

Diploma Thesis

Optimization of structural design by using parametric modeling

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Optimierungsmöglichkeiten in der Tragwerksplanung durch den Einsatz parametrischer Rechenmodelle

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Paul Hechinger, BSc

Matr.Nr.: 01126005

unter der Anleitung von

Privatdoz. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Christian Schranz, M.Sc.**

Institut für Hochbau und Technologie
Forschungsbereich für Hochbaukonstruktionen und Bauwerkserhaltung
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/206-04, 1040 Wien, Österreich

Wien, im Juni 2018

Kurzfassung

Die Verwendung parametrischer Rechenmodelle zur Analyse und Berechnung von Bauwerken stellt eine in der Tragwerksplanung relativ neuartige Entwicklung dar. Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Einsatzmöglichkeiten parametrischer Modellierung in der Tragwerksplanung und zeigt deren Vorteile auf. Im Wesentlichen sind dies die Möglichkeit der Analyse vieler verschiedener Modellzustände in kurzer Zeit sowie das sich ergebende Potential durch die Verknüpfung der sodann variablen Modellparameter mit Optimierungsalgorithmen, die zu einer Automatisierung des Berechnungs- und Optimierungsprozesses führen.

Als Einstieg in die Thematik dient eine Definition des Begriffs „Tragwerksplanung“ mit einer Erläuterung ihrer Aufgaben bei der Bearbeitung eines Bauprojekts. Anschließend erfolgt eine Erklärung des allgemeinen Ablaufs einer statischen Berechnung mit ihren einzelnen Schritten. Dabei wird ersichtlich, dass die Optimierung eines Tragwerks eigentlich ein fundamentaler Bestandteil einer jeden statischen Berechnung ist.

Im weiteren Verlauf der Arbeit stellen Kapitel 3 und 4 zwei unterschiedliche Statik-Programme vor, ein im deutschsprachigen Raum bekanntes, sehr verbreitetes und ein relativ neuartiges Programm, das den Aufbau eines parametrischen Rechenmodells ermöglicht. Die Lektüre dieser beiden Kapitel vermittelt dem Leser ein Gefühl für die Charakteristika und Unterschiede beider Programmtypen und bildet somit die Grundlage für den Hauptteil dieser Diplomarbeit, der sich dem kombinierten Einsatz beider Programmtypen anhand eines realen Projekts widmet. Dieser kombinierte Einsatz ermöglicht die Vereinigung der jeweiligen Vorteile beider Statik-Programme und eröffnet somit vielfältige sowie neue Möglichkeiten bei der Berechnung. Im konkreten Beispiel erfolgt die Optimierung einer bestehenden Tragstruktur unter Zuhilfenahme genetischer Algorithmen.

Den Abschluss der Arbeit bildet eine Interpretation der erhaltenen Ergebnisse aus der Projektstudie, um die Vorteile einer parametrischen Betrachtungsweise noch deutlicher hervorzuheben, bevor sie anschließend einen Ausblick auf mögliche künftige Entwicklungen auf diesem Gebiet wagt.

Abstract

Using parametric models for the analysis and computation of structures is a relatively new development within structural engineering. The aim of this master's thesis is to show the potential of parametric modeling within structural analysis and design and to discuss the associated advantages. The primary areas of investigation in this study are the ability for parametric modeling techniques to assess many structural forms within very short time periods and the implementation of optimization algorithms within the structural design procedure.

The thesis starts with a broader explanation of structural engineering and its functions during the various stages of construction projects. Afterwards the basic stages of the calculation process are presented. Through discussing these procedures, it will become clear that structural optimization is a fundamental part of every static calculation.

Chapters 3 and 4 introduce the reader to two different structural analysis programs – one being very popular and the other using a relatively new approach which is little known among civil and structural engineers. These two chapters deal with the individual features and relative advantages and disadvantages of both methods which forms the outline of the main discussion of the thesis. The thesis aims to present the benefits of combining these two types of software in a real project, demonstrating the range of new possibilities available to structural engineers and their design teams when this approach is adopted. To assess the method, it is used in a current project where an existing load-bearing structure is optimized through the implementation of genetic algorithms in the parametric calculation model.

The last chapter gives an interpretation of the case study results to stronger highlight the benefits of parametric structural engineering and additionally tries to take a look at possible future developments and applications.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Motivation | 9 |
| 2 | Begriffsdefinition Tragwerksplanung | 11 |
| 2.1 | Ablauf und Beteiligte eines Bauprojektes | 11 |
| 2.2 | Die Rolle der Tragwerksplanung | 12 |
| 2.2.1 | Grundlagen | 12 |
| 2.2.2 | Aufgaben in der Planung | 14 |
| 2.3 | Veränderungen durch den Einsatz computergestützter Berechnungen | 17 |
| 2.4 | Aufbau und Ablauf einer statischen Berechnung | 19 |
| 2.4.1 | Grundlagenermittlung | 19 |
| 2.4.2 | Erstellen eines statischen Modells | 20 |
| 2.4.3 | Berechnung | 21 |
| 2.4.4 | Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse | 22 |
| 3 | Konventionelle Statik-Programme | 25 |
| 3.1 | Wahl eines Herstellers | 25 |
| 3.2 | Aufbau eines Rechenmodells in Dlubal RFEM | 26 |
| 3.3 | Eingabedaten | 27 |
| 3.3.1 | Angaben zu den Bauteilen | 27 |
| 3.3.2 | Angaben zu den Einwirkungen | 29 |
| 3.4 | Berechnung | 31 |
| 3.4.1 | Grundlagen zur Methode der Finiten Elemente | 31 |
| 3.4.2 | Berechnung des Tragwerks in RFEM | 32 |
| 3.5 | Ergebnisse | 32 |
| 3.6 | Dokumentation | 33 |
| 3.7 | Stärken und Schwächen | 34 |
| 4 | Karamba – Grundlagen und Programmbeschreibung | 35 |
| 4.1 | Arbeitsumgebung | 35 |
| 4.2 | Programmieren und Entwerfen mit Grasshopper | 36 |
| 4.3 | Aufbau eines Rechenmodells in Karamba | 38 |
| 4.4 | Eingabedaten | 39 |
| 4.5 | Berechnung und Ergebnisse | 44 |
| 4.6 | Weiteres Vorgehen | 47 |
| 4.6.1 | Optimierung in Karamba | 47 |
| 4.6.2 | Export in ein konventionelles Statik-Programm | 48 |
| 4.7 | Unterschiede zu konventionellen Statik-Programmen | 49 |
| 5 | Projektstudie | 51 |
| 5.1 | Projektbeschreibung und Aufgabenstellung | 51 |
| 5.2 | Vorgangsweise und Workflow | 54 |
| 5.3 | Erzeugen der Geometrie in Rhino und Grasshopper | 56 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.4 | Rechenmodell in Karamba | 59 |
| 5.4.1 | Definition der Querschnitte | 59 |
| 5.4.2 | Definition der Lasten | 63 |
| 5.4.3 | Definition von Auflagern und Stabgelenken | 66 |
| 5.4.4 | Fertigstellung des Modells und Berechnung | 67 |
| 5.5 | Optimierungsprozess | 68 |
| 5.5.1 | Exkurs: Definition und Funktionsweise genetischer Algorithmen | 69 |
| 5.5.2 | Aufbau des Optimierungsprozesses | 71 |
| 5.5.3 | Ergebnisse des Optimierungsprozesses | 75 |
| 5.6 | Export nach RFEM | 77 |
| 5.7 | Weiteres Vorgehen in RFEM | 78 |
| 5.7.1 | Ergebnisse nach Überarbeitung des Modells | 79 |
| 5.7.2 | Dokumentation | 80 |
| 6 | Zusammenfassung und Ausblick | 83 |
| 6.1 | Interpretation der Projektstudie | 83 |
| 6.2 | Ausblick | 83 |

Kapitel 1

Motivation

Die Baukunst verstand sich über viele Jahrhunderte als eine Disziplin, die auf der Basis von Erfahrungen und bewährten Methoden ihr Handwerk ausübte. *Trial and error*, also Probieren und Scheitern, galt lange Zeit als normaler Prozess auf dem Weg zu neuartigen und ausgefallenen Konstruktionen. Mit der Zunahme baumechanischer Erkenntnisse und dem Einsatz der Mathematik kam der Idealisierung physikalischer Modelle immer mehr Bedeutung zu und dies ebnete damit den Weg in Richtung der gegenwärtigen Methode der vollständigen Tragwerkssimulation. Die schnelle und flächendeckende Verbreitung von immer leistungsfähigeren Computern eröffnete in den letzten Jahrzehnten vielfältige Möglichkeiten bei der Berechnung und Optimierung von Tragstrukturen.

Wie auch Preisinger und Heimrath in [13] schreiben, ist eine zum gegenwärtigen Zeitpunkt relativ neuartige und damit unbekanntere Methode auf dem Gebiet der Tragwerksplanung die Verwendung parametrischer Berechnungsmodelle, die es – ähnlich dem früheren Prinzip von *trial and error* – dem Anwender¹ erlauben, eine Vielzahl an Tragwerksvarianten in kurzer Zeit zu analysieren und zu bewerten.

Obwohl sich die Entwicklung und damit die Leistungsfähigkeit derartiger Berechnungsprogramme längst noch nicht im Endstadium befindet, versucht diese Diplomarbeit, einen Einblick in das Potential parametrischer Tragwerksplanung zu geben. Der Aufbau dieses Dokuments gestaltet sich wie folgt:

- Einführung in die Tragwerksplanung und Erläuterung einer statischen Berechnung
- Vorstellung der Fähigkeiten und Komponenten eines konventionellen Statik-Programms
- Vorstellung eines neuartigen, parametrischen Statik-Programms
- Darstellung der Vorteile einer Kombination beider Programme anhand einer Variantenstudie eines realen Projekts

Einführung in die Tragwerksplanung

Der Einstieg in die Thematik findet über die Erläuterung des Ablaufs eines Bauprojektes und seiner Beteiligten statt, bevor diese Arbeit dem Leser die Grundlagen aus dem Berufsbild eines Tragwerksplaners sowie seine Aufgaben im Planungsprozess näherbringt. Nach einem kurzen Abriss zu den Veränderungen in der Tragwerksplanung durch die Digitalisierung folgt die Erläuterung der wesentlichen Arbeitsschritte bei der Durchführung einer statischen Berechnung. Im Zuge dessen beleuchtet diese Diplomarbeit auch die Herangehensweise bei der selbstverständlichen Optimierung einer Tragstruktur im Zuge ihrer statischen Berechnung, die eine wesentliche Aufgabe der Tragwerksplanung darstellt. Gleichzeitig wird damit sichtbar, dass es zur Optimierung

¹Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Diplomarbeit jeweils die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung anderer Geschlechter, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.

eines Gesamtsystems unerlässlich ist, dessen einzelne Parameter und deren Auswirkung auf das Gesamtsystem zu kennen.

