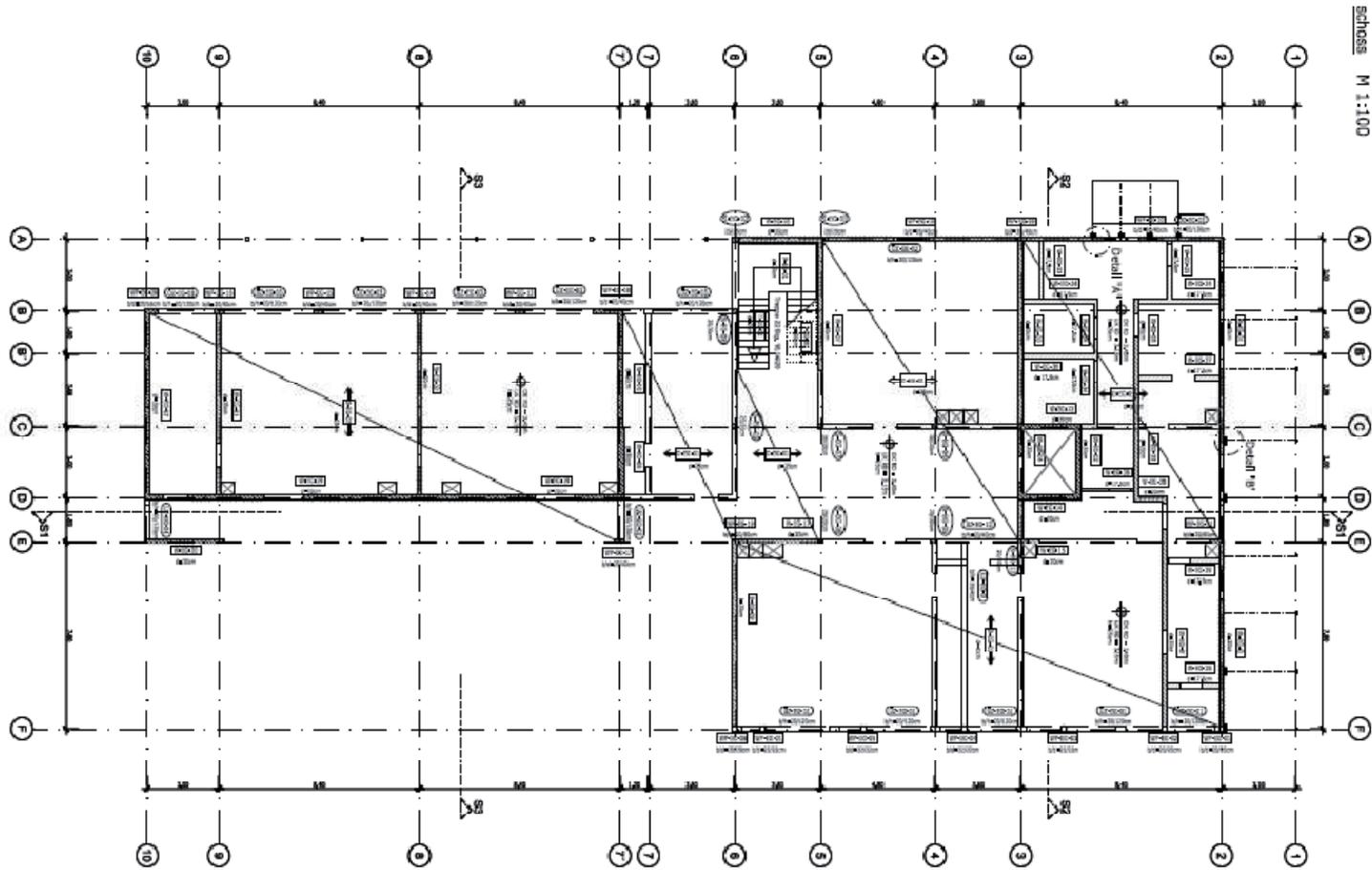
FMEA - Formblatt

Bauteil	Bodenplatte über Sockelgeschoss	Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion	tragend	Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
- Bedeutung der Fehlerfolge (B)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)
- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher Termin
große Schäden am Tragwerk	4	Fehler in der Modellierung	Falscher Ansatz der Bettung	Ansatz reduzierter Bettungswerte	3	Nicht Erforderlich	3	36	Projektleiter
		Fehler in der Ausführung	Schlechte Bodenverdichtung bei Verfüllung	Verwendung von selbstverdichtendem Verfüllmaterial	4	Bodengutachter zu Abnahme der Sohle miteinbeziehen	3	48	Projektleiter/Bodengutachter/AN



Schlösser M 1:100

Bauteil: Bodenplatte über Sockelgeschoss

FMEA - Formblatt

Bauteil	wandartiger Träger Achse 7'	Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion	tragend	Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
- Bedeutung der Fehlerfolge (B)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)
- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher Termin
Versagen des Teilsystems	4	Versagen bei Öffnungen infolge Querkraft	Fehler in der Modellierung Unbemessbarkeit im FEM Modell des Türsturzes	Redundante Bemessung mit zweitem Modell als Balken	5	Detailbetrachtung, Auswertung Fehlermeldungen	3	60	Projektleiter



Bauteil: wandartiger Träger Achse 7'

FMEA - Formblatt

Bauteil		Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion		Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

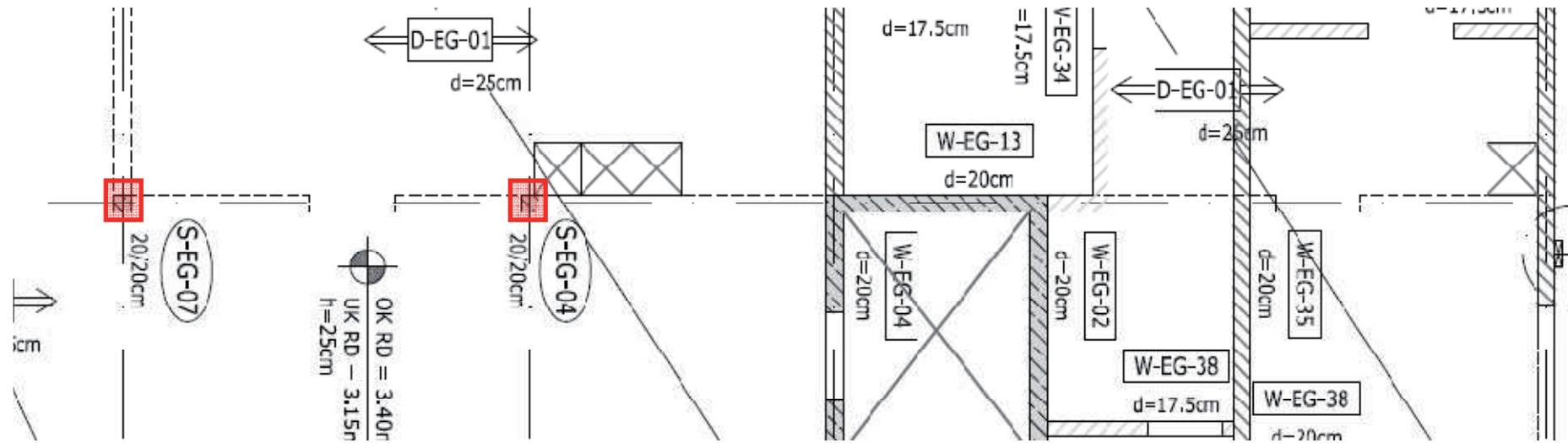
- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)

- Bedeutung der Fehlerfolge (B)

- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)

- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher Termin
Versagen des Tragwerks	5	Stabilitätsversagen, Druckversagen	Fehler in Berechnung und Bemessung	Redundante Lastermittlung mittels Einflussfläche	3	Prüfung und Überwachung der Bauausführung	3	45	Projektleiter, Prüfer



Bauteil: Wandartiger Träger auf Stützen

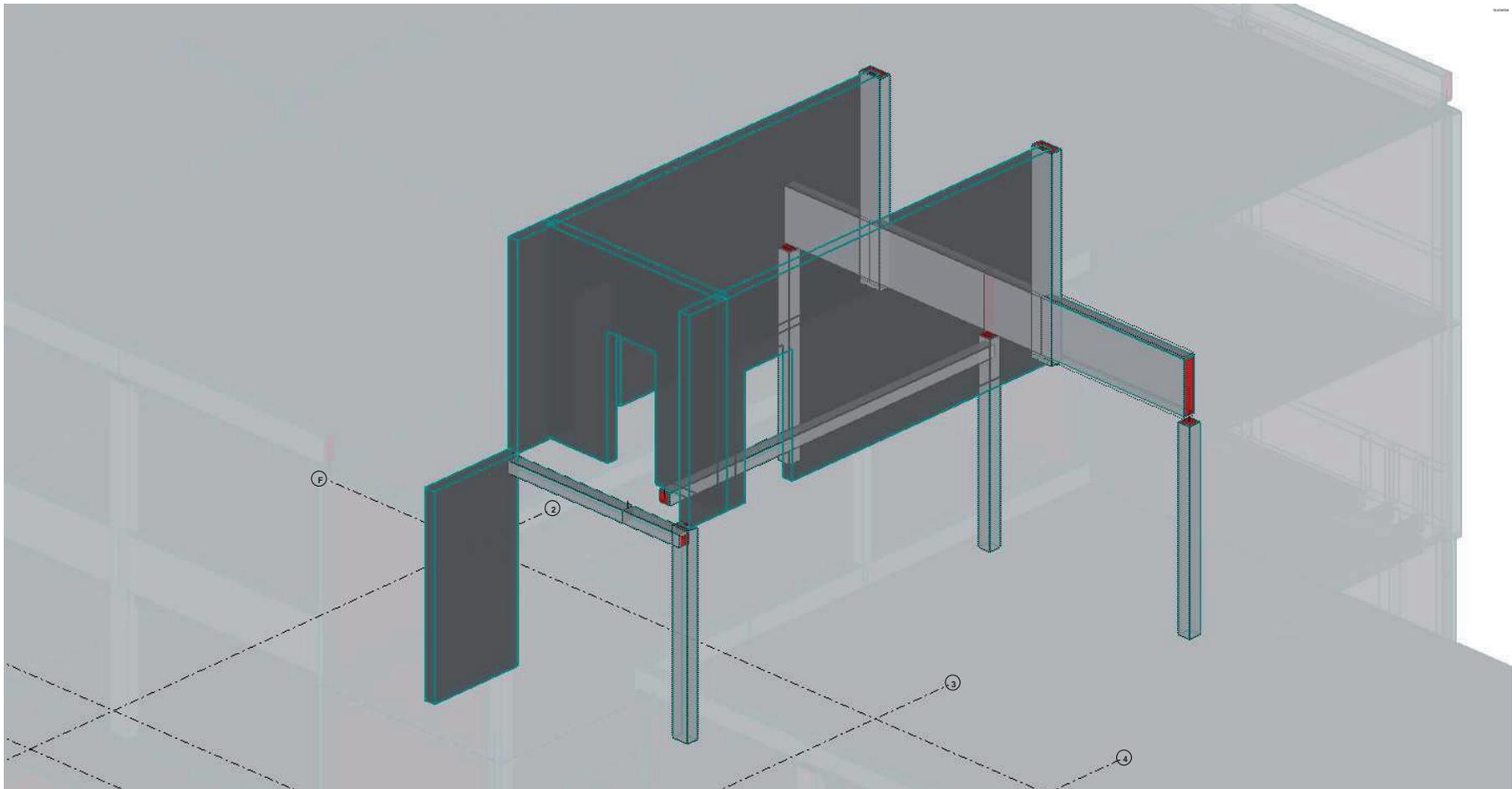
FMEA - Formblatt

Bauteil	Wandartige Träger im 1. OG	Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion	tragend	Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
- Bedeutung der Fehlerfolge (B)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)
- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher Termin
Versagen des Teilsystems	3	Versagen der Aufhängung der indirekt gelagerten Decken	Fehler bei Anschlüssen und Details in der Modellierung	Sorgfältige technische Bearbeitung der Details	3	Detailbetrachtung, Beachtung konstruktiver Regeln	3	27	Projektleiter



Bauteil: Wandartige Träger im 1. OG

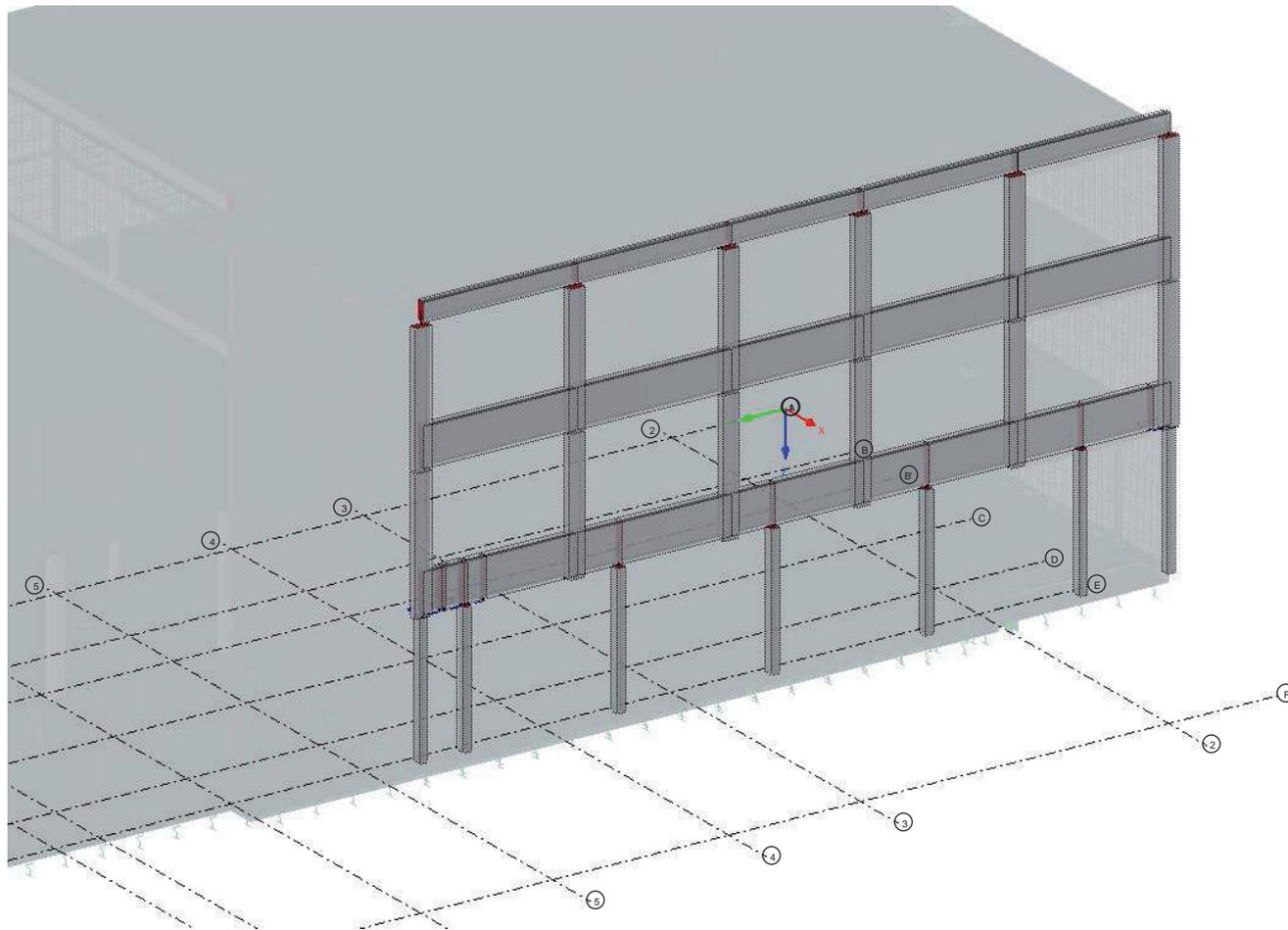
FMEA - Formblatt

Bauteil	Überzüge als Abfangebalken	Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion	tragend	Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
- Bedeutung der Fehlerfolge (B)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)
- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher Termin
Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet	4	Biegeversagen; Schubversagen	Fehler in der Ermittlung der Einwirkungen	Qualitätskontrolle der Schalplanung, Planungsprozess begleiten	5	Checkliste Schalplanung,	4	80	Projektleiter, Prüfer



Bauteil: Randunterzug als Abfangebalken

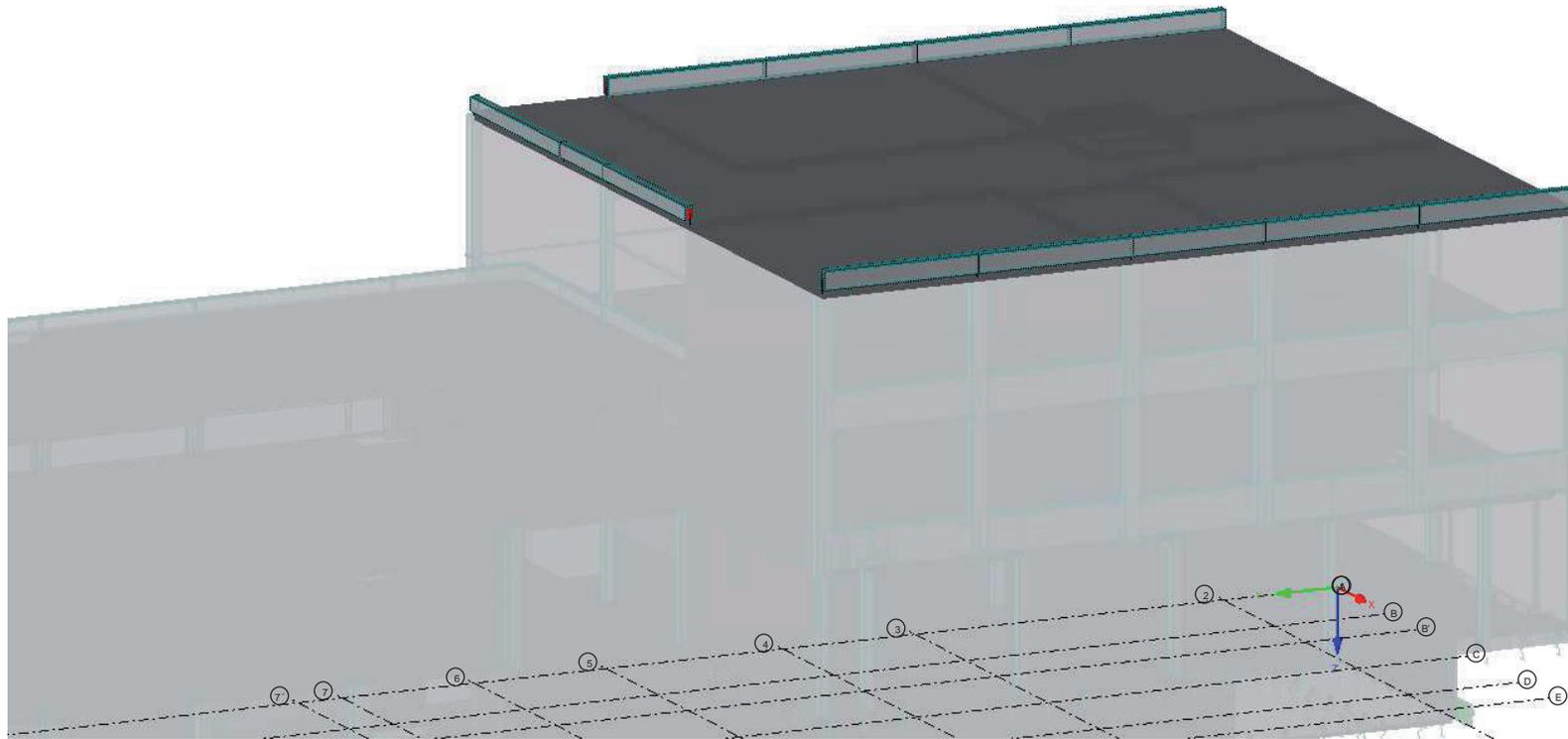
FMEA - Formblatt

Bauteil	Attikabalken Dachdecke	Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion	tragend	Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)
- Bedeutung der Fehlerfolge (B)
- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)
- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

Mögliche Fehlerfolgen	B	Möglicher Fehler (Fehlerart)	Mögliche Fehlerursachen	Vermeidungsmaßnahmen	A	Entdeckungsmaßnahmen	E	RPZ	Verantwortlicher / Termin
Geringe Schäden am Tragwerk	2	Biegeversagen zu starke Verformungen	Fehler in der Modellierung	Checkliste Modell	3	keine	2	12	Projektleiter



Bauteil: Attikabalken Decke über 2. OG

FMEA - Formblatt

Bauteil		Ersteller: M. Bayrak	Projekt: 9146
Funktion		Datum: Nov. 2009	

Bewertung der Fehler:

- Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache (A)

- Bedeutung der Fehlerfolge (B)

- Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers / der Fehlerursache (E)

- Risikoprioritätszahl (RPZ) $A \times B \times E$

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

Mögliche Fehlerfolgen B

Fehlerfolgen	B
- Versagen des Tragwerks oder eines Teilsystems	5
- große Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem - Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet - keine (wirtschaftliche) Instandsetzung durchführbar	4
- mittlere Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem - Tragfähigkeit ist eingeschränkt - Instandsetzung zur Gewährleistung der Tragfähigkeit mit mittlerem Aufwand verbunden	3
- geringe Schäden am Tragwerk oder an einem Teilsystem - Tragfähigkeit kaum beeinträchtigt - kleinere Instandsetzungsmaßnahmen notwendig	2
- keine Beeinträchtigung des Tragwerks	1

Mögliche Fehler – Fehlerart

<p>1. Stütze</p> <ul style="list-style-type: none"> - Stabilitätsversagen (Knicken) [s] - - Druckversagen [d/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 Druckstrebe) [s] - Zugversagen (im Auflagerbereich) [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] - 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] - Durchstanzen [d bei Duktilitätsbewehrung] <p>6. Bodenplatte</p> <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] <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>d = duktileres Materialverhalten s = sprödes Materialverhalten</p>
--	--

<p>4. Deckenplatte</p> <ul style="list-style-type: none"> - zu starke Verformungen [d] - Biegeversagen [d/s] - Schubversagen [d/s] - Versagen bei Öffnungen [d/s] 	
---	--

Mögliche Fehlerursachen

Fehlerkategorie	Mögliche Fehlerursachen
<p>Konzeptionelle Fehler (globale Ebene)</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Versteckte Kinematiken im Tragkonzept - Unzureichende Aussteifung des Gebäudes - Mangelnde Robustheit, d.h. unzureichende Reserven bei kleineren Bauteilversagen und Sensitivität gegenüber unplanmäßigen Störungen wie nicht eingeplante Anpralllasten oder Explosionen
<p>Fehler in Ermittlung der Einwirkungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Falsch ermittelte Lasten - Nichtberücksichtigung einer maßgebenden Einwirkung - Nichtberücksichtigung der maßgebenden Lastfallkombination
<p>Fehler in Modellierung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Fehler bei der Eingabe des Modells - Das Modell entspricht nicht der Realität (z.B. Momentengelenk statt Rotationsfeder,...)
<p>Fehler in Berechnung und</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Die Schnittgrößenermittlung wurde falsch

Bemessung	durchgeführt - Der Tragwiderstand wurde falsch berechnet
Fehler bei Anschlüssen und Details	- Die Bemessung der Anschlüsse wird falsch durchgeführt - Die Details sind nicht ausführbar

Vermeidungsmaßnahmen

Maßnahmen, die das Ziel haben die Entstehung der jeweiligen Fehlerursache zu vermeiden. In der Regel werden Maßnahmen erst ergriffen, wenn durch die Risikoprioritätszahl ein zu hohes Risiko diagnostiziert wurde.

Auftretenswahrscheinlichkeit A

		Herstellungsqualität		
		Vorgefertigtes Bauteil	Teilweise vorgefertigtes Bauteil	Herstellung vor Ort
Häufigkeit der Verwendung	häufig	I	I	II
	selten	I	II	III
	erstmalig	II	III	III

(a)

Ermittlung der Bauteilkategorie

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

(b)

Ermittlung der Bewertungszahl für die Auftretenswahrscheinlichkeit

Entdeckungsmaßnahmen

Maßnahmen, die das Ziel haben bereits entstandene Fehler noch in der jeweiligen Projektphase zu entdecken. In der Regel werden Maßnahmen erst ergriffen, wenn durch die Risikoprioritätszahl ein zu hohes Risiko diagnostiziert wurde.

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

a)

		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

b)

- a) Festlegung der FMEA-Klassen in Abhängigkeit der Gefährdungs- und der Robustheitsklassen
- b) Ermittlung der Bewertungszahl für die **Entdeckungswahrscheinlichkeit E**

6 Bauteilkatalog

Beispiele:

- Pergola (Carport)
- Sofistik-Gebäude

Inhalt:

- Überarbeitung / Änderungen
- Anmerkungen
- Erklärungsseite zu Datenblättern
- Strukturierung der Bauteile
- Bauteilkatalog Carport
- Bauteilkatalog Sofistik-Gebäude

Anmerkung:

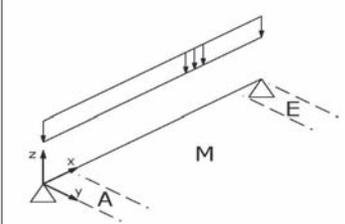
- Automatische Auswahl der Fault Types aus Bauteil-Katalog:
 - Für jede Kombination der Bauteileigenschaften wird eine eigene Fehlerliste erstellt. Eine frühere, übergeordnete Abgrenzung anhand der ersten Eigenschaften erscheint nicht möglich.
- Intervalle
 - Es erfolgt eine Unterscheidung in 2 Intervalle:
 - Intervall 1: keine Überschreitung der „max. exceedance“
 - Steifigkeit und Kräfte bei 100%
 - Intervall 2: Überschreitung der „max. exceedance“
 - Steifigkeit und Kräfte lt. Tabelle

Structural Element Name	A	2	B	1	C	1	D	1	E	-
	Balken		Einfeldträger		Holz		einachsige Biegung		-	
Structural Element Info	Balken B1 und B2		eindeutige Nummerierung und Benennung der Bauteile							

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment	condition			
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M	area	force
Bsp.: lokales Versagen: Biegeversagen Feld	Nx = My = Vz =			-95% -95% -95%	EA = EI = ES =			-95% -95% -95%	Biegeversagen des Holzbalkens B1 bzw. B2	M	M
Fehlerarten, die bei dem Bauteil auftreten können.	Qualitative Größenordnung der zugehörigen Steifigkeits- und Schnittgrößenänderungen, Unterscheidung in die Bereiche Anfang (A), Mitte (M) und Ende (E). Keine struktur- bzw. werkstoffmechanische Betrachtung.						Beschreibung des Fehlers, Wortlaut der programmtechnischen Ausgabe.	Definition der Zelle unter "max. exc.", von der der Fehlereintritt abhängig ist			
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment	condition			
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	area	force	
Bsp.: Anschlussversagen, Kontakt	Nx = My = Vz =	-10% - -10%	-10% - -10%		EA = EI = ES =	-10% -10% -10%	-10% -10% -10%	Versagen des Balkenschuhs, Anschluss an Randträger bzw. Mauerwerkswand	A/E	V	
Fehlerarten, die bei den Anschlüssen/Auflagern des Bauteils auftreten können.	siehe oben						siehe oben	siehe oben			

maximum exceedance			
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%

Angabe der maximalen Überschreitung der Bauteilwiderstände $F_{R,d}$. Ab der genannten Überschreitung treten die angegebenen Steifigkeitsreduzierungen ein.



schematische Skizze der Bauteils mit den einwirkenden Lasten und den Auflagerbedingungen. Angabe der Bereiche Anfang, Mitte und Ende.

Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Bsp.: Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
Mögliche Ursachen, die zu den oben genannten Fehlerarten führen können.	Angabe der Bewertungszahlen für die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursachen. Diese sind objektbezogen und nicht zu verallgemeinern.					

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)
Bewertungszahlen: B_A = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_E = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_B = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

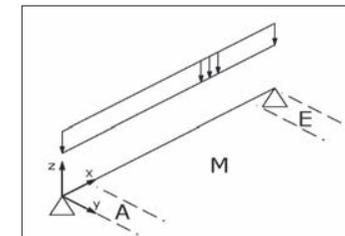
A	Bauteil	B	Art	C	Material	D	Beanspruchung	E	weitere Eigenschaften
1	Platte (flächiges Bauteil, Beanspruchung über- wiegend quer zur Ebene)	1 2	einachsig gespannt zweiachsig gespannt	1 2	Holz Stahlbeton	1 2 3	punktförmige Lagerung linienförmige Lagerung flächige Lagerung	1 2 3	Fertigung vor Ort Vorfertigung Teilweise Vorfertigung
2	Balken (überwiegend auf Biegung beanspruchtes, horizontales, stabförmiges Bauteil)	1 2	Einfeldträger Mehrfeldträger	1 2 3 4	Holz Stahl Stahlbeton Stahlverbund	1 2	einachsige Biegung zweiachsige Biegung		
3	Stütze (auf Normalkraft und/ oder Biegung bean- spruchtes, vertikales, stabförmiges Bauteil)	1 2	Pendelstütze eingespannt	1 2 3 4 5	Holz Stahl Stahlbeton Stahlverbund Mauerwerk	1 2 3	Druck Zug Biegung	1 2	schlank gedrungen
4	(Wand-)scheibe (flächiges Bauteil, Beanspruchung über- wiegend in Scheiben- ebene)	1 2	tragend nichttragend	1 2 3 4 5	Holz Stahl Stahlbeton Stahlverbund Mauerwerk	1 2	horizontal (Aussteifung) vertikal (Normalkraft)	1 2	Außenwand Innenwand
5	Fundament (Gründungselement zur Einleitung der auftretenden Lasten in den Baugrund)	1 2 3 4 5	Einzelfundament Streifenfundament Plattenfundament Pfahlgründung Zugverankerung	1 2 3	Stahlbeton Mauerwerk Beton (unbewehrt)	1 2 3	Druck Zug Biegung		

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	2	B	1	C	1	D	1	E	-
	Balken		Einfeldträger		Holz		einachsige Biegung		-	
Structural Element Info	Balken B1 und B2									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment	condition				
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M	area	force	
lokales Versagen: Biegeversagen Feld	Nx = My = Vz =			-95% -95% -95%	EA = EI = ES =			-95% -95% -95%	Biegeversagen des Holzbalkens B1 bzw. B2	M	M	
lokales Versagen: Schubversagen	Nx = My = Vz =	-5% -50% -50%	-5% -50% -50%		EA = EI = ES =				-5% -5% -50% -50%	Schubversagen des Holzbalkens B1 bzw. B2	A/E	V
übermäßige Verformungen: Durchbiegung	Nx = My = Vz =			-20% -20% -20%	EA = EI = ES =			-20% -80% 0%	übermäßige Durchbiegung des Holzbalkens B1 bzw. B2	M	M	
übermäßige Verformungen: achsiale Verdrehung (Torsion)	Nx = My = Vz =			-40% -40% -40%	EA = EI = ES =			-20% -80% 0%	übermäßige achsiale Verdrehung des Holzbalkens B1 bzw. B2	M	M	
Stabilitätsversagen: Kippen	Nx = My = Vz =			-95% -95% -95%	EA = EI = ES =			-95% -95% -95%	Kippen des Holzbalkens B1 bzw. B2	M	N	
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment	condition				
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E		area	force			
Anschlussversagen, Kontakt	Nx = My = Vz =	-10% - -10%	-10% - -10%		EA = EI = ES =	-10% -10% -10%			-10% -10% -10%	Versagen des Balkenschuhs, Anschluss an Randträger bzw. Mauerwerkswand	A/E	V
Anschlussversagen, Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nx = My = Vz =	-60% - -60%	-60% - -60%		EA = EI = ES =	-50% -50% -50%			-50% -50% -50%	Versagen des Kontaktanschlusses an Randträger bzw. Mauerwerkswand	A/E	V
Anschlussversagen, mechanische Verbindungsmittel	Nx = My = Vz =	-20% - -20%	-20% - -20%		EA = EI = ES =	-20% -20% -20%			-20% -20% -20%	Versagen der Lagesicherung in den Anschlussbereichen	A/E	V
Anschlussversagen, Querkzug	Nx = My = Vz =	-95% - -95%	-95% - -95%		EA = EI = ES =	-95% -95% -95%			-95% -95% -95%	Querkzugversagen im Anschlussbereich	A/E	V

maximum exceedance			
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

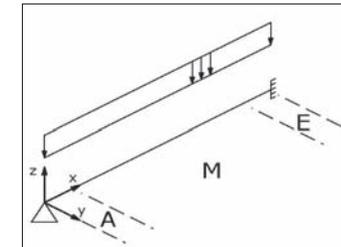
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	2	B	2	C	1	D	1	E	-
	Balken		Mehrfeldträger		Holz		einachsige Biegung			
Structural Element Info	Randträger R1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A	
lokales Versagen: Biegeversagen Feld	Nx = My = Vz =	-50% +50%	-50% +100% +50%	-60% -95% -60%	EA = EI = ES =	 -95% -95%	Biegeversagen des Randträgers R1 im Feldbereich
lokales Versagen: Biegeversagen im Bereich der Stütze (hier: Einspannung)	Nx = My = Vz =	-95% -95%	-95% -95% -95%	+20%	EA = EI = ES =	-95% -95% -95%	Biegeversagen des Randträgers R1 im Stützenbereich
lokales Versagen: Schubversagen	Nx = My = Vz =	-5% -80% -50%	-5% -80% -50%		EA = EI = ES =	 -5% -50%	Schubversagen des Randträgers R1
übermäßige Verformungen: Durchbiegung	Nx = My = Vz =			-20% -20% -20%	EA = EI = ES =	-20% -80% 0%	übermäßige Durchbiegung des Randträgers R1
übermäßige Verformungen: achsiale Verdrehung (Torsion)	Nx = My = Vz =			-40% -40% -40%	EA = EI = ES =	-20% -80% 0%	übermäßige achsiale Verdrehung des Randträgers R1
Stabilitätsversagen: Kippen	Nx = My = Vz =			-95% -95% -95%	EA = EI = ES =	-95% -95% -95%	Kippen des Randträgers R1
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E	
Anschlussversagen, Kontakt	Nx = My = Vz =	-10% -10%	-10% -10%		EA = EI = ES =	-10% -10% -10%	Schwellenpressung des Randträgers R1 über Stütze
Anschlussversagen, Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nx = My = Vz =	-60% -60%	-60% -60%		EA = EI = ES =	-50% -50% -50%	Randträger R1 wird im Bereich der Auflagerung verschieblich
Anschlussversagen, mechanische Verbindungsmittel	Nx = My = Vz =	-20% -20%	-20% -20%		EA = EI = ES =	-20% -20% -20%	Versagen der VM im Bereich des Anschlusses des Randträgers R1
Anschlussversagen, Querzug	Nx = My = Vz =	-95% -95%	-95% -95%		EA = EI = ES =	-95% -95% -95%	Querzugversagen des Randträgers R1 im Anschlussbereich

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

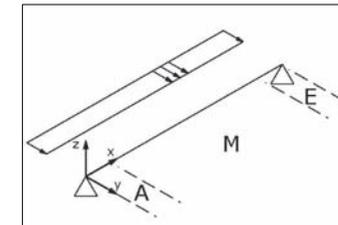
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	2	B	2	C	3	D	2	E	-
	Balken		Mehrfeldträger		Stahlbeton		zweiachsig Biegung		-	
Structural Element Info	Ringbalken RB1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx =			-80%	EA =			<-90%	Biegeversagen des Ringbalkens RB1
	Mz =			-80%	EI =				
	Vy =			-80%	ES =				
lokales Versagen: Schubversagen	Nx =	-40%	-40%		EA =				Schubversagen des Ringbalkens RB1
	Mz =	-40%	-40%		EI =				
	Vy =	-40%	-40%		ES =			<-90%	
übermäßige Verformungen: Durchbiegung	Nx =			-20%	EA =			-10%	übermäßige Durchbiegung des Ringbalkens R1
	Mz =			-20%	EI =			-20%	
	Vy =			-20%	ES =				
übermäßige Verformungen: achsiale Verdrehung (Torsion)	Nx =			-30%	EA =			-10%	übermäßige achsiale Verdrehung (Torsion) des Ringbalkens RB1
	Mz =			-30%	EI =			-20%	
	Vy =			-30%	ES =				
Stabilitätsversagen: Kippen	Nx =			-80%	EA =			-90%	Kippen des Ringbalkens RB1
	Mz =			-80%	EI =			-90%	
	Vy =			-80%	ES =			-90%	
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen, Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nx =	-40%	-40%		EA =	-40%	-40%	Ringbalken RB1 wird verschieblich	
	Mz =	-40%	-40%		EI =	-40%	-40%		
	Vy =	-40%	-40%		ES =	-40%	-40%		

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

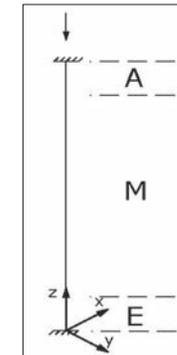
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	3	B	2	C	3	D	1,3	E	1
	Stütze		eingespannt		Stahlbeton		Druck, Biegung		schlank	
Structural Element Info	Stütze S1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
Stabilitätsversagen Druck: Knicken	Nz = My = Vx,y =			-50%	EA = EI = ES =			-80%	Knicken der Stütze S1
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen, Kontakt	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-10%	-10%	Versagen des Kontaktanschlusses der Stütze S1 an Fundament	
Anschlussversagen, Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-80%	-80%	Stütze S1 wird im Anschlussbereich an das Fundament verschieblich	

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	150%
M =			
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	1	1	1	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

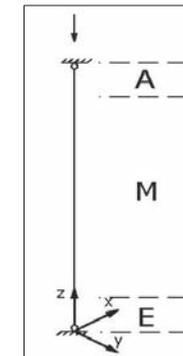
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	3	B	1	C	1	D	1	E	1
	Stütze		Pendelstütze		Holz		Druck		schlank	
Structural Element Info	Stütze S2									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
Stabilitätsversagen Druck: Knicken	Nz = My = Vx,y =			-95%	EA = EI = ES =			-90%	Knicken der Stütze S2
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen, Kontakt	Nz = My = Vx,y =	-10%	-10%		EA = EI = ES =	-10%	-10%		Versagen des Kontaktanschlusses der Stütze S2 an Fundament
Anschlussversagen, Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-80%	-80%		Stütze S2 wird im Anschlussbereich an das Fundament verschieblich
Anschlussversagen, mechanische Verbindungsmittel	Nz = My = Vx,y =	-70%	-70%		EA = EI = ES =	-70%	-70%		Versagen der VM im Bereich des Anschlusses der Stütze S2 an Fundament

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	150%
M =			
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	1	1	1	2	2	2
Fehler in Querschnittsbemessung	3	3	3	3	3	3
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

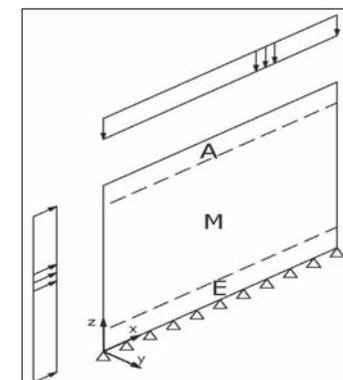
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	4	B	1	C	5	D	1+2	E	1
	Scheibe		tragend		Mauerwerk		horizontal, vertikal		Außenwand	
Structural Element Info	Wand W1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Schubversagen	Nz = My = Vx =	0% -30%	0% -30%		EA = EI = ES =	 -30%	-30%		Schubversagen der Wand W1
Stabilitätsversagen: Knicken	Nz = My = Vx =			-80% -50%	EA = EI = ES =			-80%	Knicken der Wand W1
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen, Kontakt	Nz = My = Vx =	-30% -30%			EA = EI = ES =	-30% -30%			Versagen des Kontaktanschlusses der Wand W1 an Fundament

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =			
V =	150%	150%	



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

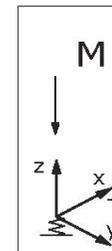
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	5	B	1	C	1	D	1, (3)	E	-
	Fundament		Einzelfundament		Stahlbeton		Druck, (Biegung)		-	
Structural Element Info	Fundament F1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-40%	EA = EI = ES =			-10%	Biegeversagen des Fundaments F1
lokales Versagen: Durchstanzen	Nx = My = Vz =			-90%	EA = EI = ES =			-90%	Durchstanzen des Fundaments F1
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =			-30%	EA = EI = ES =			-10%	Grundbruch im Bereich des Fundaments F1
übermäßige Verformungen: Setzungen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-20%	übermäßige bzw. ungleichmäßige Setzungen des Fundaments F1
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			

maximum exceedance			
	A	E	M
N =			150%
M =			
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

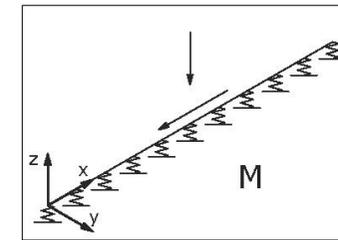
Bewertungszahlen: B_A = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_E = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_B = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	5	B	2	C	1	D	1	E	-
	Fundament		Streifenfundament		Stahlbeton		Druck		-	
Structural Element Info	Fundament F2									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-40%	EA = EI = ES =			-10%	Biegeversagen des Fundaments F2
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =			-30%	EA = EI = ES =			-10%	Grundbruch im Bereich des Fundaments F2
übermäßige Verformungen: Setzungen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-20%	übermäßige bzw. ungleichmäßige Setzungen des Fundaments F2
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen, Lagesicherung	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-10%	Verlust der Lagesicherung des Fundaments F2

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =			150%
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

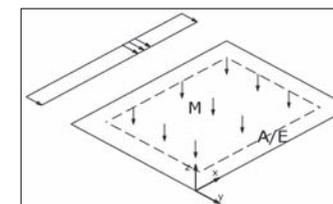
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Strukturierung der Bauteile, Nummerierung und Benennung

Structural Element Name	A	1	B	1	C	1	D	2	E	3
	Platte		einachsig gespannt		Holz		linienförmige Lagerung		teilweise Vorfertigung	
Structural Element Info	OSB - Platte (Dach) D1									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-85% -85% -85%	EA = EI = ES =			-90% -90% -90%	Biegeversagen der OSB-Platte D1
lokales Versagen: Schubversagen	Nx = My = Vz =	-60% -60% -60%	-60% -60% -60%		EA = EI = ES =	-70% -70% -70%			Schubversagen der OSB-Platte D1
übermäßige Verformungen: Durchbiegung	Nx = My = Vz =			-30% -30% -30%	EA = EI = ES =			-10% -10% -10%	übermäßige Durchbiegung der OSB-Platte D1
Stabilitätsversagen: Beulen	Nx = My = Vz =			-95% -95% -95%	EA = EI = ES =			-90% -90% -90%	Beulen der OSB-Platte D1
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen, Kontakt	Nx = My = Vz =	-30% -30% -30%	-30% -30% -30%		EA = EI = ES =	-20% -20% -20%			Versagen des Kontaktanschlusses der OSB-Platte D1 an Balken
Anschlussversagen, Lagesicherung	Nx = My = Vz =	-40% -40% -40%	-40% -40% -40%		EA = EI = ES =	-30% -30% -30%			Verlust der Lagesicherung der OSB-Platte D1

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

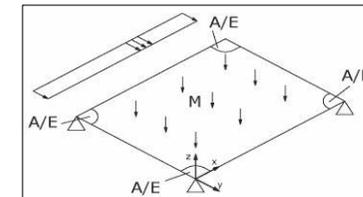
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	1	B	2	C	2	D	1	E	1
	Deckenplatte		zweiachsig gespannt		Stahlbeton		punktförmige Lagerung		Fertigung vor Ort	
Structural Element Info	Deckenplatte Pos. 1, 101, 201, 301, 401									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen Feld	Nx = My = Vz =			-5% -5% -5%	EA= EI= ES=			-20% -20% -20%	Biegeversagen der Deckenplatte
lokales Versagen: Schubversagen im Bereich der Stütze	Nx = My = Vz =	-60% -60% -60%	-60% -60% -60%		EA= EI= ES=	-60% -60% -60%	-60% -60% -60%		Schubversagen der Deckenplatte
Fault Type (Anschlüsse)	Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E		Comment
Anschlussversagen: Durchstanzen	Nx = My = Vz =		-85% -85%		EA= EI= ES=		-85% -85%		Durchstanzen der Deckenplatte im Stützenbereich

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

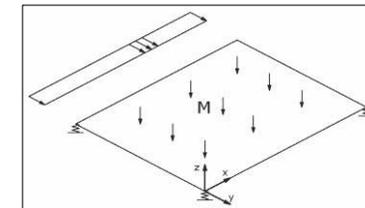
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	1	B	2	C	2	D	3	E	1
	Bodenplatte		zweiachsig		Stahlbeton		flächige Lagerung		Fertigung vor Ort	
Structural Element Info	Bodenplatte Pos. 501, 506									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A	
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =	-85% -85% -85%			EA= EI= ES=	-85% -85% -85%	Biegeversagen der Bodenplatte
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =	-20% -20% -20%			EA = EI = ES =	-20% -20% -20%	Grundbruch unter Bodenplatte
übermäßige Verformungen: ungleichmäßige Setzungen	Nx = My = Vz =	-5% -5% -5%			EA = EI = ES =	-5% -5% -5%	ungleichmäßige Setzung der Bodenplatte
lokales Versagen: Durchstanzen	Nx = My = Vz =	-20% -85% -85%			EA= EI= ES=	-20% -85% -85%	Durchstanzen der Bodenplatte im Stützenbereich
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment
	Anschluss:		M	Anschluss:		M	

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

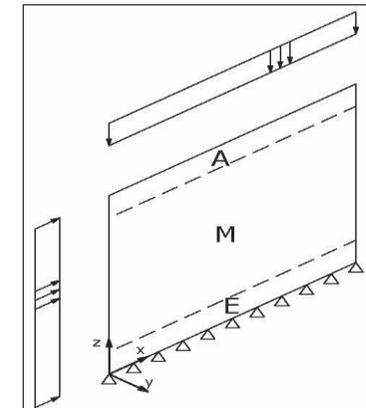
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	4	B	1	C	3	D	1,2	E	1
	Wandscheibe		tragend		Stahlbeton		vertikal, horizontal		Außen-/Innenwand	
Structural Element Info	Wandscheibe Pos. 410, 411									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Schubversagen	Nz =	-60%	-60%	-60%	EA =	-60%	-60%	-60%	Schubversagen der Wandscheibe
	My =				EI =				
	Vx =	-5%	-5%	-5%	ES =	-5%	-5%	-5%	
Stabilitätsversagen: Knicken/Beulen	Nz =	-40%	-40%	-40%	EA =	-40%	-40%	-40%	Beulen der Wandscheibe
	My =				EI =				
	Vx =	-30%	-30%	-30%	ES =	-30%	-30%	-30%	
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen: Lagesicherung	Nz =		-30%	EA =		-30%	Verschiebung des Fußpunktes der Wandscheibe		
	My =			EI =					
	Vx =		-5%	ES =		-5%			

maximum exceedance			
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =			
V =	150%	150%	



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

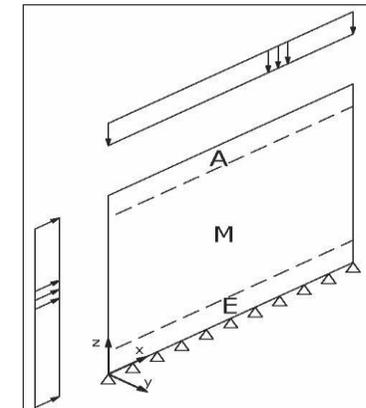
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	4	B	1	C	3	D	1,2	E	2
	Wandscheibe		tragend		Stahlbeton		vertikal, horizontal		Innenwand	
Structural Element Info	Wandscheibe Pos. 409									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Schubversagen	Nz =	-60%	-60%	-60%	EA =	-60%	-60%	-60%	Schubversagen der Wandscheibe
	My =				EI =				
	Vx =	-5%	-5%	-5%	ES =	-5%	-5%	-5%	
Stabilitätsversagen: Knicken/Beulen	Nz =	-40%	-40%	-40%	EA =	-40%	-40%	-40%	Beulen der Wandscheibe
	My =				EI =				
	Vx =	-30%	-30%	-30%	ES =	-30%	-30%	-30%	
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen: Lagesicherung	Nz =		-30%		EA =		-30%		Verschiebung des Fußpunktes der Wandscheibe
	My =				EI =				
	Vx =		-5%		ES =		-5%		

maximum exceedance			
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =			
V =	150%	150%	



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

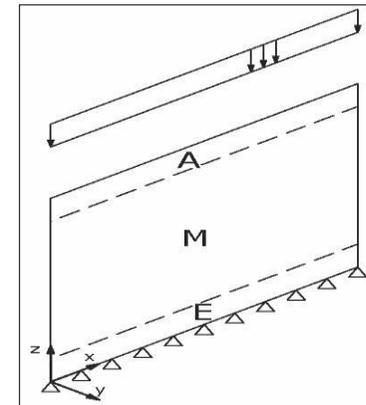
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	4	B	1	C	3	D	1	E	1, 2
	Wandscheibe		tragend		Stahlbeton		vertikal		Außen-/Innenwand	
Structural Element Info	Wandscheibe Pos. 408									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
Stabilitätsversagen: Beulen	Nz = My = Vx =	-30%	-30%	-30%	EA = EI = ES =	-30%	-30%	-30%	Schubversagen der Wandscheibe
									Beulen der Wandscheibe
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Anschlussversagen: Lagesicherung	Nz = My = Vx =			-5%	EA = EI = ES =			-5%	Verschiebung des Fußpunktes der Wandscheibe

maximum exceedance			
	A	E	M
N =			
M =			
V =	150%	150%	



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

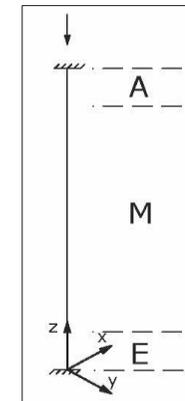
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	3	B	1	C	3	D	1	E	1
	Stütze		Pendelstütze		Stahlbeton		Druck		schlank	
Structural Element Info	Stützen Pos. 3, 4, 103, 104, 203, 204, 303, 304, 403, 404									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
Stabilitätsversagen: Knicken	Nz = My = Vx,y =			-50%	EA = EI = ES =			-80%	Knicken der Stütze
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen: Kontakt	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-10%	-10%		Versagen des Kontaktanschlusses der Stütze Decke/Fundament
Anschlussversagen: Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-80%	-80%		Stütze wird im Anschlussbereich an Decke/Fundament verschieblich

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	150%
M =			
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	1	1	1	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

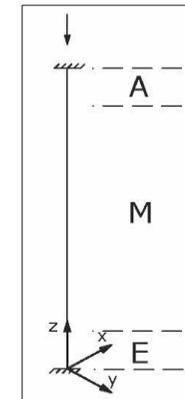
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	3	B	1	C	3	D	1	E	1
	Stütze		Pendelstütze		Stahlbeton		Druck		schlank	
Structural Element Info	Stützen Pos. 2, 102, 202, 302, 402									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
Stabilitätsversagen: Knicken	Nz = My = Vx,y =			-50%	EA = EI = ES =			-80%	Knicken der Stütze
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen: Kontakt	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-10%	-10%		Versagen des Kontaktanschlusses der Stütze Decke/Fundament
Anschlussversagen: Lagesicherung (Verschieblichkeit)	Nz = My = Vx,y =	-80%	-80%		EA = EI = ES =	-80%	-80%		Stütze wird im Anschlussbereich an Decke/Fundament verschieblich

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	150%
M =			
V =			



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	1	1	1	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

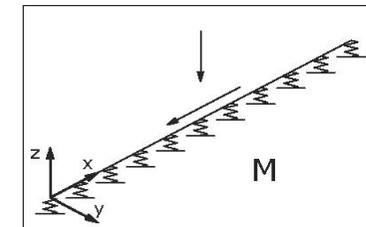
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	5	B	2	C	1	D	1	E	-
	Fundament		Streifenfundament		Stahlbeton		Druck		-	
Structural Element Info	Fundament Pos. 505									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-10%	Biegeversagen des Fundaments
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =			-30%	EA = EI = ES =			-10%	Grundbruch im Bereich des Fundaments
übermäßige Verformungen: Setzungen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-20%	übermäßige bzw. ungleichmäßige Setzungen des Fundaments
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E	M	Anschluss:	A	E		M	
Anschlussversagen: Lagesicherung	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-10%	Verlust der Lagesicherung des Fundaments

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =			150%
M =			
V =			150%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

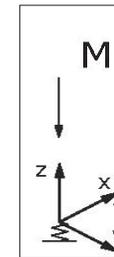
Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

6. Bauteilkatalog - Sofistik-Gebäude

Structural Element Name	A	5	B	1	C	1	D	1	E	-
	Fundament		Einzelfundament		Stahlbeton		Druck		-	
Structural Element Info	Fundament Pos. 504									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-40%	EA = EI = ES =			-10%	Biegeversagen des Fundaments
lokales Versagen: Durchstanzen	Nx = My = Vz =			-90%	EA = EI = ES =			-90%	Durchstanzen des Fundaments
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =			-30%	EA = EI = ES =			-10%	Grundbruch im Bereich des Fundaments
übermäßige Verformungen: Setzungen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-20%	übermäßige bzw. ungleichmäßige Setzungen des Fundaments
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			

maximum exceedance			
	A	E	M
N =			
M =			
V =			150%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

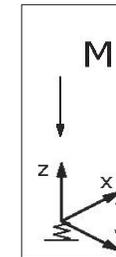
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	5	B	1	C	1	D	1	E	-
	Fundament		Einzelfundament		Stahlbeton		Druck		-	
Structural Element Info	Fundament Pos. 503									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen	Nx = My = Vz =			-40%	EA = EI = ES =			-10%	Biegeversagen des Fundaments
lokales versagen: Durchstanzen	Nx = My = Vz =			-90%	EA = EI = ES =			-90%	Durchstanzen des Fundaments
lokales Versagen: Grundbruch	Nx = My = Vz =			-30%	EA = EI = ES =			-10%	Grundbruch im Bereich des Fundaments
übermäßige Verformungen: Setzungen	Nx = My = Vz =			-20%	EA = EI = ES =			-20%	übermäßige bzw. ungleichmäßige Setzungen des Fundaments
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			

maximum exceedance			
	A	E	M
N =			
M =			
V =			150%



Cause	B_A			B_E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	2	2	2
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	2	2	2

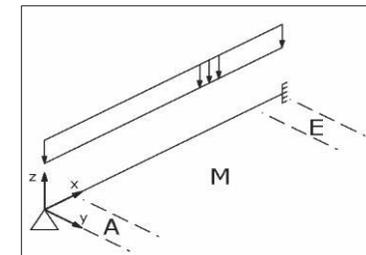
Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: B_A = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_E = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, B_B = Bedeutung der Fehlerfolge

Structural Element Name	A	2	B	2	C	3	D	1	E	-
	Balken		Mehrfeldträger		Stahlbeton		einachsige Biegung		-	
Structural Element Info	Unterzug Pos. 405, 406, 407									

Fault Type (Bauteil)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
	Bereich:	A	E	M	Bereich:	A		E	M
lokales Versagen: Biegeversagen Feld	Nx =			-5%	EA =			-20%	Biegeversagen des Unterzugs
	Mz =			-5%	EI =			-20%	
	Vy =			-5%	ES =			-20%	
lokales Versagen: Biegeversagen im Bereich der Stütze (hier: Einspannung)	Nx =	-60%	-60%		EA =	-60%	-60%		Biegeversagen des Unterzugs im Stützenbereich
	My =	-60%	-60%		EI =	-60%	-60%		
	Vz =	-60%	-60%		ES =	-60%	-60%		
lokales Versagen: Schubversagen	Nx =	-40%	-40%		EA =				Schubversagen des Unterzugs
	Mz =	-40%	-40%		EI =				
	Vy =	-40%	-40%		ES =	-40%	-40%		
übermäßige Verformungen: Durchbiegung	Nx =			-20%	EA =			-10%	übermäßige Durchbiegung des Unterzugs
	Mz =			-20%	EI =			-20%	
	Vy =			-20%	ES =				
übermäßige Verformungen: achsiale Verdrehung (Torsion)	Nx =			-30%	EA =			-10%	übermäßige achsiale Verdrehung (Torsion) des Unterzugs
	Mz =			-30%	EI =			-20%	
	Vy =			-30%	ES =				
Stabilitätsversagen: Kippen	Nx =			-80%	EA =			-90%	Kippen des Unterzugs
	Mz =			-80%	EI =			-90%	
	Vy =			-80%	ES =			-90%	
Fault Type (Anschlüsse)	Reaction force			Reaction stiffness			Comment		
Anschluss:	A	E		Anschluss:	A	E			
Versagen der Anschlüsse an Stützen	Nx =	-40%	-40%		EA =	-40%	-40%	Anschlussversagen des Unterzugs	
	Mz =	-40%	-40%		EI =	-40%	-40%		
	Vy =	-40%	-40%		ES =	-40%	-40%		

	maximum exceedance		
	A	E	M
N =	150%	150%	80%
M =	150%	150%	80%
V =	120%	120%	120%



Cause	B _A			B _E		
	A	E	M	A	E	M
Fehler in Lastermittlung	1	1	1	1	1	1
maßgebende Einwirkungskombination nicht berücksichtigt	2	2	2	3	3	3
Fehler in Schnittgrößenermittlung	2	2	2	1	1	1
Fehler in Querschnittsbemessung	2	2	2	2	2	2
Fehler in Bemessung von Verbindungen und Anschlüssen	2	2	2	3	3	3

Bereiche: A = Anfang, E = Ende, M = Mitte (mittlerer Bereich)

Bewertungszahlen: BA = Auftretenswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BE = Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, BB = Bedeutung der Fehlerfolge

7 Modellierung

7.1 Das FMEA-Modell

Die für die FMEA relevanten Konzepte beziehen sich auf die einzelnen Bauelemente eines Tragwerks, die hierarchisch organisiert werden können. Die zentralen Aspekte für die Analyse, Fehler und Effekt, sind aber nur den elementaren Bauelementen zugeordnet. Auf höheren Ebenen ist nur die Stabilität des (Teil-)Tragwerks relevant. Die folgenden Abschnitte beschreiben die wichtigsten Konzepte und zeigen ihre Zusammenhänge in UML-Diagrammen auf.

