



Universität für Bodenkultur Wien

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Konstruktiven Ingenieurbau

Peter-Jordanstraße 82, 1190 WIEN

Konstruktives Projekt

Wissenschaftliche Analyse der numerischen Zuverlässigkeits- und Robustheitsbewertung der Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit abgehängter Deckensysteme

Andre BEIGEL

Agnetha JÖRG

Wien, Dezember 2020

Kurzfassung

Diese Arbeit ist Teil eines Zulassungsverfahrens und befasst sich mit den Projektschritten, bei welchen es um die automatisierte Analyse geht. Das Gesamtthema, welches die Arbeit umschließt, ist die Robustheit von Systemen. Die Robustheit geht Hand in Hand mit der Versagenswahrscheinlichkeit beziehungsweise der Sicherheitsindizes. Die Frage ist, wann versagt ein betrachtetes System und mit welcher Wahrscheinlichkeit ist es zulässig, dass dieses versagt.

Für diese Arbeit wird ein abgehängtes Deckensystem betrachtet, welches von Nägeln getragen wird. Es stellt sich die Frage, mit welcher Sicherheit die Nägel das System tragen bzw. wann eine gewünschte Sicherheit erreicht wird. Hierfür werden die Versagenswahrscheinlichkeiten von Systemen mit unterschiedlichen Nagelabständen berechnet und verglichen. Die Vorgehensweise für das Erhalten der Wahrscheinlichkeiten nimmt den Hauptteil der Arbeit in Anspruch. Es werden mit Hilfe einer sehr großen Stichprobe von Zufallswerten, welche durch Verwendung der Monte-Carlo-Methode erhalten werden, Auswertungen durchgeführt. Die Berechnung erfolgt mit dem Statikprogramm Sofistik, in welchem ein Code definiert ist, der das System beschreibt und die gesuchten Werte ermittelt. Für eine leichtere Verständlichkeit des Codes wird auf diesen besonders eingegangen.

Abschließend werden auf Grund der Ergebnisse die Sicherheitsindizes ermittelt, mit welchen Robustheitsaussagen über die Systeme getroffen werden können. Es können mit Hilfe der Indizes Vergleiche zwischen den Systemen vorgenommen werden und so der Einfluss des variierten Nagelabstandes erkannt werden.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
1 Robustheit von Ingenieurstrukturen.....	1
1.1 Allgemein.....	1
1.2 Konstruktive Überlegungen.....	3
1.3 Entwurfsszenarien für Robustheit	6
1.3.1 Entwurfsszenarien	6
1.3.2 Entwurf für bekannte zufällige Ereignisse.....	6
1.3.3 Entwurf für Aktionen aus nicht spezifizierten Bedrohungen	7
1.4 Entwurfsstrategien	9
1.4.1 Allgemein	9
1.4.2 Alternative Lastpfadstrategie	10
1.4.3 Strategie zur Reduzierung der Folgen	12
1.4.4 Ereignissteuerungsstrategie	13
1.4.5 Strategie für die Gestaltung von Schlüsselementen.....	13
1.4.6 Präskriptive Regeln.....	14
1.5 Robustheitsquantifizierung	15
1.6 Robustheitskriterien	15
1.7 Robustheit bestehender Strukturen	16
1.8 Quantitative Robustheitsbewertung & Redundanzleistungsindikatoren	17
1.8.1 Implementierte Methodik – Redundanzkonzepte.....	18
1.8.2 steifigkeitsbasierter Robustheitsindex.....	19
1.8.3 probabilistischer Robustheitsindex.....	20
1.8.4 kombinierter Zuverlässigkeits- und Elementredundanz geprägter Robustheitsindex.....	21
1.9 Monte-Carlo-Methode	23
2 Projektüberblick.....	25
2.1 Deckenaufbau und System.....	25
2.2 Ablaufdiagramm.....	29

2.2.1	Prozessschritt: Excel Dr. Dreier.....	30
2.2.2	Prozessschritt: Matlab.....	32
2.2.3	Prozessschritt: Sofistik.....	33
3	Sofistik.....	34
3.1	Übersicht der Programmblocke	34
3.1.1	Allgemeine Befehle.....	34
3.1.2	Aqua.....	34
3.1.3	Sofimsha	35
3.1.4	Sofiload	37
3.1.5	Ase.....	38
3.1.6	Template	38
3.2	Vorstufe des generischen Codes.....	39
3.2.1	Aqua.....	39
3.2.2	Sofimsha	40
3.2.3	Sofiload	46
3.2.4	Ase.....	46
3.2.5	Template	47
3.3	generischer Code	48
3.3.1	Input	48
3.3.2	Aqua.....	49
3.3.3	Sofimsha	50
3.3.4	Sofiload	58
3.3.5	Ase.....	59
3.3.6	Änderungen	59
3.4	Report	61
4	Auswertung.....	67
4.1	Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes	67
5	Fazit.....	73
6	Ausblick	76
7	Notationstabelle	77

8	Literaturverzeichnis	79
9	Tabellenverzeichnis	80
10	Abbildungsverzeichnis	81

1 Robustheit von Ingenieurstrukturen

1.1 Allgemein

Die Robustheit ist die Fähigkeit von Strukturen, bei Ausfall eines oder mehrerer Tragelementen nicht zu versagen. Beim Entfall eines Traggliedes bleibt nur die Nutzung durch Auftreten von größeren Verformungen eingeschränkt. Dadurch wird die reduzierte Tragfähigkeit sichtbar. Dieser neue Zustand führt aber nicht zu einem Versagen der gesamten Stützkonstruktion.

Daher sollte hinreichend sichergestellt werden, dass keine zufälligen und außergewöhnlichen Ereignisse oder Schäden an strukturellen Bauteilen zu unverhältnismäßigen Folgen für das Struktursystem oder sogar zum totalen Zusammenbruch der gesamten Struktur während der Lebensdauer führen würden. Daher muss die Robustheit des Systems angemessen berücksichtigt werden. Das Design für Robustheit sollte ein integraler Bestandteil der konzeptionellen Entwurfsphase der Struktur sein, wobei verschiedene Strategien berücksichtigt werden können. Im Allgemeinen sollten im Entwurf einer Tragstruktur folgende Punkte hinsichtlich Robustheit identifiziert werden:

- Gefahren H
- Lokaler (direkter) Schaden D
- systematischer Schaden S (Folgeschäden/indirekte Schäden), führt einen fortschreitenden Kollaps herbei
- Direkte Folgen C_{dir} und indirekte Folgen C_{ind}

Beispiele für zufällige und/oder außergewöhnliche Ereignisse, welche direkt oder indirekt zu berücksichtigen sind, sind:

- Plötzliche Schäden durch Explosionen, Kollisionen und Stöße, extrem hohem Wasserdruck, Feuer oder Erdbeben, Folgen menschlicher Fehler usw.
- Kontinuierliche Schäden im Zusammenhang mit Verschlechterung oder Ermüdung

Zu den Folgen gehören menschliche, wirtschaftliche und ökologische Folgen, welche durch eine Kostenberechnung gegenübergestellt und bewertet werden können. Es werden unterschieden:

- Unmittelbare Folgen C_{dir} ergeben sich aus Schadenszuständen einzelner Komponenten und sind in der Regel auf die unmittelbaren Auswirkungen einer Gefahr beschränkt.
- Indirekte Folgen C_{ind} sind mit einem Verlust der Systemfunktionalität infolge direkter Folgen verbunden.

Das Gesamtrisiko R_{tot} in Bezug auf zufällige oder außergewöhnliche Ereignisse kann auf der folgenden Gleichung 1.1 basieren, wenn man die Addition des Risikos (Wahrscheinlichkeiten) im Zusammenhang mit lokalen (direkten) Schäden und systemischen (Folge-) Schäden (Kosten) berücksichtigt, ermittelt werden:

$$R_{tot} = \sum_i \sum_j C_{dir,ij} P[D_j|H_i] P[H_i] + \sum_i \sum_j \sum_k C_{ind,ijk} P[S_k|D_j \cap H_i] P[D_j|H_i] P[H_i] \quad (1.1)$$

mit

$P[H_i]$	Wahrscheinlichkeit Auftreten von Gefahr H_i
$P[D_j|H_i]$	Wahrscheinlichkeit direkter Schaden D_j bedingt von Gefahr H_i
$P[S_k|D_j \cap H_i]$	Wahrscheinlichkeit systemischer Schaden S_k bedingt durch Schaden D_j und Gefahr H_i
C_{dir}	direkte Folgen
C_{ind}	indirekte Folgen

Diese Gleichung zeigt die Anwendung von verschiedenen möglichen Strategien für die Sicherstellung einer gewünschten Robustheit. Folgende Strategien zur Reduzierung des Risikos des Kollapses eines Tragwerks lassen sich unterscheiden:

- Verringerung einer oder mehrerer Wahrscheinlichkeiten $P[H_i]$ hinsichtlich Auftretens von Gefahren
- Verringerung einer oder mehrerer Wahrscheinlichkeiten $P[D_j|H_i]$ des direkten Schadens
- Verringerung einer oder mehrerer Wahrscheinlichkeiten $P[S_k|D_j \cap H_i]$ systemischer Schäden
- Verringerung der direkten Folgen C_{Dir} und indirekten Folgen C_{Ind}

Darauf aufbauend kann eine Risikobewertung vorgenommen werden. Im Falle einer bestimmten Gefahr oder Beschädigung kann auch eine bedingte Risikobewertung durchgeführt werden.

1.2 Konstruktive Überlegungen

Die Überlegungen bezüglich der Robustheit eines Tragsystems während der Entwurfsphase sollten auf die Konsequenzklassen, in welche die Struktur eingereiht wird oder ist, bedacht nehmen. Für bestehende Strukturen können im Zusammenhang mit den Konsequenzklassen besondere Überlegungen erforderlich sein.

Konsequenzklassen kategorisieren den Grad der (direkten und indirekten) Konsequenzen aufgrund des Versagens eines Bauteils oder eines begrenzten Teils der gesamten Struktur. Konsequenzklassen werden in der Regel basierend auf der Art der Struktur, der Beanspruchung und der Funktionalität definiert. Für die Robustheit kann dieselbe qualitative Definition für die Konsequenzklasse verwendet werden wie für die Differenzierung der Zuverlässigkeit, z.B. Konsequenzklassen CC1 (Niedrig), CC2 (Mittel) und CC3 (Hoch).

Für Strukturen, die die Kriterien für mehr als eine Konsequenzklasse erfüllen müssen, sollte die Robustheitsanforderung unter Berücksichtigung der strengsten Konsequenzklasse formuliert werden.

Konsequenzklassenbewertungen befassen sich mit der Schwere der Konsequenzen, wenn ein unerwünschtes Ereignis auftritt. Sie wurden traditionell in Konstruktioncodes verwendet, um das Zielzuverlässigkeitsniveau zu definieren, das in der strukturellen Konstruktion impliziert ist. In Fällen, in denen die Folgen nicht vernachlässigbar sind und das auslösende unerwünschte Ereignis ungewiss oder unbekannt ist, kann es in den Konstruktionscodes erforderlich sein, zusätzliche Konstruktionsbestimmungen festzulegen, z.B. Anforderungen an die Robustheit.

Die empfohlenen Konstruktionsüberlegungen sind:

- Für Gruppenstrukturen mit geringem Risiko, bei denen für alle möglichen unerwünschten Ereignisse vernachlässigbare Folgen zu erwarten sind:

Sofern die Struktur eine zufriedenstellende Stabilität bei normalem Gebrauch aufweist, sind keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich, um die notwendige Robustheit zu erreichen.

- Für Gruppenstrukturen mit niedrigem bis mittlerem Risiko, bei denen geringfügige Folgen für genau definierte unerwünschte Ereignisse und

vernachlässigbare Folgen für unsichere und kritische Ereignisse zu erwarten sind:

Es sind indirekte Entwurfsmethoden wie normative Regeln oder die Schlüsselementmethode, abhängig vom Konstruktionstyp, zu verwenden.

- Für Gruppenstrukturen mit mittlerem bis hohem Risiko, bei denen geringfügige Folgen für gut definierte, identifizierte und wahrscheinlich auftretende unerwünschte Ereignisse zu erwarten sind und geringfügige bis mittlere Folgen in Bezug auf unsichere und kritische Ereignisse zu erwarten sind:

Zusätzlich zu den Konstruktionsanforderungen für Gruppenstrukturen mit geringem bis mittlerem Risiko sind direkte Konstruktionsmethoden zu verwenden.

- Für Gruppenstrukturen mit hohem Risiko, bei denen geringfügige bis mäßige Folgen in Bezug auf gut definierte, identifizierte und wahrscheinlich auftretende unerwünschte Ereignisse und mittlere bis schwerwiegende Folgen in Bezug auf unsichere und kritische Ereignisse zu erwarten sind:

Es sind direkte Entwurfsmethoden, die den Empfehlungen einer systematischen Risikobewertung folgen und dabei sowohl identifizierte als auch nicht identifizierte Gefahren berücksichtigen, zu verwenden. Die Risikobewertung zeigt, dass die Konstruktionsstrategien in Abhängigkeit von den Gefahren, der Wahrscheinlichkeit und den Folgen sowie den tolerierbaren Risiken ausgelegt werden sollen.

Eine systematische Risikobewertung kombiniert in der Regel qualitative und quantitative Analysen zur Risikobewertung vor und nach der Umsetzung der risikomindernden Maßnahmen. Es wird eine Kosten-Nutzen-Bewertung für jede der Risikominierungsmaßnahmen sowie eine Überprüfung des Restrisikos und eine Überprüfung der Sensitivität der in der Risikobewertung getroffenen Annahmen empfohlen. Eine transparente Aufbereitung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus der systematischen Risikoanalyse sowie die Kommunikation mit allen Beteiligten ist von wesentlicher Bedeutung.

Entwurfsüberlegungen sollten sicherstellen, dass die Struktur ausreichend robust ist.

Strukturen sollten einfache und regelmäßige Formen haben. Zu diesem Ziel sollten Massen, Steifigkeit und Elementkapazitäten gleichmäßig in der Ebene und in der Höhe verteilt werden. Vertikale Elemente, wie Säulen und Wände, sollten ohne Unterbrechung oder starke Kapazitätsreduzierung von den Fundamenten bis in den

obersten Bereich des Gebäudes laufen. Um die maximale Kapazität in Bezug auf die Duktilität von Flächenelementen zu erhalten, sollten ähnliche Spannweiten entlang der Längs- und Querrichtung (Grundriss) angenommen werden.

Für jede Entwurfsanforderung, die für jede Schadensfolgeklasse empfohlen wird, sollten die Detaillierungsregeln mit der Grundannahme der angenommenen Entwurfsmethode in Einklang stehen.

Diese Detaillierungsregeln sollten duktile Ausfallarten von Strukturbauteilen beinhalten. Durch die Bildung von plastischen Gelenken in Trägern oder Erreichen der Fließgrenze in durchgehenden Platten wird dies erreicht. Daher sollte das duktile Versagen dem spröden Fehlermodus wie Scherfehlermodi in Trägern und Platten oder Stanzscherfehlermodi in Platten vorgezogen werden. Eine ausreichende Querverstärkung in Balken und Platten oder eine ausreichende Plattendicke müssen so gestaltet sein, dass diese Widerstandshierarchie in den Strukturbauteilen erreicht wird.

Ein traditionell verwendetes Kriterium, um zu beurteilen, ob eine Gebäudestruktur ausreichend robust ist, besteht darin, die zulässige Ausfallfläche bei Verlust einer einzelnen Säule auf 15 % der Grundfläche oder 100 m² zu begrenzen, je nachdem welcher Wert geringer ist. Diese Empfehlung stammt aus der Zeit nach dem Einsturz des Ronan Point.

Vorschriften wie z.B. bei Fachwerksmethoden basieren auf der Annahme der Kontinuität von Längsbewehrungsstäben. Es müssen daher angemessene Verankerungen und Überlappungslängen vorgesehen werden, um einen Verankerungswiderstand zu erzielen, der höher ist als die axiale Kapazität von Bewehrungsstäben.

Obwohl die strukturelle Kontinuität für die meisten Konstruktionssituationen im Allgemeinen vorteilhaft ist, kann dies nach Ausfall eines lokalen Glieds die Folgen eines unvorhergesehenen Ereignisses erhöhen. Beispielsweise kann dadurch eine horizontale Kraftübertragung auf benachbarte Schächte in Tragsystemen wie Rahmen erfolgen. Um eine Versagenskettenreaktion zu verhindern, können in solchen Fällen vordefinierte Fehlermechanismen (Struktursicherungen) in Betracht gezogen werden. Diese werden in das System eingebaut, um eine Kollapsausbreitung zu begrenzen.

1.3 Entwurfsszenarien für Robustheit

1.3.1 Entwurfsszenarien

Der Entwurf für Robustheit sollte die Identifizierung und Bewertung von verschiedenen Szenarien umfassen. Diese Szenarien sind eine Reihe von Ereignissen/Bedingungen, die während des Baus oder der Lebensdauer der Struktur auftreten und deren Auswirkungen zu unverhältnismäßigen Folgen führen. Solche Entwurfsszenarien können anhand bestimmter unbeabsichtigter Aktionen, fiktiver Schäden oder Belastungen identifiziert werden und sollten mit den relevanten Interessenträgern erörtert werden. Der fiktive Schaden wird in der Regel als anfänglicher lokaler Fehler angegeben.

Bei identifizierten Gefahren werden in Folge der Entwurfsszenarien vorgegebene Aktionen, Zustandsbedingungen und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Struktur berücksichtigt.

Die zufälligen Aktionen und/oder Ereignisse, die im Entwurf angenommen werden sollen, können von Projekt zu Projekt erheblich variieren. Daher ist es schwierig, die Entwurfsszenarien auf standardisierte Weise zu spezifizieren, insbesondere wenn ein für ein Gefährdungsbild spezifischer Entwurf zur Anwendung kommt. Mögliche Gefährdungen, die nicht angegeben werden können, sind nicht identifizierte Gefahren oder bekannte Gefahren, die nicht quantifiziert werden können.

1.3.2 Entwurf für bekannte zufällige Ereignisse

Ein gefährdungsspezifischer Entwurf erfordert die Identifizierung und Quantifizierung aller ungewöhnlichen Ereignisse, die sich möglicherweise auf die Struktur und die daraus resultierenden Aktionen auswirken könnten. Im Allgemeinen sind solche Angaben unvollständig und/oder ungenau, da einige Gefährdungen unvorhergesehen sind oder ihre Ausmaße schwer vorherzusagen sind. Daher kann die Anwendung einer direkten Entwurfsmethode bei (identifizierten) zufälligen Handlungen in einigen Fällen durch Elemente der gefährdungsspezifischen (indirekten) Entwurfsmethode ergänzt werden, insbesondere durch die Annahme eines fiktiven Schadens. Dabei sollte auf die Definition der gefährdungsunspezifischen Entwurfssfälle geachtet werden, die nicht von den wahrscheinlichen Schadensszenarien abweichen sollten. Wenn die identifizierte unbeabsichtigte Aktion z.B. der Anprall eines Fahrzeugs auf zwei Säulen ist, reicht es im Allgemeinen nicht aus, für dieses Szenario nur eine Säule zu entfernen.

Im Allgemeinen sollte eine Struktur entworfen werden, die das Worst-Case-Szenario sowohl durch gefährdungsspezifische als auch durch gefährdungsunspezifische unbeabsichtigte Handlungen berücksichtigt.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt: EN1991-1-7 enthält Richtlinien für die Modellierung von Anpralllasten und Explosionen in Gebäuden, bei denen es sich um zufällige Ereignisse mit hohem Zerstörungspotenzial handelt. Es werden verschiedene Arten von Auswirkungen auf Gebäude und Brücken berücksichtigt, die Referenzwerte und Angriffspunkte von Anprallkräften bereitstellen, die je nach Schadensfolgeklasse der Struktur entweder als äquivalente statische Lasten oder dynamische Lasten modelliert werden. Bei Explosionen berücksichtigt EN1991-1-7 sowohl den direkten Einwirkungsdruck auf die Strukturelemente als auch den Druck, der von nicht-strukturellen Elementen auf Strukturbauteile übertragen wird. Falls mögliche Gefährdungen nicht spezifiziert werden können, werden sie durch fiktive Handlungen oder fiktive Schäden erfasst.

Wenn Strukturen auf bestimmte unbeabsichtigte Einwirkungen oder Stabilität gegen lokale Schäden geprüft werden, sollten die Lastkombinationen mit geringer Wahrscheinlichkeit (seltener Einwirkungskombination) angewandt werden. Dies bedeutet, dass die Teilsicherheitsfaktoren niedriger sind als bei der Bemessung des Grenzzustands der Tragfähigkeit (ULS).

1.3.3 Entwurf für Aktionen aus nicht spezifizierten Bedrohungen

Fiktive Schadensszenarien

Fiktive Schadensszenarien können Folgendes umfassen:

- Fiktive Entfernungsszenarien
- Fiktive Verschlechterungsszenarien

Die Analyse des Struktursystems im Rahmen eines fiktiven Schadensszenarios sollte unter Berücksichtigung der außergewöhnlichen Einwirkungskombination durchgeführt werden.

Wenn kein Anfangsschaden auftreten darf, kann der fiktive Schaden nicht als Gefahrenszenario angegeben werden und es werden in die Schadensszenarioanalysen nur die Bemessungsmethoden Ereigniskontrolle, Schutz und der lokale Widerstand aufgenommen.

Fiktive Entfernungsszenarien

Bei fiktiven Entfernungsszenarien werden Strukturelemente (z.B. bei den Berechnungen) entfernt und die Struktur wird auf unverhältnismäßige Folgen überprüft. Dies erfolgt beispielsweise in Kombination mit der alternativen Lastpfad-Ermittlung oder der Identifizierung von Schlüsselementen. Ursprüngliche Strukturanalysen dienen zur Identifizierung kritischer Elemente z.B. durch Entfernung dieser Elemente aus dem Rechenprozess. Übliche Elemente, welche bei dieser Analyse aus dem Rechenprozess entfernt werden, sind z.B.:

- Eine oder mehrere Säulen
- Eine oder mehrere Platten bzw. Wände
- Elemente, die für die strukturelle Integrität als entscheidend erachtet werden

Fiktive Entfernungsszenarien beinhalten aber auch den Ausfall einer Verbindung aufgrund einer nicht identifizierten Gefahr. Die Analyse des Struktursystems im Rahmen eines fiktiven Entfernungsszenarios wird im Allgemeinen durch eine statische Analyse durchgeführt. In Fällen, in denen dynamisches Verhalten die strukturelle Reaktion dominiert (z.B. bezogen auf die strukturelle Reaktion des intakten Systems), sollte die Analyse dynamische Effekte vereinfacht (z.B. energiebilanzbasiert) oder umfassend berücksichtigen.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt: Bei den entfernten Elementen handelt es sich in der Regel um außenliegende Säulen oder tragende Wände zwischen der Gründung und der ersten Ebene. Des Weiteren können auch innen tragende Elemente an gefährdeten Orten in Betracht gezogen werden.

Nominale Verschlechterungsszenarien

Bei fiktiven Verschlechterungsszenarien werden die geometrischen und Materialeigenschaften eines oder mehrerer Strukturelemente im Rechenprozess bewusst reduziert und die Struktur auf unverhältnismäßige Folgen überprüft.

Nominale Lasten

Fiktive Lasten werden im Allgemeinen als gleichmäßig verteilte äquivalente statische Lasten angegeben. Diese Lasten sollten für das betrachtete Element am ungünstigsten Punkt angreifen. Beim Anwenden fiktiver Einwirkungen auf eine Säule oder einen Balken sollte der Wert der Einwirkung in Abhängigkeit der betroffenen Wand- und Bodenfläche bestimmt werden.

Hinweis: Häufig werden für eine fiktive Belastung von Gebäuden z.B. 34 kN/m^2 angenommen. Dieser Nennwert wurde nach dem Unfall in Ronan Point (UK) empfohlen. Hierbei handelte es sich um eine Gasexplosion. Das Design für fiktive Lasten kann völlig ineffizient sein, wenn die Auswirkungen nicht identifizierter Handlungen/Einflüsse nicht durch fiktive Belastungen abgedeckt werden.

1.4 Entwurfsstrategien

1.4.1 Allgemein

Im Allgemeinen können Entwurfsstrategien für Robustheit in zwei Herangehensweisen unterteilt werden:

- Direkte Entwurfsmethoden
- Indirekte Entwurfsmethoden

Die anzuwendende Methode hängt von den in Kapitel 1.2 beschriebenen Konstruktionsüberlegungen ab.

Die Annahme einer bestimmten Strategie zur robusten Gestaltung einer gegebenen Struktur kann zu einer konzeptionellen Lösung mit strukturellen Merkmalen führen. Diese können für einige Gefahrenszenarien von Vorteil, für andere jedoch nachteilig sein. Bestimmend sind die Struktureigenschaften und das unvorhersehbare Auslöseereignis, das Ausmaß und die Lage des anfänglichen Ausfalls oder die Art des Zusammenbruchs.

Daher sollte in den meisten Fällen eine Kombination unterschiedlicher Konstruktionsstrategien zur wirtschaftlichen Erfüllung der Sicherheits- und Robustheitsanforderungen verfolgt werden. Ein diesbezüglicher pragmatischer Ansatz findet sich in „Tanner P, Hingorani R. Robustness: a practitioner’s perspective. IABSE Symposium Guimaraes, Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management, Guimaraes, 2019“.

- Entwurf eines kontinuierlichen Systems mit duktilem Verhalten
- Bereitstellung alternativer Lastpfade oder vordefinierter Kollapsmechanismen für den Fall eines lokalen Ausfalls ausgewählter struktureller Schlüsselemente aufgrund nicht identifizierter zufälliger Ereignisse
- Wenn alternative Lastpfade bereitgestellt und das Versagen eines strukturellen Schlüsselements überprüft wird, können der zugehörige versagte

Bereich ($A_{\text{Stütze}}$) als vernachlässigbar angesehen bzw. menschliche Sicherheitskriterien vernachlässigt werden. In diesem Fall kann die Wahl der Zielzuverlässigkeit für das Strukturelement nur auf wirtschaftlichen Optimierungsprinzipien basieren.

- Wenn vordefinierte Kollapsmechanismen (Sicherungen) eingebaut und verifiziert sind oder bei nicht redundanten Systemen (z.B. statisch bestimmte Strukturen), kann der versagte Bereich ($A_{\text{Stütze}}$) leicht festgelegt werden. Außerdem sollten menschliche Sicherheitskriterien für die Auslegung oder Bewertung von Schlüsselementen angewendet werden.