Kapitel 2 bildet somit die Grundlage der gesamten weiteren Arbeit und zeigt auf, dass die Parametrisierung eigentlich keine neue Idee in der Tragwerksplanung darstellt, sondern ihrem Wesen entspricht.

Vorstellung eines konventionellen Statik-Programms

Der Inhalt von Kapitel 3 widmet sich sodann der Darlegung des Status quo bei der Berechnung von Tragstrukturen durch die Vorstellung eines konventionellen Statik-Programms. Neben dem Arbeitsablauf bei der Bearbeitung von tragwerksplanerischen Aufgabenstellungen mit derartigen Programmen und den sich dadurch bietenden Möglichkeiten beleuchtet die Arbeit anschließend in Abschnitt 3.7 explizit die Stärken und Schwächen üblicher Statik-Software.

Vorstellung des parametrischen Statik-Programms Karamba

Das an die Vorstellung eines konventionellen Statik-Programms folgende Kapitel 4 präsentiert dem Leser ein relativ junges Werkzeug zur Berechnung in der Tragwerksplanung. Die Statik-Software KARAMBA ermöglicht den Aufbau eines gänzlich parametrischen Berechnungsmodells und die damit einhergehende nahezu unbeschränkte Variabilität bei der Bearbeitung von baustatischen Aufgabenstellungen.

Ähnlich der Vorgangsweise im vorangegangenen Kapitel beschäftigt sich dieser Teil der Arbeit mit den Eigenschaften sowie der Bedienung des vorgestellten Programms und seinen Möglichkeiten bei der Durchführung von statischen Berechnungen. Der Schwerpunkt liegt dabei in der Erarbeitung der deutlichsten Unterschiede zu konventionellen Statik-Programmen, die sich in mancherlei Hinsicht als Abstriche und in anderen Punkten als Alleinstellungsmerkmal und ideale Ergänzung zu diesen Programmen herauskristallisieren.

Projektstudie zum Einsatz parametrischer Rechenmodelle

Abschnitt 4.7, der die Abgrenzung von KARAMBA zu konventionellen Statik-Programmen behandelt, legt den Schluss nahe, die beiden vorgestellten Programme zu kombinieren, um aus beider Möglichkeiten neues Potential zu generieren. Veranschaulicht wird dieses Potential anhand einer konkreten Aufgabenstellung, die eine Variantenstudie zu einem realen Projekt darstellt, mit dem Ziel einer weiteren Optimierung.

Kapitel 5 konzentriert sich dabei auf den Einsatz genetischer Algorithmen zur Optimierung von Tragstrukturen, der durch die Verwendung von KARAMBA möglich ist. Durch die Kombination mit einem konventionellen Statik-Programm lassen sich auch die durch den Einsatz von KARAMBA vorhandenen Abstriche gegenüber derartigen Programmen gut kompensieren.

Kapitel 2

Begriffsdefinition Tragwerksplanung

Die Disziplinen des Bauingenieurwesens umfassen neben dem klassischen Hochbau – also Wohn-, Industrie-, Verwaltungs- und Bürobauten – auch Infrastrukturprojekte (Verkehrsbauwerke, Energie- und Wasserversorgung) und Aufgaben des Grundbaus (Stützbauwerke, Hangsicherungen) sowie des Ressourcenmanagements. In diesen Disziplinen unterscheiden sich wiederum die Tätigkeitsbereiche Planung, Ausführung, (behördliche) Kontrolle und Beratung bzw. gutachterliche Tätigkeiten.

Wie der Name schon verrät, ist die Tragwerksplanung, umgangssprachlich oftmals als „Statik“ bezeichnet, dem Tätigkeitsbereich der Planung zugehörig und – weil diese Disziplin den größten Teil aller Bauprojekte ausmacht – hauptsächlich im Hochbau vertreten. Daher konzentriert sich die vorliegende Diplomarbeit auch auf diese spezielle Disziplin, wobei an dieser Stelle ausdrücklich erwähnt sei, dass der Ansatz der Verwendung von parametrischen Berechnungsmodellen auch in allen anderen Disziplinen des Bauingenieurwesens berechtigt ist.

Zur historischen Entwicklung beziehungsweise zum Ursprung der Tragwerksplanung und ihre Verbindung zur Architektur wird auf eine Diplomarbeit [10] aus dem Jahr 2014 verwiesen, verfasst am selben Institut wie die vorliegende Arbeit.

Den Einstieg in das Thema bildet eine Übersicht über den allgemein üblichen Ablauf eines Bauprojektes mit seinen Beteiligten, bevor diese Arbeit die Aufgaben der Tragwerksplanung intensiver behandelt. Dabei gilt es jedoch zu beachten, dass eine wesentliche Eigenschaft jedes Bauprojekts seine Individualität ist, die nicht nur eine Serienproduktion unmöglich macht, sondern auch die Definition eines „Standard-Bauprojekts“ erschwert. Nichtsdestotrotz wird im Folgenden versucht, dem Leser ein deutliches Bild vom typischen Ablauf und den handelnden Personen bei einem Bauprojekt im Hochbau zu geben.

2.1 Ablauf und Beteiligte eines Bauprojektes

Jedes Bauvorhaben startet mit einer Person (in der Regel der Auftraggeber bzw. Bauherr), die eine Idee (das Bauvorhaben) realisieren möchte. Aufgabe des Planungsteams ist es, die Idee des Auftraggebers nach seinen Bedürfnissen und Wünschen weiterzuentwickeln und eine Ausführung gemäß den behördlichen Vorschriften und dem Stand der Technik entsprechend vorzubereiten. Eine auf diesen Grundlagen aufgebaute Planung ist in weiterer Folge auch Voraussetzung für die Genehmigung eines Projekts. Im Hochbau besteht das Planungsteam – je nach Projektgröße – aus der Architekturplanung (Gestaltung und Funktion), der Tragwerksplanung (Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit bzw. Nutzungssicherheit), der geotechnischen Planung (Gründung bzw. Fundamente), der Kosten- und Terminplanung und einigen Fachplanern (wie etwa Bauphysik, Brandschutz, Haustechnik, usw.). Bei kleineren Projekten können auch Teilbereiche oder sogar alle Aspekte der Planung aus einer Hand bzw. von einer einzigen Stelle durchgeführt werden.

Während die Architekturplanung aus einer eigenen Richtung kommt, versammeln sich die meisten anderen Planungsaufgaben unter dem Dach des Bauingenieurwesens. Allen Planungsleistungen gemeinsam ist jedoch der grundsätzliche Ablauf in mehreren Phasen, die sich durch

deren planerische Genauigkeit und Tiefe unterscheiden. Begrifflich lassen sich diese Phasen demnach in chronologischer Reihenfolge nach Vorentwurf, Entwurf, Einreichung (Genehmigung) und Ausführung unterscheiden.

Die Ausführungsplanung bildet prinzipiell den Abschluss der Planungsleistungen und den Beginn der Bautätigkeit, wobei speziell bei großen Projekten die Ausführungsplanung noch nicht vollständig abgeschlossen sein muss, um mit der Bauausführung beginnen zu können. Bildhaft und übertrieben formuliert muss die Wandfarbe im 30. Stockwerk eines Hochhauses noch nicht endgültig festgelegt sein, um mit dem Bau der Kellergeschoße beginnen zu können.

Die Ausführung der Bauleistung lässt sich wiederum grob in zwei Bereiche einteilen, Rohbau und Ausbau. Ersteren erbringen in der Regel klassische Baufirmen, während hingegen der Ausbau wieder in viele Teilbereiche unterteilt ist und daher von vielen verschiedenen ausführenden Firmen (Elektriker, Installateur, Maler etc.) begleitet wird. Wichtige Teile der Bauleistung, die nach der Durchführung nicht mehr oder nur schwer überprüfbar sind, wie etwa Stahlbeton-Bauteile, die die Tragsicherheit eines Gebäudes gewährleisten, müssen während der Ausführung von einer unabhängigen Stelle kontrolliert werden.

Die Fertigstellung schließlich beschreibt den Abschluss aller Bautätigkeiten und folglich den Abschluss eines Bauvorhabens, das danach in die Nutzung übergeht. Genauso wie bei einem Neubau handelt es sich selbstverständlich auch bei einem Umbau oder einer Sanierung um ein Bauprojekt, das sich jedoch in den oben angeführten Punkten und ihrer Reihenfolge nicht wesentlich unterscheidet.

2.2 Die Rolle der Tragwerksplanung

Im Weiteren wird nun auf die Aufgaben der Tragwerksplanung näher eingegangen und die Relevanz im Zuge der Bearbeitung eines Bauprojektes herausgearbeitet. Dies ist für die darauffolgenden Kapitel von erheblicher Bedeutung und dient somit als Grundlage für die gesamte Arbeit. Indirekt wird in diesem Kapitel auch der Unterschied bzw. die Abgrenzung zwischen Architekturplanung und Tragwerksplanung herausgearbeitet, da beide Planungsleistungen voneinander abhängen.

2.2.1 Grundlagen

Die Aufgaben bzw. Pflichten des Tragwerksplaners sind vom Österreichischen Institut für Bautechnik¹ sehr kompakt in [8] folgendermaßen beschrieben:

Tragwerke sind so zu planen und herzustellen, dass sie eine ausreichende Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit aufweisen, um die Einwirkungen, denen das Bauwerk ausgesetzt ist, aufzunehmen und in den Boden abzutragen.

Dieses Zitat enthält schon die drei Grundprinzipien, nach denen Tragwerksplaner – oft auch „Statiker“ genannt – ihre Bauwerke konzipieren müssen: *Tragfähigkeit, Gebrauchstauglichkeit* und *Dauerhaftigkeit*. Die Planung erfolgt dabei gemäß dem Stand der Technik, der in Normen zusammengefasst ist. Diese Normen dienen der Tragwerksplanung nicht nur als Leitfaden, wie Konstruktionen berechnet werden sollen, sondern auch als rechtliche Grundlagen im Schadensfall. Sie beinhalten unter anderem Angaben zur Kategorisierung von Bauwerken nach ihrer Bedeutung bzw. Wichtigkeit, Richtwerte für unterschiedlichste Einwirkungen, die auf Gebäude wirken können (Eigengewicht, Schnee, Wind, Erdbeben, außergewöhnliche Lasten etc.) und Berechnungshinweise für die verschiedensten Baumaterialien.

