

## Kurzbericht

# 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 bei den Autoren.

## Anlass/Ausgangslage

Die gesellschaftlichen und politischen Rahmenbedingungen führen zu verkürzten Planungs- und Genehmigungsverfahren, deren Folgen eine Vielzahl von Schäden durch menschliche Planungsfehler sind. An dieser Stelle setzt das Forschungsprojekt „Tragwerk-FMEA“ mit dem Ziel an, Fehler in der computerunterstützten Tragwerksplanung durch ein modellbasiertes Qualitätssicherungssystem auf Grundlage der FMEA-Methode (DIN EN 60812) zu vermeiden.

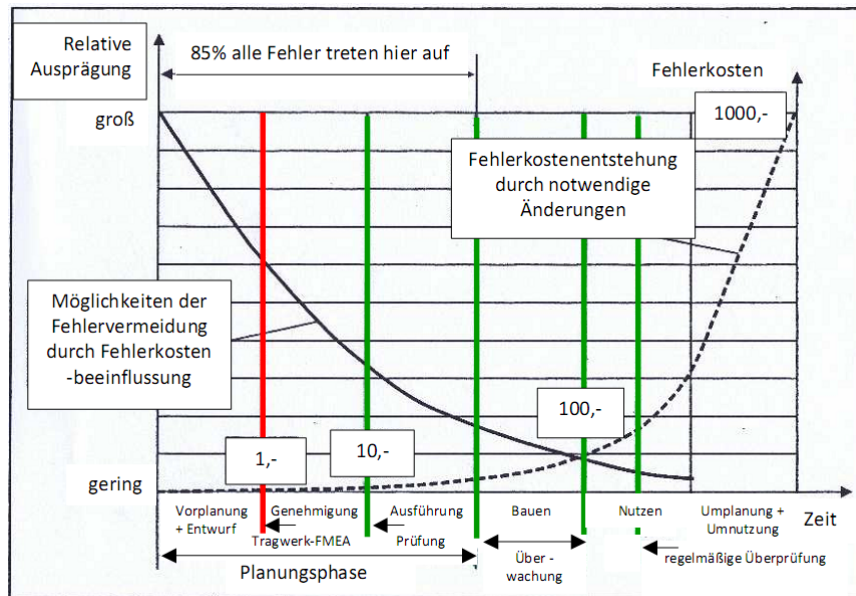


Abbildung 1: Einfluss von Fehlern auf Kosten über die Bauwerkslebensdauer

## Gegenstand des Forschungsvorhabens

Das Projekt gliedert sich in folgende Milestones:

1. die Aufnahme des IST-Zustandes in der Praxis,
2. den Entwurf des QS-Systems,
3. deren Finalisierung als systematische Prüfmethodik,
4. die Entwicklung eines modellbasierten Softwareprototypen und
5. die Evaluierung der entwickelten Werkzeuge.

Zu Beginn werden zur Aufnahme des *IST-Zustandes* die Ergebnisse von Interviews und einer Umfrage, die im Projekt unter Prüffingenieuren durchgeführt wurde, zum Stand der QS und der vorherrschenden Fehler in der Praxis ausgewertet. Auf dieser Grundlage wird ein Vorschlag zur präventiven QS skizziert. Um die Arbeitsschritte des Ingenieurs beim Schlussfolgern über das qualitative Tragverhalten formal auf ein berechenbares Modell abzubilden, wird die qualitative Verhaltensmodellierung eingeführt. Sie stellt die Grundlage für die Teilautomatisierung von Arbeitsschritten des Ingenieurs dar. Abschließend wird das QS-System in Hinblick auf die softwaretechnische Umsetzung unter den gegebenen Arbeitsbedingungen grob spezifiziert.

Danach werden für den *Entwurf des QS* von zwei unterschiedlichen Büros FMEA-Analysen an einem Referenzbeispiel durchgeführt. Die aus der Auswertung der beiden Fallstudien gewonnenen Erkenntnisse dienen zur Ableitung einer einheitlichen Methodik, die als Grundlage zur Erarbeitung des Leitfadens „Tragwerk-FMEA“ dient. Die Prüfmethodik wird zu Beginn 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.

