

Zusammenfassung

Zur Entwicklung einer Prüfmethodik „Tragwerk-FMEA“, die nach der Leistungsphase 3 angewendet werden soll, werden zwei Fallstudien, die in unterschiedlichen Büros durchgeführt worden sind, vorgestellt und ausgewertet. Die Prüfmethodik wird zu Beginn bezogen auf das Anwendungsgebiet „Tragwerksplanung“ kurz erläutert, bevor die Fallstudien vorgestellt werden. Bei den Studien wurde ein gemeinsames Referenzbeispiel benutzt. Die aus der Auswertung der beiden Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Ableitung einer einheitlichen Methodik für die Tragwerk-FMEA, die unter Praxisbedingungen benutzt werden kann. Das Augenmerk liegt auf einer sinnvollen Organisation der Team-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. In den Anhängen finden sich der globale Lastabtrag, eine genauere Beschreibung des Referenzbeispiels sowie die Ergebnisse der beiden Fallstudien.

Inhaltsverzeichnis

1. Vorbereitende Überlegungen zur Tragwerk-FMEA	2
2. Beschreibung der Fallstudie „Bürohaus X“	5
3. Durchführung der Tragwerk-FMEA an dem Bürohaus X	7
Literaturverzeichnis	13
Anhang A - Globaler Lastabtrag	
Anhang B - Sitzungsmappe	
Anhang C - Ergebnisse mit Formblättern Eisfeld Ingenieure	
Anhang D - Ergebnisse mit Formblättern WTM Engineers	

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

Bild 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 \geq 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.

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, dass 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.

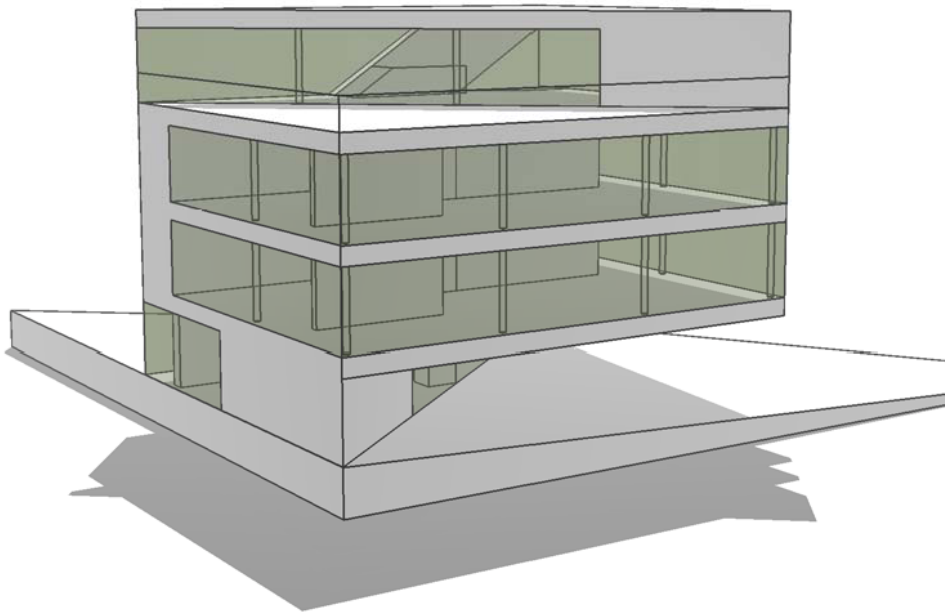


Bild 2: Bürohaus X

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 Bild 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.

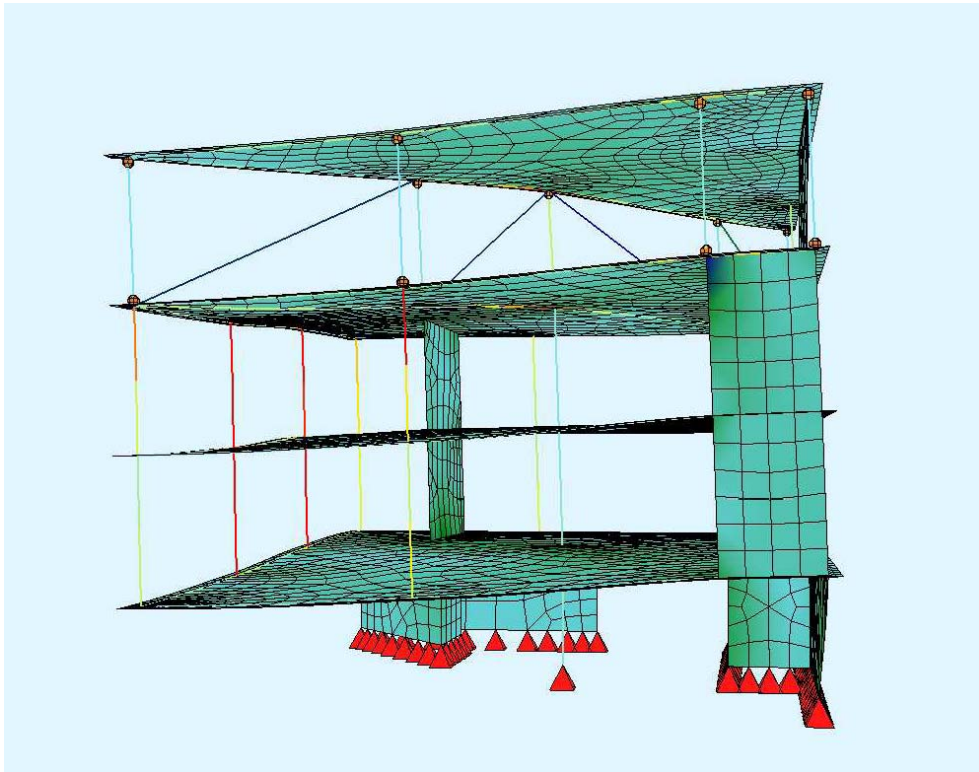


Bild 3: FE-Modell des Referenzbeispiels

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

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.