¹Österreichisches Institut für Bautechnik (OIB): Vereinigung aller österreichischen Bundesländer zur Zusammenarbeit im Bauwesen

Die zehn wichtigsten Normen für die konstruktive Planung von Bauwerken sind jene der Reihe 199X – die Eurocodes – und bestehen jeweils aus einem Grunddokument und einem nationalen Anwendungsdokument. Die europäische Normungsorganisation CEN² erarbeitet das Grunddokument (in Österreich ÖNORM EN), welches in allen Mitgliedsstaaten gleichermaßen gültig ist, jedoch Bereiche mit nationaler Wahlmöglichkeit freigibt. Nationale Komitees erstellen die nationalen Anwendungsdokumente (in Österreich ÖNORM B), die an die nationalen Verhältnisse angepasste Parameter beinhalten. Die Mitgliedsstaaten der CEN sind aktuell (Stand Frühjahr 2018) [5] alle 28 Mitgliedsstaaten der Europäischen Union, (die ehemalige jugoslawische Republik) Mazedonien, Serbien, Türkei, Island, Norwegen und die Schweiz. Die geschichtliche Entwicklung der Eurocodes sowie rechtliche Rahmenbedingungen und weiterführende Informationen zu diesem Thema finden sich auf der Website [1] des Österreichischen Normungsinstituts. Die Normen der Reihe 199X lauten wie folgt:

- EN 1990 – Grundlagen der Tragwerksplanung
- EN 1991 – Einwirkungen auf Tragwerke
- EN 1992 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbetonbauten
- EN 1993 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahlbauten
- EN 1994 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Stahl-Beton-Verbundbauten
- EN 1995 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten
- EN 1996 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Mauerwerksbauten
- EN 1997 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von in der Geotechnik
- EN 1998 – Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben
- EN 1999 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Aluminiumkonstruktionen

Im üblichen Sprachgebrauch wird allerdings nur auf die letzte Ziffer verwiesen und man spricht beispielsweise an Stelle der EN 1990 vom „Eurocode 0“.

Nun folgt die Erläuterung der drei Grundprinzipien in der Tragwerksplanung. Am offensichtlichsten ist die Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit, die die Bauwerke aufweisen müssen. Das bedeutet, dass das Bauwerk für die vorgesehene und im Vorfeld eindeutig festgelegte Nutzung im Stande sein muss, allen Beanspruchungen, die während der geplanten Nutzungsdauer darauf wirken, sicher und ohne einer Gefährdung von Lebewesen standhalten zu können. Beispielsweise muss ein Gebäude (und dessen Dach) Schneelasten in den Untergrund abtragen können, ohne einzustürzen.

Als zweites Prinzip gilt die ausreichende Gebrauchstauglichkeit eines Bauwerks. Sie soll Nutzungseinschränkungen verhindern, die zwar keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Bauwerks haben, die geplante Nutzung jedoch beeinträchtigen. Die wichtigsten Parameter zur Beurteilung der Gebrauchstauglichkeit sind üblicherweise Verformungen des Tragwerks auf Grund der einwirkenden Lasten. So darf die Decke eines Raumes nicht so weit durchhängen, dass den Nutzern ein Gefühl der Unsicherheit vermittelt wird bzw. die Nutzer des Raumes darüber keine Einschränkung der Nutzung durch die Unebenheit des Fußbodens erfahren.

²frz. Comité Européen de Normalisation

Die Eurocodes sprechen im Zusammenhang mit diesen ersten beiden Grundprinzipien von *Grenzzuständen*. Laut Eurocode 0 [9, S. 24] sind Grenzzustände der Tragfähigkeit jene, die „die Sicherheit von Personen und/oder die Sicherheit des Tragwerks betreffen“.

Hingegen definieren sich Grenzzustände der Gebrauchstauglichkeit laut Eurocode 0 [9, S. 24] dadurch, dass sie „die Funktion des Tragwerks oder eines seiner Teile unter normalen Gebrauchsbedingungen oder das Wohlbefinden der Nutzer oder das Erscheinungsbild des Bauwerks betreffen“.

Das dritte Prinzip fordert eine ausreichende Dauerhaftigkeit der Konstruktion, also eine uneingeschränkte Nutzbarkeit, für den Zeitraum der geplanten Nutzungsdauer. Die geplante Nutzungsdauer wird im Eurocode 0 [9, S. 11] definiert als „Angenommener (sic!) Zeitdauer, innerhalb der ein Tragwerk unter Berücksichtigung vorgesehener Instandhaltungsmaßnahmen für seinen vorgesehenen Zweck genutzt werden soll, ohne dass jedoch eine wesentliche Instandsetzung erforderlich ist.“ Die geplante Nutzungsdauer für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke (für den klassischen Hochbau relevant) ist in dieser Norm mit 50 Jahren festgelegt.

2.2.2 Aufgaben in der Planung

Die Aufgaben des Tragwerksplaners unterscheiden sich nicht nur in Abhängigkeit des Projekts bzw. des Auftrags, sondern auch im Lauf der Bearbeitung eines Projekts anhand der verschiedenen Projektphasen. Die Bundeskammer der ZiviltechnikerInnen als Interessensvertretung aller Tragwerksplaner in Österreich listet auf ihrer Website das „Leistungsmodell Tragwerksplanung“ auf, das die Tätigkeiten von Tragwerksplanern in den verschiedenen Projektphasen eines Bauvorhabens definiert. Dieses Leistungsmodell [6] wurde von Univ.-Prof. Architekt Hans Lechner von der Technischen Universität Graz verfasst und dient in der Folge als Grundlage zur Beschreibung der Aufgaben in der Tragwerksplanung. Abbildung 2.1 zeigt eine Übersicht über die in der Folge behandelten Planungsphasen.

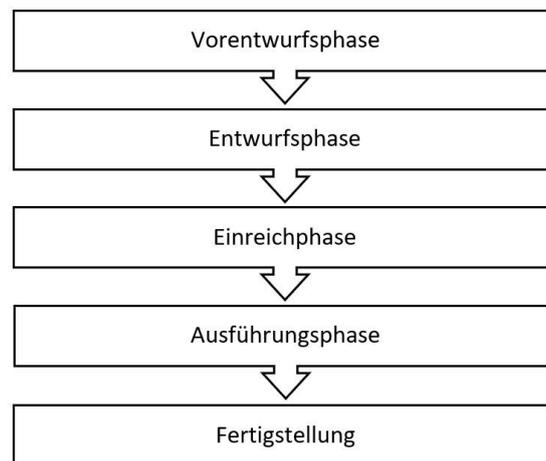


Abb. 2.1: Darstellung der wichtigsten Planungsphasen

Auch wenn sich die nun folgenden Abschnitte im Wesentlichen nur auf die Aufgaben der Tragwerksplanung allein beziehen, darf nicht der Eindruck entstehen, dass sie losgelöst von allen anderen Planungsleistungen geschieht. Eine ständige Abstimmung und Kommunikation zwischen den beteiligten Planern ist während allen Planungsphasen eines Projekts nicht nur empfohlen,

sondern unbedingt notwendig. Eine getrennt gedachte Planung ist immer problematisch. Diesem Umstand wird jedoch üblicherweise durch regelmäßige Planungsbesprechungen und ständigen Informationsaustausch Rechnung getragen.

Vorentwurfsphase

In dieser Projektphase ist die Tragwerksplanung noch hauptsächlich beratend für den Bauherrn bzw. die Architekturplanung tätig. Es erfolgt eine Erarbeitung mehrerer Konzepte für das Tragsystem und damit einhergehend sind auch grobe Aussagen zu Baustoffen, Dimensionen, Konstruktionsraster und Gründungsart möglich. Darüber hinaus wirkt die Tragwerksplanung in dieser Phase üblicherweise auch bei der Kostenschätzung und Terminplanung für ihre Planungsbereiche mit.

Um auch allen anderen Projektbeteiligten eine gute Übersicht über seine getroffenen Annahmen zu geben, ist es in dieser Phase hilfreich, einen sogenannten Lastenplan zu erstellen. Dieser gibt Auskunft über die angesetzten Beanspruchungen des Tragwerks und die zulässigen Nutzlasten aller Flächen.

Entwurfsphase

Im Entwurf steht die Entscheidung für eine der im Vorentwurf ausgearbeiteten Varianten für das Tragwerkskonzept für gewöhnlich schon fest. Diese Leistungsphase bezeichnet somit den Beginn der Ausarbeitung einer Tragwerkslösung inklusive statischer Berechnung der maßgebenden Konstruktionselemente.

Gleichzeitig beginnt spätestens jetzt die Ermittlung aller Beanspruchungen auf das Bauwerk, zusammengefasst unter dem Begriff *Einwirkungen*. Neben dem Eigengewicht des Tragwerks an sich erfolgt nun auch die Berechnung der Lasten, die sich aus dem Ausbau (Fußböden, Fassaden, Dachaufbauten etc.) ergeben. Natürlich müssen auch alle weiteren auf das Bauwerk wirkenden Lasten ermittelt werden, wie etwa Nutzlasten, die sich aus der vorgesehenen Nutzung verschiedener Räume ergeben, und die für den Projektstandort typischen Wind- und Schneelasten auf das Bauwerk.

Des Weiteren ist eine Abklärung des Erdbebenrisikos am Projektstandort und die Definition eventueller weiterer außergewöhnlicher Lasten (beispielsweise Anprall durch Staplerverkehr) erforderlich. Zusätzlich zu den *mechanisch* auf das Tragwerk einwirkenden Kräften muss untersucht werden, inwiefern *physikalische* Beanspruchungen für das Tragwerk von Bedeutung sind. Dies können zum Beispiel Temperaturänderungen, Brandbeanspruchungen oder periodische Belastungen sein.

Neben den Lasten sind im Entwurf auch konstruktive Details, wie etwa spezielle Anforderungen an die Ausführung oder Anschlüsse unterschiedlicher Tragwerksteile, auszuarbeiten und festzulegen. Durch die immer detaillierter werdende Planung ist es nun möglich, erforderliche Materialmengen besser abzuschätzen, was als Grundlage für die Kostenberechnung dient.

Abhängig vom Zeitplan bzw. Zeitdruck eines Projekts kann mit den bisher ermittelten Informationen über das Bauvorhaben bereits mit der Ausschreibung eines Teils des Tragwerks begonnen werden. Unter der Ausschreibung einer Bauleistung versteht man die Auflistung aller notwendigen Baumaßnahmen und den geschätzten zugehörigen Materialmengen (Beton, Stahl, Holz etc.), mit der potentielle ausführende Unternehmen ihre Angebotskalkulation durchführen.