7.2 Konzepte

CriticalEffectElement	Vorgegebenes Bauelement, für das die Einflüsse von Fehlern (<i>Faults</i>) anderer Elemente zu untersuchen ist.
CriticalFaultElement	Vorgegebenes Bauelement, dessen Fehler (<i>Fault</i>) im Hinblick Auswirkungen auf andere Elemente (<i>CriticalEffectElements</i>) zu untersuchen ist
Effect	<p>Das abnormale Verhalten eines Bauelements auf Grund von Überbeanspruchung. Es wird als Beziehung zwischen der Größe der Beanspruchung (<i>MemberReaction</i>) und Tragfähigkeitzustand aufgefasst, d.h. als eine Qualifikation des Lastwiderstands. Dies geschieht nicht für ein Kontinuum, sondern ist für Intervalle der Beanspruchung definiert.</p> <p>Ein <i>Effect</i> gehört zu einer bestimmten, durch die <i>EffectDefinition</i> Menge, und ist charakterisiert durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Interval</i>, repräsentiert durch untere und obere Schwellen der Veränderungen im Tragverhalten. ▪ <i>EffectTypeID</i> – Typ-Identifikation des Effektes ▪ <i>FaultTypeID</i> – Typ-Identifikation des Fehlers, der in diesem Element als Konsequenz des Effekts auftritt ▪ <i>StiffnessType</i> – Typ der Steifigkeit ▪ <i>StiffnessValue</i> – Wert der entsprechenden Steifigkeit
EffectDefinition	<p>Definiert eine Menge von Effekten (<i>Effects</i>), die den Status eines Bauteils unter einer bestimmten Beanspruchung widerspiegeln. Die Menge enthält alle möglichen Effekte einer Beanspruchung an einer bestimmten Position im Bauelement. Eigenschaften sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>StructuralElementID</i> – Identifikation des Bauelements ▪ <i>ReactionType</i> – Typ der Beanspruchung ▪ <i>Location</i> – Position im Bauelement ▪ Auflistung der <i>Effects</i>
EffectInfo	Eine (verbale) Beschreibung des Effekttyps (zur Erläuterung für den Benutzer).
EffectType	Eine Klassifizierung der Effekte, die in einem Bauteil entstehen können. Charakterisiert das Tragverhalten für ein Intervall der Beanspruchung und

	<p>enthält</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>TypeId</i>: Eine Typidentifikation ▪ <i>EffectInfo</i>: Eine verbale Beschreibung
Fault	<p>Angenommener oder abgeleiteter Fehler eines Bauteils (repräsentiert durch eine Abweichung der Steifigkeit), die eine neue Lastverteilung im Tragwerk zur Folge haben kann. Entsteht in einem Bauteil und hat die Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>StructuralElementID</i> – Eine Identifizierung des Bauelements ▪ <i>Location</i> – Position im Bauelement ▪ <i>StiffnessValue</i> : ein Steifigkeitswert, absolut oder prozentual bzgl. der Referenz-Steifigkeit des Bauelements ▪ <i>StiffnessType</i>: Einer der Typen der Beanspruchungen {Biege, Zug/Druck- oder Scher-Beanspruchung} ▪ <i>FaultTypeID</i> – Typ-Identifikation des Defektes
FaultInfo	<p>Verbale Beschreibung des Fehler-Typs.</p>
FaultType	<p>Klassifizierung der möglichen Fehlers (Siehe Tabelle 1). Folgende Parameter werden benutzt:</p> <ul style="list-style-type: none"> • <i>TypeId</i>: eine Identifikation ▪ <i>FaultInfo</i>: verbale Beschreibung des Typs ▪ <i>LocalEffect</i>: eine Beschreibung des Einflusses der Fehlerart auf das betroffene Bauelement ▪ <i>PossibleCause</i>: Mögliche Ursache(n) des Fehlers
Interval	<p>Der Bereich des Beanspruchungstyps, beschrieben durch:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Lowerbound</i>: untere Schwelle der Größe der Beanspruchung ▪ <i>Upperbound</i>: obere Schwelle der Größe der Beanspruchung <p>Die Schwellen sind die Grenzen eines Übergangs zum nächsten Effektbereich der Beanspruchung.</p>
Location	<p>Eine bestimmte geometrische Position im Bauelement (referenziert durch lokale oder globale Koordinaten)</p>
MemberReaction	<p>Kraft- oder Biegemomente im Bauteil an einer relevanten Position entlang einer bestimmten Bauteilachse. <i>MemberReaction</i> bezieht sich immer auf ein Bauelement und repräsentiert einen Beanspruchungstyp (<i>ReactionType</i>) und deren Größe und Position. An der gegebenen Position hat sie einen <i>Effect</i> zur Folge.</p> <p>Parameter sind:</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>StructuralElementID</i> – Eine ID des Bauelements ▪ <i>ReactionType</i> (siehe unten) ▪ <i>Location</i>: Position im Bauelement ▪ <i>ReferenceValue</i>: eine Referenzgröße der Beanspruchung – <i>ReferenceMemberReaction</i> ▪ <i>CurrentValue</i>: aktuelle Größe der Beanspruchung (<i>MemberReaction</i>) nach dem Einsetzen der Einflüsse aus <i>NumericalInfluences</i>.
ReactionType	Typ der internen Beanspruchung – Zug/Druck-, Schub- oder Biege-Beanspruchung und Referenz auf die jeweilige Koordinatenachse. {Längs-, Biege_Y, Biege_Z, Torsion oder Schub}
Stiffness	Repräsentiert die Steifigkeit des Bauelements, d.h. Widerstand gegen Deformation durch Biegung (EI), Längsbeanspruchung (EA) oder Schub (GA). Parameter dazu sind: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>StiffnessType</i>: Typ der Steifigkeit ▪ <i>Value</i>: als Absolutwert oder in Prozent des Referenzwertes.
StiffnessType	Auflistung der möglichen Steifigkeitstypen {Längs-, Biege_Y, Biege_Z, Torsion oder Schub} (korrespondiert mit <i>ReactionType</i>)
StructuralElement	Ein elementares Bauelement. Es hat die Eigenschaften: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>StructuralElementI</i>: ein global eindeutiges Identifizierungszeichen, und optional: <ul style="list-style-type: none"> ▪ <i>Name</i> ▪ <i>Description</i>: verbale Beschreibung ▪ <i>Function</i>: Funktion des Bauelements
StructuralElementId	Ein global eindeutiges Identifizierungszeichen jedes Bauelements im Tragwerk
StructureId	Ein eindeutiges Identifizierungszeichen eines Tragwerks oder eines Teils davon.
Upperbound/ Lowerbound	Untere bzw. obere Schwelle einer gegebenen Größe (Steifigkeit, Kraft oder Moment) als Begrenzungsmerkmale eines Fehlers oder Effekts.

Weitere Details und Beispiele zu Fehler (*Fault*) und Effekte (*Effect*) werden in Abschnitt 3 beschrieben.

7.3 Diagramme

Folgende Diagramme spiegeln die Zusammenhänge der oben beschriebenen Konzepte wider. Abb. 1 zeigt die begrifflichen Relationen zwischen einem Bauelement und dazugehörigen Objekten (als konzeptuelles Klassendiagramm in UML). Diese Begriffszusammenhänge wurden stufenweise transformiert, um daraus konkrete Datenstrukturen als Basis für die Software-Implementierung zu gewinnen (Siehe Kapitel 8 - Softwarebeschreibung). Abb. 2 zeigt, wie die Relation zwischen Beanspruchung und Effekt (*MemberReaction* und *Effect*) auf drei Parameter *StructuralElementID*, *Location* und *ReactionType*, sowie auf das *Interval* der Beanspruchungsgröße reduziert wird. Fehler (*Fault*) wird entsprechend durch die Parameter *StructuralElementID*, *Location*, *StiffnessType* und *StiffnessValue* charakterisiert.

In Abb. 3 wurde das Intervall durch die untere und obere Schwelle der Beanspruchungsgröße ersetzt. *StructuralElementID*, *Location* und *ReactionType* wurden in die Menge *EffectDefinition* ausgelagert, da sie von allen Effekten gemeinsam benutzt wird. Die Relation zwischen *Effect* und *Fault* (d.h. Folgefehler) wurde für *EffectDefinition* durch die Parameter *StiffnessType*, *StiffnessValue* und *FaultType* ersetzt.

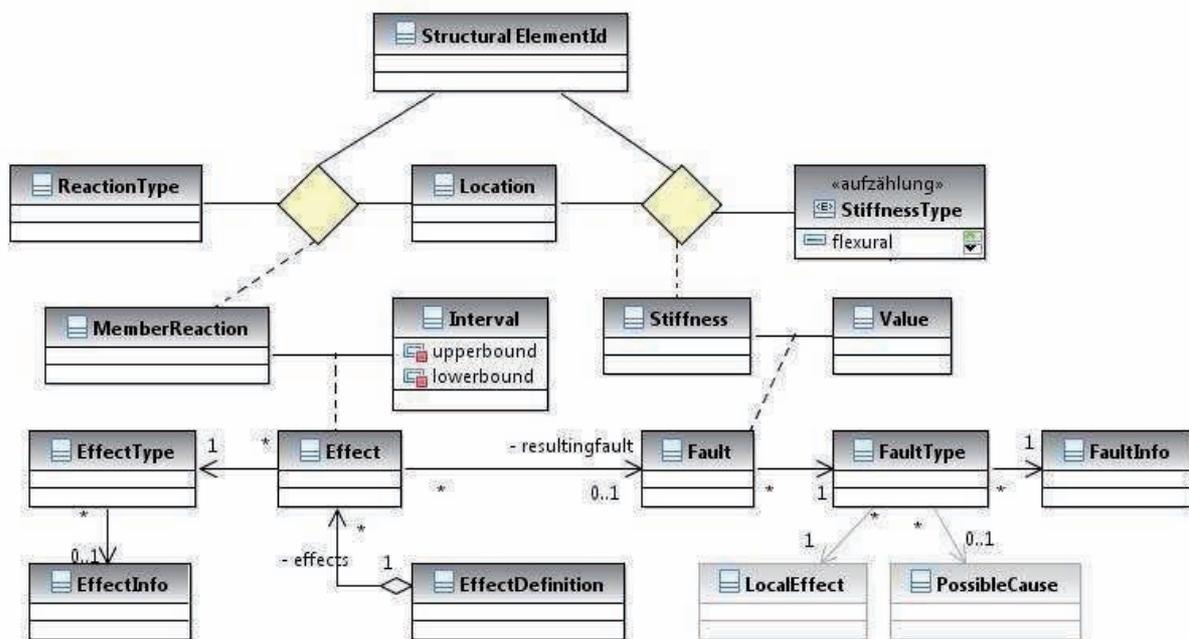


Abbildung 1: Klassendiagramm für StructuralElementId und darauf bezogene Konzepte

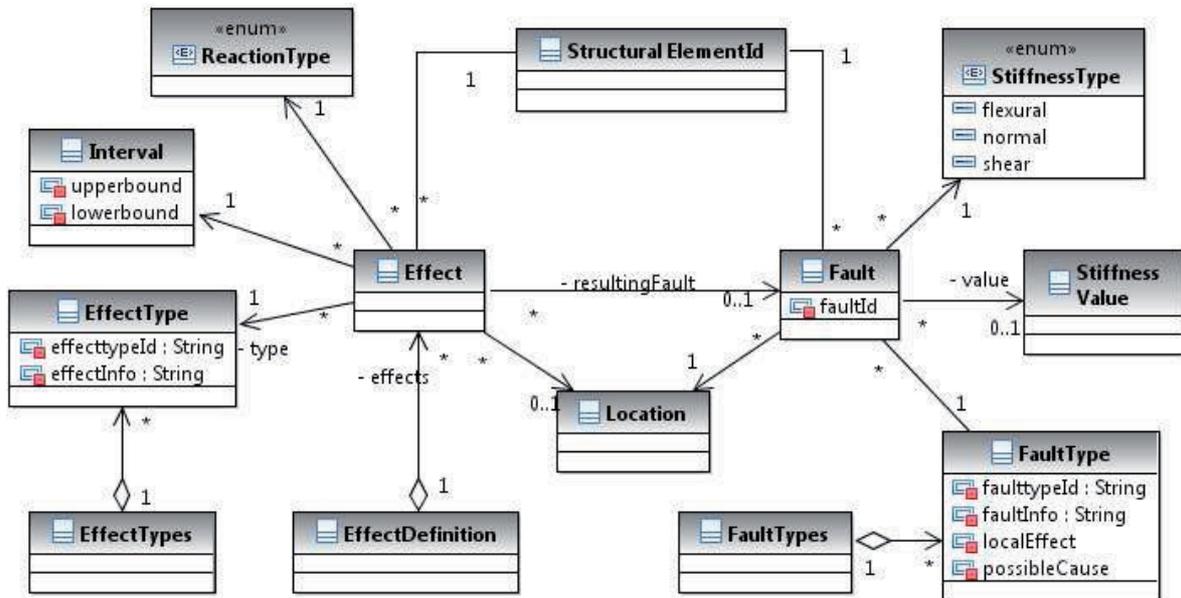


Abbildung 2: Transformierter Entwurf eines Klassendiagramms für „Effect“ und „Fault“

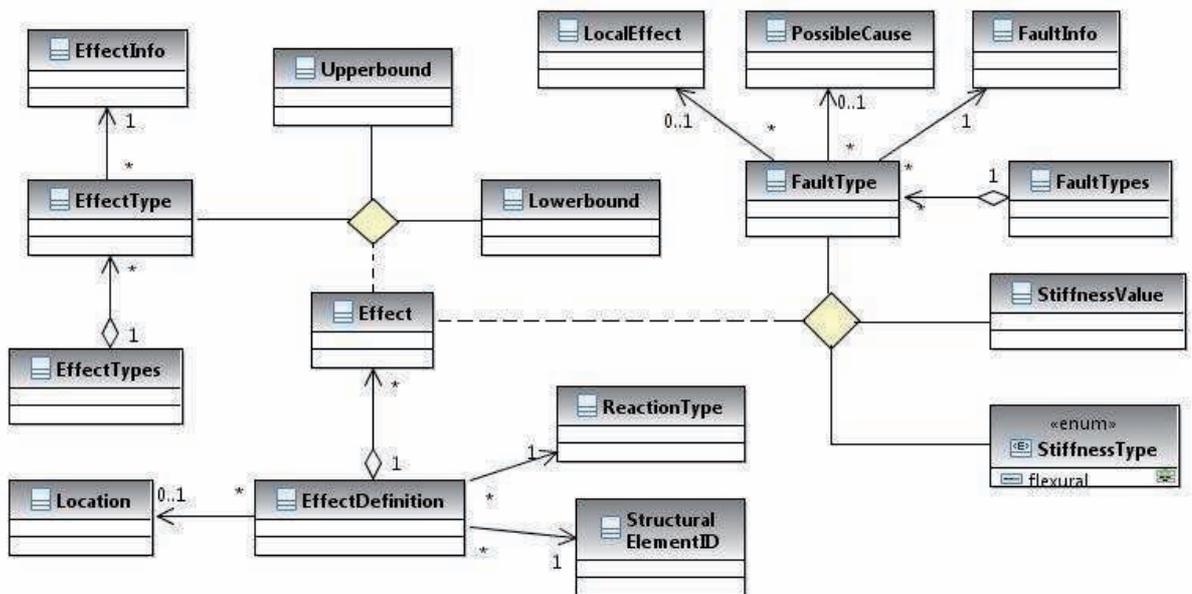
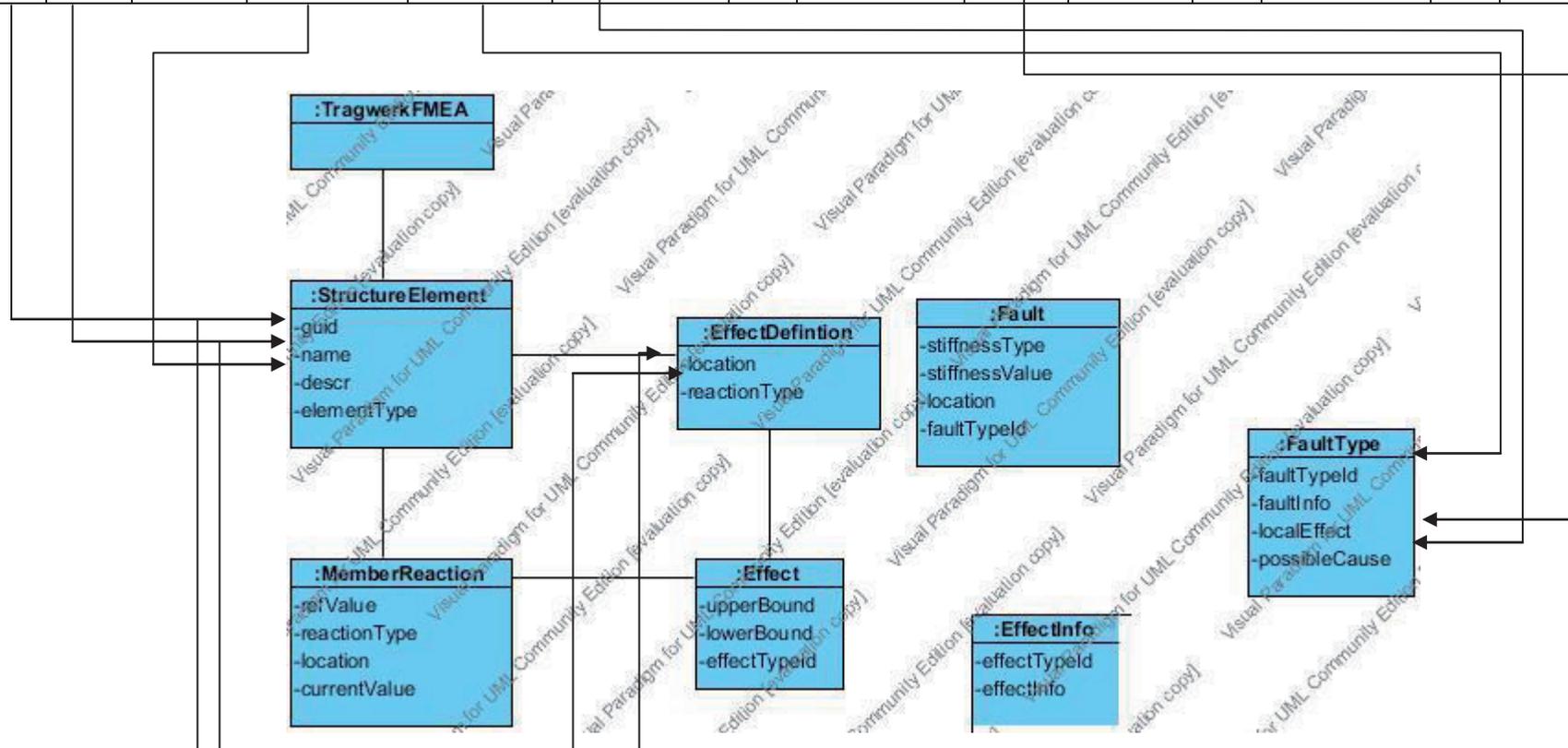


Abbildung 3: Wechselbeziehung zwischen begrifflichen Komponenten in „EffectDefinition“

7.4 Beziehung zur FMEA-Tabelle

Das folgende Bild veranschaulicht die Beziehungen zwischen den oben beschriebenen Konzepten und den Inhalten der FMEA-Tabellen.

Nr.	Bauelement				Fehlertyp und Auftretenswahrscheinlichkeit				Fehlerfolgen			Fehlerentdeckung		RPZ	Kontrolle
	GUID	Name	Funktion	Beschreibung	Mögliche Fehlertypen	Mögliche Fehlerursachen	A	Vermeidungsmaßnahmen	Lokales Effekt	Effekte a.System-Ebene	B	Entdeckungsmöglichkeiten	E		
int	string	string	string	string	string	string	(int)	string	string	string	(int)	string	(int)	(int)	string



Fehler #	Iterations-Ebene	Element-ID	Element-Name	Beanspruchungstyp	Position	Aktuelle Wert	Änderung %	Effekt (lokal)	Folgefehler	Anmerkung
(int)	(int)	(string)	(string)	(string)	(string)	(real)	(real)	(string)	(string)	(string)

7.5 Fehler und Effekte

7.5.1 Fehlerursachen, Effekt(typen), Fehlertypen

Ursache :

Fehler in Lastermittlung

 Lastannahmen zu gering

Fehler in Schnittgrößenermittlung

Maßgebliche Einwirkungskombination nicht berücksichtigt

Fehler in Bemessung

 Fehler in Biegebemessung

 Fehler in Schubbemessung

 Fehler in Querkzugnachweis

 Fehler in Stabilitätsbemessung (Kippen)

 Fehler in Torsionsbemessung

 Fehler in sonstiger Bemessung

 Keine ausreichende Berücksichtigung der Gefahr des Durchstanzens

Vorgaben aus Zulassung überschritten

Andere Ursachen:

 Verschlechterung des Materials, Querschnittsänderung, Ermüdung, Kollision/Unfälle

Effekte

Lokal:

 Einsturz

 erhöhte Beanspruchung

 Überlastung

 eingeschränkte Übertragung der Kräfte

 Reduzierte Steifigkeit

Konsequenzen auf der Systemebene:

 Lastumlagerung,

 Veränderung des statischen Systems – räumliche Steifigkeit, Stabilität

 Reduzierte Steifigkeit eines Auflagers

 Verlust eines Auflagers

 Langfristiges Versagen, langfristig Schädigung der restlichen Bauteile

 Erhöhte Beanspruchung der Bauteile gleicher Ordnung (z.B. benachbarte Stützen)

 Erhöhte Beanspruchung der Bauteile übergeordneter Ordnung (z.B. Balken, Deckenscheibe)

 Unbrauchbarkeit der Bau(teile)

Effekttypen

Elastischer/Plastischer Bereich;

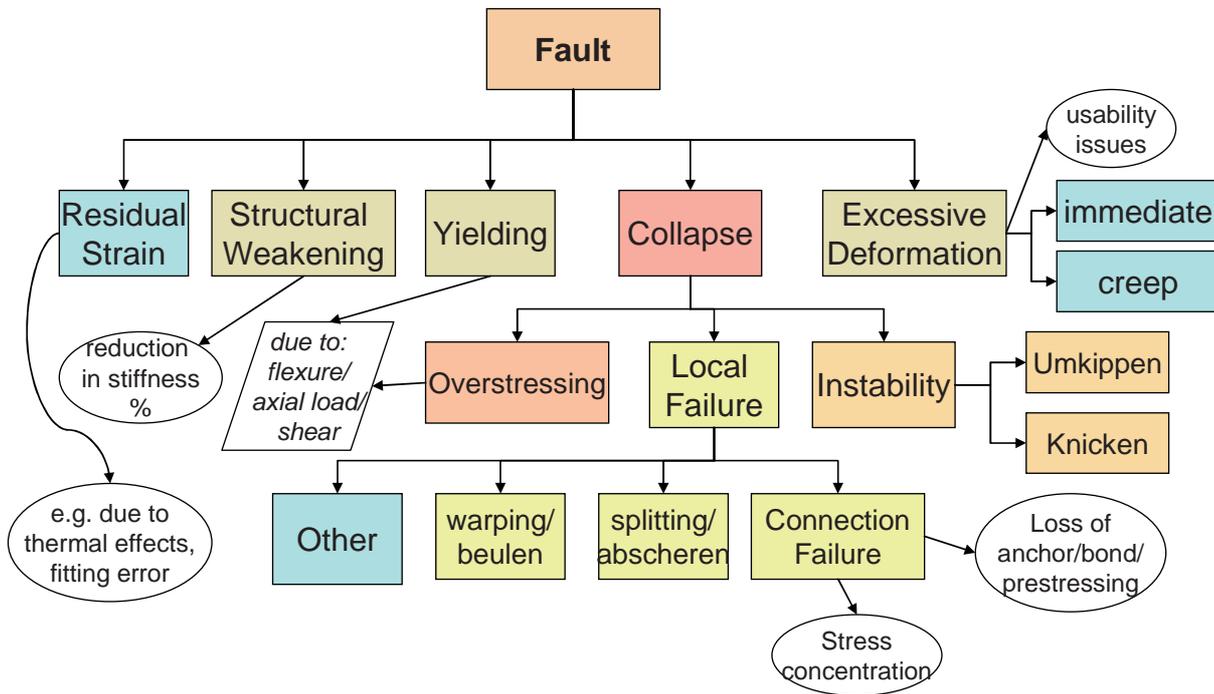
Längs-, Biege-, Scher- oder Torsions-Beanspruchung, Durchstanzen, Knicken, Kippen, Wölbung), Kriechen, Ermüdung;

Exzessive Deformation, Senkung/Rotation des Fundaments, übermäßige Spalten, schleichende Material-Verschlechterung.

Fehlertypen

Fließen, Lösen der Verankerung, Minderung der Vorspannung, Verminderung der Steifigkeit (Biegung EI, Längs EA, Querkraft GA)

7.5.2 Fehlerklassifikation



7.6 Beispiele

1. ReactionType

ReactionType
AXIAL
FLEXURAL_Y
FLEXURAL_Z
SHEAR_Y
SHEAR_Z
TORSIONAL

2. EffectType

EffectTypeID	EffectInfo
OK	Allowable range
DEFORM	Causes unacceptable deformation
BUCKLE	Element will buckle
DRILL	Element may twist

YIELD	Carrying capacity of the element is exhausted
FAIL	Structural element collapses

3. FaultType

FaultTypeID	FaultInfo	Local Effect	Possible Cause
NONE	no fault	none	none
WEAKENING	Reduction in stiffness of structural element	Reduced carrying capacity of section	Reduced section, mechanical damage or material deterioration
YIELD	Yielding	Element undergoes plastic deformation with little or no increase in load	Load exceeds carrying capacity; Too low a margin of safety
OVERSTRESSING	Overstressing	Fails due to stresses exceeding allowable limits	Loads are more than what the section is designed for
LOCAL_FAILURE	Local failure	Failure due to stress concentration	Holes or other structural discontinuities, Weak connections
BUCKLING	Buckling instability	Failure due to lateral buckling	Too slender a structural element
LATERAL_INSTABILITY	Drill instability	Rotational instability, warping	Duely unproportional cross-section
RESIDUAL_STRAIN	Residual strain due to thermal gradient	increased internal stresses	Exposure to unequal temperatures on different faces

7.7 Weitere Objekte

a. StructuralElement

StructuralElementID	Name	Description	ObjectType
B1C1	Beam b1c1	Reinforced concrete T-Beam, 1 st floor	Beam

b. MemberReaction

StructuralElementID	ReactionType	Location	ReferenceValue	CurrentValue
B1C1	FLEXURAL_Y	Mid-point	250.0	215.0

a. EffectDefinition

StructuralElementID: B1C1

ReactionType: FLEXURAL_Y

Location: Mid-point

Effects:

Lower bound	Upper bound	StiffnessType	EffectTypeId	FaultKey
-inf	-100.0	FLEXURAL_Y	FAIL	OVERSTRESSING
-100.0	300.0		OK	NONE
300.0	310.0		YIELD	YIELD
300.0	+inf		FAIL	OVERSTRESSING

b. Fault

StructuralElementID	Location	FaultKey	StiffnessType	StiffnessValue
B1C1	Midpoint	NONE	*	*
		WEAKENING	(type)	(value)
		YIELD	(type)	*
		OVERSTRESSING	(type)	0.0
		BUCKLING		
		LATERAL_INSTABILITY		
		RESIDUAL_STRAIN	(type)	(strain value)
		LOCAL_FAILURE		

e. FaultKey

NONE
WEAKENING
YIELD
BUCKLING
OVERSTRESSING
LATERAL_INSTABILITY
LOCAL_FAILURE
RESIDUAL_STRAIN

8 Standsicherheitsnachweise mit finiten Elementen

8.1 Einleitung

Der Standsicherheitsnachweise von Tragwerken mittels finiten Elementen ist heute zwar gängige Praxis, aber die Unsicherheiten im Umgang mit den Ergebnissen einer FE-Berechnung sind immer noch sehr groß. In diesem Aufsatz wollen wir daher einige Bemerkungen zur Methode der finiten Elemente in der Baustatik machen.

Für einen schnellen Einstieg wird es sinnvoll sein, sich gleich auf die Fehler zu konzentrieren, die dabei gemacht werden können, weil so am schnellsten die Besonderheiten und Eigentümlichkeiten der Methode der finiten Elemente sichtbar werden.

Die Analyse eines Tragwerks beginnt damit, dass man sich ein Modell des Tragwerks macht. Dieses Modell sollte in der Lage sein, die wesentlichen Phänomene im Tragverhalten korrekt wiedergeben zu können. Die Überprüfung, ob das Modell dem Tragwerken adäquat ist, wollen wir *Validierung* nennen.

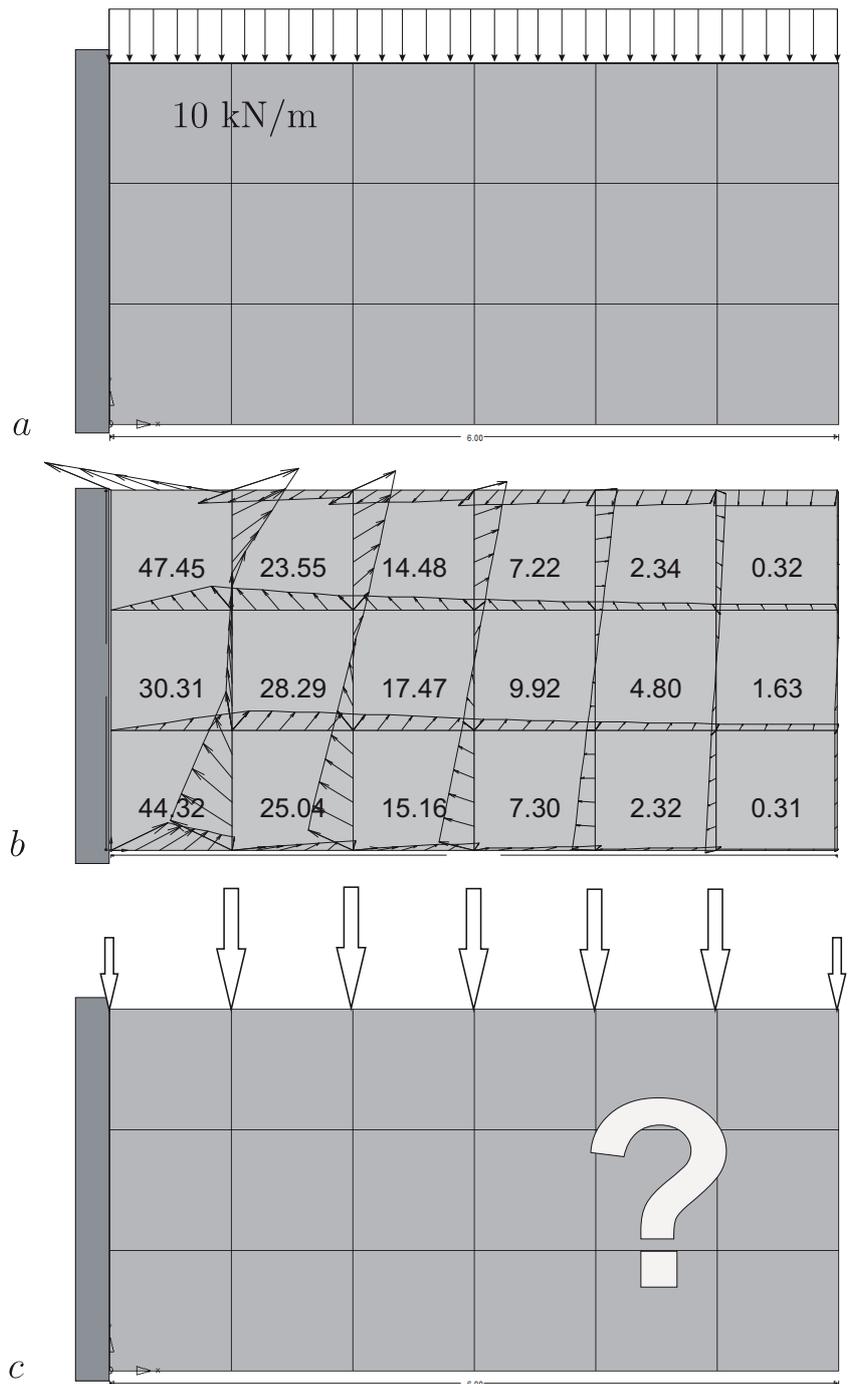
Um das Modell zu analysieren, benutzt der Tragwerksplaner ein FE-Programm, auch dabei können Fehler auftreten. Die Überprüfung, ob das Modell von dem FE-Programm richtig berechnet wurde, wollen wir *Verifizierung* nennen.

- Validierung = Ist das statische Modell adäquat?
- Verifizierung = Gibt es numerische Fehler?

Beide Fehler lassen sich, und das ist die Linie, die dieser Aufsatz verfolgt, auf einen Fehler: den Fehler in den maßgebenden Einflussfunktionen zurückführen.

Rechentechisch stellen die Werte von Einflussfunktionen Fortleitungszahlen dar. Eine Last drückt hier auf das Tragwerk und die Frage ist, was kommt davon als Querkraft in einem Bemessungsschnitt an?

Wenn hier bei der Modellbildung Fehler gemacht werden, Steifigkeiten falsch angesetzt werden, dann stimmt der Informationsfluss zwischen Aufpunkt und Lastangriffspunkt nicht, dann ist die Fortleitungszahl falsch und dann sind auch die Schnittkräfte falsch— auch wenn das FE-Programm richtig rechnet.



Knotenkräfte sind eine Fiktion

Abbildung 8.1: 1. Beispiel: Berechnung einer Scheibe mit finiten Elementen: **a)** Der Originallastfall p ; **b)** der FE-Lastfall p_h , das ist der Lastfall, den das Programm rechnet; **c)** Knotenkräfte—sie sind nur ein Modell 'als ob'. In Wirklichkeit gibt es sie nicht.

Angenommen das Modell ist richtig, das Modell kann die Kinematik des Originaltragwerks in den wesentlichen Zügen richtig abbilden. Dann gibt es immer noch Fehler, weil das FE-Programm die Einflussfunktionen, die zu dem Modell gehören, nicht richtig approximieren kann. Denn das handicap der finiten Elemente ist ihre *beschränkte Kinematik*, sind ihre ungelenken Verformungen. Deswegen sind die FE-Ergebnisse falsch.

- Modellfehler = falsche Einflussfunktionen
- Numerischer Fehler = fehlerhafte (ungelenke) Einflussfunktionen

Und die Fehler sind hintereinander geschaltet. Erst werden durch den Übergang vom Tragwerk zum Modell die wahren Einflussfunktionen reduziert, und diese schon vereinfachten Einflussfunktionen können sich auf dem FE-Netz aufgrund der fehlenden Beweglichkeit der Elemente nicht richtig ausbilden. *Diese Dinge sind weitgehend unbekannt.*

Bauingenieure sehen die finiten Elemente immer noch so, wie die Ingenieure bei Boeing, die die Methode zum ersten Mal einsetzten und dabei mit Knotenkräften und Knotenverformungen operierten. Dieses Knotenkraft-Modell ist sehr suggestiv, aber es ist doch nötig, leichte Korrekturen an diesem Modell anzubringen, wenn man mit den finiten Elementen in der Statik weiterkommen will.

8.1.1 Was finite Elemente sind und nicht sind

Viele Ingenieure verstehen die Analyse einer Kragsscheibe wie in Abbildung 8.1 a mit finiten Elementen in etwa wie folgt:

Die Kragsscheibe wird in einzelne Scheibenelemente zerlegt, die an den Knoten zusammenhängen und die Streckenlast wird, passend hierzu, durch Knotenkräfte ersetzt. Anschließend werden, ähnlich wie bei einem Fachwerk, an jedem Knoten die Gleichgewichtsbedingungen formuliert und so findet man die Verformungsfigur, die zu der FE-Scheibe gehört.

Aber dieses Modell ist nur ein *Modell als ob*, denn wenn in den Knoten der Scheibe wirklich Knotenkräfte angreifen würden, dann hätten die immens hohen Spannungen unter den Knotenkräften das Material schon lange zum Fließen gebracht und die Knoten wären mitsamt den Knotenkräften vom Bildschirm verschwunden.

Dieses Modell ist sehr populär, man findet es in sehr vielen Büchern über finite Elemente. Man kommt mit diesem Modell scheinbar sehr schnell in die Methode der Finiten Elemente hinein, aber leider nicht sehr viel weiter. Sprechen wir es deutlich aus:

- Die finiten Elemente hängen nicht nur an den Knoten zusammen.
- Die Knotenkräfte sind eine Fiktion, sie gibt es nicht.

Ja, wagen wir uns noch einen Schritt weiter vor, die ganze Interpretation, dass man eine Scheibe in kleine Scheibenelemente zerlegt ist fragwürdig. Sie ist anschaulich, das ja, aber sie führt den, der nicht das nötige Hintergrundwissen hat, eher in die Irre.

Die Scheibenelementen sind eigentlich mathematische Konstrukte und keine mechanischen Elemente. Sie dienen nur dazu, auf der Scheibe stückweise Interpolationspolynome zu konstruieren, mit denen man die horizontalen und vertikalen Verschiebungen der Scheibe, u_x und u_y , das sind ja für sich genommen jeweils Flächen, facettenartig approximieren kann. So ähnlich, wie man eine glatte Kurve durch einen Polygonzug approximieren kann. Wenn natürlich auch die Interpretation als Scheibenelemente im statischen Sinne nahe liegt und sich kaum ein Ingenieur dieser Suggestion entziehen kann.

In der Stabstatik ist diese Interpretation legitim. Im Reich der Stäbe und Balken kann man die finiten Elemente wirklich als kleine Stab- und Balkenelemente interpretieren. In der Stabstatik gibt es wirklich Knotenkräfte und Knotenmomente. Aber die Stabstatik ist eben ein Sonderfall, die Übertragung dieses Modells auf Flächentragwerke ist nicht zulässig.

- Knotenkräfte sind auf Stabtragwerke beschränkt.

Der Lastfall, den das FE-Programm wirklich rechnet, ist in Abbildung 8.1 b dargestellt. Wir nennen ihn im Folgenden den Lastfall p_h im Unterschied zum Originallastfall, den wir p nennen (unabhängig davon, ob es ein LF g oder ein Verkehrslastfall ist). In dem Lastfall p_h wirken längs den Elementkanten Linienkräfte und in den Elementen Flächenkräfte, ähnlich dem Eigengewicht, die die Scheibe nach unten drücken. Die Größe dieser Flächenkräfte erkennt man nur an den Zahlen in den Elementen. Diese Zahlen sind das Gesamtgewicht der Flächenkräfte pro Element.

Das FE-Programm hat den Lastfall p_h so eingestellt, dass er *arbeitsäquivalent*, 'wackeläquivalent' zu dem Originallastfall ist. Wackeläquivalent meint, dass, wenn wir an der Scheibe wackeln, wenn wir also die Knoten des FE-Netzes in beliebige Richtungen verschieben, die virtuellen Arbeiten, die die Originalbelastung bzw. die Ersatzbelastung auf diesen Wegen leisten, gleich sind.

Ein Prüfenieur, der erst an der realen Scheibe mit der Originalbelastung wackeln würde und danach an der FE-Scheibe mit der Ersatzbelastung, würde keinen Unterschied feststellen, wenn—und das ist der entscheidende Punkt (!)—wenn die virtuelle Verrückung eine der möglichen Knotenverschiebungen der FE-Scheibe wäre.

Wenn er aber als virtuelle Verrückungen eine Sinus-Welle wählen würde, die sich ja durch die eckigen, polygonzugartigen Elementverformungen nicht exakt wiedergeben lässt, dann würde er stutzig werden, weil die virtuellen Arbeiten der beiden Lastfälle bezüglich der Sinuswelle nicht gleich sind.

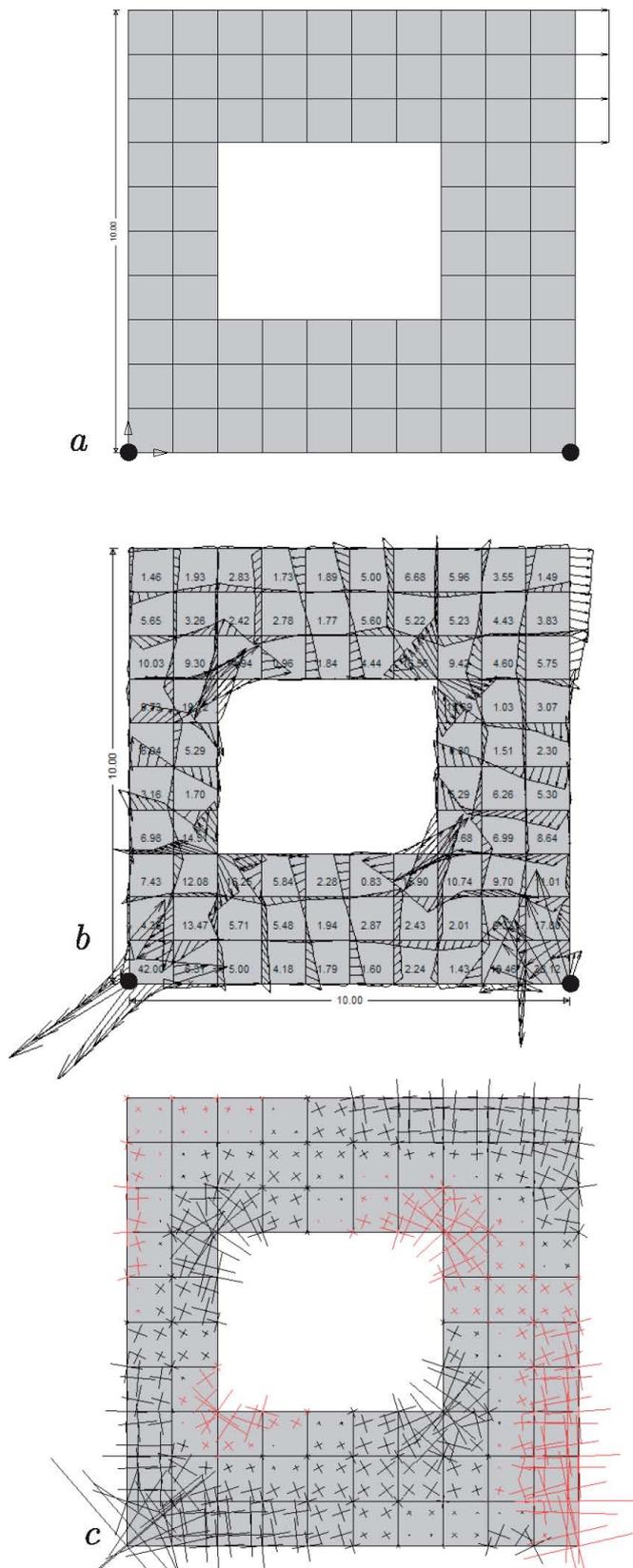


Abbildung 8.2: 2. Beispiel: FE-Analyse einer Scheibe: **a)** die Scheibe mit der Belastung. **b)** Die Lasten, die der FE-Berechnung zu Grunde liegen, haben scheinbar wenig mit der Originalbelastung zu tun. **c)** aber die Spannungen glaubt man sofort und der Anwender ahnt auch nicht, dass sie eigentlich auf dem Lastfall in Bild b beruhen.

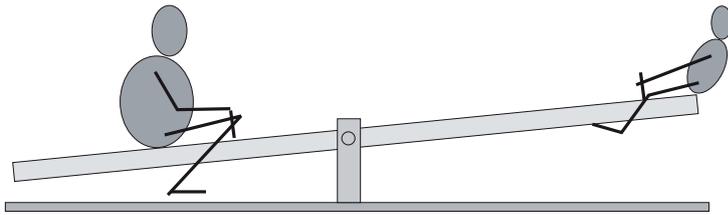


Abbildung 8.3: Vater und Sohn leisten bei jeder Drehung der Schaukel die gleiche Arbeit. Sie sind einander energetisch äquivalent. Das ist der Grundgedanke der finiten Elemente.

In dieser Beschränkung, der Äquivalenz der beiden Lastfälle p und p_h nur hinsichtlich der Knotenverschiebungen, liegt der Näherungscharakter der finiten Elemente.

- Wenn man ein Tragwerk mit finiten Elementen berechnet, dann wird der Originallastfall durch einen arbeitsäquivalenten Lastfall ersetzt.

Das Beispiel von Vater und Sohn auf der Schaukel in Abbildung 8.3, so einfach wie es ist, drückt den Äquivalenzgedanken sehr schön aus. Vater und Sohn haben nicht dasselbe Gewicht, aber bei jeder Drehung der Schaukel leisten Vater und Sohn dieselbe Arbeit, weil der Sohn das, was ihm an Gewicht fehlt, durch Hebelarm ersetzt. Vater und Sohn sind bezüglich aller möglichen Drehungen der Schaukeln einander äquivalent, weil sie bei jeder Drehung der Schaukel dieselbe Arbeit leisten.

So, wie wir durch das Hochwerfen Steine auf ihr Gewicht testen, so sagt ein FE-Programm zwei Lasten sind gleich, wenn sie bei jeder virtuellen Verrückung der Knoten die gleiche Arbeit leisten.

Ein FE-Programm begeht daher nach seiner Meinung keinen Fehler, wenn es die Randbelastung in Abbildung 8.1 a durch eine arbeitsäquivalente Belastung p_h , die Linien- und Flächenkräfte in Abbildung 8.1 b ersetzt. Bezogen auf sein (beschränktes) Sensorium, d.h. die Menge aller Knotenverschiebungen, die auf dem Netz möglich sind, sind die beiden Lastfälle ja äquivalent, einander gleich. Bei jedem Wackeln an der Scheibe sind die Arbeiten ja immer gleich groß, also sind sie doch einander äquivalent, sind sie identisch...

In der klassischen Statik sind zwei Lastfälle p und p_h gleich, wenn die Lasten in jedem Punkt übereinstimmen (starkes Gleichheitszeichen). In der FE-Statik gelten sie als gleich, wenn sie bei gleichen virtuellen Verrückungen gleiche Arbeiten leisten. Das ist das so genannte schwache Gleichheitszeichen.

FE-Statik ist somit im gewissen Sinne eine 'Wackelstatik', womit aber nichts über die Qualität der Finiten Elemente gesagt sein, denn auch die Natur findet die Gleichgewichtslagen eines Tragwerkes durch Wackeln. Nur fährt die Natur unendlich viele Tests, verwendet sie unendlich viele virtuelle Verrückungen, während ein FE-Programm sich notwendigerweise bescheiden muss. Sein Sensorium ist beschränkt. Es weiß nichts davon, dass es auch

Sinuswellen gibt.

Dieser Tausch, $p \rightarrow p_h$, das Ersetzen des Originallastfalls durch einen arbeitsäquivalenten Lastfall, ist übrigens *der einzige Fehler*, den ein FE-Programm macht und diesen Fehler begeht es gleich am Anfang. Aber alles was danach kommt, ist klassische Statik, ist Statik im Sinne des Regelwerks. Die Schnittkräfte, die Verformungen alles ist exakt. Nur ist es eben ein anderer Lastfall. Und für diesen Lastfall bemisst der Tragwerksplaner das Tragwerk. Der Tragwerksplaner glaubt die Spannungen, die er auf dem Bildschirm sieht, gehörten zu dem Lastfall in Abbildung 8.2 a. In Wirklichkeit gehören sie aber zu dem Lastfall in Abbildung 8.2 c.

8.1.2 Vergleich des gerechneten Lastfalls mit dem eingegebenen Lastfall

Wenn aber das FE-Programm den Originallastfall durch einen arbeitsäquivalenten Lastfall ersetzt, dann kann man doch eine FE-Berechnung ganz einfach dadurch kontrollieren, dass man den FE-Lastfall mit dem Originallastfall vergleicht: Was sollte gerechnet werden und welchen Lastfall hat das Programm wirklich gerechnet?

Die FE-Programme bieten diese Prüfung in der Regel aber nicht an. Dies hat zwei Ursachen: Die Benutzer wissen in der Regel nicht, dass es diese Möglichkeit gibt und die Programmautoren haben kein Interesse daran, weil sie dann dem Anwender erklären müssten, warum das FE-Programm anscheinend einen 'falschen' Lastfall löst, der noch dazu anscheinend wenig mit dem Originallastfall zu tun hat. Jeder Anwender, der mit der Theorie der finiten Elemente nicht vertraut ist, würde den Glauben an die finiten Elemente verlieren und die Programmhersteller einen guten Kunden...

Zur Ehre der Programmautoren muss jedoch gesagt werden, dass sie an dieser Situation eigentlich keine Schuld tragen. Zu einem guten Teil hat das Problem mit der Unkenntnis der Anwender zu tun. Die meisten Anwender wissen eigentlich nicht, was finite Elemente sind. Sie extrapolieren aus ihren Erfahrungen mit der Stabstatik auf die Flächentragwerke und erwarten nun, dass ihnen die FE-Programme ähnlich schöne Ergebnisse auch für Scheiben und Platten liefern. Aber das sind zwei verschiedene Welten: Das eine sind Stabtragwerken, und das andere sind Flächentragwerke.

- Es gehört sehr viel Erfahrung und Hintergrundwissen dazu, die FE-Ergebnisse bei Flächentragwerken richtig zu interpretieren.

8.1.3 Adaptive Verbesserung

Wenn man aber den FE-Lastfall p_h , also die Lasten in Abbildung 8.1 b, mit dem ursprünglichen Lastfall p , der Streckenlast in Abbildung 8.1 a vergleichen kann, dann liegt es nahe, die Elemente dort kleiner zu machen, wo die Abweichungen zwischen p und p_h

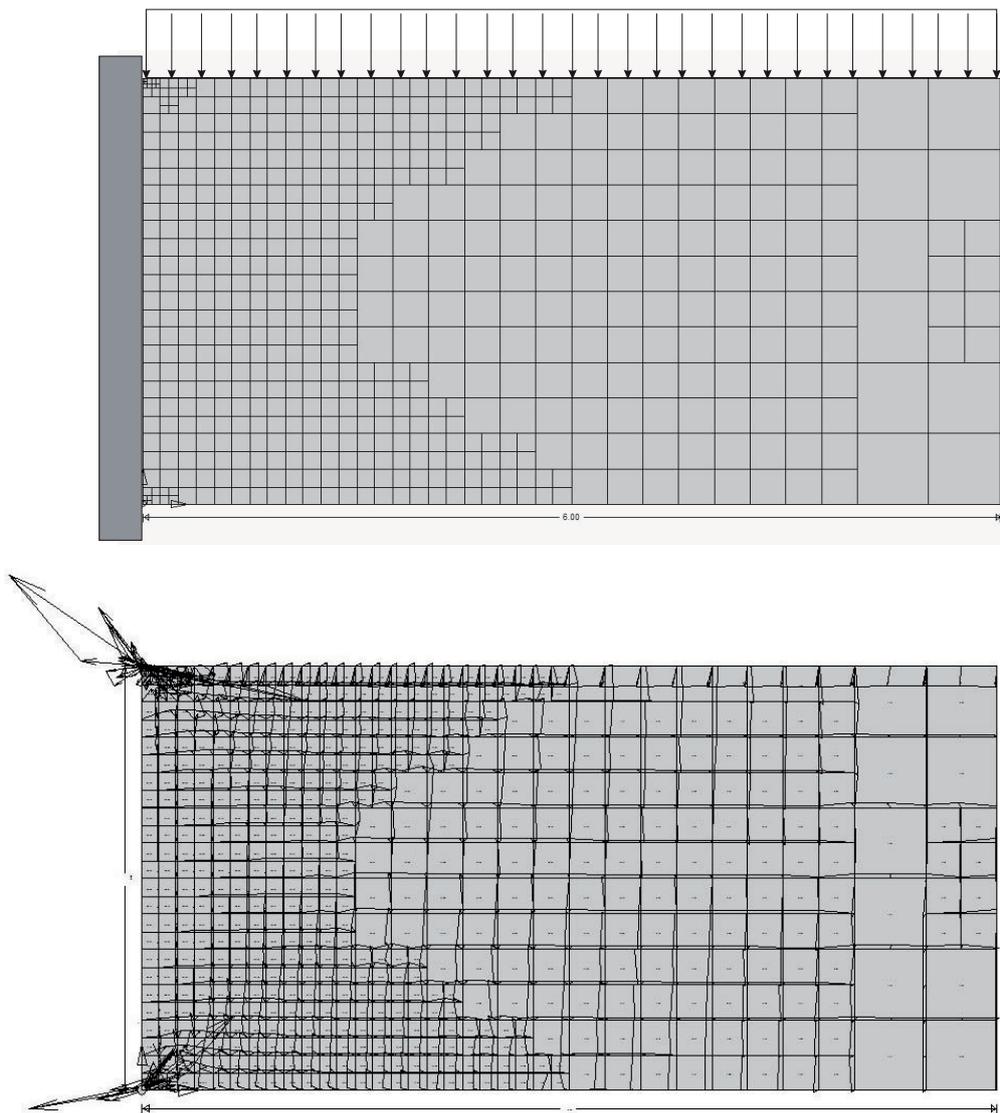


Abbildung 8.4: Adaptive Verfeinerung des Netzes. **a)** Das Netz wurde dort verfeinert, wo die Abweichung des Lastfalls p_h vom Lastfall p groß war **b)** der FE-Lastfall p_h auf dem verfeinerten Netz. In den Ecken gibt es nach der Elastizitätstheorie singuläre Spannungen. Die beginnen sich hier abzuzeichnen.

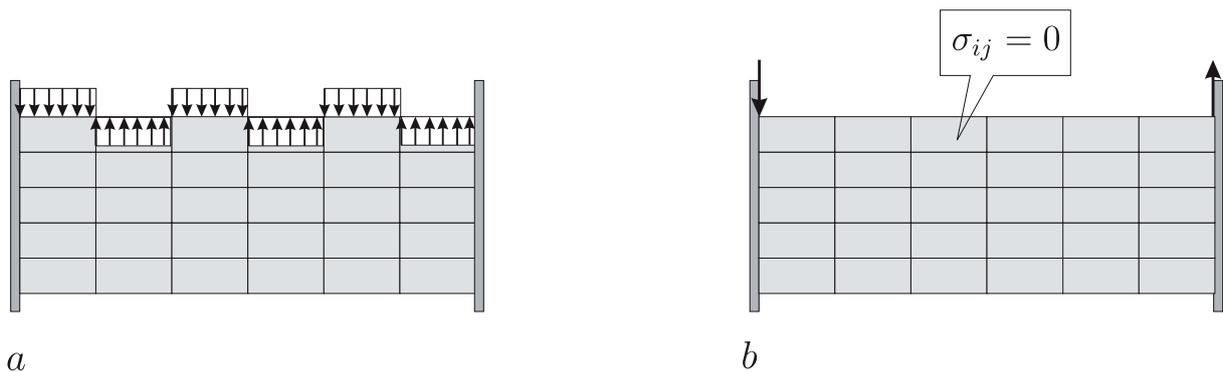


Abbildung 8.5: Scheibe: **a)** System und Belastung; **b)** bis auf die Lagerknoten sind alle äquivalenten Knotenkräfte Null.

groß sind, s. Abbildung 8.4. Auf diese Art und Weise kann man die Übereinstimmung zwischen den beiden Lastfällen p und p_h verbessern. Man nennt dies *adaptive Verfeinerung* des Netzes. Ein FE-Programm ist also gewissermaßen in der Lage sich (innerhalb gewisser Grenzen) selbst zu kontrollieren. Adaptive Verfahren werden in der Luft- und Raumfahrt schon seit längerer Zeit angewandt. Warum dann nicht auch im Bauwesen?

Andererseits darf man sich von dieser Option keine Wunder erwarten. Die Singularitäten in den Ecken lassen sich damit nicht beseitigen. Ja es ist sogar so, dass die Spannungen immer größer werden, je feiner man das Netz in der Nähe einer solchen singulären Ecke macht. Für die Ecke selbst gewinnt man also gar nichts, aber ihr negativer Einfluss auf die Genauigkeit der FE-Ergebnisse im Feld, in den abliegenden Punkten, lässt sich doch deutlich verringern. Denn anders als viele Anwender meinen, beeinflussen solche singulären Stellen auch die Genauigkeit im Feld (pollution).

Dazu kommt ein zweites. Bei einer adaptiven Verfeinerung eines Netzes werden sehr schön die kritischen Stellen, die *hot spots* sichtbar, s. Abbildung 8.6 a. Der Tragwerksplaner lernt das Tragwerk besser kennen. Mit etwas Routine ist man dann bald in der Lage vorauszusagen, wo das Programm das Netz adaptiv verfeinern wird, aber für den Anfänger, der blind dem FE-Programm vertraut, hat die adaptive Verfeinerung einen wertvollen didaktischen Nebeneffekt.

Bei einer neuen Variante, der so genannten *zielorientierten Verfeinerung*, s. Abbildung 8.6 b, kann man das Netz gezielt so verfeinern, dass ein spezieller Wert—hier die vertikalen Spannung σ_{yy} —auf dem Netz möglichst genau ermittelt wird.

Bemerkung: Der nahe liegende Gedanke, einfach die Differenz der Lasten, $p - p_h$, noch einmal auf das Tragwerk aufzubringen, diesen Lastfall zu lösen, usw., funktioniert mit finiten Elementen nicht, weil die FE-Methode ein *Projektionsverfahren* ist, [8]. Unter den Lasten $p - p_h$ verformt sich die Scheibe nicht. Es gibt Lastfälle, die kann man auf einem Netz nicht lösen, das heißt sie rufen keine Verformungen, keine Spannungen hervor, s.

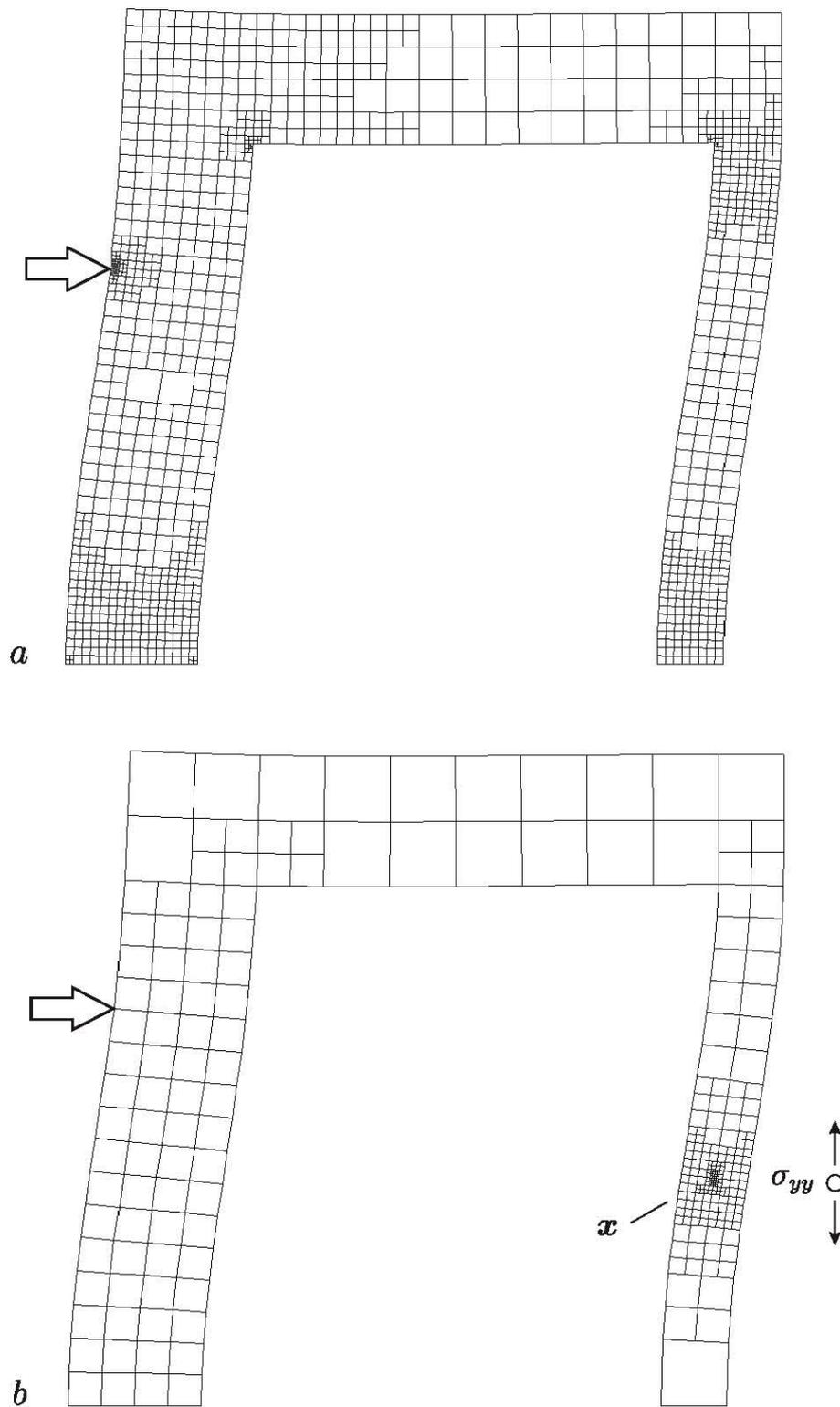


Abbildung 8.6: Adaptive Verfeinerung **a**) Standard **b**) zielorientierte Verfeinerung, [9]

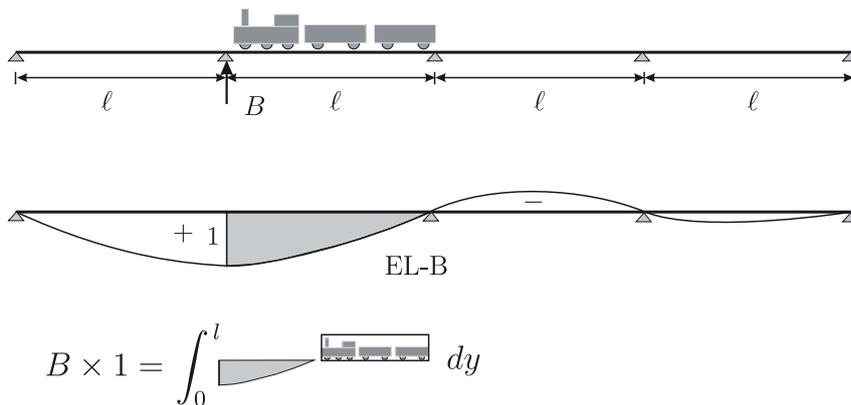


Abbildung 8.7: Ermittlung der Lagerkraft B mittels der Einflussfunktion (oder Einflusslinie, EL) für das Lager

Abbildung 8.5. Der Lastfall $p - p_h$ ist ein solcher Lastfall. Eine Verbesserung kann man daher nur erzielen, wenn man das Netz verfeinert.

8.1.4 Einflussfunktionen—der Schlüssel zu den finiten Elementen

Die Einflussfunktionen sind der Schlüssel zur Statik und auch zu den finiten Elementen, denn es gilt der zentrale Satz:

- In der linearen Statik berechnet ein FE-Programm alle Spannungen, alle Auflagerkräfte, alle Verformungen mittels Einflussfunktionen.

Und weil die Beweglichkeit eines FE-Netzes eingeschränkt ist, ist ein FE-Programm gezwungen genäherte Einflussfunktionen zu verwenden. *Das ist der einzige Grund, warum FE-Ergebnisse falsch sind.*

Der Tragwerksplaner ermittelt die Auflagerkraft B für einen Brückenpfeiler

$$B = \int_0^l \eta(x) p(x) dx \tag{8.1}$$

indem er die Streckenlast p mit der Einflussfunktion $\eta(x)$ für die Auflagerkraft überlagert, s. Abbildung 8.7. Die Einflussfunktion ist die Biegelinie der Brücke die entsteht, wenn das Innenlager entfernt wird und die Brücke an dieser Stelle um eine Längeneinheit nach unten gedrückt wird.