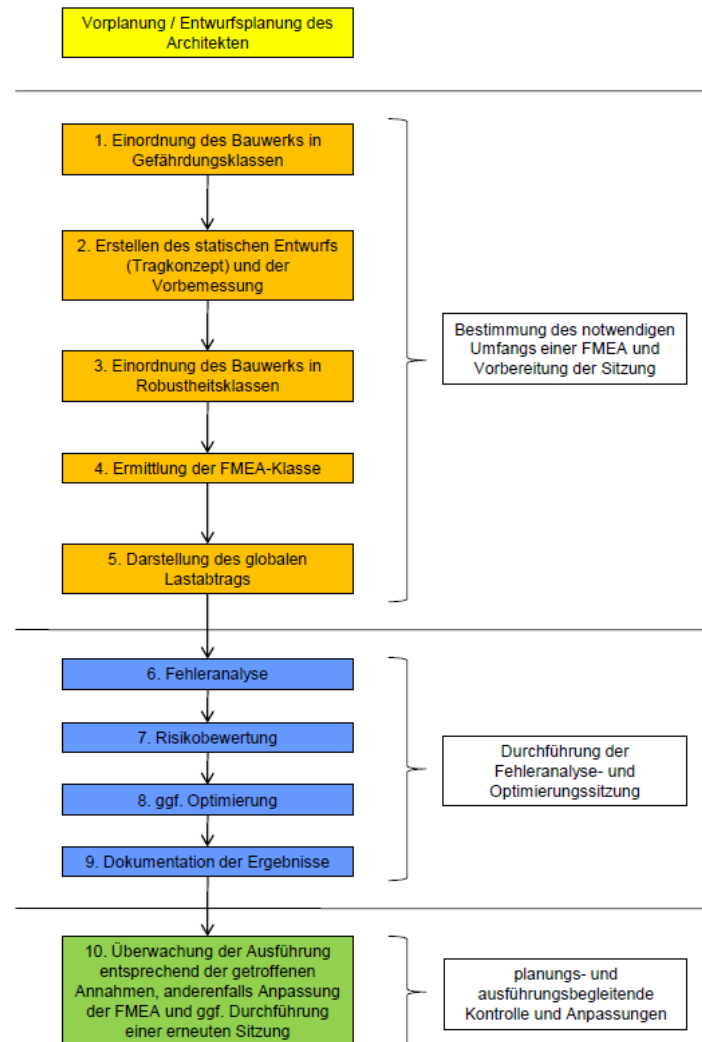


Abbildung 2: Ablauf der Tragwerk-FMEA

Das *finale QS* 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 Schadensfolgeklassen, 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. Der Leitfaden wird bei den beteiligten Büros WTM Engineers und Werner Sobek vorgestellt und in einer Teamsitzung angewendet. Die Vor- und Nachteile der Tragwerk-FMEA werden beschrieben. Weiterhin werden die Bauteilbibliotheken für ein einfaches Tragwerk aus Holz und einen üblichen Hochbau aus Stahlbeton entwickelt. Die Bibliotheken stellen systematisch für einzelne Tragelemente und deren Anschlüsse an benachbarte Bauteile (Lasteinleitung, Lastweiterleitung) die dazugehörigen Fehlerarten, Fehlerursachen und Fehlerfolgen 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.

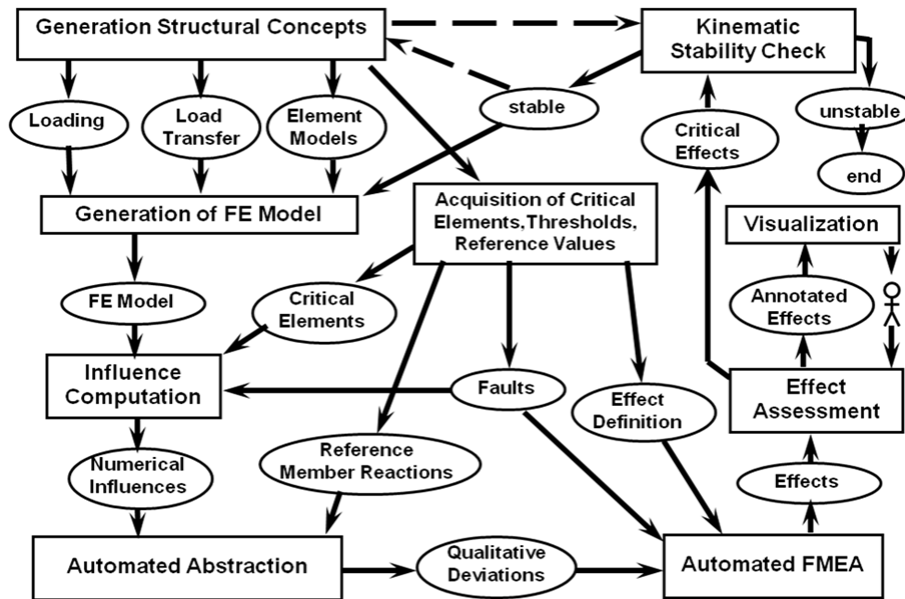


Abbildung 3: Architektur der Tragwerk-FMEA

Die *Entwicklung des modellbasierten Prototypen* beginnt mit Erarbeitung des Modellkonzepts der Tragwerk-FMEA und seinen relevanten Eigenschaften. 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. Die FE-Methode mit ihren Einflussfunktionen wird genutzt, 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 wird die Sensitivitätsanalyse eingesetzt, 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.