Spätestens zum Abschluss der Entwurfsphase ist es üblich, einen statischen Bericht mit den durchgeführten Untersuchungen und Berechnungen zu erstellen, der dem Auftraggeber (in der Regel der Bauherr) als Leistungsnachweis und anderen Projektpartnern als Auskunftsdokument dient.

Einreichphase

Zweck der Einreichplanung ist es, alle vorhandenen Informationen und Planunterlagen derart weiterzuentwickeln, dass eine Prüfung und in weiterer Folge Genehmigung des Projekts möglich ist. Für die Tragwerksplanung bedeutet dies das Aufstellen einer prüffähigen (nachvollziehbaren) statischen Berechnung für das gesamte Tragwerk. Im Zuge dessen müssen auch Pläne angefertigt werden, in denen alle statisch relevanten Positionen enthalten und die Abmessungen, Art und Güte der Baustoffe genauestens beschrieben sind (Tragwerkspläne). Den prüfenden Organen soll es damit – das notwendige Fachwissen vorausgesetzt – möglich sein, die Ausführbarkeit und Plausibilität des gesamten Bauvorhabens mit den vorhandenen Unterlagen beurteilen zu können.

Je nach behördlichen Vorgaben können unabhängige Prüfengeure erforderlich sein, die die ausgearbeiteten Unterlagen der Tragwerksplanung prüfen und gegebenenfalls Änderungen bzw. Ergänzungen in den Unterlagen verlangen.

Die erstellte statische Berechnung sowie die angefertigten Pläne dienen wiederum als Leistungsnachweis der Tragwerksplanung und detailliertere Auskunft über das Tragwerk.

Ausführungsphase

Die Ausführungsplanung beinhaltet die weitere Verdichtung und detailliertere Ausarbeitung der bis dahin schon vorhandenen Informationen, um eine ausführungsreife Lösung zu erreichen. In diesem Zusammenhang werden beispielsweise für Stahlbetonbauteile Pläne angefertigt, die die genauen späteren Abmessungen der Bauteile und deren Bauweisen definieren sollen (Schalpläne). Für alle Konstruktionen sind außerdem Einbau- und Verlegeanweisungen zeichnerisch darzustellen. Sie ermöglichen es, eine ganz genaue Vorstellung der für die Bautätigkeit notwendigen Arbeiten inklusive der einzelnen Arbeitsschritte zu erhalten.

Im Stahlbetonbau geschieht dies über Bewehrungspläne, aus denen die exakte Menge an einzubauenden Betonstahl hervorgeht (zeichnerisch und als Stückliste). Im Stahl- und Holzbau sind es Konstruktionspläne, die beispielsweise über Montagereihenfolgen und Verbindungsmittel Auskunft geben.

Diese verdichteten Informationen müssen üblicherweise – abhängig von den behördlichen Vorgaben – eine Überprüfung durch eine unabhängige Stelle oder interne Eigenkontrolle durchlaufen. Nach Übermittlung der Unterlagen an die ausführenden Firmen kann sodann die Bautätigkeit beginnen.

Für den Fall, dass die im Abschnitt „Entwurfsphase“ bereits erwähnte Ausschreibung noch nicht erfolgt ist, kann spätestens jetzt nach Vorliegen aller für die Ausführung relevanten Informationen damit begonnen werden.

Wie auch schon in der Entwurfs- und Einreichphase gibt es auch am Ende der Ausführungsphase einen abschließenden Bericht, der auf den früheren aufbaut und oftmals in Verbindung mit allen Plänen der Behörde als Nachweis über die korrekte Ausführung übermittelt werden muss.

Weitere Phasen im Leistungsmodell

Das am Beginn dieses Abschnitts erwähnte Dokument *Leistungsmodell Tragwerksplanung [LM.TW]* führt zusätzlich zu den bereits beschriebenen Phasen vier weitere, kleinere Phasen der Leistungserbringung an. Da diese Phasen für die vorliegende Diplomarbeit jedoch von geringerer Bedeutung sind, erfolgt deren Erläuterung im Anschluss auch weniger umfangreich.

Anschließend an die Ausführungsplanung wird die Mitwirkung bei Ausschreibungen und der anschließenden Vergabe der Bauleistungen angeführt. Dabei übernimmt die Tragwerksplanung eine beratende Tätigkeit gegenüber dem Auftraggeber.

Die nächste Phase beschreibt die Begleitung der Bauausführung. In diese Phase fallen Arbeiten wie Freigabe von Unterlagen der ausführenden Firmen sowie Mitwirkung an der Schlussabnahme des Bauwerkes, die das Ende der Bautätigkeit kennzeichnet.

Der vorletzte Punkt beschreibt die Mitwirkung bei der örtlichen Bauaufsicht. Es ist wichtig zu wissen, dass es sich bei diesem Organ um eine von der Tragwerksplanung unabhängige Stelle handelt. Sie soll die Ausführung im Sinne des Bauherrn gewährleisten und dient im Kontext der Tragwerksplanung zur Überprüfung der ausführenden Firmen auf plangemäße Ausführung.

Den Abschluss dieser Leistungsbeschreibung bildet die Objektbetreuung, die als von der tatsächlichen Bautätigkeit losgelöst betrachtet werden kann. In [6] sind hierzu beispielsweise die Feststellung und Überwachung von die Standsicherheit betreffenden Einflüssen genannt, also Untersuchungen am Bestandstragwerk.

2.3 Veränderungen durch den Einsatz computergestützter Berechnungen

Wie auch in allen anderen Bereichen unseres täglichen Lebens ist selbstverständlich auch in der Tragwerksplanung die Digitalisierung und der Einsatz von Computern zur Normalität geworden. Während in früheren Zeiten sämtliche Berechnungen – also tatsächlich die gesamte statische Berechnung – per Hand erfolgten, geschieht das mittlerweile nur mehr für überschlägige Vorbemessungen. Der Übergang von der gänzlich händischen Bearbeitung hin zur modernen Statik-Software, mit deren Hilfe ganze Tragwerke unabhängig von ihrer Größe modelliert, alle möglichen Einwirkungen gleichzeitig berechnet und die Ergebnisse anschaulich präsentiert werden können, fand selbstverständlich über einen langen Zeitraum statt.

Die Kunst der Tragwerksplanung besteht aber seit jeher darin, komplexe Tragwerke auf einfache und damit berechenbare kleinere Strukturen zu reduzieren. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die Ergebnisse der in ihrer Komplexität reduzierten kleineren Strukturen für das Gesamttragwerk repräsentativ sind. Das war auch die einzige Möglichkeit der Tragwerksberechnung in früheren Zeiten. Es wurde soweit als möglich abstrahiert, um eine ausgewogene Balance zwischen (manuellem) Rechenaufwand und ausreichender Rechengenauigkeit zu erzielen.

Somit blieb den Ingenieuren über Jahrhunderte lang gar keine andere Wahl, als über Vereinfachungen in der Berechnung nachzudenken und sehr ausgefeilte Berechnungsmethoden zu entwickeln. Aber trotzdem eignete sich die EDV natürlich von Anfang an ganz besonders für den Einsatz in der Tragwerksplanung, auch wenn es – wie so oft, wenn der Mensch mit Veränderungen konfrontiert ist – nicht an Skeptikern mangelte.

Zu Beginn war der Einsatz der EDV in der Tragwerksplanung beschränkt auf einzelne Teile des Tragwerks, die elektronisch berechnet werden konnten und so etwas wie „Standard-Bauteile“ darstellten. So erfolgte die Berechnung eines flächigen Bauteils wie etwa einer Geschoßdecke nicht in seiner Gesamtheit, sondern beispielsweise als schmaler Streifen mit der Breite von einem Meter. Dies war die logische Entwicklung, die nahezu gleichzeitig in der gesamten Gesellschaft passierte, nämlich Schritt für Schritt manuelle Tätigkeiten durch den Einsatz von Computern zu digitalisieren. Selbstverständlich war es auch dem Umstand geschuldet, dass die Rechenleistung der ersten Generationen von Computern zu gering war, um ganze Tragwerke zu berechnen. Es galt dabei auch immer abzuwägen, ob der Arbeitsaufwand für das Programmieren eines Rechenprogramms für eine einzige Verwendung (zum Beispiel ein Sonderbauteil) überhaupt in Relation zum Nutzen der EDV-Berechnung stand, nämlich der Zeitersparnis.

Mittlerweile ist es üblich und auch mit vertretbarem Rechenaufwand möglich, alle Teile eines Tragwerks, und seien es Wolkenkratzer, in einem konventionellen Statik-Programm zu modellieren, also geometrisch und mit deren physikalischen Eigenschaften ausgestattet zu erfassen. Die zugehörige Vorgehensweise wird anschließend in Abschnitt 3.2 erläutert. Neben der ganzheitlichen Betrachtung des Tragwerks hat die enorme Verbesserung der Rechenleistung in den letzten Jahren auch noch weitere Vorteile mit sich gebracht. So können Vorgänge im Tragwerk bzw. in

den Baustoffen, die früher vielleicht bekannt, aber nicht berechenbar waren, heutzutage ebenfalls in die statische Berechnung mit einfließen und müssen nicht mehr über Sicherheitsaufschläge oder Erfahrungswerte berücksichtigt werden. Als Beispiel sind hier etwa die natürliche Rissbildung im Beton und ihre Auswirkungen auf das Tragwerk, die anhaltende Verformung von Beton und Holz unter konstanter Last (das sogenannte „Kriechen“) oder das Verhalten von Holz unter wechselnden Klimaverhältnissen anzuführen.

Zugegebenermaßen werden sich die bislang beschriebenen Vorteile vermutlich dem Großteil der Menschheit nicht erschließen oder ihm gleichgültig sein – nämlich praktisch jedem, der nicht den Beruf des Tragwerksplaners ausübt oder kein überdurchschnittliches Interesse an diesem hegt. Mit der Steigerung der technischen Möglichkeiten in der Tragwerksplanung ging allerdings auch eine Entwicklung in der Architektur einher, deren Auswirkungen auf die Baukultur für die gesamte Gesellschaft von Bedeutung sind. Die bereits angeführte notwendige Vereinfachung von Tragsystemen hat die Optik von Bauwerken über Jahrzehnte hinweg, speziell ab den 1960er Jahren, durch regelmäßige Grundrisse und typische Konstruktionsraster dominiert.