Die direkten Entwurfsmethoden zielen explizit darauf ab, die Auswirkungen des lokalen Versagens zu begrenzen. Sie erfordern Strukturanalysen, um die Performance der Struktur für ein bestimmtes Schadensszenario zu bewerten und können von einer oder mehreren der folgenden Konstruktionsstrategien ausgehen:

- Alternative Lastpfadstrategie
- Strategie zur Reduzierung der Folgen

Sollten die bisherigen Ansätze nicht wirtschaftlich zu einer ausreichenden Robustheit führen, kann der Entwurf darauf fokussieren, die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls kritischer Elemente mittels Ereignissteuerungsstrategie (und/oder der spezifischen Lastwiderstandsstrategie, z.B. im Zusammenhang mit der Konstruktion von Schlüsselementen) zu reduzieren.

1.4.2 Alternative Lastpfadstrategie

Die alternative Lastpfadstrategie beschränkt sich auf den Widerstand gegen progressiven Kollaps (d.h. indirektes Versagen oder Folgeversagen). Die alternative Lastpfadstrategie konzentriert sich auf die Verringerung der Wahrscheinlichkeit $P[S/D \cap H]$. Maßnahmen, die der alternativen Lastpfadstrategie zugeordnet sind, sind:

- Bereitstellung von Redundanz/Integrität
- Bereitstellung von Duktilität

Für Rahmentragwerke können folgende Widerstandsmechanismen für die Reduktion des Risikos eines progressiven Kollapses angewandt werden:

- Nutzung der Durchbiegung eines Balkens, unter dem eine Stütze ausgefallen ist → Dieser Mechanismus ist im Allgemeinen ineffektiv und wird selten angewandt, da Balken hierfür überdimensioniert sein müssen.

- Nutzung eines Vierendeel-Trägerverhaltens eines Rahmens über einer ausgefallenen Stütze
- Nutzung des Bogeneffektes eines Balkens, unter welchem eine Stütze ausgefallen ist → Dieser Mechanismus ist wirksam, wenn die benachbarte Struktur ausreichend steif ist, um horizontale Verschiebungen zu begrenzen.
- Nutzung von Zugmembranverhalten von Trägern/Platten → überbrückt die beschädigte Stütze durch große Rotationen und Verschiebungen
- Beitrag nichtstruktureller Elemente

Der Übergang der Biegewirkung in Balken und Platten zum Zugmembranverhalten wird allgemein als letzter Widerstand eines Gebäudes gegen fortschreitenden Einsturz herangezogen.

Die alternative Lastpfadstrategie beruht auf der Überlegung, dass ein oder mehrere Strukturelemente beschädigt werden und keine Tragfähigkeit mehr besitzen. Für den verbleibenden Teil der Struktur ist erforderlich, dass die Struktur für einen bestimmten kurzen Zeitraum den zugehörigen Einwirkungen mit einer akzeptablen Zuverlässigkeit standhält.

Die strukturelle Integrität ist mit der Elementkontinuität streng verbunden, welche das Systemverhalten verbessert. Die Elementkontinuität wird durch eine angemessene Bindung zwischen den Strukturelementen erreicht bzw. das Ziel ist die Vermeidung von physikalischer Trennung zwischen den Strukturelementen. Bei Gebäuden werden für eine strukturelle Integrität im Sinne der Elementkontinuität z.B. Außenwände und Trennwände miteinander verbunden.

Häufige Berechnungsverfahren für eine alternative Lastpfadanalyse sind:

- ein lineares statisches Verfahren unter Berücksichtigung geeigneter Faktoren für dynamische und nichtlineare Effekte
- ein nichtlineares statisches Verfahren unter Berücksichtigung eines geeigneten Faktors für dynamische Effekte
- ein lineares dynamisches Verfahren unter Berücksichtigung eines geeigneten Faktors für nichtlineare Effekte
- ein nichtlineares dynamisches Verfahren

1.4.3 Strategie zur Reduzierung der Folgen

Die Folgenreduktionsstrategie bzw. Strategie zur Reduzierung der Folgen zielt darauf ab, inakzeptable (unverhältnismäßige) Folgen zu begrenzen (C_{ind} und/oder $P[S/D \cap H]$) im Zusammenhang mit Schäden D . Zu den Maßnahmen für die Strategie zur Reduzierung der Folgen gehören:

- Strukturelle Segmentierung/Unterteilung
- Änderung der Nutzung
- Andere nicht-strukturelle Maßnahmen zur Minderung der Folgen im Falle eines Kollapses

Strukturelle Segmentierung: Die Maßnahmen zur Verringerung der Folgen sollten auf Grundlage der Risikominderung und der damit verbundenen Kosten, die zu ihrer Erreichung erforderlich sind, ausgewählt werden.

Das in der Ebene Fortschreiten eines Kollapses kann wirksam begrenzt werden, indem die Struktur durch sogenannte "Struktursicherungen" in unabhängige Systeme unterteilt wird. Art und Lage der Tragwerkssicherungen sollten entsprechend gewählt, gestaltet, konkretisiert, ausgeführt und überprüft werden. Struktursicherungen sind besonders effektiv in großen, niedrigen Gebäuden. Weniger effektiv sind diese Sicherungen für hohe Gebäude. Daher erfolgt für hohe Gebäude die Unterteilung in bestimmten Abständen durch die Planung von stabilen Etagen über die Höhe des Gebäudes.

Änderung der Nutzung: Maßnahmen zur Verringerung der Folgen umfassen:

- die Änderung der architektonischen und strukturelle Variablen, wie der Form und des statischen Systems des Gebäudes
- die Änderung der organisatorischen Variablen, wie der Verlagerung wichtiger Geschäftstätigkeiten in sicherere und/oder robustere Gebäudeteile
- die Sicherstellung der Selbstrettung und Rettung durch andere
- der Sicherstellung von Backup/Sicherheits-Einrichtungen

Nicht-strukturelle Maßnahmen zur Minderung der Folgen umfassen:

- Installation eines Notfallplanes z.B. gemeinsam mit Feuerwehr, Rettung, Polizei
- die Prüfung der Verfügbarkeit der Notfallinfrastruktur, z.B. nahegelegene Krankenhäuser
- die Organisation von periodischen Notfallübungen

- die aktive Nutzung von Feedback/Erfahrungen in Verbindung mit ähnlichen Strukturen

1.4.4 Ereignissteuerungsstrategie

Die Ereignissteuerungsstrategie besteht darin, das Auftreten der Gefahr H zu verhindern oder die Eintrittsrates der Gefahr auf einen akzeptablen Wert zu begrenzen und erfordert, dass die Gefahr (oder das Spektrum der Gefahren) identifiziert wird. Diese Strategie konzentriert sich auf die Verringerung der Wahrscheinlichkeit $P[H]$ und erhöht nicht den inneren Widerstand einer Struktur gegen inakzeptable Schäden. Zu den Maßnahmen im Zusammenhang mit der Ereignissteuerung gehören:

- Änderungen der Baustellenorganisation oder auch der Zugang zur Baustelle
- Einschränken in der Nutzung der Struktur
- Installation von Frühwarnsystemen für die maßgebende Gefahr
- Einführung passiver Maßnahmen
- Qualitätsmanagement zur Vermeidung menschlicher Fehler
- Wartung

Als Beispiele für eine effektive Ereignissteuerung zur Reduktion des Verlustes der Strukturstabilität und Steigerung der Robustheit bieten sich folgende Maßnahmen an:

- Vermeidung von Hoch-Risikobereichen
- Im Zusammenhang mit der Lagerung oder des Transports von explosiven Stoffen oder anderen gefährlicher Stoffe: Beschränkung der Nutzung auf bestimmte Bereiche oder Verbot
- Überwachungssysteme für Wind, Gas, Brandentwicklung, etc.
- Barrieren, um Fahrzeugkollisionen, Deichbruch, Brandauswirkungen, etc. zu verhindern
- Vermeidung von Verschlechterung des strukturellen Widerstandes durch aktive oder passive Erhaltungsstrategien

1.4.5 Strategie für die Gestaltung von Schlüsselementen

Die Strategie für die Gestaltung von Schlüsselementen zielt darauf ab, den lokalen Schaden D (häufig als "direkter Schaden" bezeichnet) zu verhindern oder zu

begrenzen, welcher durch eine bestimmte Gefahr H , wie z.B. Explosionsdruck, verursacht wird. Daher ist die Strategie für die Gestaltung von Schlüsselementen ein risikospezifischer Ansatz, der sich auf die Verringerung der Wahrscheinlichkeit $P[D/H]$ bezieht.

Schlüsselemente sind Strukturelemente oder Verbindungen, die für den Widerstand der Struktur wesentlich sind. Das Versagen eines Schlüsselements hat erhebliche Folgen, da die Struktur bei Fehlen des Schlüsselements in der Regel nicht in der Lage ist, angemessene alternative Lastpfade zu entwickeln (siehe Kapitel 1.4.2). Diesem Problem kann mit einer kombinierten Entwurfsstrategie, wie in Kapitel 1.4.1 vorgestellt, entgegengewirkt werden.

Beispiele für mögliche Schlüsselemente sind Tragwerkselemente in den unteren Geschossebenen, welche Fahrzeuganprall ausgesetzt sind, Pfeiler von durchgehenden Brücken, Kabel in kabelgestützten Strukturen usw.

Maßnahmen im Zusammenhang mit einem bestimmten Lastwiderstand können folgendes umfassen:

- Erhöhung des Elementwiderstands
- Erhöhung der Elementsteifigkeit
- Verwendung aktiver oder passiver Isolationstechniken wie basisgebundene Isolierung der Struktur

Die Strategie für die Gestaltung des Schlüsselements kann durch eine ausreichende strukturelle Duktilität ergänzt werden.

- Strukturelle Duktilität kann durch die Duktilität auf der Ebene des Systems, der Elemente und des Materials erreicht werden.
- Die Materialduktilität kann durch Materialverformungskapazität erreicht werden.
- Duktile Verbesserungen können durch kontinuierliche plattenunterseitige Verstärkungen über Stützen, Nutzung von Einschnüreffekten an markanten Knoten, angemessene Zuggliedverbindungen zur Sicherstellung der Lastübertragung usw. erreicht werden.

1.4.6 Präskriptive Regeln

Die Anwendung von Entwurfsregeln ist eine indirekte Entwurfsmethode, die nicht auf der Performance basiert und als Teil der Entwurfsüberlegungen in Abschnitt 2 betrachtet werden kann. Je nach der Art der Konstruktion wurden bereits

unterschiedliche Vorschriften formuliert. Die häufigsten Vorschriften beziehen sich auf die Bereitstellung horizontaler und/oder vertikaler Zugbindungen.

1.5 Robustheitsquantifizierung

Die Quantifizierung der Robustheit sollte auf dem Vergleich

- der Intensität und dem Ausmaß des Anfangsschadens, und
- den zugehörigen Folgen

basieren. Eine explizite Quantifizierung der Robustheit kann durch den Vergleich

- von Designalternativen und
- dem Follow-up der Robustheit während der Lebensdauer der Struktur

erfolgen.

Die Robustheitsquantifizierungen können in folgende Ebenen mit abnehmender Komplexität vorgenommen werden:

- Risikobasierte Quantifizierung auf Grundlage einer vollständigen Risikoanalyse, bei der die Folgen in direkte und indirekte Folgen unterteilt werden (siehe Kapitel 1.1)
- Zuverlässigkeitsbasierte Quantifizierung abgeleitet z.B. aus der Zuverlässigkeit der Struktur im beschädigten und unbeschädigten Zustand
- Deterministische Quantifizierung auf Basis struktureller Parameter wie Tragfähigkeit, Steifigkeit, Schadensenergie usw.

1.6 Robustheitskriterien

Ein operatives Kriterium für die Überprüfung der Robustheit einer Struktur, die einen lokalen Schaden aufgrund des Ausfalls eines oder mehrerer Elemente aufweist, lässt sich wie folgt definieren:

$$E_d(A=0, \Delta E_{d, \text{Stütze}}, \dots) \leq R_d \quad (1.2)$$

Die Kombinationen für die Ermittlung des Bemessungswerts der Einwirkungen E_d bezieht sich auf die Situationen nach einem außergewöhnlichen Ereignis (kein explizites zufälliges Ereignis: $A = 0$). Für die Umverteilung (z.B. Membrankräfte) innerer Kräfte und Momente auf die verbleibenden Teile der Struktur $\Delta E_{d, \text{Stütze}}$ müssen auch dynamische Effekte aufgrund von plötzlichem Elementkollaps berücksichtigt werden.

Für die Bestimmung des Bemessungswertes des Widerstands R_d dürfen die reduzierten Teilsicherheitsfaktoren für die Materialeigenschaften und Widerstandsmodellunsicherheiten der außergewöhnlichen Einwirkungen berücksichtigt werden.

Nichtsdestotrotz kann die strukturelle Gestaltung für Robustheit unwirtschaftlich sein. Die Verwendung eines risikobasierten Ansatzes für die Gestaltung der verbleibenden Struktur kann diese Situation verändern, indem die bedingte Wahrscheinlichkeit eines Systemausfalls nach einem lokalen Versagen in die Zuverlässigkeitsüberprüfungen einfließt. Akzeptierte Werte für diese Wahrscheinlichkeit sind 0,01–0,1 (siehe Ellingwood B. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2006;20:315–23.; Ellingwood B., Dusenberry DO. Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2005;20:12; ASCE 7.10).

Werden strukturelle Sicherungen berücksichtigt, können die zusätzlichen inneren Kräfte und Momente $\Delta E_{d, \text{Stütze}}$ konservativ auf der Grundlage des oberen Bemessungswertes der Sicherungsfestigkeit $R_{d, \text{Sicherung}}$ festgelegt werden. Darüber hinaus muss ein mögliches Versagen der Sicherung überprüft werden. Für die relevanten Situationen nach dem außergewöhnlichen Ereignis ($A = 0$) sollte der Bemessungswert der Einwirkung in den berücksichtigten Sicherungen $E_{d, \text{Sicherung}}$ den oberen Bemessungswert des entsprechenden Widerstands $R_{d, \text{Sicherung}}$ überschreiten:

$$R_{d, \text{Sicherung}} < E_{d, \text{Sicherung}} \quad (1.3)$$

1.7 Robustheit bestehender Strukturen

Für bestehende Strukturen, bei denen unterschiedliche Randbedingungen die Robustheit beeinträchtigen können, sind besondere Konstruktionsüberlegungen erforderlich. Im Allgemeinen werden in diesem Zusammenhang folgende zwei häufige Entwurfssituationen betrachtet:

- Nutzungsänderung: Eine höhere Schadensfolgeklasse kann in den Konstruktionsüberlegungen (Kapitel 2) übernommen werden, wenn die Nutzungsänderung zu einem deutlich höheren Risiko führt.
- Änderungen und Erweiterungen: Dies sollte die Robustheit der bestehenden Struktur nicht verringern.

Liegen große Unbekannte hinsichtlich struktureller Eigenschaften mit potenziellen versteckten Defekten in der bestehenden Struktur vor, werden Entwurfsüberlegungen für die Robustheit analog zu Gruppenstrukturen mit hohem Risiko (vgl. Kapitel 2) empfohlen. Bei bestehenden Strukturen werden folgende Strategien angewandt:

- Reduktion der Folgen
- Ereigniskontrolle
- Verbesserung von Schlüsselementen

Diese sollten hauptsächlich zur Verbesserung der strukturellen Robustheit in Betracht gezogen werden, da andere Entwurfsstrategien (siehe Kapitel 1.4) im Umgang mit bestehenden Strukturen möglicherweise nicht durchführbar sind.

In bestehenden Strukturen können Maßnahmen im Zusammenhang mit dem konzeptionellen Layout (z.B. Gestaltung von alternativen Lastwegen beim Ausfall von lokalen Elementen) in der Regel nicht ohne kostspielige Struktureingriffe in die Praxis umgesetzt werden. Die eindeutige Identifizierung aller relevanten Gefahren und Gefahrenszenarien ist daher besonders wichtig für die Beurteilung der Robustheit bestehender Strukturen.

Typische Nutzungsänderungen, die zu einer signifikanten Erhöhung des Risikos führen können, sind beispielsweise:

- Nutzungsänderungen eines Gebäudes von einer privaten in eine öffentliche Nutzung
- Nachträgliche Aushebung von Kellern, Entfernen von Innenstützen, Herstellung von Öffnungen oder Einbau von Zwischengeschoßen

Die Anwendung von Vorschriften (siehe Kapitel 1.6) für kleine Änderungen (d.h. Nachrüstsysteme) ist in vielen der Fälle für die Sicherstellung einer ausreichenden Robustheit passend. In manch anderen Fällen sind direkte Konstruktionsansätze erforderlich, um nachzuweisen, dass die nachgerüstete Struktur einen zufriedenstellenden Grad der Robustheit aufweist.

1.8 Quantitative Robustheitsbewertung & Redundanzleistungsindikatoren

Parallel zu den im vorherigen Abschnitt diskutierten Robustheitsentwurfskonzepten kann die Quantifizierung der Robustheit einen effizienten Entscheidungsprozess ermöglichen, um die am besten geeignete Strukturkonfiguration oder Konstruktionsstrategie zu ermitteln. Die Quantifizierung der Robustheit sollte auf dem Vergleich der Höhe und des Ausmaßes des Anfangsschadens oder der entsprechenden Folgen basieren (Zhu und Frangopol, 2012), (Ghosn et al., 2016 und 2016b). Herangehensweisen zur Quantifizierung der Robustheit können in folgende Ebenen mit abnehmender Komplexität unterteilt werden:

- Risikobasierte Quantifizierung auf der Grundlage einer vollständigen Risikoanalyse, bei der die Folgen in direkte und indirekte Folgen unterteilt werden
- Zuverlässigkeitsbasierte Quantifizierung, die sich z.B. aus der Zuverlässigkeit des Struktursystems in der beschädigten und unbeschädigten Situation ergibt
- Deterministische Quantifizierung basierend auf strukturellen Parametern wie Tragfähigkeit, Steifigkeit, Schadensenergie usw.

Die Überprüfung der Leistungsindikatoren kann anhand vordefinierter Robustheitskriterien durchgeführt werden. Ein operatives Kriterium für die Überprüfung der Robustheit einer Struktur, die einen lokalen Schaden durch den Ausfall eines oder mehrerer seiner Strukturelemente annimmt, wird durch folgende Gleichung 1.4 dargestellt:

$$E_d(A=0, \Delta E_{d, \text{Stütze}}, \dots) \leq R_d \quad (1.4)$$

Dies gilt, wenn sich die zu berücksichtigenden Kombinationen für die Ermittlung des Bemessungswerts der Einwirkungen E_d auf Situationen nach einem zufälligen Ereignis beziehen (keine explizite zufällige Handlung: $A = 0$). Bei der Umverteilung (z.B. durch Membrankräfte) müssen jedoch dynamische Effekte durch plötzlichen Elementkollaps $\Delta E_{d, \text{Stütze}}$ berücksichtigt werden.

1.8.1 Implementierte Methodik – Redundanzkonzepte

Redundante Systeme sind so konzipiert, dass sie alternative Lastpfade bereitstellen. Dies stellt eine der wichtigsten möglichen Strategien der Robustheitsplanung dar. In diesem Fall können die Lasten noch innerhalb des Systems umverteilt werden, wenn einige Strukturbauteile versagen oder geschwächt werden. Diese können aufgenommen und sicher an die angrenzenden Systeme oder das Fundament übertragen werden.

Die geometrische/topologische redundante Konfiguration eines Systems kann durch Redundanzindizes ausgedrückt werden. Redundanzindizes sind quantifizierbare Größen, die zeigen, wie effizient die statische Unbestimmtheit in einem System verteilt ist. Sie zeigen die Bedeutung der einzelnen Komponenten für das globale System und das Zusammenspiel dieser Komponenten untereinander an (Xinjian et al., 2017). Da diese Indizes Informationen über die Koordinierung zwischen den Strukturbauteilen sowie über Schwachstellen eines Systems geben, sind sie für die Bewertung der Robustheit wichtig.

Die Quantifizierung der Robustheit erfolgt entsprechend der internationalen wissenschaftlichen Literatur und entsprechend quantifizierbarer und vergleichbarer Robustheitsmaße nach:

- dem steifigkeitsbasierten Robustheitsindex
- dem probabilistischen Robustheitsindex
- dem kombinierten Zuverlässigkeit und Elementredundanz geprägte Robustheitsindex

Diese Ansätze werden nachfolgend für einige ausgewählte Systeme vorgestellt. In Abbildung 1 ist die Erhöhung der Redundanz am Beispiel eines Fachwerksystems zu erkennen. Es werden zusätzliche Streben eingeführt, wodurch bei einem Ausfall die Last auf diese Streben umverteilt werden kann.

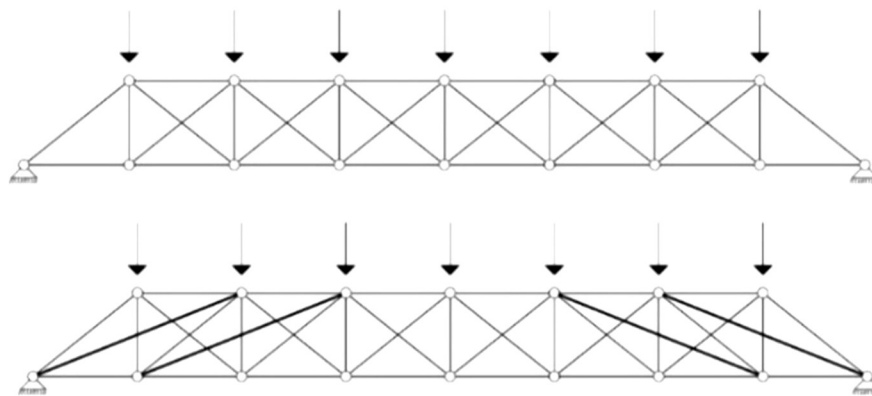


Abbildung 1: Erhöhung der Redundanz am Beispiel eines Fachwerksystems (oben), durch Addition von Elementen und Erhöhung seiner statischen Unbestimmtheit (unten)

1.8.2 steifigkeitsbasierter Robustheitsindex

Ein unkomplizierter und rechenfreundlicher Ansatz wird durch den steifigkeitsbasierten Robustheitsindex von Praxedes und Yuan (2019) und ähnlich von Starossek und Haberland (2011) dargestellt (siehe Gleichung 1.5). $\det(K_{\text{beschädigt}})$ und $\det(K_{\text{intakt}})$ sind die Determinanten der Steifigkeitsmatrizen der beschädigten bzw. intakten Struktur. Bei diesem Ansatz führt ein Schaden zu einer Verringerung der strukturellen Kapazität. In diesem Fall wird die Änderung der Struktureigenschaft "Systemsteifigkeit" gemessen. Das Verhältnis der Determinanten der Steifigkeitsmatrizen im beschädigten und intakten Zustand kann als Redundanzteil der ausgefallenen Komponente konzipiert werden. Der Index nimmt Werte zwischen 0

und 1 an und erhöht sich bei höheren Robustheitsgraden, d.h. wenn die Systemsteifigkeit nach einem Fehler auf dem vollen Niveau bleibt, hat die ausgefallene Komponente keinen Einfluss auf das Systemverhalten.

Aus dieser Sicht nimmt die Steifigkeit eines Struktursystems am meisten ab, wenn das Bauteil mit der niedrigsten Redundanzrate ausfällt. In statisch bestimmten Systemen verschwindet der Index nach einem Fehler, da die globale Steifigkeit nicht mehr gegeben ist (Instabilität). Ein Aspekt in Bezug auf diesen Index ist, dass die Robustheit nur auf den Strukturmerkmalen basiert und die Belastungssituation und die Lastumverteilung innerhalb des Systems ignoriert wird. Dieser Index kann zum Vergleich allgemeiner Systeme dienen, vorausgesetzt, die Lasteffekte sind identisch und linear. Jedoch kann der steifigkeitsbasierte Robustheitsindex nur begrenzt den Anforderungen einer realistischen Beschreibung der Robustheit gerecht werden. Um die Lastabhängigkeit zu gewährleisten, können auch die Verformungen oder Auslastungsverhältnisse (λ) vor und nach einem Ausfall verwendet werden (reaktionsbasierte Messungen), wie in Gleichung 1.6 zu sehen ist.

$$\rho_{\text{Steifigkeit}} = \min \left[\frac{\det(K_{\text{beschädigt}})}{\det(K_{\text{intakt}})} \right] = \min [r_{ii}] \quad (1.5)$$

$$\lambda_{\eta} = \frac{\eta_{\text{(beschädigt)}}}{\eta_{\text{(intakt)}}} \quad (1.6)$$

$$\lambda_w = \frac{w_{\text{(beschädigt)}}}{w_{\text{(intakt)}}} \quad (1.7)$$

1.8.3 probabilistischer Robustheitsindex

Der probabilistische Robustheitsindex $\rho_{\text{Probabilistik}}$ wird durch das Verhältnis der Ausfallswahrscheinlichkeit der intakten $pf_{\text{(intakt)}}$ und der beschädigten Struktur $pf_{\text{(beschädigt)}}$ gebildet (siehe Gleichung 1.8) (Fu und Frangopol, 1990). Es werden Werte zwischen Null und unendlich erreicht, wodurch niedrigere Werte zu einem höheren Grad an Robustheit führen. Die Robustheit zeichnet sich per Definition dadurch aus, dass anfängliche und lokale Schäden die strukturelle Zuverlässigkeit des Systems nicht wesentlich beeinträchtigen. Um diesen Index zu bestimmen, wird eine probabilistische Analyse durchgeführt. Die Eingabeparameter des Systems wie Materialstärke, Querschnitt und Lasten werden als stochastische Variablen definiert, um den Einfluss von Variabilität und Unsicherheiten in die Schadensszenarien einfließen zu lassen. Die Lasten können als zufällige Sets für verschiedene Belastungssituationen konzipiert werden. Die Ausfallswahrscheinlichkeiten lassen sich

alternativ aus Expertengutachten ableiten, z.B. in Form eines systematischen, mehrstufigen Befragungsverfahrens (Delphi-Verfahren) oder eines Risikomanagement-Workshops. Hier muss ein gewisser Kompromiss in der Genauigkeit quantifizierbarer Ergebnisse gefunden werden.

$$\rho_{\text{Probabilistik}} = \frac{p_f(\text{beschädigt}) - p_f(\text{intakt})}{p_f(\text{intakt})} = \frac{p_f(\text{beschädigt})}{p_f(\text{intakt})} - 1 \quad (1.8)$$

Dies ist eine geeignete Zuverlässigkeitsmethode für die Bewertung der Gesamtrobustheit eines Systems und sie kann in einem strategischen Entscheidungsverfahren trotz Übereinstimmung mit den aktuellen Design- und Zuverlässigkeitsstandards oder der Branchenpraxis im Allgemeinen umgesetzt werden. Dieses Verfahren erfordert jedoch einen erheblichen Rechenaufwand und eine solide Variabilitätsmodellierung, eine gute Sammlung unterstützender Daten und Fachwissen auf technischer Ebene.