Genau so geht auch eine FE-Programm vor. Sein Problem ist nur, dass seine Einflussfunktion falsch ist oder, milder ausgedrückt, nur annähernd richtig ist.

Denn dadurch, dass die Brücke in finite Elemente unterteilt wird, *verliert sie an Beweglichkeit*, wird sie un gelenker und als Folge hiervon wird sich nicht die korrekte Biegelinie ausbilden, wenn das Lager um eine Längeneinheit abgesenkt wird.

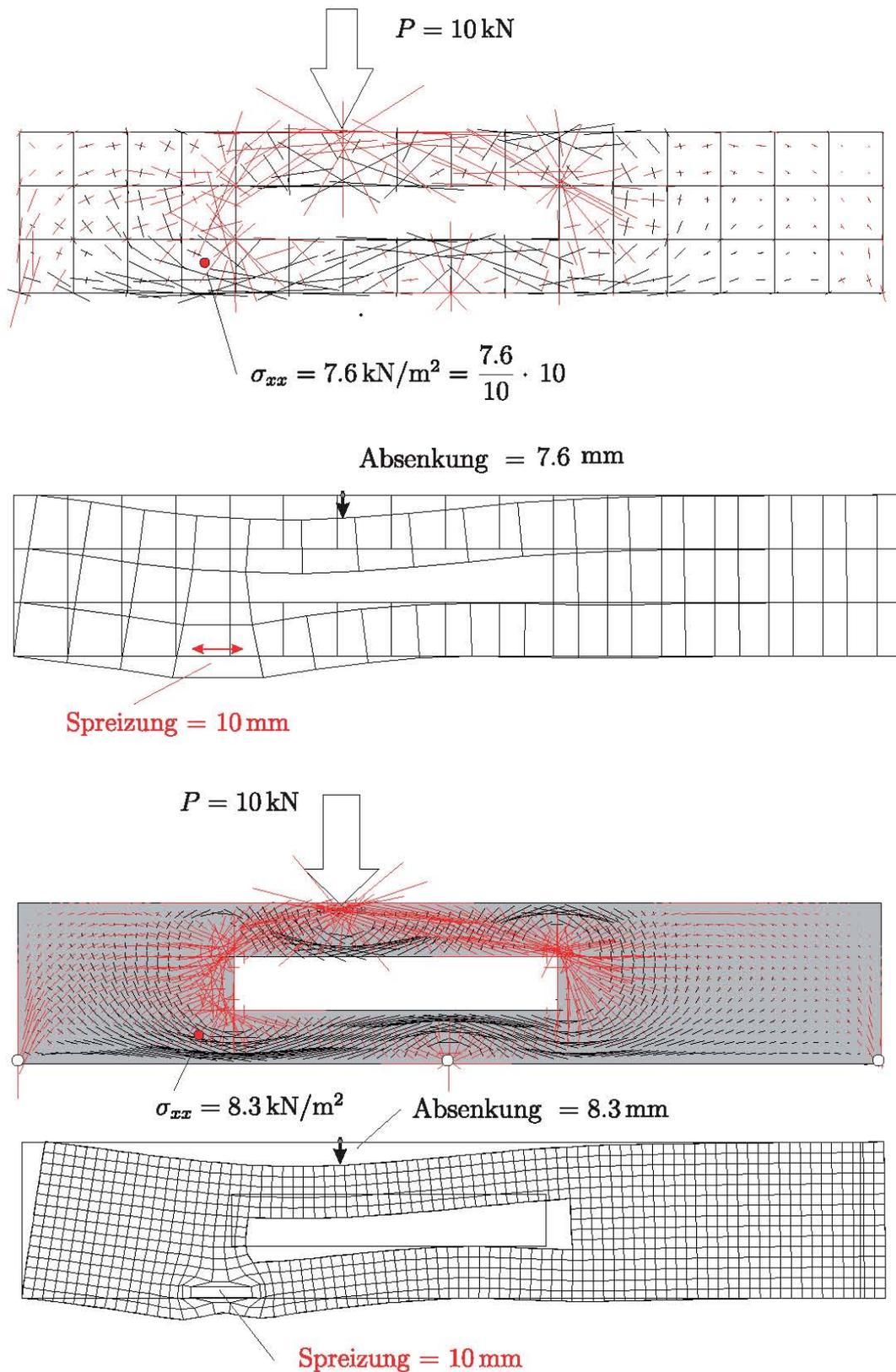


Abbildung 8.8: Eine Versetzung von 10 mm im Aufpunkt ruft in dem FE-Modell eine vertikale Verschiebung von 7,6 mm im Fusspunkt der Belastung hervor. Also ist die Spannung im Aufpunkt gleich $7,6/10 \times 10 = 7,6 \text{ kN/m}^2$. Auf dem verfeinerten Netz wird die vertikale Verschiebung größer und daher wächst die Spannung auf $8,3/10 \times 10 = 8,3 \text{ kN/m}^2$.

- Die FE-Ergebnisse sind nur Näherungen, weil die eingeschränkte Kinematik der finiten Elemente nicht die korrekte Ausbildung der Einflussfunktionen erlaubt.

Welche Konsequenzen diese elementare Tatsache für die tägliche Arbeit mit finiten Elementen hat, wollen wir an drei kleinen Beispielen erläutern.

Beispiel Spannung

Die Scheibe in Abbildung 8.8 wird an ihrem oberen Rand durch eine Einzelkraft belastet. Wie groß ist die dadurch hervorgerufene horizontale Spannung in dem markierten Punkt im unteren Teil der Scheibe? Das FE-Programm berechnet diese Spannung, wie alle anderen Werte auch, mittels der zugehörigen Einflussfunktion. Die Einflussfunktion für die Spannung σ_{xx} ist die Verformungsfigur der Scheibe, wenn der Aufpunkt um 10 mm gespreizt wird. Was in dem FE-Modell von dieser Spreizung an der oberen Kante, im Fußpunkt der Kraft ankommt, hängt von der Zahl und der Größe der gewählten Elemente ab. Bei der hier gewählten, relativ groben Vernetzung, bewegt sich der Fußpunkt der Last um 7.6 mm vertikal nach unten und somit kommt das FE-Programm auf einen Wert von

$$\sigma_{xx} = \frac{7.6}{10} \cdot P \quad (8.2)$$

für die Spannung. Wenn man das Netz feiner wählt, dann wächst die Verformung (= Einflusskoeffizient) an und damit auch die Spannung.

Moment in einer Krag­scheibe

Ein Beispiel bei dem der Fehler wesentlich größer ist, ist die Krag­scheibe in Abbildung 8.9 a. Das exakte Biegemoment im Schnitt $A - A$ beträgt 2,5 kNm. Das FE-Programm kommt nur auf einen Wert von 1,66 kNm. Der Grund ist, dass auf dem FE-Netz die exakte Einflussfunktion für das Biegemoment, s. Abbildung 8.9 b, nicht darstellbar ist. Wenn das FE-Programm versucht, den Schnitt $A - A$ um 45° zu drehen, wie es Vorschrift ist, dann hebt sich das Kragarmende nur um 1,66 m und nicht, wie es richtig wäre, um 2,5 m.

Resultierende Schnittkraft in einer Wand

Ähnlich krass ist der Fehler bei dem nächsten Beispiel. Die Wandscheibe in Abbildung 8.10 wird oben links mit einer Kraft von 1 kN belastet. Das FE-Programm kommt jedoch im Schnitt $A - A$ auf einen Wert von 2,09 kN für die resultierende horizontale Schnittkraft (N_{yx}). Der Grund für diesen großen Fehler ist, dass das FE-Programm mit einer falschen Einflussfunktion arbeitet. Die exakte Einflussfunktion für die Schnittkraft ist eine Verschiebung des ganzen oberen Teils gleichmäßig um 1 cm nach rechts, s. Abbildung 8.10 b. Auf dem FE-Netz kann diese Bewegung aber nicht dargestellt werden, weil ein solcher Verschiebungssprung, denn darum handelt es sich ja, wenn der obere Teil zur Seite gleitet, auf einem FE-Netz nicht darstellbar ist. Das FE-Programm bemüht sich zwar diese Bewegung darzustellen, aber es gelingt ihm nur die 'Pseudo'-Einflussfunktion in Abbildung

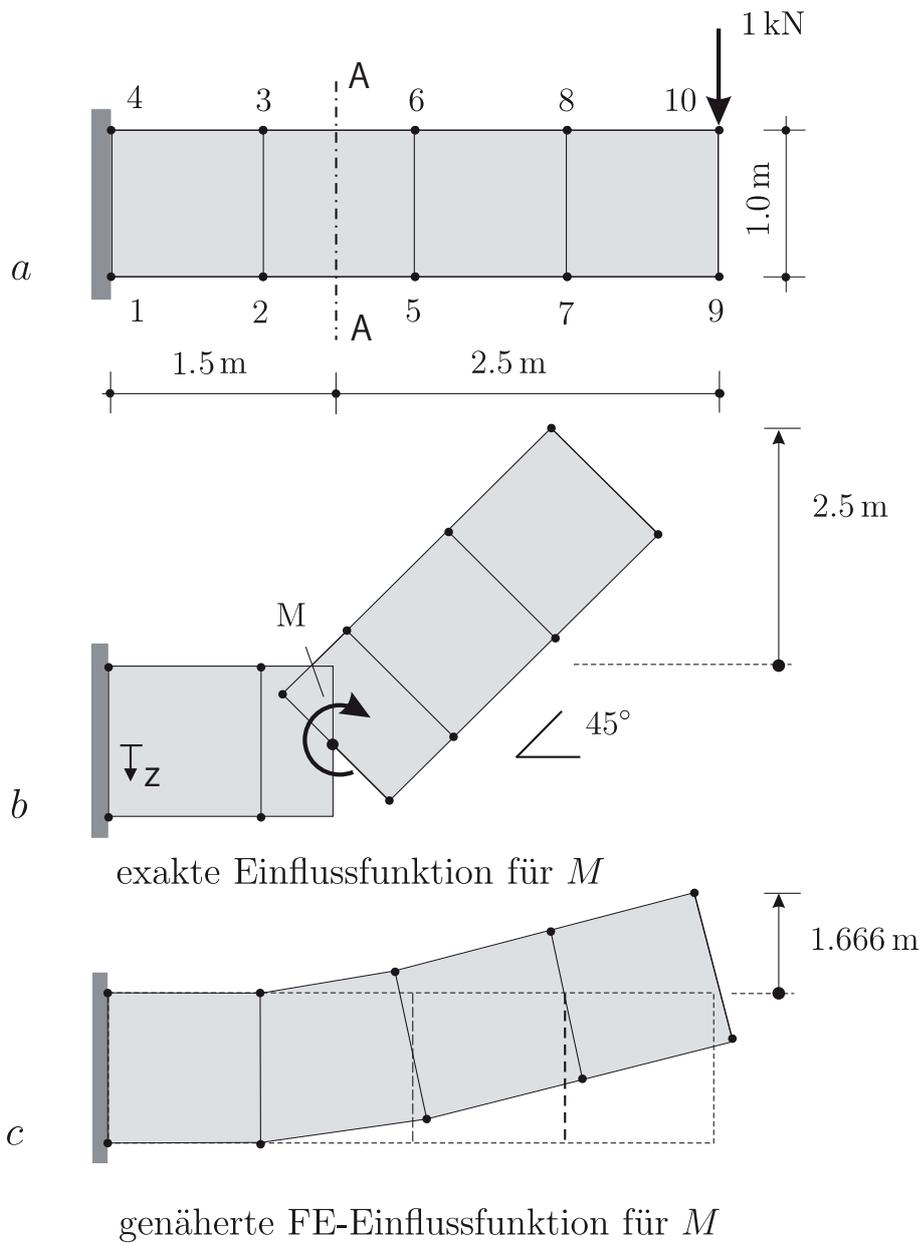


Abbildung 8.9: a) Kragsscheibe; b) exakte Einflussfunktion für das Biegemoment M ; c) FE Näherung

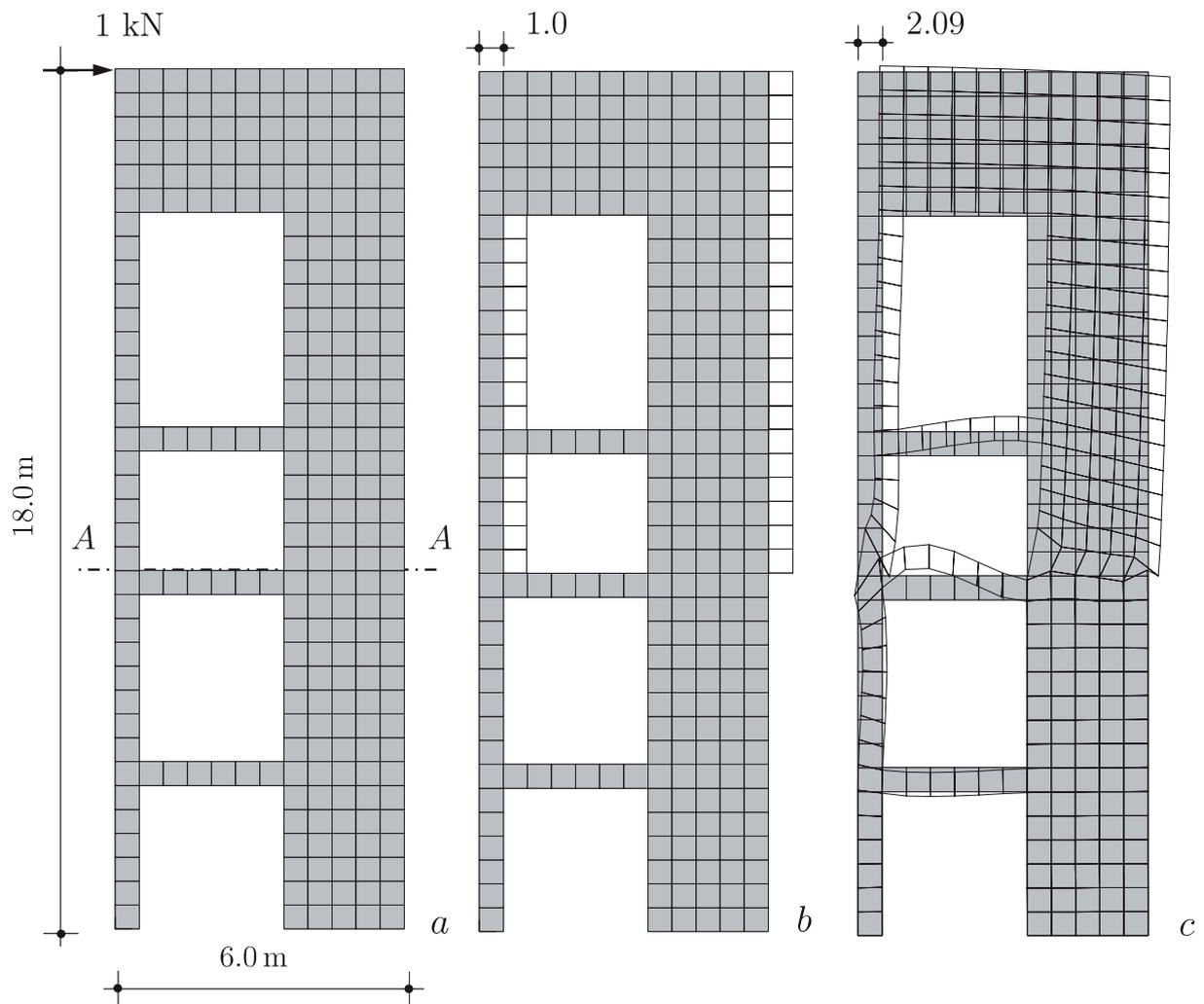


Abbildung 8.10: Wandscheibe: **a)** Schnitt A – A, **b)** exakte Einflussfunktion für N_{yx} im Schnitt A – A, **c)** FE Näherung

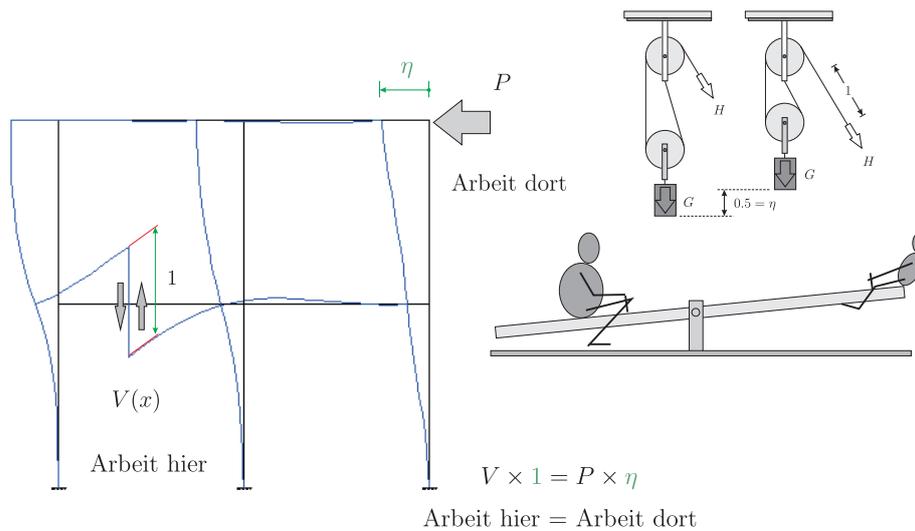


Abbildung 8.11: Jede Einflussfunktion gleicht einer Schaukel. Die Arbeiten auf beiden Seiten der Schaukel müssen gleich groß sein. So stellen sich die Schnittkräfte ein.

8.10 c zu erzeugen, bei der sich die obere linke Ecke um 2,09 cm nach rechts bewegt.

Es ist nur konsequent und in sich stimmig, wenn das FE-Programm dann im Schnitt A–A die Schnittkraft zu 2,09 kN berechnet

$$N_{yx} = \text{Einflusskoeffizient} \times 1 \text{ kN} = 2,09 \times 1 \text{ kN} = 2,09 \text{ kN.} \quad (8.3)$$

Die Logik ist richtig, aber das Ergebnis ist falsch.

8.1.5 Statik ist angewandte Kinematik

Wir rühren hier an eine Grundtatsache der Statik:

- Statik ist nicht 'statisch', sie ist angewandte Kinematik.

Nirgendwo wird dies deutlicher als beim Einsatz der finiten Elemente in der Statik.

Ein Tragwerk besteht aus unendlich vielen Momenten-, Normalkraft- und Querkraftgelenken. Alle diese Gelenke sind gesperrt. Aber wenn man ein solches Querkraftgelenk löst, s. Abbildung 8.11 a, und dadurch eine Bewegung in das Tragwerk hineinträgt, dann ist die Arbeit, die von der Wanderlast und von den Kräften am Gelenk dabei geleistet werden, gleich groß. An dem einen Ende der 'Schaukel' sitzen - im übertragenen Sinne - die beiden gegengleichen Gelenkkräfte¹ und am anderen Ende der Schaukel sitzt die Wanderlast und beide, die Gelenkkräfte und Wanderlast, leisten bei der 'Drehung' der Schaukel die gleiche Arbeit wie Vater und Sohn in Abbildung 8.3.

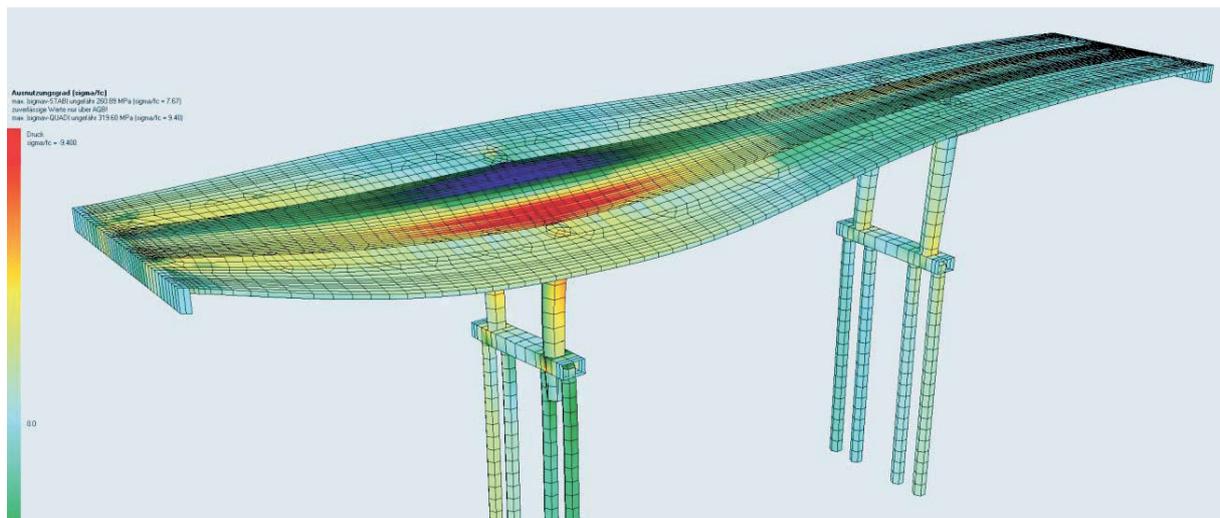


Abbildung 8.12: Einflussfunktion für die Normalkraft im vorderen Pfeiler einer Brücke auf Bohrpfehlen [13]

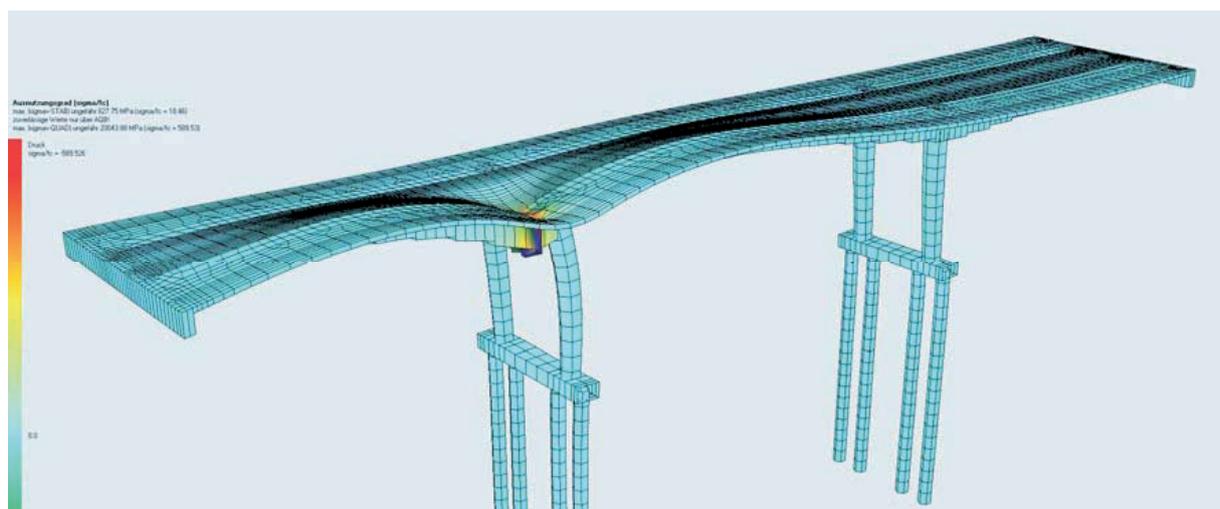


Abbildung 8.13: Einflussfunktionen für das Biegemoment [13]

Das, was von der Spreizung des Querkraftgelenks im Fußpunkt der Wanderlast ankommt, ist umgekehrt gleich dem Einfluss, den die Wanderlast auf die Querkraft im Aufpunkt hat.

Die ganze Strecke zwischen dem Querkraftgelenk und dem Fußpunkt der Wanderlast muss daher, wenn die richtige Botschaft im Fußpunkt der Wanderlast ankommen soll, richtig modelliert werden. Wenn hier Fehler gemacht werden, die Steifigkeiten zu hoch oder zu niedrig sind, dann ist die Übertragungsstrecke zwischen dem Querkraftgelenk und dem Fußpunkt der Wanderlast gestört und dann wird umgekehrt, aufgrund der Reziprozität, der Einfluss der Wanderlast auf die Querkraft falsch abgeschätzt.

- Die Fortleitungszahlen müssen stimmen.

Die korrekte Modellierung eines Tragwerks entscheidet sich hier.

Und jetzt versteht man auch sofort das handicap der finiten Elemente. Aufgrund der eingeschränkten Beweglichkeit der finiten Elemente stimmen die Fortleitungszahlen nicht. Die Einflussfunktionen können sich nicht richtig ausbilden. Die Kommunikation zwischen dem Aufpunkt und der Wanderlast ist gestört.

- Die eingeschränkte Kinematik ist der Kardinalfehler der finiten Elemente.

8.1.6 Abklingverhalten

Das Erzeugen von Einflussfunktionen, gleicht dem Wurf eines Steines in ein großes Wasserbecken, das in mehrere Kanäle und Seitenarme aufgeteilt ist. Der Stein wirft Wellen, und diese Wellen verebben (in der Regel) mit wachsendem Abstand von dem Aufpunkt, s. Abbildung 8.17, wobei die Enge oder Weite der Kanäle (die Steifigkeiten der Bauteile), die Ausbildung der Uferzonen (Lager) etc. das Abklingverhalten zusätzlich beeinflussen.

Lassen wir die Einflüsse der Umgebung zunächst einmal weg, dann hängt das Abklingverhalten primär vom Typ der Einflussfunktion ab. Eine Einflussfunktion für eine Durchbiegung ebbt langsam ab, während die Einflussfunktion für eine Querkraft sehr viel schneller abebbt. Je höher die Ordnung der Ableitung des Wertes ist, den man berechnen will,

$$w \quad w' \quad M = -EI w'' \quad V = -EI w''' \quad (8.4)$$

desto schneller ebbt die Einflussfunktion ab.

Das gilt auch für Scheiben und Platten, wie man in Abbildung 8.14 sieht, wo die vier Einflussfunktionen für die Durchbiegung w , die Verdrehung $w_{,x}$ ($= w'$), das Moment m_{xx} und die Querkraft q_x in der Mitte einer Platte dargestellt sind.

¹Weil sie jeweils anteilige Wege gehen zählen sie wie eine Kraft

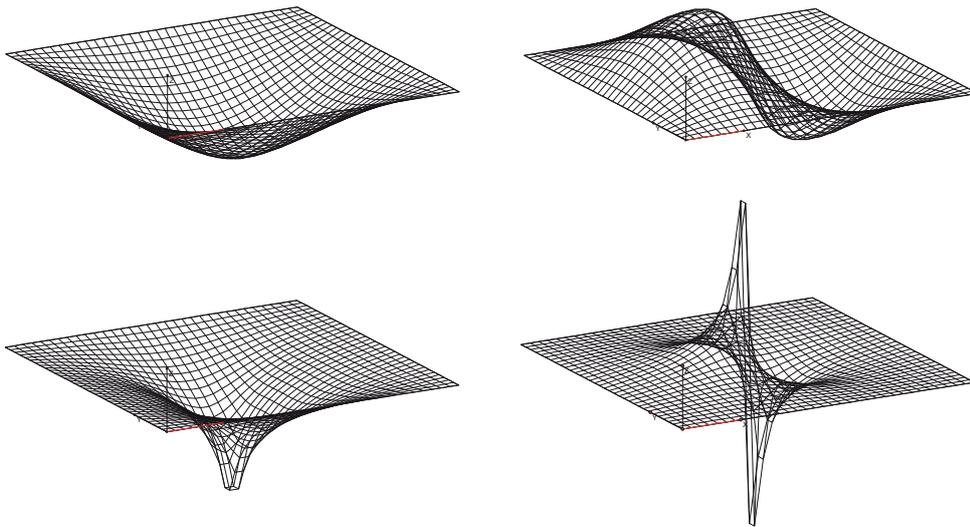


Abbildung 8.14: Einflussfunktionen im Vergleich: **a)** Durchbiegung, **b)** Verdrehung (Neigung), **c)** Moment m_{xx} , **b)** Querkraft q_x ; a) und c) sind Summenformeln und b) und d) sind Differenzenformeln

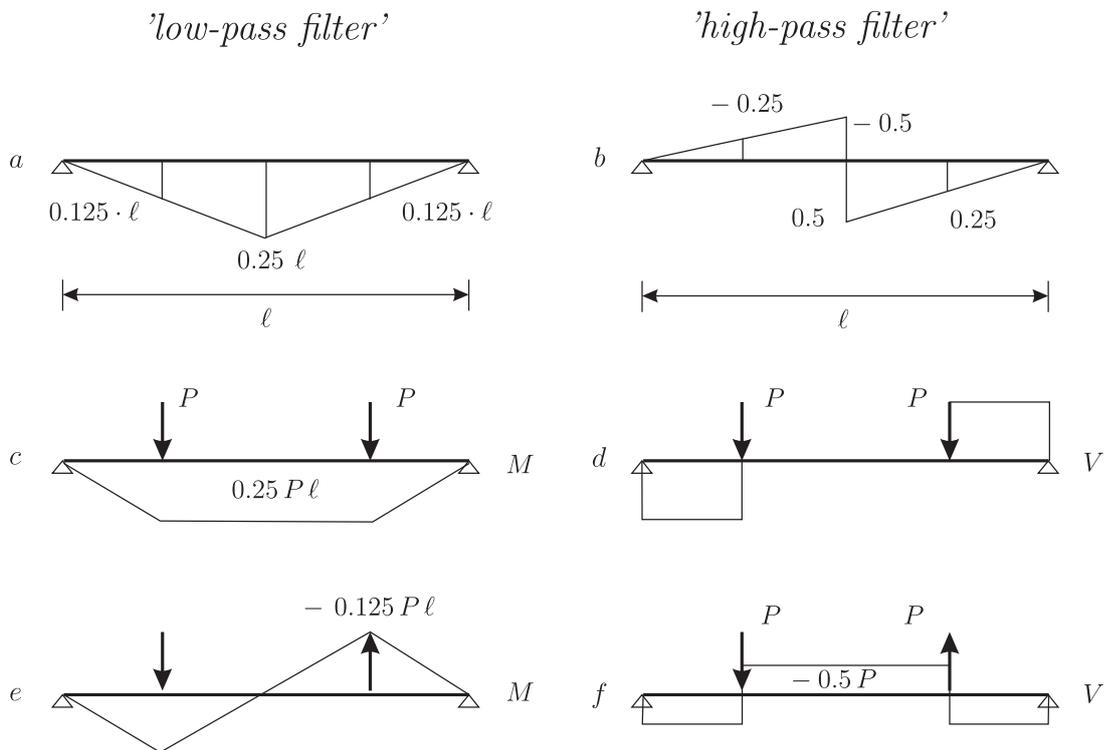


Abbildung 8.15: Einflussfunktion für **a)** die Querkraft und **b)** das Biegemoment in Feldmitte im Vergleich: Die Einflussfunktion für V reagiert auf Differenzen ('high-pass filter', s. Bild **c)** und **e)**) und die für M summiert ('low-pass filter', s. Bild **d)** und **f)**).

Die weit ausholende Einflussfunktion für die Durchbiegung signalisiert dem Tragwerksplaner, dass auch entfernt stehende Lasten noch die Durchbiegung in der Plattenmitte beeinflussen. Während die ganz eng gefasste, aber steil ansteigende Einflussfunktion für die Querkraft darauf hinweist, dass die Querkraft in Plattenmitte nur von den Lasten in unmittelbarer Nähe des Aufpunkts abhängt.

8.1.7 Dipole und Monopole oder warum Querkräfte ungenauer sind als Momente

Diese Unterschiede sind der Grund, warum Durchbiegungen in FE-Programmen wesentlich genauer sind als Querkräfte, denn dem FE-Programm fällt es viel leichter die einfache 'Delle', die die Einflussfunktion für w darstellt, anzunähern als die Scherbewegung, die die Einflussfunktion für die Querkraft darstellt. Die Einflussfunktion für die Durchbiegung wird von einer Einzelkraft, einem Monopol, erzeugt während die Einflussfunktion für die Querkraft von einem Dipol erzeugt wird. Die eine Einflussfunktion integriert, und die andere differenziert.

- Monopol summiert (Durchbiegung, Moment)
- Dipol differenziert (Spannung, Querkraft)

Dipol und Monopol sind Begriffe aus der Elektrotechnik. Ein Dipol entsteht, wenn zwei elektrische Punktladungen, $+1/\Delta x$ und $-1/\Delta x$, sich aufeinander zu bewegen, $\Delta x \rightarrow 0$, und die Ladungen dabei gleichzeitig über alle Grenzen wachsen.

In der Statik entspricht ein solcher Dipol zwei entgegengesetzt gerichteten Einzelkräften $P = \pm 1/\Delta x$, die sich aufeinander zu bewegen und dabei immer größer werden. Dort wo sie zusammentreffen, reißt es den Balken auseinander, und es entsteht ein Versatz der Größe $\Delta w = 1$.

Auch die Einflussfunktionen für die Spannungen werden von Dipolen erzeugt. So entsteht die Einflussfunktion für die horizontale Spannung σ_{xx} in einer Scheibe dadurch, dass zwei Horizontalkräfte $\pm 1/\Delta x$, von links und rechts kommend, sich im Aufpunkt treffen und den Punkt dabei in zwei Teile zerreißen, und eine Punktversetzung der Größe Eins im Aufpunkt erzeugen, s. Abbildung 8.16.

Die Einflussfunktion für eine Verschiebung hingegen wird durch einen Monopol erzeugt, eine einzelne Kraft $P = 1$.

Einflussfunktionen, die von Monopolen erzeugt werden, summieren, während Einflussfunktionen, die von Dipolen generiert werden, differenzieren.

Ein Monopol erzeugt eine Delle: Was in diese Delle hineinfällt zählt, erhöht die Verformung. Die Dipole dagegen erzeugen Scherbewegungen oder Wellen, wie in einem Teppich, der Falten wirft. Wenn links und rechts vom Dipol dieselbe Belastung steht, dann heben

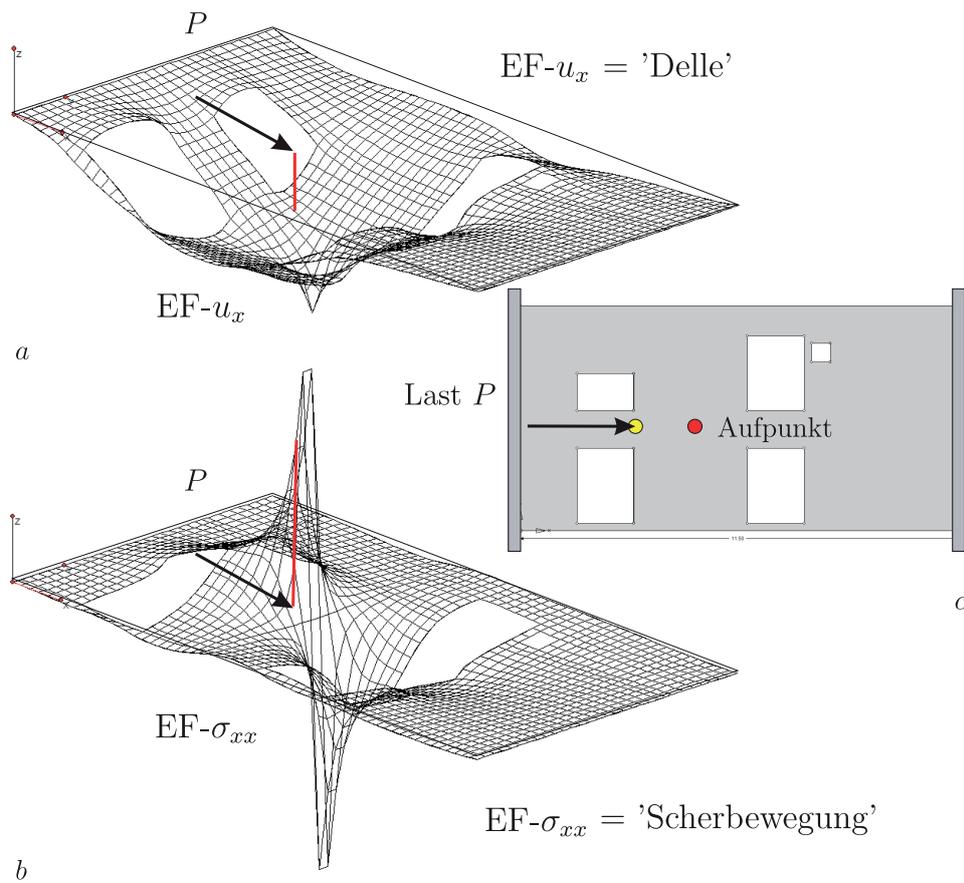
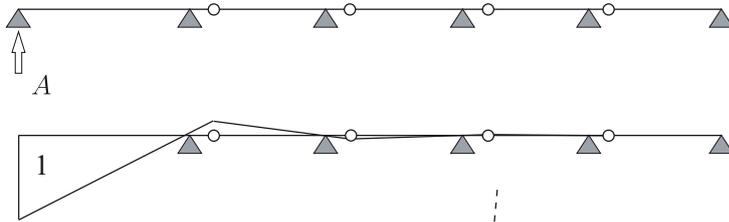


Abbildung 8.16: Einflussflächen in einer Scheibe **a)** für die horizontale Verschiebung u_x , **b)** für die horizontale Spannung σ_{xx} **c)** die Scheibe und der Aufpunkt; die Ausschläge entsprechen horizontalen Bewegungen der Scheibe nach links und rechts

Gerberträger Nr. 1



Gerberträger Nr. 2

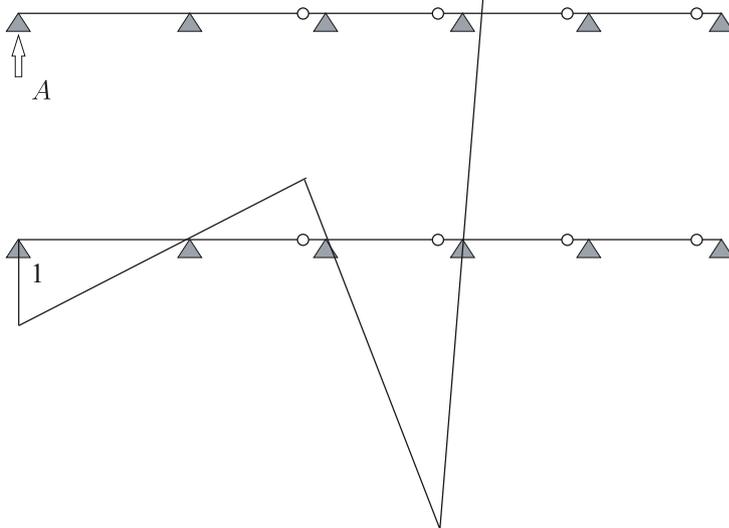
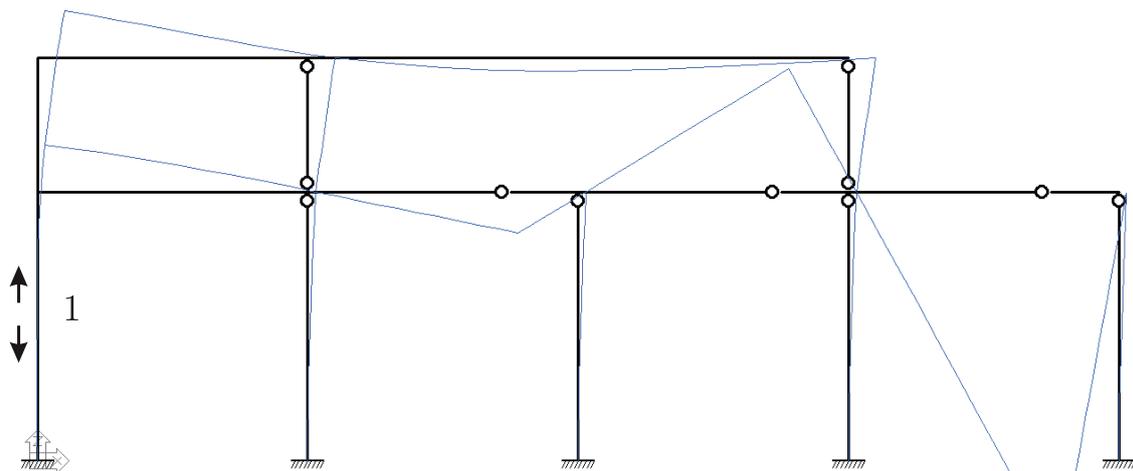
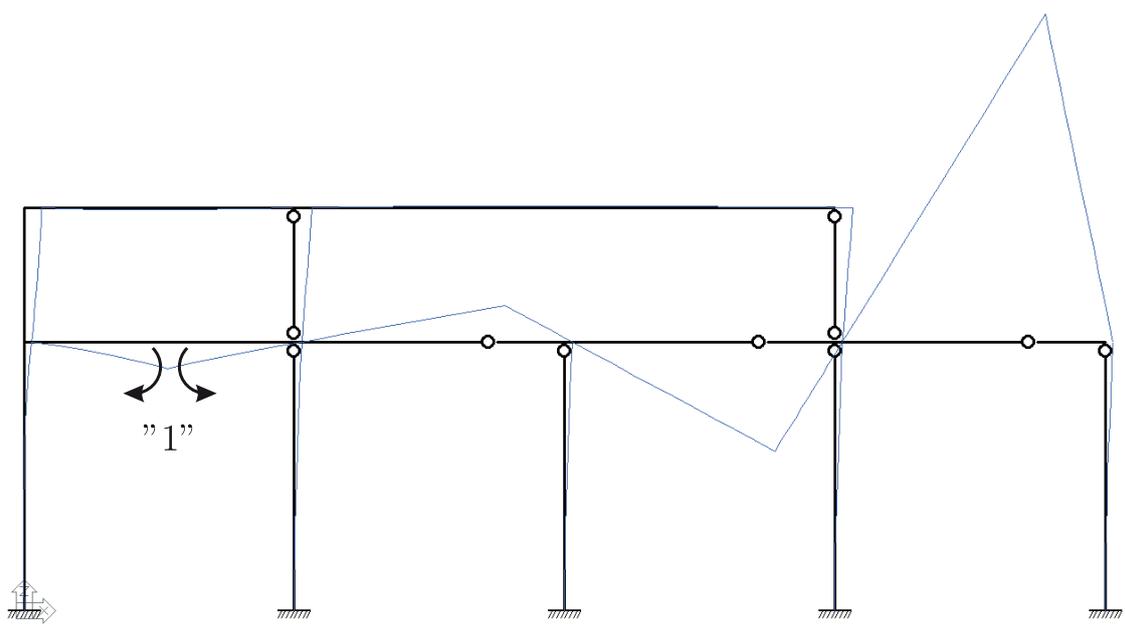


Abbildung 8.17: Einflussfunktionen für die Lagerkraft A an zwei Gerberträgern. Nicht alle Einflussfunktionen klingen ab!



a



b

Abbildung 8.18: a) Einflussfunktion für die Normalkraft und b) das Biegemoment M im Riegel. Nicht alle Einflussfunktionen klingen ab!

sich die Wirkungen gegenseitig auf, wie die Querkraft V in der Feldmitte eines Einfeldträgers unter Gleichlast (antimetrisch \times symmetrisch = Null). Wenn die Belastung jedoch in der Mitte ihr Vorzeichen wechselt, dann wird V maximal (antimetrisch \times antimetrisch = Max).

Es ist jetzt auch klar, warum Verformungen und Momente von FE-Programmen relativ genau berechnet werden, während Spannungen und Querkräfte dagegen deutlich abfallen. Dellen kann ein FE-Programm schon auf groben Netzen relativ gut approximieren, während Scherbewegungen schwerer darzustellen sind. Oder anders: Differenzieren rauht auf, integrieren glättet.

Die Einflussfunktionen für Lagerkräfte sind übrigens alle vom Summentyp, auch wenn die Lagerkräfte Querkräfte oder Normalkräfte sind, ihre Einflussfunktionen also auf Scherbewegungen beruhen, weil sich an Lagern die Differenzbewegungen, die wir typischerweise bei einem Querkraft- oder Normalkraftgelenk sehen, nicht ausbilden kann. Die eine Hälfte des Gelenkes ist sozusagen 'geerdet', fest mit dem Boden verbunden und kann sich daher nicht bewegen. Die Bewegung der anderen Gelenkhälfte gleicht dann einer 'halben' Delle (aber mit der vollen Auslenkung Eins am Gelenk).

8.1.8 Einflussfunktionen, die mit dem Abstand vom Aufpunkt wachsen

In der Regel ist es so, dass die Einflussfunktionen mit zunehmendem Abstand vom Aufpunkt immer kleiner, immer schwächer werden. Daher ist es in der Regel zulässig, sich bei dem Studium der Einflussfunktionen auf den Nahbereich des Aufpunkts zu konzentrieren, wie im Fall des Gerberträgers in Abbildung 8.17 a.

Wenn man allerdings die Gelenke in dem Gerberträger von links nach rechts verrückt, dann schaukelt sich die kinematische Kette auf, s. Abbildung 8.17 b, und das bedeutet, je weiter die Last vom Lager entfernt ist, desto größer wird die Lagerkraft! Also Vorsicht, wenn die Einflussfunktionen Anteile von Starrkörperbewegungen (kinematische Ketten!) enthalten.

Dieser Effekt kann auch bei ganzen Rahmen auftreten, s. Abbildung 8.18. Sowohl die Einflussfunktion für die Normalkraft, Abbildung 8.18 a, wie für das Biegemoment in dem linken Stiel, Abbildung 8.18 b, werden umso größer, je weiter man sich von dem Aufpunkt entfernt. Natürlich ist dieses Beispiel konstruiert, aber die Tatsache, dass es möglich ist ein solches Beispiel zu konstruieren, sollte eine Warnung vor einem allzu naiven Umgang mit Einflussfunktionen sein.

- Ein FE-Ergebnis ist dann exakt, wenn die zugehörige Einflussfunktion auf dem Netz exakt dargestellt werden kann.
- Praktisch reicht es aus, wenn die Einflussfunktion im Bereich der Last exakt ist.

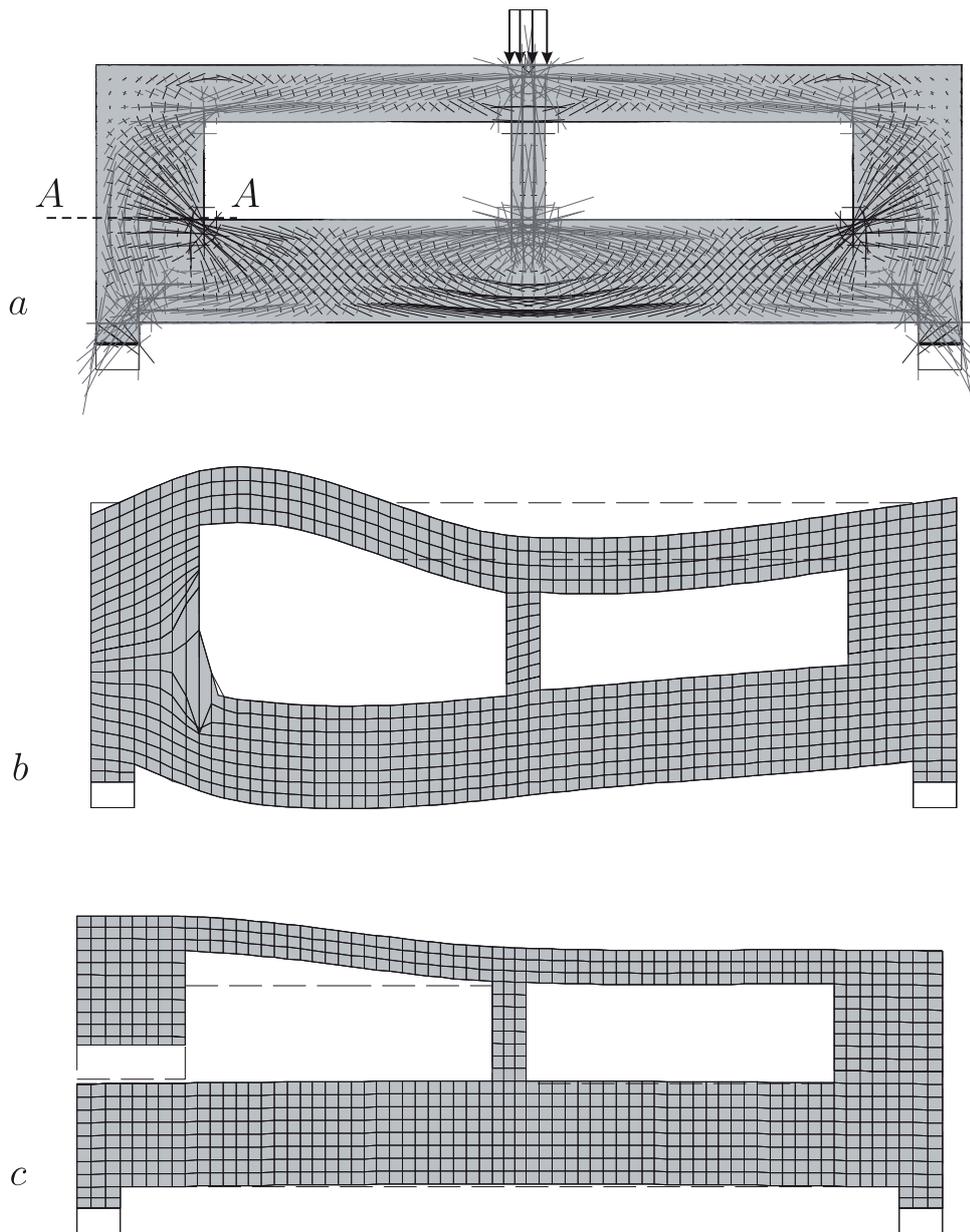


Abbildung 8.19: Wandscheibe: **a)** System und Belastung; **b)** Einflussfunktion für die Spannung σ_{yy} in der Nähe der Ecke; **c)** Einflussfunktion für die Normalkraft N_y im Schnitt A-A, [8]

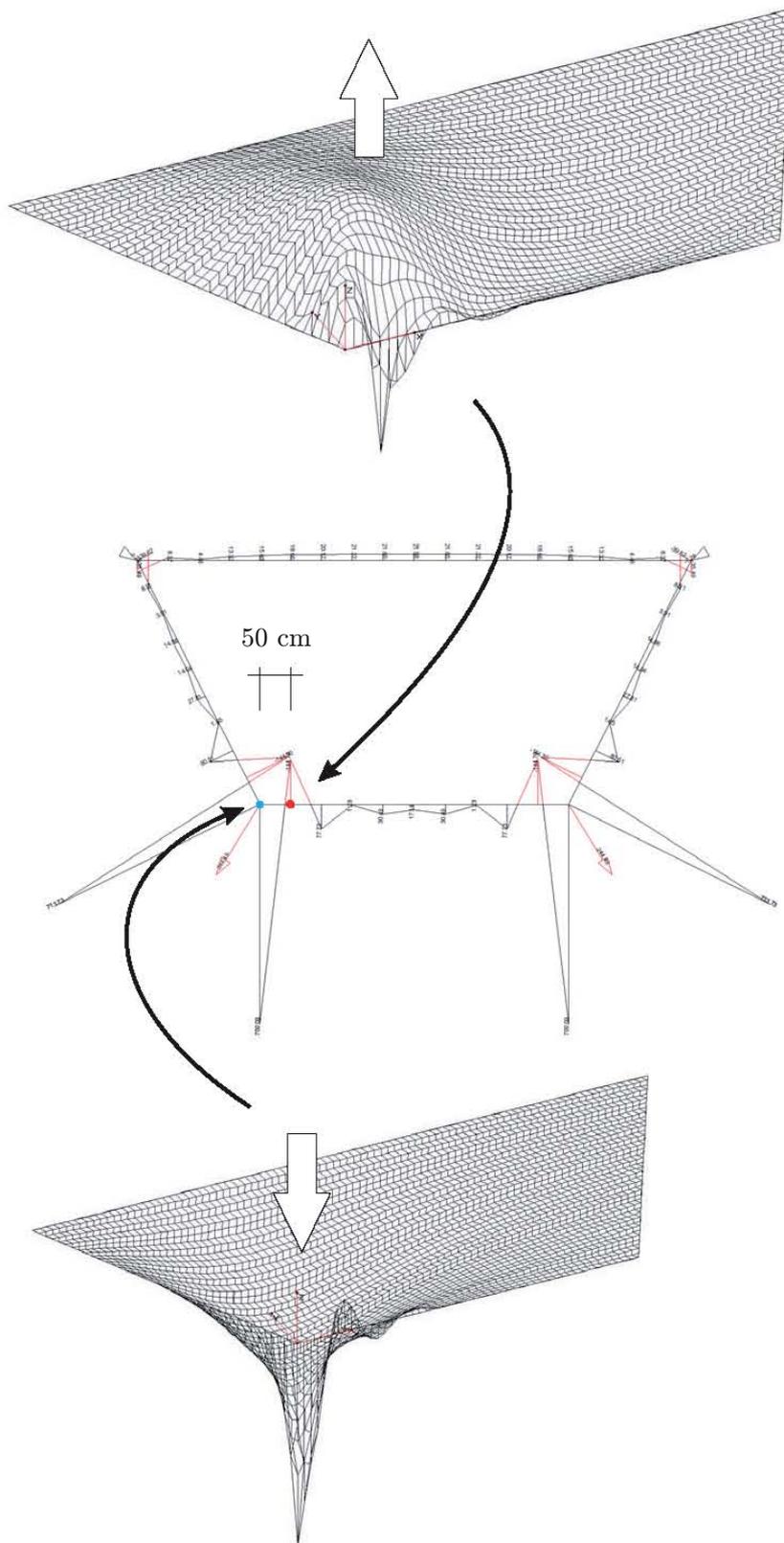


Abbildung 8.20: Trapezplatte unter Gleichlast. Die Lagerkräfte oszillieren in den stumpfen Winkeln, wie es die Elastizitätstheorie voraussagt. Die Flächen oben und unten sind die Einflussfunktionen für die Querkraft in der Ecke, bzw. kurz dahinter. Die Punkte liegen nur 50 cm auseinander, aber die Einflussfunktionen drehen das Vorzeichen um!

- Exakte Einflussfunktionen können in der Regel auf einem FE-Netz nicht dargestellt werden. Es muss daher das Ziel einer FE-Berechnung sein, das Netz so auszubilden, dass der Fehler in den genäherten Einflussfunktionen möglichst klein ist.

8.1.9 Singularitäten

Wie geht man mit Singularitäten um? Zunächst gilt: Singularitäten lassen sich nicht vermeiden. Singularitäten treten, wenn man der Elastizitätstheorie glaubt, praktisch bei jeder Scheibe und Platte auf. Selbst bei einer Kragsscheibe werden zum Beispiel die Randspannungen an der Einspannstelle oben und unten theoretisch unendlich groß. Wovon man aber in der Praxis normalerweise nichts sieht, weil die Netze dafür einfach zu grob sind. Andere Singularitäten machen sich aber auch schon auf groben Netzen bemerkbar. Das sind die Singularitäten, die dem Ingenieur Schwierigkeiten machen.

Es hilft nicht, das Netz in der Nähe der Singularität zu verfeinern, weil dadurch nur die Spannungen noch größer werden. Das einzige was hilft, ist, dass man statt Punkten Schnitte betrachtet, also von Punktwerten zu integralen Werten wechselt. Das kann man sogar überzeugend begründen.

Der Punkt *A* der Scheibe in Abbildung 8.19 ist ein solch singulärer Punkt. Dort treten unter der eingezeichneten Belastung Zugspannungen auf. Diese werden umso größer, je feiner man das Netz in der Nähe der Ecke macht. Wenn man aber, statt der Spannung in der Ecke, die resultierende Normalkraft in einem horizontalen Schnitt durch den Wandpfeiler betrachtet, dann herrscht Ruhe. Die Normalkraft ist stabil, sie ändert sich kaum, wenn das Netz verfeinert wird. Für den Spannungsnachweis in der Ecke empfiehlt es sich also aus der Normalkraft in dem Schnitt eine mittlere Spannung zu berechnen und diese dann zur Ecke hin um den Faktor zwei (z.B.) zu erhöhen.

Das Studium der Einflussfunktionen löst das Rätsel auf. Die Einflussfunktion für die Spannung in der Ecke wird ja durch eine Versetzung des Eckpunktes in vertikaler Richtung erzeugt, was an sich schon schwierig zu modellieren ist. Weil nun aber die Spannung unendlich groß wird, muss diese Versetzung zu unendlich großen Verschiebungen im Fußpunkt der Last führen! Die Versetzung in *einem* Punkt reißt praktisch die ganze Scheibe auseinander! Wie soll das auf einem FE-Netz vernünftig dargestellt werden? Und wenn auch die Einflussfunktion für die Ecke selbst 'explodiert', so darf doch die Einflussfunktion für die Spannungen in den benachbarten Punkte die Scheibe nur fast auseinanderreißen, weil die Spannungen ja auch nur 'fast' unendlich sind. Wie soll das gehen?

Die Einflussfunktion für die Normalkraft in dem Schnitt dagegen ist viel harmloser. Sie entsteht, indem zunächst der Schnitt geführt wird und dann die beiden Schnittufer um insgesamt eine Längeneinheit nach oben und nach unten auseinander gedrückt werden. Und das ist eine Bewegung, die schon auf groben Netzen sehr gut dargestellt werden kann, und daher ist auf das FE-Ergebnis Verlass. Eine Verfeinerung des Netzes scheint da überflüssig. Sie bringt, wie beobachtet ja auch nichts. Das Ergebnis ist von Anfang an

stabil.

Singuläre Punkte erkennt man also daran, dass die Spannungen in Ihrer Nähe sehr empfindlich auf Veränderungen in der Maschenweite des Netzes reagieren. Die Spannungen in solchen Punkten sind nur Momentaufnahmen, die für ein Netz 'richtig' sind, die aber sofort ins Laufen kommen, wenn man das Netz verfeinert.

Theoretisch sollte man ein Netz so lange verfeinern, bis es ausiteriert ist, d.h. bis sich die Spannungen in den maßgebenden Punkten nicht mehr ändern. Aber das ist natürlich Wunschdenken.

8.1.10 Oszillierende Lagerkräfte

Es gibt ein Phänomen, das ganz eng mit den Singularitäten verbunden ist, und das sind oszillierende Lagerkräfte, wobei das auch oszillierende Einspannmomente sein können. Immer wenn die Lagerkräfte in einer Ecke oszillieren, es 'klemmt', dann handelt es sich um eine echte Singularität, oder es liegt ein Fehler im FE-Modell vor.

Ein typisches Beispiel sind die Auflagerkräfte in den stumpfen Ecken einer Trapezplatte, siehe Abbildung 8.20. Der Rand ist eigentlich gelenkig gelagert, aber in der Ecke kommt es aufgrund der beidseitigen, schräg verlaufenden gelenkigen Lager zu einer Einspannung 'im Punkt' und darauf reagiert die Platte sehr allergisch. Nach der Elastizitätstheorie werden die Auflagerkräfte unendlich groß und damit wird das FE-Programm nicht fertig.

Eigentlich ist es die Kinematik, mit der das FE-Programm nicht fertig wird, denn die oszillierenden Lagerkräfte sind nur ein Echo der oszillierenden Einflussfunktionen, siehe Abbildung 8.20. Die Einflussfunktion für die Lagerkraft in der Ecke selbst (unteres Abbildung) wölbt sich nach unten, die Lagerkraft ist also positiv, während die Einflussfunktion für die Lagerkraft in einem unmittelbar benachbarten Punkt (50 cm nach rechts) sich nach oben wölbt, die Lagerkraft also negativ ist! Das weist darauf hin, dass durch die Einspannung in der Ecke die Kinematik der Platte empfindlich gestört ist und das FE-Programm mit seinen beschränkten Mitteln diese Kinematik nicht nachbilden kann.

Es gibt aber ein Beispiel, wo die Oszillationen in den Lagerkräften sogar richtig sind und das sind Wandenden. Wenn der Knoten vorne an der Wand nach unten geht, also die Einflussfunktion für die Knotenkraft erzeugt wird, dann bildet sich vor der Wand eine relativ große Senke aus, in die alles hineinfällt, was nur in der Nähe des Wandkopfs steht, während wenn sich der Knoten vor dem Wandende um eine Längeneinheit absenkt, die Platte vor dem Wandkopf nach oben geht, d.h. die Knotenkraft im rückwärtigen Knoten wird negativ, wird eine Zugkraft. Auch hier ändert sich bei kurzem Abstand das Vorzeichen der Einflussfunktion—nur dass es hier anschaulich klar ist, warum.

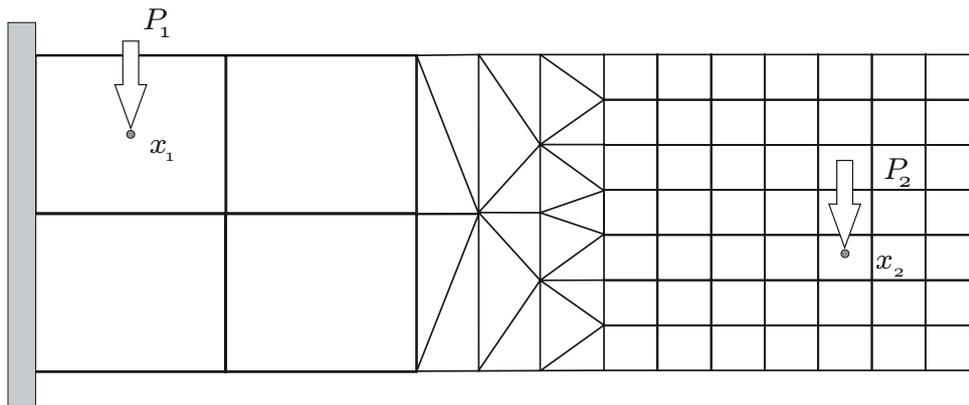


Abbildung 8.21: Kragarm: Ein sehr ungleiches Netz. Die kleinen Elemente rechts können den großen Fehler nicht mehr korrigieren, den sie von den vier Elementen links erben. Aber die gegenseitigen Verschiebungen, $\delta_{12} = \delta_{21}$, sind gleich groß.