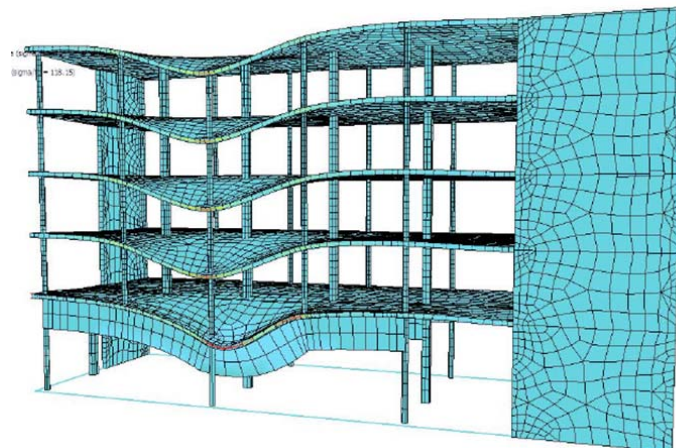


Bild 5: Einflussfunktion für das Stützmoment im Unterzug

Die *Evaluierung der Werkzeuge* findet durch Anwendung des Prototypen an o. g. Hochbau statt. Es ist außerdem geplant, den Prototypen auch noch bei den Partnerbüros zu testen.

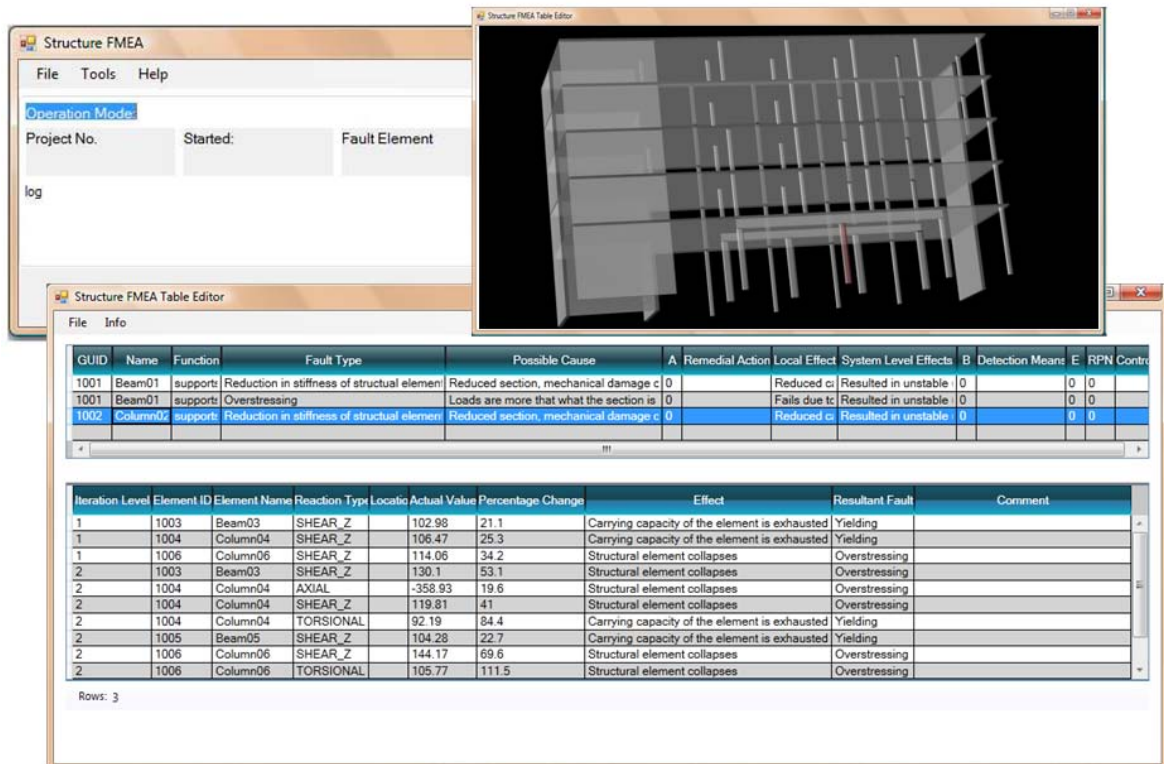


Abbildung 4: GUI-Komponenten der Software Tragwerk-FMEA

## Fazit

Das Ziel ist geeignete Hilfsmittel zur präventiven Fehlervermeidung für die frühen Phasen der Tragwerksplanung und die bautechnische Prüfung zu erarbeiten.

Die Ergebnisse umfassen den Leitfaden zur Durchführung einer Tragwerk-FMEA mit Hochbaubeispielen und einen Softwareprototypen, der den Planer/Prüfingenieur bei der qualitativen Analyse der Robustheit bei komplexen Bauwerken unterstützt. Der Prototyp besteht aus der Steuerungskomponente zur Durchführung einer Tragwerk-FMEA, einem FMEA-Table-Editor zur Festlegung des Risikos und dem Visualisierer zur Auswahl von Bauteilfehlern und der Darstellung deren Fehlerfolgen, die mit einer kommerziellen FE-Software über Einflussfunktionen berechnet werden.

## Eckdaten

Kurztitel: Tragwerk-FMEA

Forscher:

Prof.-Ing. Friedel Hartmann, Prof.-Ing. Werner Seim, Prof. Peter Struss, Dr.-Ing. Michael Eisfeld

Projektleitung:

Dr.-Ing. Michael Eisfeld MSc und Prof.-Ing. Friedel Hartmann

Gesamtkosten: 399.788,97 € Anteil Bundeszuschuss: 58,6 %, Projektlaufzeit: 21 Monate