1.8.4 kombinierter Zuverlässigkeits- und Elementredundanz geprägter Robustheitsindex

In diesem Fall sollte auch die Möglichkeit der Formulierung eines risikobasierten Robustheitsindex (siehe Gleichung 1.9) erwähnt werden. Diese beruht auf der Berücksichtigung der möglichen Folgen progressiver Schäden mit der klassischen Definition [Risiko] = [Eintrittswahrscheinlichkeit] x [Folge]. Der Index liegt zwischen 0 und 1 und setzt sich aus dem Verhältnis zwischen direktem Risiko R_{dir} und Gesamtrisiko $R = R_{\text{dir}} + R_{\text{ind}}$ zusammen. Ein höherer Grad an Robustheit wird durch einen steigenden Index dargestellt. Sollte der Index einen Wert von eins haben, würde dies bedeuten, dass die betreffende Stützstruktur absolut robust ist und keine Schadensausbreitung stattfindet. In diesem Fall wird kein indirektes Risiko R_{ind} durch lokale Schäden (z.B. Ausfall einer Strebe in einem Fachwerksystem) erzeugt. Steigt das indirekte Risiko R_{ind} jedoch im Verhältnis zum ursprünglichen Schaden überproportional an, geht der Index gegen Null. Aus dem Produkt der Wahrscheinlichkeiten eines Schadens und der daraus resultierenden Folgen, wie z.B. wirtschaftliche Verluste, ergibt sich ein Risiko. Das direkte Risiko und die Risiken werden durch die Gleichungen 1.10 und 1.11 gemäß Gleichung 1.1 berechnet (siehe Baker et al., 2008).

$$\rho_{\text{Risiko}} = \frac{R_{\text{dir}}}{R_{\text{dir}} + R_{\text{ind}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{\text{ind}}}{R_{\text{dir}}}} \quad (1.9)$$

$$R_{\text{dir}} = \sum_i \sum_j C_{\text{dir},ij} P(D_j | E_i) P(E_i) \quad (1.10)$$

$$R_{\text{ind}} = \sum_k \sum_i \sum_j C_{\text{ind},ijk} P(S_k | D_j \cap E_i) P(D_j | E_i) P(E_i) \quad (1.11)$$

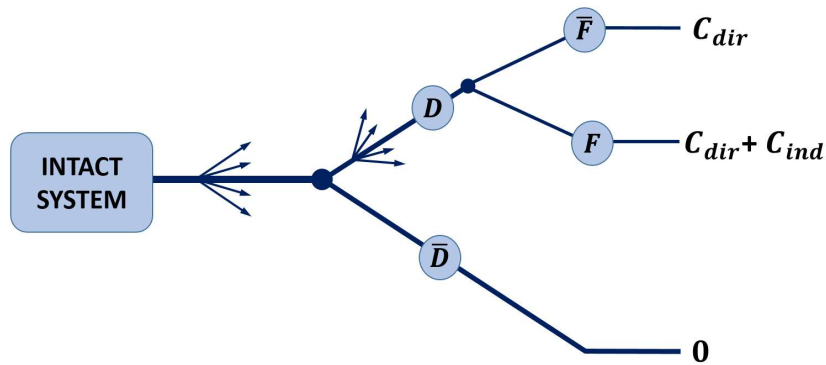


Abbildung 2: Direkte und indirekte Folgen, angepasst von (Baker et al., 2008)

Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, verbleibt das System im Falle einer Einwirkung entweder in einem unbeschädigten Zustand \bar{D} (keine Folgen) oder geht in einen beschädigten Zustand D mit den sich daraus ergebenden direkten Folgen C_{dir} über. Jeder Schaden, der im weiteren Verlauf des Ereignisses auftritt, führt entweder zum endgültigen Ausfall des Systems F aufgrund mangelnder Robustheit mit den daraus resultierenden indirekten Folgen C_{ind} oder das System ist in der Lage dem Schadensfortschritt \bar{F} standzuhalten. In diesem Fall beschränkt sich der Schaden auf die direkten Folgen, die direkt mit der Einwirkung zusammenhängen.

Basierend auf Eriksson und Tibert (2006) und Kou et al. (2017) wird ein Robustheitsindex vorgeschlagen, der die einzelnen Beiträge zur Redundanz durch die Systemkomponenten und deren Ausfallwahrscheinlichkeiten berücksichtigt. Dieser Index kann als Robustheitsindex durch Kombination der strukturellen Zuverlässigkeit und des Redundanzgrades der Strukturkomponenten verstanden werden. Wie in der Definition des Index in Gleichung 1.12 zu sehen ist, wird die Zuverlässigkeit der einzelnen Elemente (β_i) geschätzt und mit ihren Redundanzkomponenten (r_{ii}) kombiniert. Dieser Ansatz erklärt implizit den Einfluss des Grades der Unbestimmtheit auf die Beurteilung der strukturellen Robustheit, d.h. durch die Zuordnung eines Beitrags zu jeder Komponente entsprechend ihrer Redundanz. Die Definition der statischen Unbestimmtheit ist in Gleichung 1.13 angegeben. Die Summe der einzelnen Redundanzbeiträge summiert sich zur Unbestimmtheit f des gesamten Systems. Basierend auf diesem Index bleiben die Einflüsse aus der Korrelation zwischen den Elementen (nicht diagonale Einträge einer Redundanzmatrix z.B. in einem Fachwerksystem) dissoziiert, obwohl diese Einflüsse für eine vernünftige Bewertung der Robustheit berücksichtigt werden sollten. Am Beispiel eines Fachwerksystems ist klar, dass das Struktursystem aus einer bestimmten Anzahl miteinander verbundener linearer Komponenten besteht, während die nicht diagonalen Einträge der

Redundanzmatrix den Einfluss eines lokalisierten Ausfalls auf die angrenzenden Komponenten widerspiegeln.

$$\rho_{\text{Redundanz}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ii}(1-\phi(-\beta_i))}{\sum_{i=1}^n (1-r_{ii})} \quad (1.12)$$

$$f = a + p - 3k \quad (1.13)$$

mit:

- β_i = einzelnen Fachwerkelemente
- r_{ii} = Redundanzkomponenten
- a = Anzahl der externen Reaktionen
- p = Anzahl der festen Komponenten
- k = Anzahl der Knoten

1.9 Monte-Carlo-Methode

Die Monte-Carlo-Methode oder Monte-Carlo-Simulation ist ein stochastisches Verfahren, welches auf dem Gesetz der großen Zahlen basiert. Dieses besagt, dass sich die relative Häufigkeit von Zufallsergebnissen um die theoretische Wahrscheinlichkeit eines Zufallsergebnisses approximiert. Bei der Simulation werden für die relevanten Variablen Grenz- und Mittelwerte ermittelt und Verteilungsfunktionen gewählt. Der Zufallsgenerator erzeugt Zufallszahlen a_{ik} von 0 bis 1. Diese werden als Werte der Verteilungsfunktion $F_{X_i(x_i)}$ interpretiert und geben den zugehörigen Wert x_{ik} aus (siehe Abbildung 3).

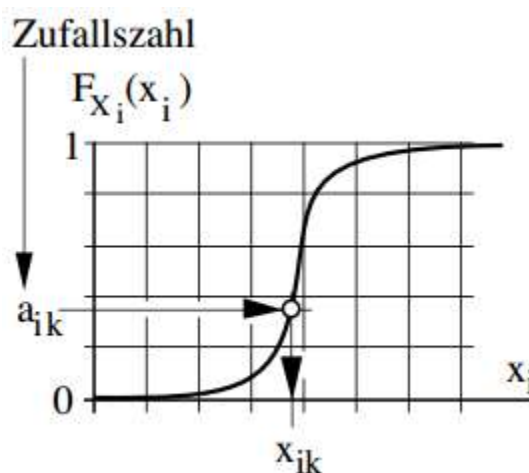


Abbildung 3: Vorgehensweise MC-Methode

Durch diese Herangehensweise können beispielsweise bei bekannter Verteilungsfunktion von Einwirkung und Widerstand zufällige Kombinationen simuliert werden. Soll nun die Versagenswahrscheinlichkeit bestimmt werden, wird diese durch die frequentistische Definition der Wahrscheinlichkeit wie folgt berechnet:

$$p_f \approx \frac{z_0}{z} \tag{1.14}$$

Hierfür wird z_0 (Anzahl der Versagensfälle) durch z (Gesamtanzahl) dividiert. Um zuverlässige Aussagen zu erhalten, müssen diese Simulationen in hoher Zahl durchgeführt werden.

2 Projektüberblick

Im folgenden Kapitel soll ein Überblick über die wissenschaftliche Analyse der numerischen Zuverlässigkeits- und Robustheitsbewertung für die Tragsicherheit und Gebrauchstauglichkeit eines abgehängten Deckensystems gegeben werden. Einleitend werden in Kapitel 2.1 die zu untersuchenden Systeme vorgestellt. Um die Vorgangsweise einer Zuverlässigkeitsbewertung transparent darzustellen, wird in Kapitel 2.2 ein Ablaufdiagramm präsentiert, welches die durchgeführten Prozessschritte aufzeigt. Ziel der Untersuchung ist, die Zuverlässigkeit für das folgend beschriebene Deckensystem zu bestimmen. Es wird ein Sicherheitsindex von 3,8 angestrebt.

2.1 Deckenaufbau und System

In Abbildung 4 bis Abbildung 9 sind die zu untersuchenden Systeme im Grundriss und in der Ansicht dargestellt. Wie bereits in der Einleitung erwähnt, wird ein Sicherheitsindex von 3,8 angestrebt. Dieser kann über den Abstand der Nägel zueinander beeinflusst werden. Die Systeme unterscheiden sich in den Nagelabständen und der sich ergebenden Nagelanzahl. Im ersten Schritt wird der Nagelabstand von 450 mm gewählt. In weiterer Folge werden die Nägel in Abständen von 360 mm und 280 mm gesetzt. Des Weiteren werden die Systeme im Berechnungsschritt mit und ohne Deckenabstützung betrachtet.

In den Ansichten sind die Nägel in Rot, die Hänger in Braun und das obere Deckenprofil in Blau erkennbar. An den Hängerenden ist das untere Profil angebracht (in diesen Abbildungen nicht dargestellt).



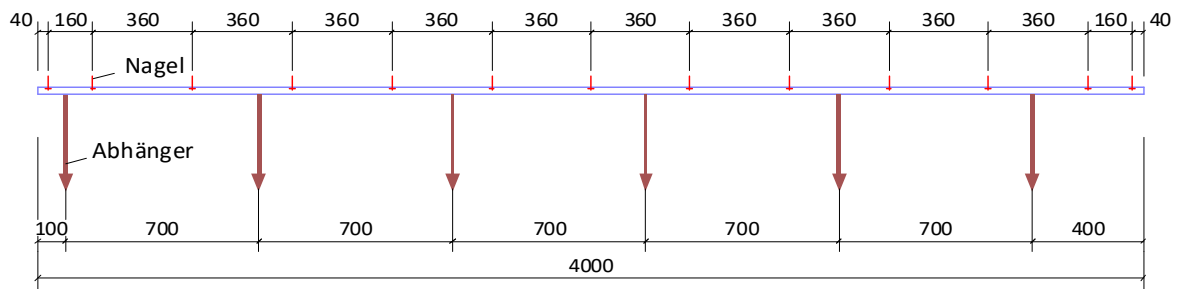


Abbildung 6: Ansicht Deckensystem mit Nagelabstand 360mm, Quelle: F. Dreier, K. Block

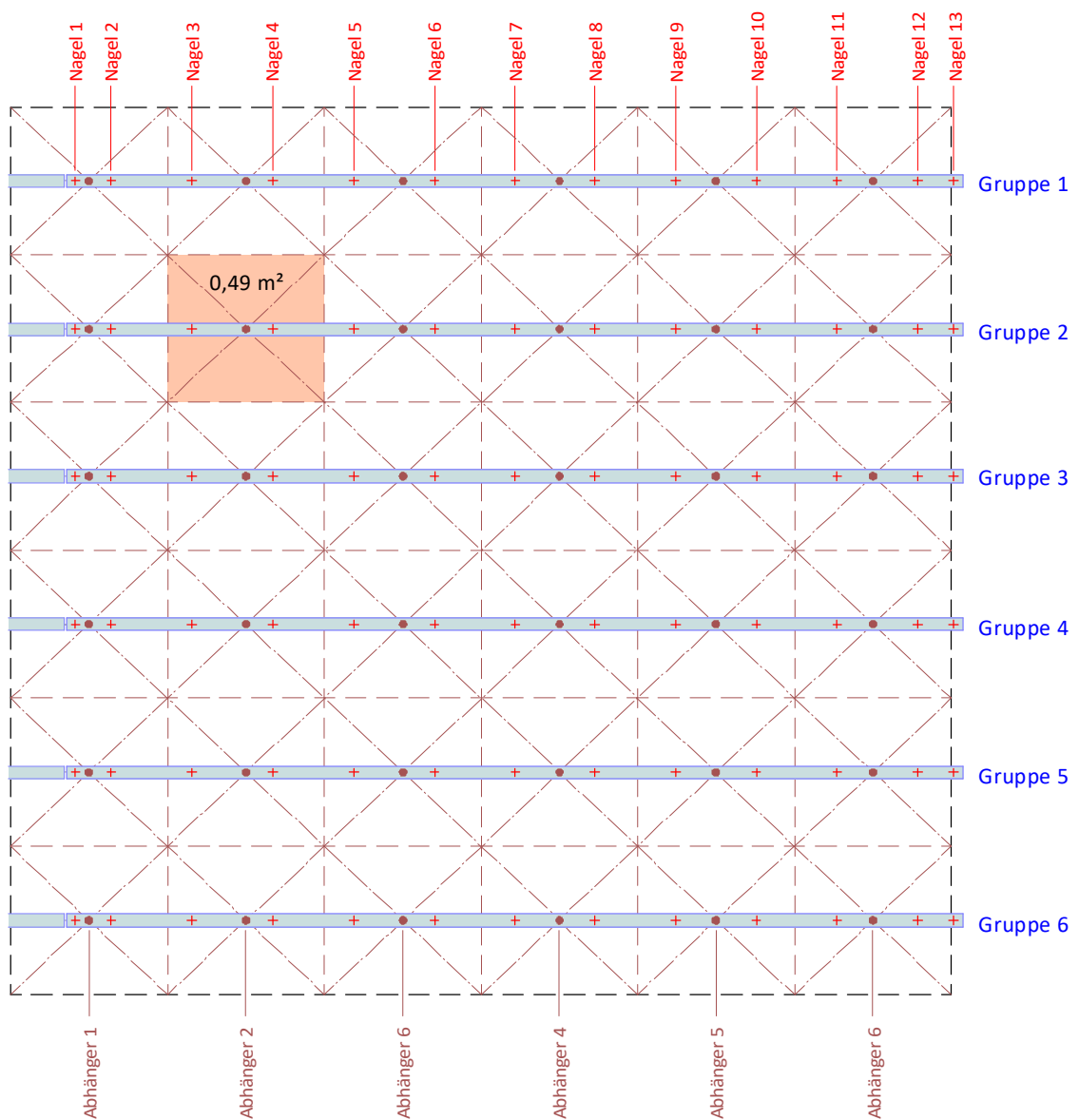


Abbildung 7: Grundriss Deckensystem mit Nagelabstand 360mm, Quelle: F. Dreier, K. Block

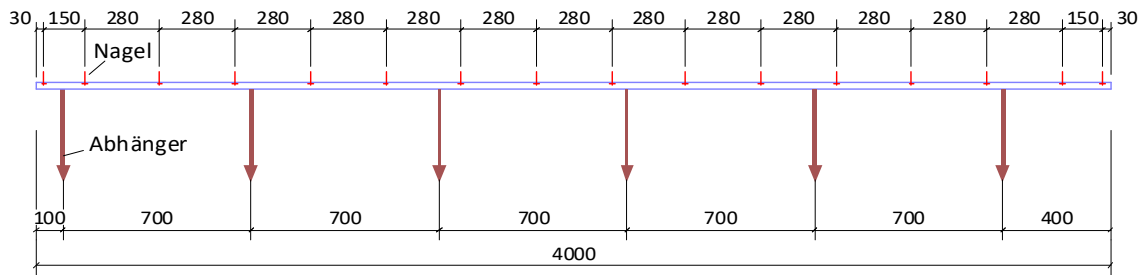


Abbildung 8: Ansicht Deckensystem mit Nagelabstand 280mm, Quelle: F. Dreier, K. Block

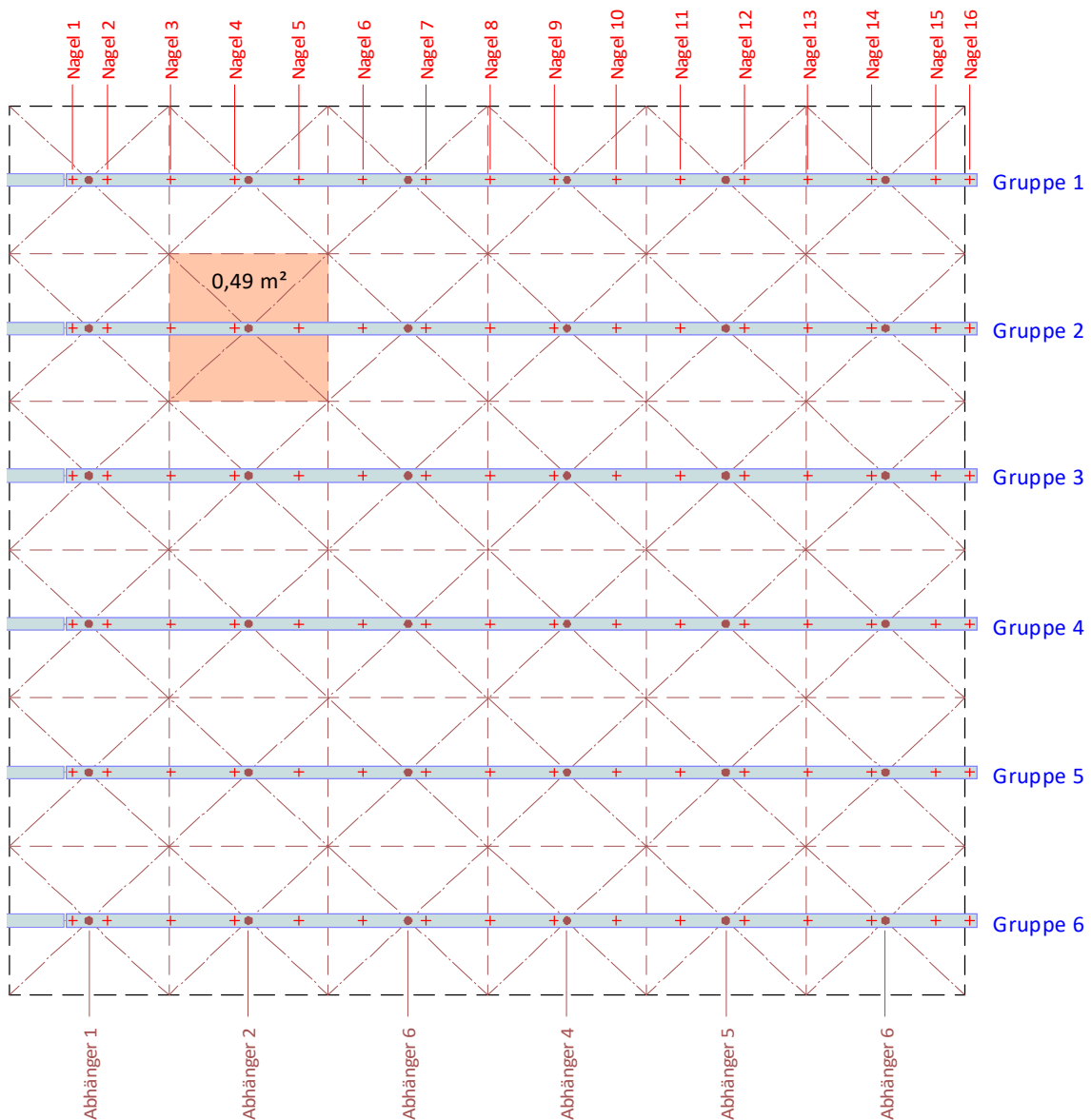


Abbildung 9: Grundriss Deckensystem mit Nagelabstand 280mm, Quelle: F. Dreier, K. Block

2.2 Ablaufdiagramm

In Abbildung 10 ist das Ablaufdiagramm zu sehen, welches die durchgeführten Prozessschritte schematisch zeigt. Nachfolgend werden die einzelnen Schritte jeweils kurz erläutert, damit ein grober Überblick über die Zusammenhänge erhalten wird. Dieses Diagramm dient vor allem dazu die essenziellen Arbeiten rund um die Auswertung mit Sofistik aufzuzeigen.





Abbildung 10: Ablaufdiagramm - nötige Prozessschritte

2.2.1 Prozessschritt: Excel Dr. Dreier

Grundlage stellen die Verteilungsfunktionen der Lastverhältnisse sowie der Nageltragfähigkeiten, welche von Dr. Dreier erstellt wurden, dar. Aus diesen Verteilungen können Zufallswerte der Hängerkräfte sowie der Nagelkapazitäten über die Monte-Carlo-Methode generiert werden, welche für die weiteren Arbeitsschritte benötigt werden. Die berechneten Werte aus den Verteilungsfunktionen wurden in Excel eingetragen (siehe Tabelle 1). Diese Tabelle dient dazu, einen Einblick in die Anzahl an notwendigen Schritten zu geben.

Tabelle 1: Simulationsablauf für den Nachweis der Nagel-Gruppenbefestigungen von abgehängten Decken, nach Dr. Dreier

<u>Simulation experimenteller Abhängerkräfte</u>				<u>Simulation experimenteller Nagel-Tragfähigkeiten</u>			
Zufallszahlen Z				Zufallszahlen Z			
Z	Abhänger 1	...	Abhänger 6	Z	Nagel 1	...	Nagel 11
Gr. 1	0,077042568	...	0,38802566	Gr. 1	0,9062189	...	0,0916545
Gr. 2	0,384823598	...	0,689339091	Gr. 2	0,1952906	...	0,1161214
Gr. 3	0,474904732	...	0,776111625	Gr. 3	0,9556005	...	0,4537874
Gr. 4	0,584432282	...	0,429674274	Gr. 4	0,832687	...	0,6097821
Gr. 5	0,628780404	...	0,087982862	Gr. 5	0,7882528	...	0,9391672
Gr. 6	0,963433118	...	0,332217679	Gr. 6	0,3974351	...	0,9311379
							
$E(Z) = 1,165 \cdot \ln\left(\frac{1}{1 - Z / 1,001}\right)^{0,304}, \quad \text{mit } 0 < Z < 1$							
Lastverhältnis $E_A = F_{\text{exp A}} / F_{\text{calc A}} = E(Z)$							

E_A	Abhänger 1	...	Abhänger 6
Gr. 1	1,255	...	1,268
Gr. 2	1,196	...	0,824
Gr. 3	0,982	...	0,947
Gr. 4	1,218	...	1,365
Gr. 5	1,581	...	0,377
Gr. 6	1,195	...	1,762



Simulierte Abhängerkräfte

$$F_{\text{sim A}} = E_A \cdot F_{\text{calc A}} = E_A \cdot 0,245$$

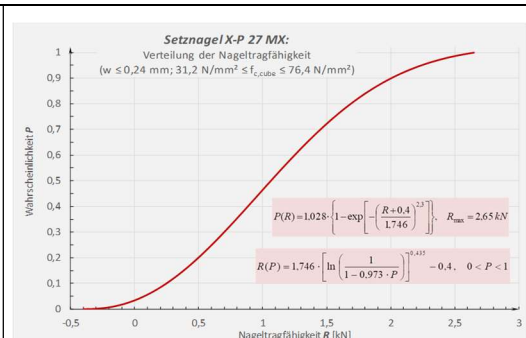
$F_{\text{sim A}}$	Abhänger 1	...	Abhänger 6
Gr. 1	0,308	...	0,311
Gr. 2	0,293	...	0,202
Gr. 3	0,241	...	0,232
Gr. 4	0,299	...	0,334
Gr. 5	0,387	...	0,092
Gr. 6	0,293	...	0,432



Experimentelle Abhängerkräfte

$$F_{\text{exp A}} = k_{\text{sim A}} \cdot F_{\text{sim A}}$$

$F_{\text{exp A}}$	Abhänger 1	...	Abhänger 6	$\Sigma F_{\text{exp A}}$
Gr. 1	0,275	...	0,278	1,332
Gr. 2	0,262	...	0,181	1,399
Gr. 3	0,215	...	0,208	1,409
Gr. 4	0,267	...	0,299	1,512
Gr. 5	0,346	...	0,083	1,703
Gr. 6	0,262	...	0,386	1,465



$$R(Z) = 1,746 \cdot \left[\ln \left(\frac{1}{1 - 0,973 \cdot Z} \right) \right]^{0,435} - 0,4, \text{ mit } 0 < Z < 1$$



Simulierte Nagel-Tragfähigkeiten

$$R_{\text{sim N}} = R(Z)$$

$R_{\text{sim N}}$	Nagel 1	...	Nagel 11
Gr. 1	2,028	...	0,223
Gr. 2	0,487	...	0,294
Gr. 3	2,271	...	0,980
Gr. 4	1,778	...	1,268
Gr. 5	1,656	...	2,179
Gr. 6	0,879	...	2,139





Experimentelle Nagel-Tragfähigkeiten

$$R_{\text{exp N}} = R_{\text{sim N}}, \text{ wenn } R_{\text{sim N}} > 0;$$

$$\text{sonst } R_{\text{exp N}} = 0$$

$R_{\text{exp N}}$	Nagel 1	...	Nagel 11	$\Sigma R_{\text{exp N}}$
Gr. 1	0,747	...	1,358	10,466
Gr. 2	0,815	...	2,169	15,210
Gr. 3	1,183	...	1,039	13,199
Gr. 4	1,206	...	0,100	10,939
Gr. 5	1,220	...	1,017	10,556
Gr. 6	1,293	...	0,990	11,626

Berechnung der Auslastung und Auswahl des Sets mit höchster Auslastung		
		Auslastung
		$\Sigma F_{exp A} / \Sigma R_{exp N}$
		8,8%
		6,4%
		7,8%
		7,4%
		9,7%
		9,0%
		max. Auslastung
		9,7%
<div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <div style="text-align: center;">  </div> <div style="text-align: center;">  </div> </div>		
Statische Berechnungen und Nachweise werden mit den Werten experimenteller Abhängerkräfte und Nagel-Tragfähigkeiten der höchstausgelasteten Gruppenbefestigung geführt		
Experimentelle Abhängerkräfte $F_{exp A}$		Experimentelle Nagel-Tragfähigkeiten $R_{exp N}$
$F_{exp A1}$	...	$F_{exp A6}$
0,299	...	0,393
$R_{exp N1}$	...	$R_{exp N16}$
1,956	...	0,659

Der Zufallsgenerator in Excel stellt sich für eine Vielzahl von Simulationen als unpraktikabel dar, da jeder Simulationsdurchlauf manuell gestartet werden muss. Aus diesem Grund wurde in einem weiteren Schritt auf das Programm Matlab zurückgegriffen.