8.1.11 Pollution

Unter pollution (engl.) versteht man den Effekt, dass die Unschärfe in singulären Punkten die Genauigkeit auch noch in weit abliegenden Punkten negativ beeinflusst. Das ist sozusagen die Gegenrede zu dem Argument, dass das Material klüger sei als das Programm und dass deswegen die singulären Punkte bei einer FE Berechnung, was ihre Fernwirkung angeht, vernachlässigt werden können.

Pollution kann man sich als *drift* der FE-Lösung vorstellen, also als Abweichung zwischen der FE-Lösung und der exakten Lösung in den Knoten. Wenn wir die FE-Lösung in den Knoten interpolieren könnten, dann wäre der *drift* null. Die FE-Lösung verfehlt aber die exakte Lösung in den Knoten und diese Diskrepanz ist der *drift*.

Singuläre Punkte verursachen Pollution. Sie tritt auch auf, wenn man die Elemente in ihrer Größe sehr ungleich wählt. Angenommen man modelliert eine Kragstange auf den ersten zwei Metern mit nur vier großen Elementen und lässt diesen dann eine Serie von kleinen, schmalen Elementen bis zum Ende der Kragstange folgen, s. Abbildung 8.21. Die kleinen Elemente haben theoretisch eine hohe Präzision, aber numerisch können sie sich nie von dem Verschiebungsfehler, dem *drift*, erholen, der durch die groben Elemente am Anfang der Kragstange in das Modell hineingetragen worden ist. Auch das ist pollution.

Pollution ist deswegen gefährlich, weil man sie nicht sieht. Der Tragwerksplaner hat inzwischen gelernt, dass Oszillationen in den Ergebnissen auf Fehler in dem FE-Modell hindeuten und so hat er gar kein Arges, dass die Ergebnisse falsch sein könnten, wenn die Verläufe glatt sind. Bei der Kragstange ist es aber so, dass der Verschiebungsfehler, den die kleinen Elemente von den vorderen großen Elementen erben sich nur darin äußert, dass zu allen Knotenverschiebungen konstante Werte dazu addiert werden (der *drift*). Wenn man von Knoten zu Knoten geht ist es nahezu immer derselbe Wert, d.h.

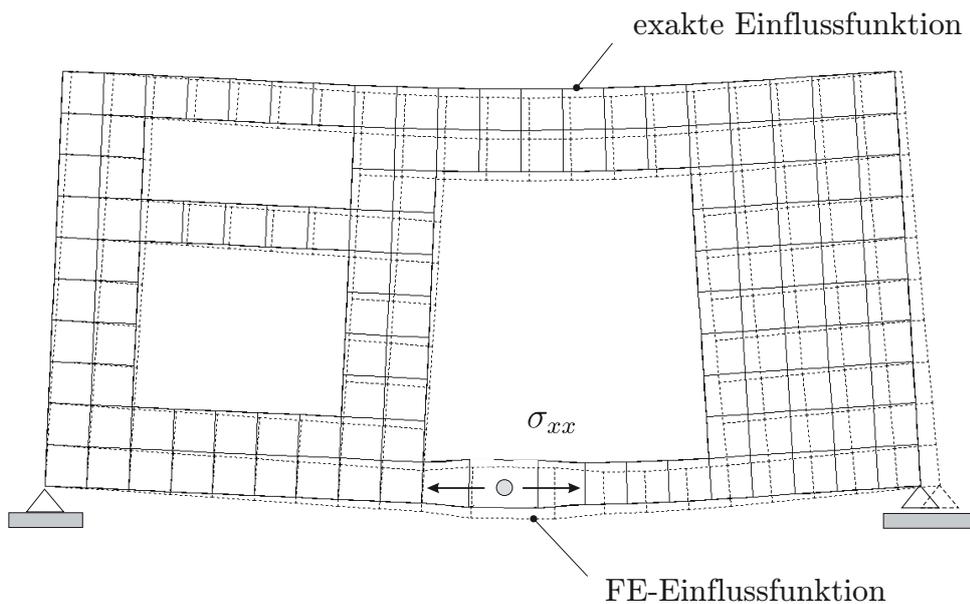


Abbildung 8.22: Der drift (= Abweichung in den Knoten) der FE-Einflussfunktion (hier für σ_{xx}) ist mit einer der Gründe für den Fehler in den FE-Spannungen.

die pollution verrät sich nicht durch Oszillationen. Es ist ein systematischer, glatter Fehler.

Und weil die Einflussfunktionen ja auch Verformungsfiguren sind, wirkt sich ein *drift* der Knoten auch auf sie negativ aus, das heißt das Programm unterschätzt oder überschätzt den Einfluss der Belastung auf einen Bemessungsquerschnitt, s. Abbildung 8.22.

Pollution kann nur von dem FE-Programm selbst entdeckt werden, wenn es das Netz überprüft und adaptiv verfeinert. Die Bedeutung der pollution für die praktische Arbeit halten wir für gering. Man sollte zur Kenntnis nehmen, dass dieses Phänomen existiert. Mathematiker können eindrucksvolle Beispiele für diesen Effekt produzieren, aber in der Regel ist es im Bauwesen so, dass die übrigen Fehler, die man bei einer FE-Rechnung macht, einen größeren Einfluss auf die Genauigkeit der Ergebnisse haben.

8.1.12 Maxwell und die Folgen

Der Satz von Maxwell

$$\delta_{12} = \delta_{21} \quad (8.5)$$

besagt, dass bei einem Balken die gegenseitigen Verschiebungen zweier Einzelkräfte $P = 1$ gleich groß sind. Dieser Satz gilt auch für die finiten Elemente, und es ergeben sich daraus interessante Konsequenzen: Der Klang der Violine des Geigers auf dem Podium wird bei dem Zuhörer in der letzten Reihe nur dann gut zu hören sein, wenn umgekehrt jeder Ton, der in der letzten Reihe gespielt wird, mit derselben Qualität an das Ohr der Geigers

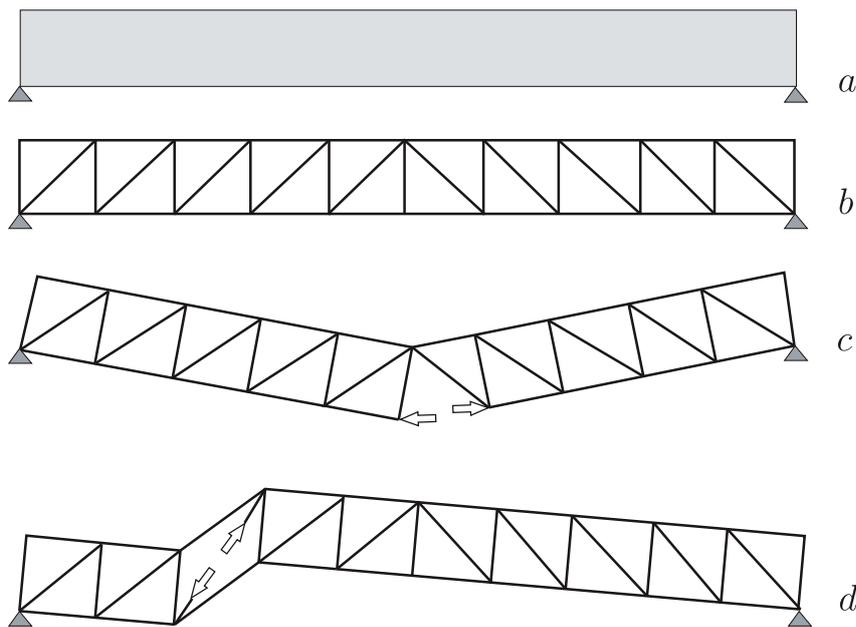


Abbildung 8.23: Der Erfolg der Fachwerkanalogie beruht darauf, dass die Scheibe und das Fachwerk dieselbe Kinematik aufweisen, **a)** die Scheibe; **b)** das Fachwerk; **c)** Einflussfunktion für den Zuggurt; **d)** Einflussfunktion für den Diagonalstab.

dringt.

Angewandt auf die Kragsscheibe in Abbildung 8.21 bedeutet dies: Eine Einzelkraft $P_1 = 1$ im Punkt \boldsymbol{x}_1 erzeugt im Punkt \boldsymbol{x}_2 die gleiche Verschiebung, wie umgekehrt eine Einzelkraft $P_2 = 1$ im Punkt \boldsymbol{x}_2 sie im Punkt \boldsymbol{x}_1 verursacht. Auf Grund der Reziprozität, $\delta_{12} = \delta_{21}$, leiden daher beide Lastfälle unter dem groben Netz. Es nützt nichts, das Netz nur rechts zu verfeinern.

Es reicht also z.B. nicht aus das Netz nur an der Einleitungsstelle der Spannkraft zu verfeinern, sondern man muss auch die Umgebungen der Bemessungsschnitte fein genug diskretisieren, damit man ein sauberes Signal aus der Spannkraft erhält.

Wobei man jetzt noch anmerken müsste, dass ja die ganze Übertragungstrecke zwischen Fußpunkt der Last und Bemessungsschnitt hinreichend genau modelliert werden muss, damit das Signal eine Chance hat sich korrekt auszubreiten. Und weil sich ja das Signal im Konzertsaal über den ganzen Raum ausbreitet und das Signal somit aus allen Richtungen an das Ohr des Zuhörers dringt, so muss auch das ganze Tragwerk theoretisch korrekt und fein genug modelliert werden. Theoretisch, denn anders als ein Konzertsaal ist ja ein Hochhaus kein einfacher Kubus, sondern es gleicht eher einem System von Bächen, Seen, Kanälen und Schleusen und das Signal pflanzt sich ja bevorzugt längs den Haupttragrichtungen fort. Diese muss man eigentlich finden und dann sauber modellieren.

8.1.13 Das wahre Tragwerksmodell

Für die Diskussion wird es hilfreich sein ein 'wahres' Tragwerksmodell zu definieren. Wir gehen davon aus, dass sich das wahre Tragwerk linear elastisch verhält: Eine Verdoppelung der Belastung eine Verdoppelung der Schnittgrößen und der Verformungen zur Folge hat. Der Stahlbau dürfte diesem Ideal relativ nahe kommen. Im Massivbau geht man von einem nichtlinearen $\sigma - \varepsilon$ -Diagramm aus, aber diese Nichtlinearität kommt in der Praxis ja eigentlich nur bei der Bemessung in das Modell hinein. Vorher wird linear-elastisch gerechnet und von daher sollten die folgenden Überlegungen auch für den Massivbau gelten. Generell sind wir der Meinung, dass es vorwiegend die Kinematik ist, also die 'großen Effekte', die den Kräftefluss in einem Tragwerk bestimmt.

Unter dieser Annahme gibt es für jede Lagerkraft, für jede Spannung in einem Punkt, für jede Verformung in einem Punkt, eine Einflussfunktion. Wir sagen ein Modell dieses Tragwerkes ist dann exakt, wenn das Modell in der Lage ist, all diese Einflussfunktionen richtig wiederzugeben.

Daran lassen sich dann FE-Modelle messen: Wie gut gelingt es ihnen, die Einflussfunktionen für die maßgebenden Schnittgrößen anzunähern? Es sind aber zwei Fehler, die hier zusammenkommen: Der Modellfehler und der numerische Fehler, nur der letztere ist dem FE-Programm anzulasten.

Ein Bürohochhaus wird ja nicht als ganzes mit Volumenelementen nachgebaut, sondern es wird in Stiele, Riegel, Deckenplatten und Wandscheiben zerlegt und die spezifischen Defekte dieser Modelle erbt das FE-Gesamtmodell des Tragwerks.

Bevor ein FE-Programm seine Fehler macht, macht also schon der Tragwerksplaner—bewusst—Fehler. Diese Modellreduktion geht mit einer Mittelung der Schnittgrößen einher. Statt Spannungen in einem Punkt betrachtet er das resultierende Moment oder die resultierende Querkraft als maßgebende Größe in einem Schnitt und er errechnet erst später wieder aus diesen Schnittgrößen die Spannungen in einzelnen Punkten des Querschnitts.

Gesetzt, dass

- Werte im eigentlichen Sinne sich immer nur auf einen Punkt beziehen, Spannungen in einem Punkt, Verschiebungen in einem Punkt
- der Raum dreidimensional ist und somit die Einflussfunktion für die Punktwerte eine dreidimensionale Erstreckung im Raum hat

so folgt, dass nur, wenn ein FE-Programm diese dreidimensionale Einflussfunktion exakt nachbilden kann, der Wert in einem Punkt exakt sein kann (von glücklichen Zufällen abgesehen).

Theoretisch wäre es denkbar, dass sich der beim Übergang von dem 3-D Modell auf das 2-D-Modell gemachte Modellfehler bei der Rückrechnung vom Schnitt auf den Punkt, also der Spannungsberechnung aus dem Moment, wieder eliminieren ließe, aber diese Kette ist nicht durchgängig intakt, sondern unterwegs werden Annahmen getroffen, die die Rückrechnung unmöglich machen. Anders gesagt: unabhängig von jedem FE-Programm sind die Spannungen, die auf einem 2-D Modell beruhen in der Regel nur Näherung.

Die inhärente Schwäche dieser Reduktionsverfahren wird bei der Analyse von räumlichen Stabtragwerken sichtbar, weil dann die Programmautoren dazu gezwungen sind, ein Ersatzmodell auf das andere zu türmen.

Für sich alleine genommen können die Biegespannungen und die Schubverformungen des ebenen Trägers auf ein entkoppeltes System von einfachen Differentialgleichungen zurückgeführt werden. Der Querschnitt in einem räumlichen Rahmen wird aber gleichzeitig um zwei Achsen gebogen, tordiert, verwölbt und verdrillt und kein Effekt ist von dem anderen isoliert. Daher ist es schwer vorstellbar, dass die so berechneten Spannungen denselben Wert haben wie in dem echten 3-D Modell. Von daher ist man geneigt, die Ermittlung der exakten Spannungen in den Bemessungsschnitten von Stahlprofilen als die Königsdisziplin zu betrachten. Nicht weil Stabstatik so schwierig ist, sondern weil hier ein Modell auf das andere getürmt wird: Aus 3-D wird 2-D und daraus schließlich 1-D. In 1-D wird gerechnet, werden die Differentialgleichungen gelöst, und das wird dann wieder in 3-D zurück gerechnet.

Dazu kommt, dass man Anschlüsse, die aus mehreren Profilen zusammengesetzt sind, nicht in jedem Detail mit finiten Elemente nachbauen kann. Aber dies kann, wegen des Aufwandes immer nur unabhängig von dem Rest des Tragwerkes geschehen und somit ist der Effekt, den man eigentlich und modellieren will, der Übergang vom Feld in das Lager gar nicht fassbar.

Wesentlich bei jeder Modellreduktion ist, dass die charakteristische Kinematik erhalten bleibt. Darauf beruht ja der Erfolg der Fachwerkanalogie, s. Abbildung 8.23.

8.1.14 Ist 3-D genauer als 2-D?

Zunächst ist man geneigt zu sagen: Ja. Die 2-D Statik ist ja im Grunde eine Statik am Ersatzsystem, weil die einzelne Wand und der aus dem Tragwerk herausgelöste Unterzug nichts von den anschließenden Bauteilen wissen und meist starr gelagert gerechnet werden. Theoretisch sollten daher die Standsicherheitsnachweise mit dem Trend zur 3-D-Statik an Qualität gewinnen.

Praktisch ist es jedoch so, dass bei der Behandlung eines Tragwerkes als ganzem die Sorgfalt für das Detail verloren geht. Bei der 2-D Statik widmet man sich jedem Tragwerksteil einzelnen sehr detailliert und sehr aufmerksam und der Tragwerksplaner muss

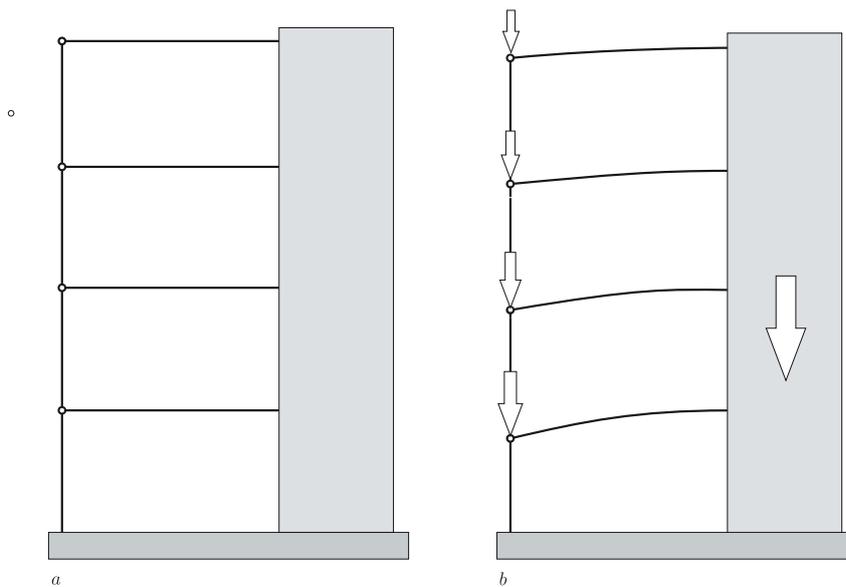


Abbildung 8.24: Bei einer Untersuchung am Gesamttragwerk führen die unterschiedlichen Steifigkeiten der Stützen und des Kerns zu negativen Feldmomenten in den Deckenplatten, die so nicht auftreten, weil bei der Erstellung des Gebäudes Differenzsetzungen aus Eigengewicht (teilweise) ausgeglichen werden.

ein Verständnis für das Tragverhalten des ganzen Gebäudes haben, um die Lasten, die auf das einzelne Bauteil wirken, richtig anzusetzen. Bei der Statik am Gesamtmodell ist das theoretisch nicht nötig und so übersieht man leicht, dass die Entstehungsgeschichte eines Tragwerkes einen wesentlichen Einfluss auf die Statik des Tragwerkes hat, s. Abbildung 8.24.

Es ist natürlich verlockend, von einer Software zu träumen, die auf Knopfdruck automatisch die ganze Statik vom First bis zum den Fundamenten erstellt. Aber dann braucht man auch keinen Statiker mehr...

Wir wollen einmal die These wagen, dass der Ingenieur dem Tragwerk seine Seele leihen muss. Das scheint uns, so merkwürdig es auch klingen mag, die primäre Aufgabe des Tragwerkplaners zu sein. Er muss eine Idee von den Tragwerk haben, er muss ein Verständnis für das Tragverhalten entwickeln und dann erst kann er darangehen die Standsicherheit eines Gebäudes nachzuweisen. Wenn er das nicht hat, wenn ihm das fehlt, dann ist die Statik eigentlich wertlos. Wie will er dann die Ergebnisse des Computers kontrollieren? Es geht ihm dann so wie dem Tragwerksplaner, der einen ganzen Gebäudeblock in den Rechner gab, und am Schluss gestand: Er wusste nicht mehr wohin die Kräfte laufen...

Wenn sich daher die Tendenz zur 3-D-Statik verstärken sollte, dann ist es unbedingt nötig, dass die Transparenz der Computerstatik im gleichen Maße zunimmt. Dann müssen Kontrollmechanismen her, dann müssen visuelle Hilfsmittel her, die es dem Tragwerksplaner ermöglichen das Tragverhalten nachzuspielen und ihn so befähigen, die Gültigkeit der

Ergebnisse zu beurteilen.

Der Computer und die zunehmende Komplexität der Normen haben dazu geführt, dass die Statik mehr und mehr zu einem Blindflug wird. Die Überlagerung der Lastfälle benötigt heute ein vielfaches der Zeit die die FE-Berechnung in Anspruch nimmt. Und wer weiß am Ende der Überlagerung noch, wo die Werte herkommen? Wenn sich die 3-D Statik nicht durchsetzt, dann wahrscheinlich deswegen, weil die Ermittlung der maßgebenden Schnittkräfte in den Bemessungsschnitten bei einer Statik am Gesamtmodell unzumutbar lange dauert.

Vor dem Computer sitzt ein (junger) Ingenieur und wenn denn die Schreckensmeldungen der Prüfindgenieure nicht übertrieben sind, dann ist es heute anders wie früher: Der Computer muss dem Anwender die Statik beibringen und nicht umgekehrt...

Der junge unerfahrene Ingenieur wird mit viel Sorgfalt versuchen, jedes Detail nachzubilden, jeden Anschluss, jedes Knotenblech und wird dann doch für seine Mühen eventuell schlecht belohnt, wenn dann Singularitäten zu so merkwürdigen Ergebnissen führen, die er sich gar nicht erklären kann. Er hat doch eigentlich alles richtig gemacht...

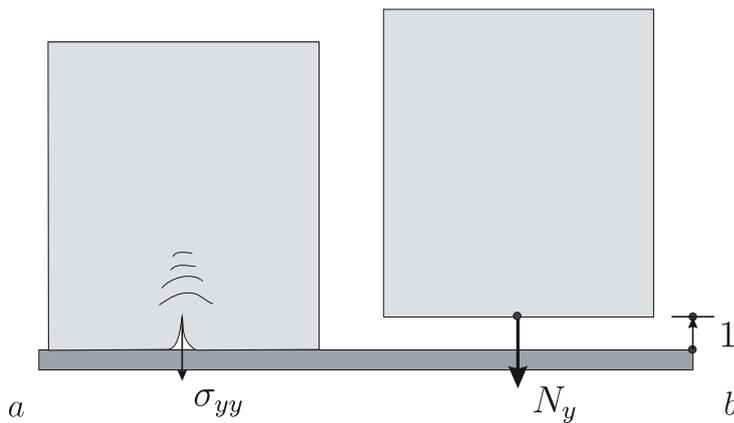
Die Ausbildung der Bauingenieure muss deren Tauglichkeit für den Einsatz im Ingenieurbüro und in der Baufirma sicherstellen. Und dazu gehört primär, dass der junge Ingenieur ein Gefühl für das Tragverhalten von Bauteilen und Bauteilgruppen erwirbt. Bei einer FE-Rechnung, die immer eine Diskretisierung notwendig macht, werden von unerfahrenen Anwendern auch ganz nebensächliche, untergeordnete Teile eines Tragwerks mitberechnet, weil die Kenntnis für die Haupttragwirkungen fehlt.

In den riesigen Zahlenmengen einer FE-Berechnung die richtigen Größen zu finden, setzt die Kenntnis des Tragverhaltens voraus. Die lässt sich aber nicht durch die Diskretisierung vermitteln, sondern durch Handrechnung von einfachen Modellen unterstützt u.U. mit Tabellen. Die genaue baustatische Berechnung bis auf kleine Fehler von wenigen Promillen kann dann mit den finiten Elementen im Nachhinein erfolgen, wenn man vorher (!) weiß, was ungefähr herauskommen muss.

8.1.15 Hierarchie der Werte

- Der einzige Wert, der bei einer FE-Berechnung garantiert exakt ist, ist die Summe V .

Einfach weil die Einflussfunktion für die Summe V eine einfache Translation des Tragwerks ist, s. Abbildung 8.25 b. Und ein solches Anheben oder Senken des ganzen Tragwerkes um eine Längeneinheit kann man schon auf dem größten Netz exakt darstellen. Es ist die einfachste mögliche Einflussfunktion. Dagegen ist die FE-Einflussfunktion für die Spannung σ_{yy} in einem einzelnen Punkt der Lagerfuge, s. Abbildung 8.25 a, wahrscheinlich immer nur eine Näherung, weil man die Auswirkungen einer solchen Spreizung auf einem

Abbildung 8.25: Einflussfunktion für σ_{yy} und für N_y , [8]

FE-Netz nur schwer richtig darstellen kann.

Die Genauigkeit der Ergebnisse staffelt sich also danach, wie schwierig es für das FE-Programm ist, auf dem Netz die Einflussfunktionen für diese Größen zu approximieren. Und wie natürlich gewinnen dabei die integralen Werte gegenüber den Punktwerten.

In der Hierarchie ganz oben stehen die Durchbiegungen und die Stützenkräfte, weil die Einflussfunktionen für diese Größen einfache 'Dellen' sind. Als nächstes kommen die Momente, weil auch deren Einflussfunktionen bzw. Einflussflächen von Monopolen erzeugt werden (s.o.). Auch sie summieren, auch sie integrieren. Sie addieren einfach nur alles auf, was an Belastung in der Nähe des Aufpunktes steht.

Dagegen haben die Einflussfunktionen für Spannungen und Querkräfte ein echtes handicap weil ihre Einflussfunktionen Scherbewegungen sind, deren beide *peaks* bis $\pm\infty$ reichen. Das macht es für ein FE-Programm schwierig, die exakten Spannungen und Querkräfte zu ermitteln.

Nun könnte man einwenden, dass in der Stabstatik die FE-Ergebnisse alle exakt sind, also auf mehr als die Summe V Verlass ist. Aber man darf dabei nicht vergessen, dass die Stabstatik ja schon eine Reduktion des 3-D-Tragwerks ist und die eigentliche Frage daher ist, wie gut die 1-D-Einflussfunktion plus der nachgeschalteten technischen Biegetheorie die 3-D-Einflussfunktion für die Spannung σ_{xx} in einem Querschnittspunkt eines I-Profiles annähern kann?

Führen die Schritte

- Reduktion des Tragwerkes auf einen ebenen Rahmen
- Aufstellen der Einflussfunktion für das Moment M im Schnitt
- Auswertung der Einflussfunktion

- Berechnung der Normalspannung σ_{xx} im Rahmen der technischen Biegelehre aus M auf dieselbe Spannung σ_{xx} wie die direkte Auswertung der 3-D-Einflussfunktion?

Streng genommen muss die FE-Einflussfunktion auch nur im Fußpunkt der Last den richtigen Wert hat. Das dazwischen ist nicht wichtig, es zählt nicht. Das erklärt, warum es selbst auf groben Netzen immer Punkte gibt, in denen die Ergebnisse richtig sind.

Bei Flächenlasten, wie etwa dem Eigengewicht, wird ja zur Auswertung der Einflussfunktion, etwa für eine Lagerkraft A ein Integral gebildet

$$A = \int_{\Omega} \eta(\mathbf{x}) p(\mathbf{x}) d\Omega \quad (8.6)$$

und wenn sich der Fehler in der FE-Einflussfunktion $\eta(\mathbf{x})$ im Mittel aufhebt, dann ist die Lagerkraft exakt.

8.1.16 Zahlengläubigkeit

Der Ingenieur will Ergebnisse haben. Ihn interessiert das maximale Moment in Feldmitte, die maximale Querkraft rechts vom Auflager, etc.. All das sind Punktwerte, Werte in einem Punkt. Der Mathematiker würde sagen, das sind Punktfunktionale.

Nun kontrastiert diese Schärfe im Ergebnis mit der Tatsache, dass die Methode der Finiten Elemente ein Energieverfahren ist. Sie findet den Lastfall p_h , der dem Originallastfall am nächsten kommt, dadurch, dass sie die potentielle Energie des Tragwerkes minimiert². Der Wettbewerb wird also auf Grund *einer* Zahl entschieden. Und dann will man, wenn man diesen Ersatzlastfall gefunden hat, genau wissen, wie groß die maximalen Spannungen oder Verschiebungen in allen Punkten der Scheibe ist. Das passt scheinbar nicht zusammen.

Dies soll die Einleitung zu der Bemerkung sein, dass es im Grunde müßig ist über einzelne Zahlen, über Werte in einzelnen Punkten, bei einer FE-Berechnung zu streiten. Wenn der Algorithmus das Gesamtsystem im Auge hat, und dieses dann noch auf eine Zahl reduziert, kann man sich schon fragen, welche Genauigkeit ein einzelner Wert hat.

Dagegen kann man natürlich einwenden, dass das FE-Programm ja nicht nur einen Wurf tut, also nur einmal an den Tragwerk wackelt, sondern dass es sehr, sehr viele Tests fährt, dass es mit sehr, sehr viel virtuellen Verrückungen an dem Tragwerken wackelt und so danach strebt, dass der FE-Lastfall dem Original Lastfall möglichst nahe kommt. Hinter

²Eigentlich wird die potentielle Energie, oder genauer ihr Betrag, maximiert. Nur weil die potentielle Energie in der Gleichgewichtslage negativ ist, spricht man immer von einem Minimum. Wenn man links vom Nullpunkt ist, gewinnt der, der weiter weg vom Nullpunkt ist, also kleiner als alle anderen. Aber betragsmäßig ist es der größte Wert.

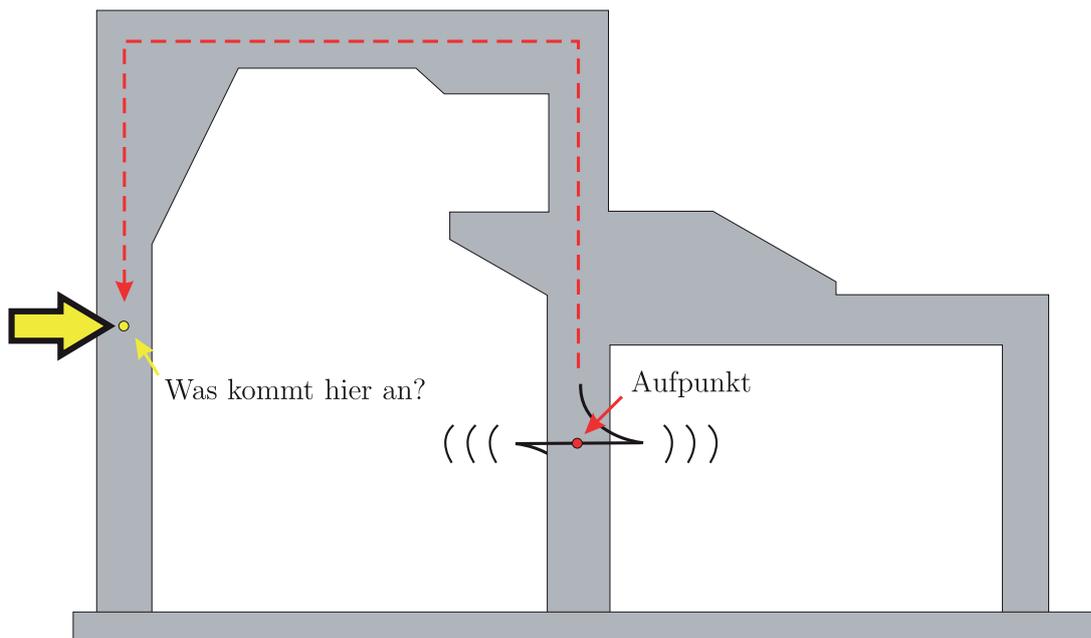


Abbildung 8.26: Die Einflussfunktion für die Querkraft wird durch eine Scherbewegung des Aufpunkts ausgelöst. Die Gestaltung der Diskontinuitätsbereiche ist entscheidend dafür, wie diese Bewegung über das Tragwerk läuft und damit entscheidend dafür, was davon im Kraftangriffspunkt ankommt, d.h. wie groß der Einfluss der Kraft auf die Querkraft ist.

der einen Zahl stecken also sehr viele Würfe.

Es ist sicherlich auch müßig, über einzelne Momentenwerte oder Querkraftwerte zu streiten, aber wenn in zehn oder zwanzig Punkten die Abweichungen gegenüber einer Kontrollberechnung signifikant sind, dann ist das schon auffällig.

Auch gilt, dass man bei dem Vergleich einzelner Werte abstufen muss. So ist zum Beispiel die Summe der Lagerkräfte immer exakt, gleichgültig wie grob das FE-Netz ist. Es ist aber auch der einzige Wert, der immer exakt ist. Die integralen Lagerkräfte kommen diesem Ideal relativ nahe, weil deren Einflussfunktionen sich schon auf groben Netzen gut annähern lassen. Insbesondere die Normalkräfte in Stützen sind deswegen sehr genau.

Auch die Normalkraft oder die Querkraft in einem längeren Schnitt durch eine Scheibe sollten wenig Anlass zu Zweifeln geben. Auch hier ist das Argument wieder, dass die Einflussfunktionen für solche integralen Größen leicht zu approximieren sind.

Für alle anderen Punktwerte gelten aber die Bemerkungen, die wir oben gemacht haben. Je höher die Ableitungen sind, die in einem Punkt berechnet werden sollen, Spannungen, Momente und Querkräfte sind ja Ableitungen der Verschiebungen, desto ungenauer sind die Punktwerte. Am kritischsten sind die Querkräfte und die Spannungen, weil ihre Einflussfunktionen Scherbewegungen sind, sie also differenzieren. Und man weiß, wie

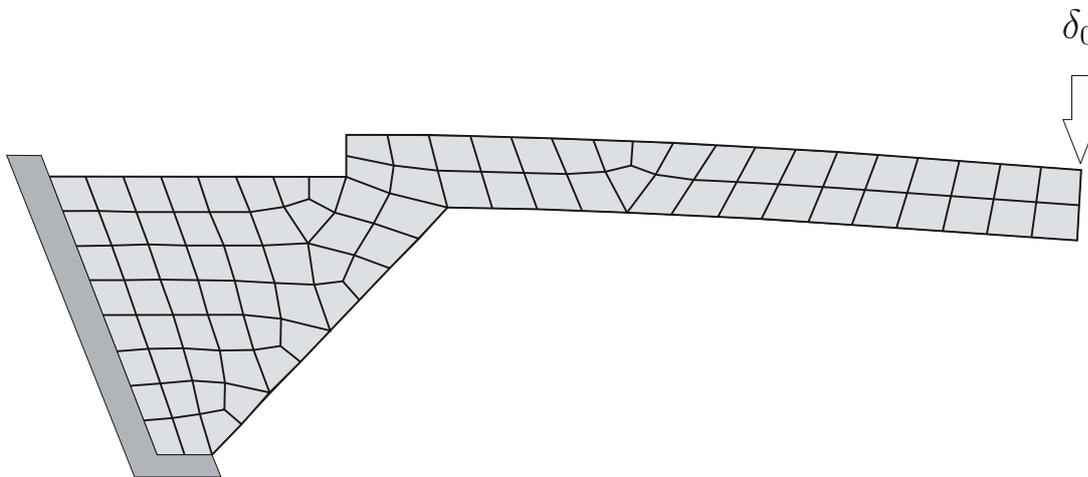


Abbildung 8.27: Je weiter das Tragwerk auskragt, desto fehleranfälliger werden FE-Ergebnisse.

schwierig es ist, numerisch zu differenzieren.

8.1.17 Biege- und Diskontinuitätsbereiche

Bei der Bemessung von Tragwerken unterscheidet man heute zwischen Biegebereichen und sogenannten Diskontinuitätsbereichen. In Biegebereichen gilt näherungsweise die Balkentheorie während sich in den Diskontinuitätsbereichen ein Spannungszustand einstellt, der nur durch komplexere Modelle (2-D Scheibenstatik) erfasst werden kann.

Ursprünglich wurde diese Unterscheidung eingeführt, um den Dehnungs- und Spannungszustand in einem Querschnitt zu charakterisieren. Viele Ingenieure interpretieren dies mittlerweile so, dass sie meinen, dass in Biegebereichen die Schnittkräfte einer FE-Statik korrekt sind und nur die Ergebnisse in Diskontinuitätsbereiche mit Vorsicht zu betrachten seien. Aber dies ist eine irrige Meinung: Auch die Schnittkräfte in Biegebereichen können falsch sein.

Man überzeugt sich davon leicht, wenn man das Abbildung 8.26 betrachtet. Der Einfluss, den die Last im linken Stiel auf die Querkraft im Aufpunkt rechts hat, hängt davon ab, wie groß die horizontale Verschiebung des Lastangriffpunktes ist, wenn man den Aufpunkt spreizt (Querkraftgelenk mit Versatz von Eins). Diese Bewegung durchläuft mehrere Diskontinuitätsbereiche. Wenn diese Bereiche nicht richtig modelliert werden, dann kommt im Fußpunkt zu wenig oder zu viel von der Spreizung an und dann ist auch die Querkraft falsch, obwohl sie in einem Biegebereich liegt.

Das ist im Grunde das Problem, das wir oben schon angesprochen haben, nämlich dass die ganze Strecke zwischen dem Fußpunkt der Wanderlast und dem Aufpunkt korrekt modelliert werden muss. Vereinfachungen am Tragwerksmodell, das Weglassen von gewissen Teilen, starre statt drehelastische Einspannung, etc. all diese Maßnahmen müssen

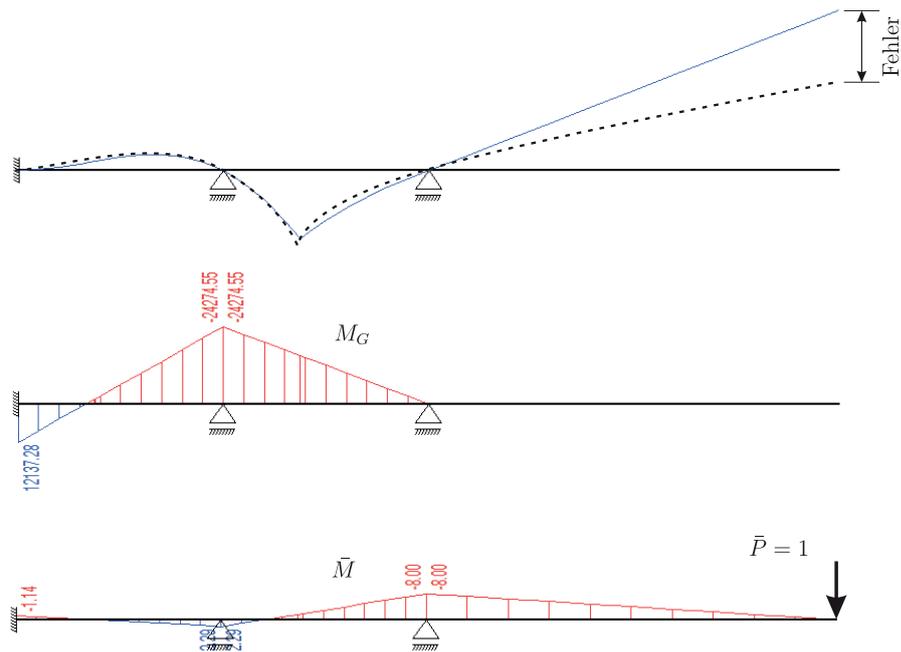


Abbildung 8.28: Fehleranfälligkeit bei auskragenden Bauteilen **a)** Exakte und genäherte Einflussfunktion für Feldmoment **b)** Moment M_G der exakten Einflussfunktion **c)** Moment aus der Hilfsgröße $\bar{P} = 1$

in diesem Licht geprüft werden: Verfälschen sie die Fortpflanzung der Einflussfunktionen oder sind die unvermeidbaren Fehler vernachlässigbar?

8.1.18 Auskragende Bauteile

Eine direkte Konsequenz dieser Überlegungen ist, dass Ergebnisse in weit auskragenden Bauteilen, wie etwa der Kragplatte in Abbildung 8.27, mit Vorsicht zu betrachten sind. Dies liegt daran, dass die Einflussfunktionen für die Schnittkräfte in solchen Bauteilen—vor allem für die Anschlusskräfte—relativ fehleranfällig sind.

Angenommen, die Einflussfunktion für das Feldmoment im 2. Feld des Trägers in Abbildung 8.28 wird nicht richtig berechnet. In dem betreffenden Feld sind die Abweichungen noch klein, aber im Kragträger sind sie nicht mehr zu übersehen und je länger der Kragträger ist, desto größer werden die Abweichungen, die aus dem scheinbar kleinen Fehler entstehen.

Dies gilt nicht nur für auskragende Bauteile, sondern auch für Teile eines Tragwerkes, die sehr weich aufgehängt sind. Denn der Einfluss der Wanderlast auf das Moment, die Querkraft oder die Normalkraft im Aufpunkt hängt davon ab, was aufgrund der Spreizung des Gelenkes im Fußpunkt der Wanderlast ankommt. Und wenn die Wanderlast in einem sehr weich aufgehängten Bereich steht dann können kleine Steifigkeitsänderungen große

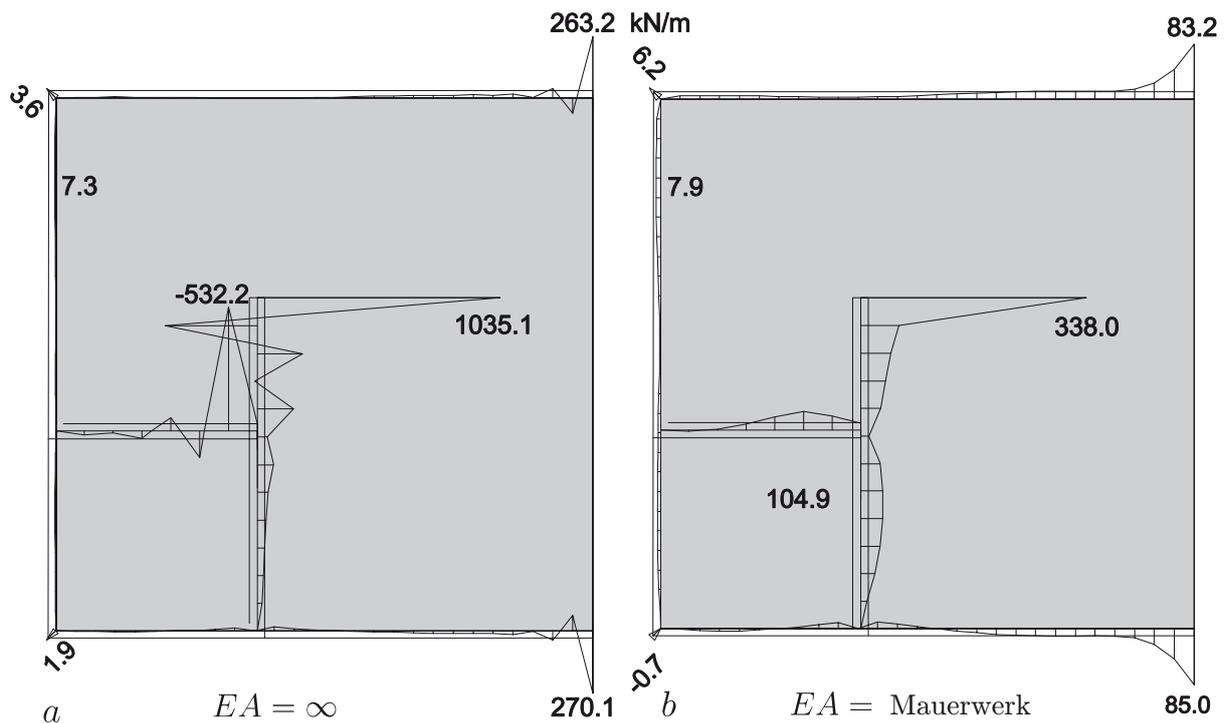


Abbildung 8.29: Lagerkräfte einer Platte (8m × 8 m) im LF $g = 9 \text{ kN/m}^2$; der rechte Rand ist frei. a) Starre Lager, b) Lagerung auf Mauerwerk

Schwankungen dieses Wertes zur Folge haben und das bedeutet, dass sich der Einfluss der Wanderlast schlecht abschätzen lässt. Dann ist Vorsicht geboten.

8.1.19 Lagerkräfte

Die Lagerkräfte sind, zusammen mit den Durchbiegungen, die Werte, die ein FE-Programm am genauesten ermitteln kann, weil die Einflussfunktionen für die Knotenkräfte eine einfache Gestalt haben. Es sind Dellen oder Kuhlen, die dadurch entstehen, dass der Knoten um eine Längeneinheit abgesenkt wird. Genau genommen wird nicht der Knoten um eins abgesenkt, sondern

- es wird zwischen dem Knoten und seinem Widerlager ein Schnitt geführt
- es werden die beiden Schnittufer um eine Längeneinheit aneinander vorbei bewegt: der Knoten nach unten, das Widerlager nach oben.

Wenn das Widerlager fest ist (starres Lager), dann muss die Eins, die Bewegung ganz von dem Knoten aufgebracht werden, die Platte senkt sich um Eins ab. Wenn das Lager elastisch ist (Feder), dann lässt sich die Feder nach oben ziehen und um das gleich Maß muss sich die Platte weniger nach unten bewegen, die Einflussfläche für die Lagerkraft verläuft flacher. Im Extremfall, bei einer sehr weichen Feder, wird die Eins alleine von der Feder aufgebracht und die Platte rührt sich gar nicht, das heißt die Einflussfläche für die Lagerkraft ist null. Die Feder entzieht sich dem Lastabtrag.

Wenn man sich diese Abbildung vor Augen hält, dann versteht man auch, warum bei einer starren Lagerung einer Decke auf einer Wand die Lagerkräfte an freien Wandenden zu Oszillationen neigen, und die Lagerkraft in dem vordersten Knoten immer den größten Wert hat, s. Abbildung 8.29. Einfach weil die Kuhle, die entsteht, wenn man den vordersten Knoten um Eins absenkt (= Einflussfunktion für die Knotenkraft), von maximaler Größe ist.

Und wenn man den dahinter liegenden Knoten um Eins nach unten drückt, dann geht der Teil der Platte vor dem Wandende nach *oben* (= negative Durchbiegungen) und das heißt, dass die Knotenkraft die Platte nach unten ziehen muss: Die Knotenkraft ist negativ. So kommen die Oszillationen in den Knotenkräften zustande und während sie sonst auf Singularitäten oder andere Unstimmigkeiten hinweisen, ist ihr Auftreten hier durch die Statik erklärbar und ganz natürlich.

Wenn man die starre Lagerung durch Mauerwerkswände ersetzt, wie in Abbildung 8.29, dann verschwinden die Oszillationen, weil dann die Absenkung eines Knotens immer auch zu Absenkungen der Nachbarknoten führen und so die krassen Vorzeichenwechsel in den Stützkraften verschwinden.

Der Vollständigkeit halber soll sei noch erwähnt, dass bei einer FE-Analyse die geometrischen Lagerbedingungen exakt erfüllt werden, aber die statischen Lagerbedingungen nur näherungsweise. Der gelenkig gelagerte Rand einer Platte ist also nicht exakt momentenfrei, sondern nur im energetischen Mittel, im Sinne des Prinzips der virtuellen Arbeiten.

8.1.20 Lagersteifigkeiten

Alle tragenden Teile sollten mit ihrer wahren Steifigkeit modelliert werden. Das gilt insbesondere für Wände, Stützen und Unterzüge. Zum einen erhält man nur auf diese Weise realistische Bemessungsgrößen auf der anderen Seite hilft nichts Singularitäten in Lagerkräften oder Spannungen abzubauen, als der Entschluss Lager mit ihrer natürlichen Nachgiebigkeit zu erfassen.

Steife Lager ziehen die Kräfte an, weil die Einflussfunktionen mit wachsender Steifigkeit 'fülliger' werden, wie man in Abbildung 8.30 sieht.

Wenn man die Lagerkräfte überschlägig mit einer Lastflächenmethode kontrolliert, dann rechnet man im Prinzip mit starren Lagern, was ja nicht der Wirklichkeit entspricht. Zudem haftet der Einteilung einer Decke in Lastflächen eine gewisse Willkür an.

Gerade Lagerkräfte berechnen FE-Programme relativ genau. Das folgt aus der Theorie, weil die Einflussfunktionen für Lagerkräfte eine einfache Gestalt haben und schon auf relativ groben Netzen gut angenähert werden, so dass in der Regel wenig Anlass besteht die

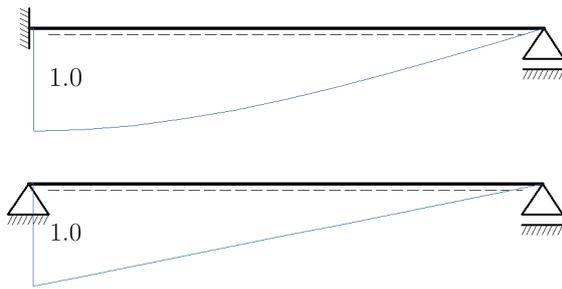
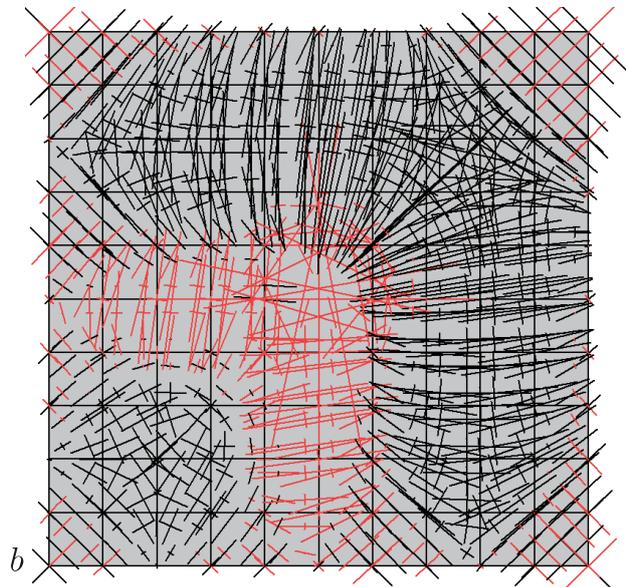


Abbildung 8.30: Einflussfunktionen für die linke Lagerkraft im Vergleich: a) Volleinspannung b) gelenkige Lagerung

a

10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00



c

2.43	1.87	1.21	1.04	1.35	1.36	0.89	0.77	1.37	2.21
2.04	3.47	2.51	2.09	3.78	4.04	1.92	1.29	2.00	1.39
1.81	3.50	2.06	-0.26	5.62	7.20	0.44	0.41	1.48	0.85
1.50	2.43	1.67	-9.06	6.53	12.33	-6.66	1.35	2.28	0.97
-3.26	-5.38	-2.89	8.73	-11.26	-17.27	10.44	6.71	3.86	1.31
-2.97	-5.86	-5.28	1.10	-2.14	-8.15	2.81	4.32	3.36	1.25
1.66	2.45	1.48	-3.51	-3.05	2.75	-1.11	1.15	2.30	1.06
2.25	4.81	4.19	0.63	-4.75	-3.18	1.32	2.54	2.80	1.29
2.56	5.02	4.68	2.29	-5.55	-5.31	2.13	3.45	3.56	1.91
2.65	2.54	2.21	1.65	-2.87	-3.25	1.42	1.76	2.04	2.44

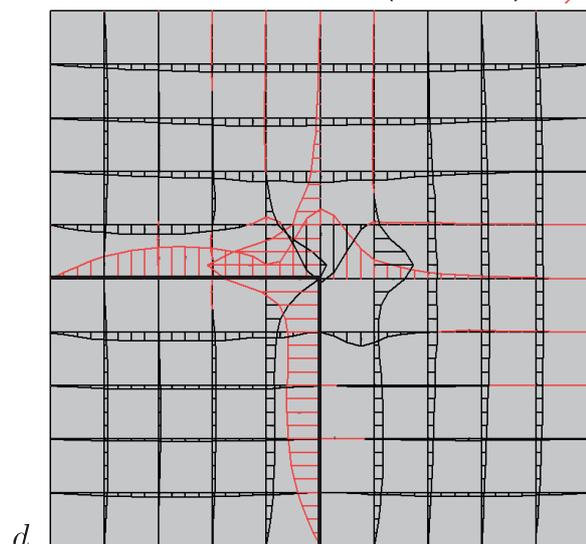


Abbildung 8.31: Wohnhausdecke a) System und Belastung b) Elementlasten c) Kräfte auf den Elementkanten, im Bereich der Wände sind diese Kräfte die Lagerkräfte

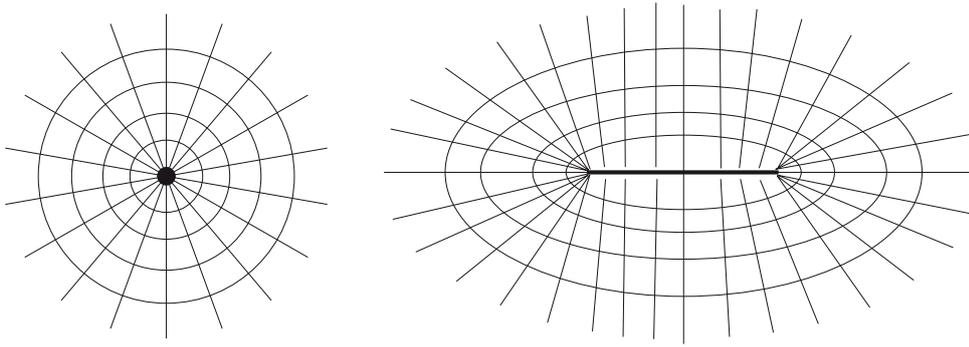


Abbildung 8.32: In der Nähe eines Punktlagers sind die Kraftlinien so eng gepackt, dass das Material anfängt zu fließen. Deswegen kann man eine Scheibe nicht auf ein Punktlager stellen. Und deswegen bringen auch Einzelkräfte (Knotenkräfte) die Scheibe zum fließen. Wenn ein FE-Programm wirklich mit Knotenkräften rechnen würde, dann wären alle Knoten vom Bildschirm verschwunden. Wenn die Belastung jedoch über eine kurze Länge verteilt wird, dann entschärft sich die Situation, die Kraftlinien sind nicht mehr so eng gepackt und das Material widersteht (theoretisch) den hohen Spannungen.

FE-Lagerkräfte anzuzweifeln. Sie dürften, krasse Bedienungsfehler ausgeschlossen, immer genauer sein, als Ergebnisse, die mit Lastflächenmethoden oder ähnlichem erzielt wurden.

8.1.21 Ausrunden der Momente?

Bei Balken ist es sicherlich sinnvoll, das Stützenmoment über den Wänden auszurunden. Ob das aber bei einer Plattenberechnung mit finiten Elementen noch gelten kann, ist doch zweifelhaft, denn in einem FE-Modell liegt eine Platte nicht auf einem scharfen Linienlager auf, sondern sie ist eher weich gebettet, weil es eigentlich eine ganze 'Wolke' von Stützkraften ist, vor allem eben Flächenkräfte, die die Platte trägt. Formal sieht das so aus, sind die Knotenkräfte, die der Anwender auf den Bildschirm sieht, auch der Wolke äquivalent, aber ob man deswegen ausrunden darf oder ausrunden sollte?

In Abbildung 8.31 wird dies beispielhaft an einer Wohnhausdecke über zwei Innenwänden, die mit einer Gleichlast belastet ist, gezeigt. Dargestellt ist der Lastfall, den das FE-Programm wirklich gerechnet hat. Längs den Elementkanten drücken in ihrer Höhe veränderliche Linienkräfte die Platte nach unten. Im Bereich der beiden Innenwände drehen diese Linienkräfte jedoch ihr Vorzeichen um (!) und stützen die Platte. In dem Plot wird kein Unterschied gemacht zwischen Lasten und Lagerkräften. Es ist alles eingetragen worden, was auf die Platte drückt bzw. die Platte stützt. Die Platte liegt also auch noch, so muss man die Verteilung der Kräfte interpretieren, links und rechts und unterhalb und oberhalb von den zwei Innenwänden auf imaginären Luftkissen auf. Eine echte Schneidenlagerung stellt man sich nun doch anders vor.

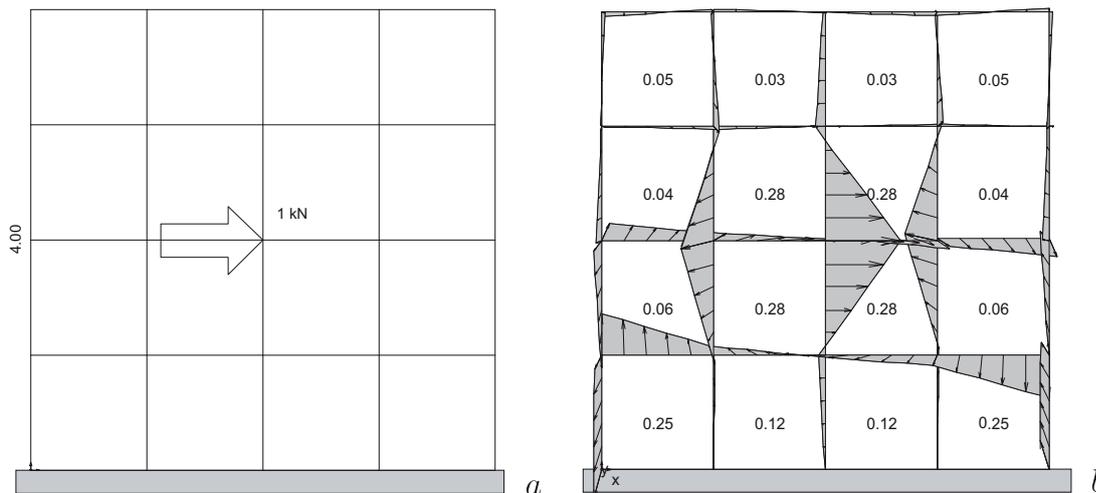


Abbildung 8.33: Wie es wirklich aussieht, wenn man eine Scheibe mit einer Einzelkraft belastet. a) Die Knotenkraft b) wird vom FE-Programm durch eine Schar von Linienkräften längst den Elementkanten und Flächenkräften in den Elementen angenähert. Ein FE-Scheibenprogramm kann keine Einzelkräfte rechnen.

8.1.22 Lagerkräfte von Scheiben

Mathematisch ist ein Punkt ein Kreis K_r mit Radius r gleich Null und damit auch mit dem Umfang Null. Zieht man immer kleinere Kreise K_r , $r \rightarrow 0$, um eine Punktlast $P = 1$, dann müssen also die Spannungen σ gegen Unendlich gehen, weil nur so bei schrumpfenden Umfang $U = 2\pi r$ das Integral der Spannungen der Kraft das Gleichgewicht halten kann

$$\lim_{r \rightarrow 0} \int_{K_r} \sigma ds = \lim_{r \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} \sigma r d\varphi = \lim_{r \rightarrow 0} \int_0^{2\pi} \frac{1}{2\pi r} r d\varphi = 1. \quad (8.7)$$

Die Spannungen σ müssen sich also verhalten wie $1/r$. Dies bedeutet aber, dass das Material der Scheibe plastifiziert und zu fließen anfängt, s. Abbildung 8.32. Man kann mathematisch zeigen, dass eine Einzelkraft den Angriffspunkt bis in den Punkt ∞ verschiebt. Alle Punktlager einer Scheibe müssten also vom Bildschirm verschwunden sein, wenn ein FE-Programm wirklich Knoten als Punktlager rechnen würde.

- Man kann eine Scheibe nicht in einem Punkt festhalten.

Das sagt die Elastizitätstheorie. Man kann auch einer Scheibe keine Verschiebung in einem Punkt vorschreiben. Das tut man ja theoretisch, wenn man einen Knoten festhält.

Punktlager wie auch Knotenkräfte sind also eine Fiktion. Der Ingenieur setzt zwar eine gewisse Kraft in einen Knoten, aber das Lastbild, das von einem Scheibenprogramm erzeugt wird, ist ein ganz anderes, s. Abbildung 8.33.