Die neuen Möglichkeiten in der Tragwerksplanung (und selbstverständlich auch in der Architektur) haben den Weg frei gemacht für ausgefallene Formen und Strukturen, die jeglicher Regelmäßigkeit oder einer Reduktion auf Konstruktionsraster entbehren. Waren derartige Strukturen früher schon geometrisch und darstellerisch (zweidimensional) schwer erfassbar, eine statische Berechnung dieser Systeme hätte jeder seriöse Tragwerksplaner ohnehin abgelehnt, da der Rechenaufwand mit den vorhandenen Methoden nicht zu bewerkstelligen war.

Ein sehr gutes Beispiel für komplexe Aufgaben, wie die oben beschriebenen, sind die vier neuen Stationen der Hungerburgbahn in Innsbruck. Sie wurden vom Architekturbüro *Zaha Hadid Architects* aus London entworfen und das Projekt 2007 fertiggestellt. Die Tragwerksplanung für die neuen Stationen übernahmen *Bollinger+Grohmann Ingenieure*. Abbildung 2.2 zeigt die Station Hungerburg der neuen Hungerburgbahn.



Abb. 2.2: Station Hungerburg der neuen Hungerburgbahn [Bollinger+Grohmann Ingenieure, Matthias Witte]

Zum Abschluss dieses Abschnitts muss an dieser Stelle allerdings ebenfalls angemerkt werden, dass jene umfangreichen Möglichkeiten, die sich durch die computergestützte Berechnung eröffnen, auch ein gewisses Gefahrenpotential bzw. potentielle Fehlerquellen darstellen. Das Programm berechnet natürlich nur die vom Benutzer vorgegebenen Informationen und nach den von ihm getroffenen Einstellungen. Die Rahmenbedingungen und Detailinstellungen des zu berechnenden Problems müssen also genauestens und mit Bedacht festgelegt und die Ergebnisse im Nachhinein auf Plausibilität überprüft werden. Die von unerfahrenen Nutzern oftmals getroffene Annahme,

dass durch die Verwendung derartiger Statik-Programme der Computer die gesamte Arbeit übernimmt, endet nahezu immer in der lehrreichen Erfahrung, dass der Computer alleine (derzeit noch) gar nichts kann.

2.4 Aufbau und Ablauf einer statischen Berechnung

In ihrem weiteren Verlauf vergleicht diese Arbeit zwei unterschiedliche Statik-Programme und arbeitet im Anschluss daran deren Vorzüge gegenüber dem jeweils anderen heraus. Daher ist es im Vorfeld von elementarer Bedeutung, den Inhalt einer statischen Berechnung genau so wie die übliche Vorgehensweise beim Aufstellen derselben zu verstehen. Dazu wird im Folgenden auf die wesentlichen Punkte und Arbeitsschritte näher eingegangen. Der Fokus liegt dabei jedoch weniger auf den verschiedenen Planungsphasen, wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, sondern mehr auf den notwendigen Informationen, die für das Erstellen einer statischen Berechnung erforderlich sind. Die Angaben sind somit auch unabhängig davon, ob eine statische Berechnung per Hand oder mit Hilfe eines Statik-Programms erfolgt.

2.4.1 Grundlagenermittlung

Zu Beginn einer statischen Berechnung ist es erforderlich, alle notwendigen Informationen verfügbar zu haben, die für die weitere Bearbeitung benötigt werden. Dazu zählen etwa projektspezifische Informationen wie die globalen Abmessungen des zu berechnenden Tragwerks bzw. die Planungsunterlagen der Architektur. Das Wesen einer statischen Berechnung liegt in den Nachweisen, die einer definierten Einwirkung (Belastung) einen vorhandenen Widerstand gegenüberstellen. Und zwar soll der Widerstand einer Konstruktion gerade so groß gewählt sein, dass sie allen einwirkenden Kräften standhält, ohne unnötiges Material zu verschwenden. In welcher Reihenfolge im Zuge der Grundlagenermittlung die Bestimmung der Einwirkungen und Widerstände geschieht, ist nicht von Bedeutung und hat natürlich auch keinen Einfluss auf das Ergebnis.

Dieses Beispiel beginnt mit der Ermittlung der Widerstände. Es muss also festgelegt werden, welche Materialien für die unterschiedlichen Bauteile vorgesehen sind und in welcher Güte³. Vorweg sei hier schon angemerkt, dass im Sinne der Wirtschaftlichkeit einer Konstruktion praktisch immer von mehreren iterativen Berechnungsschritten ausgegangen werden kann. Das bedeutet demnach, dass die eingangs gewählten Parameter (wie zum Beispiel Material und Materialgüte) bei einer neuerlichen Iteration natürlich einer Änderung unterliegen können. Eine realistische Abschätzung zu Beginn erspart jedoch unnötigen Arbeitsaufwand im Zuge der Berechnung.

Stehen die globalen Abmessungen und das Material inklusive Materialgüte einmal fest, erfolgt die Auswahl der Querschnitte, also die Abmessungen der einzelnen Bauteile wie Stützen, Träger, Wandstärken und dergleichen. Alle bisher getroffenen Annahmen repräsentieren sodann den widerstehenden Teil des Tragwerks.

Als zweiter elementarer Punkt der Grundlagenermittlung müssen nun die Belastungen ermittelt werden. Einen groben Überblick vermittelte bereits Abschnitt 2.2.2. Projektspezifisch können die auftretenden Lasten sehr stark variieren. Daher können weder allgemeingültige Aussagen getroffen werden, welche Lasten anzusetzen sind, noch kann der Anspruch der Vollständigkeit gestellt werden. Praktisch immer zu berücksichtigen sind jedoch das Eigengewicht des gesamten Bauwerks (im fertigen Zustand), die Nutzlasten der verschiedenen Räume (für einen Raum, der als Schlafzimmer genutzt wird, ist eine andere Belastung vorgesehen als für einen Konzertsaal)

³Die Materialgüte definiert sich über die zulässige Beanspruchung (Festigkeit) eines Elements bei gleichbleibendem Querschnitt. So kann etwa eine Betonstütze bei gleichbleibenden Abmessungen durch die Auswahl einer höheren Betongüte höhere Lasten ableiten, als das mit einer niedrigeren Betongüte der Fall wäre.

und die Beanspruchung des Tragwerks durch Wind. Weitere typische Lasten sind Schneelasten, Erdbebenbeanspruchungen und allenfalls außergewöhnliche Belastungen, wie etwa Anprall durch Fahrzeugverkehr. Hierzu bietet sich der Eurocode 1 als Hilfestellung an, welche Lasten zu berücksichtigen und wie diese zu ermitteln sind.

Die soeben aufgezählten Einwirkungen zählen üblicherweise zu den statisch wirkenden. Das heißt, sie verändern ihre Größe über die Zeit nicht. Für zeitlich und in ihrer Größe veränderliche Einwirkungen, als Beispiel sei an dieser Stelle die Beanspruchung aus Windkräften genannt, wird dann nur der maximal auftretende Wert in Rechnung gestellt. Für manche Bauwerke bzw. Teile davon kann es jedoch erforderlich sein, dynamische Belastungen zu definieren und deren Auswirkungen auf das Tragwerk zu untersuchen. Eine etwas genauere Erläuterung dieses Themas erfolgt später in Abschnitt 2.4.3.

Die Erstellung und Aktualisierung eines statischen Berichts sollte bereits von Beginn an während der Erarbeitung dieser Grundlagen laufend passieren, da diese Informationen grundlegender Bestandteil einer statischen Berechnung sind.

2.4.2 Erstellen eines statischen Modells

Im nächsten Schritt wird das statische System mit seinen statischen Randbedingungen definiert. Neben der Abstrahierung der architektonischen Struktur auf ein statisches Modell (vgl. Abschnitt 2.3) sind auch die kinematischen Eigenschaften des Modells zu bestimmen. Gemeint sind damit Bedingungen, die das Verhältnis der einzelnen Bauteile eines Modells zueinander (sogenannte Gelenksdefinitionen) bzw. des gesamten Modells mit der Umgebung (sogenannte Auflagerbedingungen) beschreiben. Es ist etwa aus statischer Sicht ein Unterschied, ob die Fixierung einer Stahlstütze durch Einbetonieren des Stützenfußes oder durch Verschrauben des Fußes mit einer Betonplatte geschieht. Diese Informationen sind für das statische Modell von wesentlicher Bedeutung, da die einbetonierte Stütze eine größere Belastung ertragen können wird, als jene, die nur durch ein paar Schrauben gesichert ist.

Bei der Erstellung eines statischen Modells werden nur statisch relevante Bauteile berücksichtigt. Das sind etwa tragende Wände, Stützen und Geschoßdecken – mehr oder weniger das „Skelett“ eines Bauwerks. Nichttragende Bauteile wie dünne Zwischenwände aus Mauerwerk oder Gipskarton sind darin nicht enthalten.

Der Vollständigkeit halber sei hierzu angemerkt, dass – wie auch die Widerstände und Einwirkungen – auch das statische Modell im Verlauf der statischen Berechnung noch angepasst werden kann. Jedoch ändern sich dadurch die Rahmenbedingungen des Projekts, die üblicherweise keine sehr flexiblen Parameter sind, weshalb eine Anpassung der Widerstände zu empfehlen ist.

Das weitere Vorgehen beschreibt nun das Aufbringen der Lasten auf das vorhandene statische Modell. Der Eurocode 0 empfiehlt zu diesem Punkt die Berücksichtigung verschiedener sogenannter „Lastkombinationen“. Die Begriffe *Tragfähigkeit* und *Gebrauchstauglichkeit* wurden bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert und kommen auch hier wieder zur Anwendung. Im Eurocode finden sich für diese beiden Begriffe verschiedene Lastkombinationen, die in unterschiedlichen statischen Nachweisen ihre Verwendung finden. Sowohl für die Grenzzustände der Tragfähigkeit als auch für jene der Gebrauchstauglichkeit listet der Eurocode 0 jeweils drei verschiedene Lastkombinationen auf. Die Kombinationen unterscheiden sich dabei durch das Verwenden unterschiedlicher Kombinations- und Teilsicherheitsbeiwerte. Kombinationsbeiwerte sind Faktoren, mit denen die Einwirkungen multipliziert werden. Sie berücksichtigen, dass mehrere verschiedene Einwirkungen zwar gleichzeitig wirken können, nicht jede jedoch in ihrer vollen Größe. Teilsicherheitsbeiwerte sind – wie aus dem Namen bereits erkennbar – Sicherheitsfaktoren und prinzipiell nur bei Nachweisen im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzuwenden. Außerdem gilt es, Teilsicherheitsbeiwerte für die Widerstände und jene für Einwirkungen zu unterscheiden. Durch Multiplikation bzw.