2.2.2 Prozessschritt: Matlab

Die Eingabe sind die Verteilungsfunktionen der Hängerkräfte und Nagelkapazitäten. Über die Monte-Carol-Methode werden zufällige y-Werte zwischen 0 und 1 generiert und den dazugehörigen x-Werten der kumulativen Verteilung zugeordnet. Dadurch werden zufällige Werte für Hängerkräfte und Nagelkapazitäten gemäß ihrer Verteilung generiert. Der Prozess der Zufallsgenerierung kann mittels Matlab programmiert und folgend automatisiert für 1 Mio Simulationen durchlaufen werden. Ergebnis dieses Rechenschritts stellt eine Datei mit den zufällig generierten

Hängerkräften L und Nagelkapazitäten R dar. In Abbildung 11 ist dies schematisch dargestellt. An jeder Stelle würde eine zufällig generierte Zahl stehen. Diese Datei dient als Input für die statischen Berechnungen in Sofistik, welche den Hauptteil dieser Arbeit darstellen.

R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆			...			R ₁₃		L ₁	L ₂	L ₃		...			L ₆	
...																					
...																					
10 ⁶ Zeilen																					

Abbildung 11: Schema Ergebnisdatei aus Matlab (Input für Sofistik)

2.2.3 Prozessschritt: Sofistik

In Sofistik werden die in Matlab generierten Werte eingelesen und das System (Beispiel siehe Abbildung 12) definiert. Primäre Ausgabe der folgenden Rechenprozesse ist eine Liste mit den Werten der resultierenden Nagelkräfte. Es können die Anzahlen der Ausfälle je Simulation sowie kinematische Systeme erkannt werden (siehe Abbildung 12). Ein kinematisches System tritt auf, wenn alle Nägel ausgefallen sind. Dies ist der Fall, wenn $R_{i,berechnet} < R_{i,Kapazität}$ ist. Wenn $R_i < F_i$ ist, bedeutet dies, dass die Nagelkapazität R_i (=Widerstand) kleiner der auftretenden Kraft F_i (Einwirkung) ist und der Nagel daher ausfällt. Auf Basis diese Ergebnisse kann eine Bewertung vorgenommen werden. Es wird ermittelt, wie oft ein, zwei, drei usw. Nägel je System ausgefallen sind. Diese Anzahl an Nagelausfällen wird prozentuell dargestellt. Weiters werden die Versagenswahrscheinlichkeiten des Systems ermittelt und daraus die Sicherheitsindizes β berechnet.

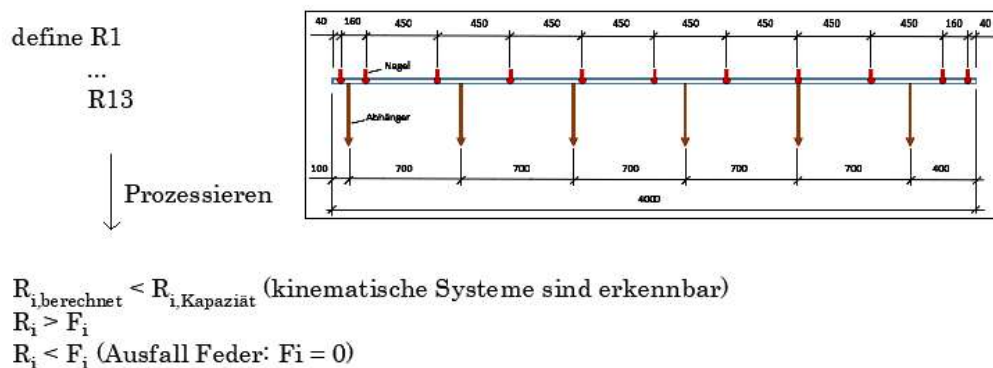


Abbildung 12: Schema Sofistikprozess & Systemdarstellung (hier mit 450 mm Nagelabstand)

3 Sofistik

Im Kapitel Sofistik werden in Abschnitt 3.1 zunächst die allgemeinen Funktionen der einzelnen Sofistik-Programmblöcke vorgestellt und erklärt. Im nächsten Abschnitt 3.2 wird die Vorstufe des generischen Codes beschrieben. Aufbauend auf diesem Kapitel wird die Weiterentwicklung des Codes in Abschnitt 3.3 skizziert.

3.1 Übersicht der Programmblöcke

3.1.1 Allgemeine Befehle

In Sofistik erfolgt die gesamte Eingabe als Programmcode. Zur System- und Lastgenerierung werden unter anderem die Programmblöcke „Aqua“, „Sofimsha“ und „Sofiload“ verwendet. Die Berechnung erfolgt im Block „Ase“. Bevor die einzelnen Blöcke genauer erklärt werden, erfolgt eine Zusammenfassung von Befehlen, welche in mehreren Programmblöcken wiederholt auftreten.

Die Steuerung der Ausgabe erfolgt über den Befehl „ECHO“. Mit dem Wert „OPT“ wird das Ausmaß der Ausgabewerte festgelegt. Wird nachfolgend beispielsweise der Wert „MAT“ oder „QUER“ verwendet, werden die Materialparameter bzw. Querschnittswerte ausgegeben. Bei Verwendung des Werts „VOLL“ werden alle Optionen gesetzt. Über die Eingabe „WERT“ wird der Umfang der Ausgabe definiert. Bei Angabe von „NEIN“ erfolgt keine Ausgabe, bei der Verwendung von „VOLL“ wird eine erweiterte Ausgabe generiert. Diese Ausgabe ist im Reportfenster einsehbar. „KOPF“ steht für die Kopfzeile und legt mit der nachfolgenden Eingabe die Überschrift bzw. Kopfzeile fest. Mit dem Befehl „ENDE“ wird die Eingabe für den jeweiligen Block beendet.

3.1.2 Aqua

Im AQUA-Block (siehe Abbildung 13) werden allgemeine Querschnittsinformationen definiert.

```
+PROG AQUA uns:1
KOPF Trägerrost
ECHO OPT VOLL WERT NEIN
NORM DIN 1045-1          $ Von der Norm hängen z.B. Bezeichnungen für Materialien ab
BETO 1 C 25              $ Material Beton
STAH 2 BST 500SA         $ Material Bewehrungsstahl
QUER 1 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000
QUER 2 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000
ENDE
```


Abbildung 13: AQUA-Block, Querschnitts- und Materialdefinition

Mithilfe des Befehls „NORM“ wird eine Norm definiert, welche als Berechnungsgrundlage dient. Es stehen unter anderem „EN“ Eurocodes, „DIN“ deutsche Normen und „OEN“ österreichische Normen zu Auswahl. Weiters wird mit einer nachfolgenden Bezeichnung die spezielle Norm definiert.

Material, wie beispielsweise Betonmaterialien und metallische Werkstoffe, werden durch die Befehle „BETO“ bzw. „STAH“ definiert. Mit der nachfolgenden Zahl wird eine Materialnummer vergeben, mit welcher im späteren Verlauf den Elementen Materialien zugeordnet werden können. Weiters wird die Art des Materials sowie die Festigkeitsklasse bzw. Güte definiert.

Mit dem Befehl „QUER“ werden die Querschnittswerte definiert. Der erste Wert legt die Querschnittsnummer fest, um im späteren Verlauf den Elementen Querschnitte zuordnen zu können. Die nachfolgende Zahl ordnet dem Querschnitt über die zuvor definierte Materialnummer ein Material zu. Die nächste Stelle gibt die Fläche des Querschnitts an. Dieser Teil wurde in Abbildung 15 als Bruch formuliert. Des Weiteren können Querschnittswerte wie beispielsweise Torsions- und Flächenträgheitsmomente definiert werden. Grundsätzlich können die Eingabewerte in einer vorgegebenen Reihenfolge (siehe Abbildung 14) ohne Kürzel angegeben oder auch untereinander durch Kürzel vorgezogen werden (siehe Abbildung 15).

QUER NR MNR A[m2] AY[m2] AZ[m2] IT[m4] IV[m4] IZ[m4] IYZ[m4] CM[m6] YSC[m] ZSC[m] YMIN[m] YMAX[m] ZMIN[m] ZMAX[m] WT[1/m3] WY[1/m2] WYZ[1/m2] NPL[kN] VYPL[kN] VZPL[kN] MTP[kNm] MYPL[kNm] MZPL[kNm] BCYZ

Abbildung 14: Darstellung der vorgegebenen Reihenfolge von Eingabewerten

QUER 1 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000
QUER 2 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000

Abbildung 15: Darstellung von vorgezogenen Eingabewerten (hellblau)

3.1.3 Sofimsha

Der Block „SOFIMSHA“ dient der Systemdefinition. Diese bezieht sich auf Geometrie und Randbedingungen des Systems. Es werden die Koordinaten der Knoten und verbindenden Stäbe sowie Festhaltungen definiert. Über den Befehl „SYST“ wird die Art des Systems definiert (siehe Abbildung 16). Es kann zwischen einem räumlichen System „3D“, einem ebenen System „2D“ und weiteren Systemen gewählt werden.

```

+PROG SOFIMSHA urs:2
KOPF RAUMSYSTEM
ECHO OPT VOLL WERT NEIN
SYST 3D

```

Abbildung 16: Sofimsha-Block, Systemdefinition

Mit der Eingabe „KNOT“ werden Knoten, Koordinaten und Festhaltungen definiert. Die Knotennummern und jeweiligen Koordinaten können wahlweise einzeln oder in einem Intervall vergeben werden. Unter dem Befehl „FACH“ können Fachwerkelemente definiert werden. Diese können entweder auf Zug oder auf Druck belastet werden. In diesem Block ist es möglich, für die Fachwerkelemente eine Nummer, Anfangsknoten, Endknoten, Querschnittsnummer, Vorspannkraft, Schlupf, Risslast und Fließlast hinzuzufügen. Weitere Optionen wie eine Teilung für die Generierung oder optionale Teilungsknoten sind wählbar. Über den Befehl „STAB“ werden die gesetzten Knoten mit Stäben verbunden. Hierfür wird mit „ka“ und „ke“ jeweils der Anfangs- und Endknoten definiert.

```

KNOT nr 2          x 0.04          y 7.0    z 0.0
KNOT nr (3 7 1)    x (0.0657 0.0257) y 7.0    z 0.0
FACH nr 204 ka 4    ke 104          QNR 2 TEIL 4
STAB nr (1 62 1)   ka ( 1 1)       ke ( 2 1)   QNR 1 TEIL 4

```

Abbildung 17: Sofimsha-Block, Elementgenerierung

Mit der Eingabe „FIX“ werden Festhaltungen für Knoten festgesetzt. Eine Auswahl von möglichen Festhaltungen ist Tabelle 2 zu entnehmen.

```

KNOT 1    FIX ZP
KNOT 2    FIX MXPY

```

Abbildung 18: Sofimsha-Block, Definition der Randbedingungen

Tabelle 2: Auszug der Kennbuchstaben für Festhaltungen

PX	Festhaltung gegen Verschiebung in x
PY	Festhaltung gegen Verschiebung in y
PZ	Festhaltung gegen Verschiebung in z
MX	Festhaltung gegen Verdrehung um x
MY	Festhaltung gegen Verdrehung um y
MZ	Festhaltung gegen Verdrehung um z

XP	= PY + PZ
YP	= PX + PZ
ZP	= PX + PY
PP	= PX + PY + PZ

Über den Befehl „FEDE“ werden Federelemente gesetzt. Die Nummerierung der Federn sowie deren Zuordnung zu einer Knotennummer kann wieder in einem Intervall erfolgen. Mit „CP“ wird die Federkonstante in Wirkungsrichtung in der Einheit kN/m³ und mit „RISS“ die Rissspannung der Feder in kN/m² definiert.

```
FEDE (2002 2062 1) KA (2 1) DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
del typ fede 2002
```

Abbildung 19: Sofimsha-Block, Generierung Federelemente

Das Entfernen von bereits definierten Elementen erfolgt über die Eingabe von „del typ“ und die Elementart sowie -nummer.

3.1.4 Sofiload

Der Programmblock Sofiload hat die Aufgabe, die Belastung zu generieren. Da die Lasten unabhängig vom FE-Netz definiert werden, stellt Sofiload den Zusammenhang zwischen geometrischem Modell und Berechnungsmodell her. Dies erfolgt durch Erzeugung von Element- und Knotenlasten an der vorhandenen Netzstruktur.

```
+prog sofiload urs:4
  kopf Belastung 1.1
  ECHO OPT VOLL WERT NEIN
  $ beispiele für Lastfälle

  lf nr 1;
  knot nr typ p1 $Variante 1
      4 pzz $(L1)
      16 pzz $(L2)
      25 pzz $(L3)
      35 pzz $(L4)
      44 pzz $(L5)
      53 pzz $(L6)
  ende
```

Abbildung 20: Beispiel Sofiload-Block, Lastgenerierung

Die Funktionen der Befehle „Kopf“ und „Echo“ können Kapitel 3.1.1 entnommen werden. Über die Eingabe „lf“ werden Lastfälle definiert. In den Einstellungen können die Nummerierung, die Einwirkung für den Lastfall sowie verschiedene

Faktoren und Sicherheitsbeiwerte festgelegt werden. In weiterer Folge werden durch „knot“ die Knotenlasten definiert. Mit „nr“ wird der gewünschte Knoten ausgewählt und über „typ“ die Lastart und Richtung festgelegt. Mit p1 bis p7 können Lastwerte zugeordnet werden. Mit dem Befehl „ende“ wird die Eingabe für diesen Block beendet.

3.1.5 Ase

Der Block „Ase“ dient der Aufstellung sowie Lösung der Steifigkeitsmatrix.

```
+prog ase urs:5
    kopf 1
    ECHO OPT VOLL WERT NEIN
    syst prob nonl iter 500 tol 0.001
    STEU WARN 448
    lf 1
ende
```

Abbildung 21: Beispiel Ase-Block, Systemberechnung

Die Funktionen der Befehle „kopf“ und „Echo“ können Kapitel 3.1.1 entnommen werden.

Mithilfe des Befehls „syst“ (globaler Steuerwert) können Einstellungen an der Berechnung vorgenommen werden. Unter „prob“ wird die Art der Berechnung festgelegt. Es kann unter anderem zwischen linearer „line“ und materialnichtlinearer Berechnung „nonl“ sowie Theorie 2. Ordnung „TH2“ gewählt werden. Die Kürzel „iter“ und „tol“ definieren die Anzahl und die Toleranz der Iterationen.

Durch den Befehl „STEU“ (Steuerung Rechenverfahren) ergänzt mit „Warn“ können spezielle Fehlermeldungen ausgeschaltet werden.

Über den Befehl „lf 1“ wird der Lastfall mit der Nummer 1, welcher zuvor in Block Sofiload definiert wurde, der Berechnung zugeordnet.

3.1.6 Template

In diesem Block werden Variablen definiert und in der Sofistik-Datenbank gespeichert. Dies erfolgt mit Hilfe der Kürzel „LET“ und „STO“.

3.2 Vorstufe des generischen Codes

Auf den folgenden Seiten wird die erste Version des Sofistik-Codes mit einem Nagelabstand von 450mm, 11 Nägeln und mit Deckenabstützung schrittweise erläutert. Dies soll die Verständlichkeit des nachfolgenden Codes in Kapitel 3.3 erleichtern.

```
$ KAPAZITÄT NAGEL #1-11 ...(Vektor mit n Skalarwerten)
#define R1 = 0.610851
#define R2 = 2.610972
#define R3 = 1.571931
#define R4 = 1.726047
#define R5 = 2.266147
#define R6 = 1.807843
#define R7 = 0.000000
#define R8 = 0.725598
#define R9 = 1.803418
#define R10 = 0.796885
#define R11 = 1.037762

#define L1 = 0.370950
#define L2 = 0.391681
#define L3 = 0.286086
#define L4 = 0.302472
#define L5 = 0.155796
#define L6 = 0.310244
```

Abbildung 22: Definition der Nagelkapazitäten und Hängerkräfte, Vorstufe des generischen Codes

Mit dem Befehl „#define“ werden Variablen definiert. Die Werte der Variablen R1 bis R11 repräsentieren die Nagelkapazitäten, die Werte für L1 bis L6 die Hängerkräfte. Diese Größen werden aus der Matlab-Input-Datei geladen.

3.2.1 Aqua

Abbildung 23 zeigt den Code des Aqua-Blocks. Durch den Befehl „KOPF“ wird die Kopfzeile mit der Bezeichnung „Trägerrost“ versehen.

```
+PROG AQUA urs:1
KOPF Trägerrost
ECHO OPT VOLL WERT NEIN
NORM DIN 1045-1 $ Von der Norm hängen z.B. Bezeichnungen für Materialien ab
BETO 1 C 25 $ Material Beton
STAHL 2 BST 500SA $ Material Bewehrungsstahl
QUER 1 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000/1000
QUER 2 1 16472610/210000/1000/1000 IT .024279 IY 1671873000/210000/1000/1000/1000/1000 IZ 1671873000/210000/1000/1000/1000/1000
ENDE
```

Abbildung 23: Aqua-Block, Vorstufe des generischen Codes

Mit dem Befehl „ECHO“ und der Eingabe „OPT“ wird der Umfang des folgenden Blocks definiert. Dieser ist auf „VOLL“ gestellt, das heißt, dass alle Ausgabeoptionen

gewählt wurden. „WERT“ beschreibt den Ausgabeumfang der ECHO-Option. Dieser wurde auf „NEIN“ gestellt, daraus folgt, dass nur eine Berechnung der Daten aber keine Ausgabe durchgeführt wird. Dies hat den Vorteil einer verkürzten Rechenzeit.

Um eine Berechnung zu ermöglichen, wurde im ersten Schritt die „Norm“ „DIN 1045-1“ gewählt. Zu beachten ist, dass es von der Norm abhängige Variablen wie zum Beispiel die Materialbezeichnungen gibt.

Des Weiteren wurden die Materialien definiert. Beton „BETO“ wurde die Materialnummer 1 mit der Festigkeitsklasse C 25 zugewiesen. Stahl „STAH“ mit der Materialnummer 2 wurde mit der Stahlgüte Bewehrungsstahl 500 SA festgelegt.

Wie in Abbildung 23 zu erkennen ist, wurden zwei Querschnitte definiert. So wurde mit „QUER 1 1“ dem Querschnitt 1 das Material mit der Materialnummer 1 (Beton C25) zugewiesen. Der darauffolgende Wert weist eine Querschnittsfläche A in m^2 zu. Auf Grund von Einheitenumformungen ist die Fläche als Bruch formuliert. Weiters sind das Torsionsträgheitsmoment IT, das Flächenträgheitsmoment IY und das Flächenträgheitsmoment IZ jeweils in m^4 und wiederum als Bruch angegeben.

3.2.2 Sofimsha

Die Art des Systems ist als räumliches System definiert, weshalb die Einstellung „SYST“ mit „3D“ erfolgt.

```
PROG SOFIMSHA urs:2
      KOPF RAUMSYSTEM
      ECHO OPT VOLL WERT NEIN
      SYST 3D
```

Abbildung 24: Definition des räumlichen Systems

In Abbildung 25 werden die Knoten des oberen Profils definiert. Dies erfolgt entweder einzeln über die Zuordnung von Koordinaten zu einer Knotennummer oder über ein Intervall. In Zeile 3 erfolgt beispielsweise die Knotennummerierung von 3 bis 7 in einem Intervall von 1. Das Intervall beginnt bei der x-Koordinate 0,0657 mit einer Schrittweite von 0,0257. Die Abstände der einzelnen Knoten ergeben sich aufgrund der Anordnung von Nägeln, Hängern und Federn, welche als Deckenabstützung fungieren. Da diese Herangehensweise wenig flexibel hinsichtlich der Variation der Nagelabstände ist, wurde die Knotengenerierung in Kapitel 3.3 modifiziert.

KNOT nr 1	x 0.00	y 0.0	z 0.0
KNOT nr 2	x 0.04	y 0.0	z 0.0
KNOT nr (3 7 1)	x (0.0657 0.0257)	y 0.0	z 0.0
KNOT nr 8	x 0.20	y 0.0	z 0.0
KNOT nr (9 13 1)	x (0.275 0.075)	y 0.0	z 0.0
KNOT nr 14	x 0.650	y 0.0	z 0.0
KNOT nr (15 56 1)	x (0.725 0.075)	y 0.0	z 0.0
KNOT nr (57 62 1)	x (3.827 0.026)	y 0.0	z 0.0
KNOT nr 63	x 4.00	y 0.0	z 0.0

Abbildung 25: Definition der Knoten des oberen Profils, Vorstufe des generischen Codes

In Abbildung 26 ist die Definition der Knoten des unteren Profils zu sehen. Dies ist an der z-Koordinate von 0,7 zu erkennen. Für eine schnellere Identifizierung der Knoten erfolgt die Nummerierung der Knoten der unteren Reihe beginnend mit 101.

KNOT nr 101	x 0.00	y 0.0	z 0.7
KNOT nr 102	x 0.04	y 0.0	z 0.7
KNOT nr (103 107 1)	x (0.0657 0.0257)	y 0.0	z 0.7
KNOT nr 108	x 0.20	y 0.0	z 0.7
KNOT nr (109 113 1)	x (0.275 0.075)	y 0.0	z 0.7
KNOT nr 114	x 0.650	y 0.0	z 0.7
KNOT nr (115 156 1)	x (0.725 0.075)	y 0.0	z 0.7
KNOT nr (157 162 1)	x (3.827 0.026)	y 0.0	z 0.7
KNOT nr 163	x 4.00	y 0.0	z 0.7

Abbildung 26: Definition der Knoten des unteren Profils, Vorstufe des generischen Codes

Die Stäbe werden mittels Intervall generiert (siehe Abbildung 27). Die Stabnummern des oberen Profils werden von 1 bis 62 im Intervall von 1 vergeben. Mit „ka (1 1)“ und „ke (2 1)“ wird dem Stab der Stabanfangs- und Stabendknoten zugeordnet und im Intervall von 1 jeweils erhöht. Analog wurde für das untere Profil vorgegangen.

STAB nr (1 62 1)	ka (1 1)	ke (2 1)	QNR 1	TEIL 4
STAB nr (101 162 1)	ka (101 1)	ke (102 1)	QNR 1	TEIL 4

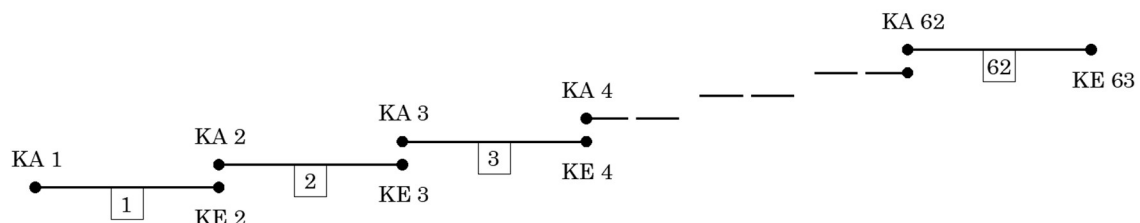


Abbildung 27: Definition der Stäbe zwischen den Knoten (Vorstufe des generischen Codes) und skizzierter Ablauf

Die vertikalen Hänger müssen als Pendelstäbe modelliert werden. Da die Verbindung der Knoten über den Befehl „STAB“ eine biegesteife Verbindung zur Folge hätte, wurde der Befehl „FACH“ (Fachwerkselement) gewählt. Dies hat den Vorteil, dass die Stäbe nur Normalkräfte übertragen und somit als Pendelstäbe fungieren. Alternativ können über eine Starrkörperkopplung zwei Knoten mit der Koppelbedingung „KF“ verbunden werden (siehe Abbildung 28). Da in diesem Fall die Variante dem Befehl „FACH“ gleicht, jedoch eine höhere Anzahl von Knotendefinitionen nötig ist und folgend zu einem höheren Rechenaufwand führt, wurde diese verworfen.

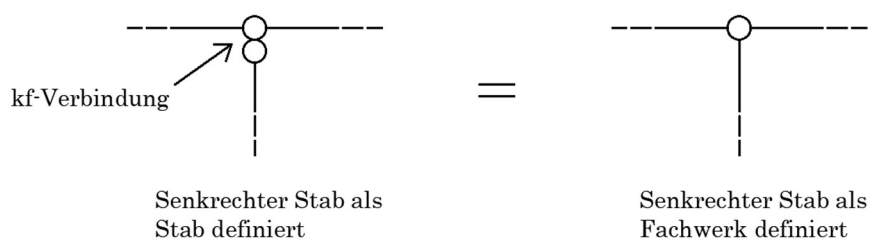


Abbildung 28: Möglichkeiten der Definition von gelenkigen Anschlüssen

Zuerst wird dem jeweiligen Hänger eine Nummer „nr 204“ hinzugefügt, wie zum Beispiel in der ersten Zeile in Abbildung 29 ersichtlich ist. Darauf folgt die Festlegung der Position des Hängers durch Angabe des Anfangsknotens mit „ka“ und des Endknotens mit „ke“. Anfangsknoten 4 befindet sich im oberen Profil und Endknoten 104 ist direkt unter Knoten 4 im unteren Profil situiert. Weiters wird dem Hänger eine Querschnittsnummer mit „QNR“ zugeteilt. Es wird hier 2 gewählt. Die diesem Querschnitt zugeteilten Maße und Eigenschaften können im Aqua-Block nachgelesen werden. Zuletzt wird der Hänger durch die Angabe „TEIL 4“ für die Generierung in vier Teile untergliedert. Durch diese Teilung wird die Generierung eines präzisen Schnittkraftverlaufs ermöglicht.