Dasselbe gilt hinsichtlich der Punktlager. In einem festgehaltenen Punkt wird keine Einzelkraft eingeleitet, sondern es ist eine ganze Wolke von Flächenkräften und Linienkräften,

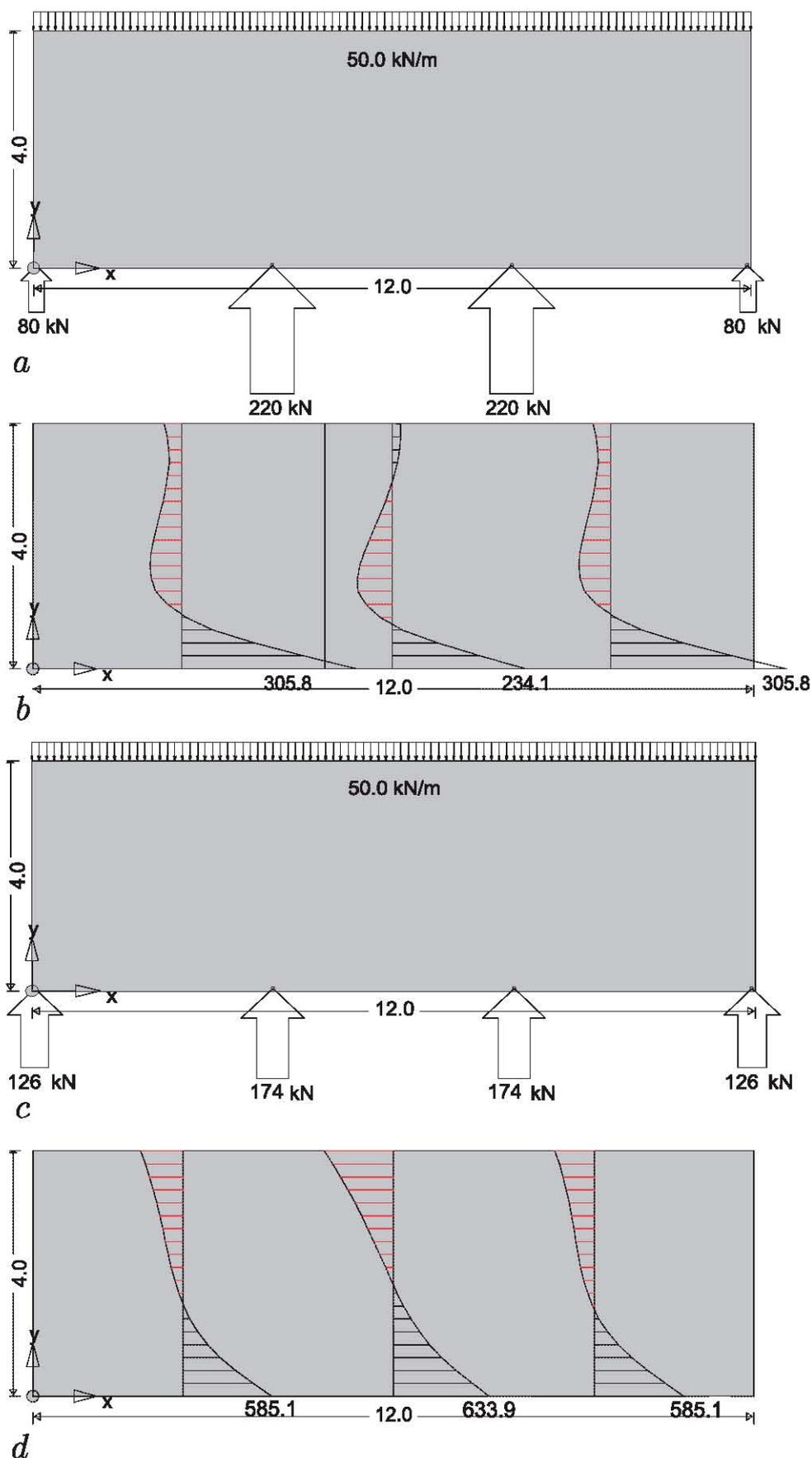


Abbildung 8.34: Einfluss der Lagersteifigkeit: a) starres Lager, b) Spannungen σ_{xx} , c) Mauerwerk als Lager, d) Spannungen σ_{xx} kN/m²

die die Scheibe in der Nähe des Punktes stützen. Dies sieht man, wenn man sich einmal den FE-Lastfall p_h bei einer solchen Lagerung auf dem Bildschirm darstellen lässt.

- Man darf mit Punktlagern rechnen.

Natürlich darf man mit festgehaltenen Knoten, mit Punktlagern, rechnen, nur muss man sich dann über den Näherungscharakter im klaren sein.

Weil man nach der Elastizitätstheorie einer Scheibe eine Verschiebung längs einer Linie, wie einer Lagerkante, vorschreiben kann, ist es im übrigen völlig legitim, wenn man mehrere Knoten in einer Reihe festhält.

Es ist bekannt, dass Scheiben sehr empfindlich auf die Steifigkeiten der Lager reagieren, daher ist es wichtig die Steifigkeiten korrekt zu erfassen. Dies sieht man sehr schön an der Scheibe in Abbildung (8.34). Bei steifen Lagern bilden sich kleine Druckbögen zwischen den Lagern aus und die Verteilung der Lagerkräfte ähnelt einem Durchlaufträger, s. Abbildung 8.34 a, während weiche Lager zu einer Erhöhung der äußeren Lagerkräfte gegenüber den inneren Lagerkräften führen.

8.1.23 Stützen

Würde man eine Rundstütze als Punktstütze (Radius $r = 0$) modellieren, dann würden die Stützmomente unendlich groß werden. Weil sich die Stützenkraft jedoch über eine gewisse Fläche A ausbreitet, kommt es nicht zu diesen extremen Spitzen, sondern das Biegemoment ist vielmehr ausgerundet.

Es bleibt jedoch ein starker Anstieg des Moments zur Stütze hin. Warum dieser Anstieg so stark ist, versteht man, wenn man das Abbildung 8.35 betrachtet; es ist sozusagen die gekrümmte Einflussfunktion, die sich über die Stütze hochschiebt und so stark auftürmt.

Dieser starke Anstieg ist der Grund, warum die Stützenanschnittsmomente sich so schlecht berechnen lassen. In der Literatur sind viele Vorschläge gemacht worden, wie man durch Eingriffe in die Modellierung der Stütze zu 'besseren', d.h. genaueren Ergebnissen kommen kann.

Wir halten es jedoch für ausreichend, dass

1. Die Steifigkeiten aller tragenden Teile einer Platte korrekt modelliert werden
2. Das FE-Netz zur Stütze hin verfeinert wird.

Die letztere Maßnahme zielt auf eine bessere Darstellung der Anschnittsmomente, nicht der Lagerkraft in der Stütze. Die Lagerkraft ist auch ohne diese Maßnahme schon relativ genau.

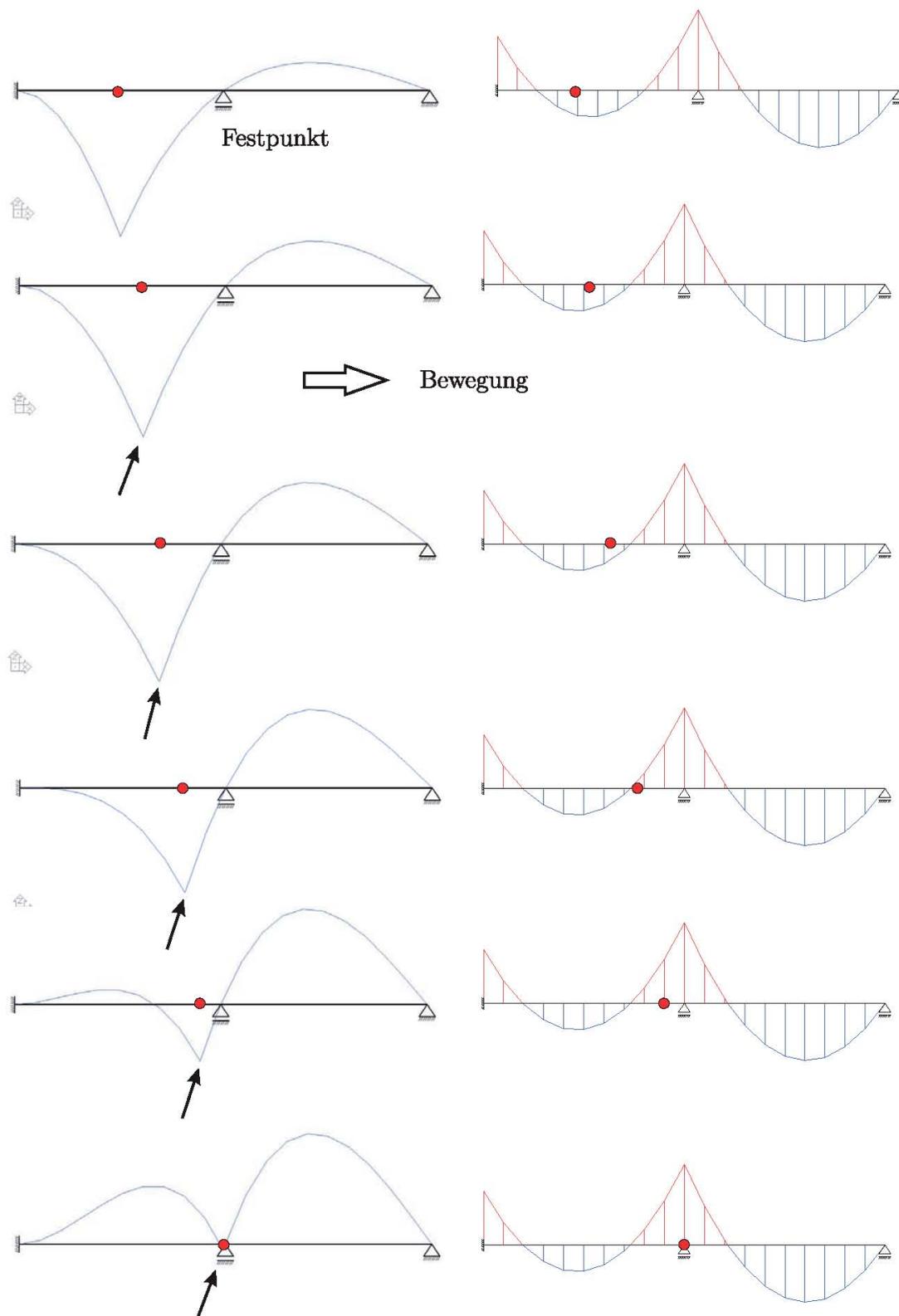


Abbildung 8.35: Wie sich das positive Feldmoment zu einem negativen Stützmoment entwickelt, versteht man, wenn man verfolgt, wie sich die—eigentlich immer gleich bleibende—Einflussfunktion zur Stütze hin auftürmt.

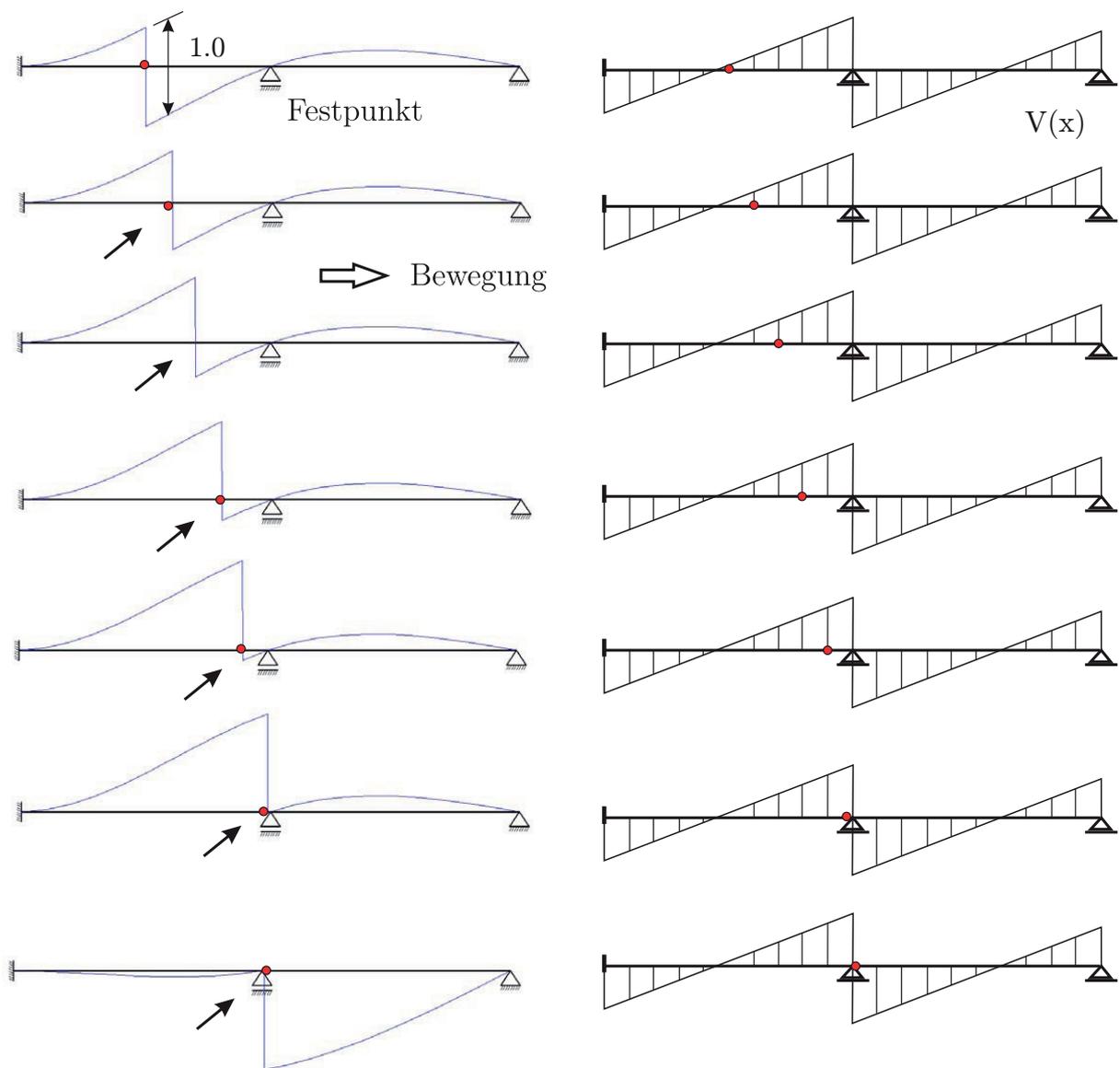


Abbildung 8.36: Wie die Einflussfunktion für $V(x)$ über den Träger wandert

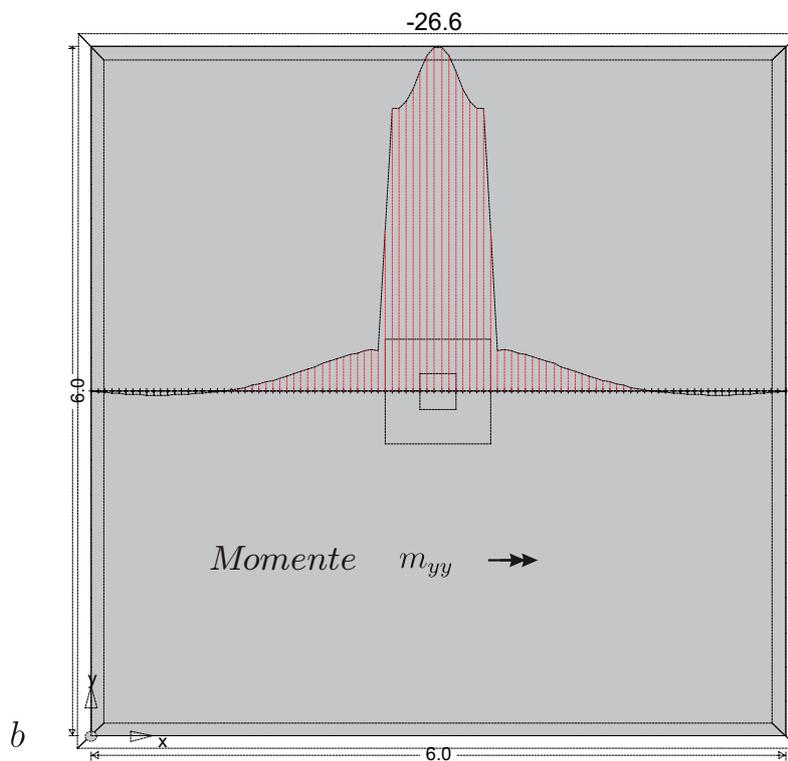
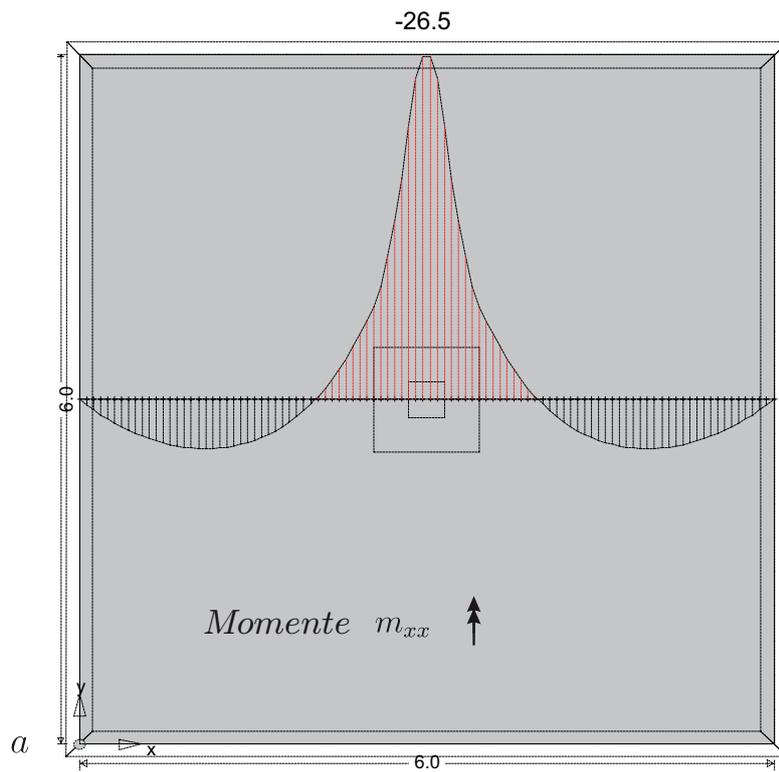


Abbildung 8.37: Stützenkopfverstärkung: **a)** Biegemomente m_{xx} längs der Mittelachse, **b)** Biegemomente m_{yy} . In einem vertikalen Schnitt wäre m_{yy} stetig und m_{xx} würde springen

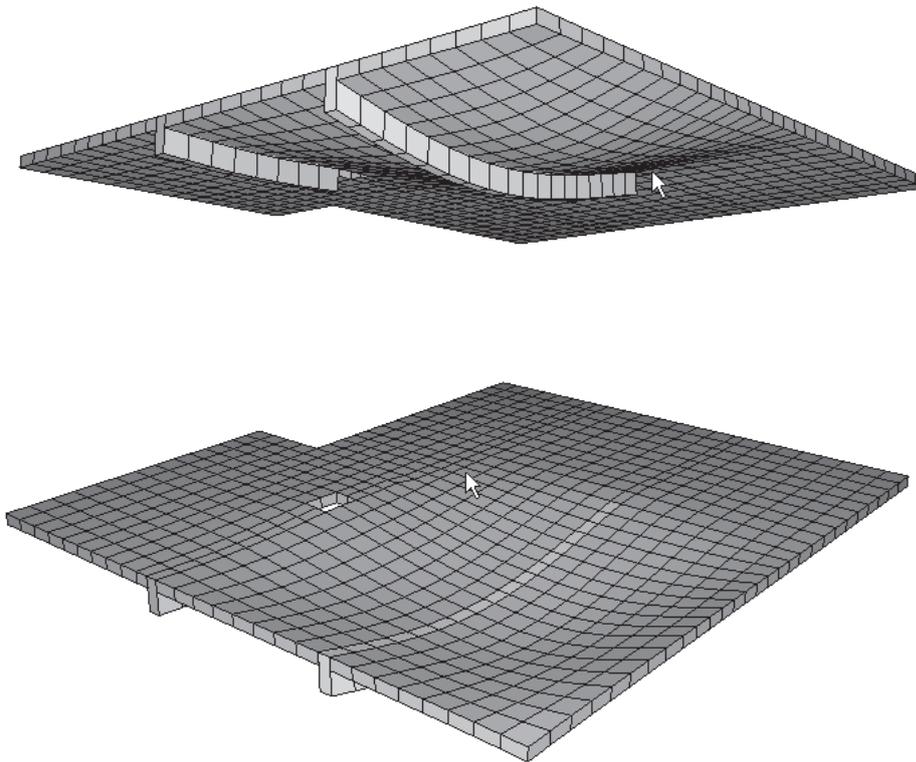


Abbildung 8.38: Verformungen des Systems Platte und Unterzug - stark überhöht

Eine gute Orientierung bietet die Streifenmethode, die z.B. in dem Heft 240 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton abgedruckt ist. Bei Vergleichsrechnungen zeigte sich immer eine gute Übereinstimmung.

Man beachte, dass bei Stützenkopfverstärkungen jeweils eines der beiden Momente m_{xx} und m_{yy} springt, s. Abbildung 8.37.

8.1.24 Unterzüge

Solange es keine FE-Programme gab, hat man meist Unterzüge als starre Lager gerechnet. Jetzt da man mit FE-Programmen die Steifigkeiten realistisch erfassen kann, ist man erstaunt, wie wenig die Unterzüge im Vergleich zur Platte tragen. Obwohl es eigentlich klar ist, dass eine Deckenplatte wesentlich steifer ist, als ein Unterzug, der 20 cm oder 30 cm aus der Decke ragt, s. Abbildung 8.38.

Insbesondere gilt diese für die versteckten Unterzüge. Diese bringen für das Tragverhalten einer Decke fast nichts.

Weil Unterzüge im Vergleich mit einer Platte relativ weich sind, ist es auch nicht so entscheidend, wie man nun den Unterzug modelliert:

- Platte und Balken als Falwerk (auch Schalenmodell genannt)
- Platte als Falwerk, Unterzug als exzentrischer Balken oder Platte
- Platte als Platte und Unterzug als exzentrischen Balken (mit Normalkraft)
- Platte als Platte und Unterzug mit Schwereachse in der Plattenmittelebene

Die Ankopplung im Sinne der finiten Elemente bedeutet, dass die Bewegungen des Balkens und die Bewegungen der Platte in den Knoten synchronisiert werden. Es ist also eine *punktweise geometrische* (= gleiche Verformungen in den Knoten) und *energetische* Kopplung (= gleiche Arbeiten der Schnittkräfte in der Schnittfuge von Balken und Platte).

Je nachdem, ob man diese Ausmitte e berücksichtigt oder nicht, spricht man von einem *zentrisch* oder einem *exzentrisch* angeschlossenen Balken. Die Modelle unterscheiden sich dann bezüglich der Art und Weise wie die Normalkräfte aus dieser Exzentrizität in die Rechnung eingeführt werden.

Durch die Kopplung der Elemente entstehen eine ganze Reihe von Inkompatibilitäten bzw. Fehlern. Wir erinnern daran, dass das Schnittprinzip bei der FE-Kopplung *unterschiedlicher* Bauteile nicht mehr gilt, s. [8]. Nur die *virtuellen Arbeiten* der Schnittkräfte sind noch gleich. Dazu kommt noch, dass Balken und Platte sich unterschiedlich durchbiegen, denn die Biegelinie w des Balkens wird in der Regel nicht mit der Biegefläche $w(x, y)$ der Platte in der Balkenachse übereinstimmen. Oft hat man eine Reissner-Mindlin-Platte mit Schubverformungen, die an einen Balken ohne diese angekoppelt werden. Jeder Gedanke an eine reale Einleitung der Balkenkräfte in das Plattensystem führt in die Irre, hier kann man nur in energetisch gleichwertigen Knotenkräften denken.

Wir haben in [8] die verschiedenen Varianten ausführlich diskutiert und wollen es daher an dieser Stelle bei diesem Hinweis belassen.

8.1.25 Mängel in der Konstruktion

Wenn es zu 'merkwürdigen Ergebnissen' kommt, dann muss der Fehler nicht immer beim Programm liegen. Es kann auch an der Konstruktion liegen. Zwei Beispiele sollen dies veranschaulichen.

Ungewollte Einspannung in einer Platte

Zur Einführung betrachten wir die Einflussfunktion für die Querkraft eines Durchlaufträgers in der Mitte des zweiten Feldes, s. Abbildung 8.39. Je näher die beiden Innenlager zueinander rücken, $h \rightarrow 0$, desto weiter wölbt sich die Einflussfunktion in den Nachbarfeldern nach unten und nach oben, weil durch den immer gleich bleibenden Versatz von $\Delta w = 1$ im mittleren Feld, die Tangenten an die Biegelinie sich immer steiler aufstellen. Das bedeutet: Wenn nur das erste Feld belastet ist, dann geht die Querkraft bei schrumpfenden Abstand der Innenlager gegen Unendlich! Anschaulich ist es so, dass das mittlere,

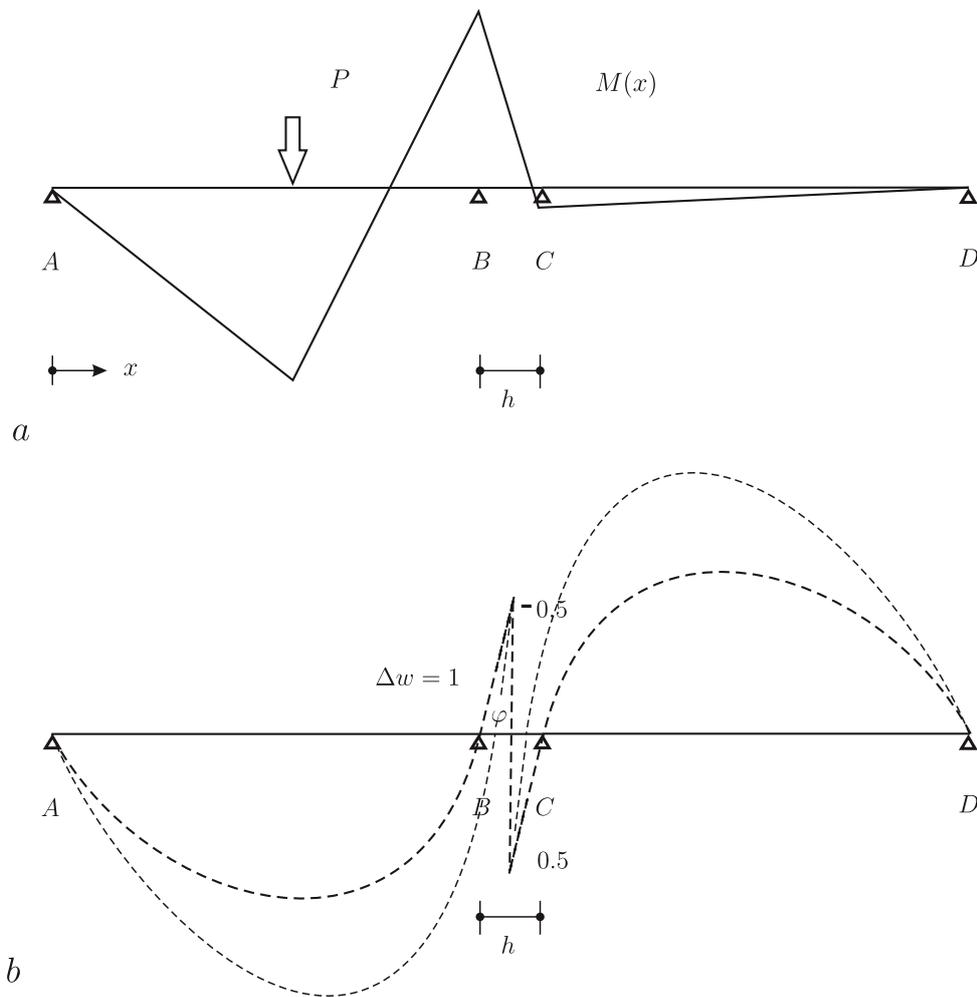


Abbildung 8.39: Einflussfunktion für die Querkraft in der Mitte des zweiten Feldes. Die Einflussfunktion schlägt in den Nachbarfeldern umso stärker aus je kleiner der Abstand h der Innenlager ist. Bei einem Abstand $h = 0$ wölbt sie sich bis auf $\pm\infty$

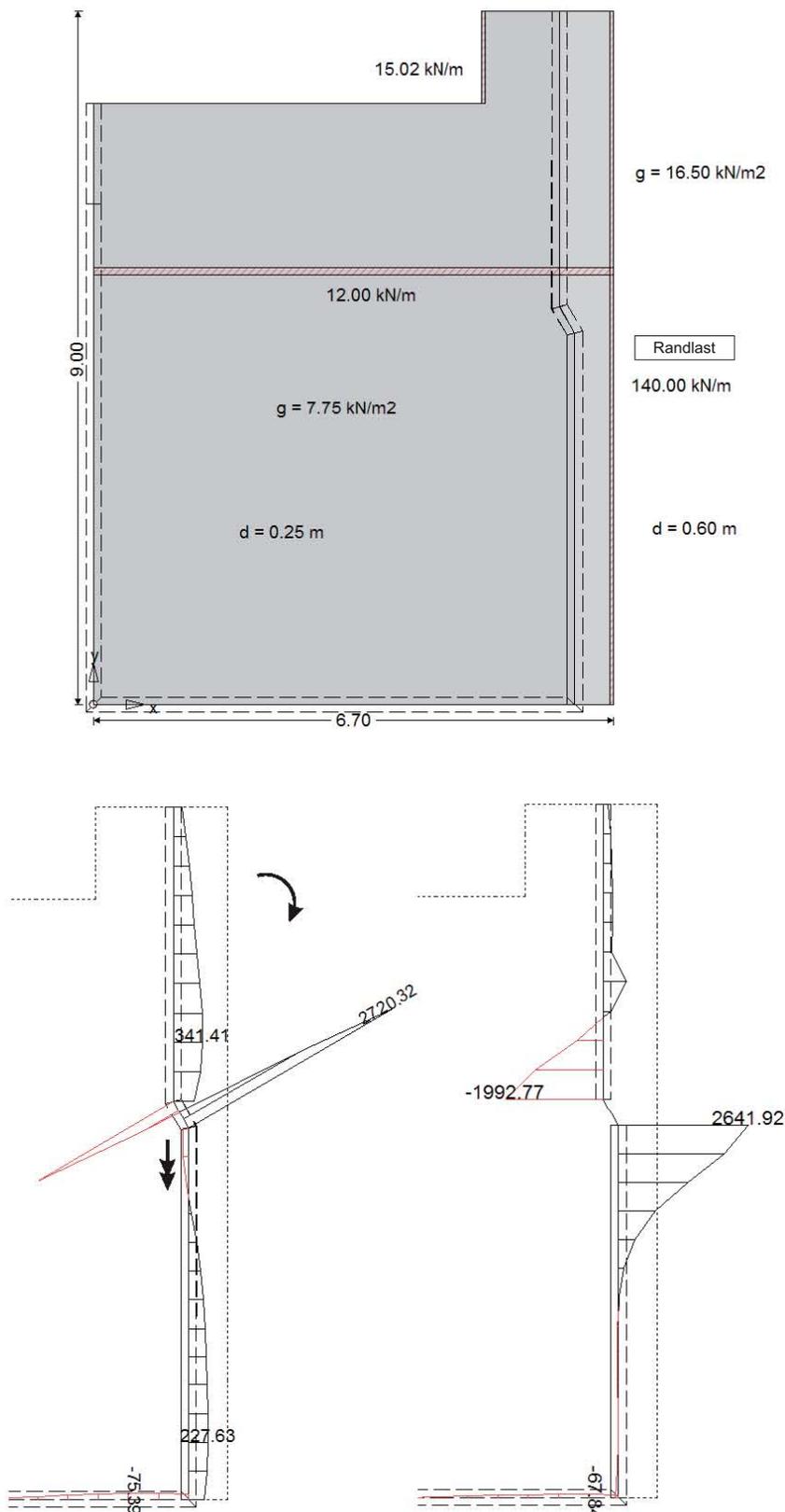


Abbildung 8.40: Die Randlast biegt die Platte über die leicht gegeneinander versetzten Innenwände. Die Innenwände bauen ein Torsionsmoment auf, dass die Platte stabilisiert. Aber aufgrund des kurzen Hebelarms werden die Lagerkräfte sehr groß. **a)** Platte und Belastung **b)** Lagerkräfte in den Wänden **c)** Lagerkräfte bei unterbrochenen Innenwänden

extrem kurze Feld wie eine Volleinspannung wirkt und das Einspannmoment von zwei gegengleichen Kräften aufgebracht werden muss, die den Abstand $h = 0$ haben.

Genau diese ungewollte Einspannung hat der Architekt durch einen Versatz der Innenwände erzeugt, s. Abbildung 8.40. Durch Randlasten wird die Platte über die zueinander versetzten Innenwände gebogen und dabei entsteht ein Biegemoment, das an den Enden der Innenwände zu steil ansteigenden Lagerkräften führt, die von der Platte nicht mehr aufgenommen werden können. Der Fehler liegt hier also in der Konstruktion.

Knicke in der Einspannung

Auf den ersten Blick harmlose, kleine Knicke im Verlauf eines Lagers, kleine Abweichungen von der 'Ideallinie', können das Tragverhalten einer Platte entscheidend verändern. Von daher ist es wichtig darauf zu achten, dass die Wände und Lager 'in der Flucht' stehen.

Ein bemerkenswertes Beispiel dafür ist die Platte in Abbildung 8.41, die den Boden eines Wasserauslasses bildet. Um die Krümmung des Randes nachzubilden, musste der Tragwerksplaner den Rand mit einem Polygonzug nachbilden. Dabei hat er das Ende des Randabschnitts Nr. 2 um ein kleines Maß zu viel nach rechts verzogen. Dadurch kam es zu einem kleinen zusätzlichen Knick zwischen Randabschnitt 1 und 2 mit fatalen Folgen für die Einspannmomente, s. Abbildung 8.41 b. Offensichtlich werden die Einspannmomente am Knick singulär. Das sieht man auch sehr schön, wenn man die Einflussfunktion für das Einspannmoment kurz oberhalb der Ecke, Abbildung 8.42 a, und kurz unterhalb der Ecke, Abbildung 8.42 b, betrachtet. Hier findet bei kürzestem Abstand ein Vorzeichenwechsel in der Einflussfunktion statt!

Das Gegenmittel ist, den zu groß geratenen Knick zu korrigieren. Dazu war es nur nötig einen Knoten um 1 cm zu verschieben! Berechnet man jetzt die Einflussfunktionen für die oben genannten Biegemomente, dann ist von dem Vorzeichenwechsel nichts mehr zu sehen und die FE-Ergebnisse sind in Ordnung.

8.1.26 Gleichgewicht

In vielen Büchern über finite Elemente findet man Sätze wie

- *Das globale Gleichgewicht ist erfüllt.*
- *Das Gleichgewicht im Element ist nicht erfüllt.*
- *Das Gleichgewicht an den Elementrändern ist nicht erfüllt.*
- *Das Gleichgewicht an den Knoten ist erfüllt. (?)*

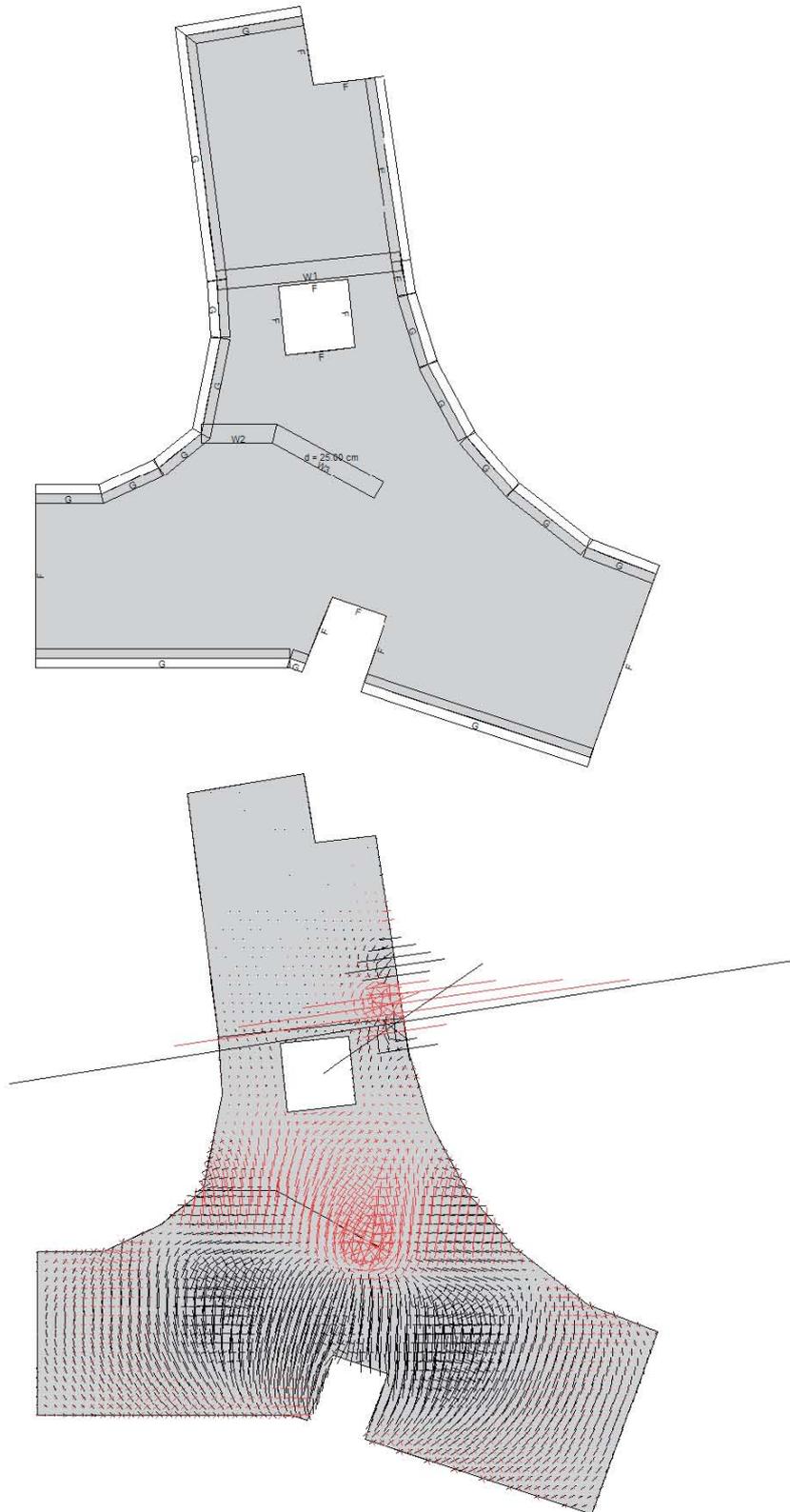


Abbildung 8.41: Wasserauslass und Hauptmomente

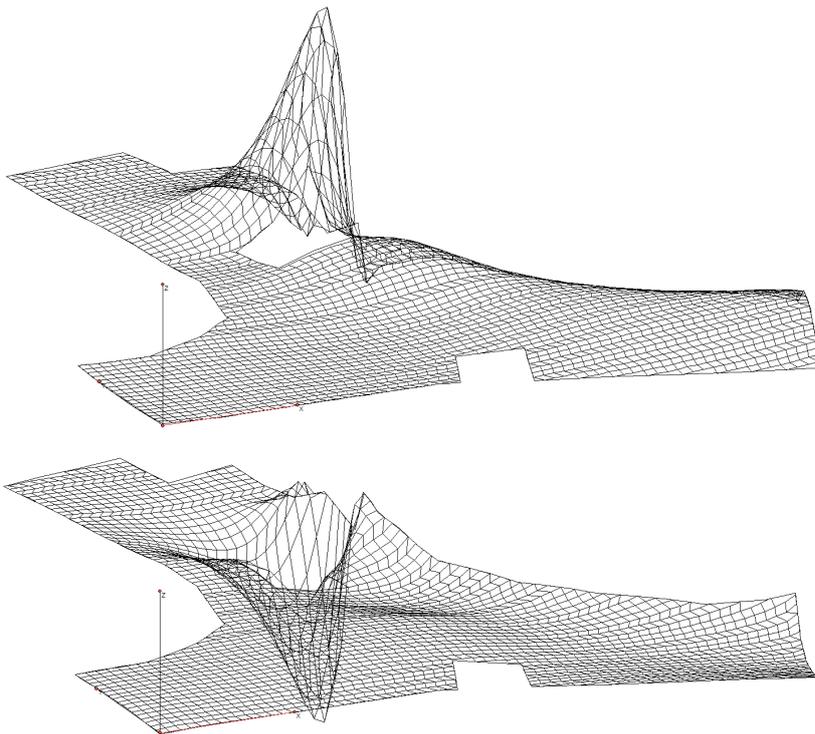


Abbildung 8.42: Einflussfunktion für das Einspannmoment oberhalb und unterhalb des Knicks in der Wand

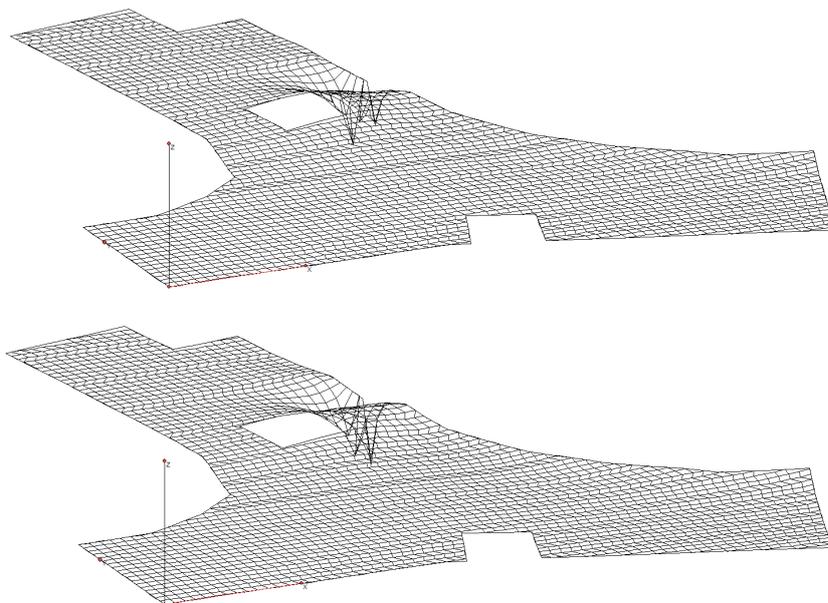


Abbildung 8.43: Einflussfunktion für das Einspannmoment oberhalb und unterhalb des begradigten Knicks in der Wand

Diese Sätze stärken nicht das Vertrauen des Anwenders in die Methode der finiten Elemente, aber sie verlieren doch viel von ihrer Dramatik, wenn man sich in Erinnerung ruft, dass die Methode der finiten Elemente im gewissen Sinn ein Ersatzlastverfahren ist. Die Schnittkräfte, die ein FE-Programm ausgibt, gehören zum äquivalenten Lastfall p_h , und daher ist es (aus Sicht der FEM) ganz natürlich, dass nichts passt, wenn man über Kreuz vergleicht: Die Schnittkräfte eines Lastfalls A sind in der Regel nie im Gleichgewicht mit den Lasten eines Lastfalls B.

Ein FE-Programm begeht nur *einen* Fehler, den ihm ein Prüfenieur anlasten könnte, und den begeht es gleich zu Anfang: Es ersetzt den Originallastfall durch einen äquivalenten Lastfall. Alles andere aber, was danach kommt, ist klassische Baustatik im Sinne des Regelwerkes. Das FE-Programm löst den äquivalenten Lastfall *exakt*. Daher ist das ganze Tragwerk und jedes Teilsystem im Gleichgewicht – mit den Lasten des äquivalenten Lastfalls, [8].

Eine der elementarsten Proben bei einer FE-Berechnung ist es, die Lagerkräfte mit der eingegebenen Belastungen zu vergleichen. Wenn nun aber das FE-Programm doch einen anderen Lastfall löst, warum stimmen dann die Lagerkräfte überein? Die Lagerkräfte stimmen nicht punktweise über, sondern nur die Summe V stimmt überein. Das liegt daran, dass die Resultierende des Ersatzlastfalls p_h nach Lage, Richtung und Größe mit der Resultierenden des Originallastfalls übereinstimmt. Dies muss übrigens auch schon auf dem größten Netz gelten. Von daher ist diese Kontrolle zwar unbedingt notwendig, aber sie sagt nichts über die Qualität einer FE-Berechnung aus.

Eher verdient der folgende Punkt Erwähnung, nämlich die Tatsache, dass die Lasten aus dem Eigengewicht oder anderen Vollasten bei Platten und Scheiben nie zu 100 % in eine FE-Berechnung eingehen.

Dadurch, dass die Belastung in äquivalente Knotenkräfte umgerechnet wird, wandert ein Teil des randnahen Eigengewichts direkt als Knotenkräfte in die Lagerknoten, führt also nicht zu Schnittkräften. Man darf daher theoretisch den Schubspannungsnachweis nicht mit den rechnerischen Querkraften in Elementmitte führen, sondern muss theoretisch die Knotenkräfte am Rand in Lagerkräfte umrechnen und den Schubnachweis mit diesen Querkraften führen.

Es sei bei dieser Gelegenheit auch noch einmal deutlich darauf hingewiesen, dass das FE-Gleichungssystem

$$\mathbf{K} \mathbf{u} = \mathbf{f} \tag{8.8}$$

nicht das Gleichgewicht der Kräfte an den Knoten formuliert. Hier werden nicht Kräfte gleichgesetzt, sondern Arbeiten! Der FE-Lastfall p_h wird so eingestellt, dass er bei jeder virtuellen Verrückung der Knoten dieselbe Arbeit leistet wie der Originallastfall p . Das ist die Bedeutung dieser Gleichungen.

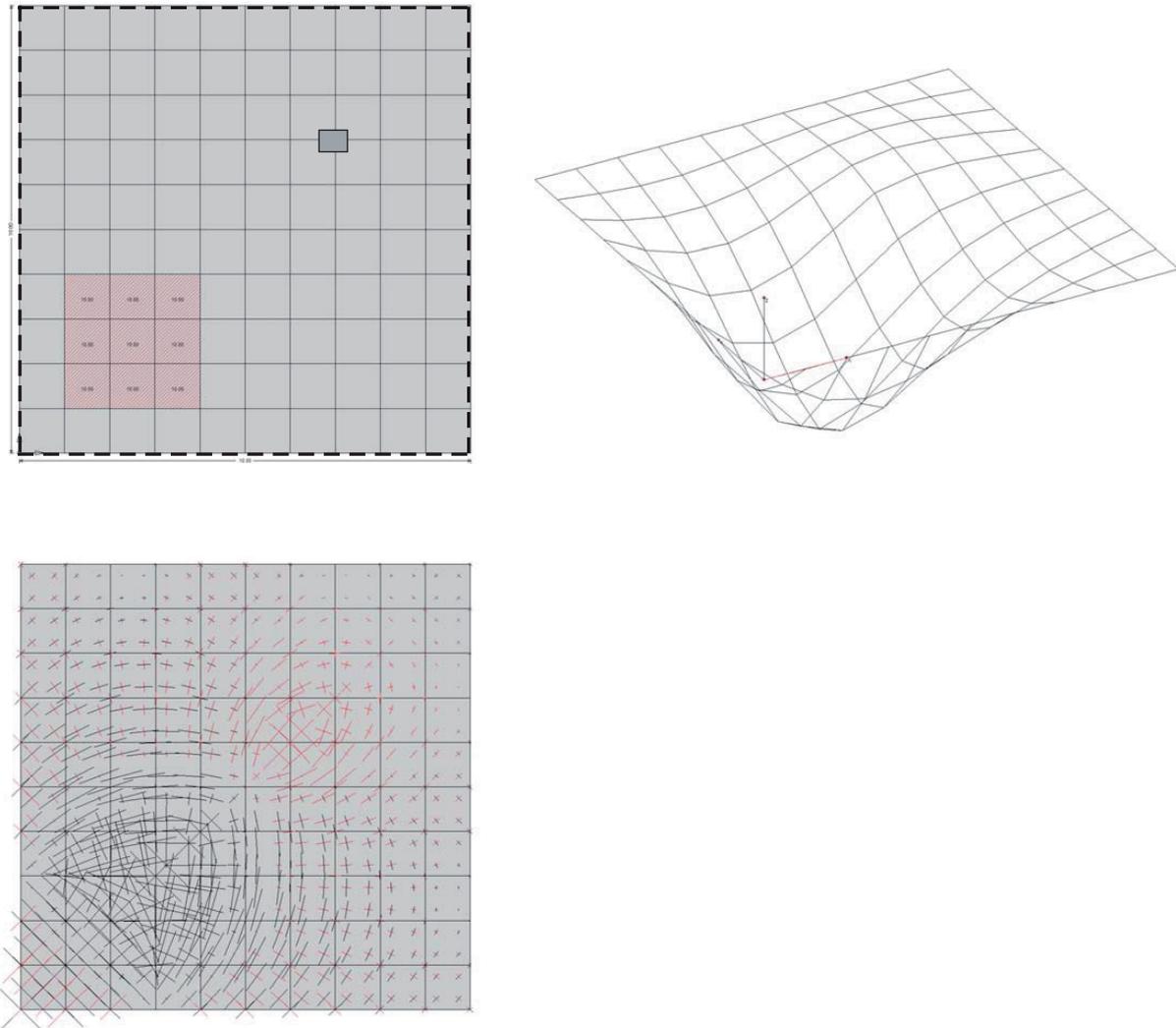


Abbildung 8.44: Berechnung einer gelenkig gelagerten Platte mit Innenstütze mit finiten Elementen

-0.04	-0.11	-0.17	-0.19	-0.10	0.12	0.13	-0.04	-0.10	-0.04
-0.10	-0.29	-0.44	-0.55	-0.41	0.40	0.44	-0.27	-0.29	-0.10
-0.15	-0.39	-0.50	-0.61	-1.13	0.71	0.74	-0.98	-0.27	-0.04
-0.15	-0.41	-0.36	0.14	0.75	-2.10	-2.17	0.74	0.44	0.13
-0.03	-0.32	-0.25	0.34	1.20	-1.79	-2.10	0.71	0.40	0.12
0.60	0.27	0.63	0.18	0.15	1.20	0.75	-1.13	-0.41	-0.10
0.50	2.64	2.87	2.26	0.18	0.34	0.14	-0.61	-0.55	-0.19
1.05	3.30	4.03	2.87	0.63	-0.25	-0.36	-0.50	-0.44	-0.17
0.60	2.96	3.30	2.64	0.27	-0.32	-0.41	-0.39	-0.29	-0.11
0.62	0.60	1.05	0.50	0.60	-0.03	-0.15	-0.15	-0.10	-0.04

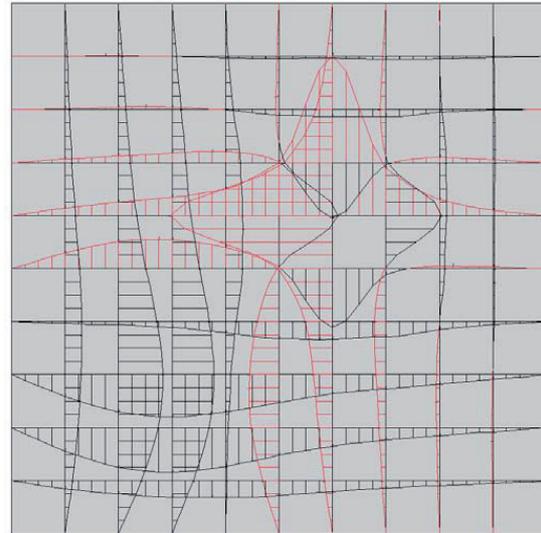
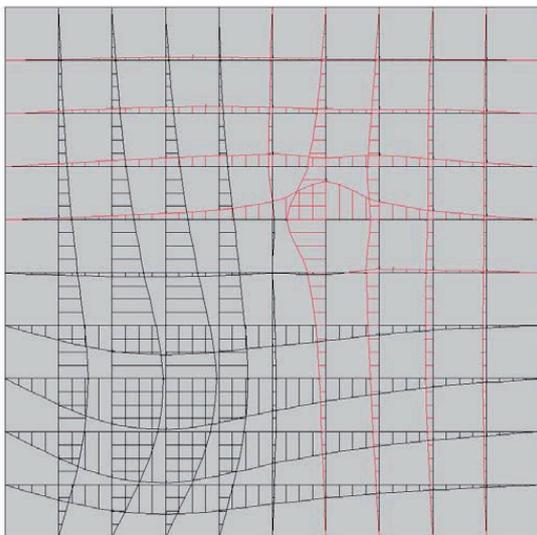


Abbildung 8.45: Der FE-Lastfall **a)** Elementlasten **b)** Linienlasten längs den Elementkanten und **c)** Linienmomente längs den Kanten

8.1.27 Die Konsequenzen für die Statik

Zum Schluss kommen wir noch einmal auf den zentralen Satz zurück:

- Der Tragwerksplaner, der ein FE-Programm benutzt, bemisst das Tragwerk für den FE-Lastfall p_h .

Und nicht, so muss man ergänzen, für den Originallastfall. In keiner Statik taucht dieser FE-Lastfall p_h auf. Soll man also jetzt zur Pflicht machen, dass bei jeder FE-Berechnung der FE-Lastfall p_h dokumentiert wird?

Wir zögern an dieser Stelle, denn man muss auch die Gefahren sehen, die in einem direkten Vergleich der beiden Lastfälle, des Originallastfalls p und des gerechneten Lastfalls p_h lauern. Wenn man sich einmal die Mühe gemacht, und die beiden Lastfälle miteinander vergleicht, dann ist man erschrocken, wie wenig die beiden Lastfälle miteinander zu tun haben, s. Abbildung 8.44 und 8.45.

Eigentlich sind nur neun Elemente der Platte mit 10 kN/m^2 belastet. Das FE-Programm rechnet dagegen überall mit Flächenlasten, die jedoch in ihrer Größe variieren und deutlicher kleiner sind als die 10 kN/m^2 . Zusätzlich wirken aber noch längs den Elementkanten Linienkräfte und Linienmomente. Also doch ein andere Verteilung von Lasten, als die, die eigentlich zu berechnen war. Wenn man jedoch auf die Hauptmomente schaut, siehe Abbildung 8.44 c, und nicht wüsste, wo diese Hauptmomente eigentlich herkommen, dann würde man sagen: 'Ja, das passt'. Das sind annähernd die Hauptmomente, die zu der Originalbelastung in Abbildung 8.44 a gehören.

Offensichtlich, so müssen wir schließen, kann man dasselbe Ziel auf verschiedenen Wegen erreichen. Und davon profitieren die finiten Elemente. Scheinbar ganz unterschiedliche Lasten führen zu demselben Tragbild.

Wir wollen hier an die Bemerkungen anknüpfen, die wir in [8] zu diesem Thema gemacht haben:

'... wenn wir als Tragwerksplaner mehr Zutrauen zu den finiten Elementen gewinnen wollen, dann müssen wir uns mit diesem Punkt intensiver auseinandersetzen. Dies ist ein Problem der *Statik* und erst in zweiter Linie ein Problem der numerischen Mathematik.

Was heißt *nah* und *fern* in der Statik? Welche Unschärfe können wir uns in der Statik erlauben und welche nicht?³

Was wir – etwa bei einer Plattenberechnung – sehen und vergleichen können sind die Lasten, das p und das p_h , also – wir vereinfachen etwas – die vierten Ableitungen der

³Man lese den Aufsatz von Bürg und Schneider [2] über die Bemessung einer einfachen Garagendecke durch 32 verschiedene Ingenieure!

Biegefläche. Die Schnittmomente aber sind die zweiten Ableitungen, also das zweifach unbestimmte Integral der Belastung

$$m = \int \int p \, d\Omega \, d\Omega, \quad m_h = \int \int p_h \, d\Omega \, d\Omega.$$

Bei der Integration werden die Oszillationen in den Lasten geglättet, und so kommt es, dass die Schnittmomente der FE-Lösung relativ gut den exakten Momenten folgen. Das ist der mathematische Hintergrund. Integration ist ein Glättungsprozess, und kein Prüfingenieur kann aus der Differenz der Lasten Aussagen über die Differenz der Schnittmomente machen.

Wenn im Dachgeschoß, in der vierten Etage, die Wände 20 cm aus der Flucht stehen, wer will dann sagen, wie groß die Abweichung im zweiten Geschoß ist? Den Abstand im Dachgeschoß können wir messen. Die Abweichung im zweiten Geschoß nicht. Über sie können wir nur spekulieren. Das ist das Problem.' [Ende Zitat]

Nun ist es aber natürlich nicht so, dass das FE-Programm den Originallastfall durch einen willkürlich gewählten Lastfall ersetzt, sondern der FE-Lastfall p_h ist eng auf den Originallastfall abgestimmt; Er ist wackeläquivalent zu dem Originallastfall. Bei jeder durch die Knotenverschiebungen darstellbaren virtuellen Verrückung des FE-Tragwerkes sind die virtuellen Arbeiten in den beiden Lastfällen gleich groß. Die beiden Lastfälle sind also schon aufeinander abgestimmt. Nur sieht man das nicht auf dem Bildschirm.

Unser Auge misst die Fläche zwischen der Originalbelastung und FE-Belastung, es hält sozusagen die Differenz $|p - p_h|$ gegen die Eins

$$\int_0^l |p - p_h| \cdot 1 \, dx.$$

Es misst die Resultierende R der absolut genommenen Fehlerkräfte, oder, was wegen $R \times 1 = R$, dasselbe ist: Es schätzt die Arbeit ab, die die Beträge der Fehlerkräfte auf der virtuellen Verrückung $\delta w = 1$ leisten.

Das FE-Programm hält dagegen die Fehlerkräfte gegen *alle* Einheitsverformungen der Knoten und versucht all diese virtuellen äußeren Arbeiten zu Null zu machen

$$\delta A_a = \int_0^l (p - p_h) \varphi_i \, dx = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Beim Blick auf die Fehlerkräfte $p - p_h$ muss man also mitdenken. Es wäre sicherlich zu naiv, die Fehlerkräfte *prima facie* zu nehmen, sich darauf zu versteifen, dass das Lastbild p_h der FE-Lösung möglichst 'gut' aussieht, denn das Auge operiert nur mit einer virtuellen Verrückung, $\varphi = 1$, ein FE-Programm dagegen mit 10, 100 oder 1000 Einheitsverformungen φ_i , und man muss einem FE-Programm zu gute halten, dass es mitdenkt, dass es versucht den Ersatzlastfall p_h so optimal einzustellen, dass der Fehler in der Energie –

also das Fehlerquadrat der Schnittkräfte – möglichst klein wird.

Soll man also den FE-Lastfall p_h gar nicht zeigen, weil das den Nicht-Fachmann nur verwirren würde? Wir meinen nicht. Erstens ist es so, dass die adaptiven Verfahren sich genau an diesem Lastfall p_h orientieren, also das Netz dort verfeinern, wo die Differenz $p - p_h$ groß ist, und dass man zum zweiten als Tragwerksplaner durch die Darstellung des Lastfalls p_h auf die *hot spots*, auf die Punkte wo es 'klemmt' hingewiesen wird.

Und vielleicht hätte die Darstellung des FE-Lastfall p_h das Gute, dass der naive Dogmatismus vieler Ingenieure einer etwas aufgeklärteren, lockeren Sicht der Dinge weichen würde. Der Gewinn an Bandbreite würde alle Mal den scheinbaren Verlust wettmachen. Es ist höchste Zeit, dass die praktische Baustatik im 21. Jahrhundert ankommt. Mit dem Knotenkraft-Modell der finiten Elemente, siehe das Eingangsbeispiel und das dazugehörige Ingenieurmodell in Abbildung 8.1 c, lässt sich die Zukunft nicht gewinnen. Das ist zu kurz gesprungen. Die Baustatik hat besseres verdient.

Literaturverzeichnis

- [1] Barth C, Rustler W (2010) Finite Elemente in der Baustatik Praxis, Bauwerk Verlag Berlin
- [2] Bürg, M., J. Schneider, Variability in Professional Design, Strct. Engineering Intern. 1994, 247-250
- [3] Enseleit J (1999) Strukturmechanische Analyse des Entstehens von Bauwerken, Werner Verlag Düsseldorf
- [4] Gensichen V (2010) “Die Qualitätssicherung von EDV-Programmen und die Suche nach der Realität”, Der Prüflingenieur Oktober 2010 (ISSN 1430-9084)
- [5] Grätsch T, Hartmann F, Katz C, “Einflussfunktionen und finite Elemente”, Bauingenieur, 78, (2003)
- [6] Grätsch T, Hartmann F (2004) “Duality and finite elements”, Finite Elements in Analysis and Design, 40: 1005–1020
- [7] Graf W, Vassilev T (2006) Einführung in computerorientierte Methoden der Baustatik, Ernst & Sohn Berlin
- [8] Hartmann F, Katz C (2002) Statik mit finiten Elementen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [9] Hartmann F, Katz C (2007) Structural Analysis with Finite Elements, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage
- [10] Kindmann R, Kraus M (2007) Finite-Element-Methoden im Stahlbau, Ernst & Sohn Berlin
- [11] Morris A, (2008) A Practical Guide to Reliable Finite Element Modelling, John Wiley & Sons Inc. Oxford
- [12] Rombach G (2006) Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau, Ernst & Sohn Berlin, 2. Auflage
- [13] Sopoht M, Sopoht G (2008) Sensitivitätsanalyse an einem Brückenbauwerk in semi-integraler Bauweise, Diplomarbeit Universität Kassel
- [14] Takunov B (2010) Sensitivitätsanalyse mittels Einflussfunktionen, Masterarbeit Universität Kassel
- [15] Werkle H (2007) Finite Elemente in der Baustatik, Vieweg Verlag Wiesbaden 3. Auflage

9 Sensitivitätsanalyse von Tragwerken

9.1 Einleitung

Vor 60 Jahren wurden zum ersten Mal finiten Elemente zur Analyse von Tragstrukturen eingesetzt. Verließ die Entwicklung am Anfang zunächst langsam, so hat die stetig zunehmende Leistungsfähigkeit der Computer und der Software und die Tatsache, dass man plötzlich Tragwerke berechnen konnte, die zuvor keiner echten Analyse zugänglich waren, der Methode zu einem Siegeslauf durch die Ingenieurbüros verholfen.