3.1 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	<u>18</u>	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								

Bild 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

tes 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)	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

Tabelle 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	Uwe Wolf 30.06.2009
				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	Uwe Wolf 30.06.2009
				Checkliste mit wichtigen Punkten erstellen					

Bild 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 Gesamttragelement hat die größte Auswirkung auf die Abhängung und wird mit "3" bewertet. Die Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeiten werden jeweils mit "2" bewertet.

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 Abhängig-

keiten 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 Einfeld 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.

3.3 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 lebhafte 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 Verlaufs 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

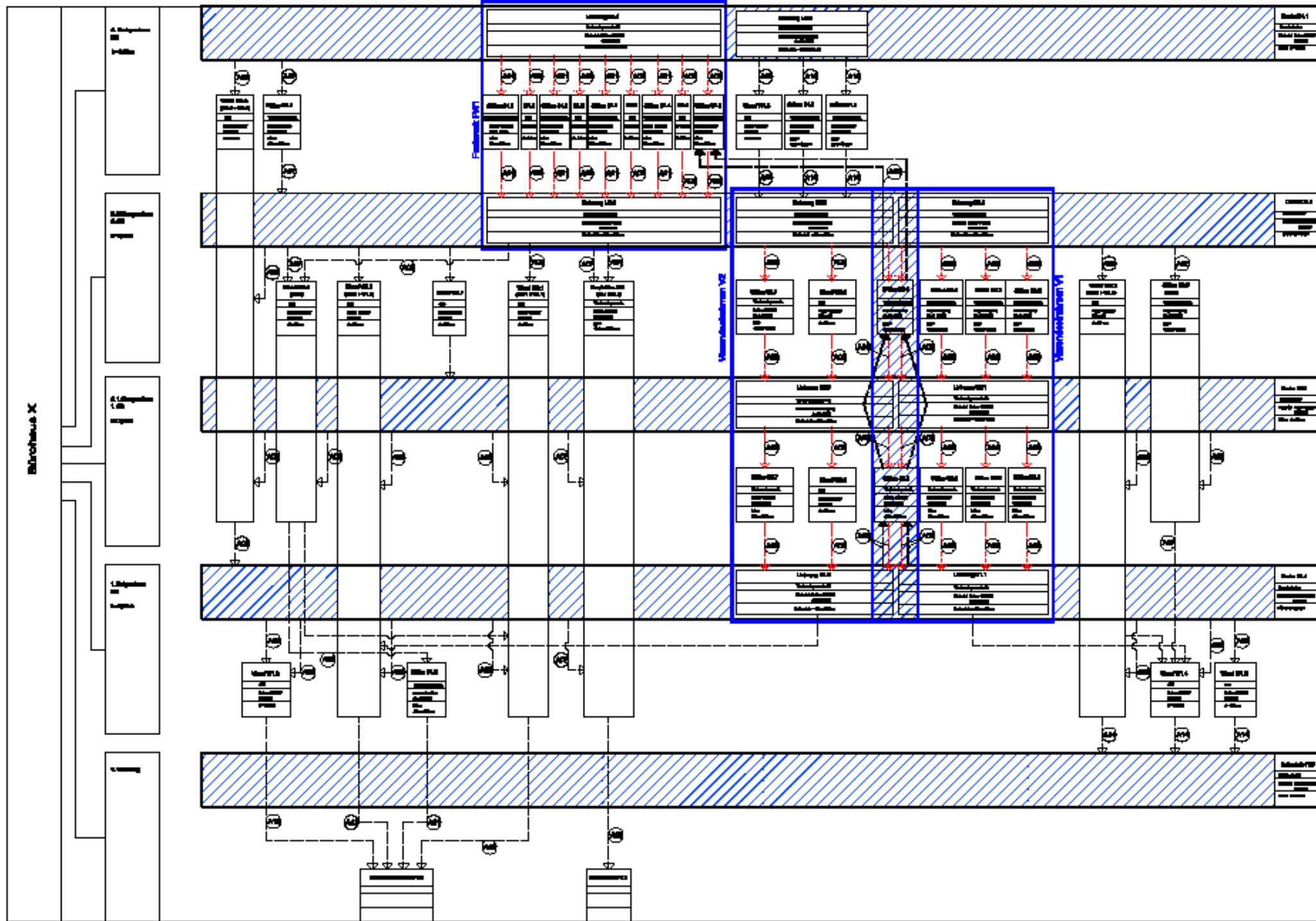
hingegen wurden Neuberechnungen für die betrachteten Systemschwächungen durchgeführt. Dies führt zunächst zu genaueren Aussagen aber auch zu einem sehr hohen Zeitaufwand.