FACH nr 204	ka 4	ke 104	QNR 2	TEIL 4
FACH nr 216	ka 16	ke 116	QNR 2	TEIL 4
FACH nr 225	ka 25	ke 125	QNR 2	TEIL 4
FACH nr 235	ka 35	ke 135	QNR 2	TEIL 4
FACH nr 244	ka 44	ke 144	QNR 2	TEIL 4
FACH nr 253	ka 53	ke 153	QNR 2	TEIL 4

Abbildung 29: Definition der Hänger, Vorstufe des generischen Codes

Im nächsten Schritt werden die Randbedingungen definiert. Dies geschieht im oberen Profil des Systems in jedem Knoten, an dem sich ein Nagel befindet. Randbedingungen werden festgelegt, indem Festhaltungen mit dem Befehl „FIX“ für einen Knoten in bestimmte Richtungen eingefügt werden.

KNOT 1	FIX ZP	KNOT 101	FIX MXZP
KNOT 2	FIX MXPY	\$KNOT 102	FIX MXPY
KNOT 8	FIX MXPY	\$KNOT 108	FIX MXPY
KNOT 14	FIX MXPY	\$KNOT 114	FIX MXPY
KNOT 20	FIX MXPY	\$KNOT 120	FIX MXPY
KNOT 26	FIX MXPY	\$KNOT 126	FIX MXPY
KNOT 32	FIX MXPY	\$KNOT 132	FIX MXPY
KNOT 38	FIX MXPY	\$KNOT 138	FIX MXPY
KNOT 44	FIX MXPY	\$KNOT 144	FIX MXPY
KNOT 50	FIX MXPY	\$KNOT 150	FIX MXPY
KNOT 56	FIX MXPY	\$KNOT 156	FIX MXPY
KNOT 62	FIX MXPY	\$KNOT 162	FIX MXPY
KNOT 63	FIX ZP	KNOT 163	FIX MXZP

Abbildung 30: Definition der Randbedingungen oberes Profil (links) und unteres Profil (rechts),
Vorstufe des generischen Codes

Wie in Abbildung 30 links zu erkennen ist, wird erst der gewünschte Knoten durch seine Knotennummer gewählt und darauffolgend mit „FIX“ die Randbedingung definiert. Aufgrund der Unverschieblichkeit des Systems am Anfangs- und Endpunkt werden für die beiden äußersten Knoten 1 und 63 jeweils eine Festhaltung gegen Verschiebung in x- und y-Richtung mit der Eingabe von „ZP“ vorgenommen. An den Stellen, wo Nägel situiert sind (siehe Abbildung 30 links), wird eine Festhaltung gegen Verdrehung um die x-Achse (MX) und gegen Verschiebung in die y-Richtung (PY) eingefügt. Die Randbedingungen für die Knoten des unteren Profils werden in Abbildung 30 rechts definiert. Hier sind ausschließlich Festhaltung für die Knoten 101 und 163 (Außenknoten) gegen Verdrehung um die x-Achse und Verschiebung in x- und y-Richtung notwendig. Die restlichen Knoten benötigen keine Randbedingungen und sind daher mit der Eingabe „\$“ deaktiviert. Eine Überlegung für die Randbedingung ZP des unteren Profils ist, ob die Festhaltung gegen Verschiebung in x-Richtung wirklich notwendig ist oder nur einen gegen Verschiebung in y-Richtung (PY) genügt. Dieser Fragestellung kann in weiteren Arbeitsschritten nachgekommen werden.

In weiterer Folge wird die Deckenabstützung durch Generierung von Federn erzeugt (siehe Abbildung 31). Da im Vorfeld im oberen Profil ausschließlich benötigte Knoten generiert wurden, werden die Federn im Intervall mit einem Schritt von 1 gesetzt. Für eine bessere Übersichtlichkeit beginnen die Laufnummern der Federn der Deckenabstützung bei 2002. Da die Federn der Deckenabstützung die Durchbiegung des oberen Profils nur in Richtung Decke (negative z-Richtung, als Druckfeder) blockieren sollen und in Sofistik Federn nur als Zugfeder versagen, wurden diese durch eine explizite Richtungskomponente „DZ -1“ definiert. Diese wirken mit einer Federkonstante in Wirkungsrichtung „CP“ von 500 kN/m³ und weisen eine Rissspannung

von 0,001 kN/m² auf. Die geringe Rissspannung bedeutet, dass die Federn der Deckenabstützung entfallen, sobald sie auf Zug belastet werden. Daher haben diese keinen weiteren Einfluss auf die Verformung des Profils. Folgend werden die überflüssigen Federn der Deckenabstützung, welche aufgrund des Intervalls auf der Position eines Nagels situiert wurden, gelöscht. Dies ist in Abbildung 31 Zeile 2 bis 4 zu erkennen.

\$ FEDERN DER DECKENABSTÜTZUNG

```
FEDE (2002 2062 1) KA (2 1) DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
del typ fede (2002 2002+6*10 6)
del typ fede (2003 2007 2)
del typ fede (2057 2061 2)
```

Abbildung 31: Generierung Federn der Deckenabstützung, Vorstufe des generischen Codes

Im nächsten Schritt werden die Nägel neu definiert (siehe Abbildung 32). Diese werden als Federelement mit einer erhöhten Federkonstante „CP“ von 500000 kN/m³ erstellt. Als Rissspannung wird jedem einzelnen Nagel über die zu Beginn definierten Variablen „R1“ bis „R11“ eine Nagelkapazität zugeordnet.

\$ FEDERN DER NAGELKRÄFTE

```
$FEDE (1002 1002+6*10 6) KA (2 6) DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000
```

```
FEDE 1002 KA 2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R1)
FEDE 1008 KA 8 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R2)
FEDE 1014 KA 14 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R3)
FEDE 1020 KA 20 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R4)
FEDE 1026 KA 26 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R5)
FEDE 1032 KA 32 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R6)
FEDE 1038 KA 38 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R7)
FEDE 1044 KA 44 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R8)
FEDE 1050 KA 50 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R9)
FEDE 1056 KA 56 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R10)
FEDE 1062 KA 62 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss $(R11)
```

Abbildung 32: Definition der Federn der Nagelkräfte, Vorstufe des generischen Codes

Um eine Berechnung des Systems trotz Versagen aller Nägel (Kollaps) zu ermöglichen, werden an den Enden des Systems Federn definiert, welche nach dem Kollaps aktiviert werden. Diese werden beim Versagen des Systems auf Druck beansprucht, weshalb mit „DZ 1“ eine positive Orientierung gewählt wird (siehe Abbildung 33). Mit „gap“ wird das Spiel bzw. der Schlupf der Feder mit 0,8 m festgelegt. Das bedeutet, dass diese Federn erst nach einer Deformation von 0,8 m kraftaktiv werden und somit einen Übergang des Systems in ein rechnerisch kinematisches System verhindern.

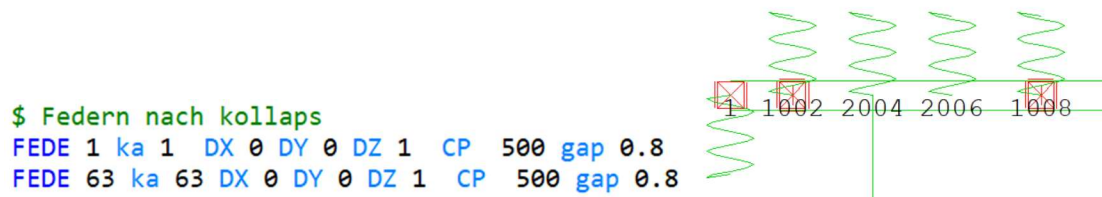


Abbildung 33: Definition der Federn nach Kollaps (links) und Modellansicht mit Federnummern (rechts), Vorstufe des generischen Codes

In Abbildung 34 ist eine Darstellung des Systems nach der vollständigen Generierung aller Elemente zu erkennen.

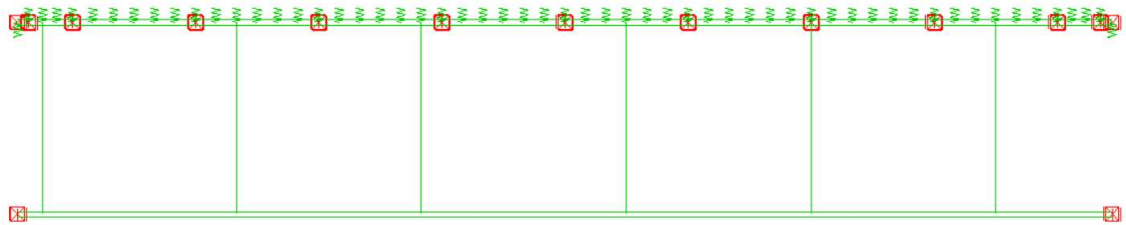


Abbildung 34: Sofistik-Modell, Vorstufe des generischen Codes

Tabelle 3: Zusammenfassung der Elementnummerierung, Vorstufe des generischen Codes

Element	Nummer
Knotenelemente	
Knoten oberes Profil	1 - 63
Knoten unteres Profil	101 - 163
Stabelemente	
Stäbe (oberes Profil)	1 - 63
Stäbe (unteres Profil)	101 - 163
Fachwerkstäbe (Hänger)	Beginnend mit 200
Federelemente	
Nägel	Beginnend mit 1000
Federn	Beginnend mit 2000
Außenfedern	1 & 63

3.2.3 Sofiloadd

```
+prog sofiloadd urs:4
  kopf Belastung 1.1
  ECHO OPT VOLL WERT NEIN
  $ Beispiele für Lastfälle

  lf nr 1;
  knot nr typ p1 $Variante 1
      4   pzz $(L1)
      16  pzz $(L2)
      25  pzz $(L3)
      35  pzz $(L4)
      44  pzz $(L5)
      53  pzz $(L6)
ende
```

Abbildung 35: Sofiloadd-Block, Vorstufe des generischen Codes

In Abbildung 35 ist zu erkennen, dass dem Lastfall „lf“ die Nummer „nr“ 1 zugewiesen wurde. Folgend wird Knoten 4 „nr 4“ in globaler Z-Richtung „typ pzz“ mit einer Last von „p1 \$(L1)“ belastet. Die Belastung wird am Knoten 4 angesetzt, da sich an diesem Knoten ein Hänger befindet. Der Lastwert „\$(L1)“ stellt die zu Beginn definierte Hängerkraft dar. Analog wurden die weiteren Hängerkräfte den Knoten zugeordnet.

3.2.4 Ase

```
+prog ase urs:5
  kopf 1
  ECHO OPT VOLL WERT NEIN
  syst prob nonl iter 500 tol 0.001
  STEU WARN 448
  lf 1
ende
```

Abbildung 36: Ase-Block, Vorstufe des generischen Codes

Die Zeile „syst prob nonl iter 500 tol 0.001“ definiert folgendes:

Als Art der Berechnung „prob“ wurde „nonl“ für materialnichtlineare Federn gewählt. Es ist anzumerken, dass in weiterer Zukunft die Art der Berechnung nach Theorie 2. Ordnung „TH2“ geändert werden kann. Für die Anzahl an Iterationen stellte sich aus vergangenen Prüfungen der Wert 500 als praktikabel dar, da nur noch kleine Restkräfte übrigblieben. Dieser Parameter könnte in weiteren Anpassungen hinsichtlich Rechengeschwindigkeit optimiert werden. Die Toleranz der Iteration wurde mit 0,001 definiert. Die folgende Zeile dient der Deaktivierung der

Fehlermeldung 448. Dies erfolgt über „STEU“ (Steuerung Rechenverfahren) mit dem Befehl „Warn“ zur Ausschaltung einer speziellen Fehlermeldung. Über den Befehl „lf 1“ wird der Lastfall mit der Nummer 1, welcher zuvor in Block Sofiloadd definiert wurde, der Berechnung zugeordnet.

3.2.5 Template

Mit dem Befehl „LET“ werden die berechneten Werte der Durchbiegung (siehe Abbildung 37 links) und der Nagelkräfte (siehe Abbildung 37 rechts) lokal gespeichert.

```

Prog template urs:3
ECHO VOLL $ NEIN

@KEY SPRI_RES 1

LET#wR1__ @(1002,v)*1000
LET#wR2__ @(1008,v)*1000
LET#wR3__ @(1014,v)*1000
LET#wR4__ @(1020,v)*1000
LET#wR5__ @(1026,v)*1000
LET#wR6__ @(1032,v)*1000
LET#wR7__ @(1038,v)*1000
LET#wR8__ @(1044,v)*1000
LET#wR9__ @(1050,v)*1000
LET#wR10__ @(1056,v)*1000
LET#wR11__ @(1062,v)*1000
LET#wR00__ @(1,v)*1000

LET#pR1__ @(1002,p)*1000
LET#pR2__ @(1008,p)*1000
LET#pR3__ @(1014,p)*1000
LET#pR4__ @(1020,p)*1000
LET#pR5__ @(1026,p)*1000
LET#pR6__ @(1032,p)*1000
LET#pR7__ @(1038,p)*1000
LET#pR8__ @(1044,p)*1000
LET#pR9__ @(1050,p)*1000
LET#pR10__ @(1056,p)*1000
LET#pR11__ @(1062,p)*1000
LET#pR00__ @(1,p)*1000

```

Abbildung 37: Template, Vorstufe des generischen Codes

3.3 generischer Code

Im Zuge weiterer Berechnungen sowie Variation der Nagelabstände wurde die Systemgenerierung modifiziert und Verbesserungen hinsichtlich Flexibilität erreicht. Der Anpassungsbedarf bei Änderung der Nagelabstände konnte wesentlich reduziert werden. Diese Verbesserungen am Code werden im folgenden Kapitel genauer beleuchtet.

Weiters werden die entsprechenden Stellen angemerkt, an denen Anpassungen vorgenommen werden müssen, sofern ein anderer Nagelabstand gewünscht ist. Zur besseren Identifikation werden die entsprechenden Textstellen farblich markiert. In Kapitel 3.3.6 sind die notwendigen Änderungen in tabellierter Form zusammengefasst.

3.3.1 Input

In Abbildung 38 ist der Aufbau der Inputdatei zu sehen. Hierbei steht eine Zeile für einen Monte-Carlo-Simulationsdurchgang. Im Fall von 200.000 MC-Simulationsdurchgängen besteht die Input-Datei aus 200.000 Zeilen. In der ersten Spalte ist die Gruppennummer des maximalbelasteten Trägers des Systems dargestellt. In der 2. Spalte ist der „tmp_val“-Wert ausgegeben, welcher im Zuge der Simulation generiert wird. Nachfolgend sind die Hängerlasten und Nagelkapazitäten eingetragen. Unabhängig des Nagelabstandes werden 6 Hängerlasten erstellt. Da der generische Code mithilfe des Systems mit Nagelabstand 360 mm erklärt wird, sind in dieser Abbildung 13 Nagelkapazitäten aufgelistet.

Gruppe	tmp_val	Hängerlasten						Nagelkapazitäten												
6	0.13	0.26	0.39	0.32	0.27	0.26	0.28	0.03	1.86	1.20	0.83	0.71	2.00	1.43	1.33	2.24	0.97	2.11	1.59	0.73
6	0.15	0.26	0.33	0.35	0.31	0.14	0.41	0.72	1.08	0.36	0.68	1.91	0.71	1.08	0.25	0.92	1.48	0.66	0.56	1.17
5	0.11	0.33	0.23	0.22	0.18	0.45	0.29	0.32	0.92	0.43	1.55	0.79	1.72	0.30	0.35	2.36	1.84	1.04	0.83	0.27
3	0.12	0.30	0.25	0.31	0.28	0.40	0.32	0.58	1.64	2.44	1.85	1.53	0.71	0.61	1.18	1.89	1.90	1.21	2.21	1.26
1	0.14	0.36	0.25	0.16	0.37	0.19	0.45	0.69	0.79	0.27	1.75	0.85	0.23	0.93	1.03	1.37	1.32	2.31	0.84	0.62
6	0.09	0.33	0.28	0.25	0.38	0.27	0.20	0.89	0.86	1.20	0.65	0.96	1.46	0.59	1.19	0.53	1.77	0.79	0.74	0.48
...

Abbildung 38: Aufbau der Input-Datei

In Abbildung 39 ist zu erkennen, dass durch die Funktion „STO“ die Nagelkapazitäten „R“ sowie Hängerlasten „L“ aus der Input-Datei geladen werden.


```

$ KAPAZITÄT NAGEL #1-11 ...(Vektor mit n Skalarwerten)

+prog template urs:3

STO#R(1) 1.330173
STO#R(2) 0.367952
STO#R(3) 0.090110
STO#R(4) 0.848224
STO#R(5) 0.689824
STO#R(6) 0.976005
STO#R(7) 2.402960
STO#R(8) 1.247787
STO#R(9) 0.280456
STO#R(10) 2.180624
STO#R(11) 1.681994
STO#R(12) 0.900478
STO#R(13) 2.104729

STO#L(1) 0.345827
STO#L(2) 0.319175
STO#L(3) 0.244187
STO#L(4) 0.288111
STO#L(5) 0.280684
STO#L(6) 0.209279

ende

```

Abbildung 39: Laden der Nagelkapazitäten und Hängerlasten, generischer Code

Für eine Variation der Nagelabstände ist eine Anpassung der Anzahl an Nagelkapazitäten notwendig. Wird der Nagelabstand verringert, steigt die Anzahl der nötigen Nagelkapazitäten.

3.3.2 Aqua

```

+PROG AQUA urs:1
KOPF HILTI-CFS-EU 360mm mit ABST
ECHO OPT VOLL $WERT NEIN
-      NORM DIN 1045-1; STAHL 1 S 235T; STAHL 2 S 235T
      PROF 1 CDS 60 30 6 ALPH 90; PROF 2 BAR 5
ENDE

```

Abbildung 40: Aqua-Block, generischer Code

In Abbildung 40 ist zu erkennen, dass nun für zwei verschiedene Materialnummern Stahl S 235 T definiert wurde („STAHL 1 S 235T“, „STAHL 2 S 235T“). Dies ist notwendig, da in weiterer Folge zwei verschiedene Profile mit demselben Material benötigt werden. Im Unterschied zur Vorstufe des generischen Codes wird nicht mehr ein Querschnitt mit Querschnittsfläche, Flächenträgheitsmomente und Torsionsmoment gewählt, sondern diese Angaben erfolgen durch die Definition eines bestimmten Profils. So wird das erste Profil für den oberen und unteren Träger mit „PROF 1

CDS 60 30 6“ definiert. Dieses hat die gleiche Steifigkeit, welche in der Vorstufe des generischen Codes definiert wurde. Mit dem Befehl „ALPH 90“ wird das Profil um 90° gedreht. Das zweite Profil „PROF 2 BAR 5“ wird für die Hänger benötigt und weist einen Kreisquerschnitt von 5 mm Durchmesser auf.

In diesem Block ist es lediglich notwendig, den „Kopf“ (Überschrift) für einen neuen Nagelabstand und die Variation mit oder ohne Deckenabstützung anzupassen.

3.3.3 Sofimsha

Der Unterschied in diesem Block im Vergleich zur Vorstufe des generischen Codes zeigt sich in der Optimierung durch die Verwendung von Loops. Mit Loops kann automatisch eine beliebige Anzahl von Punkten erzeugt werden, welche in einem bestimmten Abstand zueinanderstehen sollen. Es werden lediglich ein Startwert für die Nummerierung und die erste Koordinate angegeben. Weiters ist die Angabe von lokalen Variablen nötig, welche beispielsweise die entsprechenden Zählintervalle bestimmen, mit welchen die Werte weitergezählt werden. Je nach Notwendigkeit kann dies durch Addition, Subtraktion usw. erfolgen.

Knotengenerierung

Die allgemeinen Angaben wie „KOPF“, „ECHO“ und „SYS“ bleiben im Vergleich zur Vorstufe des generischen Codes gleich.

```
+PROG SOFIMSHA urs:2
KOPF HILTI-CFS-EU 360mm mit ABST
ECHO OPT VOLL WERT NEIN
SYST 3D

$ERZEUGUNG DER KNOTEN FÜR OBERE UND UNTERE SCHIENE MIT ABSTAND VON 1cm
LET#1 1; LET#2 0
LOOP 401
    KNOT NR 1000+#1 X 0.00+#2 Y 0.00      Z 0.0
    KNOT NR 2000+#1 X 0.00+#2 Y 0.00      Z 0.7

    LET#1 #1+1
    LET#2 #2+0.01
ENDLOOP
```

Abbildung 41: Erzeugung der Knoten für obere und untere Schiene mit 1 cm Abstand, generischer Code

Soll eine weitere Datei mit einem anderen Nagelabstand generiert werden, sollte an dieser Stelle im Befehl „KOPF“ die korrekte Beschreibung vorgenommen werden.

Mit der Anweisung „LET#“ wird eine lokale Variable gesetzt, welche nur in diesem Programmblock gilt. Direkt nach „LET#“ steht die Bezeichnung der Variablen, in

Abbildung 41 wurde 1 bzw. 2 gewählt. Darauffolgend ist der Wert der jeweiligen Variable definiert. Variable 1 erhält den Wert 1 („LET#1 1“) und Variable 2 den Wert 0 („LET#2 0“). Diese beiden Variablen sind temporär und werden im weiteren Verlauf anstelle von Zahlen verwendet.

Nach der Festlegung der Variablen folgt ein Loop (= Schleife). Dies geschieht durch die Angabe „LOOP“. Die darauffolgende Zahl 401 in Abbildung 41 gibt an, wie oft der Loop durchlaufen werden soll. In diesem Fall wird die Schleife 401mal durchlaufen. Es folgt die Angabe der Anfangsknoten der oberen („KNOT NR 1000+#1 X 0.00+#2 Y 0.00 Z 0.0“) und unteren Schiene („KNOT NR 2000+#1 X 0.00+#2 Y 0.00 Z 0.7“). Mit „NR“ wird die Knotennummer erzeugt. Diese startet für das obere Profil bei 1001, da „1000+#1“ gewählt wird. Durch „#1“ wird der Wert der oberhalb festgelegten Variable 1 eingesetzt. Die erste Knotennummer des unteren Profils startet bei 2001 („2000+#1“). An der nächsten Stelle wird die X-Koordinate des Knotens festgelegt. In beiden Fällen (obere und untere Schiene) wird „0.00+#2“ gewählt. Daher startet der Anfangsknoten jeweils bei der X-Koordinate 0.00, da Variable #2 den Wert Null besitzt. Die Y- und Z- Koordinaten werden nicht geändert, sondern bleiben für jeden Knoten, der generiert wird, gleich. Nun werden zwei neue Variablen 1 und 2 innerhalb des Loops festgelegt, auf welche beim weiteren Durchlaufen zurückgegriffen wird. Hierbei handelt es sich um „LET#1 #1+1“ und „LET#2 #2+0.01“. Die erste Variable wird wiederum für die Generierung der Knotennummern benötigt und die zweite für die zugehörige X-Koordinate. Die Knotennummer zählt jeweils um 1 weiter und die X-Koordinate um 0,01, das entspricht 1 cm (0,01 m). Durch die Angabe „ENDLOOP“ wird der Loop beendet. Nach der Beendigung der 401 Schleifen wurden nun Knoten auf einer Länge von 4,00 m in einem Intervall von 0,01 m erzeugt.

Idee hinter dem eben beschriebenen Loop ist die Generierung der Knoten in einem Intervall von 1 cm. Durch diese Anordnung von Knoten können Nägel und Federn im weiteren Verlauf exakt an die gewünschte Stelle gesetzt werden. Hierbei ist es unerheblich, in welchem Abstand die Nägel zueinander gesetzt werden sollen. Um die Rechenzeit noch weiter zu optimieren, wäre es möglich, die Knoten der unteren Schiene in einem Abstand von 70 cm zu setzen (statt 1 cm), da hier für die weiteren Untersuchungen keine anderen Knotenpositionen notwendig sind.

Zuordnung der Stäbe zu Knoten

Im nächsten Schritt werden Stäbe zwischen den soeben generierten Knoten der oberen Schiene gesetzt.

```

$ZUORDNUNG DER STÄBE ZU KNOTEN
LET#1 1
LOOP 400
    STAB NR 1000+#1 KA 1000+#1 KE 1001+#1 QNR 1
    LET#1 #1+1
ENDLOOP

```

Abbildung 42: Generierung Stäbe der oberen Schiene

In Abbildung 42 ist der Loop dargestellt, welcher die Stäbe für das obere Profil erzeugt. Der Loop wird 400mal durchlaufen, da die obere Schiene gesamt 400 cm lang ist und je cm ein Knoten situiert ist. Diese Knoten werden nun mit Stäben verbunden. Es wird zuerst eine Variable „LET#1 1“ definiert, welche dafür verantwortlich ist, den Startwert (Knotennummer „NR“, Anfangsknoten „KA“ und Endknoten „KE“) festzulegen. Das heißt, Stab 1001 („NR 1000+#1“) startet bei Knoten 1001 („KA 1000+#1“), endet bei Knoten 1002 („KE 1001+#1“) und wird Querschnitt 1 zugeteilt („QNR 1“). Zuletzt wird eine neue Variable 1 („LET#1“) definiert, auf welche beim weiteren Durchlaufen des Loops zugegriffen wird. „LET#1 #1+1“ bewirkt die Erhöhung der Werte von Durchlauf zu Durchlauf um jeweils eins. Durch diese Schleife werden 400 Stäbe generiert.