Aber mit dem Erfolg kam auch die Kritik. Es wurde deutlich, dass das Wissen der Ingenieure über die Methode nicht mit ihrem Erfolg Schritt hielt. Prüfeningenieure klagten und klagten darüber, dass die Methode oft ohne Sinn und Verstand von den Ingenieuren eingesetzt wird, dass eine kritische Evaluierung der Berechnungsergebnisse oft fehlt und das Wissen über die Grenzen der Methode bei den Aufstellern sehr rudimentär sind.

Gleichzeitig hat der Umfang der zu führenden statischen Nachweise und der Aufwand, den man für diese Nachweise führen muss, in den letzten Jahren immer mehr zugenommen. Die Überlagerungsvorschriften z.B. sind inzwischen so kompliziert geworden, dass ein Programm für die Ermittlung der maximalen Schnittkräfte ein Vielfaches an der Zeit braucht, die es zur Analyse der Lastfälle braucht. Und der Aufsteller kann kaum noch nachvollziehen, aus welcher Lastfallkombination nun die Extremwerte kommen, die das Programm ausdrückt und welche Kombinationsbeiwerte in den maßgebenden Werten stecken.

Diesem Phänomen überlagert sich ein weiterer Effekt: Früher wurden Standsicherheitsnachweise so geführt, dass man ein Tragwerk in einzelne, überschaubare Tragglieder unterteilte, und diese dann getrennt betrachtete. Dies hatte den Vorteil, dass die Statik relativ leicht kontrollierbar war und gut überschaubar. Heute dagegen werden Standsicherheitsnachweise zunehmend am Gesamtmodell geführt und die dabei anfallenden großen Datenmengen erhöhen die Intransparenz weiter.

So sprach ein Aufsteller in einem Statik-Seminar von ‚Blindflug‘ beim Nachweis einer kleinen Überführung aus Spannbeton, weil er nicht nachvollziehen konnte, wie das Programm auf die Extremwerte gekommen war, und ein anderer Aufsteller, der einen ganzen Straßenblock als eine Struktur analysierte, gestand offen, dass er nicht mehr wusste ‚wo die Kräfte hinliefen‘. Die Situation wird dadurch verschärft, dass eigentlich unverzichtbare Kontrollen seitens der Aufsteller oft aus Zeitdruck unterbleiben.

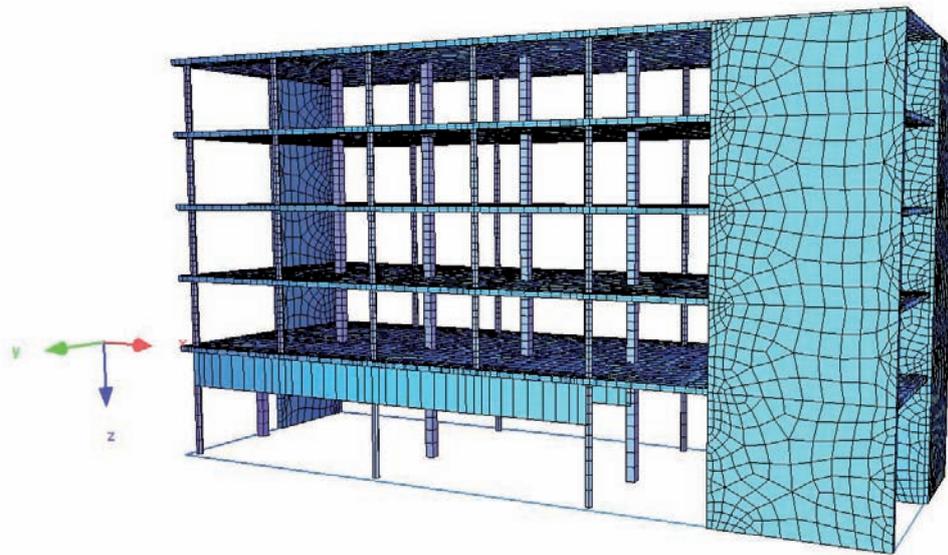


Abbildung 9.1: Bürogebäude

Die zunehmende Leistungsfähigkeit der FE-Software hat zu einer paradoxen Situation in der Statik geführt: Wir sind heute in der Lage selbst komplexeste Bauwerke mit modernen Statikprogrammen zu analysieren, aber gleichzeitig führt diese immer mehr überhandnehmende Abhängigkeit vom Computer zu immer mehr Intransparenz. Die Tendenz zur 3-D Statik, die Tendenz ganze Tragwerke 'en bloc' in einem Computermodell zu analysieren, macht es für den Prüfenieur immer schwieriger Statiken zu kontrollieren.

Gerade die jungen Ingenieure vertrauen dem Computer grenzenlos und verzichten oft auf die elementarsten Prüfungen der Ergebnisse, weil sie nicht mehr die Nähe zu dem Tragwerk haben, die der entwerfende Ingenieur vor 30 Jahren noch hatte.

Aber auch der Tragwerksplaner, der mit 2-D-Modellen arbeitet, steht vor ähnlichen Fragen, wenn im Erdgeschoss eine Wand verrückt wird, und er abschätzen muss, welche Konsequenzen das für die oberen Geschosse hat. Dann muss er ein Gefühl für das Tragwerk haben, muss abschätzen können, wie die Kräfte laufen, ob die Änderung für das Tragverhalten unwesentlich ist oder ob die Statik ganz neu aufgestellt werden muss. Er muss in der Lage sein, die wesentlichen Tragwirkungen zu verstehen und die Interaktion zwischen den unterschiedlichen Teilen des Tragwerkes zu erfassen um daraus Vorteile in Bezug auf Sicherheit, Architektur und Wirtschaftlichkeit zu ziehen.

Wenn die Lage aber so ist, wenn die Transparenz in der Statik trotz oder wegen des Computers verloren geht, warum sollen wir dann nicht den Computer auch dazu benutzen, sich selbst und den Tragwerksentwurf zu kontrollieren bzw. dem jungen Tragwerksplaner im Sinne eines *senior engineers* zur Seite zu stehen. Die Eingabe bei den ersten Rechner geschah mittels Lochkarten und das Ergebnis waren lange Listen, lange Zahlenkolonnen.

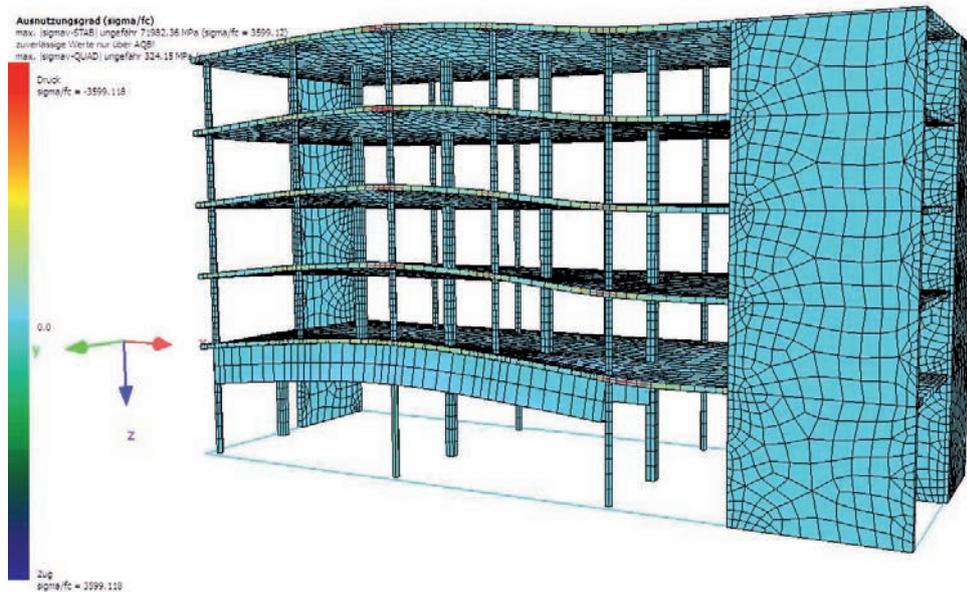


Abbildung 9.2: Bürogebäude: Einflussfunktion für eine der Stützen im Erdgeschoss

Dann kam die Visualisierung, die anschauliche und farbige Darstellung der Ergebnisse. Dann hat man entdeckt, dass sich FE-Programm selbst korrigieren können, die adaptive Verfeinerung der Netze wurde implementiert (wenn auch nicht im Bauwesen).

Nun müssen wir den nächsten Schritt tun: Wir müssen die Computer selbst dazu benutzen, das Tragwerksmodell zu validieren und auf Schwachstellen im Entwurf hinzuweisen. Das wäre sozusagen der Übergang von einer rechnerischen Statik zu einer qualitativen Statik. Uns scheint dieser Schritt zwingend und logisch zu sein.

Das Werkzeug hierzu ist die Sensitivitätsanalyse von Tragwerken mittels Computern.

Die Sensitivitätsanalyse hilft die folgenden Fragen zu beantworten:

- Was ist der maßgebende Lastpfad in einem Tragwerk?
- Wie sieht der kritische Pfad (Kollaps) aus?
- Wie ändern sich die Schnittkräfte, wenn sich die Steifigkeiten ändern?
- Wie empfindlich reagiert das Tragwerk auf Risse im Beton?
- Wie hängen die Spannungen an den höchst beanspruchten Stellen von den Steifigkeiten der benachbarten Bauteile ab?
- Welche Auswirkungen hat der Ausfall einer Stütze auf das Tragwerk?
- Wie groß ist der Einfluss der Bodensteifigkeit auf den Überbau?

Das Werkzeug zur Beantwortung dieser Fragen sind Einflussfunktionen.

9.1.1 Validierung, Verifizierung und Einflussfunktionen

Die Genauigkeit der numerischen Ergebnisse hängt von zwei Faktoren ab, dem so genannten Diskretisierungsfehler, und dem Modellfehler. Die Diskretisierungsfehler ist der Fehler, den man macht, wenn man, vereinfacht gesagt, das Netz zu grob wählt, und der Modellfehler, ist der Fehler den man begeht, wenn man die Steifigkeiten falsch ansetzt.

Zur Kontrolle des Diskretisierungsfehler gibt es heute eine ganze Reihe von Techniken, Stichwort: adaptive Methoden, so dass dieses Thema an dieser Stelle nicht weiter erläutert werden muss. Anders ist es mit dem Modellfehler. Nicht richtig erfasste Steifigkeiten, falsch modellierte Bauteile, falsch angesetzte Lagerbedingungen, et cetera., verfälschen Ergebnisse auch dann, wenn theoretisch die zu Grunde liegenden Gleichungen exakt gelöst werden.

In engem Zusammenhang mit dem Modellfehler, steht die Frage nach der Robustheit einer Konstruktion. Ist das Tragwerk in der Lage, kleinere Schwächungen oder Variationen in den Steifigkeiten aufzufangen, oder kommt es zum Kollaps? Werden solche ‚wackligen‘ Konstruktionen mit finiten Elementen berechnet, dann kann eine ungünstige Kombination von Diskretisierungsfehler und Modellfehler eine Sicherheit vortäuschen, die gar nicht vorhanden ist.

Es ist daher an der Zeit, zu einer qualitativen Statik zu kommen, die Schwachpunkte einer Konstruktion mit dem Rechner zu erkennen, die Sensitivität eines Tragwerks in Zahlen zu fassen, und damit dem Aufsteller mitteilen zu können wie wichtig die einzelnen Bauteile für die Standsicherheit eines Tragwerks sind, wie mögliche Kollapsszenarien aussehen, und welche Details eines Tragwerkes der besonderen Aufmerksamkeit des Ausstellers bedürfen.

Natürlich sieht der erfahrene Tragwerksplaner die Schwachpunkte einer Konstruktion auch so, er braucht dazu keinen Computer. Aber es geht darum, die rein numerische Ebene zu verlassen und zu einer Stufe der Computerstatik zu kommen bei der der Rechner auch etwas über die Qualität der Ergebnisse mitteilen kann und der Rechner in die Lage versetzt wird, die Schwachstellen einer Konstruktion zu erkennen und den Aufsteller darauf aufmerksam zu machen.

Die bisherigen Forschungsansätze, die sich mit der Robustheit von Tragwerken beschäftigen, beruhen meist auf stochastischen Verfahren und führen dann meist über eine Variation der Koeffizienten der Steifigkeitsmatrix zu numerisch sehr aufwändigen Untersuchungen (‚Monte-Carlo Verfahren‘). Das wesentliche Werkzeug bei der hier vorgeschlagenen Sensitivitätsanalyse eines Tragwerks sind dagegen die Einflussfunktionen. Beide Fehlerarten, der Diskretisierungsfehler und der Modellfehler, lassen sich auf Fehler in den Einflussfunktionen zurückführen.

Wenn die Stützenkopferschiebung einer Stütze nicht mit den gemessenen Werten übereinstimmt, dann liegt, wenn vorausgesetzt wird, dass die Differenzialgleichung exakt gelöst worden ist, ein Fehler im Modell vor: Die Einflussfunktion für die Stützenkopferschiebung, die

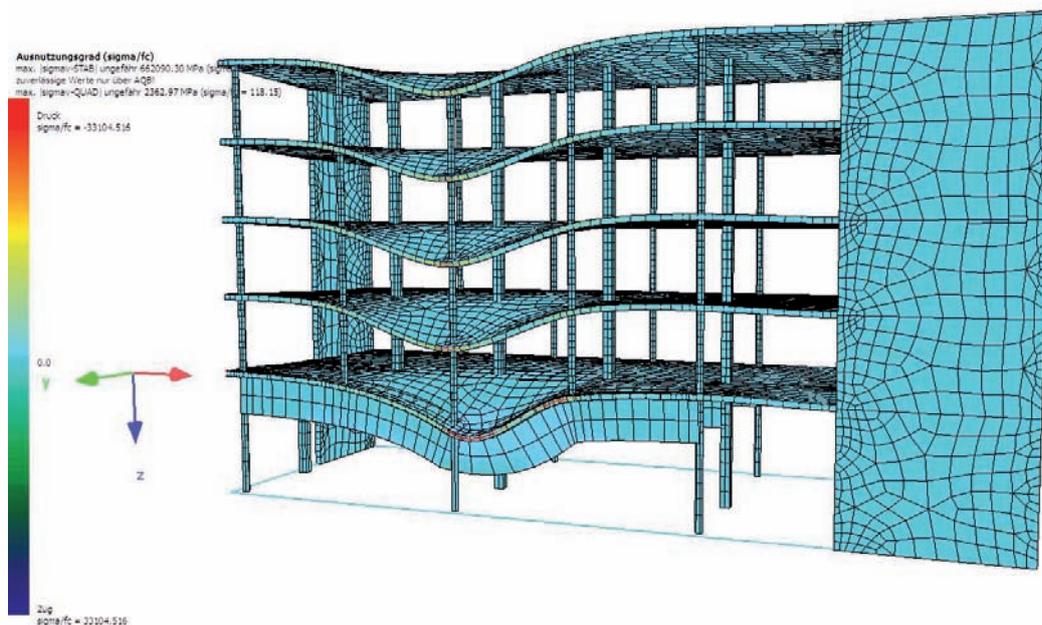


Abbildung 9.3: Bürogebäude: Einflussfunktion für das Moment im Unterzug

das Modell benutzt, stimmt nicht mit der Einflussfunktion am realen Tragwerk überein.

Wenn umgekehrt, das Modell sehr gut mit dem realen Tragwerk übereinstimmt, wie das in der Stabstatik in der Regel der Fall ist, aber trotzdem die Ergebnisse vom Verhalten des realen Tragwerks abweichen, dann liegt in der Regel ein Diskretisierungsfehler vor, dann hat das FE-Programm die Einflussfunktionen nicht richtig umgesetzt.

Es ist wenig bekannt, dass ein FE-Programm jede Schnittgröße und jeder Verformung mit der zugehörigen Einflussfunktionen berechnet. Dass die Ergebnisse am Ende trotzdem falsch sind, liegt daran, dass ein FE-Programm die exakten Einflussfunktionen mit den finiten Elementen nicht exakt reproduzieren kann. Dazu ist ein FE-Netz zu ungenau, sprich es ist nicht gelenkig genug um die Ausschläge nachzuvollziehen, die zu einer Einflussfunktionen gehören.

Denn alle Einflussfunktionen sind Verformungsfiguren. Die eingeschränkte Kinematik eines FE-Netzes ist daher der Grund warum FE-Ergebnisse falsch sind. Die Sensitivitäten in einem Tragwerk, sowohl auf der statischen wie auch auf der numerischen Seite, finden also ihren Ausdruck in den Einflussfunktionen. Wie rasch klingen die Einflussfunktionen ab, welche Bauteile werden von ihnen erfasst, wie ändern sich die Einflussfunktionen, wenn die Steifigkeiten in gewissen Traggliedern sich ändern, et cetera.? Dies alles ist charakteristisch für ein Tragwerk.

Über das Studium der Einflussfunktionen kann man zu qualitativen Aussagen über die Robustheit eines Tragwerks kommen, denn die Robustheit des Tragwerks ist eine Eigen-

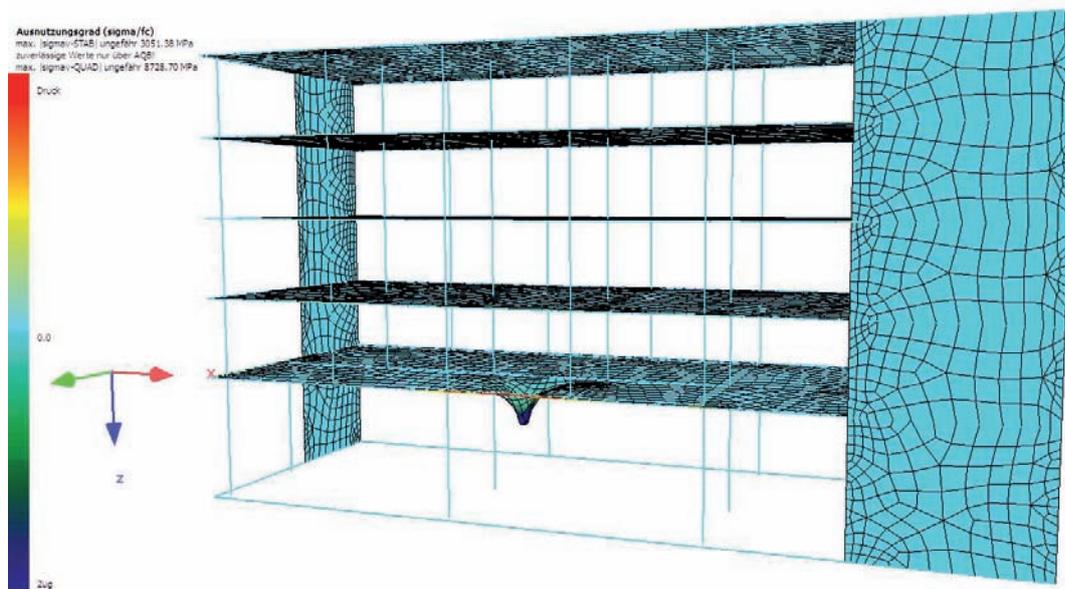


Abbildung 9.4: Bürogebäude: Einflussfunktion für das Moment m_{xx} in einem Punkt der unteren Decke

schaft, die durch das globale elastische Verhalten (versteckte Kinematiken sowie energiereiche Elemente, durch die Großteil der Kräfte fließen) sowie das postkritische lokale Verhalten (spröde oder duktil) definiert ist.

Wenn auch der Übergang von der 2-D Statik zur 3-D Statik in vollem Gange ist, so werden doch heute vielfach noch Tragwerke in Einzelteile zerlegt, die dann als 2-D Strukturen berechnet werden. Wenn es dann zur Änderungen im Tragentwurf kommt, so stellt sich regelmäßig die Frage, muss nun alles neu berechnet werden, oder kann man davon ausgehen dass die Störungen, die durch die Änderungen im Tragentwurf verursacht wurden, lokal begrenzt sind? Das sind Fragen, die direkt durch das Studium der Einflussfunktionen beantwortet werden können.

In den letzten Jahren sind im Fachgebiet Baustatik der Universität Kassel die grundlegenden Beziehungen zwischen finiten Elementen und Einflussfunktionen untersucht worden. Dies betrifft die Fragen, wie ein FE-Programm die Einflussfunktionen umsetzt, welche Einflussfunktionen gut und welche Einflussfunktionen schlecht approximiert werden können, die Fragen nach der numerischen Genauigkeit der Einflussfunktionen und wie implizit FE-Programme von der Genauigkeit der numerischen Einflussfunktionen abhängen.

Insbesondere ist es gelungen, die Einflussfunktionen so zu formulieren, dass die Auswirkungen von lokalen Änderungen in den Steifigkeiten auf den Rest des Tragwerks durch eine rein lokale Analyse des gestörten Bereiches berechnet werden können.

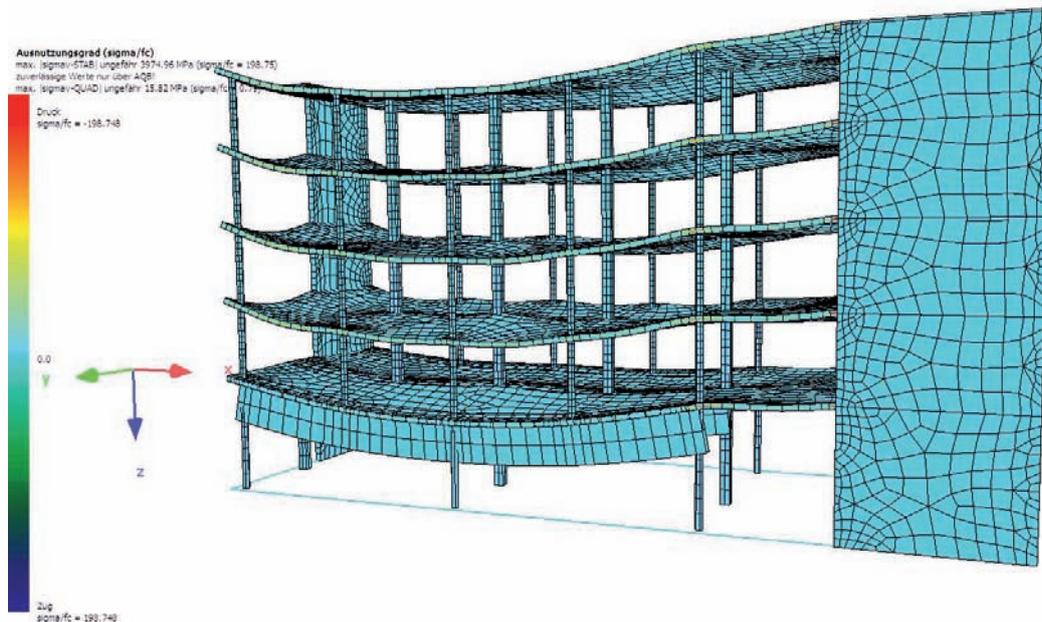


Abbildung 9.5: Bürogebäude: Verformung des Gebäudes nach der ersten Schwächung (Großer Steifigkeitsverlust einer Stütze im Untergeschoss)

9.1.2 Wie wird die Sensitivitätsanalyse angewandt?

Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, den Tragwerksentwurf zu beurteilen, zu einer Aussage über die Standsicherheit eines Tragwerks zu kommen und mögliche Schwachstellen aufzudecken.

Wie man mittels Einflussfunktionen zu qualitativen Aussagen über die Standfestigkeit einer Konstruktion kommen kann, möge die nachstehende Skizze einer Kollapsberechnung illustrieren.

Frage: Gibt es einen Gleichgewichtszustand, in dem das progressiv geschwächte Tragwerk zur Ruhe kommt?

Verfahren:

1. Automatische Vorschlagsbestimmung von kritischen Elementen anhand von Energiebetrachtung sowie versteckten Kinematiken
2. Vervollständigung der Liste der kritischen Elemente anhand der vorliegenden Ausnutzungsgrade und Wichtigkeit
3. Auswahl eines Fehlers (Modellierung als Steifigkeitsabfall) für ein kritisches Element über einen 3D-Tragwerkviewer
4. Bildung der Einflussfunktion für ausgewählte Schwächung entlang des Lastabtrages

5. Überlagerung der Schnittgrößen aus der Einflussfunktion mit maßgebendem Lastfall für Original-Schnittgrößen für Berechnung der Änderungen der Ausnutzungsgrade der Elemente (Unterscheidung zwischen Widerständen, die postkritisches Verhalten zulassen oder sofort versagen)
6. Farbliche Darstellung des Lastabtrages, bei Änderungen der maßgebenden Schnittgrößen größer als 15
7. Überprüfung, bei welchen Elementen sofortiges Versagen vorliegt und Bestimmung von kinematischen Ketten
8. Einführung von mechanischen Freiheitsgraden an den Stellen (plastisches Verhalten), die mehr als 20
9. Kontrolle, ob Tragwerk oder Teile davon verschieblich sind
10. Für jedes Element mit postkritischem Bereich Bildung der Einflussfunktion entlang ihrer Lastabtrages wie unter 4 und weiter wie oben

Abbruchkriterien: Verschieblichkeit des gesamten oder von Teilen des Tragwerkes.

9.1.3 Implementierung der Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitätsanalyse von Tragwerken kann nur rechnergestützt geschehen. Dies verlangt, dass auf Seiten der Softwarehäuser die dazu notwendigen Algorithmen in den Programmen implementiert werden. Wie das im einzelnen zu geschehen hat, soll in einem zusätzlichen Dokument erläutert werden. Es ist geplant, dass im Anschluss an das Forschungsvorhaben die Softwarehäuser zu einem gemeinsamen Seminar eingeladen werden und dabei die Implementierung der Algorithmen erläutert wird.

In diesem Dokument kann es nur darum gehen, die grundlegende Technik zu erklären, zu erläutern wie man mit Einflussfunktionen die Sensitivität von Tragwerken kontrollieren kann.

9.1.4 Änderungen von Steifigkeiten

Steifigkeitsänderungen—auch nur in einem kleinen Teil eines Tragwerks—beeinflussen die Schnittkraftverteilung im ganzen Tragwerk, weil die Einflussfunktionen, gleich für welche Größe, sich sofort ändern, wenn der Beton in einem Riegel reißt oder ein Lager nachgibt, s. Bild 9.6. Sie beginnen sozusagen wegzudriften. Denn Einflussfunktionen sind ja Biegelinien, sie sind ja die Reaktionen des Tragwerks auf das Spreizen von Gelenken, und als solche unterliegen sie, wie natürlich, allen Steifigkeitsänderungen in einem Tragwerk. In Bild 9.6 ist die Einflussfunktion für die Querkraft in der Mitte des unteren linken Riegels dargestellt. Die gestrichelte Linie ist dieselbe Einflussfunktion, wenn in dem Riegel rechts davon die Steifigkeit um 50 % abfällt. (Rechnerisch dürften die Änderungen wesentlich

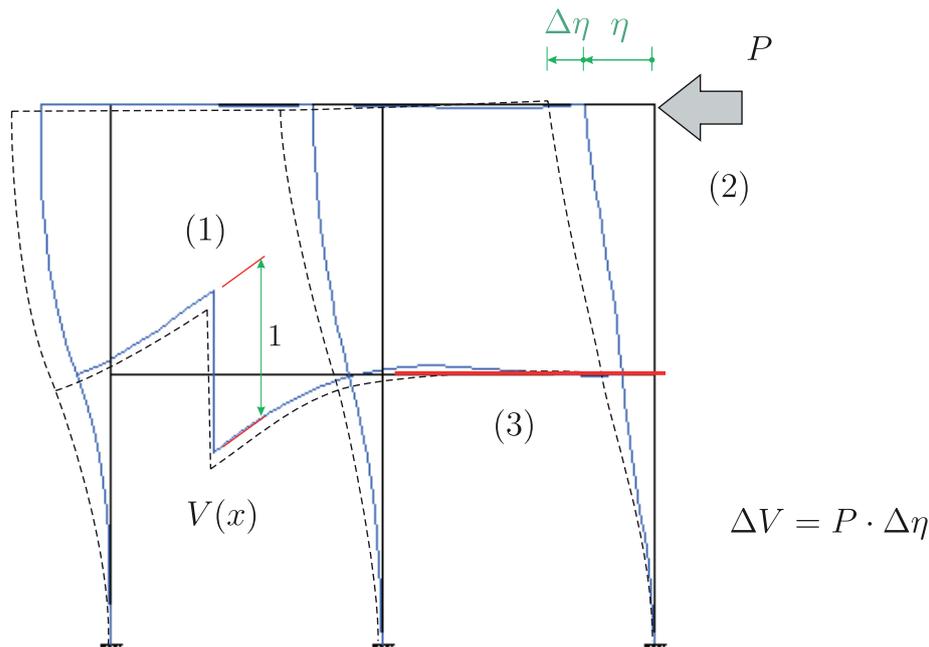


Abbildung 9.6: Die ganze Einflussfunktion ändert sich, wenn sich die Steifigkeit an einer Stelle ändert.

kleiner sein als hier dargestellt).

Vor dem Steifigkeitsverlust hat die Spreizung des Querkraftgelenkes zu einer horizontalen Verschiebung η des Fußpunktes der Wanderlast geführt. Somit betrug die Querkraft aus der Wanderlast

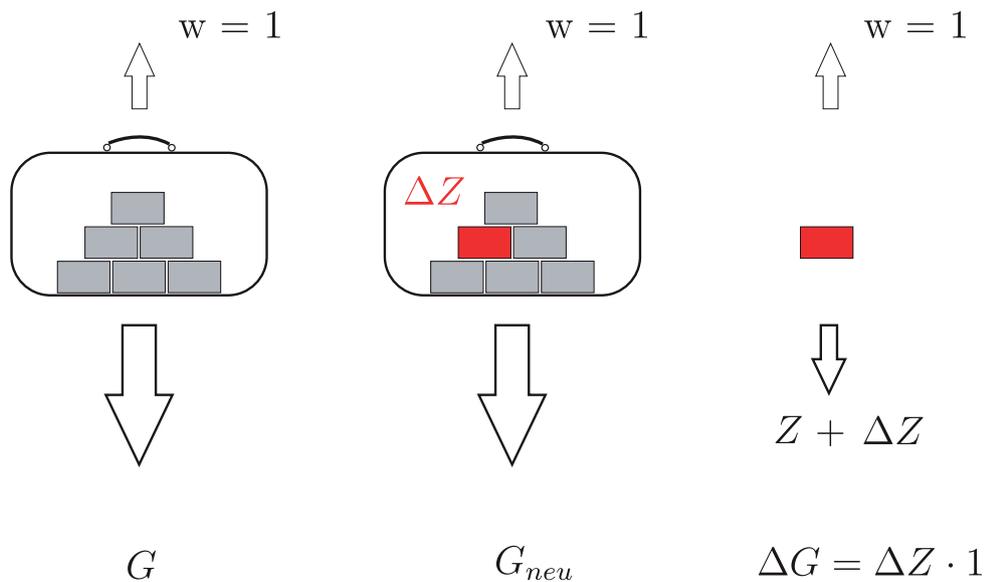
$$V = P \cdot \eta. \quad (9.1)$$

Aufgrund des Steifigkeitsverlust hat sich jedoch der Fußpunkt der Wanderlast noch um ein zusätzliches Maß $\Delta \eta$ nach links verschoben und somit beträgt die Querkraft jetzt

$$V + \Delta V = P \cdot (\eta + \Delta \eta). \quad (9.2)$$

Die Änderungen in den Einflussfunktionen signalisieren dem Betrachter also, wie sich die Schnittgrößen ändern, wenn sich die Steifigkeiten ändern. Die Konsequenzen aus Steifigkeitsänderungen kann man also ganz einfach sehen, wenn man die beiden Einflussfunktion, vorher und nachher, übereinander legt.

Was vor allem bei einem solchen direkten Vergleich sichtbar wird, ist, welche Teile eines Tragwerkes einen besonders großen Einfluss auf die relevante Größe haben. Steifigkeitsänderungen in diesen Bereichen, führen zu relativ großen Änderungen. So kann man



$$\Delta G = G_{neu} - G = \Delta Z$$

Abbildung 9.7: Wie wir das Gewicht eines Koffers messen.

Sensitivitätskarten erstellen.

Es sind zwei Fragestellungen, die hierbei von Interesse sind. Angenommen das größte Moment in einem Tragwerk trete über der Stütze A auf. Um die Tragreserven abzuschätzen, kann man nun fragen: Welche Steifigkeitsänderungen und an welchen Stellen in dem Tragwerk würden dazu führen, dass das Moment größer wird?

Die andere Frage lautet: Angenommen eine Wand oder eine Stütze in einem Tragwerk fällt aus, oder verliert dramatisch an Steifigkeit, welche Änderungen in den Schnittkräften würde das zur Folge haben?

Einmal, so kann man sich das zurecht legen, steht man fest in einem Punkt (über der Stütze A) und schaut nach Störungen aus, die den eigenen Standpunkt gefährden könnten oder, das ist nun die andere Situation, man ist selbst der 'Übeltäter' (die Stütze gibt nach) und man versucht den Punkt zu finden, in dem man den maximalen negativen Effekt erzielt.

Beide Fragen kann man mit der Technik, die wir im Folgenden skizzieren werden, beantworten.

9.1.5 Kurze Einführung

Um das Gewicht einer Koffers zu ermitteln, heben wir den Koffer kurz an. Die Einflussfunktion für das Koffergewicht G ist also, so können wir, etwas frei formuliert, sagen, eine vertikale Bewegung $w = 1$, s. Bild 9.7.

Angenommen in dem Koffer sind 10 Ziegelsteine und ein Ziegelstein ändert sein Gewicht um ein Maß ΔZ

$$Z \rightarrow Z + \Delta Z. \quad (9.3)$$

Wir können nun das geänderte Gewicht G_c ($c = \text{changed}$) des Koffers auf zwei Arten bestimmen. Wir können den ganzen Koffer noch einmal anheben, oder wir heben nur den Ziegelstein an, dessen Gewicht sich geändert hat, denn offenbar gilt

$$G_c - G = \Delta Z. \quad (9.4)$$

Das Heben des Ziegelsteins allein reicht, um das geänderte Gewicht zu finden. So gehen wir auch sinngemäß in der Statik vor.

Nehmen wir an bei einem Durchlaufträger ändere sich im dritten Feld, im Abschnitt $[x_a, x_b]$ die Steifigkeit, $EI \rightarrow EI + \Delta EI$. Ein negatives ΔEI entspräche einem Aufreißen des Betons. Welche Auswirkung hat diese Änderung auf die Durchbiegung in der Mitte des ersten Feldes?

Durchbiegungen berechnen wir mit Hilfe des Prinzips der virtuellen Kräfte. Wir bringen in der Mitte des ersten Feldes eine Einzelkraft $\bar{P} = 1$ an und überlagern das zugehörige Biegemoment \bar{M} mit dem Biegemoment M aus der Belastung

$$\delta = \int_0^l \frac{M \bar{M}}{EI} dx. \quad (9.5)$$

Wenn sich die Steifigkeit im dritten Feld ändert, dann ändert sich das Biegemoment $M \rightarrow M_c$ aus der Belastung und auch das Biegemoment $\bar{M} \rightarrow \bar{M}_c$ aus der Einzelkraft $\bar{P} = 1$ und so muss das Integral neu aufgestellt und neu berechnet werden

$$\delta_c = \int_0^l \frac{M_c \bar{M}_c}{EI_c} dx \quad (9.6)$$

d.h. wir müssen noch einmal über den ganzen Träger integrieren (den Koffer noch einmal anheben). Der untere Index c ($= \text{changed}$) steht hier und im folgenden für die geänderten Werte.

Jetzt kommt die 'Abkürzung'. Man kann zeigen, dass man die *Änderung* der Durchbiegung alleine durch Integration über das betroffene Feld, das Feld, in dem sich die Steifigkeit ändert, berechnen kann und zwar mit der Formel

$$\delta_c - \delta = \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_c \bar{M}}{EI} dx. \quad (9.7)$$

Hierbei ist M_c das Moment in dem dritten Feld *nach* der Änderung der Steifigkeit und \bar{M} ist das Moment in dem Feld aus der Einflussfunktion *vor* der Änderung. Das Integrationsintervall $[x_a, x_b]$ ist das dritte Feld des Trägers. In anderen Situationen könnte es aber auch nur ein Ausschnitt, 10 cm, 20 cm, aus einem Feld sein. Diese Formel entspricht dem Anheben des einzelnen Ziegelsteins.

Wie lässt sich (9.7) in Worte fassen? Zunächst bemerken wir, dass das Integral ein Energieintegral ist und das stimmt mit der Tatsache überein, dass eigentlich (fast) alle Werte in der Statik Energien sind. Jede Verschiebung, jede Spannung, jede Auflagerkraft ist eine Energie. Wenn man nämlich ein Auflager um eine Längeneinheit absenkt, dann leistet die Lagerkraft dabei eine Arbeit, es entsteht also Energie, und diese Arbeit ist gerade so groß wie die Arbeit, die die Belastung auf den Wegen leistet, die durch die Lagerabsenkung in das Tragwerk hineingetragen werden. So stellt sich die Lagerkraft ein.

Vielleicht kann man die Gleichung (9.7) daher so umschreiben: Man 'schickt' die Einflussfunktion für die Größe, deren Änderungen man studieren will, als virtuelle Verrückung durch das geschwächte Tragwerksteil und misst die Arbeit, die Energie, die dabei in dem geschwächten Tragwerksteil entsteht. Und diese Arbeit, mit der relativen Steifigkeitsänderung gewichtet, ist gleich der Änderung der betreffenden Größe.

Die Formel (9.7) ist exakt, aber sie hat den gravierenden Nachteil, dass man den Momentenverlauf M_c , das Moment aus der Last am modifizierten Tragwerk, kennen muss, um die Änderungen der Durchbiegung zu berechnen. Wenn man diesen Momentenverlauf hat, dann kennt man sicherlich auch die modifizierte Biegelinie, und dann braucht man diese Formel nicht mehr...

Aber wir wollen ja Voraussagen machen, ohne neu zu rechnen, ohne das modifizierte System aufzustellen¹.

Um dieses Problem zu umgehen, ersetzen wir in (9.7) das Moment M_c (Moment aus der Belastung am geschwächten System) durch das Moment M am ursprünglichen ungeschwächten System und wir erhalten so die Näherungsformel

$$\delta_c - \delta \simeq \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \bar{M}}{EI} dx. \quad (9.8)$$

¹Die Alternative wäre, einfach alles auszuprobieren, die Steifigkeiten feldweise zu variieren, das Tragwerk neu zu berechnen und zu schauen, welche Konsequenzen diese Variationen für das Tragwerk hätten ('Monte-Carlo-Methode')

Dies ist gleichbedeutend mit der Vernachlässigung des ersten Integrals in der Formel

$$\delta_c - \delta = \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{(M_c - M) \bar{M}}{EI} dx + \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \bar{M}}{EI} dx \quad (9.9)$$

also mit der Annahme, dass in dem geschwächten Bereich der Unterschied der beiden Momente vernachlässigbar ist oder, was auch der Fall sein könnte, die Abweichung $M_c - M$ orthogonal zu \bar{M} ist, die Überlagerung mit den δ_{ik} -Tafeln also Null ergibt.

Denn damit Änderungen einen Effekt haben, müssen sie in die richtige 'Richtung' zeigen. Wenn man einen Berg in der Ebene um 10 km nach rechts oder nach links verschiebt, dann wird der Berg nicht höher. Oder: Verstärkungen an der falschen Stelle in einem Tragwerk bringen nichts.

9.1.6 Anwendungsskizze—Frage 1

In Bild 9.8 ist ein Rahmen unter Windlast dargestellt. Die Aufmerksamkeit gilt hier dem Moment im Fußpunkt des Stiels im ersten Geschoss auf der rechten Seite des Gebäudes. Die Frage lautet: Welche Steifigkeitsänderungen haben den größten Einfluss auf das Moment?

Wenn sich in irgendeinem Teil $[x_a, x_b]$ des Rahmens die Biegesteifigkeit ändert, $EI \rightarrow EI + \Delta EI$, weil der Beton reißt, $\Delta EI < 0$, dann beträgt die Änderung des Fußpunktmomentes

$$M_c(x) - M(x) = \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_G M_c}{EI} dx. \quad (9.10)$$

Links stehen die beiden Momente im Fußpunkt x , nachher und vorher, $M_c(x)$ und $M(x)$. Die Momente M_G und M_c unter dem Integral sind Funktionen. Die Funktion M_G ist das Moment, das zu der Einflussfunktion für das Fußpunktmoment gehört (Einflussfunktion = Biegelinie \rightarrow hat ein Moment) und die Funktion M_c ist das Moment aus der Belastung.

Der Index c an M_c weist darauf hin, dass es der Momentenverlauf nach der Änderung der Steifigkeit ist. Das Bauteil gibt nach, die Steifigkeit ändert sich, und das Tragwerk findet eine neue Gleichgewichtslage. Dabei ändern sich in dem ganzen Tragwerk die Momente, aus M wird M_c .

Nun wollen wir ja nur eine Voraussage machen, d.h. das modifizierte Tragwerk soll ja nicht aufgestellt und berechnet werden, sondern am Originaltragwerk, am ungeschwächten Tragwerk, soll der möglicherweise negative Effekt einer Tragwerksschwächung abgeschätzt

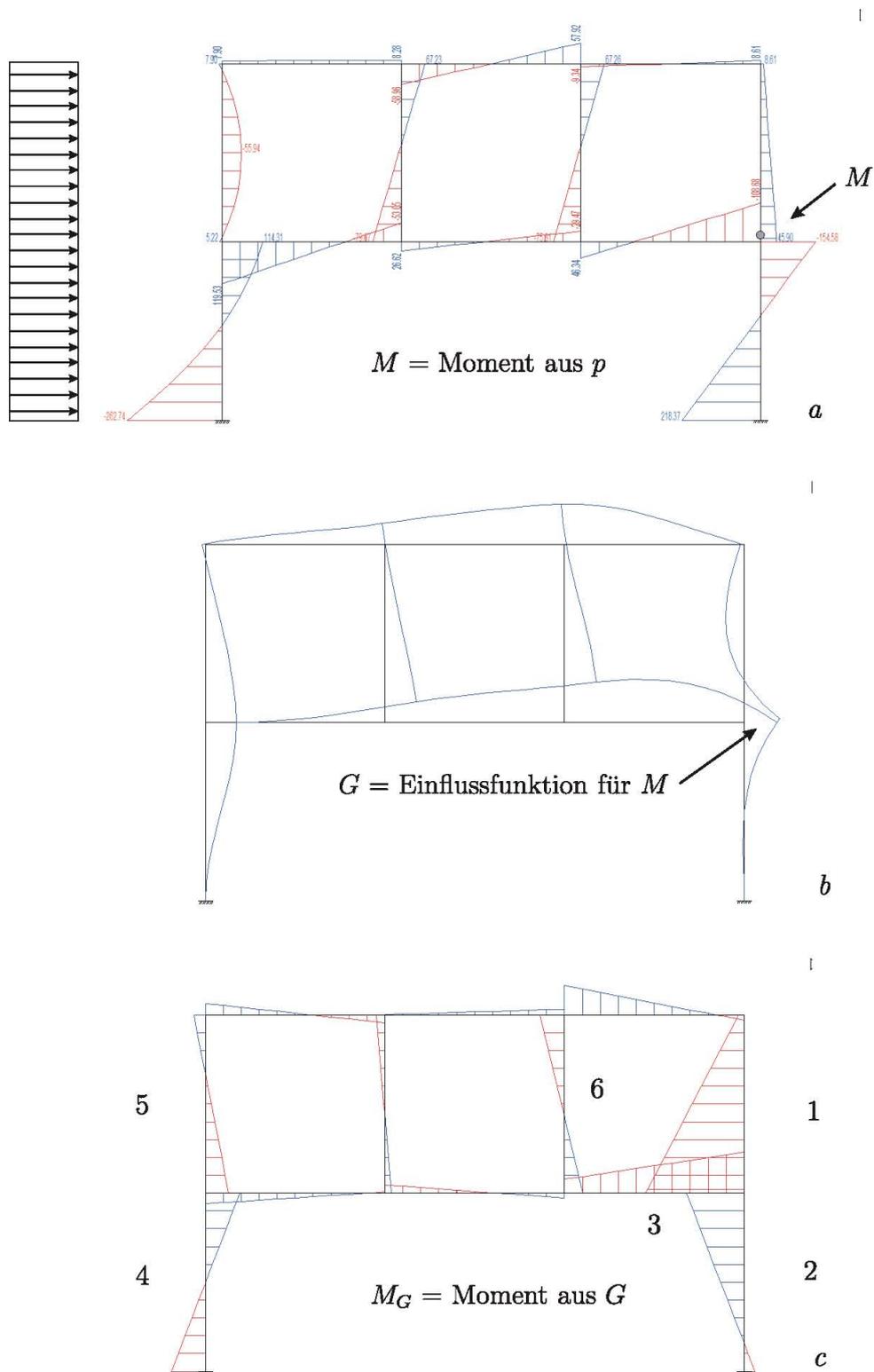


Abbildung 9.8: Windlast auf einen Rahmen, **a** Momente aus p , **b** Einflussfunktion für das Moment im Fusspunkt des rechten Stiels, **c** Momente aus der Einflussfunktion

werden. Wir kennen also M_c nicht und daher ersetzen wir M_c durch M , was auf die Vernachlässigung des ersten Integrals in der Formel

$$M_c - M = \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_G (M_c - M)}{EI} dx + \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_G M}{EI} dx \quad (9.11)$$

hinausläuft. Wir hoffen also, dass die Näherung

$$M_c - M \cong \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M_G M}{EI} dx \quad (9.12)$$

für baupraktische Belange hinreichend genau ist.

Wie arbeitet man mit dieser Formel? Man einigt sich zunächst auf den möglichen Steifigkeitsabfall ΔEI , also etwa -20% , -30% oder -40% von EI . Damit liegt der Quotient

$$\frac{\Delta EI}{EI} = -0.2 \dots -0.4 \quad (9.13)$$

vor dem Integral fest. Der Einfachheit halber wird man als die zu untersuchenden Intervalle $[x_a, x_b]$ die Riegel und Stiele selbst wählen, also annehmen, dass die Balken auf voller Länge gerissen sind. Dann gilt es den Balken zu finden, in dem das Integral (9.12) absolut genommen, den größten Wert hat. Ein Steifigkeitsabfall in diesem Balken bewirkt dann die größte Änderung des Moments im Fußpunkt des Stiels.

Man kann die Kontrolle optisch vornehmen, indem man den Momentenverlauf M und den Momentenverlauf M_G nebeneinander plottet. Die Balken, in denen beide Momente gleichzeitig groß sind, sind die Balken, bei denen ein Steifigkeitsverlust am kritischsten für das Moment ist.

Das Moment M aus dem maßgebenden Lastfall darf als bekannt vorausgesetzt werden. Um das Moment M_G zu berechnen, wird die Einflussfunktion für das Fußpunktmoment aufgestellt und der zugehörige Momentenverlauf berechnet. Die Einflussfunktion ist ja eine Biegelinie und daher gehört zu ihr natürlich auch ein Momentenverlauf. Das ist M_G .

Ändert sich in einem Stiel oder Riegel die Biegesteifigkeit, $EI \rightarrow EI + \Delta EI$, so ist die Änderung im Anschnittsmoment gleich

$$M_c - M = \frac{\Delta EI}{EI} \int_0^l \frac{M_G M}{EI} dx. \quad (9.14)$$

Die Bauteile, in denen *beide* Momente, M_G und M groß sind, und nicht orthogonal zueinander, sind die Bauteile mit dem größten Einfluss auf das Anschnittsmoment. Der Fall, dass die beiden Momente orthogonal zueinander sind, läge zum Beispiel vor wenn längs des Balkens M konstant wäre und M_G antimetrisch. Dann wäre das Integral unabhängig

von der Größe von ΔEI Null.

Ein Blick auf die Plots von M und M_G zeigt, dass die Reihenfolge der Wichtigkeit in etwa die folgende sein sollte: Stiel 1 und 2, Riegel 3 und dann die Stiel 4, 5 und 6. Wie natürlich sind es, aufgrund der seitlichem Windbelastung, vor allem die Stiele, deren Steifigkeiten die Höhe des Fußpunktmomentes beeinflussen.

9.1.7 Anwendungsskizze—Frage 2

Die zweite Frage zielt nach dem Einfluss von Steifigkeitsänderungen in einem Riegel oder einer Stütze auf den Rest des Tragwerkes. Welche Bereiche sind besonders betroffen und wo kann man die Effekte vernachlässigen?

Dabei tritt eine Schwierigkeit auf. Zu jeder Änderung, die wir untersuchen, also zu jeder Schnittgröße, die sich ändert und die einer Beobachtung wert ist, gehört eine eigene Einflussfunktion und somit muss man sehr, sehr viele Einflussfunktionen aufstellen, und sehr viele Integral

$$J_c - J = \frac{\Delta EI}{EI} \int_0^l \frac{M_G M_c}{EI} dx \quad (9.15)$$

auswerten, wenn man sicher sein will, dass man nichts übersehen hat.

Zwar ändert sich das Moment M aus dem maßgebenden Lastfall nicht, aber das Moment M_G ist für jeden Wert J ein anderes, weil zu jedem J eine andere Einflussfunktionen gehört und damit ein anderes Moment M_G (= Moment aus der Einflussfunktion).

Nehmen wir beispielhaft die Querkräfte V in den Zehntelpunkten x_i des ersten Felds eines Durchlaufträgers. Es soll untersucht werden, wie sich diese Werte ändern, wenn der Beton im dritten Feld reißt.

Für jeden einzelnen Querkraftwert $V(x_i)$ in einem der Zehntelpunkte müssen wir die Einflussfunktion aufstellen und das Moment M_G dieser Einflussfunktion mit dem Moment M aus der Belastung überlagern

$$V_c(x_i) - V(x_i) \simeq \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M M_G}{EI} dy. \quad (9.16)$$

Das ist sehr aufwendig. Zum Glück geht es auch anders.

Bevor wir das wie diskutieren, wie es anders geht, wollen wir diese Gleichung noch etwas ausführlicher schreiben, denn M_G ist eigentlich die Funktion

$$M_G(y) = M(G_V[x])(y). \quad (9.17)$$

Es ist das Moment im Integrationspunkt y , das zu der Einflussfunktion $G_V[x]$ für die Querkraft im Punkt x gehört. (In der eckigen Klammer $[x]$ steht der Aufpunkt). Ausführlicher ist (9.16) also identisch mit

$$V_c(x_i) - V(x_i) \simeq \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \cdot M(G_V[x])(y)}{EI} dy. \quad (9.18)$$

Nun kommt der Tausch: Man kann in der obigen Formel das Moment M_G durch die Funktion $V(G_M[y])(x)$

$$V_c(x_i) - V(x_i) \simeq \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \cdot V(G_M[y])(x)}{EI} dy \quad (9.19)$$

ersetzen. Die Funktion

$$V(G_M[y])(x_i) \quad (9.20)$$

(Funktion von y) ist die Querkraft im Zehntelpunkt x_i aus der Einflussfunktion $G_M[y]$ für das Biegemoment M im Integrationspunkt y .

Es gibt jetzt also zwei Einflussfunktionen

- $G_V[x_i]$ für die Querkraft in dem Punkt x_i
- $G_M[y]$ für das Moment im Punkt y

Die zweite Einflussfunktionen ist sozusagen die Einflussfunktion für die Energie in dem Träger, denn wir messen die Verzerrungsenergie in einem Balken an Hand der Biegemomente.

Diese zweite Einflussfunktion $G_M[y]$ für das Moment M im Integrationspunkt y entsteht bekanntlich dadurch, dass man im Aufpunkt y einen Knick von Eins erzeugt. Dadurch verformt sich der Durchlaufträger und so entstehen Querkräfte $V(G_M[y])(x)$ in jedem Punkt x des Trägers. Der Ausdruck in (9.20) ist der Wert dieser Querkraft im Zehntelpunkt x_i

$$\text{was gemessen wird} \quad \rightarrow \quad V(\underbrace{G_M[y]}_{\text{Einflussfunktion}})(x_i) \quad \leftarrow \quad \text{wo} \quad (9.21)$$

Der Übergang von (9.16) zu (9.19) basiert auf der Identität

$$M(G_V[x_i])(y) = V(G_M[y])(x_i), \quad (9.22)$$

die wiederum auf dem Satz von Betti beruht. Diese Gleichung besagt, dass die gegenseitigen Wirkungen der beiden Einflussfunktionen gleich groß sind. Das Moment im Punkt y , das zu der Einflussfunktion für die Querkraft im Punkte x_i gehört, ist genauso groß wie

die Querkraft im Punkt x_i , die zu der Einflussfunktion für das Moment im Punkt y gehört.

Wir können das obige Ergebnis so zusammenfassen: Ändert sich in einem Intervall $[x_a, x_b]$ eines Durchlaufträgers die Biegesteifigkeit, $EI \rightarrow EI + \Delta EI$, und sei $J(x)$ irgendein beliebiger Wert in einem beliebigen Punkt x des Durchlaufträgers, dann gilt für die Änderung dieses Wertes

$$J_c(x) - J(x) \simeq \frac{\Delta EI}{EI} \int_{x_a}^{x_b} \frac{M \cdot J(G_M[y])(x)}{EI} dy. \quad (9.23)$$

Mit in diesem Integral können wir also alle Änderungen, $J(x) \rightarrow J_c(x)$, in dem Tragwerk erfassen. Hierbei steht, das sei noch einmal betont, J für eine Schnittkraft oder eine Verformung in einem beliebigen Punkt x des Trägers.

Es gibt aber noch ein Problem: Die Einflussfunktion für das Biegemoment, G_M , muss (theoretisch) für das Biegemoment in jedem Integrationspunkt y aufgestellt werden, weil sich ja der Integrand $J(G_M[y])(x)$ mit jedem Punkt y ändert. Die Einflussfunktion für das Moment am Anfang des Intervalls $[x_a, x_b]$ wird im Punkt x einen anderen Wert J haben, als die Einflussfunktion für das Moment am Ende des Intervalls.

Um dieses Problem zu umgehen, kann man das Integral durch eine Ein-Punkt oder Zwei-Punkt Quadratur annähern. Dann muss die Einflussfunktion G_M nur für das Moment in der Mitte bzw. in den beiden Endpunkten des Intervalls aufgestellt werden.

Wie findet man nun die Werte $J(x)$ ($= M, V, N$), die am meisten von einem Steifigkeitsabfall ΔEI betroffen sind? Angenommen man benutzt eine Ein-Punkt Quadratur, dann plottet man den Verlauf von $J(G_M[y])(x)$ über das Tragwerk, also das Moment, die Querkraft und die Normalkraft, die zu der Einflussfunktion für das Moment in der Mitte des Intervalls $[x_a, x_b]$ gehören. Dort, wo die Werte M, V und N aus der Einflussfunktion groß sind, dort sind die Schnittgrößen M, V und N des maßgebenden Lastfalls am meisten von dem Steifigkeitsabfall betroffen.

Diese Technik lässt sich sinngemäß auf alle Bauteile und alle Tragwerke anwenden. Sinngemäß, weil je nach dem Typ des Tragwerks die entscheidende Formel eine leicht andere Gestalt hat. Denn die Formel ist ja ein Energieintegral, misst eine Energie, eine innere Energie, und je nach Typ des Bauteils ist der Ausdruck für diese innere Energie ein anderer.

Hängt die innere Energie des Bauteils von der Normalkraft ab, wie bei einem Fachwerkstab, dann gilt sinngemäß

$$J_c(x) - J(x) \simeq \frac{\Delta EA}{EA} \int_{x_a}^{x_b} \frac{N \cdot J(G_N[y])(x)}{EA} dy. \quad (9.24)$$

Bei einer Scheibe lautet das entsprechende Integral

$$J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \simeq \frac{\Delta E}{E} \int_{\Omega_p} \sigma_{ij}(\mathbf{y}) \cdot J(G_{\varepsilon_{ij}}[\mathbf{y}])(\mathbf{x}) d\Omega_{\mathbf{y}}. \quad (9.25)$$

Der Teil der Scheibe Ω_p , über den hier integriert wird, ist ein Teilbereich der Scheibe, in dem sich der E-Modul ändert, $E \rightarrow E + \Delta E$. Das J steht für irgendeine interessierende Größe also zum Beispiel eine Verschiebung oder eine Spannung. Die $\sigma_{ij}(\mathbf{y})$ sind die Spannungen aus dem maßgebenden Lastfall im Integrationspunkt \mathbf{y} und die einzelne Funktion

$$G_{\varepsilon_{ij}} \quad (9.26)$$

ist die Einflussfunktionen für die Verzerrung ε_{ij} im Integrationspunkt $\mathbf{y} = (y_1, y_2)$. Weil es vier Verzerrungen gibt, $\varepsilon_{11}, \varepsilon_{12} = \varepsilon_{21}$ und ε_{22} , von denen zwei gleich sind, sind jetzt in jedem Integrationspunkt drei Einflussfunktionen aufzustellen. In der Regel wird man für jedes einzelne finite Element eine Ein-Punkt Quadratur wählen, so dass man für die drei Verzerrungen in der Mitte der betroffenen Elemente jeweils drei Einflussfunktionen aufstellen muss.

Sinngemäß dieselben Überlegungen gelten für eine Platte. Wenn bei einer Platte in einem Teilgebiet Ω_p der Beton reißt, dann ist davon die Plattensteifigkeit

$$K = \frac{E h^3}{12} \cdot \frac{1}{(1 - \nu^2)} \quad (9.27)$$

betroffen und das Maß für die Änderung einer Größe J (Durchbiegung, Moment, Querkraft, et cetera) ist das Energieintegral

$$J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \simeq \frac{\Delta K}{K} \int_{\Omega_p} \kappa_{ij}(\mathbf{y}) \cdot J(G_{m_{ij}}[\mathbf{y}])(\mathbf{x}) d\Omega_{\mathbf{y}}, \quad (9.28)$$

wobei jetzt

$$G_{m_{ij}}[\mathbf{y}] \quad (9.29)$$

die Einflussfunktion für das Moment m_{ij} im Integrationspunkt \mathbf{y} ist.

In beiden Gleichungen, (9.25) und (9.28), haben wir von der Einsteinschen Summationskonvention Gebrauch gemacht, d.h. über doppelt vorkommende Indizes ist zu summieren.

9.1.8 Rechentechnische Umsetzung

Anders als bei Stabtragwerken verlangt die rechentechnische Umsetzung dieser Formeln nun doch einige Überlegungen. Beginnen wir zunächst mit dem Verständnis dieser Formeln und nehmen an, dass in einem einzigen Element von der Größe Ω_e der Beton reißt. Dann kann man das Integral sicherlich durch eine Ein-Punkt Quadraturformel ersetzen und erhält so den Ausdruck

$$J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \simeq \frac{\Delta K}{K} \cdot \left(\kappa_{ij}(\mathbf{y}_c) \cdot J(G_{m_{ij}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) \right) \cdot \Omega_e. \quad (9.30)$$

Die κ_{ij} sind die Krümmungen in Elementmitte aus dem maßgebenden Lastfall und die vier Zahlen $J(G_{m_{ij}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x})$ sind die Werte J der vier Einflussfunktionen für die Momente in Elementmitte und zwar die Werte J in dem Punkt \mathbf{x} , der auf der linken Seite der Gleichung steht.

Bei der Auswertung werden die 2×4 Werte κ_{ij} und $J(G_{m_{ij}})$ paarweise multipliziert und addiert und ergeben so gesamthaft die Änderung der Größe J in dem Punkt \mathbf{x}

$$\begin{aligned} J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) &\simeq \frac{\Delta K}{K} \cdot \left(\kappa_{ij}(\mathbf{y}_c) \cdot J(G_{m_{ij}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) \right) \cdot \Omega_e \\ &= \frac{\Delta K}{K} \cdot \left(\kappa_{11}(\mathbf{y}_c) \cdot J(G_{m_{11}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) + 2 \cdot \kappa_{12}(\mathbf{y}_c) \cdot J(G_{m_{12}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) \right. \\ &\quad \left. + \kappa_{22}(\mathbf{y}_c) \cdot J(G_{m_{22}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) \right) \Omega_e. \end{aligned} \quad (9.31)$$

In der linearen Statik darf man superponieren, d.h. wir bilden erst die Summe

$$\Sigma = \kappa_{11}(\mathbf{y}_c) \cdot G_{m_{11}}[\mathbf{y}_c] + 2 \cdot \kappa_{12}(\mathbf{y}_c) \cdot G_{m_{12}}[\mathbf{y}_c] + \kappa_{22}(\mathbf{y}_c) \cdot G_{m_{22}}[\mathbf{y}_c] \quad (9.32)$$

und wenden dann auf die Summe die Funktion J an

$$J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \simeq \frac{\Delta K}{K} \cdot J(\Sigma) \cdot \Omega_e. \quad (9.33)$$

Ist also zum Beispiel J das Moment m_{xx} , dann sind in all den Punkten \mathbf{x} der Platte die Änderungen dieses Momentes groß, in denen (9.33) groß ist.

Nun kann man diese Summe noch vereinfachen, indem man einfach die κ_{ij} alle eins setzt. Dann wird aus (9.30) die Summe

$$J_c(\mathbf{x}) - J(\mathbf{x}) \simeq \frac{\Delta K}{K} \cdot J(G_{m_{11}}[\mathbf{y}_c] + 2 \cdot G_{m_{12}}[\mathbf{y}_c] + G_{m_{22}}[\mathbf{y}_c])(\mathbf{x}) \cdot \Omega_e \quad (9.34)$$

Dieses so reduzierte Integral liefert dann natürlich keinen echten Wert mehr, aber es bleibt als Indikatorfunktion wertvoll. Denn die Schnittgrößen $J(\mathbf{x})$ für die dieser Indikator groß ist, sind am meisten von den Steifigkeitsänderungen in dem Element Ω_e betroffen.