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 Baumechanik 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

globaler Lastabtrag Bürohaus X



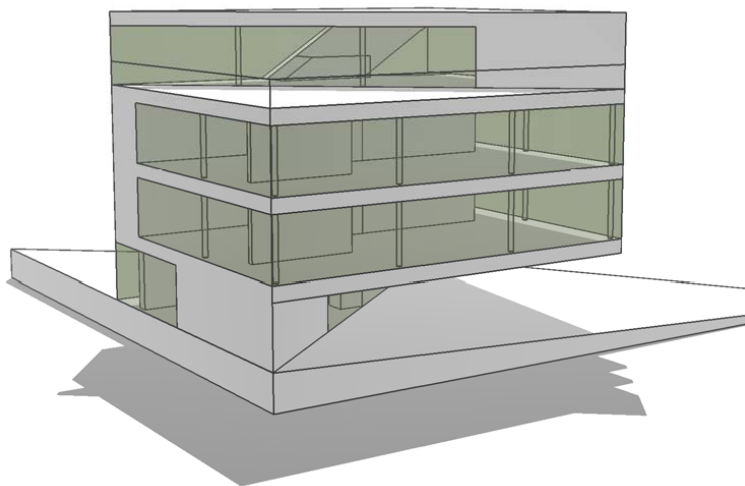
Anhang B – Sitzungsmappe
Einladung zu einer

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“.



Inhalt

1. Informationen zur FMEA	4
Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) – was ist das?	4
Wofür wurde sie entwickelt und in welchen Bereichen findet sie heute Anwendung?	4
FMEA im Bauwesen: wo und wie wendet man sie an?	4
Welches Ziel wird damit verfolgt?	4
Wer ist an diesem Projekt beteiligt und von wem wird es gefördert?	4
Was erwarten wir uns von einer Fehleranalyse- und Optimierungssitzung?	5
Wer ist an dieser Sitzung beteiligt?	5
2. Vorstellung des Projekts „Bürohaus X“	6
Beschreibung	6
Statisches Konzept und globaler Lastabtrag	6
Anhang	7
Ansichten	7
Grundrisse und Schnitt	9
Funktionsmodell	11
Lastabtrag Rahmen und Fachwerk	13

1. 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 Prüfsingenieure) 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

2. Vorstellung des Projekts „Bürohaus X“

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

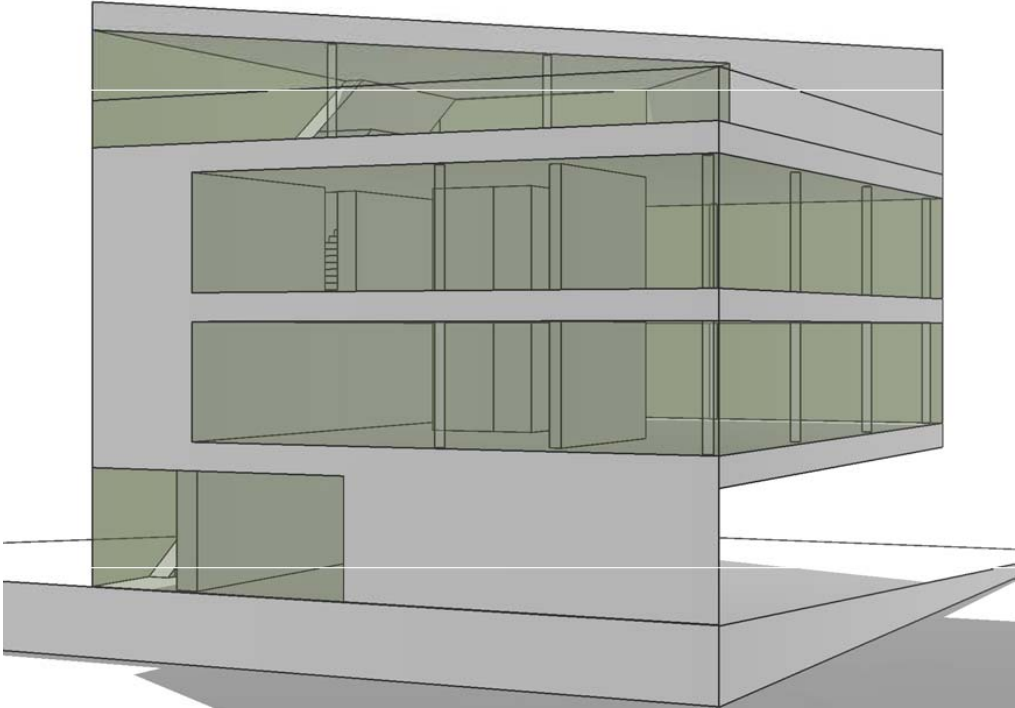
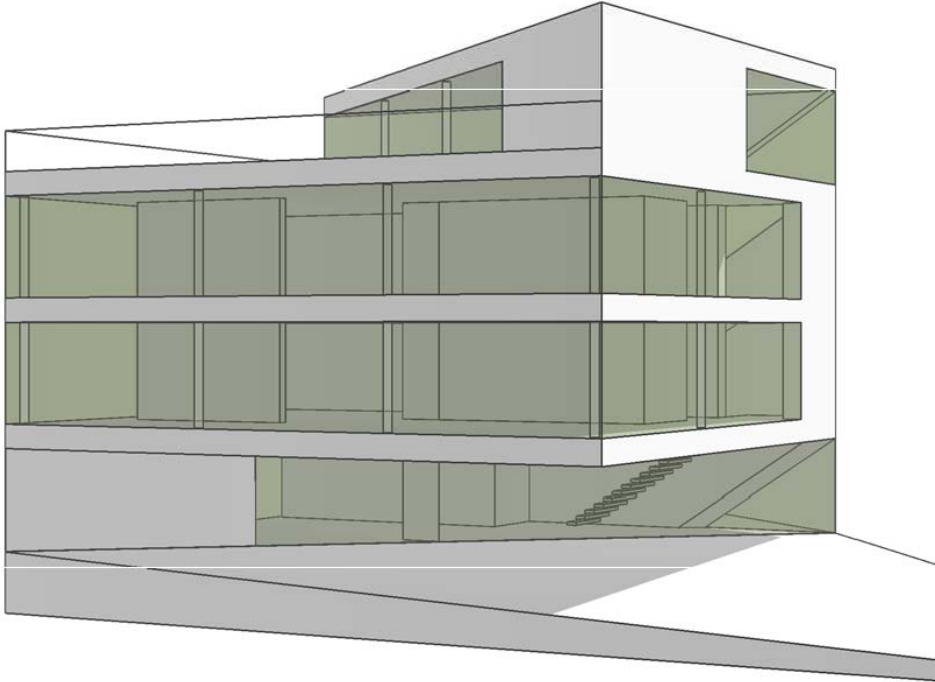
Statisches Konzept und globaler Lastabtrag