Erzeugung der Hänger

Der nächste Schritt stellt die Erzeugung der Hänger und Stäbe der unteren Schiene dar (Abbildung 43).

```

$HÄNGER DES SYSTEMS
LET#1 1; LET#2 10; LET#3 #2-9
LOOP 6
    FACH NR 3000+#1 KA 1000+#2 KE 2000+#2 QNR 2
    STAB NR 2000+#1 KA 2000+#3 KE 2000+#2 QNR 1 TEIL 6
    LET#1 #1+1; LET#2 #2+70; LET#3 #2-70
ENDLOOP
    STAB NR 2000+#1 KA 2000+#3 KE 2401 QNR 1 TEIL 6

```

Abbildung 43: Generierung der Hänger und Stäbe der unteren Schiene

Hierfür werden erst drei Variablen „LET#1 1“, „LET#2 10“ und „LET#3 #2-9“ definiert. Der folgende Loop wird 6mal durchlaufen. Die Hänger werden mit dem Befehl „FACH“ generiert, da diese als Pendelstäbe wirken. Würde der Befehl „STAB“ gewählt werden, müsste ein zusätzliches Gelenk eingefügt werden, da ansonsten eine biegesteife Verbindung entsteht, welche an dieser Stelle nicht gewünscht ist. Die Hänger starten mit der Laufnummer 3001 („NR 3000+#1“), da Variable 1 der Wert 1 zugeordnet ist. Der Anfangsknoten des ersten Hängers ist 1010 („KA 1000+#2“), da Variable 2 den Wert 10 besitzt. Der Endknoten des ersten Hängers liegt vertikal unter dem Anfangsknoten, daher besitzt der Endknoten die Knotennummer 2010 („KE 2000+#2“). Den Hängern wird das Profil 2 zugeordnet („QNR 2“), welches einen

Kreisquerschnitt besitzt. Weiters werden in diesem Loop die Stäbe der unteren Schiene generiert. Der erste Stab mit der Nummer 2001 („NR 2000+#1“) beginnt bei Knoten 2001 („KA 2000+#3“ = $2000 + \#2 - 9 = 2000 + 10 - 9 = 2001$) und endet bei Knoten 2010 („KE 2000+#2“). Diesem Stab wird die Querschnittsnummer 1 („QNR 1“) zugeordnet und für die Berechnung wird der Stab in sechs Teile („TEIL 6“) unterteilt. Die Unterteilung dient dem Erhalt aussagekräftiger Schnittkraftverläufe. Zuletzt werden die weiteren Variablen für den Loop definiert, mit welchen die Werte pro Durchlauf einer Schleife erhöht werden. Hierfür werden Variable 1 „LET#1 #1+1“, Variable 2 „LET#2 #2+70“ und Variable 3 „LET#3 #2-70“ definiert. Variable 1 wird nur für die Erzeugung der Laufnummern benötigt. Sie erhöht die Werte jeweils um eins. Variable 2 wird für die Anfangsknoten und Endknoten der Hänger sowie für die Endknoten der Stäbe der unteren Schiene benötigt. Hierbei wird der vorherige Wert laufend um 70 erhöht, da die Hänger in einem Abstand von 70 cm zueinanderstehen. Variable 3 dient der Angabe der Anfangsknoten für die Stäbe der unteren Schiene. Es werden jeweils vom Wert der Variabel 2 70 abgezogen. Nach dem letzten Durchlauf des Loops wird der letzte fehlende Stab generiert. Dieser beginnt bei Knoten 2360 und endet bei Knoten 2401.

Definierung der Lagerbedingungen

Weiters werden die Lagerbedingungen der Endknoten der oberen Schiene (Knoten 1001 und 1401) sowie der unteren Schiene (Knoten 2001 und 2401) erstellt.

```
$LAGERBEDINGUNGEN ENDKNOTEN
KNOT 1001      FIX ZP;   KNOT 1401      FIX ZP
KNOT 2001      FIX MXZP; KNOT 2401      FIX MXZP
```

Abbildung 44: Lagerbedingungen der Endknoten (obere und untere Schiene)

In Abbildung 44 ist zu erkennen, dass für die Endknoten der oberen Schiene Festhaltungen gegen Verschiebung in X- und Y-Richtung eingefügt werden und für die Endknoten der unteren Schiene eine Festhaltung gegen Verdrehung in X-Richtung zu den Festhaltungen gegen Verschiebungen in X- und Y-Richtung hinzugefügt wird.

Wie in Abbildung 45 zu erkennen ist, werden den Nägeln Festhaltungen gegen Verdrehung in X-Richtung und Verschiebung in Y-Richtung zugeordnet. Die erste Nagellagerungsbedingung liegt bei Knoten 1004, die weiteren Nagelfesthaltungen werden in einem Loop erzeugt. Die Lagerungsbedingung für den letzten Nagel liegt bei Knoten 1397 (1401 minus 4).

```

$ LAGERUNGSBEDINGUNGEN DER INNEN-NÄGEL
KNOT 1004      FIX MXPY

LET#1 20
LOOP 11
    KNOT 1000+#1      FIX MXPY
    LET#1 #1+36
ENDLOOP

KNOT 1401-4      FIX MXPY

```

Abbildung 45: Lagerungsbedingungen der Nägel

Es wird ein Loop verwendet, um die entsprechenden Knoten auszuwählen. Dabei wird bei Knoten 1020 („KNOT 1000+#1“) gestartet und laufend um 36 („LET# #1+36“) weitergezählt. Dies entspricht dem Abstand zwischen den Nägeln. Jedem dieser Nägel wird eine Festhaltung gegen Verdrehung in X-Richtung (MX) und Verschiebung in Y-Richtung (PY) hinzugefügt. Durch die Verwendung des Loops können in weiterer Folge leicht Anpassungen vorgenommen werden, sofern ein anderer Nagelabstand gewünscht ist.

Ist es nun der Wunsch, ein System mit einem neuen Nagelabstand zu erstellen, muss an dieser Stelle die Loopanzahl auf die Anzahl der verwendeten Nägel abzüglich dem Wert 2 (auf Grund der äußersten Nägel) geändert werden. Weiters ist es wichtig, für Variable „LET#1 #1+36“ statt dem Wert 36 den neuen korrekten Nagelabstand einzusetzen.

Generierung der Deckenabstützung

Zuletzt werden in diesem Block die Federn für die Deckenabstützung des Systems erstellt. Es werden zwei Federn („FEDE“) mit den Nummern 5014 („5000+20-#2“) und 5008 („5000+20-2*#2“) zwischen den ersten Nägeln definiert (siehe Abbildung 46). Hierfür wird erst eine Variable, die den Wert 6 besitzt („LET#2 6“), definiert. Mit dieser Variablen werden die Federnummern und jeweiligen Anfangsknoten berechnet.

```

$ DECKENABSTUETZUNG FEDERN ZWISCHEN ERSTEN NÄGEL
LET#2 6
FEDE NR 5000+20-#2  KA 1001+20-#2  DX 0 DY 0 DZ -1  CP 500 riss 0.001
FEDE NR 5000+20-2*#2 KA 1001+20-2*#2 DX 0 DY 0 DZ -1  CP 500 riss 0.001

```

Abbildung 46: Federn (5014 & 5008) zwischen den ersten Nägeln

Beide Federn sind vertikal über dem Träger platziert, um bei Druckbeanspruchung zu wirken. Dies wird durch die explizite Richtungskomponente in negativer Z-Richtung erreicht („DX 0 DY 0 DZ -1“). Die Federkonstante in Wirkungsrichtung CP beträgt 500 kN/m³ und die Rissspannung 0,001 kN/m².

Im nächsten Schritt werden die restlichen Federn zwischen den Nägeln gesetzt (siehe Abbildung 47). Es werden jeweils drei Federn zwischen zwei Nägel platziert. Hierfür wird ein Loop verwendet.

```
$ DECKENABSTUETZUNG DREI FEDERN ZWISCHEN NÄGEL
LET#1 0; LET#2 9
LOOP 10
    FEDE NR 5020+#1+#2 KA 1020+#1+#2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
    FEDE NR 5020+#1+2*#2 KA 1020+#1+2*#2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
    FEDE NR 5020+#1+3*#2 KA 1020+#1+3*#2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
    LET#1 #1+36
ENDLOOP
```

Abbildung 47: restliche Federn zwischen Nägeln

Es werden zwei Variablen „LET#1“ und „LET#2“ gewählt. Die erste Variable besitzt den Wert 0 und die zweite ist gleich 9. Der Loop wird 10mal durchlaufen („LOOP 10“). Die ersten Federn haben die Nummern 5029 („NR 5020+#1+#2“), 5038 („NR 5020+#1+2*#2“) und 5047 („NR 5020+#1+3*#2“) sowie die entsprechenden Anfangsknoten 1029 („KA 1020+#1+#2“), 1038 („KA 1020+#1+2*#2“) und 1047 („KA 1020+#1+3*#2“). Da jeweils drei Federn zwischen den Nägeln situiert sind, wird in folgendem Loop dieses „Federparket“ um den gewählten Nagelabstand versetzt (LET#1 #1+36). Jede Feder ist vertikal über dem Träger platziert, um bei Druckbeanspruchung zu wirken. Dies wird durch die explizite Richtungskomponente DX 0, DY 0 und DZ -1 modelliert. Die Federkonstanten in Wirkungsrichtung CP sind mit 500 kN/m³ definiert und die Rissspannungen der Federn mit 0,001 kN/m².

Für eine Anpassung an einen anderen Nagelabstand muss die Variable „LET#2“ auf den Wert „Nagelabstand dividiert durch vier“ geändert werden. Weiters entspricht die neue Loopanzahl gleich der Nagelanzahl minus drei. Kurz vor Ende des Loops ist es notwendig, die Variable „LET#1“ anzupassen. Hier wird anstelle der Zahl 36 der neue Nagelabstand eingetragen.

Die zwei Federn zwischen den letzten Nägeln werden nicht wie die sonstigen Federn durch Addition erzeugt, sondern hier wird das Systemende betrachtet und von diesem die entsprechenden Werte abgezogen. Selbstverständlich könnte die Definition der beiden Federn statt der Subtraktion auch durch Addition erfolgen, doch es erscheint die Subtraktion der leichteste Weg zu sein.

```
$ DECKENABSTUETZUNG FEDERN ZWISCHEN LETZEN NÄGEL
LET#2 6
    FEDE NR 5401-20+#2 KA 1401-20+#2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
    FEDE NR 5401-20+2*#2 KA 1401-20+2*#2 DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500 riss 0.001
```

Abbildung 48: Federn zwischen den letzten Nägeln

Abbildung 48 zeigt die Erstellung der Federnummern („FEDE NR“), Anfangsknoten („KA“) sowie der expliziten Richtungskomponenten, Federkonstanten in Wirkungsrichtung („CP“) und Risssspannung („riss“). Für den Erhalt der Federnummern und Anfangsknoten wird eine Variable LET#2 mit dem Wert 6 definiert. Die eine Feder erhält die Nummer 5387 („NR 5401-20+#2“) am Knoten 1387 („KA 1401-20+#2“) und die andere Feder besitzt die Nummer 5393 („NR 5401-20+2*#2“) am Knoten 1393 („KA 1401-20+2*#2“). Eine grafische Übersicht der Aufteilung der Deckenabstützungselemente ist in Abbildung 51 zu erkennen.

Generierung der kinematischen Federn

Weiters werden zwei kinematische Federn am Systemanfang und -ende eingefügt (siehe Abbildung 49 und Abbildung 51), um eine Berechnung des Systems trotz Versagen aller Nägel (Kollaps) zu ermöglichen. Diese werden aktiviert, wenn die Verformung das über „gap“ definierte Federspiel überschreitet, das heißt, wenn alle restlichen Federn des Systems ausgefallen sind. Diese beiden Federn werden beim Versagen des Systems auf Druck beansprucht, weshalb mit „DZ 1“ eine positive Orientierung gewählt wird.

```
$ KINEMATISCHES SYSTEM  FEDERN
LET#1 1;   LET#2 15
          FEDE NR #1           KA 1001           DX 0 DY 0 DZ 1   CP  500 gap 0.8
          FEDE NR #2           KA 1401           DX 0 DY 0 DZ 1   CP  500 gap 0.8
```

Abbildung 49: kinematische Federn

Es werden zwei Variablen LET#1 mit dem Wert 1 und LET#2 mit dem Wert 15 definiert. Die beiden Federn besitzen die Nummern 1 und 15 („NR 1“, „NR 15“) und sind bei Knoten KA 1001 und 1401 platziert. Mit „DZ 1“ wird eine positive Orientierung festgelegt. Die Federkonstante in Wirkungsrichtung beträgt 500 kN/m³ und der Schlupf („gap“) der Feder ist gleich 0,80 m.

Bei einer Änderung der Nagelabstände (Änderung der Nagelanzahl) kann an dieser Stelle die Bezeichnung der letzten Federnummer auf die Anzahl der Nägel plus 2 geändert werden. Die restlichen Werte bleiben gleich.

Generierung der Nägel

Zu guter Letzt werden die Nägel als Federn mit zugehöriger Nagelkapazität (Festigkeit) definiert (siehe Abbildung 50 und Abbildung 51).


```

$ NAGELKRÄFTE FEDERN
LET#1 3;
LET#2 20
FEDE #1-1          KA 1000+#2-16      DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss #R(1)
LOOP 11
  FEDE #1          KA 1000+#2        DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss #R(#1-1)
  LET#1 #1+1
  LET#2 #2+36
ENDLOOP
FEDE #1          KA 1401-4          DX 0 DY 0 DZ -1 CP 500000 riss #R(#1-1)
ENDE

```

Abbildung 50: Federn Nagelkräfte

Für die Erstellung der Nägel wird, mit Ausnahme vom ersten und letzten Nagel, auf einen Loop zurückgegriffen. Erst werden die Variablen LET#1 mit dem Wert 3 und LET#2 mit dem Wert 20 erstellt. Der Nagel mit der Nummer 2 („FEDE #1-1“) liegt bei Knoten 1004 („KA 1000+#2-16“) und ist mit der negativen Z-Richtung („DZ -1“) definiert. Weiters besitzt dieser die Federkonstante von 500000 kN/m³ in Wirkungsrichtung und die Rissspannung R(1) in kN/m², welche aus dem Template mit dem Befehl „#R“ geladen wird. Die folgenden Federn 3 bis 14 werden mittels Loop definiert. Die Federnummer zählt aufgrund der Variablen LET#1 #1+1 jeweils um eins höher. Die Knoten werden jeweils aufgrund der Variablen LET#2 #2+36 um 36 weitergezählt (entspricht dem Nagelabstand). Auch diese Nägel zeigen in die negative Z-Richtung und besitzen eine Federkonstante von 500000 kN/m³ in Wirkungsrichtung. Der Wert der Rissspannung wird wiederum aus dem Template durch den Befehl „#R(#1-1)“ geladen. Die letzte Feder 15 ist am Knoten 1397 platziert und weist die gleichen Werte auf, wie die vorigen Federn. Auch diesem Nagel wird die entsprechende Rissspannung aus dem Template zugeordnet.

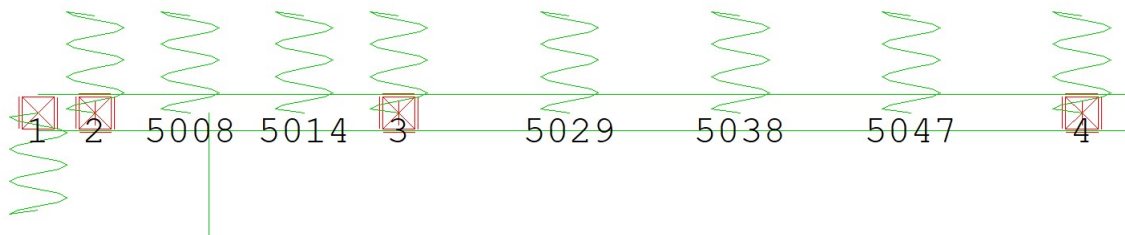


Abbildung 51: Systemausschnitt des oberen Profils, Nummerierung der kinematischen Federn, der Nägel sowie der Deckenabstützung

Soll eine Datei mit einem anderen Nagelabstand erstellt werden, ist für diesen Bereich die Loopanzahl auf die Nagelanzahl minus zwei zu korrigieren. Für Variable „LET#2 #2+36“ wird statt 36 der neue Nagelabstand eingesetzt. Die restlichen Werte bleiben gleich.

Für eine schnelle Identifikation von Elementen wurden den jeweiligen Gruppen Laufnummern zugewiesen, welche in Tabelle 4 aufgelistet sind. Die Tausenderstelle

dient der Identifizierung, so erhalten die Knoten des oberen Profils die Laufnummer 1000, die untere Schiene die Laufnummer 2000. Analog wurde hier für die Stäbe vorgegangen. Für die Federelemente wurde die Laufnummer 5000 verwendet.

Tabelle 4: Zusammenfassung der Elementnummerierung, generischer Code

Element	Nummer
Knotenelemente	
Knoten oberes Profil	1001 - 1401
Knoten unteres Profil	2001 - 2401
Stabelemente	
Stäbe (oberes Profil)	1001 - 1400
Stäbe (unteres Profil)	2001 - 2007
Fachwerkstäbe (Hänger)	3001 - 3006
Federelemente	
Nägel	2-14
Federn	5008 - 5393
Außenfedern	1 & 15

3.3.4 Sofiloadd

In diesem Block wird die Last auf das System aufgebracht (siehe Abbildung 52). Es wird Lastfall 1 generiert („LF NR 1“), welcher den Faktor 1,0 besitzt. Durch die Angabe eines Faktors kann die Last leicht um einen bestimmten Prozentsatz geändert werden. Würde der Faktor zum Beispiel 0,8 betragen, werden 80% der Last auf das System aufgebracht. Die Last wird in den Anfangsknoten der Hänger aufgebracht. Daher wird ein Loop erzeugt, welcher an genau diesen Knoten die Last aufbringt. Dieser Loop wird 6mal durchlaufen, da sieben Hänger vorliegen. Die Last wird durch die Angabe „P1 #L(#I)“ entsprechend den Werten im Template zugeordnet. Diese Werte entsprechen den Hängerkräften. „LET#2 #2+70“ wird für die Knotennummer benötigt, damit diese laufend um 70 erhöht wird und daher genau die Positionen der Hänger trifft. „LET#I #I+1“ dient der Zuordnung der richtigen Nummer der Belastung.


```

+PROG SOFILOAD urs:4
KOPF HILTI-CFS-EU 360mm mit ABST
ECHO OPT VOLL WERT NEIN

$HÄNGER DES SYSTEMS
LET#1 1; LET#2 10
  LF NR 1 FAKT 1.0
LET#I 1
LOOP 6
  KNOT NR 2000+#2 TYP PZZ P1 #L(#I)
  LET#2 #2+70
  LET#I #I+1
ENDLOOP
ENDE

```

Abbildung 52: Sofiload-Block, generischer Code

Soll eine Datei mit einem anderen Nagelabstand erstellt werden, ist für diesen Bereich die Überschrift auf den gewünschten Nagelabstand zu ändern.

3.3.5 Ase

Die Erklärung des Ase-Blocks kann Kapitel 3.1.2 und 3.2.1 entnommen werden. Einziger Unterschied ist, dass eine zusätzliche Anweisung hinzukommt. Mit „STEU WARN 827“ wird die Fehlermeldung 827 deaktiviert.

```

+PROG ASE urs:5
KOPF HILTI-CFS-EU 360mm mit ABST
ECHO OPT VOLL WERT NEIN

  SYST prob nonl iter 500 tol 0.001
  STEU WARN 448
  STEU WARN 827

  LF 1
ENDE

```

Abbildung 53: Ase-Block, generischen Codes

Soll eine Datei mit einem anderen Nagelabstand erstellt werden, ist für diesen Bereich die Überschrift auf den gewünschten Nagelabstand zu ändern.

3.3.6 Änderungen

Überblicksmäßig sind in Tabelle 5 die notwendigen Schritte zusammengefasst, um eine Änderung des Nagelabstands am System vorzunehmen. Diese können auch dem Fließtext entnommen werden und sind durch blaue Schrift hervorgehoben. Tabelle 5 zeigt in der ersten Spalte den Block, in der zweiten Spalte die Unterüberschrift des jeweiligen Blocks (sofern vorhanden) und in der dritten Spalte den Befehl, der geändert werden muss. In der vierten Spalte ist eine Erklärung angegeben, wie der neue Wert zustande kommt.

Tabelle 5: notwendige Änderungen bei Variation der Nagelabstände

Block	Überschrift im Code	Befehl	Änderung
PROG TEMPLATE	\$ KAPAZITÄT NAGEL #1-xx	STO#R(1) ... STO#R(xx)	Anzahl Nagelkapazitäten
PROG AQUA	-	KOPF	xx mm, mit/ohne
PROG SOFIMSHA	-	KOPF	xx mm, mit/ohne
	\$ LAGERUNGSBE- DINGUNGEN DER INNEN-NÄGEL	LOOP	Loopanzahl = Nagelanzahl minus 2
		LET#1 #1+xx	für xx Nagelabstand einsetzten
	\$ DECKENABSTU- ETZUNG DREI FE- DERN ZWISCHEN NÄGEL	LET#2	Wert = Nagelabstand dividiert durch 4
		LOOP	Loopanzahl = Nagelanzahl minus 3
		LET#1 #1+xx	für xx Nagelabstand einsetzten
	\$ KINEMATISCHES SYSTEM FEDERN	LET#2	Nagelanzahl plus 2
	\$ NAGELKRÄFTE FEDERN	LOOP	Loopanzahl = Nagelanzahl minus 2
		LET#2 #2+xx	für xx Nagelabstand einsetzten
PROG SOFILOAD	-	KOPF	xx mm, mit/ohne
PROG ASE	-	KOPF	xx mm, mit/ohne

3.4 Report

In Abbildung 54 ist der Aufbau der Output-Datei für die aufgenommenen Nagelkräfte zu erkennen. Die erste und letzte Spalte enthält die Werte der kinematischen Federn. In der Abbildung werden diese nicht aktiviert und haben daher den Wert 0. In den Spalten N1 bis N13 sind die jeweils aufgenommenen Nagelkräfte aufgelistet.

Nagelkräfte [N]														
kin. Feder	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	kin. Feder
0,00	0,00	344,20	48,16	310,10	104,60	222,80	113,60	166,40	129,20	133,40	152,70	194,40	-57,19	0,00
0,00	162,20	81,90	127,90	229,00	132,10	238,70	124,30	198,40	65,27	56,37	247,10	274,00	-80,32	0,00
0,00	195,00	122,70	85,11	166,20	77,99	144,40	90,12	88,70	249,10	238,90	141,50	209,30	-61,77	0,00
0,00	180,60	107,70	95,68	172,20	119,90	202,20	130,40	162,30	211,30	212,70	161,60	223,90	-65,99	0,00
0,00	214,60	136,20	90,52	184,00	61,85	101,50	172,40	218,20	97,99	89,55	263,40	299,60	-87,88	0,00
0,00	200,60	120,90	102,80	195,10	98,21	161,20	176,90	231,00	129,70	160,20	92,74	138,50	-40,89	0,00
...

Abbildung 54: Output-Datei, aufgenommene Nagelkräfte

Fällt ein Nagel aus, kann dieser keine Kraft aufnehmen. Dies ist beispielsweise in Abbildung 55 bei Nagel 9 (N9) zu erkennen.

Nagelkräfte [N]														
kin. Feder	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	kin. Feder
0,00	119,90	34,80	167,00	319,80	66,84	174,80	68,90	239,80	0,00	241,10	160,30	255,40	-75,51	0,00

Abbildung 55: 1 Nagelausfall

In Abbildung 56 ist der Ausfall von zwei benachbarten Nägeln (N8 & N9) ersichtlich.

Nagelkräfte [N]														
kin. Feder	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	kin. Feder
0,00	116,30	53,35	105,70	155,30	208,30	132,60	475,80	0,00	0,00	474,70	-62,07	165,60	-50,44	0,00

Abbildung 56: 2 Nagelausfälle

Können die auftretenden Kräfte nicht von den Nägeln 1 bis 13 aufgenommen werden, versagt das gesamte System. Dies ist in Abbildung 57 erkennbar. Hier werden die beiden kinematischen Federn an den Enden des Trägers aktiviert.

Nagelkräfte [N]														
kin. Feder	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	kin. Feder
-1095,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-833,50

Abbildung 57: kinematisches System

Weiters erfolgt die Ausgabe der Durchbiegung des Systems (siehe Abbildung 58). Es werden für jede Nagelposition N1 bis N13 sowie für die kinematischen Federn die Durchbiegung ausgegeben.

Durchbiegung [m]														
kin. Feder	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9	N10	N11	N12	N13	kin. Feder
-0,0831	0,0696	0,0007	0,0001	0,0006	0,0002	0,0004	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	-0,0001	-0,0007
0,0009	0,0003	0,0002	0,0003	0,0005	0,0003	0,0005	0,0002	0,0004	0,0001	0,0001	0,0005	0,0005	-0,0002	-0,0011
0,0011	0,0004	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0003	0,0002	0,0002	0,0005	0,0005	0,0003	0,0004	-0,0001	-0,0008
0,0010	0,0004	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0004	0,0003	0,0003	0,0004	0,0004	0,0003	0,0004	-0,0001	-0,0009
0,0012	0,0004	0,0003	0,0002	0,0004	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0002	0,0002	0,0005	0,0006	-0,0002	-0,0011
0,0011	0,0004	0,0002	0,0002	0,0004	0,0002	0,0003	0,0004	0,0005	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	-0,0001	-0,0005

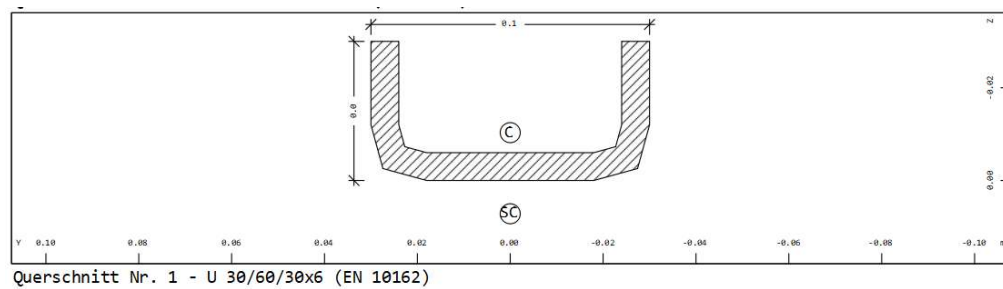
Abbildung 58: Output-Datei, Durchbiegung

Auf den folgenden Seiten ist weiters ein Auszug des automatisch erstellten Reports von Sofistik dargestellt. Aufgrund der Eingabe von Material- und Querschnittsbezeichnung werden die Kennwerte aus der Norm ausgelesen. Diese sind in Abbildung 59 bis Abbildung 61 dargestellt. In Abbildung 62 ist der Iterationsverlauf mit Angabe der Restkräfte und Energie abgebildet. Die Nagelkräfte und -verschiebungen können Abbildung 63 entnommen werden, wobei auch der Ausfall von Nägeln durch „gerissen“ ausgelesen werden kann. Des Weiteren sind Schnittkraftverläufe und Visualisierungen von auftretenden Kräften und Verschiebungen abgebildet (siehe Abbildung 64 bis Abbildung 67).