Bleiben wir noch bei diesem vereinfachten Indikator. Wie wird er berechnet? Wir lösen das Gleichungssystem

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_G = \mathbf{f}. \quad (9.35)$$

Die Komponente f_i des Vektors ist für jedes i , für jeden Freiheitsgrad i , die Summe

$$\begin{aligned} f_i &= \sum_{j,k=1}^2 m_{jk}(\varphi_i)(\mathbf{y}_c) \\ &= m_{11}(\varphi_i)(\mathbf{y}_c) + 2 \cdot m_{12}(\varphi_i)(\mathbf{y}_c) + m_{22}(\varphi_i)(\mathbf{y}_c) \end{aligned} \quad (9.36)$$

also die Summe der vier Momente m_{jk} der Ansatzfunktion φ_i , die zu dem Freiheitsgrad i gehört, in der Elementmitte \mathbf{y}_c . Weil die meisten Ansatzfunktionen im Bereich des Elementes Ω_e Null sind, ist dieser Vektor \mathbf{f} schwach besetzt. Wenn wir einmal ein kanonisches Viereckelement mit drei Freiheitsgraden pro Ecke voraussetzen, dann sind nur zwölf Komponenten des Vektors besetzt und alle anderen sind null.

Diese kumulierten Momente werden als Knotenkräfte auf die Platte aufgebracht und dabei entstehen die Knotenverschiebungen \mathbf{u}_G . Und wie zu jedem Lastfall, so gehören auch zu diesen Knotenverschiebungen Momente, Querkkräfte usw. und diese Werte, das sind die $J(\mathbf{x})$.

Will man also zum Beispiel wissen, in welchem Bereich der Platte mit großen Änderungen in der Querkraft q_x zu rechnen ist, wenn der Beton in dem Element Ω_e reißt, dann muss man sich den Verlauf von q_x , den der Vektor \mathbf{f} erzeugt, anschauen. Und die Punkte, in denen die Querkraft in der anderen Richtung, also q_y , am stärksten von der Änderung betroffen ist, findet man, indem man den Verlauf von q_y studiert. Und so für jeden anderen Wert auch.

Das Gleichungssystem (9.35) wird also nur einmal gelöst. Hier kommt der große Vorteil zu tragen, den der Tausch (9.22) mit sich bringt. Man muss nicht für jeden Wert J und für jeden Punkt \mathbf{x} eine separate Einflussfunktion generieren, sondern eine Einflussfunktion für die kumulierten Momente in der Elementmitte reicht.

Der Vektor \mathbf{f} stellt sozusagen den Lastfall Energie in dem Element Ω_e dar (unter der Annahme dass die konjugierten Werte alle den Wert eins im Element haben), und wie diese Energien nun ausstrahlt, das charakterisiert den Beitrag, den das Element zu dem Tragwerk leistet. Wenn die Werte J aus dem Lastfall \mathbf{f} alle klein sind, dann kann man davon ausgehen, dass ein Steifigkeitsverlust in dem Element vernachlässigbar ist.

Die Erweiterung auf mehrere Elemente ist klar. Dann wächst die Zahl der Einträge in dem Vektor \mathbf{f} , weil nun noch zusätzlich weitere Knoten mit den fiktiven Knotenkräften f_i belastet werden. Je mehr Elemente natürlich dazukommen, desto verschwommener wird natürlich die Indikatorfunktion. Aber es hindert einen ja nichts daran, die Elementbeiträge mit den Krümmungen aus dem maßgebenden Lastfall zu wichten und so die Formel wieder näher an die tatsächlichen Verhältnisse heranzurücken.

Die Technik lässt sich also sinngemäß bei allen Tragwerken einsetzen, und es ist evidentenmaßen gleichgültig, ob man damit Änderungen in Schnittkräften, in Spannungen, Verformungen oder Lagerkräften verfolgt.

Kommen wir noch einmal auf den Lastfall Energie und die zugehörigen Knotenkräfte f_i zu sprechen. Mit Energie ist die innere Energie des Bauteils gemeint. Die Energie ist das Produkt konjugierter Größen, also Spannungen mal Dehnungen, Momente mal Krümmungen, etc. Einer der Terme kommt aus dem maßgebenden Lastfall und der andere Term kommt aus der Einflussfunktion. Wegen der Symmetrie der inneren Energie ist es gleichgültig, ob die Spannungen oder die Dehnungen aus dem maßgebenden Lastfall kommen. Auf jeden Fall muss man, wenn man mit diesen Formeln arbeitet, wissen, wie die innere Energie des Bauteils definiert ist, das man untersucht.

Nehmen wir zum Beispiel einen räumlichen Stab. Die virtuelle innere Energie, die durch das Spreizen eines Querkraftgelenkes (= Einflussfunktion für eine Querkraft) in diesem Stab ausgelöst wird, ist der Ausdruck

$$a(u, u_G) = \int_0^l \left(\frac{N N_G}{EA} + \frac{M_x M_x^G}{G I_T} + \frac{M_y M_y^G}{EI_y} + \frac{M_z M_z^G}{EI_z} \right) dx \quad (9.37)$$

wobei der Index G auf die Schnittgrößen aus der Einflussfunktion hinweist. Im Sinne einer Indikatorfunktion setzen wir die Schnittkräfte aus dem maßgebenden Lastfall gleich Eins und berechnen das verbleibende Integral

$$\int_0^l \left(\frac{N_G}{EA} + \frac{M_x^G}{G I_T} + \frac{M_y^G}{EI_y} + \frac{M_z^G}{EI_z} \right) dx \quad (9.38)$$

durch eine Ein-Punkt Quadratur, $x_c =$ Mitte des Elements,

$$\left(\frac{N_G(x_c)}{EA} + \frac{M_x^G(x_c)}{G I_T} + \frac{M_y^G(x_c)}{EI_y} + \frac{M_z^G(x_c)}{EI_z} \right) \cdot l. \quad (9.39)$$

Der Vektor \mathbf{f} , der zu dem Energielastfall gehört, hat dann die Komponenten

$$f_i = \left(\frac{N_G(\varphi_i)(x_c)}{EA} + \frac{M_x^G(\varphi_i)(x_c)}{G I_T} + \frac{M_y^G(\varphi_i)(x_c)}{EI_y} + \frac{M_z^G(\varphi_i)(x_c)}{EI_z} \right) \cdot l, \quad (9.40)$$

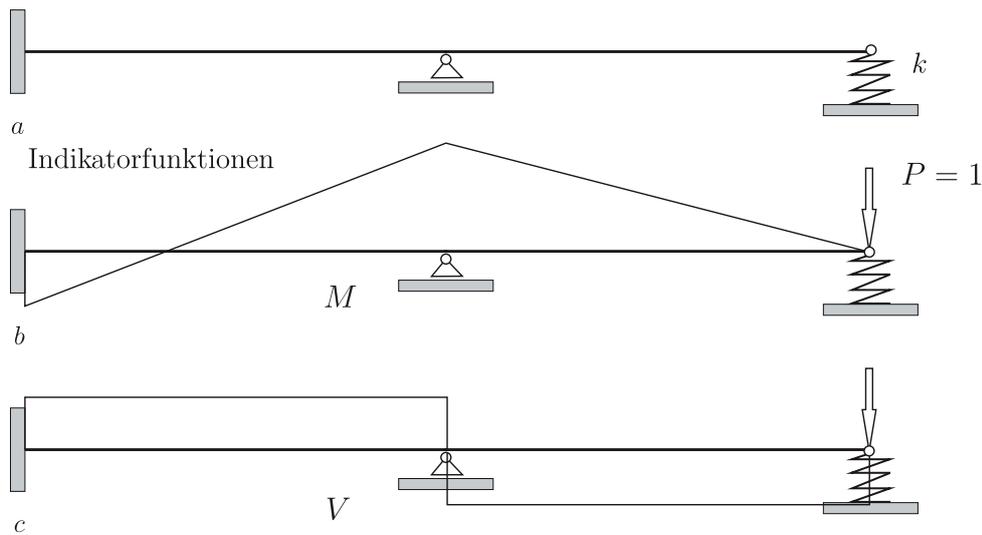


Abbildung 9.9: Federndes Lager a) System b) Momente aus der Einflussfunktion für die Federzusammendrückung c) Querkräfte aus der Einflussfunktion

wenn die φ_i die Einheitsverformungen sind, die zu den Freiheitsgraden u_i des Tragwerks gehören. Bis auf die beiden Knoten, die zu dem Träger gehören, sind daher alle anderen Knoten unbelastet, weil eine Aktivierung eines abliegenden Freiheitsgrades keine Schnittkräfte in dem Träger erzeugen. Alle anderen Freiheitsgrade bleiben bei einer Einheitsverformung ja gesperrt.

Die Lösung des Gleichungssystems

$$\mathbf{K} \mathbf{u}_G = \mathbf{f} \tag{9.41}$$

repräsentiert dann die Indikatorfunktion. Die Indikatorfunktion ist also die zu dem Vektor \mathbf{f} gehörige Verformungsfigur des Tragwerks. Die Größe der Werte J ($= M, N, V$ etc.) aus dem Lastfall \mathbf{f} signalisiert, welche Werte J in dem maßgebenden Lastfall von einem Steifigkeitsabfall in dem Träger besonders betroffen sind.

9.1.9 Nachgiebige Lager

Dieser Formalismus lässt sich natürlich auch auf nachgiebige Lager anwenden. Auf Lager, die plötzlich nachgeben, deren Steifigkeiten sich ändern, oder die ganz ausfallen. Wir haben alle diese verschiedenen Fälle in X sehr detailliert behandelt und wir wollen wir an dieser Stelle nur anhand eines einfachen Balkens die grundlegende Idee darstellen.

Der Zweifeldträger in Bild X ruht rechts auf einem elastischen Lager. Die Frage ist, wie ändern sich die Werte J , also die Schnittkräfte oder die Lagerkräfte, wenn sich die Steifigkeit k des elastischen Lagers ändert? Die virtuelle innere Energie des Trägers ist der

Ausdruck

$$a(w, \delta w) = \int_0^l \frac{M \delta M}{EI} dx + k w(l) \cdot \delta w(l) \quad (9.42)$$

und somit beträgt die Änderung in einer Größe J auf Grund einer Änderung $k \rightarrow k + \Delta k$

$$J_c(x) - J(x) = -\Delta k \cdot G(l, x) \cdot w(l) \quad (9.43)$$

Hierbei ist $G(l, x)$ die Zusammendrückung der Feder aus der Einflussfunktion für die Größe $J(x)$ und $w(l)$ ist die Zusammendrückung der Feder in dem maßgebenden Lastfall. Wenn man also zum Beispiel an einer Stelle x des Trägers ein Querkraftgelenk einbaut und dieses um Eins spreizt, dann wird das zu einer Bewegung in der Feder führen und das ist $G(l, x)$, wobei l für das Ende des Trägers steht, also wo sich die Feder befindet.

Nun kommt noch der Tausch. Es sei $\eta(x)$ die Einflussfunktion für die Zusammendrückung der Feder, d.h. um wieviel drückt sich die Feder zusammen, wenn die Wanderlast $P = 1$ an der Stelle x steht. Diese Einflussfunktionen wird ja einfach dadurch erzeugt, dass man die Feder mit einer Kraft der Größe Eins belastet. Nun gilt

$$G(l, x) = J(\eta)(x). \quad (9.44)$$

Und damit lässt sich (9.43) auch wie folgt schreiben

$$J_c(x) - J(x) = -\Delta k \cdot J(\eta)(x) \cdot w(l). \quad (9.45)$$

Will man also wissen will, welche Werte J in dem Durchlaufträger besonders von einer Änderung der Federsteifigkeit betroffen sind, dann muss man sich die Werte J anschauen, die die Einflussfunktion für die Zusammendrückung der Feder erzeugt. Man plottet also die Biegemomente und die Querkräfte, die zu der Einflussfunktion η gehören und die Punkte, in denen diese Werte groß sind, sind am meisten von einer Änderung der Lagersteifigkeit betroffen.

Die rechte Seite von (9.45) ohne $w(l)$ ist also die Indikatorfunktion für das nachgiebige Lager

$$\text{Indikatorfunktion} = -\Delta k \cdot J(\eta)(x) \quad (9.46)$$

und im konkreten Einzelfall müsste man eben diese Funktion noch mit der Zusammendrückung der Feder in dem maßgebenden Lastfall multiplizieren. Dann hätte man die echten Werte.

Man könnte die Indikatorfunktion auch nur auf

$$\text{Indikatorfunktion} = -J(\eta)(x) \quad (9.47)$$

reduzieren, also die Steifigkeitsänderung auch noch herausnehmen und diese dann dem $w(l)$ zuschlagen.

9.1.10 Kollaps von Tragwerken—kritischer Pfad

Der Kollaps von Tragwerken beginnt damit, dass ein wichtiges Bauteil ausfällt, dieser Ausfall zu Überbeanspruchung an anderen Stellen führt, diese dann plastifizieren und weitere Bauteile einstürzen, bis das ganze Tragwerk zusammenfällt.

Die Kette dieser Ereignisse bezeichnen wir als den kritischen Pfad. Natürlich gibt es in einem Tragwerk mehrere kritische Pfade, je nachdem welches Bauteil zuerst versagt. Wenn man sich zu Beginn auf die höchst beanspruchten Stellen in den Tragwerk konzentriert, sollte es möglich sein mittels der hier vorgestellten Sensitivitätsanalyse den zu einem Anfangsfehler gehörigen kritischen Pfad anzugeben.

Man findet zunächst die Stelle in den Tragwerk, die am meisten von dem Steifigkeitsabfall betroffen ist und an der sich ein plastisches Gelenk aufgrund der Überbeanspruchung ausbildet. Im nächsten Schritt werden nun die sich daraus ergebenden Schnittkraftumlagerungen berechnet, die maximal beanspruchte Stelle bestimmt, ein Fließgelenke eingeführt und werden dieses Schrittes uraufgeführt, solange sich ein Gleichgewichtszustand einstellen kann bzw. bis das System instabil wird.

In der Übersicht stellt sich eine solche Kollapsberechnung, wie folgt dar, [11],

1. Findung von kritischen Elementen anhand von Energiebetrachtung, Ausnutzungsgrad und versteckten Kinematiken
2. Gegebenenfalls eine Vervollständigung oder Änderung von kritischen Elementen
3. Auswahl eines Fehlers, dessen Auswirkungen zu untersuchen sind
4. Bildung der Einflussfunktion für die betrachtete Systemänderung
5. Bestimmung der Schnittgrößenänderungen mit der Methode der Sensitivitätsanalyse mit den Einflussfunktionen
6. Überprüfung, ob die berechneten Änderungen maßgeblich für das Tragwerk sind
7. Modellierung des neuen Systems mit dem Fehler
8. Kontrolle, ob das System verschieblich ist
9. Erneute Untersuchung, wie in den Punkten 4. bis 8.

Das Abbruchkriterium ist die Verschieblichkeit des Tragwerks.

Der Rahmen in Bild 9.10 wurde so überprüft. Die Riegel und die Stiele haben eine Länge von 8 m und bestehen aus Stahlprofilen HEB200 (Stahl S235). Rechts greift eine seitliche Streckenlast von 10 kN/m an.

Aus der Streckenlast ergibt sich der Momentenverlauf in Bild 9.11. Das größte Biegemoment tritt in dem belasteten Stiel auf und es wird angenommen, dass in diesem Balken die

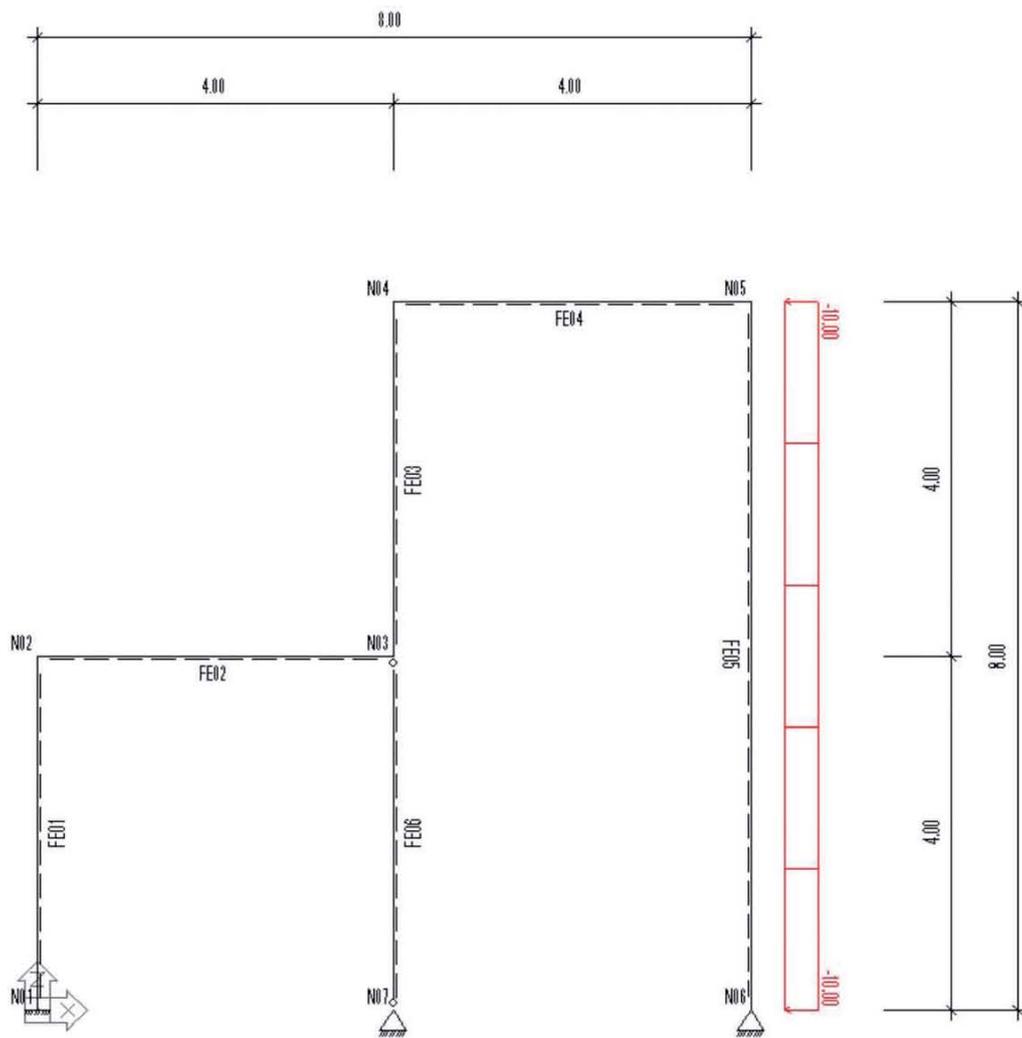


Abbildung 9.10: Rahmen

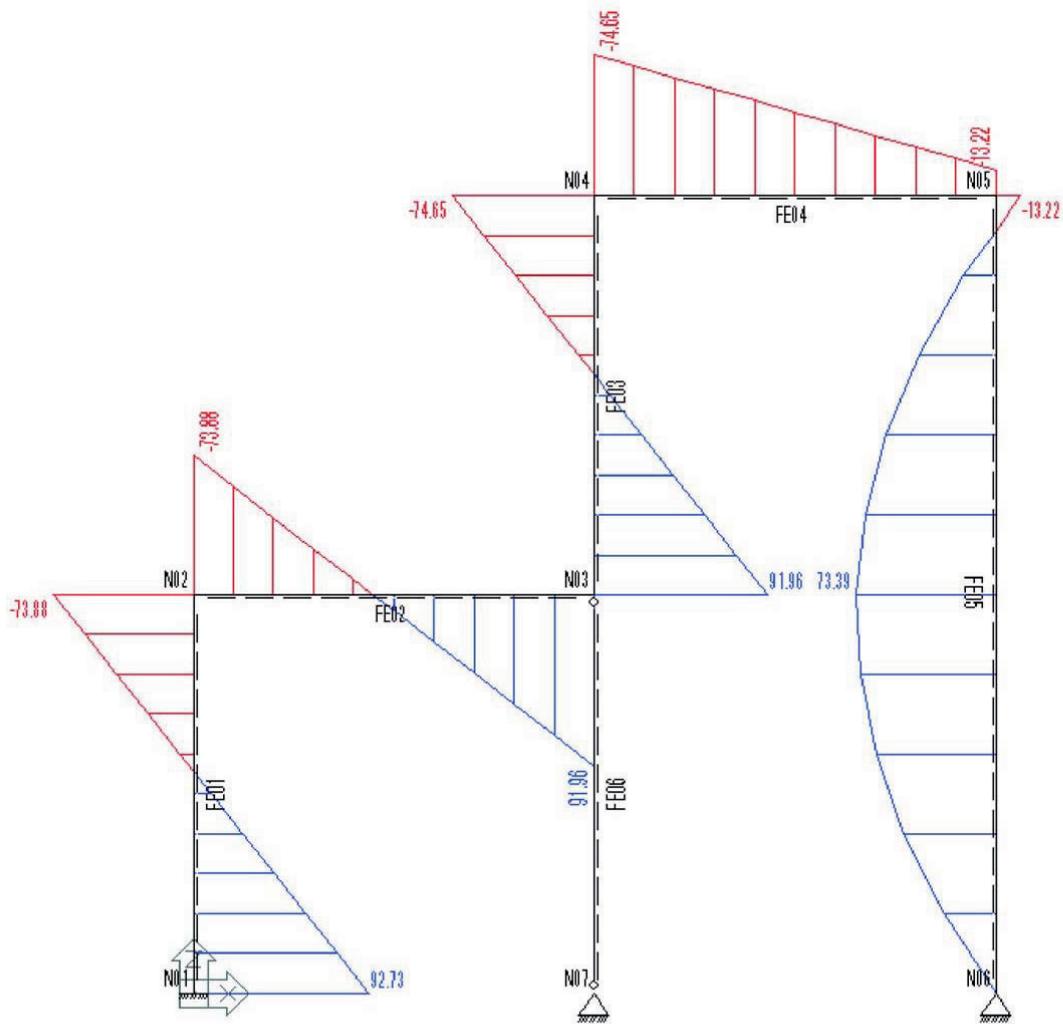


Abbildung 9.11: Biegemomente M_y aus der Linienlast

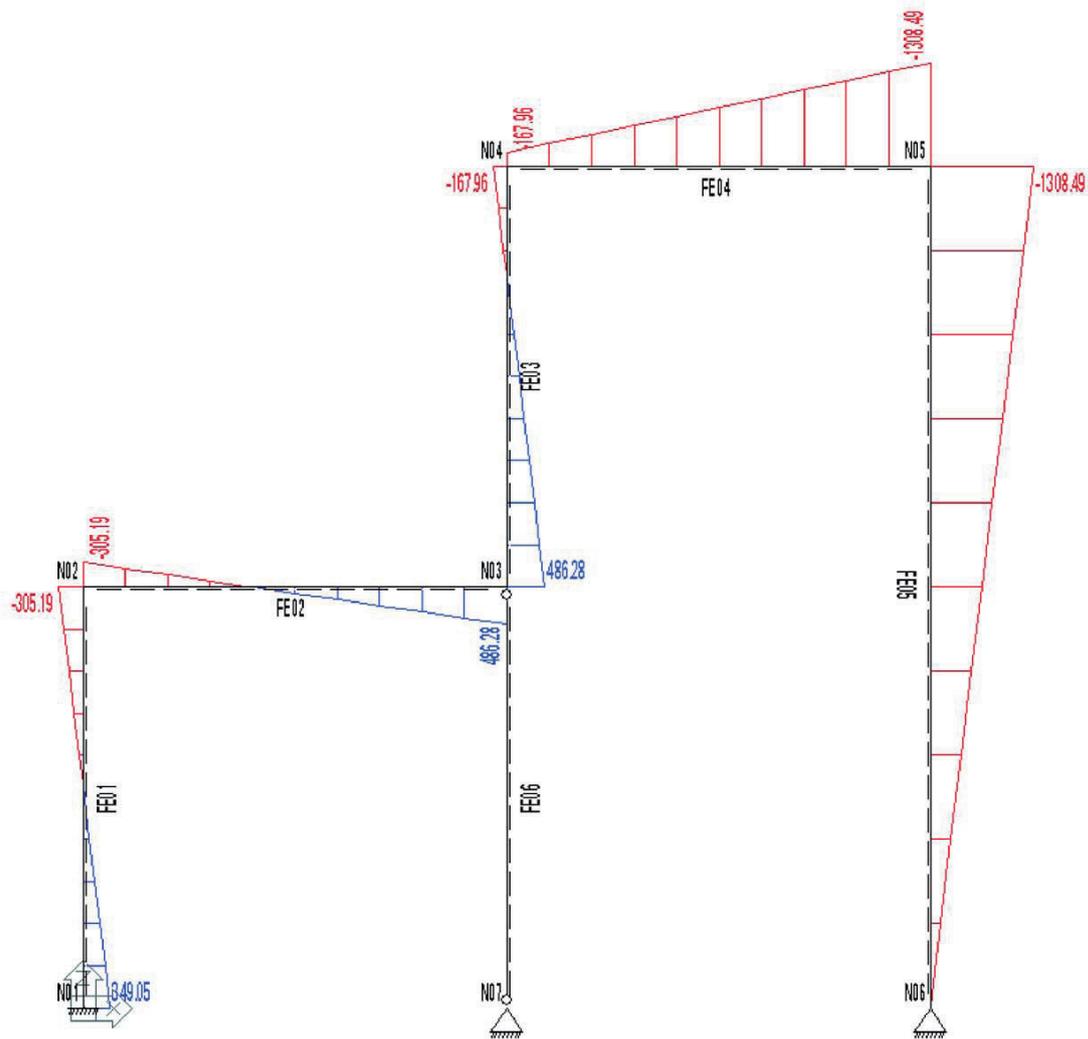


Abbildung 9.12: Biegemomente M_y aus der Einflussfunktion

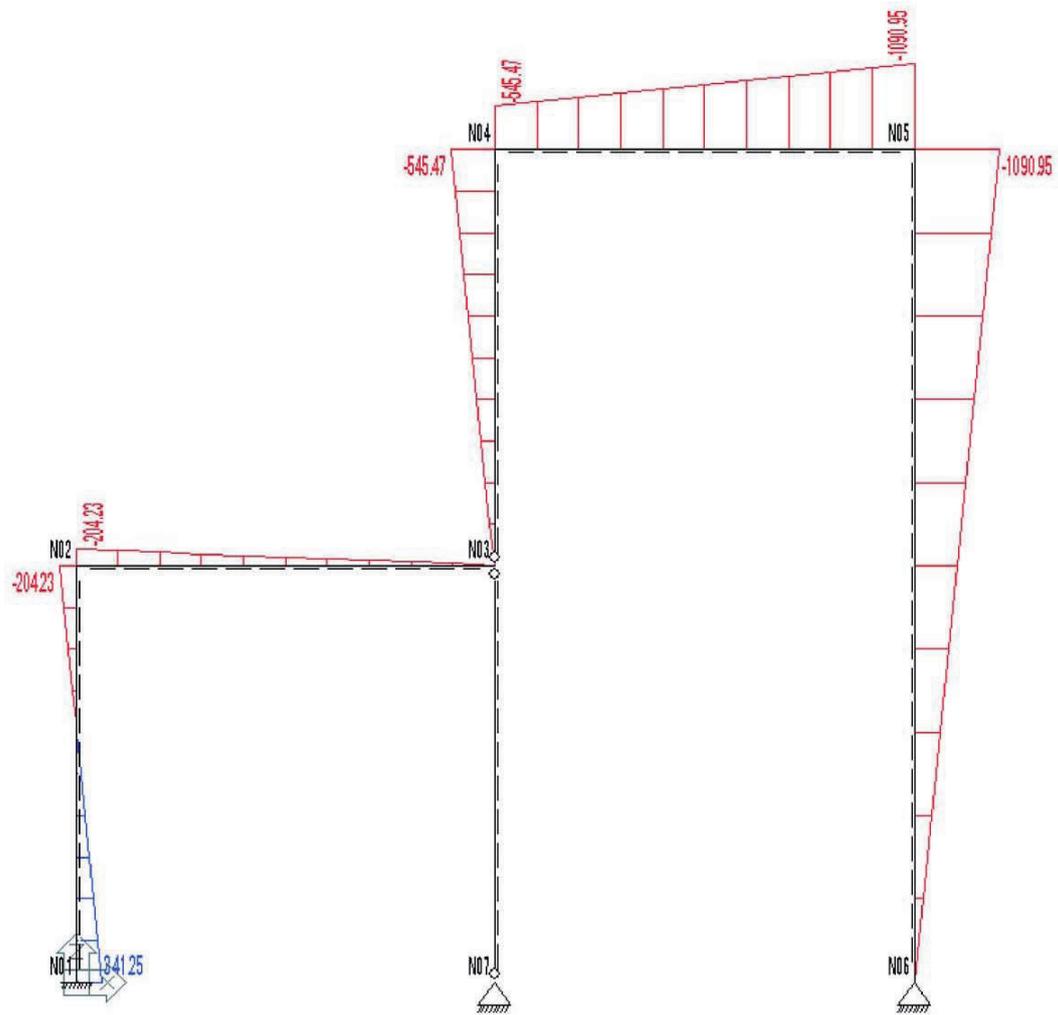


Abbildung 9.13: Biegemomente M_y am geschwächten System aus der Belastung

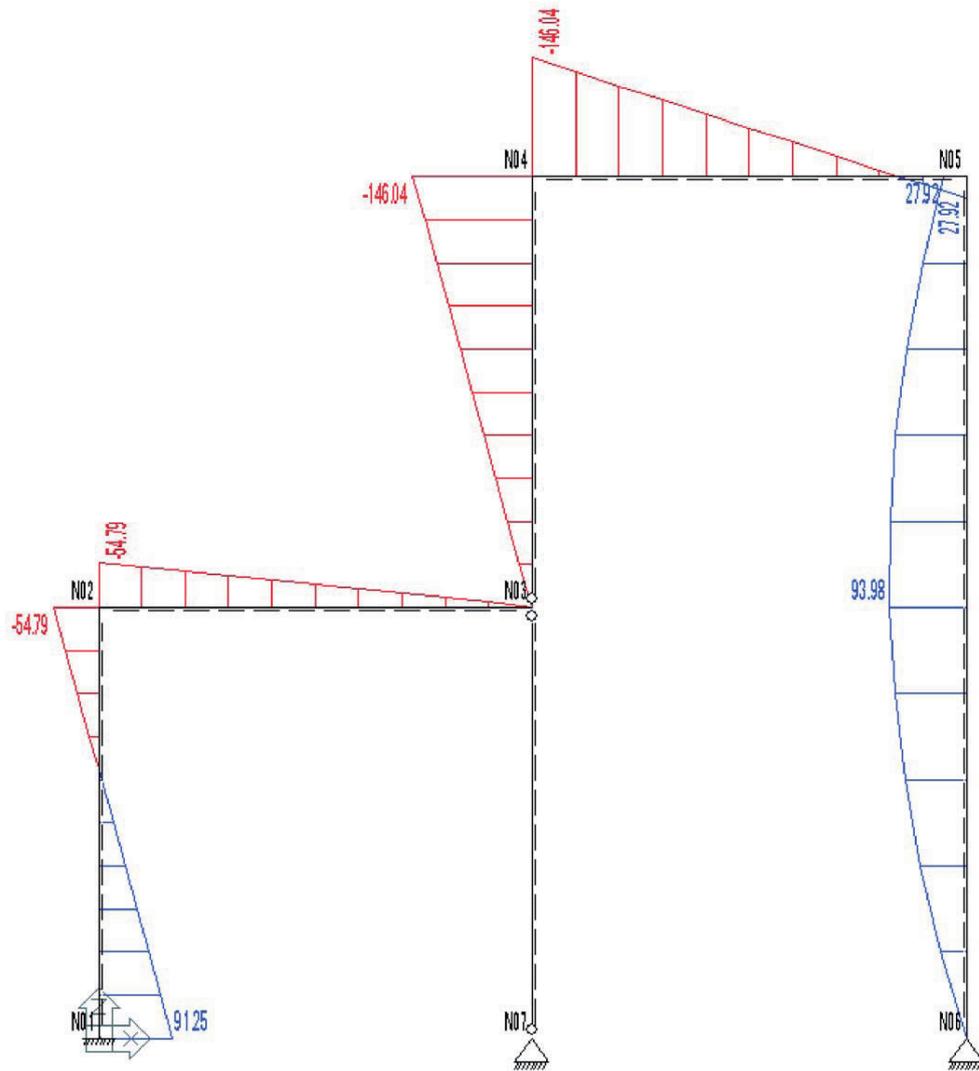


Abbildung 9.14: Biegemomente M_y am geschwächten System aus der Einflussfunktion

Steifigkeit nachgibt. Es wird angenommen, dass dieser Balken geschwächt wird. Nun bildet man die Einflussfunktion für das Biegemoment M_y an dieser Stelle. Daraus resultiert ein Momentenverlauf, der dem Bild 9.12 entnommen werden kann. Aus den Verläufen wird ersichtlich, dass sowohl aus der Belastung als auch aus der Einflussfunktion das Biegemoment in Knoten N03 den maximalen Betrag aufweist. Daher wird angenommen, dass sich an dieser Stelle ein Gelenk bildet.

Das neue, veränderte System wird modelliert und berechnet. Der Momentenverlauf aus der Linienlast hat nun einen anderen Verlauf (siehe Bild 9.13). Nun wird wieder eine Einflussfunktion gebildet, aus der gewisse Schnittgrößen resultieren. Diese sind im Bild 9.14 dargestellt. Aus den beiden Darstellungen wird ersichtlich, dass die nächste Änderung im System im Knoten N04 stattfinden wird, da dort die Biegemomente sowohl aus der Einflussfunktion, als auch aus der Belastung groß sind. Daraus folgt, dass an dieser Stelle die nächste Schwächung zu modellieren ist.

Von der weiteren Analyse wird jedoch abgesehen, da ein weiteres Momentengelenk im Knoten N04 das System statisch bestimmt macht. Das bedeutet, dass aus der Einflussfunktion keine Kräfte resultieren und somit ist die weitere Auswertung nicht möglich. Jeder weitere Fehler würde zum Kollaps des Systems führen.

Literaturverzeichnis

- [1] Grätsch T, Hartmann F, Katz C, “Einflussfunktionen und finite Elemente”, Bauingenieur, 78, (2003)
- [2] Grätsch T, Hartmann F (2004) “Duality and finite elements”, Finite Elements in Analysis and Design, 40: 1005–1020
- [3] Hartmann F, Katz C (2002) Statik mit finiten Elementen, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York
- [4] Hartmann F, Katz C (2007) Structural Analysis with Finite Elements, Springer Verlag, Berlin Heidelberg New York, 2. Auflage
- [5] Morris A, (2008) A Practical Guide to Reliable Finite Element Modelling, John Wiley & Sons Inc. Oxford
- [6] Otaibi W (2010) FMEA (Failure Mode and Effects Analysis) eines Tragwerks, Masterarbeit Universität Kassel
- [7] Otaibi W (2009) Sensitivitätsanalyse an ebenen und räumlichen Rahmen, Diplomarbeit Universität Kassel
- [8] Otaibi W, Takunov B (2010) Überführung eines 3D- in ein 2D-Modell, Projektarbeit Universität Kassel
- [9] Rombach G (2006) Anwendung der Finite-Elemente-Methode im Betonbau, Ernst & Sohn Berlin, 2. Auflage
- [10] Sopoht M, Sopoht G (2008) Sensitivitätsanalyse an einem Brückenbauwerk in semi-integraler Bauweise, Diplomarbeit Universität Kassel
- [11] Takunov B (2010) Sensitivitätsanalyse mittels Einflussfunktionen, Masterarbeit Universität Kassel

10 Software-Beschreibung

10.1 Funktionalität

Die Software wird als eine Desktop-Anwendung eingesetzt. Sie soll Prüfsingenieuren und Tragwerksplanern ermöglichen, potenzielle Stabilitätsrisiken von Tragwerken als Folge von Kollaps oder Steifigkeitsminderung von kritischen Bauelementen zu untersuchen. Die Software wird im Verbund mit einer Statik/FEM-Anwendung eingesetzt, die die numerischen Berechnungen von Fehlerauswirkungen in einer Iterationsschleife ausführt. Eine Tragwerk-BIM-Anwendung liefert Informationen über den globalen Lastabtrag, die kritischen Schwellen der Tragfähigkeiten, die Referenz-Schnittgrößen der Bauelemente und die Teile-Hierarchie im Tragwerk. Ferner existiert ein Modul, das Einflussfunktionen aus der FE-Analyse und aus den BIM-Informationen generiert, ein Algorithmus, der die progressiven Kollaps-Berechnungen im Zusammenwirken mit dem genannten Modul ausführt, sowie Anzeigemodule, die die Ergebnisse der FMEA-Analyse in Tabellenform sowie innerhalb einer 3D-Strukturdarstellung anzeigen (Abb. 1).

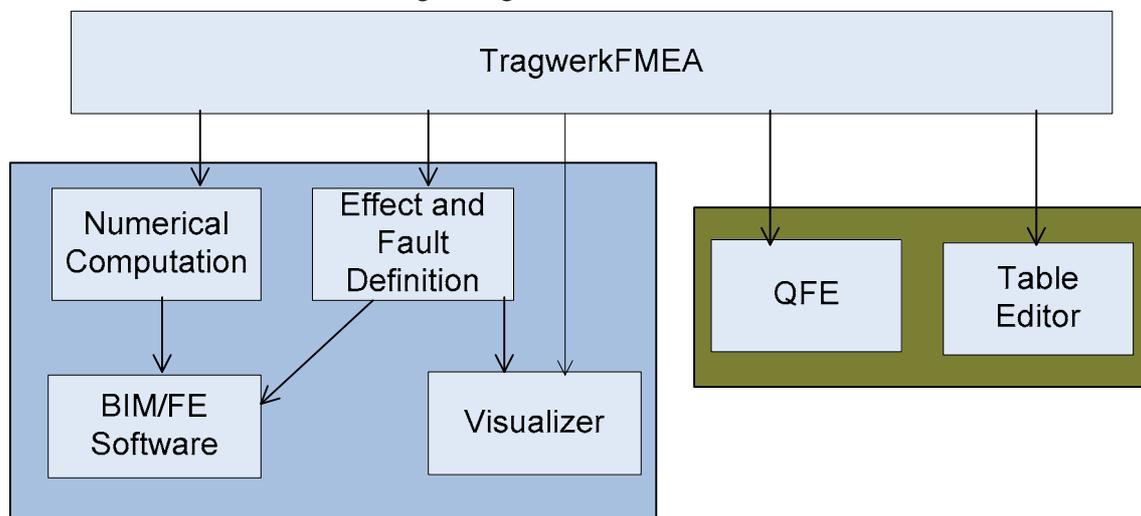


Abbildung 1: Modulen der automatischen FMEA

10.2 Benötigte Fremdsoftware

Liste der Software von Drittanbietern, die in das System integriert sind:

- BIM Software
- 3D-Visualizer
- Statik/FE-Application
- QFE

10.3 Funktionale Anforderungen

Folgende Funktionen wurden festgelegt, die von den Akteuren „Benutzer“ und „System“ genutzt werden.

/LF10/ Tragwerk auswählen *Select structure in Abb.2*

Akteur: Benutzer („Tester“ in Abb. 2)

Am Anfang der Analyse soll der Benutzer in der Lage sein, ein statisch isoliertes Teil des Tragwerks auszuwählen, das analysiert werden soll. Der Visualizer soll dann die

Bauelementdaten aus einer Datei oder aus einer externen CAD/Statik/FE-Anwendung laden. Das Importieren der Daten aus externen Applikationen bedarf der Realisierung von Software-Schnittstellen zu diesen Anwendungen. Der Benutzer importiert dadurch das sogenannte Tragwerkkonzept die Bauelementdaten (Schnittgrößen, Tragverhalten, Verbindungen der Elemente und geometrische Daten für die lokale Steifigkeitsmatrizen), die Belastungen und den globalen Lastabtraggraphen.

/LF20/ Kritische Bauelemente auswählen *Select critical elements*

Akteur: Benutzer

Aus der 3D-Anzeige des Tragwerkkonzepts wählt der Benutzer ein Element (einzelnes Bauelement oder eine Verbindung) aus, das er für kritisch hält (**CriticalElement**). **CriticalElement** ist entweder ein Bauelement, dessen Fehler Ausgangspunkt der Analyse ist (**CriticalFaultElement**), oder ein Bauelement, für das die relevanten Auswirkungen bestimmt werden sollen (**CriticalEffectElement**). Die Auswahl kann auf der Erfahrung des Benutzers basieren, aus vorausgegangen Analysen oder Risikoprioritäten stammen.

/LF30/ Einflussfunktionen generieren *Derive influence functions*

Akteur: System

Die Einflussfunktionen werden generiert. Eine Einflussfunktion beschreibt die Wirkungen einer Veränderung, hier: eines möglichen Fehlers (Kollaps oder Abschwächung) eines kritischen Elements (**CriticalFaultElement**) auf ausgewählte Bauelemente (**CriticalEffect-Elements**). Beispiele möglicher Fehler sind: Steifigkeitsabfall (durch Umwelteinflüsse, Unfall, falsche Auslegung, ...), Formation von plastischen Gelenken, Kollaps, usw.

/LF32/ Schwellwerte generieren *Generate Thresholds*

Das System berechnet, abhängig vom Typ des Elements, Schwellwerte der Schnittgrößen für die ausgewählten kritischen Elemente. Ein Schwellwert ist die Grenzgröße einer Beanspruchung oder einer Kombination von solchen, an der sich das Tragverhalten des Elements zu ändern beginnt. In der derzeitigen Lösung wird der Input für die Steifigkeitsmatrix aus den strukturellen Konzepten von ConEd generiert.

/LF34/ Einflüsse definieren *Define Effects*

Akteur: System

Basierend auf den berechneten Schwellwerten und den Materialeigenschaften werden Effekte für die ausgewählten kritischen Elemente in Form von qualitativen Werten (Intervallen) berechnet, die den Grad der Beanspruchungen (z.B. elastischer Bereich, Fließen, Kollaps) sowie die möglichen Folgefehler kategorisiert.

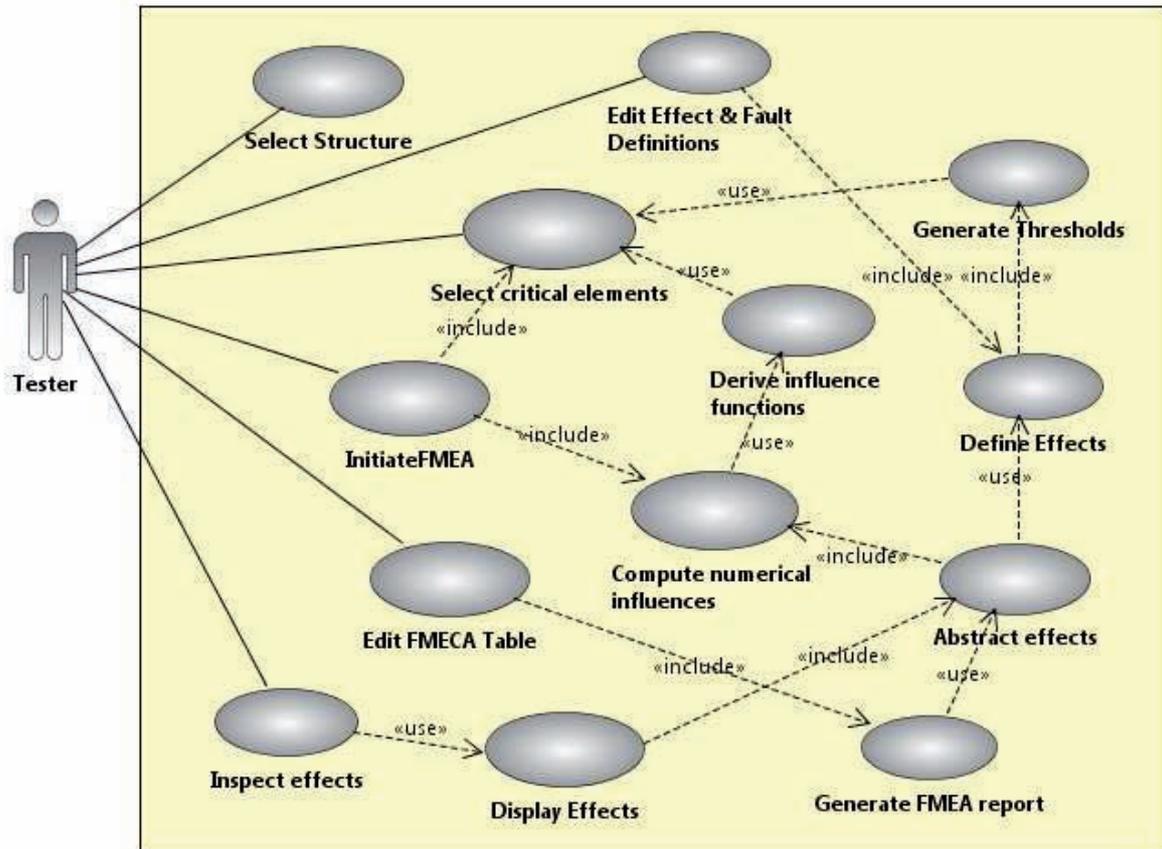


Abbildung 2: Top level use cases

/LF36/ Effekt- und Fehler-Definitionen editieren *Edit Effect & Fault Definitions*

Akteur: Benutzer

Der Benutzer soll in der Lage sein, die berechneten Schwellwerte und die Effekt- und Fehler-Definitionen zu editieren und zu speichern.

/LF40/ Die FMEA initialisieren *Initiate FMEA*

Akteur: Benutzer

Der Benutzer wählt ein kritisches Element (CriticalFaultElement) aus, assoziiert ein Fehler-Szenario und startet die Analyse. Dann berechnet das System mit Hilfe der Einflussfunktionen eine aus dem Fehler folgende neue Lastverteilung im Tragwerk. Eine progressive Kollapsberechnung wird mit dem Fehler und mit den Folgefehlern durchgeführt, um die Stabilität des Tragwerks durchgehend zu testen. Der Benutzer soll in der Lage sein, Zwischenergebnisse einzusehen und ggf. den Prozess abubrechen.

/LF45/ Numerische Einflüsse berechnen *Compute numerical influences*

Akteur: System

Auf Grund der Einflussfunktionen und des ausgewählten Fehlers und den ggf berechneten Folgefehlern berechnet das System die Änderungen in den Schnittgrößen in der CriticalEffectElements.

/LF50/ Effekte abstrahieren *Abstract effects*

Akteur: System

Aus den berechneten numerischen Einflüssen (d.h. der neuen Lastverteilung) berechnet das System die Änderungen in den Schnittgrößen der ausgewählten kritischen Elemente und prüft, ob sich kritische Auswirkungen ergeben haben. Das System zeigt dann auf Anforderung die Ergebnisse an. Falls es in einigen Elementen zu Tragfähigkeitsänderungen gekommen ist, können das Tragwerk-Konzept entsprechend abgeändert und die Analyse in einer weiteren Iteration mit den neuen Folgefehlern fortgesetzt werden. Der Benutzer soll in der Lage sein, den Iterationszyklus automatisch laufen zu lassen oder ihn manuell zu steuern.

/LF55/ Effekte anzeigen *Display Effects*

Akteur: System

Das System soll eine farb-kodierte Anzeige produzieren, damit die Effekte pro Iteration, bzw. die Effektkaskaden, visuell inspiziert werden können. Das Display soll die betroffenen kritischen Elementen im 3D-Modell anzeigen. Die Farbkodierung soll die Schwere der Effekte widerspiegeln, d. h. die qualitativen Verhältnisse zwischen aktuellen Schnittgrößen und das noch vorhandene Tragpotenzial des jeweiligen Bauelements in qualitativer Weise (bezogen auf die definierten Schwellwerte).

/LF60/ Effekte untersuchen *Inspect effects*

Akteur: Benutzer

Der Benutzer soll in der Lage sein, die Ergebnisse der Effektabstraktionen visuell zu inspizieren. Dadurch kann der Benutzer entscheiden, ob die Iteration weiterlaufen oder unterbrochen werden soll.

/LF70/ FMEA-Bericht generieren *Generate FMEA report*

Akteur: System

Als Ergebnis der Analyse generiert das System eine Tabelle von Ursache-Effekt-Relationen.

Die Ergebnistabelle soll die Wechselwirkungen zwischen Bauelementen, ihren Fehlern und deren Folgeeffekten auf verschiedenen Iterationsebenen anzeigen. Die Tabelle soll die folgenden Spalten enthalten:

- StructuralElementId (Kennzeichen des Elements)
- Fehler (Ausgangspunkt der Analyse)
- Lokaler Effekt (Auswirkung in demselben Bauelement): ein vordefinierter Text
- Propagierte Effekte (Einflüsse auf andere Elemente), mit Angabe der Fehlerkaskaden, d.h. der Iterationsstufe, in welcher der Effekt auftritt.
- Effekte auf System- und Sub-Systemebenen bezüglich Stabilität
- Zahlenwerte der Kritikalitätsanalyse
- Konsequenzen (vom Benutzer anzugeben).

Das System soll dem Benutzer ermöglichen, Berichte über die potentiellen Risiken für die ausgewählten kritischen Elemente oder für das gesamte Tragwerk generieren zu können.

/LF80/ Die FMECA-Tabelle editieren *Edit FMECA Table*

Akteur: Benutzer

Dem Benutzer soll es möglich sein, Zusatzangaben zu den Auswertungen zu machen und die automatisch generierte FMEA-Tabelle zu editieren. Der Editor soll ermöglichen:

- Texte in den Tabellen zu ändern
- Eine Tabellenzeile zu löschen, wenn der generierte Effekt nicht plausibel oder nicht relevant zu sein scheint. (Andere Effekte des Fehlers, falls vorhanden, sollen beibehalten werden)
- Zeilen mit zusätzlichen Effekten eines Fehlers einfügen
- Alle Einträge eines Fehlers löschen (falls als irrelevant betrachtet)
- Ergebnisse für Fehler einfügen, die nicht automatisch analysiert wurden.
- Änderungen sollen persistent gemacht werden können. Das System soll Benutzerangaben erfragen, falls die Änderungen in den späteren Iterationen überschrieben werden sollen (diese Funktion wurde nicht implementiert). Im Detail:
 - Angabe von Änderungen, die in der nächsten Iteration beibehalten werden sollen.
 - Auf Anforderung des Benutzers sollen gelöschte oder manuell eingefügte Zeilen markiert angezeigt werden, damit Benutzer im Einzelfall entscheiden kann, ob die jeweilige Änderung beibehalten werden soll.

10.4 Allgemeiner Lösungsansatz, Architektur

10.4.1 Lösungsideen

1 Die Analyse wird auf die ausgewählten kritischen Bauelemente fokussiert, sowohl im Hinblick auf die Ausgangsfehler, als auch die zu untersuchenden Auswirkungen dieser Fehler. Ein Fehler eines Bauelements wird als eine Änderung (Minderung) der Steifigkeit des Elements definiert. Dabei werden Längs-, Quer- oder Biege-Steifigkeit an relevanten Punkten im Bauelement betrachtet.

2 Um die Auswirkungen der Fehler zu evaluieren, werden numerische Berechnungen durchgeführt, die auf dem FE-Modell des Tragwerks basieren. Die Berechnungen basieren auf Einflussfunktionen. Einflussfunktionen geben die Auswirkungen eines Fehlers auf eine bestimmte Schnittgröße (Kraft oder Moment) an einer bestimmten Position in einem (anderen) Bauelement an.

3 Eine Auswirkung soll durch endliche Anzahl von qualitativ bestimmten Kategorien erfasst werden, wie z. B. „keine signifikante Auswirkung“, „signifikante, aber nicht katastrophale Auswirkung“, „katastrophale Auswirkung“, usw. „Katastrophale Auswirkung“ bedeutet den Ausfall des Bauelements, der für die Folgeanalysen eine Änderung in der Struktur des Tragwerks erforderlich macht. Aus Sicht der FMEA bedeutet der erstere Fall „kein Effekt“, während die anderen Effekte im Sinne der FMEA darstellen.

4 Es wird davon ausgegangen, dass die Kategorisierung der Auswirkungen (Effekte einer bestimmten Schnittgröße an einer bestimmten Position in einem Bauelement) durch Schwellwerte jeweiliger Schnittgrößen in dem Bauelement isoliert, d.h. unabhängig von dessen Verbindungen mit anderen Elementen spezifiziert werden kann (da Effekte nur von dessen Material und Form abhängig sind). Die Kategorisierung wird durch Relationen definiert, die die Bereichsbedingungen der Schnittgrößen angeben. Für jedes kritische Bauelement müssen Tragfähigkeiten im Voraus berechnet werden. Referenzschnittgrößen sind die der Bemessung für den Normalfall. Bei der FMEA werden die Änderungen in den Schnittgrößen in Relation zur potentiellen Tragfähigkeit des Elements gesetzt.

5 Ein Effekt ist im Allgemeinen ein Produkt des Zusammenwirkens von verschiedenen Schnittgrößen in einem Querschnitt. Für den jetzigen Softwareprototyp wird jedoch angenommen, dass ein Effekt im Hinblick auf eine einzelne Schnittgröße definiert werden kann. Kombinierte Beanspruchungen (z. B. wie in Stützen und Rahmen) erfordern komplexe Bedingungen – d.h. Constraints mit mehreren Variablen.

6 Ein Einfluss auf eine Schnittgröße kann dann zu einer qualitativen Kategorie, die durch die relevanten lokalen Schwellwerte begrenzt ist, abstrahiert werden. Die qualitative Berechnung kann mit dem an der TUM entwickelten Abstraction Operator durchgeführt werden.

7 Die Berechnung der Effekte kann dann mit den von der Firma OCC'M SW für das AUTAS Projekt entwickelten Qualitative FMEA Engine (QFE) durchgeführt werden.

8 Das Ergebnis der Berechnung ist eine (evtl. leere) Liste von Effekten, d.h. ein Tripel Element-Lage-Schnittgröße mit den assoziierten qualitativen Effekten. Es ist die Basis für die beiden nachfolgenden Schritte:

9 Die Visualisierung der Effekte, d.h. die farbkodierte Anzeige der betroffenen Elemente, die die Effektkategorie widerspiegelt.

10 Falls ein katastrophaler Effekt an Elementen eingetreten ist, wird das FE-Modell für die weitere Analyse entsprechend modifiziert. Die Modifizierung soll, falls der Benutzer nicht abbricht, automatisch stattfinden. Der Prozess endet, falls eine Instabilität ermittelt wird. „Instabilität“ bezieht sich auf das gesamte Tragwerk oder auf ein Teiltragsystem, während ein „katastrophaler Effekt“ den Ausfall eines einzelnen Bauelements bedeutet. „Instabil“ heißt, dass ein Freiheitsgrad (Bewegung oder Rotation) des Systems ohne Belastungsänderung entstanden ist. Der Ausfall eines Bauelements muss nicht unbedingt zur Instabilität des Tragwerks führen, da andere Bauteile die Belastungen aufnehmen können.

11 Am Ende wird eine FMEA-Tabelle generiert, die die Liste der Fehler-Effekt-Relationen (Lokal- und Gesamtsystemeffekte) enthält. Der Benutzer kann dann die Tabelle editieren und Risikoprioritätszahlen einfügen.

10.4.2 Struktur und Ablauf der Software

Die Abbildungen 3 und 4 zeigen die Haupt-Software-Komponenten und ihre Kommunikation und Interfaces.

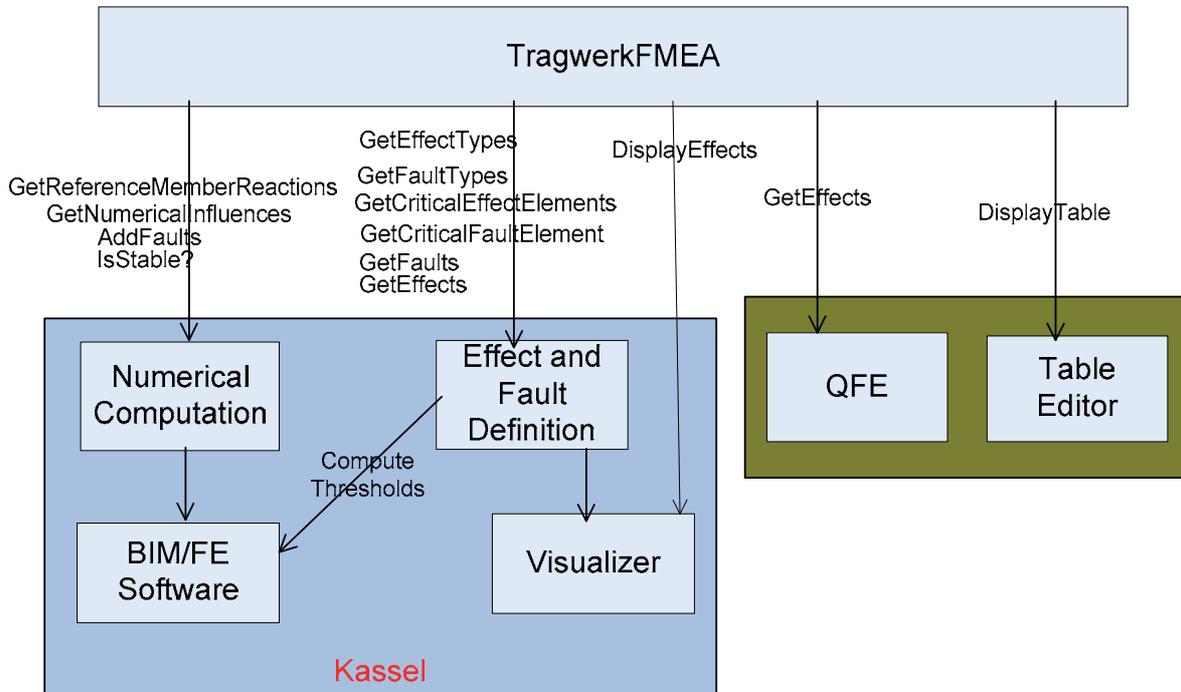


Abbildung 3: Kommunikationsdiagramm

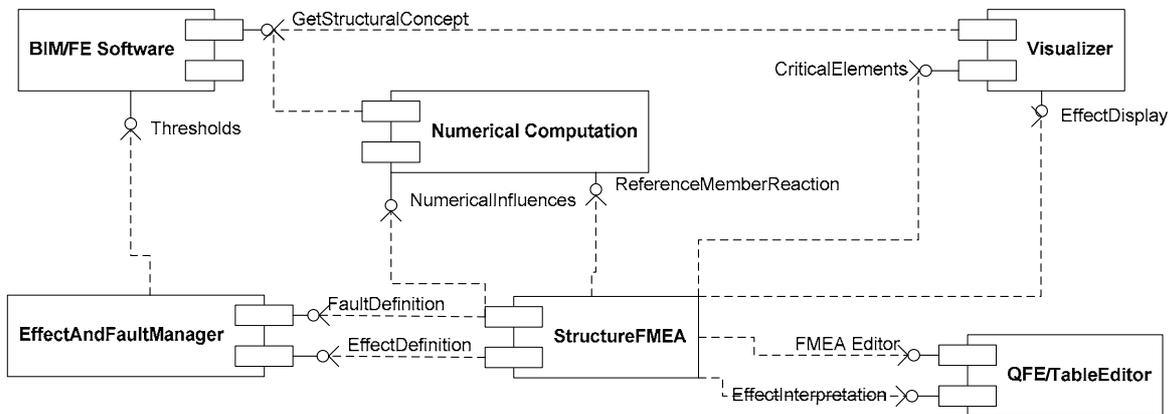


Abbildung 4: Komponentendiagramm

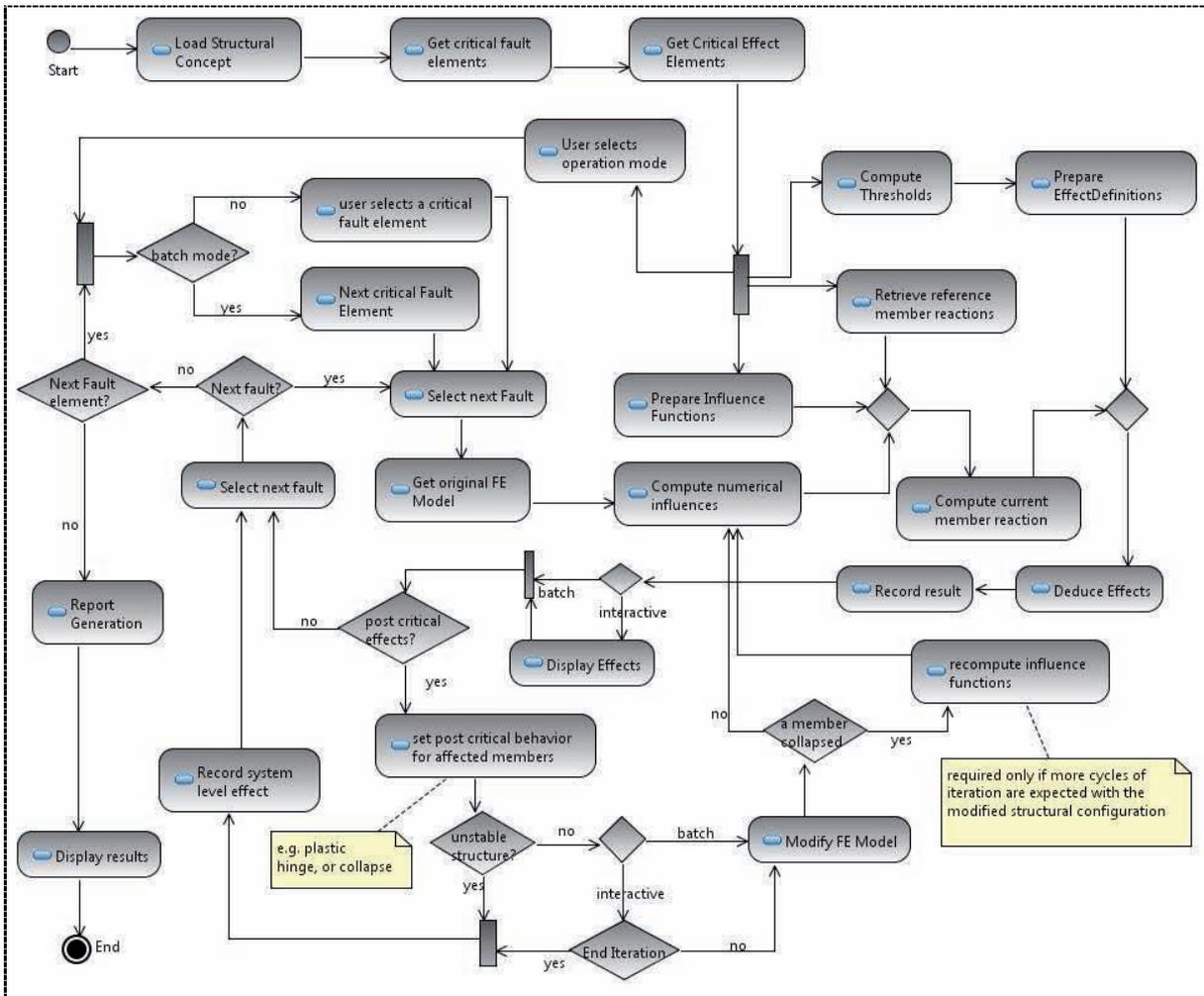


Abbildung 5: Aktivitätsdiagramms

Die Abläufe werden durch ein Aktivitätsdiagramm (Abb. 5) und ein Sequenzdiagramm (Abb. 6) dargestellt.