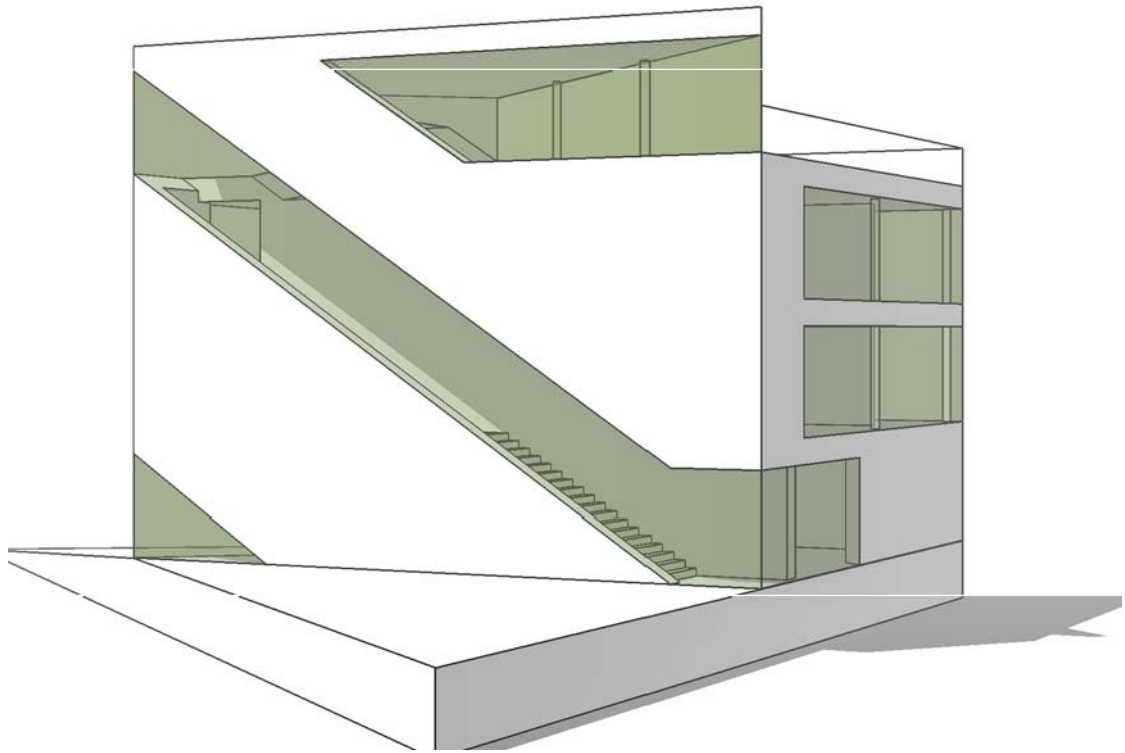
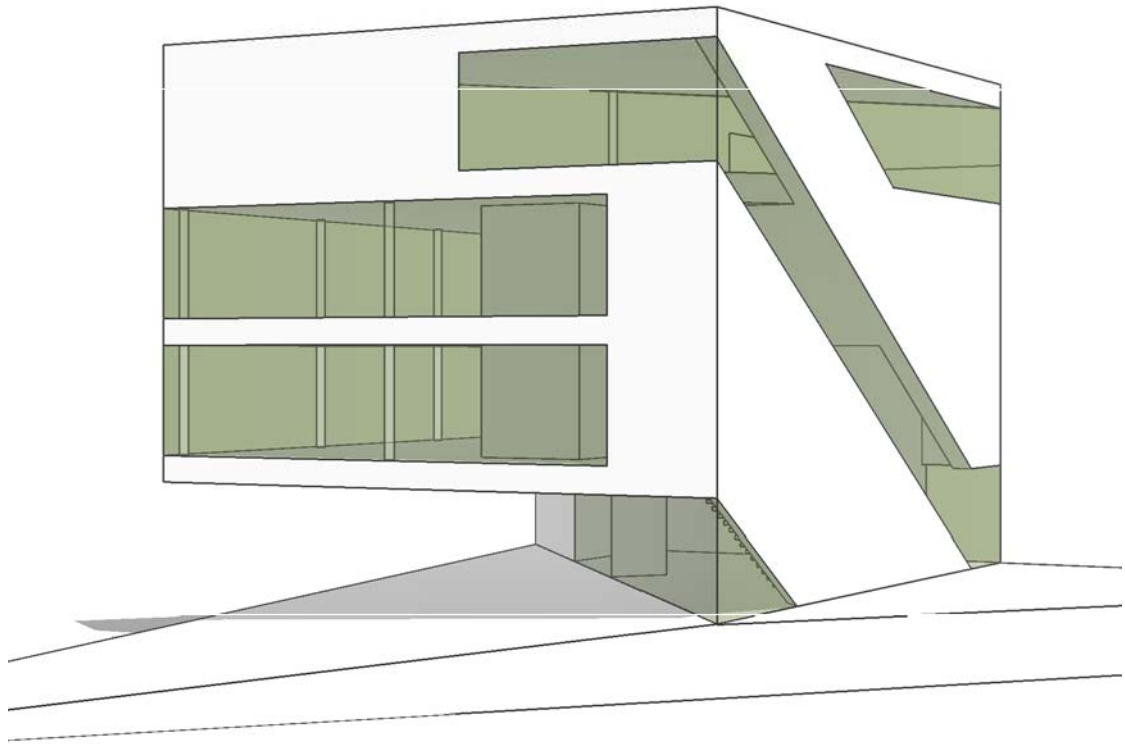
Aussteifung: innere und äußere Wände, vorwiegend im Bereich der Treppe (s. Grundrisse)