Mat 1 S 235 T (DIN 18800)					
Elastizitätsmodul	E	210000	[MPa]	Materialsicherheit	1.10 [-]
Querdehnzahl	μ	0.30	[-]	Fließgrenze	fy 215.00 [MPa]
Schubmodul	G	81000	[MPa]	Druckfließgrenze	fyc 215.00 [MPa]
Kompressionsmodul	K	171821	[MPa]	Zugfestigkeit	ft 340.00 [MPa]
Nominelle Wichte	γ	78.5	[kN/m3]	Druckfestigkeit	fc 340.00 [MPa]
Rohdichte	ρ	7850.0	[kg/m3]	Bruchdehnung	0.00 [o/oo]
Ausdehnungskoeffizient	α	1.20E-05	[1/K]	Verbundwert relativ	0.00 [-]
max. Erzeugnisdicke	t-max	100.00	[mm]	Verbundwert k1 (EN1992)k1	0.00 [-]
				Verfestigungsmodul	Eh 0.00 [MPa]
				Proportionalitätsgrenze	215.00 [MPa]
				Schwingbreite	σ -dyn 0.00 [MPa]

Mat 2 S 235 T (DIN 18800)					
Elastizitätsmodul	E	210000	[MPa]	Materialsicherheit	1.10 [-]
Querdehnzahl	μ	0.30	[-]	Fließgrenze	fy 215.00 [MPa]
Schubmodul	G	81000	[MPa]	Druckfließgrenze	fyc 215.00 [MPa]
Kompressionsmodul	K	171821	[MPa]	Zugfestigkeit	ft 340.00 [MPa]
Nominelle Wichte	γ	78.5	[kN/m3]	Druckfestigkeit	fc 340.00 [MPa]
Rohdichte	ρ	7850.0	[kg/m3]	Bruchdehnung	0.00 [o/oo]
Ausdehnungskoeffizient	α	1.20E-05	[1/K]	Verbundwert relativ	0.00 [-]
max. Erzeugnisdicke	t-max	100.00	[mm]	Verbundwert k1 (EN1992)k1	0.00 [-]
				Verfestigungsmodul	Eh 0.00 [MPa]
				Proportionalitätsgrenze	215.00 [MPa]
				Schwingbreite	σ -dyn 0.00 [MPa]

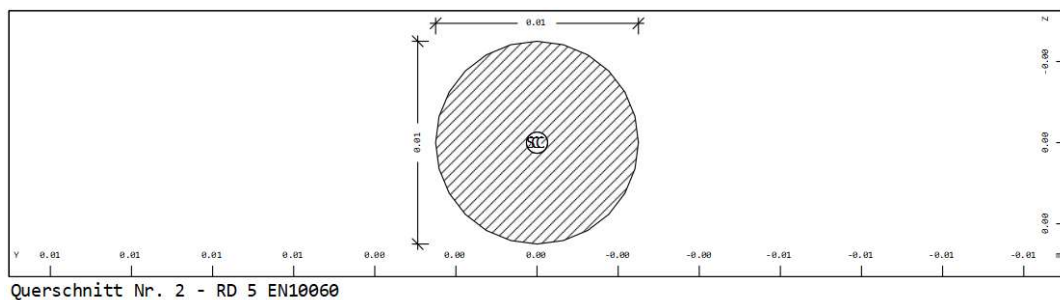
Abbildung 59: Materialkennwerte für S 235 T



Querschnittswerte

QNr	Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
	MBw	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]		Iyz[m ⁴]					α[°]
1	1	6.0165E-04	2.794E-04	4.743E-08	0.000	0.000	210000	4.7	2.807E-07
		6.943E-09	2.182E-04	2.807E-07	-0.010	0.007	81000	(CENTR)	4.743E-08

Abbildung 60: Querschnitt 1 für Profilträger



Querschnittswerte

QNr	Mat	A[m ²]	Ay[m ²]	Iy[m ⁴]	yc[m]	ysc[m]	E[MPa]	g[kg/m]	I-1[m ⁴]
	MBw	It[m ⁴]	Az[m ²]	Iz[m ⁴]	zc[m]	zsc[m]	G[MPa]		I-2[m ⁴]
		Ayz[m ²]		Iyz[m ⁴]					α[°]
2	1	1.9635E-05	1.706E-05	3.068E-11	0.000	0.000	210000	0.2	
		6.086E-11	1.706E-05	3.068E-11	0.000	0.000	81000	(CENTR)	

Abbildung 61: Querschnitt 2 für Hänger

Iterationsverlauf Lastfall 1

Iteration 1	Restkraft	0.1084	Energie	1.000	Schritt	1-1	f=	1.000
Update nichtlineare Steifigkeit								
Iteration 2	Restkraft	0.1170	Energie	1.011	Schritt	2-1	f=	1.011
Iteration 3	Restkraft	0.1148	Energie	1.012	Schritt	3-1	f=	1.799
Update nichtlineare Steifigkeit								
Iteration 4	Restkraft	0.0857	Energie	1.020	Schritt	4-1	f=	7.196
Iteration 5	Restkraft	0.0653	Energie	1.077	Schritt	5-1	f=	28.785
Iteration 6	Restkraft	0.0675	Energie	1.071	Schritt	5-2	f=	0.894
Update nichtlineare Steifigkeit								
Iteration 7	Restkraft	0.0220	Energie	1.046	Schritt	6-1	f=	0.893
Iteration 8	Restkraft	0.0172	Energie	1.045	Schritt	7-1	f=	0.983
Iteration 9	Restkraft	0.0090	Energie	1.048	Schritt	8-1	f=	3.932
Iteration 10	Restkraft	0.0004	Energie	1.051	Schritt	9-1	f=	8.337

Abbildung 62: Ausgabe des Iterationsverlaufs

Grp	Nummer	P [kN]	P-t [kN]	M [kNm]	u [mm]	u-t [mm]	phi [mrad]	Zustand
0	1	0.0	0.0	0.00	0.001	0.000	0.000	nichtlinear
0	2	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	3	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	4	0.0	0.0	0.00	0.036	0.000	0.000	gerissen
0	5	0.3	0.0	0.00	0.001	0.000	0.000	
0	6	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	7	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	8	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	9	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	10	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	11	0.2	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	12	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	13	0.1	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	14	-0.0	0.0	0.00	0.000	0.000	0.000	
0	15	0.0	0.0	0.00	-0.001	0.000	0.000	nichtlinear

Abbildung 63: Nagelkräfte und -verschiebungen

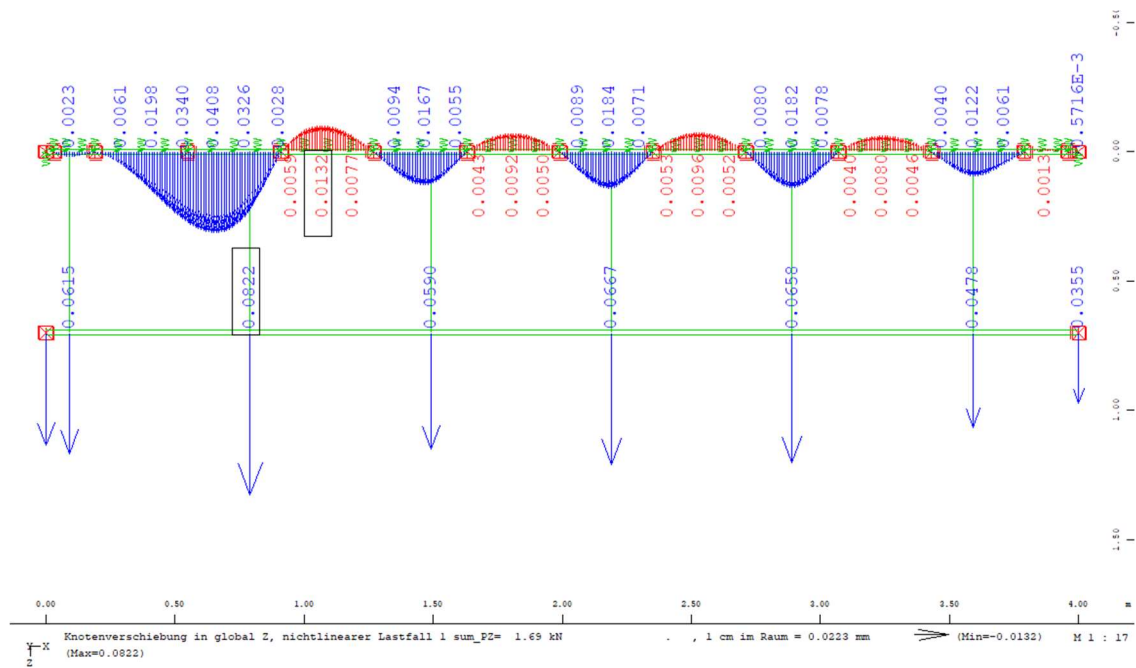


Abbildung 64: Knotenverschiebung des Systems

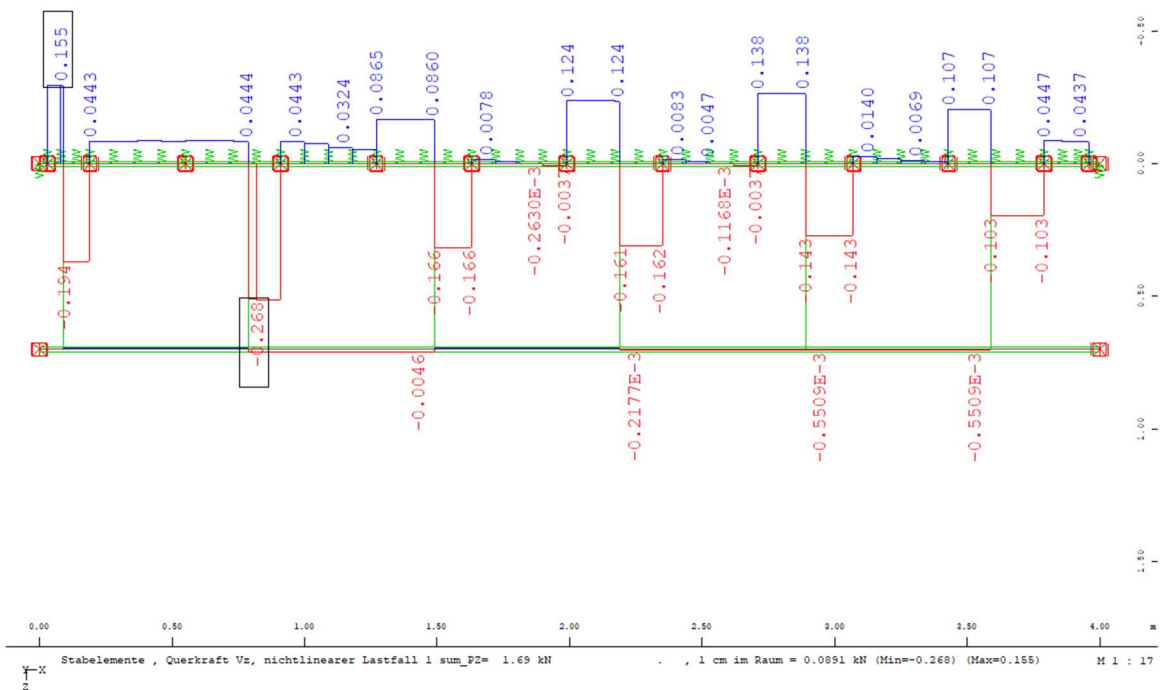


Abbildung 65: Querkräftverlauf Vz

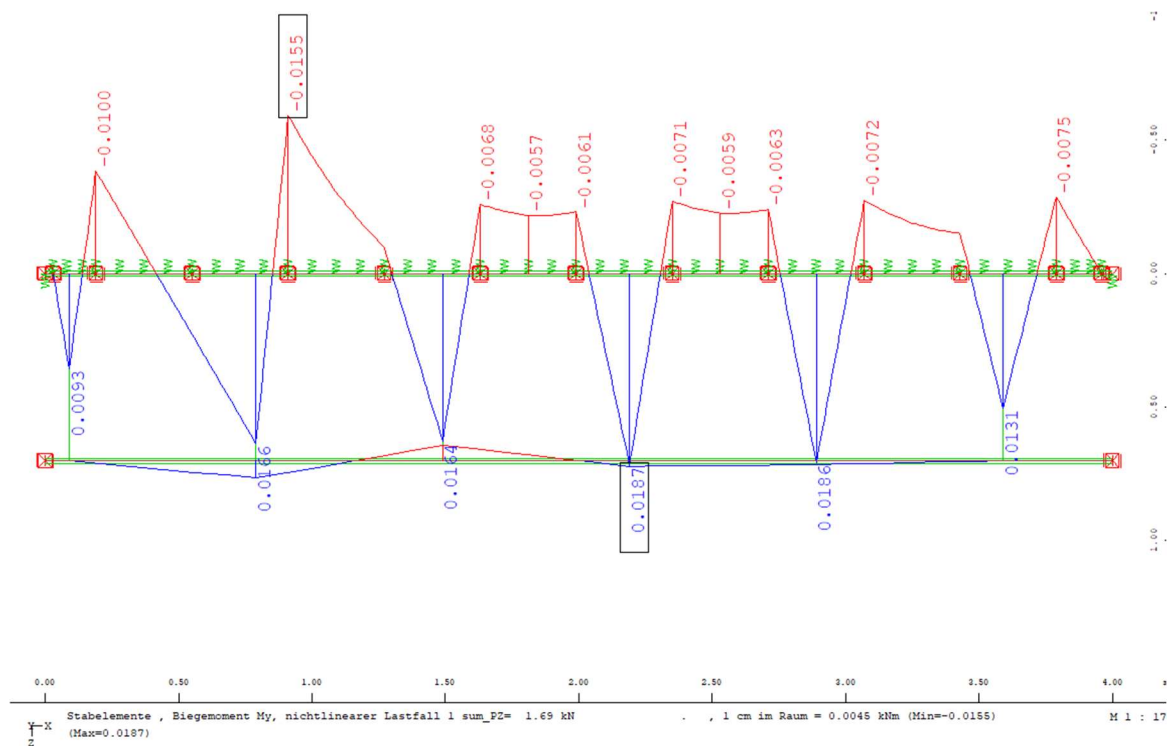


Abbildung 66: Momentenverlauf My

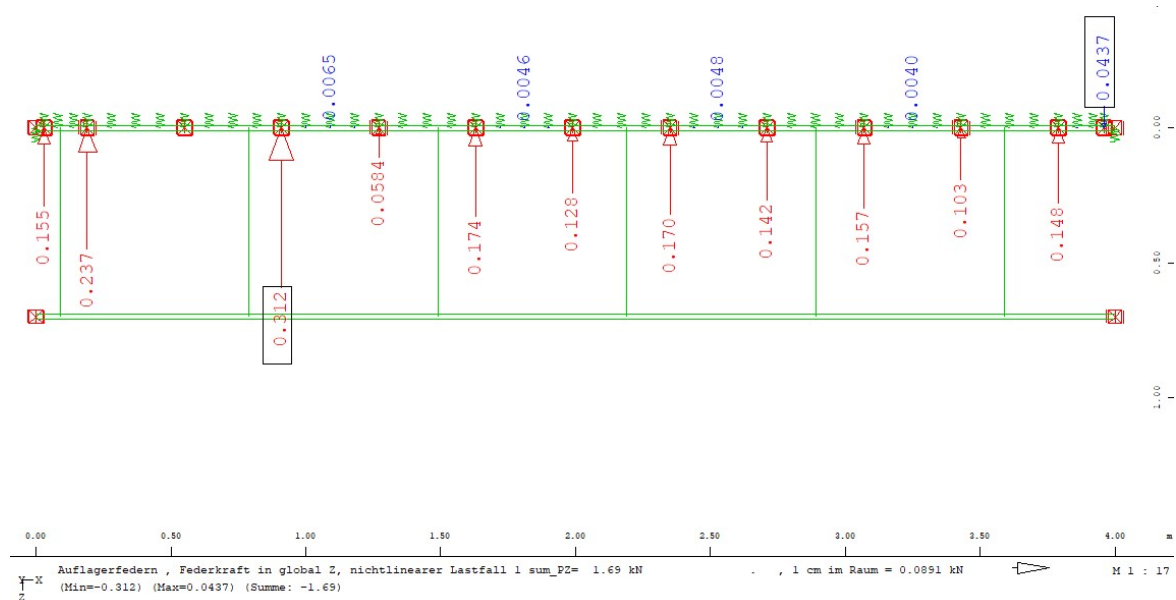


Abbildung 67: auftretende Reaktionskräfte, aufgenommen von den Nägeln und der Deckenabstützung

4 Auswertung

4.1 Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes

In Abbildung 68 ist die automatische Berechnung des β -Werts in Matlab ersichtlich. Mit Format „LONG“ werden die Ergebnisse mit einer Genauigkeit von 8 Nachkommastellen erzeugt. Zunächst werden aus der Ausgabedatei Sofistik (siehe Kapitel 3.4) die Werte der ersten Spalte durch „pRx(:,1)“ als Vektor „kin“ definiert. Im nächsten Schritt werden die Stellen aller Werte, welche ungleich null sind, in der Variable „k“ gespeichert. Die Variable „k“ beschreibt somit die kinematischen Fälle. Weiters wird die Versagenswahrscheinlichkeit „pf“ berechnet. Diese ergibt sich aus der Division der Summe der kinematischen Fälle durch die Gesamtanzahl der durchgeführten Simulationen. In diesem Fall wird mit der Eingabe „size(k)“ die Anzahl an kinematischen Fällen erhalten und durch die zu diesem Zeitpunkt simulierte Gesamtanzahl von 90.000 dividiert.

Im nächsten Auswertungsschritt wird jeder Simulationsdurchgang betrachtet, dies entspricht jeweils einer Zeile. Durch den Befehl „a(i,:)=sum(pRx(i,:)==0)-4“ werden pro Zeile die Ausfälle identifiziert. In weiterer Folge werden die Gesamtanzahlen eines Ausfalls bis hin zu acht Ausfällen (sk1 bis sk8) ermittelt.

```
format LONG
kin=pRx(:,1);
k = find(kin~=0);
pf=size(k)/90000;
k0 = pf(1);

for i = 1:80000
a(i,:)=sum(pRx(i,:)==0)-4;
end

a;
k1 = a==1; sk1=sum(k1);
k2 = a==2; sk2=sum(k2);
k3 = a==3; sk3=sum(k3);
k4 = a==4; sk4=sum(k4);
k5 = a==5; sk5=sum(k5);
k6 = a==6; sk6=sum(k6);
k7 = a==7; sk7=sum(k7);
k8 = a==8; sk8=sum(k8);
```

Abbildung 68: Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit mittels Matlab

In Tabelle 6 sind die Auswertungen für das System mit Nagelabstand 450 mm ersichtlich. Die grafische Darstellung des Systems ist in Kapitel 2.1 in Abbildung 4 und Abbildung 5 zu sehen. Infolge 200.000 durchgeführter Simulationen an dem System mit Deckenabstützung konnte bei einer Belastung von 100% eine Versagenswahrscheinlichkeit p_f von 0,055 berechnet werden. Dies ergibt einen Sicherheitsindex von $\beta = 1,16$. Parallel zu den Berechnungen mit den Werten aus Sofistik wird mittels einfachen Modellen mit der Software „Freet“ ein Sicherheitsindex $\beta_{\text{vereinfacht}}$ berechnet. Dieser beläuft sich auf $\beta_{\text{vereinfacht}} = 1,03$. Nachfolgend ist eine Übersicht der prozentuellen Ausfälle der Nägel bezogen auf die Gesamtanzahl der Simulationen dargestellt. Dies bedeutet, dass im Zuge aller Simulationen bei 31% der Simulationen 1 Nagel ausgefallen ist, bei 32% 2 Nägel ausgefallen sind usw.

Tabelle 6: Auswertung System 450 mm Nagelabstand

	450 mm Nagelabstand					
	mit Deckenabstützung			ohne Deckenabstützung		
	Belastung			Belastung		
	60%	80%	100%	60%	80%	100%
p_f			0,055			
β			1,16			
$\beta_{\text{vereinfacht}}$			1,03			
0 Nägel			8%			
1 Nagel			31%			
2 Nägel			32%			
3 Nägel			18%			
4 Nägel			8%			
5 Nägel			2%			
6 Nägel			1%			
7 Nägel			0%			
8 Nägel			0%			

In Tabelle 7 sind die Auswertungen für das System mit Nagelabstand 360 mm ersichtlich. Die grafische Darstellung des Systems ist in Kapitel 2.1 in Abbildung 6 und Abbildung 7 zu sehen. Infolge 200.000 durchgeführter Simulationen an dem System mit sowie ohne Deckenabstützung konnten bei Belastung von 100%, 80% und 60% die Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes berechnet werden.

Durch Verringerung des Nagelabstands von 450 mm auf 360 mm ist erwartungsgemäß eine Verbesserung des β -Werts von 1,16 auf 2,60 zu beobachten. Durch Reduzierung der Belastung auf 80% bzw. 60% werden β -Werte von 2,85 bzw. 3,21 erreicht.

Da durch die Deckenabstützung die Verformung des Systems nach oben hin behindert ist, bildet sich eine Gegenkraft bzw. Abstützungskraft (Hebelsarm) aus. Diese zusätzlichen Zugkräfte wirken auf die Nägel, wodurch der β -Wert nachteilig beeinflusst wird. Aus diesem Grund ist zu erkennen, dass die Sicherheitsindizes bei den Systemen ohne Deckenabstützung höher ausfallen als jene mit Abstützung. Mittels „Freet“ wurde mit $\beta_{\text{vereinfacht}} = 2,56$ bereits eine passable Näherung zum Sicherheitsindex $\beta = 2,6$ erreicht. Im Zuge aller Simulationen sind bei voller Belastung bei 14% der Simulationen 1 Nagel ausgefallen, bei 5% der Simulationen 2 Nägel ausgefallen usw.

Tabelle 7: Auswertung System 360 mm Nagelabstand

	360 mm Nagelabstand					
	mit Deckenabstützung			ohne Deckenabstützung		
	Belastung			Belastung		
	60%	80%	100%	60%	80%	100%
p_f	0,000511	0,002	0,0046		0,0015	0,004
β	3,21	2,85	2,60		3,10	2,80
$\beta_{\text{vereinfacht}}$	2,56					
0 Nägel	90%	85%	80%	79%		
1 Nagel	8%	11%	14%		13%	13%
2 Nägel	2%	3%	5%		4%	5%
3 Nägel	0%	1%	1%		1%	2%
4 Nägel	0%	0%	0%		0%	1%
5 Nägel	0%	0%	0%		0%	0%
6 Nägel	0%	0%	0%		0%	0%
7 Nägel	0%	0%	0%		0%	0%
8 Nägel	0%	0%	0%		0%	0%

In Tabelle 8 sind die Auswertungen für das System mit Nagelabstand 280 mm ersichtlich. Die grafische Darstellung des Systems ist in Kapitel 2.1 in Abbildung 8 und Abbildung 9 zu sehen. Infolge 200.000 durchgeführter Simulationen an dem System mit sowie ohne Deckenabstützung konnten bei Belastung von 100%, 80% und 60% die Versagenswahrscheinlichkeiten und Sicherheitsindizes berechnet werden. Durch Verringerung des Nagelabstands von 360 mm auf 280 mm ist abermals eine Verbesserung des β -Werts von 2,60 auf 2,92 zu beobachten. Durch Reduzierung der Belastung auf 80% bzw. 60% werden β -Werte von 3,15 bzw. 3,35 erreicht. Der Sicherheitsindex der Systeme ohne Deckenabstützung bei Volllast fällt mit $\beta = 3,65$ höher aus als jener mit Abstützung. Mittels „Freet“ wurde ein Sicherheitsindex $\beta_{\text{vereinfacht}} = 2,78$ berechnet. Im Zuge aller Simulationen sind bei voller Belastung bei 36%

der Simulationen 1 Nagel ausgefallen, bei 15% der Simulationen 2 Nägel ausgefallen usw.

Tabelle 8: Auswertung System 280 mm Nagelabstand

	280 mm Nagelabstand					
	mit Deckenabstützung			ohne Deckenabstützung		
	Belastung			Belastung		
	60%	80%	100%	60%	80%	100%
p_f	0,0004125	0,0007667	0,0017	0,000111		
β	3,35	3,15	2,92	3,65		
$\beta_{\text{vereinfacht}}$	2,78					
0 Nägel	48%	47%	44%	67%		
1 Nagel	34%	36%	36%	23%		
2 Nägel	12%	13%	15%	8%		
3 Nägel	3%	3%	4%	2%		
4 Nägel	1%	1%	1%	0%		
5 Nägel	0%	0%	0%	0%		
6 Nägel	2%	0%	0%	0%		
7 Nägel	0%	0%	0%	0%		
8 Nägel	0%	0%	0%	0%		

In Tabelle 9 ist eine Zusammenstellung der β -Indizes für die Belastungssituationen mit 60%, 80% und 100% für die Systeme mit Deckenabstützung zu finden. In der darunterliegenden Abbildung 69 ist dieser Sachverhalt grafisch dargestellt. Wird ein Diagramm einzeln betrachtet, z.B. Diagramm a), können die β -Indizes für das System mit Nagelabstand von 280 mm ausgelesen werden und die drei Belastungssituationen verglichen werden. Allerdings ist es auch möglich, die drei Grafiken a), b) und c) gemeinsam vertikal zu betrachten. Auf diese Weise kann ein Vergleich des Einflusses der Nagelabstände bei einer bestimmten Belastungssituation erfolgen.