Division der Ausgangswerte erhält man aus den *charakteristischen Werten* die *Bemessungswerte*. Teilsicherheitsbeiwerte sollen statistische Abweichungen der angesetzten charakteristischen Werte erfassen und erhöhen damit die Sicherheit. Salopp formuliert führt dies zu einer Berechnung mit verringerten Widerständen und erhöhten Einwirkungen.

Ein Beispiel einer solchen Lastkombination ist in Formel (2.1) gegeben. Sie ist die wichtigste Lastkombination für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und enthält dadurch sowohl Kombinationsbeiwerte ψ als auch Teilsicherheitsbeiwerte γ .

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (2.1)$$

Formel (2.1) ist dem Eurocode 0 [9, S. 37] entnommen und beschreibt die Lastkombination für „ständige oder vorübergehende Bemessungssituationen“. Der Buchstabe G bezeichnet dabei alle ständigen Lasten, P eine allfällige Beanspruchung durch Vorspannung⁴ eines Betonbauteils und Q alle veränderlichen Lasten auf das Tragwerk.

Gemeinsam ist all diesen unterschiedlichen Kategorien von Lastkombinationen die Abbildung aller möglichen Beanspruchungen des Tragwerks. Für die Bemessung des statischen Modells – also das Führen der Nachweise mit den größten Beanspruchungen – sind in weiterer Folge die *maßgebenden* Lastkombinationen zu ermitteln. Diese lassen sich teilweise mit Erfahrung und im Zweifelsfall durch Berechnung aller Kombinationen und den Vergleich der Ergebnisse erkennen.

2.4.3 Berechnung

Ist das statische Modell vollständig erstellt, sind also auch sämtliche Lasten und Lastkombinationen sowie die Widerstände definiert, kann mit der Berechnung begonnen werden. Das Ergebnis dieser baustatischen Berechnung ist dabei die Beanspruchung des Tragwerks, also die Kräfte in den Bauteilen. Diese werden auch „Schnittgrößen“ genannt, weil sie „frei werden“, wenn man durch ein Bauteil gedanklich „durchschneidet“. Beispielsweise wird bei einer vertikalen Stütze die maßgebende Schnittgröße üblicherweise die vertikale Kraft in Richtung der Stützenachse sein und nicht eine innere Kraftgröße normal auf die Stützenachse.

Diese Schnittgrößen sind in weiterer Folge die Grundlage für das Führen der statisch erforderlichen Nachweise. Dazu ist es natürlich wichtig, zu wissen, welche Nachweise im Zuge der statischen Berechnung zu führen sind. Neben den „standardmäßigen“ Nachweisen, ob die Materialfestigkeit eines Bauteils größer ist als die Beanspruchung, gibt es noch zahlreiche weitere Nachweise, die möglicherweise zusätzlich erforderlich sind, abhängig von den Eigenschaften des Bauteils.

So sind etwa Nachweise der Tragfähigkeit für den Brandfall bei Betonbauteilen in der Regel nicht notwendig, solange bestimmte Bauteilstärken eingehalten sind, während der „Lastfall Brand“ bei Bauteilen aus Holz durchaus das entscheidende Kriterium darstellen kann. Genauso sind bei schlanken, hohen Bauteilen (zum Beispiel Stützen) andere Nachweise zu führen (sogenannte Stabilitätsnachweise gegen Ausknicken schlanker Bauteile) als das bei Wänden der Fall ist, unabhängig vom eingesetzten Material.

Ein weiterer, wichtiger Punkt, den es zu berücksichtigen gilt, sind dynamische Wirkungen, die bereits kurz angeschnitten wurden. Untersuchungen bzw. Nachweise von dynamischen Einwirkungen sowie dynamischen Antworten des Bauwerks wurden erst durch den bereits diskutierten Einsatz EDV-gestützter Berechnungen in der Tragwerksplanung in größerem Umfang möglich.

Dabei gibt es zwei wesentliche Unterschiede dynamischer Beanspruchungen, die zu unterscheiden sind: wiederkehrende Lastzyklen, auch Ermüdungsbeanspruchung genannt, und dynamische

⁴Vorspannung bedeutet das Aufbringen einer „negativen Beanspruchung“ während der Bauausführung, die der Beanspruchung des Bauteils unter normalen Gebrauchslasten entgegenwirkt.

Anregungen von Bauteilen, die dadurch zu schwingen beginnen und dabei Schädigungen erfahren können.

Ersteres sind Einflüsse, die das Tragwerk durch wiederkehrende Lastzyklen schädigen und zwar nicht primär auf Grund der Lastgröße (wie das bei statischen Nachweisen der Fall ist), sondern wegen der häufigen Be- und Entlastung des Bauteils. Es wird also die Auswirkung auf das Tragwerk untersucht, wenn eine bestimmte Lastgröße tausende Male einwirkt. Das klassische Beispiel für derartige Einwirkungen sind Brücken. Es ist klarerweise nicht ausreichend, dass sie der üblichen Verkehrslast (also der möglichen Anzahl an gleichzeitig vorhandenen Fahrzeugen auf der Brücke) nur einmal standhalten. Durch die zyklische Belastung der einzelnen Brückenabschnitte bei Überfahrt eines Fahrzeuges mit der darauffolgenden Entlastung, und das mehrere hundert oder tausend Male pro Tag, kann es über einen langen Zeitraum zu einer Schädigung der Brücke kommen. Im Hochbau, auf dem ja das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt, kommen Ermüdungsbeanspruchungen jedoch eher selten vor. Meistens in Kombination mit Maschinen, klassischerweise bei Portalkränen in Maschinenhallen.

Der zweite Punkt ist etwas komplizierter und auch schwieriger vorstellbar. Allgemein lässt sich das Problem durch das Vorhandensein einer dynamischen Anregung und dem Fehlen einer ausreichenden Dämpfung beschreiben. Die Folge können für die Nutzer des Tragwerks unangenehm empfundene Schwingungen oder die Schädigung spröder Bauteile sein, die die Schwingungen nicht mitmachen können (zum Beispiel bei Beton). Am häufigsten sind dynamische Anregungen durch Wind, Erdbeben oder Bewegungen von Menschen verursacht. Beispiele dafür sind etwa das „Schaukeln“ einer Werbetafel im Wind, das Schwanken eines Gebäudes bei einem Erdbeben sowie Schwingungen, die von tanzenden Menschen auf das Bauwerk übertragen werden (Tanzsäle, Tribünen). Die Auswirkungen dieser dynamischen Anregungen werden einerseits durch die *Erregerfrequenz* der Einwirkung (Wind, Erdbeben, Tanz etc.) und andererseits durch die *Eigenfrequenz* des Bauteils bestimmt. Letztere beschreibt dabei jene Schwingung, mit der ein Bauteil dauernd (jedoch nicht wahrnehmbar für Menschen) schwingt. Kommt es zur Resonanz beider Schwingungen, also einer ungünstigen Überlagerung der beiden Frequenzen, so steigt die Amplitude (der Schwingungsausschlag) theoretisch ins Unendliche an.

Aus der Beschreibung dieser dynamischen Beanspruchungen lässt sich auch erkennen, warum die früher gebräuchlichere Bezeichnung „Statik“ bzw. „Statiker“ mehr und mehr von den Begriffen „Tragwerksplanung“ bzw. „Tragwerksplaner“ abgelöst wird, weil eine rein statische Betrachtung von Bauwerken mittlerweile nicht mehr dem Stand der Technik entspricht.

2.4.4 Auswertung und Dokumentation der Ergebnisse

Am Ende der Berechnung ist bekannt, ob alle erforderlichen Nachweise erfüllt sind oder eine Veränderung des statischen Modells notwendig ist. Erfüllt ist ein Nachweis dann, wenn die *Ausnutzung* des Bauteils kleiner oder gleich 100 % ist. Ist die Einwirkung also beispielsweise nur halb so groß wie der Widerstand des Bauteils, so beträgt seine Ausnutzung 50 % oder 0,5. Sollte es Positionen geben, wo die Einwirkung größer als der Widerstand ist, wird im Allgemeinen der Widerstand erhöht. Das bedeutet, Querschnitte und/oder Materialgüten zu erhöhen oder zusätzliche Bauteile einzufügen. In manchen Fällen kann es auch sinnvoll sein, das statische System zu hinterfragen, da im Zuge seiner Erstellung zahlreiche Annahmen des bearbeitenden Ingenieurs eingeflossen sind. In jedem Fall sind anschließend mit den geänderten Rahmenbedingungen alle notwendigen Nachweise erneut zu führen, bis im gesamten Modell der Widerstand größer ist als die Einwirkung.

Selbstverständlich kann auch der gegensätzliche Fall auftreten, dass ein Widerstand viel zu hoch angesetzt wurde. Im Sinne einer wirtschaftlichen und damit sparsamen Konstruktion wird

es also angebracht sein, den Widerstand soweit zu verkleinern, dass er gerade noch größer ist als die maßgebende Einwirkung.

Daran kann man bereits sehr gut erkennen, was unter den am Anfang dieses Abschnitts erwähnten Iterationen verstanden wird. Aufgabe der Tragwerksplanung ist es also, eine Konstruktion zu entwerfen, die so wirtschaftlich wie möglich und so sicher wie gefordert ist.

Den Abschluss jeder statischen Berechnung bildet die Dokumentation und Aufbereitung der Ergebnisse. Es genügt hierbei nicht, dass nur der bearbeitende Tragwerksplaner weiß, welche Annahmen getroffen und welche Berechnungen durchgeführt wurden. Es muss auch für außenstehende Personen mit ausreichendem Fachwissen möglich sein, die gesamte Berechnung nachzuvollziehen und prüfen zu können. Wie bereits in Abschnitt 2.4.1 angeführt, sollte der Bericht zur statischen Berechnung im Zuge der Bearbeitung kontinuierlich erweitert werden. Spätestens nach Abschluss aller Berechnungen ist es jedenfalls üblich und gegebenenfalls auch gefordert, einen Bericht zu verfassen, der dem Auftraggeber als Leistungsnachweis und anderen Projektpartnern sowie für zukünftige Untersuchungen am Objekt als Grundlage dient.

Kapitel 3

Konventionelle Statik-Programme

Der vorangegangene Abschnitt 2.4 behandelte bereits die wesentlichen Schritte bei der Erstellung einer statischen Berechnung. Dabei wurde auch ausdrücklich erwähnt, dass der beschriebene Leitfaden allgemeine Gültigkeit besitzt und unabhängig von der technischen Bearbeitung (per Hand oder mittels Statik-Software) ist. Das vorliegende Kapitel vermittelt nun die Grundlagen, wie konventionelle Statik-Software aufgebaut ist, wie die Bedienung derartiger Programme sowie die Berechnung erfolgt, welche Informationen in das Programm eingegeben werden müssen und welche Ergebnisse erhalten werden. Die Erläuterung konventioneller Statik-Software ist dann im Weiteren die Grundlage für den Inhalt von Kapitel 4, das einen gänzlich anderen Typ von Berechnungssoftware behandelt und die Unterschiede aufzeigt.