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

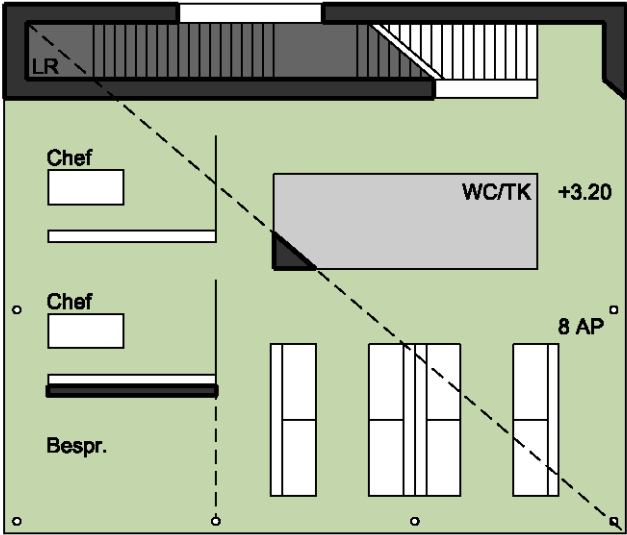
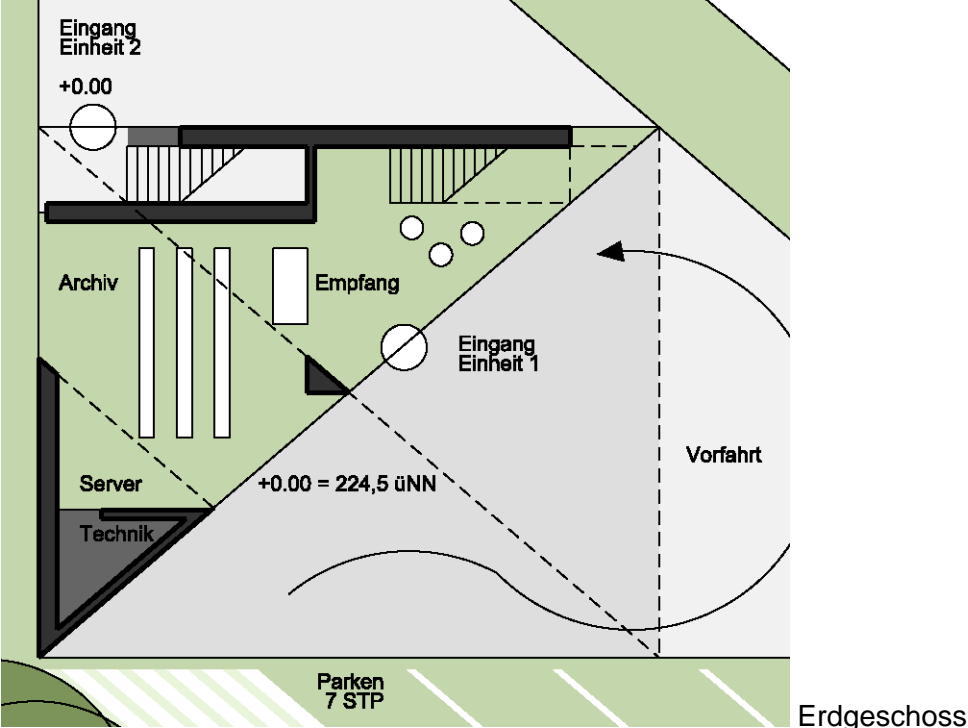
Auskragung: Aufnahme durch Vierendeelrahmen, Abtragung durch Fachwerk (s. Bauteilzeichnungen)