Tabelle 9: Zusammenfassung der β -Indizes für Systeme mit Deckenabstützung

β -Indizes mit Deckenabstützung	Belastung		
	60%	80%	100%
280 mm Nagelabstand	3,35	3,15	2,92
360 mm Nagelabstand	3,21	2,85	2,60
450 mm Nagelabstand	2,76	1,96	1,16

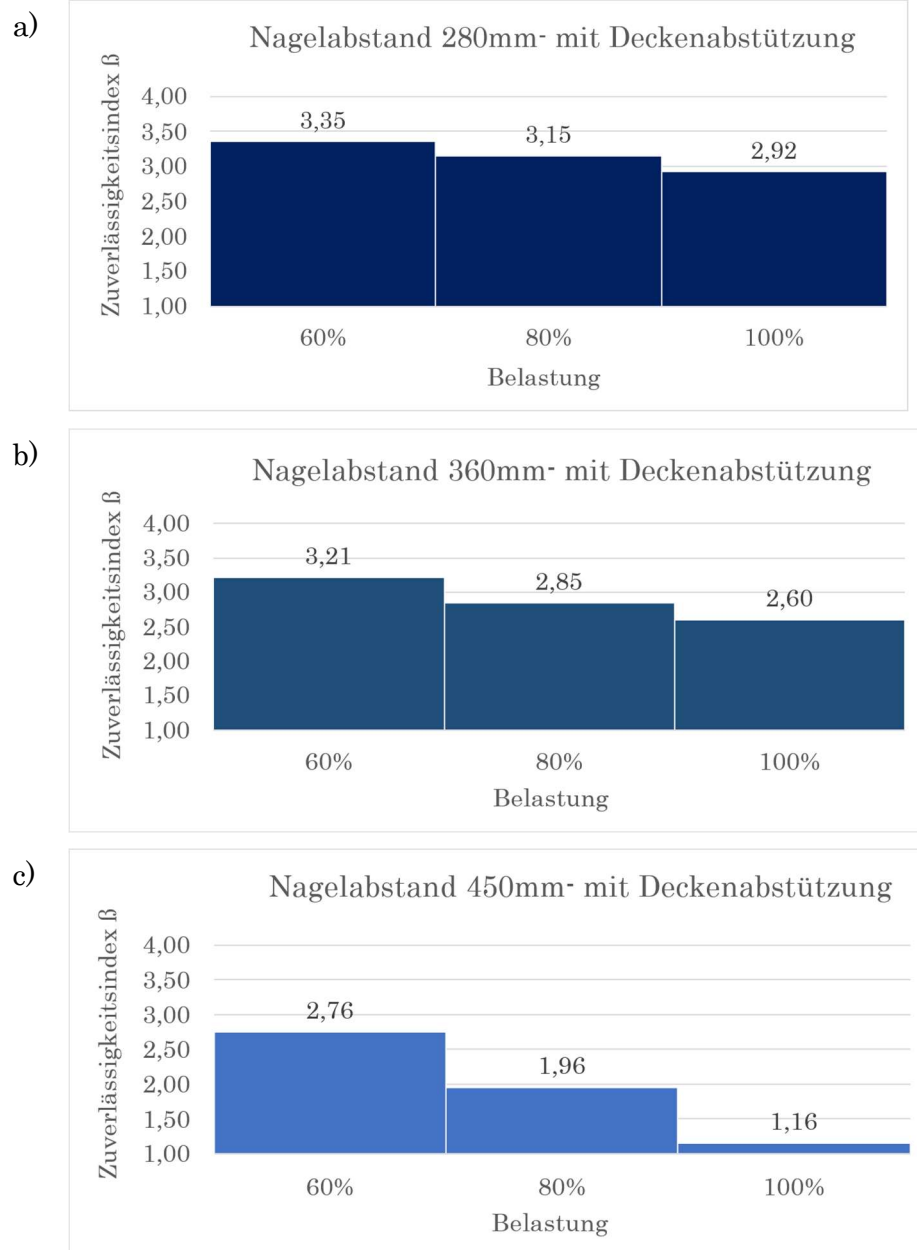


Abbildung 69: β -Indizes für das System mit Deckenabstützung mit verschiedenen Belastungssituationen (Nagelabstände: a) 450 mm; b) 360 mm; c) 250 mm)

Tabelle 10 stellt eine Zusammenfassung der β -Indizes für die Systeme ohne Deckenabstützung für die Belastungssituationen mit 60%, 80% und 100% dar. Die Tabelle wurde in Abbildung 70 grafisch umgesetzt. Es kann wiederum jedes Diagramm einzeln betrachtet werden oder es können beide Diagramme miteinander verglichen werden.

Tabelle 10: Zusammenfassung der β -Indizes für Systeme ohne Deckenabstützung

β -Indizes ohne Deckenabstützung	Belastung		
	60%	80%	100%
280 mm Nagelabstand	4,08	3,88	3,65
360 mm Nagelabstand	3,46	3,10	2,80

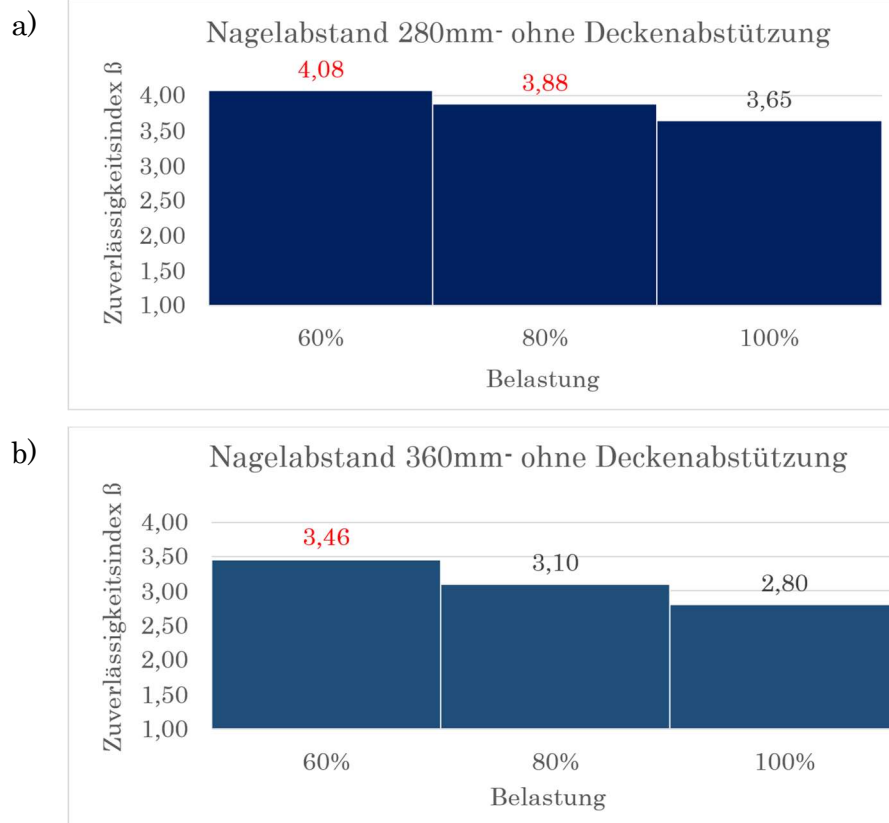


Abbildung 70: β -Indizes für das System ohne Deckenabstützung mit verschiedenen Belastungssituationen (Nagelabstände: a) 450 mm; b) 360 mm)

5 Fazit

Für die praktische Anwendbarkeit ist es von Vorteil, wenn ein System vorliegt, welches in Vergleich zu den bisher beschriebenen Auswertungen und Berechnungen schnelle Ergebnisse liefert. Das dafür nötige Vorgehen basiert auf einfachen Berechnungen, für welche ein Faktor bekannt sein muss, welcher den Sachverhalt der Ausfallsreaktionen ausreichend genau beschreibt. Hierbei handelt es sich um den Transferfaktor. Mit Kenntnis dieses Faktors soll es möglich sein, für ein beliebiges System auf schnelle und relativ einfache Weise die Gesamtversagenswahrscheinlichkeit zu berechnen sowie den Versagensablauf beschreiben zu können.

Der Transferfaktor wird mit Hilfe der Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Nägel sowie des Gesamtsystems ermittelt. Dies geschieht, indem eine bestmögliche Näherung gesucht wird. Die Kenntnis der benötigten Wahrscheinlichkeiten wird aus den vorangegangenen Versuchen entnommen. Nun wird beispielsweise das System in Abbildung 71 betrachtet. Für jeden Nagel ist die Versagenswahrscheinlichkeit bekannt. Außerdem ist die Versagenswahrscheinlichkeit des gesamten Systems bekannt und soll zum Beispiel mit dem Sicherheitsindex $\beta = 3,65$ beschrieben werden. Der Transferfaktor ist jener Wert, mit welchem die Einzelwahrscheinlichkeiten multipliziert werden müssen, sodass zum Schluss die korrekte Gesamtversagenswahrscheinlichkeit erhalten wird. Fällt nun der erste Nagel R1 mit der Wahrscheinlichkeit $P_f(R1)$ aus, trägt dieser keine Last mehr. Nun ist die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit der zweite Nagel R2 versagt. Hierzu wird die Versagenswahrscheinlichkeit des ersten Nagels, welcher versagt hat, mit dem Transferfaktor multipliziert und zu der des zweiten Nagels addiert. Diese Summe beschreibt das Ausfallen der ersten beiden Nägel. Weiters wird der eben erhaltenen Wert wiederum mit dem Transferfaktor multipliziert, da dies wiederum einen Einfluss auf den drittnächsten Nagel hat. Hier werden die Wahrscheinlichkeiten aufsummiert. Dieses Vorgehen kann fortgesetzt werden, bis das gesamte System versagt hat. In Abbildung 72 ist das Lastpfadschema eines mittigen Ausfalls zu erkennen. Hierbei werden die Ausfallswahrscheinlichkeiten beidseitig des ersten Ausfalls weitergegeben und es bildet sich ein pyramidenförmiges Schema aus.

R1				
Pf(R1)	R2			
Pf(R1)*Ft	Pf(R2)	R3		
$\Sigma = Pf(R1)*Ft$	$Pf(R2)*Ft$	Pf(R3)	...	
	$\Sigma = Pf(R1)*Ft + Pf(R2)*Ft$	...	...	R16
		...	...	Pf(R16)
		
				...
Transferfaktor Ft				Gesamtversagens wahrscheinlichkeit Pf
				Sicherheitsindex β

Abbildung 71: erster Ausfall am Rand des Systems

			R4			
		R3		R5		
	R2				R6	
...						R7
						...
		Transferfaktor Ft				
		Gesamtversagens wahrscheinlichkeit Pf				
		Sicherheitsindex β				

Abbildung 72: erster Ausfall in der Mitte des Systems

Weiters kann ein Robustheitsfaktor r definiert werden (siehe Gleichung 5.1). Dieser setzt sich aus dem Sicherheitsindex des Gesamtsystems β_{ges} dividiert durch den jeweiligen Sicherheitsindex β_i eines einzelnen Nagels zusammen.

$$r = \frac{\beta_{\text{ges}}}{\beta_i} \quad (5.1)$$

Abschließend soll mit Abbildung 73 ein Zusammenhang aus der in Kapitel 1 besprochenen Robustheit mit der anschließenden Analyse des Deckensystems hergestellt werden. Es kann ein Gefährdungsbild erstellt werden, welches sich aus einer Kombination aus verschiedenen Einwirkungen aus natürlicher und gebauter Umwelt auf das Tragsystem zusammensetzt. Für ein abgehängtes Deckensystem sind dies zum Beispiel Nutzung, Überlastung, Brand, Erdbeben, Wasser, chemischer Angriff, usw. Die Robustheitsanalyse kann deterministisch, zuverlässigkeitsbasiert oder risikobasiert vorgenommen werden und ist in Abbildung 73 rechts unten angeführt. Schädigungsprozesse bzw. Ausfallsszenarien sind beispielsweise Nagelausfall beim Setzen und nach Deckenmontage, Rissbildung des Verankerungsgrundes, ein großer Anteil geringer Nageltragfähigkeiten oder Hängerausfall.

Prozessschritte der statischen Analysen	Prozessschritt	abgehängtes Deckensystem	Robustheits relevante Definitionen			
Materialien Materialeigenschaften	1	Strahlbeton, Baustahl	Schädigungsprozesse Schädigungsmodelle			
Norm- Nachweisformate Sicherheitsformate	2	Eurocode EN1992, EN1993	Sicherheitsformat Teilsicherheitsfaktoren, Kombinationsbeiwerte "Aussergewöhnliche Lastfallsituation"			
Topologie der Struktur & Idealisierung (z.B. Stab, Flächen, Scheiben, Schalensysteme)	3	Nägel, Durchlaufträger, Pendelstäbe	Ausfallgefährdete Strukturelemente auf Basis einer Gefahrenanalyse (Fehlerbaum-, Ereignisbaum-, Fehler-Ereignisbaumanalysen)	Widerstandsmodell	Deterministische Robustheitsanalyse	Zuverlässigkeitsbasierte Robustheitsanalyse
	3.1	Nagelkapazitäts- überschreitung	Konzeption der Modelle für mechanische Ausfallsszenarien Grenzwerte der Initiierung, Grenzwerte des Totalversagens (Überlastung, Explosion, ...)			
	3.2	-	Konzeption der Modelle für verschlechterungsprozessbedingte Ausfallsszenarien Grenzwerte der Initiierung, Grenzwerte des Totalversagens (Ermüdung, Korrosion,...)			
Topologie der Lagerungsbedingungen, Randbedingungen & Idealisierung (z.B. Interaktionen zum Baugrund & zwischen den Bauteilen)	4	Verbund Nagel & Stb.-Platte	Ausfallgefährdete Rand- & Lagerungsbedingungen auf Basis einer Gefahrenanalyse	Einwirkungsmodell		
	4.1	Anschluss Stb.-Platte & Träger mit/ohne Deckenabstützung	Konzeption der Modelle für mechanische Ausfallsszenarien Grenzwerte der Initiierung, Grenzwerte des Totalversagens			
	4.2	-	Konzeption der Modelle für Verschlechterungsprozesse bedingte Ausfallsszenarien			
Definition der Einzellastfälle	5	Eigengewicht & ständige Ausbaulasten	Aktive Lastfälle nach dem Eintritt der robustheitsspezifischen Schadensereignisse	Einwirkungsmodell		
	5.1	Kombination Eigengewicht & ständige Ausbaulasten	Lastfälle welche die robustheitsspezifischen Schadensereignisse auslösen			
Definition der normspezifischen Lastfallkombinationen (Teilsicherheitsbeiwerte für ständige & variable Lasten etc., und deren Kombinationsbeiwerte)	6	entsprechend Norm	Definition der robustheitsspezifischen Lastfallkombinationen und der zugehörigen robustheitsspezifischen Widerstandsmodelle (Teilsicherheitsbeiwerte und Kombinationsbeiwerte entsprechend der Außergewöhnlichen Lastfallkombination)			
Lineare bzw. nichtlineare Berechnung der Systemantwort der definierten Lastfallkombinationen (Verformungs- und Zustandsgrößen)	7		Lineare bzw. Nichtlineare Berechnung der Systemantwort der robustheitsspezifischen Lastfallkombinationen und Widerstandsmodelle "Außergewöhnlichen Lastfallkombination" (Verformungs- und Zustandsgrößen)	Statische Analyse		
Analyse der Verformungs- bzw. Zustandsgrößen in Bezug auf die normspezifischen Grenzzustände	8		Analyse der robustheitsspezifischen Verformungs- bzw. Zustandsgrößen in Bezug auf die Grenzzustände der Außergewöhnlichen Lastfallsituationen			
	8.1		Maßgebende robustheitsspezifische Lastfallkombination und Robustheitswiderstandsmodell (geringster Abstand zu den definierten Grenzwerten)			
	8.2		Erhöhung der maßgebenden robustheitsspezifische Lastfallkombination bis zum Überschreiten der definierten Grenzwerte			
Deterministischer Robustheitsindikator $r = I_{kapaz}/I_{intakt}$ $r < 1$...Robustheitsanforderung nicht erfüllt → Adaptierung des Widerstandmodells $r \geq 1$...Robustheitsanforderung erfüllt						
Zuverlässigkeitsindex basierter Robustheitsindikator $p_{Probabilität} = (p_{f,beschädigt} - p_{f,intakt})/p_{f,intakt} = p_{f,beschädigt}/p_{f,intakt} - 1$ $0 \leq p_{Probabilität} < \infty$ je kleiner $p_{Probabilität}$, desto robuster						
Risikoindex basierter Robustheitsindikator $p_{Risiko} = R_{dir}/(R_{dir} + R_{ind}) = 1/(1 + R_{ind}/R_{dir})$ $p_{Risiko} \rightarrow 0 \dots$ überproportionales Risiko $p_{Risiko} = 1$... absolut robust (keine Schadensausbreitung)						

Abbildung 73: Prozessablauf der Robustheitsanalyse

6 Ausblick

Zukünftig könnte mit einer probabilistischen Analyse eine Zuverlässigkeitsbewertung für Pfahlssysteme durchgeführt werden. Hierfür wäre die Bewertung von Pfahlausfällen und des Setzungsverhaltens von Interesse. Des Weiteren wäre mit dieser Methode eine Verbesserung von Ankersystemen, zum Beispiel in Tunneln, auf der Zuverlässigkeitsebene vorstellbar.

7 Notationstabelle

Symbol	Erklärung
a	Anzahl der externen Reaktionen
A_{bauteil}	Fläche des Bauteils
C_{dir}	direkte Folgen
C_{ind}	indirekte Folgen
D	lokaler (direkter) Schaden
\bar{D}	beschädigter Zustand
\bar{D}	unbeschädigten Zustand
$\det(K_{\text{beschädigt}})$	Determinante der Steifigkeitsmatrize der beschädigten Struktur
$\det(K_{\text{intakt}})$	Determinante der Steifigkeitsmatrize der intakten Struktur
E_A	Lastverhältnis
E_d	Bemessungswert der Einwirkung
$E_{d,\text{Sicherung}}$	Bemessungswert der Einwirkung in den Sicherungen
F	endgültigen Ausfall des Systems
F	Grad der Unbestimmtheit
\bar{F}	Schadensfortschritt des Systems
$F_{\text{exp } A}$	experimentelle Abhängigerkräfte
F_i	auf tretende Kraft, Einwirkung
$F_{\text{sim } A}$	simulierte Abhängigerkräfte
H	Gefahren
k	Anzahl der Knoten
p	Anzahl der festen Komponenten
$P[D_j | H_i]$	Wahrscheinlichkeit direkter Schaden D_j bedingt von Gefahr H_i
$P[H_i]$	Wahrscheinlichkeit Auftreten von Gefahr H_i
$P[S_k | D_j \cap H_i]$	Wahrscheinlichkeit systemischen Schadens S_k bedingt durch Schaden D_j und Gefahr H_i
$pf_{\text{(beschädigt)}}$	Ausfallwahrscheinlichkeit beschädigte Struktur
$pf_{\text{(intakt)}}$	Ausfallwahrscheinlichkeit intakte Struktur
R_d	Bemessungswert des Widerstands
$R_{d,\text{Sicherung}}$	Bemessungswert der Sicherungsfestigkeit
R_{dir}	direktes Risiko
$R_{\text{exp } N}$	experimentelle Nagel-Tragfähigkeiten
R_i	Widerstand
r	Robustheitsfaktor
r_{ii}	Redundanzkomponenten

R_{ind}	indirektes Risiko
R_{simN}	simulierte Nagel-Tragfähigkeiten
R_{tot}	Gesamtrisiko
S	systematischer Schaden
ULS	Grenzzustand der Tragfähigkeit
z	Gesamtanzahl
Z	Zufallszahlen
z_0	Anzahl der Versagensfälle
β	Sicherheitsindex
β_{ges}	Sicherheitsindex des Gesamtsystems
β_i	Sicherheitsindex einzelner Elemente
$\Delta E_{\text{d,Stütze}}$	zusätzliche innere Kräfte und Momente
λ	Auslastungsverhältniss
$\rho_{\text{Probabilistik}}$	probabilistischer Robustheitsindex
$\rho_{\text{Redundanz}}$	redundanzgeprägter Robustheitsindex
ρ_{Risiko}	risikogeprägter Robustheitsindex

8 Literaturverzeichnis

Tanner P, Hingorani R. Robustness: a practitioner's perspective. IABSE Symposium Guimaraes, Towards a Resilient Built Environment - Risk and Asset Management, Guimaraes, 2019

Ellingwood B. Mitigating Risk from Abnormal Loads and Progressive Collapse. Journal of Performance of Constructed Facilities. 2006;20:315-23.; Ellingwood B., Dusenberry DO. Building Design for Abnormal Loads and Progressive Collapse. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2005;20:12; ASCE 7.10

Zhu und Frangopol, 2012

Ghosn et al., 2016 und 2016b

Xinjian et al., 2017

Praxedes und Yuan, 2019

Starossek und Haberland, 2011

Fu und Frangopol, 1990

Baker et al., 2008

Eriksson und Tibert, 2006

Kou et al., 2017

Jörg Schneider, 2018, Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen

9 Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Simulationsablauf für den Nachweis der Nagel-Gruppenbefestigungen von abgehängten Decken, nach Dr. Dreier</i>	<i>30</i>
<i>Tabelle 2: Auszug der Kennbuchstaben für Festhaltungen.....</i>	<i>36</i>
<i>Tabelle 3: Zusammenfassung der Elementnummerierung, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>45</i>
<i>Tabelle 4: Zusammenfassung der Elementnummerierung, generischer Code</i>	<i>58</i>
<i>Tabelle 5: notwendige Änderungen bei Variation der Nagelabstände.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabelle 6: Auswertung System 450 mm Nagelabstand.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabelle 7: Auswertung System 360 mm Nagelabstand.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabelle 8: Auswertung System 280 mm Nagelabstand.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 9: Zusammenfassung der β-Indizes für Systeme mit Deckenabstützung.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabelle 10: Zusammenfassung der β-Indizes für Systeme ohne Deckenabstützung.....</i>	<i>72</i>

10 Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1: Erhöhung der Redundanz am Beispiel eines Fachwerksystems (oben), durch Addition von Elementen und Erhöhung seiner statischen Unbestimmtheit (unten).....</i>	<i>19</i>
<i>Abbildung 2: Direkte und indirekte Folgen, angepasst von (Baker et al., 2008)</i>	<i>22</i>
<i>Abbildung 3: Vorgehensweise MC-Methode</i>	<i>23</i>
<i>Abbildung 4: Ansicht Deckensystem mit Nagelabstand 450mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 5: Grundriss Deckensystem mit Nagelabstand 450mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>26</i>
<i>Abbildung 6: Ansicht Deckensystem mit Nagelabstand 360mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 7: Grundriss Deckensystem mit Nagelabstand 360mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>27</i>
<i>Abbildung 8: Ansicht Deckensystem mit Nagelabstand 280mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 9: Grundriss Deckensystem mit Nagelabstand 280mm, Quelle: F. Dreier, K. Block</i>	<i>28</i>
<i>Abbildung 10: Ablaufdiagramm - nötige Prozessschritte</i>	<i>29</i>
<i>Abbildung 11: Schema Ergebnisdatei aus Matlab (Input für Sofistik).....</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 12: Schema Sofistikprozess & Systemdarstellung (hier mit 450 mm Nagelabstand)</i>	<i>33</i>
<i>Abbildung 13: AQUA-Block, Querschnitts- und Materialdefinition</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 14: Darstellung der vorgegebenen Reihenfolge von Eingabewerten.....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 15: Darstellung von vorgezogenen Eingabewerten (hellblau).....</i>	<i>35</i>
<i>Abbildung 16: Sofimsha-Block, Systemdefinition</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 17: Sofimsha-Block, Elementgenerierung</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 18: Sofimsha-Block, Definition der Randbedingungen</i>	<i>36</i>
<i>Abbildung 19: Sofimsha-Block, Generierung Federelemente.....</i>	<i>37</i>
<i>Abbildung 20: Beispiel Sofiload-Block, Lastgenerierung.....</i>	<i>37</i>

<i>Abbildung 21: Beispiel Ase-Block, Systemberechnung</i>	<i>38</i>
<i>Abbildung 22: Definition der Nagelkapazitäten und Hängerkräfte, Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 23: Aqua-Block, Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>39</i>
<i>Abbildung 24: Definition des räumlichen Systems.....</i>	<i>40</i>
<i>Abbildung 25: Definition der Knoten des oberen Profils, Vorstufe des generischen Codes..</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 26: Definition der Knoten des unteren Profils, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 27: Definition der Stäbe zwischen den Knoten (Vorstufe des generischen Codes) und skizzierter Ablauf.....</i>	<i>41</i>
<i>Abbildung 28: Möglichkeiten der Definition von gelenkigen Anschlüssen.....</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 29: Definition der Hänger, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>42</i>
<i>Abbildung 30: Definition der Randbedingungen oberes Profil (links) und unteres Profil (rechts), Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>43</i>
<i>Abbildung 31: Generierung Federn der Deckenabstützung, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 32: Definition der Federn der Nagelkräfte, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>44</i>
<i>Abbildung 33: Definition der Federn nach Kollaps (links) und Modellansicht mit Federnummern (rechts), Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 34: Sofistik-Modell, Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>45</i>
<i>Abbildung 35: Sofiloader-Block, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 36: Ase-Block, Vorstufe des generischen Codes.....</i>	<i>46</i>
<i>Abbildung 37: Template, Vorstufe des generischen Codes</i>	<i>47</i>
<i>Abbildung 38: Aufbau der Input-Datei.....</i>	<i>48</i>
<i>Abbildung 39: Laden der Nagelkapazitäten und Hängerlasten, generischer Code</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 40: Aqua-Block, generischer Code</i>	<i>49</i>
<i>Abbildung 41: Erzeugung der Knoten für obere und untere Schiene mit 1 cm Abstand, generischer Code.....</i>	<i>50</i>
<i>Abbildung 42: Generierung Stäbe der oberen Schiene.....</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 43: Generierung der Hänger und Stäbe der unteren Schiene</i>	<i>52</i>
<i>Abbildung 44: Lagerbedingungen der Endknoten (obere und untere Schiene).....</i>	<i>53</i>

<i>Abbildung 45: Lagerungsbedingungen der Nägel</i>	54
<i>Abbildung 46: Federn (5014 & 5008) zwischen den ersten Nägeln</i>	54
<i>Abbildung 47: restliche Federn zwischen Nägeln</i>	55
<i>Abbildung 48: Federn zwischen den letzten Nägeln</i>	55
<i>Abbildung 49: kinematische Federn</i>	56
<i>Abbildung 50: Federn Nagelkräfte</i>	57
<i>Abbildung 51: Systemausschnitt des oberen Profils, Nummerierung der kinematischen Federn, der Nägel sowie der Deckenabstützung</i>	57
<i>Abbildung 52: Sofiloader-Block, generischer Code</i>	59
<i>Abbildung 53: Ase-Block, generischen Codes</i>	59
<i>Abbildung 54: Output-Datei, aufgenommene Nagelkräfte</i>	61
<i>Abbildung 55: 1 Nagelausfall</i>	61
<i>Abbildung 56: 2 Nagelausfälle</i>	61
<i>Abbildung 57: kinematisches System</i>	61
<i>Abbildung 58: Output-Datei, Durchbiegung</i>	62
<i>Abbildung 59: Materialkennwerte für S 235 T</i>	62
<i>Abbildung 60: Querschnitt 1 für Profilträger</i>	63
<i>Abbildung 61: Querschnitt 2 für Hänger</i>	63
<i>Abbildung 62: Ausgabe des Iterationsverlaufs</i>	63
<i>Abbildung 63: Nagelkräfte und -verschiebungen</i>	64
<i>Abbildung 64: Knotenverschiebung des Systems</i>	65
<i>Abbildung 65: Querkraftverlauf V_z</i>	65
<i>Abbildung 66: Momentenverlauf M_y</i>	66
<i>Abbildung 67: auftretende Reaktionskräfte, aufgenommen von den Nägeln und der Deckenabstützung</i>	66
<i>Abbildung 68: Ermittlung der Versagenswahrscheinlichkeit mittels Matlab</i>	67
<i>Abbildung 69: β-Indizes für das System mit Deckenabstützung mit verschiedenen Belastungssituationen (Nagelabstände: a) 450 mm; b) 360 mm; c) 250 mm)</i>	71

<i>Abbildung 70: β-Indizes für das System ohne Deckenabstützung mit verschiedenen Belastungssituationen (Nagelabstände: a) 450 mm; b) 360 mm).....</i>	<i>72</i>
<i>Abbildung 71: erster Ausfall am Rand des Systems.....</i>	<i>74</i>
<i>Abbildung 72: erster Ausfall in der Mitte des Systems.....</i>	<i>74</i>