3.1 Wahl eines Herstellers

Die Vorstellung der Funktionen und des Wesens konventioneller Statik-Software passiert beispielhaft anhand des Programms „Dlubal RFEM“ (Version 5.11). Die Entscheidung für genau diese Software fiel auf Grund der Tatsache, dass der Autor neben anderen Statikprogrammen am meisten Praxiserfahrung im Umgang mit dieser Software besitzt. Einerseits wird sie neben anderer Software an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Universität Wien zu Lehrzwecken eingesetzt und andererseits vom Autor im beruflichen Alltag regelmäßig verwendet.

Die Entscheidung für einen bestimmten Hersteller und dessen Software hängt im Großen und Ganzen von den gewünschten Programmfunktionen, der Implementierung von Baunormen und – im Berufsalltag nicht unwesentlich – von der Support-Qualität ab. Dadurch ist es auch verständlich, dass in verschiedenen Regionen der Erde unterschiedliche Programme zum Einsatz kommen und es keinen weltweiten Marktführer gibt, wie das etwa bei Office-Lösungen der Fall ist.

Programme mit ähnlichem Leistungsumfang, wie jener des oben genannten, sind im deutschsprachigen Raum beispielsweise „SCIA Engineer“ oder „SOFiSTiK“. Auch diese Programme bieten die Möglichkeit, Tragwerke in ihrer Gesamtheit modellieren und berechnen zu können. Neben derartig umfassender Software für verschiedenste Bereiche der Tragwerksplanung gibt es auch noch unzählige weitere kleine Statik-Programme, die nicht den Anspruch auf Modellierung ganzer Gebäude bzw. Tragwerke stellen, sondern zum Beispiel auf die Bemessung einzelner Tragwerksteile spezialisiert sind. Da es allerdings nicht Ziel dieser Diplomarbeit ist, eine umfassende Auflistung von am Markt vorhandener Statik-Software zu bieten, wird auf eine intensive Recherche in diesem Zusammenhang verzichtet und der Fokus auf die Erstellung einer statischen Berechnung gelegt.

Die folgenden Abschnitte erklären nun den *manuellen* Aufbau eines Rechenmodells in Dlubal RFEM (im weiteren Text kurz RFEM genannt). Im Zusammenhang mit BIM¹ sei erwähnt, dass

¹BIM = Building Information Modeling (dt. Gebäudedatenmodellierung) bezeichnet eine digitale Planungsweise im Bauwesen, bei der alle das Bauwerk betreffenden Informationen in der Planung, Ausführung und Instandhaltung in einem zentralen Modell zusammenfließen und von allen Projektpartnern gepflegt und genutzt werden.

es selbstverständlich auch möglich ist, bereits vorhandene Geometrien mittels verschiedener Dateiformate in RFEM zu importieren. Da hierfür jedoch bereits einiges an Wissen im Umgang mit dem Programm erforderlich ist und der Aufbau des Modells mittels anderer Software geschieht, ist diese Möglichkeit der Modellerstellung für die Erläuterung der Funktionen in RFEM weniger geeignet.

3.2 Aufbau eines Rechenmodells in Dlubal RFEM

Die kleinste geometrische Einheit des statischen Modells ist ein Punkt oder Knoten. Punkte lassen sich miteinander durch Linien verbinden, die ihrerseits wiederum als Begrenzungslinien für Flächen dienen oder – mit Querschnittsinformationen ausgestattet – zu Stäben umgewandelt werden können. Die Platzierung der Punkte in der Zeichenebene erfolgt entweder manuell durch Mausclick oder durch direkte Koordinateneingabe. Da RFEM eine dreidimensionale Arbeitsumgebung besitzt, definiert sich ein Punkt folglich über seine x-, y- und z-Koordinate.

Bei der Erstellung des Modells erfolgt eine Unterscheidung zwischen flächigen und stabförmigen Bauteilen, aus diesen zwei Typen wird anschließend das gesamte Modell aufgebaut. Flächige Bauteile sind beispielsweise Wände oder Decken, während Stützen oder Balken Beispiele für stabförmige Bauteile darstellen. Die Modellierung von (unregelmäßigen) Volumenkörpern und die Veränderungen des Volumens unter Beanspruchung ist für das Bauwesen nicht relevant und wird daher an dieser Stelle nicht angeführt.

Grundsätzlich denken Tragwerksplaner bei der Konstruktion ihrer statischen Modelle nur in Schwerachsen. Das bedeutet etwa, dass Stützen nur über deren Mittellinie und Decken nur über deren Mittelebene definiert sind. Der Grund dafür liegt in der in Abschnitt 2.4.1 erläuterten iterativen Berechnungsweise mit allfälligen Änderungen im Zuge der Bemessung. Dadurch können sich beispielsweise die Außenabmessungen von Stützen im Laufe der Berechnung ändern, die Stützenachse (und damit das statische Modell als Ganzes) bleibt allerdings unverändert.

Es ist jedoch auch möglich, den Konstruktionsprozess über Bearbeitungsfunktionen erheblich zu beschleunigen. So können alle Elemente in RFEM nachträglich kopiert, verschoben, gespiegelt, unterteilt und skaliert werden – und das natürlich bei mehreren Elementen gleichzeitig. Bei einem mehrgeschoßigen Gebäude mit regelmäßigem Grundriss erfolgt die Konstruktion daher in der Regel nicht für jedes Geschoß separat. Die Bearbeitungsfunktionen erlauben die Konstruktion des Erdgeschoßes und anschließend dessen Kopie um die gewünschte Anzahl an Geschoßen „nach oben“ – gegebenenfalls mit geringfügigen Anpassungen.

Für die spätere Berechnung ist es wichtig, dass alle Bauteile, die in Wirklichkeit „übereinander“ platziert sind (zum Beispiel eine Stütze steht auf der Decke), im statischen Modell tatsächlich miteinander verbunden sind. Jener Knoten also, der den Fußpunkt der Stütze definiert, muss exakt in der Fläche (also die Mittelebene (!) der Decke) liegen, auf der die Stütze steht. Dies gilt es während der Konstruktion zu beachten. Sobald auch nur ein Millimeter Abstand zwischen Knoten und Fläche vorhanden ist, erkennt das Programm keine Verbindung und die Stütze hängt in der Luft, was meist zu einer Fehlermeldung bei der Berechnung, aber jedenfalls zu falschen Ergebnissen führt.

Das architektonische Modell eines Bauwerks erfährt in der Tragwerksplanung eine starke Abstrahierung. So werden etwa auch kleine Öffnungen in Decken und Wänden (kleine Fenster oder Deckendurchbrüche für Steigleitungen) in der Regel nicht im statischen Modell berücksichtigt.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass beim Aufbau eines Rechenmodells in RFEM die Konstruktion aller Bauteile direkt über die Programmoberfläche abläuft. Die folgenden Abschnitte dienen der detaillierten Erläuterung, wie dies für ein Modell in RFEM geschehen kann.

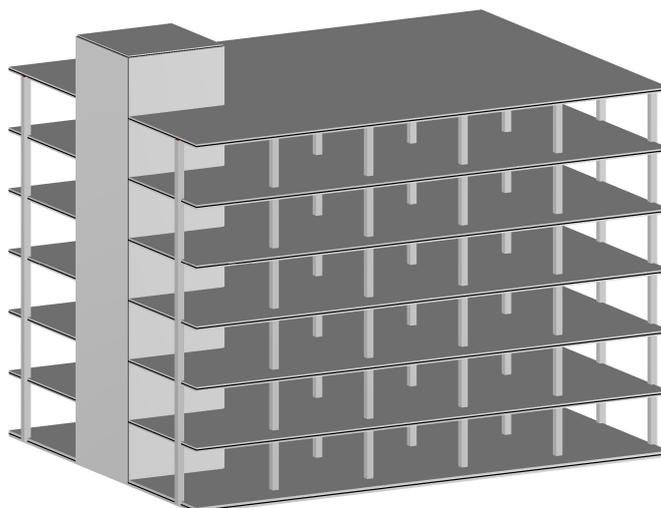


Abb. 3.1: Tragwerksübersicht des fiktiven Modells

Abbildung 3.1 zeigt ein fiktives Tragwerk, das in der Folge zur Erläuterung der Programmfunktionen sowie der Konstruktion in RFEM dient. Dieses fiktive Modell besteht zur Gänze aus Stahlbeton, wie das etwa bei größeren Büro- oder Wohngebäuden typischerweise der Fall ist. Die folgenden Erläuterungen sind aber materialunabhängig und gelten selbstverständlich nicht nur für Beton. Dies kommt auch dadurch zum Ausdruck, dass – wie im Folgenden ersichtlich – zu Beginn der Modellierung zuerst das Material für die zu erstellenden Bauteile festgelegt werden muss. Die folgenden Seiten erläutern nun Schritt für Schritt die wichtigsten Einstellungen im Modell anhand von Bildern der jeweiligen Programmfenster.

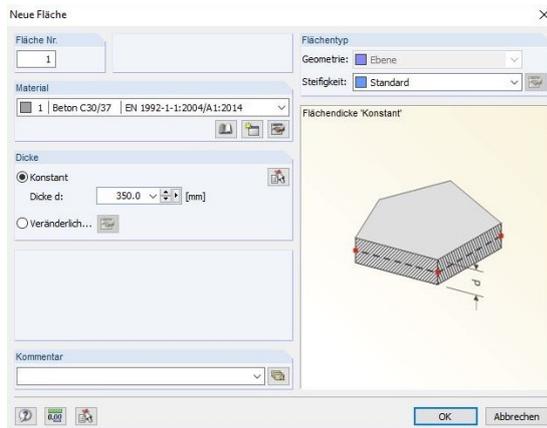
3.3 Eingabedaten

3.3.1 Angaben zu den Bauteilen

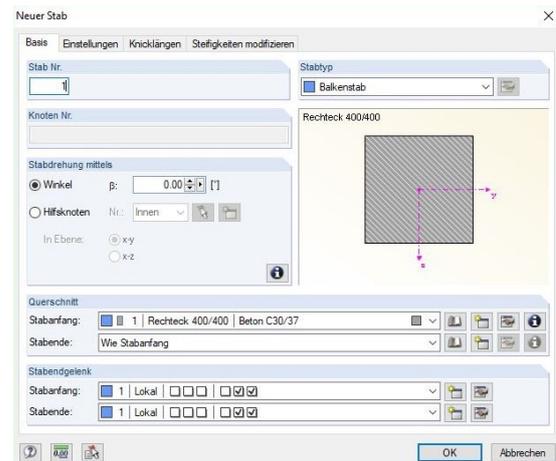
Der erste Schritt bei der Modellierung einer Fläche oder eines Stabes sind Angaben zum Material und zu den Abmessungen des Bauteils zu machen. Abbildung 3.2a zeigt die notwendigen Eingaben für eine Fläche, Abbildung 3.2b jene für einen Stab. Bei diesem fiktiven Tragwerk wird als erstes die Bodenplatte aus Beton mit einer Stärke von 35 cm gezeichnet und in weiterer Folge die Stützen, ebenfalls aus Beton, mit 40 cm Seitenlänge. Die Auswahl des Materials (hier Beton der Güte C30/37) erfolgte bereits einen Schritt davor.