Anhang
Ansichten



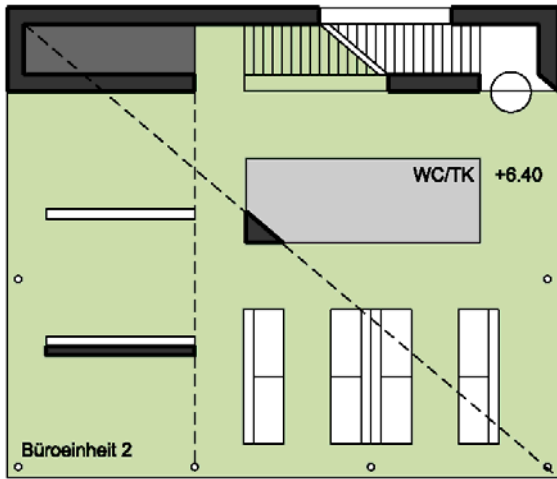


Grundrisse und Schnitt



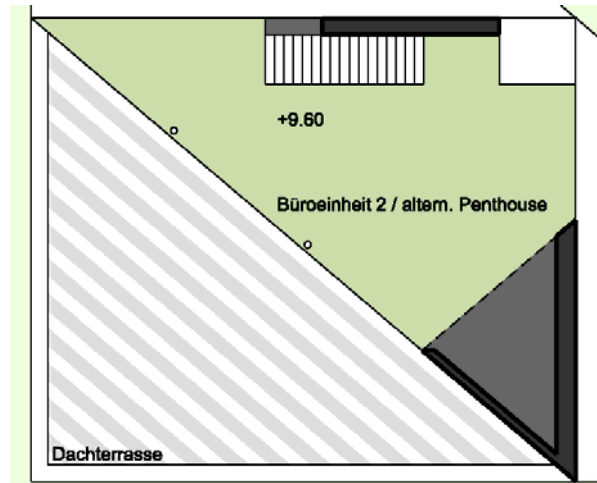
Obergeschoss E1
BGF = 211 qm

1. Obergeschoss

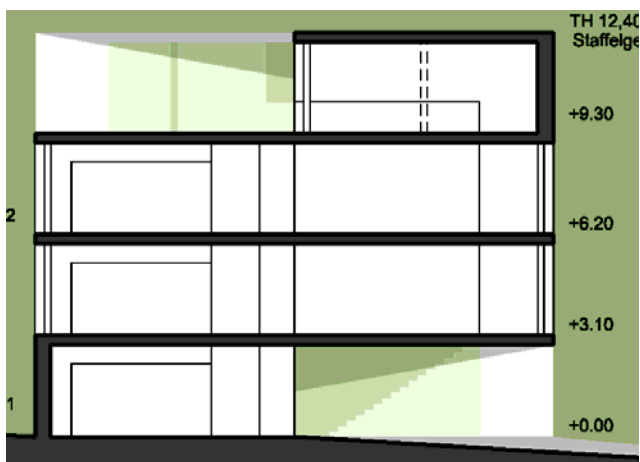


Obergeschoss E2
BGF = 228 qm

2. Obergeschoss

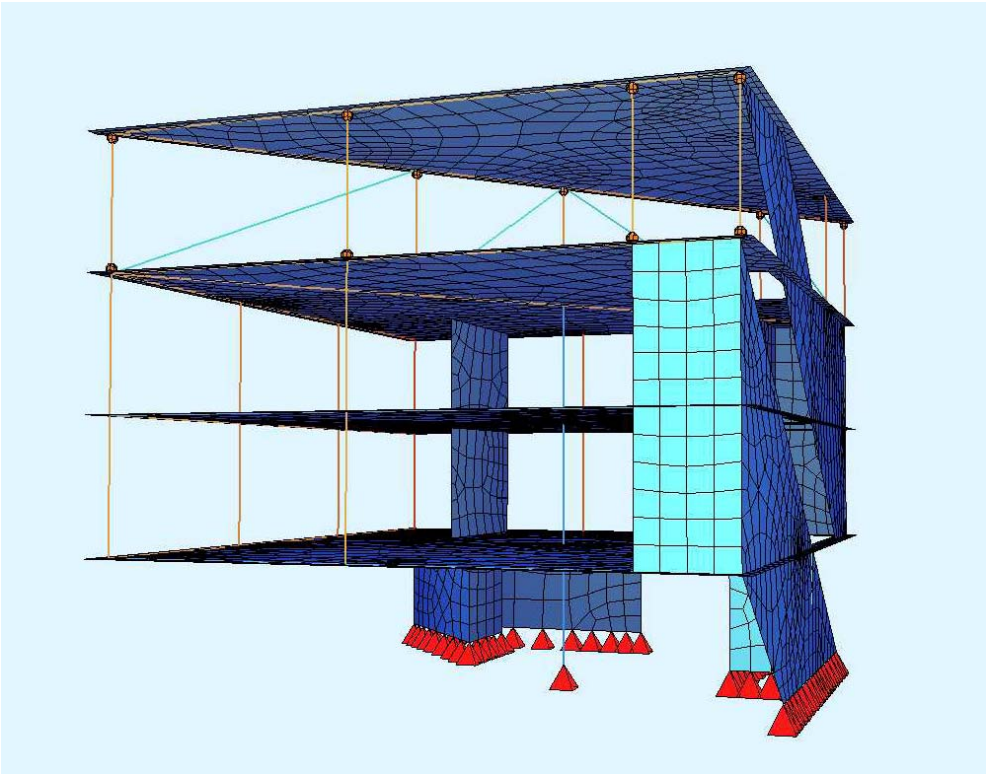
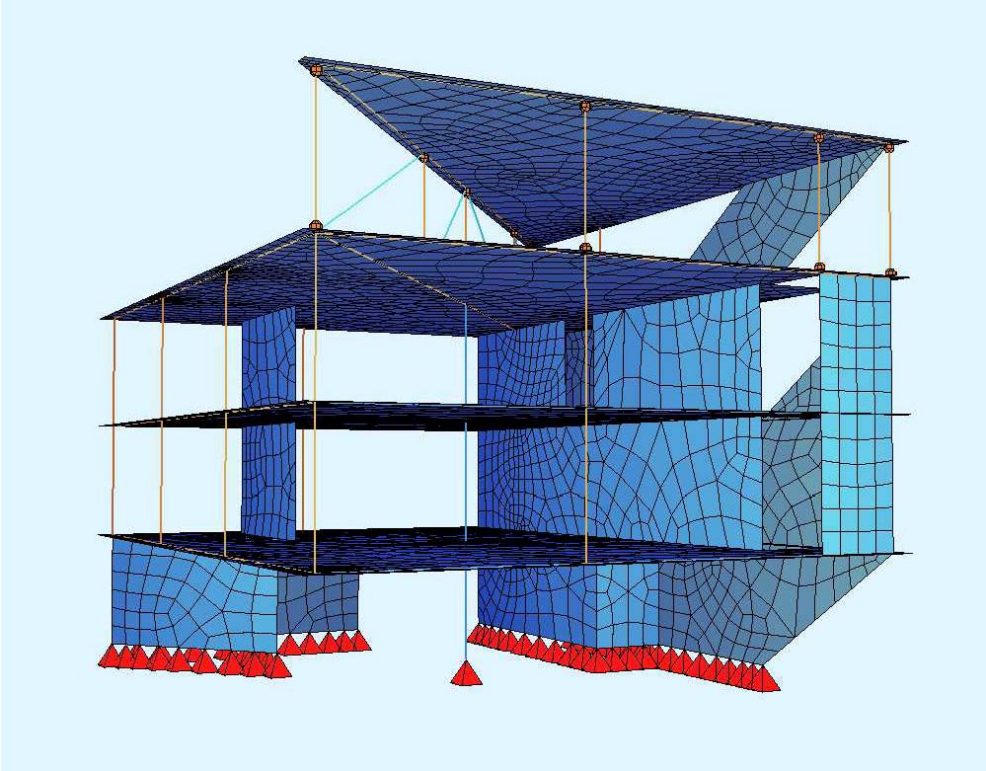