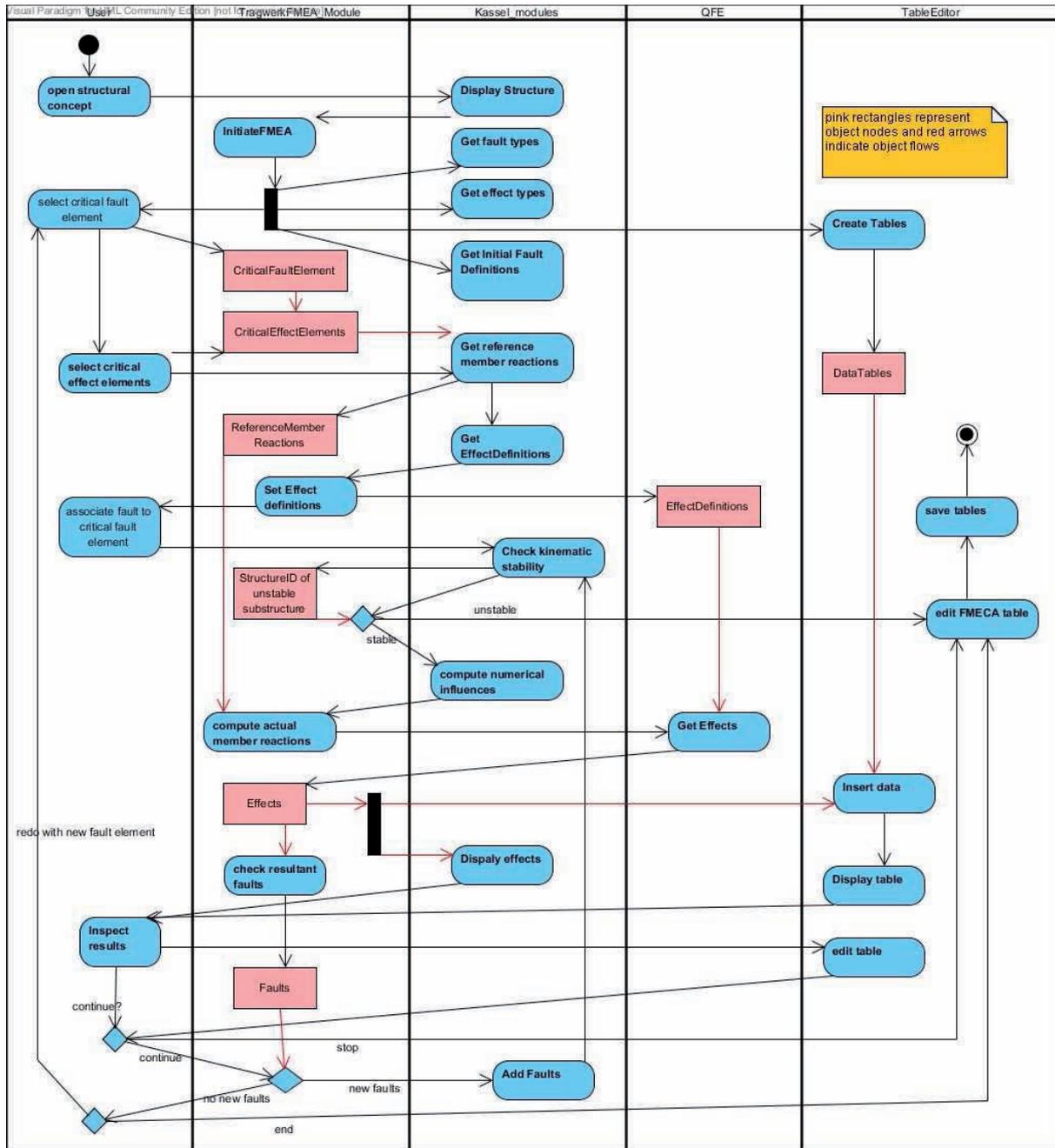


Abbildung 6: Sequenzdiagramm mit Objektflüssen während einer interaktive FMEA-Sitzung

10.4.3 Entwurf der Schnittstellen

Wie das grobe Komponentendiagramm (Abb. 4) veranschaulicht, ist StructureFMEA der zentrale Modul, der die anderen Modulen aufruft.

Die folgende Auflistung zeigt, in der Reihenfolge ihrer Ausführung, die verschiedenen vom StructureFmea-Modul bereitgestellten Methoden.

Modul: StructureFmea

1. **OpenStructuralConcept():** mit vorgegebenem Dateinamen öffnet **OpenStructuralConcept()** das Tragwerkkonzept im **Visualizer** und startet den FMEA-Prozess. Die Datei enthält das Tragwerkkonzept, das der **Visualizer** einliest und in 3D anzeigt.

```
Visualizer.InitViewer(filename);
```

2. **Initialize()**: startet die Erhebung der relevanten Information für die Analyse:

2.1. **GetCriticalFaultElements()** erfragt die kritischen Elementen mit assoziierten Fehlern (Typ: *StructuralElement*), die im *Visualizer* ausgewählt werden. Mit einem Fehler von einem der so ausgewählten Elemente wird dann der FMEA-Prozess gestartet .

```
List<CriticalFaultElement> startFaultElements =  
Visualizer.GetCriticalFaultElements(); //i.e. user selects one  
Or Visualizer.GetCriticalFaultElements(StructureId);
```

2.2. **GetCriticalEffectElements()** erfasst mit dem *Visualizer* eine Liste von **CriticalEffectElements** (je von Typ: *StructuralElement*), d.h. die Elemente, die auf Auswirkungen der in 2.1 ausgewählten Fehler untersucht werden.

```
List<StructuralElement> criticalElements =  
Visualizer.GetCriticalEffectElements();//i.e. user selects them  
or Visualizer.GetCriticalEffectElements(StructureId); or  
Visualizer.GetCriticalEffectElements(List<StructureElementIds>);
```

2.3. **GetEffectDefinitions()** erfasst die Effektdefinitionen und Fehlertypen für die ausgewählten kritischen Elemente. Dafür wird der Modul **EffectAndFaultDefinition** aufgerufen, der die Schwellwerte der Effekte generiert. Der Modul **EffectAndFaultDefinition** soll auch die Definition und Editierung von der entsprechenden Fehlern ermöglichen. Die so definierten *EffectDefinition*-Objekten werden später im QFE-Modul angewendet.

```
List<EffectDefinition> effectdefinitions =  
EffectAndFaultDefinition.GetEffectDefinitions(criticalElements);  
or GetEffectDefinitions (StructureId, StructuralElementId);  
QFE_Interface.SetEffectDefinitions(effectdefinitions);
```

2.4. **GetEffectTypes()** erfasst die Liste der möglichen Effekttypen.

```
List<EffectType> = Visualizer.GetEffectTypes();
```

2.5. **GetFaultTypes()** erfasst die Liste der möglichen Fehlertypen.

```
List<FaultType> = Visualizer.GetFaultTypes();
```

2.6. **GetFaultDefinitions()** ruft die Liste der Definitionen der möglichen Fehler ab.

```
List<Fault> = Visualizer.GetFaultDefinitions();
```

2.7. **GetReferenceMemberReactions()**: für die Liste von kritischen Elementen werden die Schnittgrößen für den Normalfall aus dem Modul *NumericalComputation* abgerufen.

```
List<MemberReaction> referenceMemberReactions =  
NumericalComputation.GetReferenceReactions(List<CriticalElement>);
```

3. **Start FMEA** : um den FMEA-Prozess zu starten, wählt der Benutzer den Operationsmodus: „batch“ oder „interaktive“. In Batchmodus iteriert das System über die Liste der *CriticalFaultElements* und dabei jeweils über die Liste der Fehler des Elements. In einer interaktiven Sitzung steuert der Benutzer die Iterationen, indem er die Fehlerelemente einzeln auswählt und, falls gewollt, die Iteration abbricht. In beiden Fällen ruft das System

```
AnalyzeFaultElement(StructureId, CriticalFaultElement);
```

auf, wobei wiederum iterativ

```
AnalyzeFault(StructureId, IterationLevel);
```

aufgerufen wird.

- 3.1. Die Methode `AddFaults(StructureId, Faults)` wird zuerst aufgerufen. Der Modul **NumericalComputation** modifiziert das Berechnungsmodell gemäß des initialen Fehlers (bzw. der späteren Folgefehler) und gibt die `StructureId` der modifizierten Struktur zurück.
- 3.2. Der Modul **NumericalComputation** überprüft, ob das Tragwerk kinematisch instabil geworden ist und gibt ggf. die Liste von `StructureIds` der Sub-Systeme, die instabil geworden sind, zurück.

```
NumericalComputation.IsStable(StructureId);
```

- 3.3. Falls unter 3.2 ein instabiles (Teil-)Tragwerk identifiziert wurde, trägt der TragwerkFMEA-Modul das Ergebnis als einen Effekt auf Systemebene in die Übersichtstabelle 1 ein und beendet die Iteration. Das System führt dann die Analyse für den nächsten Fehler durch. Im interaktiven Modus kann der Benutzer den Prozess mit einem anderen `CriticalFaultElement` fortführen.

Falls das Tragwerk stabil bleibt, holt die Methode `GetNumericalInfluences()` alle Änderungen in allen relevanten Schnittgrößen für sämtliche `CriticalEffectElements`.

```
numericalInfluences =  
NumericalComputation.ComputeNumericalInfluences(StructureId);
```

- 3.4. Aktuelle Schnittgrößen werden dann kumulativ als Summe der in den einzelnen Iterationen berechneten Inkremente der numerischen Einflüsse und der Referenzschnittgrößen bestimmt.

```
actualMemberReactions = updateMemberReactions(numericalInfluences);
```

- 3.5. **QFE** wird dann aufgerufen, um die Effekte aus den aktuellen Schnittgrößen herzuleiten. Falls neue Fehler entstanden sind, gibt **QFE** deren Liste zurück.

```
List<Effect> newEffects =  
QFE_Interface.ComputeEffectsAndFaults(actualMemberReactions);
```

Der Iterationzyklus terminiert, falls keine neuen Fehlern eintreten.

```
Bool newFaultsOccured = QFE_Interface.isNewFaults();
```

- 3.6. Der TragwerkFMEA-Modul ruft den **TableEditor** auf und fügt die von **QFE** zurückgegebenen Ergebnisse in die Tabellen ein.

```
TableEditor.AddRowsToTable1(List of data objects);  
TableEditor.AddRowsToTable2(List of data objects);
```

In Tabelle 1 des TableEditors werden folgende Datenobjekte, die Eigenschaften eines `CriticalFaultElements` sind, in die vorgesehenen Spalten eingefügt:

No.: Zeilennummer, die für jeden neuen Fehler erhöht wird.

<i>GUID:</i>	global eindeutiges Kennzeichen des Bauelements	<i>Name:</i>
	Name des Bauelements	
<i>Funktion:</i>	Funktion des Elements im Tragwerk	
<i>Beschreibung:</i>	beschreibt das Bauelement	
<i>FehlerTyp:</i>	beschreibt den Fehler	
<i>Mögliche Ursache:</i>	Ursache des Fehlertyps	

Außer diesen vorgefertigten Texten wird das Ergebnis der automatischen Analyse eingetragen:

Lokaler Effekt: Auswirkung des Fehlers auf das betroffene Bauteil selbst

System-Effekte: Liste der ggf. Aufgetretenen Instabilitäten, bzw. Hinweis, dass die Analyse vom Benutzer abgebrochen wurde

Der Rest der Spalten wird später vom Benutzer ergänzt.

Pro Zeile in Tabelle 1 (d.h. pro Fehler) wird eine Tabelle 2 angelegt, die die Propagierung der Effekte als Ergebnisse der iterativen Berechnung darstellt. Darin enthält eine Zeile die folgenden Datenobjekte:

Fehler-Nr: Eine Referenz auf die Zeilennummer in Tabelle 1

Iterationsebene: die Anzahl der mit dem Anfangsfehler durchgeführten Iterationszyklen.

Element-ID: Kennzeichen des betroffenen Bauelements

Element-Name: Name des betroffenen Bauelements

Banspruchungs-Typ: Art der Beanspruchung, die den Effekt verursacht

Position (Lage): Lage im Bauelement

Aktueller Wert: Wert der Schnittgröße

Änderung in %: prozentuale Änderung der Schnittgröße bzgl. der Referenzgröße.

Lokaler Effekt: Beschreibung des resultierenden Effekts für das betroffene Bauelement (EffectInfo)

Folgefehler: Beschreibung eines aus dem Effekt resultierenden Folgefehlers (FaultInfo)

Anmerkung: vom Benutzer eingefügte Kommentar.

3.7. Der *Visualizer* zeigt Änderungen in den Schnittgrößen und ihre Auswirkungen farb-kodiert an. Der Benutzer soll auch in der Lage sein, gleichzeitig die Ergebnistabellen zu inspizieren und zu editieren.

```
Visualizer.DisplayEffects(newEffects);
```

```
TableEditor.DisplayTable();
```

Am Ende der Inspektion kann der Benutzer den Iterationszyklus weiterführen oder stoppen.

3.8. Falls 3.5 neue Fehler zurückgibt, ruft der TragwerkFMEA-Modul die **NumericalComputation** auf, um das Tragwerkmodell mit den neuen Fehlern zu versehen. Der Modul wiederholt dann die obige Prozedur, bis sich keine neuen Fehler ergeben, das Tragwerk als Ganzes oder teilweise instabil wird oder der Benutzer den Iterationszyklus abbricht. Der TragwerkFMEA-Modul erweitert für jede Iteration die jeweiligeTabelle 2.

3.9. Am Ende jeder Iteration soll der Benutzer die Ergebnistabellen inspizieren und Tabelle 1 editieren können. `TableEditor.DisplayTable()` soll die automatisch generierten Tabellen zum Editierzweck anzeigen.

3.10. In einer interaktiven Sitzung kann der Benutzer aus der Liste der vorhandenen *CriticalFaultElements* ein weiteres Element mit Fehlern auswählen und den Prozess weiterführen oder eine neue Mengen von *CriticalFaultElements* und *CriticalEffectElements* erstellen und dafür den ganzen Prozess vom vorne durchführen (Reinitialization).

10.5 Datenstrukturen

10.5.1 Konzeptionelle Klassen

Die Konzeptualisierung der Aufgabe wurde im Kapitel 6 „Modellierung“ beschrieben, das die Basis für die Implementierung der Datenstrukturen liefert. Abb. 7 stellt die Konzepte und Beziehungen als Klassendiagramme dar.

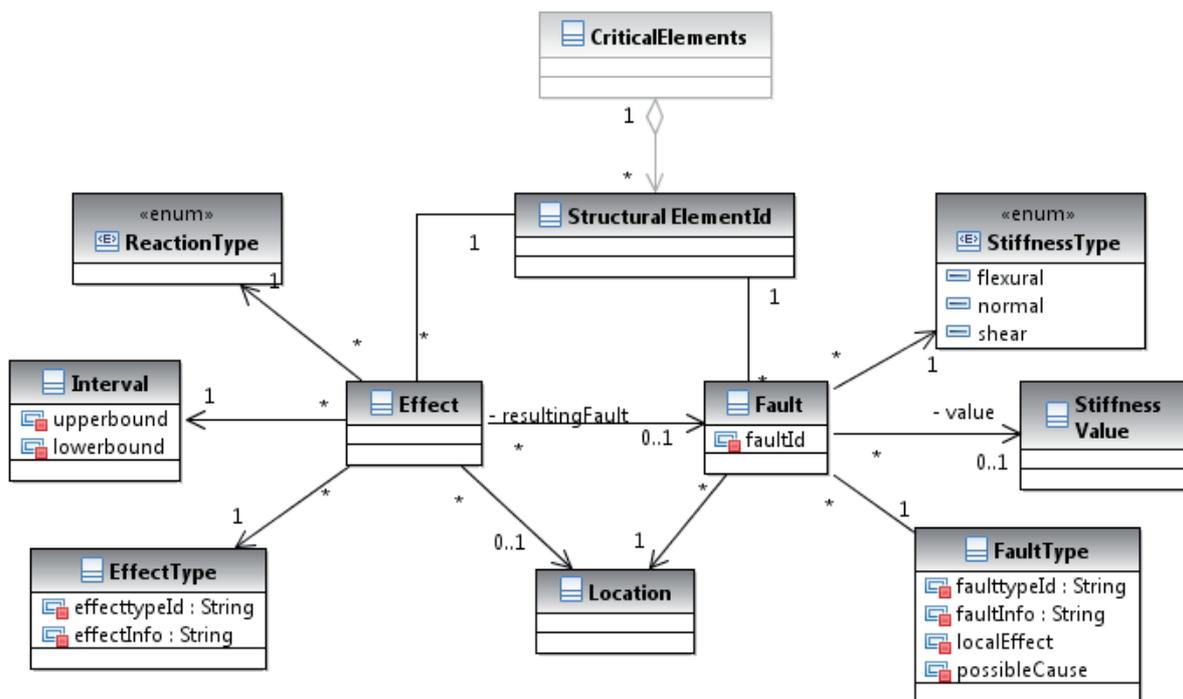


Abbildung 7: Konzeptuelles Klassendiagramm

10.5.2 Datenaustausch mit den Modulen zur numerischen Berechnung und Visualisierung

Ein *StructuralElement*-Objekt enthält die folgenden Attributen: *StructuralElementID* (ein global eindeutiges Kennzeichen), *Name*, *Beschreibung* and *Funktion*.

1. *GetCriticalFaultElements()* gibt eine Menge von *Bauelement*-Objekten zurück.

Input Parameter	User wählt mehrere <i>CriticalFaultElement</i> -Objekte im Visualizer aus. Alternativ gibt er <i>StructuralElementIDs</i> ein.
Rückgabe	Eine Liste von <i>CriticalFaultElement</i> -Objekten. Diese sind <i>Bauelement-Objekte</i> mit einer Menge von assoziierten Fehlern.

2. *GetCriticalEffectElements()* gibt eine Liste von *StructuralElement*-Objekten zurück.

Input Parameter	User wählt mehrere <i>CriticalFaultElement</i> -Objekte im Visualizer aus. Alternativ gibt er <i>StructuralElementIDs</i> ein.
Rückgabe	Eine Liste von <i>Bauelement</i> -Objekten als <i>CriticalEffectElements</i>

3. *GetEffectDefinitions()* Liefert eine Liste von *EffectDefinition*-Objekten für jedes *CriticalEffectElement*-Object.

Input Parameter	eine Liste von <i>Bauelement</i> -Objekten als <i>CriticalEffectElements</i>
Rückgabe	eine Liste von <i>EffectDefinition</i> -Objekten für jedes <i>CriticalEffectElement</i> -Objekt

EffectDefinition hat die Attribute *StructuralElementID*, *ReactionType*, *Location* und eine Liste von *Effects*. *Effect* besteht aus *Interval* (representiert durch obere und untere Schwellen der Schnittgrößen), *EffectType*, *FaultType*, *StiffnessType* and *StiffnessValue*. Diese Daten werden zu Beginn ermittelt und an QFE übergeben.

4. *GetReferenceReactions()*

Input Parameter	eine Liste von <i>Bauelement</i> -Objekten als <i>CriticalElements</i>
Rückgabe	eine Liste von Referenz-Schnittgrößen (<i>MemberReaction</i>), jeweils mit den Attributen: <i>StructuralElementID</i> , <i>ReactionType</i> , <i>Location</i> und <i>magnitude</i> (eine reale Zahl).

5. *GetEffectTypes()*

Input Parameter	
Rückgabe	eine Liste von Effektyp-Objekten (<i>EffectType</i>), jeweils mit den Attributen: <i>TypeID</i> und <i>Beschreibung</i> (beide String).

6. *GetFaultTypes()*

Input Parameter	
Rückgabe	Eine Liste von FehlerTyp-Objekten, jeweils mit den Attributen <i>TypeId</i> , <i>FaultInfo</i> , <i>LocalEffect</i> and, <i>PossibleCause</i>

7. *GetNumericalInfluences()*

Input Parameter	eine Liste von mit Fehlern versehenen <i>CriticalFaultElement</i> -Objekten
Rückgabe	eine Liste von <i>NumericalInfluence</i> -Objekten, jeweils mit den Attributen: <i>StructuralElementID</i> , <i>ReactionType</i> , <i>Location</i> , <i>magnitude</i> (numerischer Wert) und möglicherweise <i>iterationLevel</i> (integer). Der numerische Einfluss (<i>NumericalInfluence</i>) wird für alle <i>CriticalEffectElements</i> berechnet.

8. *AddFaults()* sendet eine Liste von Fehlern an den Modul **NumericalComputation**, der das Tragwerk-Modell aufgrund der Fehler ändert und ein Kennzeichen (*StructureId*) des modifizierten Tragwerks zurückgibt.

Input Parameter	eine Liste von <i>Bauelement</i> -Objekten mit Fehlern, jeweils mit Kennzeichen des Bauelements, Lage, FehlerTyp, und Typ und Wert der Steifigkeit.
Rückgabe	Kennzeichen (<i>StructureId</i>) des modifizierten (Teil)-Tragwerks

Attribute eines Fehlers (*Fault*) sind Kennzeichen (*StructuralElementID*), Position (*Location*), Steifigkeitswert (*StiffnessValue*), Art der Steifigkeit (*StiffnessType*) und Art des Fehlers (*FaultType*).

9. *DisplayEffects()*: Für die farb-kodierten Anzeigen der relativen Änderungen in den Schnittgrößen werden die Ergebnisse der aktuellen Iterationsstufe (aus Tabelle 2) an den Visualizer übergeben.

Input Parameter	Eine Liste von Bauelement-Objekten mit Fehlern: Kennzeichen (<i>StructuralElementID</i>), Typ der Schnittgröße (<i>ReactionType</i>), Lage (<i>Location</i>), aktuelle Schnittgröße (<i>MemberReaction</i>), %-Änderung, Art des Fehlers (<i>FaultType</i>)
Rückgabe	Keine (lediglich Anzeige)

10. *IsStable()*: gibt entweder True oder ggf. Kennzeichen der instabil gewordenen Subsysteme zurück.

Input Parameter	<i>StructureId</i>
Rückgabe	True oder Liste von instabilen (Teil-)Strukturen

10.5.3 Datenaustausch mit QFE

1. *ComputeEffectsAndFaults()*: mit den aktuellen Schnittgrößen als Argumenten werden die resultierende Effekte und die etwaigen Folgefehler in den *CriticalEffectElements* bestimmt.

Input Parameter	Eine Liste von <i>CriticalEffectElements</i> mit aktuellen Schnittgrößen.
returns	True, falls neue Effekte oder neue Folgefehler resultierten.

2. *SetEffectDefinitions()* übergibt die Liste der *EffectDefinition* an QFE.

Input Parameter	Eine Liste der <i>EffectDefinition</i> -Objekten.
returns	True, falls die Objekte erfolgreich gesetzt sind

3. *GetEffects (MemberReactions)* übergibt eine Liste von aktuellen Schnittgrößen an die QFE. Jede Schnittgröße ist charakterisiert durch das Kennzeichen des Bauelements, den Typ der Schnittgröße, die Lage und die Größe der Beanspruchung. QFE liefert die sich daraus ergebenden Effekte und ggf. die damit verbundenen Fehler an den TragwerkFmea-Modul zurück.

Input Parameter	Eine Liste von aktualisierten <i>Schnittgrößen</i> -Objekten.
returns	Eine Liste von <i>Effect</i> -Objekten

10.5.4 Datenaustausch mit dem TableEditor

Die von QFE ermittelten Ergebnisse werden an den TableEditor übergeben. Tabelle 1 enthält eine Zeile für jeden analysierten Fehler. Die eingetragenen Daten gehen auf die im Vorfeld erfassten Definitionen und Texte zurück, mit Ausnahme der Spalte "Auswirkung auf Systemebene", die das Endergebnis der iterierten Analyse enthält (also Instabilität oder nicht, bzw. Hinweis, dass bis zum Abbruch durch den Benutzer keine Instabilitäten auf Systemebene abgeleitet wurden.) Die erste Spalte dieser Tabelle (Nr.) ist eine automatisch inkrementierte Seriennummer pro Anfangsfehler.

In Tabelle 2 werden die Schnittgrößenänderungen und die Ergebnisse der Berechnungen aufgezeichnet. Die Tabelle enthält die aktuellen Schnittgrößen und die damit verbundenen lokalen Auswirkungen an den relevanten Punkten in den betroffenen kritischen Elementen. In dieser Tabelle referenziert die Spalte „Fehler #“ die Zeilennummer in Tabelle 1. Die Iterationsstufe gibt die Anzahl der mit dem Anfangsfehler und dessen Folgefehlern durchgelaufenen Iterationen wieder. Der Benutzer kann Kommentare hinzufügen.

Die folgenden Attribute eines *CriticalFaultElement* werden in den relevanten Spalten der Tabelle 1 eingefügt.

<i>Nr.:</i>	Zeilennummer (für jeden neuen Fehler).
<i>GUID:</i>	global eindeutiges Kennzeichen des Bauelements
<i>Name:</i>	Name des Bauelements
<i>Funktion:</i>	Funktion des Elements im Tragwerk
<i>Beschreibung:</i>	Text zur Charakterisierung des Bauelement
<i>Fehlertyp:</i>	Beschreibung des Fehlers
<i>Mögliche Ursache:</i>	für den Fehlertyp

Lokaler Effekt: Auswirkung auf das vom Fehler betroffene Element
Effekte Systemebene: Endergebnis der Analyse:
 Instabilität oder nicht (bzw. Abbruch durch Benutzer).

Die übrigen Spalten sollen vom Benutzer ergänzt werden.

Eine Zeile in Tabelle 2 der FMECA enthält folgende Angaben:

Fehler #: Referenz auf die Zeilennummer in Tabelle 1.
Iterationsstufe: Zahl der Iterationsstufe
Element-ID: Kennzeichen des betroffenen Bauelements.
Element-Name: Name des betroffenen Bauelements.
BeanspruchungsTyp: Typ der den Effekt verursachenden Beanspruchung
Position: die betroffene Lage im Bauelement
Aktuelle Wert: aktueller Wert der Schnittgröße.
Änderung in %: Abweichung der Schnittgröße vom Referenzwert
Effekt (lokal): Info über den für die Schnittgröße hervorgerufenen Effekt
Folgefehler: Info über eventuelle Folgefehler des Effekts
Anmerkung: vom Benutzer einzufügende Kommentare.

AddRowsToTable1(row); AddRowsToTable2(row);

Input Parameter	<i>row:</i> Parameter einer Zeile der Tabelle 1, bzw. Tabelle 2
Rückgabe	

Nach der FMEA-Sitzung soll der Benutzer auch Zeilen mit Werten aus anderen Quellen zu den Tabellen einfügen können (Siehe Kapitel 3 - Richtlinien).

11 Softwareprototyp

Die Oberfläche des Tragwerk-FMEA Prototypen besitzt die folgenden Komponenten:

- Hauptfenster zur Steuerung der iterativen Kollapsberechnung,
- Visualisierer zur Auswahl von Fehler/Effektelementen und zur Darstellung des Kollapses,
- Table-Editor zur Festlegung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit sowie der Bedeutung der Fehlerfolge, um die Risikoprioritätszahlen zu berechnen und die Ergebnisse zu bearbeiten und als Formblätter auszudrucken.

Diese Hauptkomponenten sind in Abbildung 1 dargestellt, wobei eine vollständige Sitzung weiter unten alle weiteren GUI-Komponenten beschreibt.

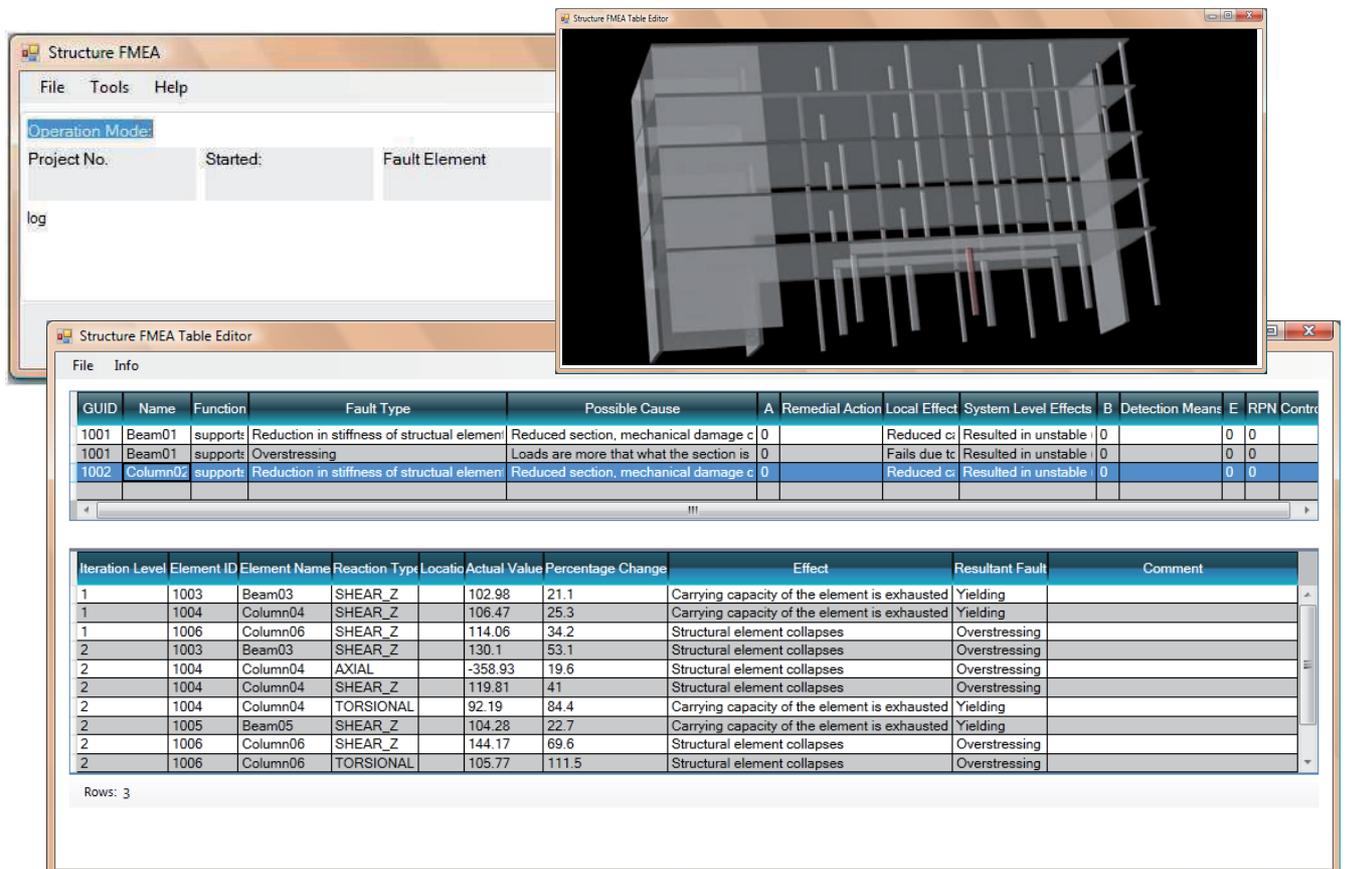


Abbildung 1: GUI-Komponenten der Software Tragwerk-FMEA

Im Hintergrund greifen diese GUI-Komponenten zur Berechnung der Robustheit auf folgende Module zurück:

- Numerical Computation (Anbindung an kommerzielle FE-Software, hier SOFiSTiK) zur Berechnung der resultierenden Schnittgrößen am Gesamttragwerk infolge einer lokalen Bauteilschwächung, die als Steifigkeitsabfall modelliert ist.
- Effect and Fault Manager (Effektenmodul) zur Ableitung der geänderten Bauteilwiderstände infolge von Überschreitungen in den Bemessungsschnitten. Das Resultat ist ein geändertes mechanisches Modell (z. Bsp. Einführen eines Fließgelenkes), das als Basis für den nächsten Propagierungsschritt dient.

- QFE (qualitative Schlussfolgerungskomponente) zur Propagierung von Fehlern in Form von Steifigkeitsreduzierungen als Folge von Überbeanspruchbarkeiten.

Abbildung 2 stellt den Workflow mit seinen Abhängigkeiten dar, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Tragwerk-FMEA nur auf wenige Informationen zurückgreifen kann, da sie nach der Leistungsphase 3 ausgeführt werden soll.

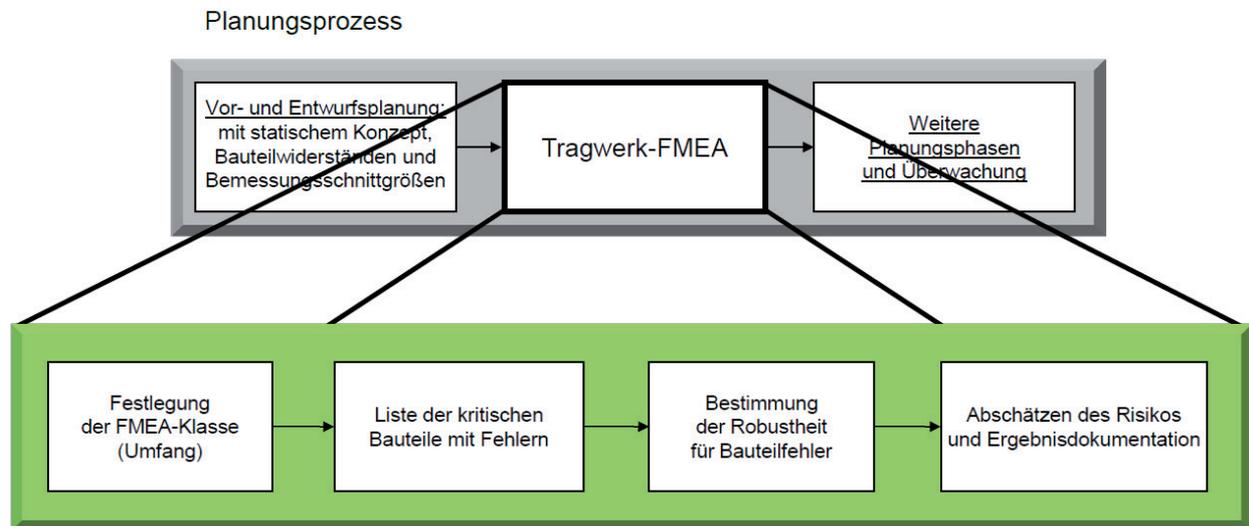


Abbildung 2: Workflow der Tragwerk-FMEA und Integration in Planungsprozess

Der geänderte Arbeitsprozess des Tragwerksplaners sowie der an der QS beteiligten Planer stellt sich wie folgt dar:

1. Festlegung der FMEA-Klasse:

Zu Beginn importiert der Planer das Tragkonzept aus einem gängigen Tragwerksmodellierer in die Tragwerk-FMEA-Software. In diesem Fall aus ConED[®]. Das Tragkonzept muss folgende Informationen enthalten: globales statisches Modell, Lasten, Materialien, Bauteile mit Bemessungsschnitten und dazugehörigen Schnittgrößen sowie Beanspruchbarkeiten. Das qualitative Verhalten der einzelnen Bauteile über einen Schnittgrößenbereich von + bis – unendlich wird aus den Bauteilkatalogen extrahiert, indem die Zustandsvariablen (= Bauteilwiderstände in den Bemessungsschnitten) in Abhängigkeit der Bauteileigenschaften instanziiert werden. Sofern es sich um eine Positionsstatik handelt, muss zusätzlich der Lastabtrag mit seiner Topologie zwischen den Bauteilen über einen gerichteten-annotierten Graphen beschrieben werden, um die Folgefehler in der Tragstruktur für eine anfängliche Bauteilschwächung zu bestimmen. Danach bestimmt der Planer die FMEA-Klasse anhand des Leitfadens, die den Umfang der durchzuführenden Tragwerk-FMEA definiert. Die FMEA-Klasse hängt von der Gefährdungsklasse (der Schadensfolgeklasse sowie der Honorarzone) und der Robustheitsklasse ab. In diesem Fall sind die Schadensfolgeklasse CC2 (Bürohaus sowie exponierte Stützen im Erdgeschoss für Fahrzeuganprall), die Honorarzone III und die Robustheitsklasse 2 (siehe Abbildung 3) ermittelt worden, so dass sich das Bauwerk gemäß Abbildung 4 die FMEA-Klasse 2 einstufen lässt.

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

+5

Tabelle 2.4: Vorschlag eines Bewertungsverfahrens zur Ermittlung der Robustheit von Tragwerken

Abbildung 3: Einstufung in Robustheitsklasse

Es ist zu erwähnen, dass es sich bei der oben ermittelten Robustheit, um eine heuristische Einschätzung handelt, die lediglich zur Festlegung des Umfangs dient. Die eigentliche Untersuchung der Robustheit in Bezug auf Fehler und deren Fortpflanzung im Bauwerk findet in der FMEA-Sitzung mit Hilfe des Prototypen statt.

		Honorarzone 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

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

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

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

Abbildung 4: Einstufung in FMEA-Klasse

2. Auflistung der kritischen Bauteile mit potentiellen Fehlern

Auf Basis der FMEA-Klasse ist die Betrachtungstiefe gering sowie die Anzahl der zu untersuchenden Bauteile niedrig. Der Planer stellt nun zur Vorbereitung der FMEA-Sitzung die Liste der kritischen Bauteile/Verbindungen auf. In diesem Fall sind es die exponierten EG-Stützen sowie die hochbelasteten Unterzüge im EG zum Auffangen der Stützenlasten aus den Obergeschossen. Diese Auflistung kann von den Sitzungsteilnehmern hinsichtlich der zu betrachtenden Elemente sowie der dazugehörigen Fehler ergänzt werden. Zusätzlich kann eine automatische Vorschlagsermittlung mittels einer vorgeschalteten Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, um kritische Stellen im Tragwerk zu entdecken. Dies ist jedoch momentan im Prototypen noch nicht implementiert.

3. Bestimmung der Robustheit des Tragwerks hinsichtlich einzelner Fehler

In der FMEA-Sitzung können nun über den Visualisierer die Bauteile der o. g. Liste mit den entsprechenden Fehlern ausgewählt werden. Im konkreten Fall ist dies eine EG-Stütze, für die ein Steifigkeitsabfall infolge Anprall um ca. 90% angenommen wird. Daraus resultiert wie in Abbildung 5 dargestellt im ersten Berechnungsschritt der Ausfall des Unterzuges über der Stütze (Bauteil mit roter Einfärbung) sowie eine Umlagerung der Lasten zu den grüngefärbten Bauteilen, bei denen allerdings nur gering die Beanspruchbarkeiten überschritten werden. Diese Ergebnisse werden im FMEA-Editor mit Lage und Art der Überschreitung (Beanspruchung und Höhe) angezeigt.

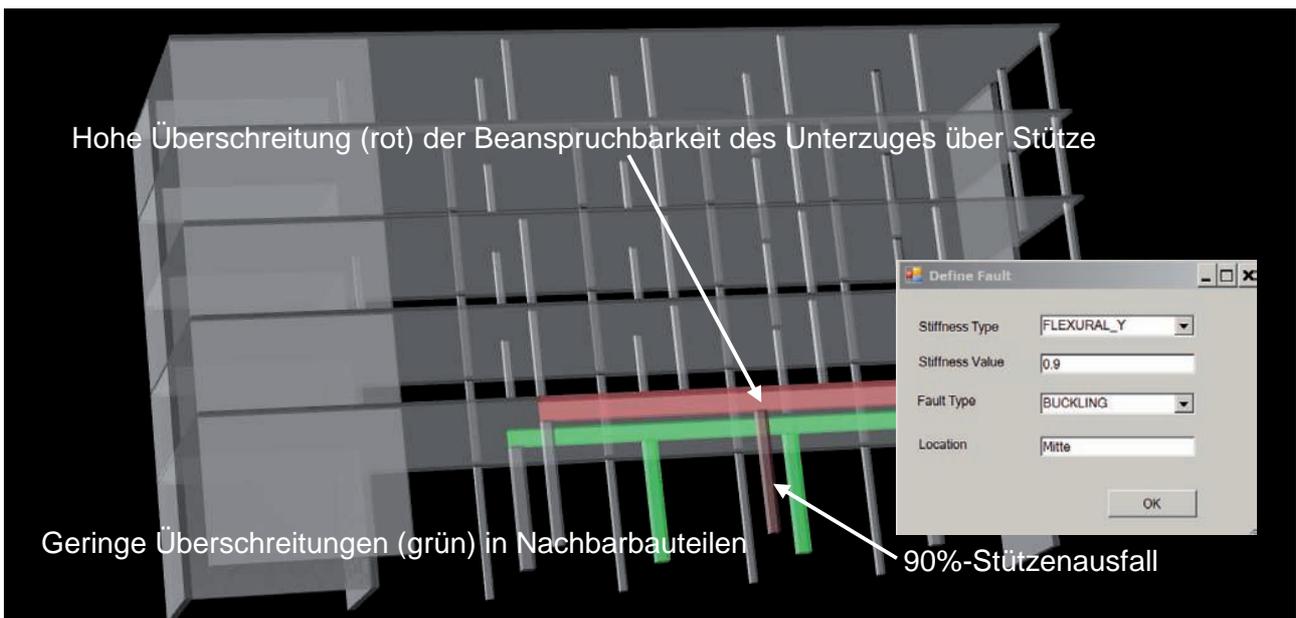


Abbildung 5: Erster Propagierungsschritt für Fehler „Stützenausfall“

Nun folgt ein weiterer Berechnungsschritt, indem das mechanische Modell mit der modifizierten Steifigkeit (über Einführung eines Fließgelenkes) mit der FE-Software nochmals berechnet wird. Dies geschieht durch Überlagerung des Originallastfalles mit der entsprechenden Einflussfunktion (1-Moment im Fließgelenk). Hieraus ergeben sich weitere Schwächungen des Tragwerks, die immer wieder wie oben beschrieben in das Berechnungsmodell zurückgeschrieben werden, bis entweder der Planer die Berechnung stoppt, das Tragwerk während des Kollapsvorgangs einen neuen Gleichgewichtszustand findet oder ein Teiltragsystem bzw. das Bauwerk instabil wird. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis nach fünf weiteren Propagierungsschritten. Dabei wird deutlich, dass der Kollapsvorgang fortschreitet, indem sukzessiv weitere Bauteile ausfallen.

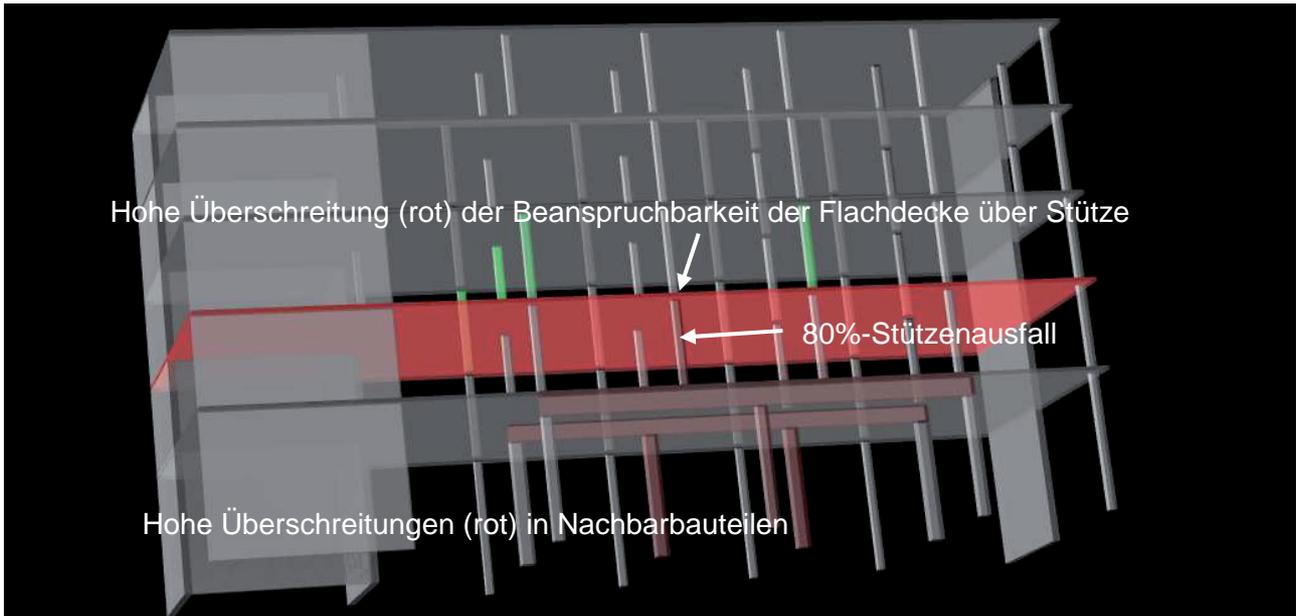


Abbildung 6: Sechster Propagierungsschritt für Folgefehler aus Fehler „Stützensausfall“

Da immer nur ein Bauteil zu einem Zeitpunkt ausfallen kann, also keine Gleichzeitigkeit existiert, ergeben sich mehrere Propagierungsschritte aus einer Bauteilschwächung. Nachdem für jeden zu betrachtenden Fehler solch eine vereinfachte Kollapsberechnung durchgeführt worden ist, können in der FMEA-Sitzung von allen Beteiligten die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten sowie die Kennzahl der Fehlerfolge gewählt werden, wonach automatisch die Risikoprioritätszahlen (RPZ) ermittelt werden. Sollten hohe RPZ's auftreten, sind verantwortlich Maßnahmen zu deren Beseitigung festzulegen, die bis zur Überarbeitung des statischen Konzeptes reichen können.

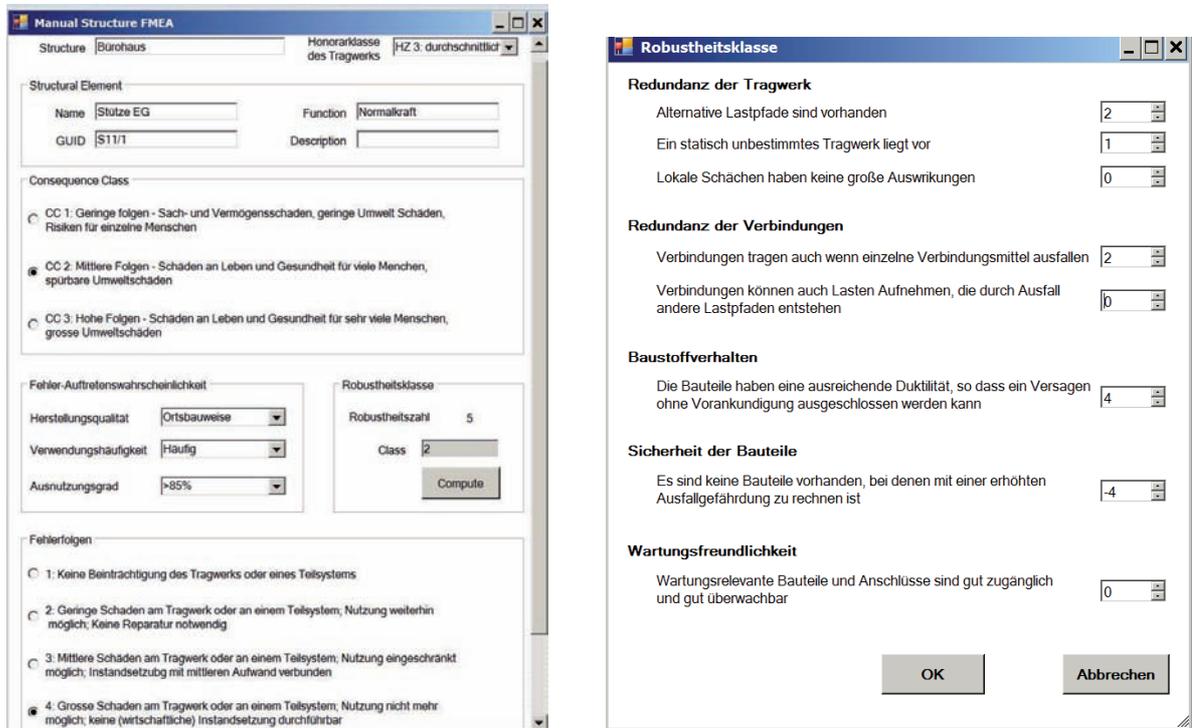


Abbildung 7: Manuelle Bestimmung der Schadensfolge ohne Berechnung

Als weitere Alternative ist es möglich ohne eine Kollapsberechnung die Folgen für einen Fehler festzulegen. Dies ist in Abbildung 7 dargestellt. Dabei kann der Nutzer über eine Abfrage der erforderlichen Informationen durch die Software, die Schadensfolge für einzelne Fehler selbst abschätzen. Das Ergebnis beider Alternativen führt zu den Ergebnissen, die mit dem FMEA-Table-Editor bearbeitet und als Formblätter ausgedruckt werden können.

4. Beurteilung der Ergebnisse und Abschätzen des Risikos über RPZ in Team

Der Table-Editor zeigt die Ergebnisse in zwei Tabellen an (siehe Abbildung 8). Die untere Tabelle beinhaltet die Ergebnisse der einzelnen Berechnungsschritte mit Elementnummer, Positionsnummer, Versagensart, absoluter Schnittgröße, die Überschreitung der Beanspruchbarkeit in Prozent sowie die Effekte auf das Bauteil sowie den daraus resultierenden Fehlern für den nächsten Berechnungsschritt. Im konkreten Beispiel würde der Unterzug UZ12/1 auf Biegung Versagen, da aus einem negativen Stützmoment ein positives Feldmoment infolge der Stützenschwächung wird. Es stellt sich als resultierender Fehler ein Fließen ein, welches zu einem Steifigkeitsabfall von 95 Prozent führt, ohne dass weitere Kräfte in diesem Querschnitt aufgenommen werden können.

The screenshot shows the 'Structure FMEA Table Editor' window. It contains two tables. The top table is a summary table with columns: GUID, Name, Function, Fault Type, Possible Cause, A Remedial Action, Local Effect, System Level Effects, B Detection Means, E, RPN, and Control. The bottom table is a detailed calculation table with columns: Iteration Level, Element ID, Element Name, Reaction Type, Local Actual Value, Percentage Change, Effect, Resultant Fault, and Comment. The bottom table shows 12 rows of data for various structural elements like Beams and Columns, detailing their failure modes and the resulting effects on the system.

Abbildung 8: Ergebnisse für Berechnungsschritte und die Folgen auf Tragsystem- oder Bauwerksebene

In der oberen Tabelle können von den Sitzungsteilnehmern die entsprechenden Zahlen zur Bewertung eingetragen werden, auf deren Grundlage die Software die RPZ berechnet. Durch dieses zweistufige Prinzip kann der FMEA-Editor auch ohne das Modul der Kollapsberechnung benutzt werden, was von einem Partnerbüro als wichtiges Merkmal betrachtet wurde. Abschließend kann der Nutzer der Software DIN-konform die Ergebnisse über die FMEA-Formblätter dokumentieren.

12 Zusammenfassung

12.1 Schlussfolgerungen

Das Projekt hat eine geschlossene Lösung zur QS in der Tragwerksplanung nach den Leistungsphasen 2 und 3 der HOAI entwickelt. Das erarbeitete QS-System geht über die EN ISO 9001 sowie die generische FMEA-Methode hinaus, da es nicht nur formale Schritte und erforderliche Dokumente definiert, sondern auch tragwerksplanungsbezogene Inhalte. Das im Projekt entwickelte QS-System beruht auf zwei Säulen:

- dem Leitfaden zur „Tragwerk-FMEA“, der den Prozess der Qualitätssicherung mit seinen einzelnen Schritten in Abhängigkeit des vorhandenen Risikos (Konsequenzklasse, Honorarzone, Robustheit) definiert.
- der modellbasierten Lösung mittels Einflussfunktion und qualitativer Verhaltensmodellierung, die es ermöglicht – auch bei Bauwerken mit komplexem Lastabtrag - Folgen von Bauteilschwächungen bis hin zu Kollapsvorgängen abzuschätzen.

Erst die Verbindung der modellbasierten Lösung mit den Einflussfunktionen erlaubt es, den FMEA-Prozess modellbasiert formal auf den Computer abzubilden und seine Korrektheit sicherzustellen, was gerade bei einer sicherheitsrelevanten Unterstützung durch den Computer wichtig für die Akzeptanz in der Praxis ist.

Das entwickelte QS-System ist über die bearbeiteten Bauwerksklassen hinaus skalierbar, so dass eine breite Anwendungsbasis sichergestellt ist. Der Leitfaden samt Arbeitsblättern kann sofort von Tragwerksplanern angewendet werden. Die Methode der Einflussfunktionen bedarf noch einer Implementierung durch die Softwarehäuser, da die Einflussfunktionen bisher nur prototypisch mit dem Programmsystem SOFiSTiK umgesetzt wurden.

Als langfristiges Forschungsziel kann die Tragwerk-FMEA um die FMEA in der Konstruktion und der Ausführung ergänzt werden, wodurch sich eine geschlossene Qualitätssicherung für die Tragwerksplanung ergäbe.

12.2 Offene Fragen und weiterer Forschungsbedarf

Die FMEA-Methode wird bisher nur vereinzelt von Büros der Tragwerksplanung in der Praxis zur QS eingesetzt, da auf den planenden Büros ein enormer Konkurrenzdruck lastet. Dadurch wird ein verbreiteter Einsatz nur möglich, wenn sich die Methode nahtlos und mit wenig zusätzlichem Aufwand einfügen lässt. Leider ist dies nur schwer zu erreichen, da in den frühen Phasen die meisten Informationen in Papierform vorliegen und so nicht für die Verarbeitung mit dem Computer zugänglich sind. Dies trifft insbesondere auf das statische Konzept zu, dass für die Tragwerk-FMEA als Startpunkt benötigt wird. Es bedarf somit weiterer Forschung zur Digitalisierung des Tragkonzeptes. Desweiteren ist der Begriff der Qualitätssicherung in der Tragwerksplanung im Gegensatz zur Produktentwicklung in der Automobilindustrie nicht verbreitet. Dies führt dazu, dass es kein Berufsbild des Qualitätsmanagers in diesem Bereich gibt und somit die Methode der Tragwerk-FMEA durch Anwendung von den Beteiligten erlernt werden muss. Daraus ergaben sich folgende wesentliche Fragestellungen bei der Anwendung in den Büros:

- Wie lassen sich die Bewertungskriterien, insbesondere für die Auftretenswahrscheinlichkeit und die Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehlerursache, die offensichtlich stark von der persönlichen Einschätzung jeden Teilnehmers abhängig sind, objektivieren?

- Wie können die in den Formblättern festgehaltenen Maßnahmen wirksam über alle Leistungsphasen bis zur Ausführung verfolgt werden?
- Wie kann eine FMEA-Sitzung strukturiert durchgeführt werden, wenn man in die Kollapsberechnung in der Sitzung in Echtzeit durchführen will?
- Definition: Die Definition der Fehlerfolgen war oft zu unpräzise. Als Folge wurde häufig genannt: "Gebäude stürzt ein", gefolgt von der Bewertungszahl "5".
- Fehlerursachen und Bewertung: Die Fehlerursachen wurden nur unzureichend betrachtet. Dadurch fiel auch die Bewertung der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit häufig weg

Diese Fragen können nur beantwortet werden, wenn eine Wissensbasis in Form von Bauteilkatalogen, den entsprechenden Wahrscheinlichkeiten sowie den dazugehörigen Fehlern bürointern aufgebaut wird. Um die modellbasierte Lösung breiter anwendbar zu machen, sind folgende Fragen zu beantworten:

- Wie kann aus einer Positionsstatik ein dreidimensionales Modell abgeleitet werden?
- Wie können sinnvoll Kataloge aufgebaut werden?
- Wie können Ergebnisse von Bauteilversuchen zur Beschreibung des realistischen Verhaltens von Bauteilen genutzt werden?

Abschließend können bei der Weiterentwicklung der modellbasierten Tragwerk-FMEA die Annahmen für die Modellierung reduziert werden. So wird momentan davon ausgegangen, dass sich das Verhalten linear-elastisch mit plastischer Umlagerung beschreiben lässt, um die qualitative Robustheit des Tragwerks abzuschätzen. Weiterhin wird von nicht-parallelem Bauteilversagen ausgegangen, was durch eine schrittweise Lastaufbringung umgesetzt wird. Bei der Modellierung des postkritischen Versagens sind noch die Verbindungen zwischen den Elementen in einer Bibliothek zu beschreiben, da die Verbindungen wesentlich zur Robustheit beitragen. Dies könnte durch eine genauere Auswertung der entsprechenden konstruktiven Regeln in den DIN-Normen erreicht werden.

12.3 Ergebnisse und deren Veröffentlichung

Das erarbeitete QS-System umfasst einen Leitfaden zur Durchführung der Tragwerk-FMEA mit Beispielarbeitsblätter. Der Leitfaden geht auf die speziellen Anforderungen des Bauwesens ein und ist manuell für einfachere Tragkonstruktionen anwendbar. Der Leitfaden wird dem BVPI übergeben und soll als Grundlage für die Erarbeitung und Veröffentlichung einer Richtlinie dienen. Damit wird die in Deutschland bestehende Prüfmethodik transparent und kann auch über deutsche Grenzen hinweg kommuniziert werden.

Weiterhin ist ein Softwareprototyp entwickelt worden, der die Teamsitzung zur Beurteilung des statischen Konzeptes unterstützt. Die Unterstützung beginnt für einfache Tragwerke bei einer automatischen Generierung der Formblätter und endet für komplexere Tragkonstruktionen bei einer qualitativen Analyse der Robustheit. Der Prototyp besteht aus einem FMEA-Editor, der modellbasierten Schlussfolgerungskomponente, dem Visualisierer, dem Effect and Fault Manager und der kommerziellen FE-Software. Über das Internet sollen für potentielle Anwender folgende Informationen zugänglich gemacht werden:

- FMEA-Editor,
- Demonstrationsfilm einer Teamsitzung mit Anwendung der Software,
- Kontaktadressen für Interessierte bzgl. möglicher Beratung und Anpassung der Software für ihre Zwecke.

Außerdem werden alle Unterlagen, die im Rahmen des Forschungsprojektes entstanden sind, über die Projektwebseite www.tragwerk-fmea.de veröffentlicht und darüber der breiten Masse der Ingenieure zugänglich gemacht. Darüber hinaus ist ein Workshop mit Softwarehäusern geplant, um die Ergebnisse vorzustellen. Im Rahmen eines Fachtreffens ist der Austausch mit den betroffenen Interessengruppen (BVPI, Ingenieurbüros, Bauaufsicht, etc.) wünschenswert.