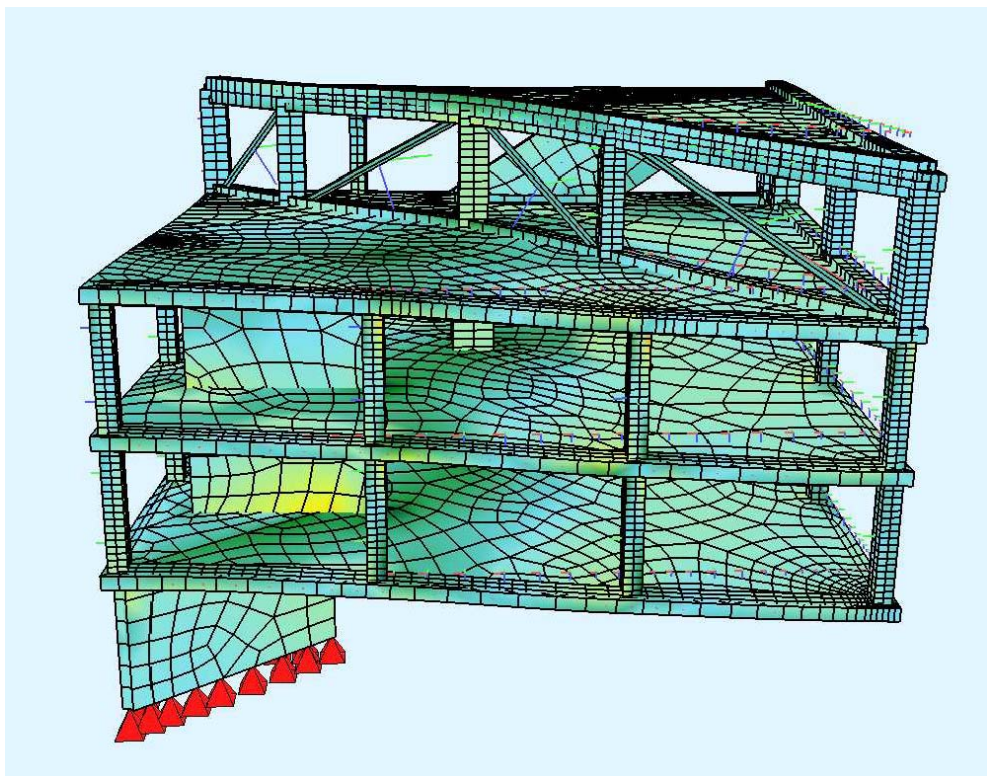
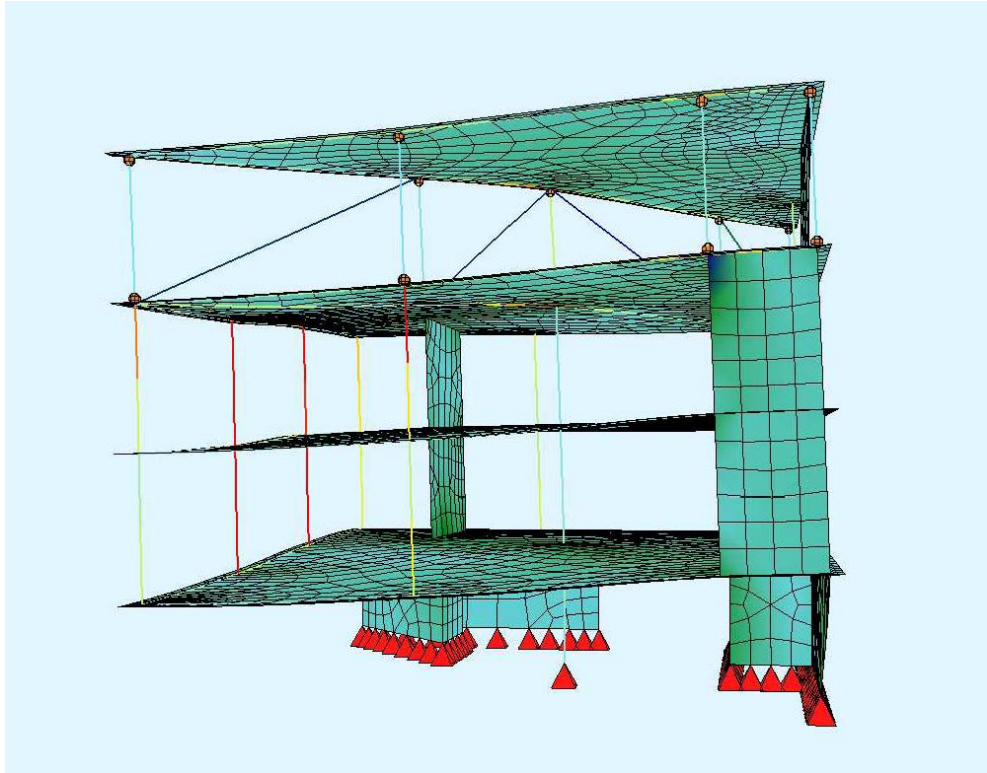
Dachgeschoss



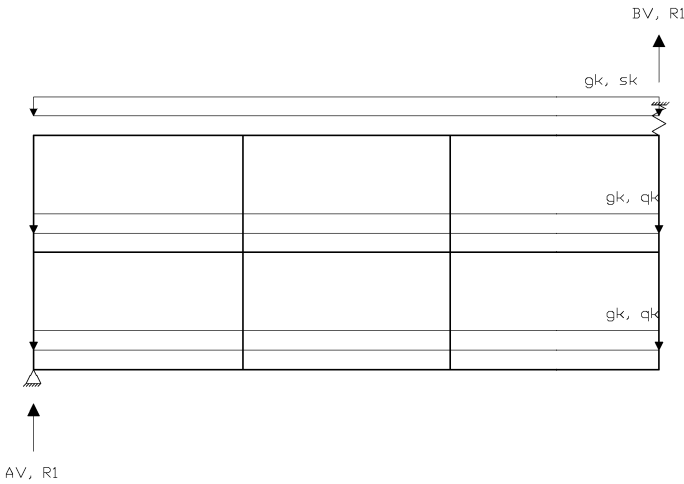
Schnitt

FE-Modell

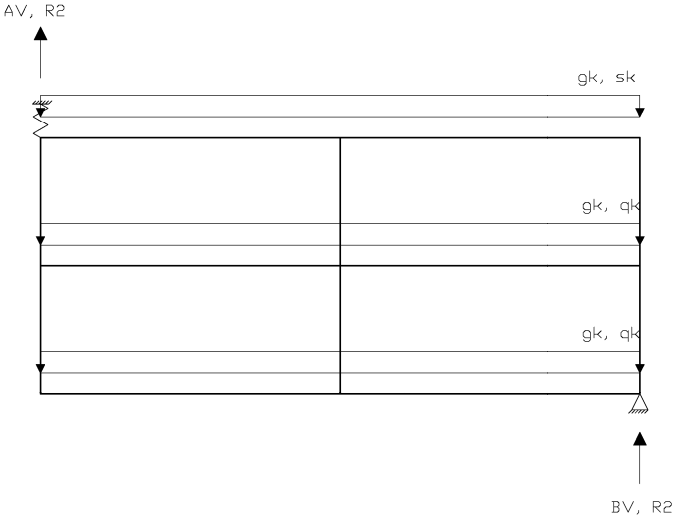




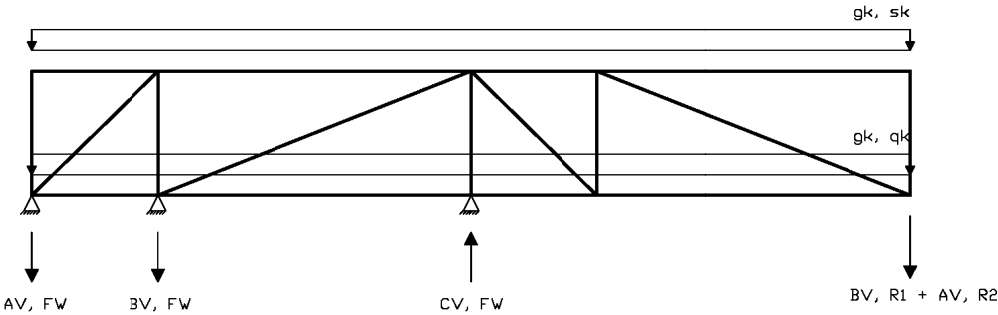
Lastabtrag Rahmen und Fachwerk



Vierendeelrahmen 1



Vierendeelrahmen 2



Fachwerk

Anhang C – Ergebnisse Eisfeld 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	<u>18</u>	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

Fachwerkr.: 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]

Fachwerkkr.: 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 Schnittgrößenermittlung	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	9		
		Kontrollliste mit Berechnungsschritten								
	Fehler in Bemessung	geeignetes Programm verwenden	1		3	unabhängige Kontrollberechnung	3	9		
		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: Vierendelr. VR1/VR2 (S3.5)	Erstellt von: Lie	Plan-Nr: 11161-SB-V-02
Funktion: Weiterleitung der Lasten aus U3.1 und U3.3 in Fachwerk	Erstellt am: 08.08.2009	
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 Vierendelrah. 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 Vierendelrah. 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								