Es ist leicht erkennbar, dass für einen Stab mehr Informationen erforderlich sind als für eine Fläche. Während für die Fläche eine Definition von Material und Flächendicke ausreicht (auf den Flächentyp bzw. Steifigkeitseinstellungen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden), sind für den Stab darüber hinaus noch eine Orientierung (Drehung im Grundriss) sowie Gelenksdefinitionen an den Stabenden anzugeben. Mit dem Anlegen eines eindeutigen Querschnitts und der Zuweisung zu einem Stab bzw. einer Stütze erfolgt die Festlegung deren Abmessungen. Diese notwendigen Einstellungen sind in Abbildung 3.3a für den Querschnitt und in Abbildung 3.3b für die Gelenke ersichtlich.

Eine kurze Erläuterung des Begriffs „Gelenksdefinitionen“ erfolgte bereits in Abschnitt 2.4.2. Diese Elemente des statischen Modells definieren die Freiheitsgrade einer Verbindung von Stäben, also die Bewegungsmöglichkeiten. Bei einer dreidimensionalen Betrachtungsweise sind das Verschiebungen in Richtung der Koordinatenachsen x , y und z (bezeichnet mit dem kleinen



(a) Definition einer Fläche

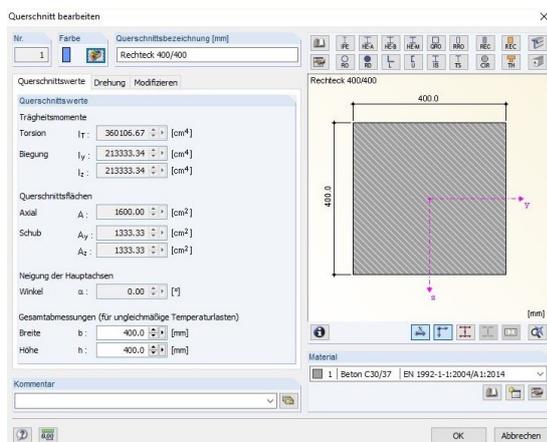


(b) Definition eines Stabes

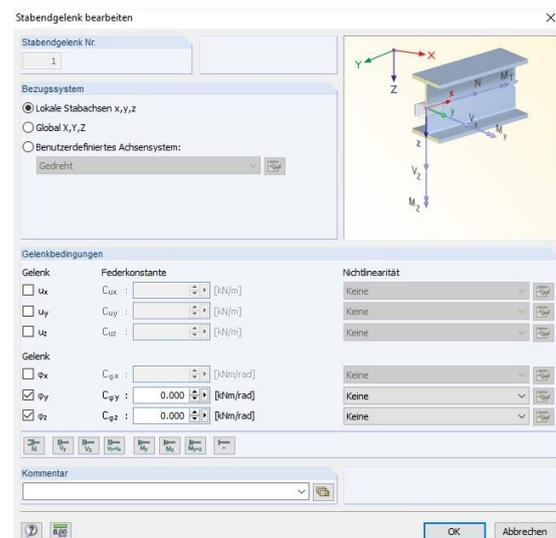
Abb. 3.2: Angaben zu den Abmessungen von Querschnitten in RFEM

lateinischen Buchstaben u) sowie Rotationen um diese jeweiligen Achsen (bezeichnet mit dem kleinen griechischen Buchstaben ϕ). In der Eingabemaske zu den Gelenken entsteht dabei durch Setzen eines Häkchens beim jeweiligen Freiheitsgrad ein Gelenk. Standardmäßig ist hier der Wert „0“ eingestellt, also kein Widerstand gegen die Bewegung dieses Gelenks. Dieser ließe sich hier durch Eingabe eines Wertes definieren. Umgekehrt heißt das natürlich, dass durch Entfernen des Häkchens der Widerstand unendlich groß wird und somit kein Gelenk vorhanden ist.

Mit den bisher getroffenen Einstellungen lässt sich das gesamte Modell vervollständigen. Die Bodenplatte kann um die Geschoßhöhe nach oben kopiert und die Stärke der somit neu erhaltenen Fläche auf die gewünschte Stärke der Geschoßdecke angepasst werden. Vertikal stehende Flächen dienen zur Modellierung der Wände im Stiegenhauskern. Das Gesamttragwerk entsteht nach



(a) Definition eines Querschnitts



(b) Definition eines Gelenks

Abb. 3.3: Zusätzliche Einstellungen für Stäbe

Fertigstellung des ersten Geschoßes und Kopieren desselben um die gewünschte Anzahl der Geschoße nach oben.

3.3.2 Angaben zu den Einwirkungen

Analog zur beschriebenen Vorgehensweise in Abschnitt 2.4.2 ist der nächste Punkt das Aufbringen der Lasten (Einwirkungen) auf das statische Modell. Bevor dies möglich ist, benötigt RFEM jedoch die zugehörigen Lastfälle. RFEM bietet dabei die Möglichkeit, direkt im Programm die gewünschten Lastfälle zu erzeugen und diese danach manuell in Lastkombinationen zu kombinieren. Durch deren anschließende Gruppierung in Ergebniskombinationen ist eine übersichtliche Filterung von Ergebnissen möglich. Dieser Vorgang lässt sich allerdings auch automatisieren. Dazu benötigt RFEM nur die gewünschten (manuell anzulegenden) Lastfälle und erzeugt daraus automatisch alle möglichen Lastkombinationen auf Basis der Kombinationsregeln in der anzuwendenden Norm.

Abbildung 3.4 zeigt das Fenster zur manuellen Definition der Lastkombinationen. Dargestellt ist in diesem Fall die ständige oder vorübergehende Kombination aus Gleichung (2.1) in Abschnitt 2.4.2.

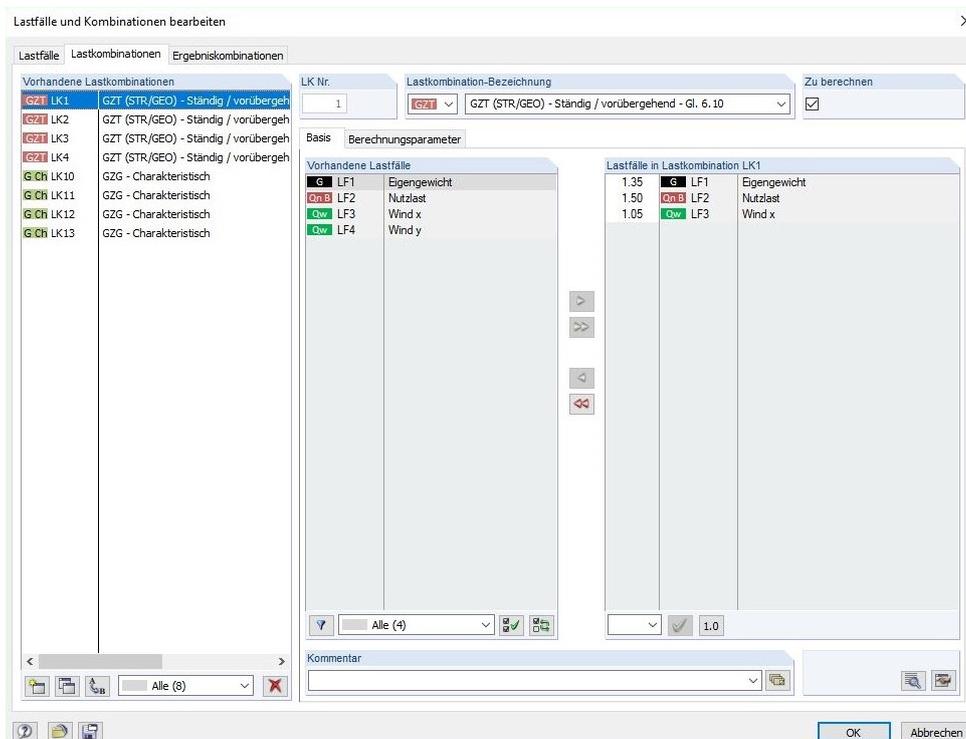


Abb. 3.4: Definition einer Lastkombination

Neben den in der Lastkombination inkludierten Lastfällen sind auch die Multiplikationsfaktoren, bestehend aus Teilsicherheitsbeiwert multipliziert mit dem Kombinationsbeiwert, in der Abbildung erkennbar. Als ständige Last ist das Eigengewicht hier mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_G = 1,35$ multipliziert. Bei den veränderlichen Lasten wird die Nutzlast mit dem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Q,1} = 1,5$ kombiniert mit der Windlast, die den Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{Q,2} = 1,5$ und den Kombinationsbeiwert $\psi_{0,2} = 0,7$ erhält. Damit ergibt sich als Faktor für die Windlast $1,5 \cdot 0,7 = 1,05$.

Sobald alle Lastfälle und Kombinationen fertig erstellt sind, erfolgt das Aufbringen der tatsächlichen Lasten auf das System. Dabei lassen sich die verschiedenen Lasttypen Knotenlast bzw.

Punktlast, Stablast bzw. Linienlast und Flächenlast unterscheiden. Aus diesen Bezeichnungen geht auch schon hervor, auf welche Elemente des statischen Modells sich diese Lasten jeweils beziehen. Da es allerdings für die Anschauung genügt, kommen in diesem fiktiven Projekt lediglich zwei Arten von Lasttypen zur Anwendung, nämlich die Nutzlast als vertikale Flächenlast auf alle Geschoßdecken und die Windlast als horizontale Linienlast² auf die Außenkanten der Geschoßdecken. Abbildung 3.5 veranschaulicht die erforderlichen Angaben für eine Flächenlast.

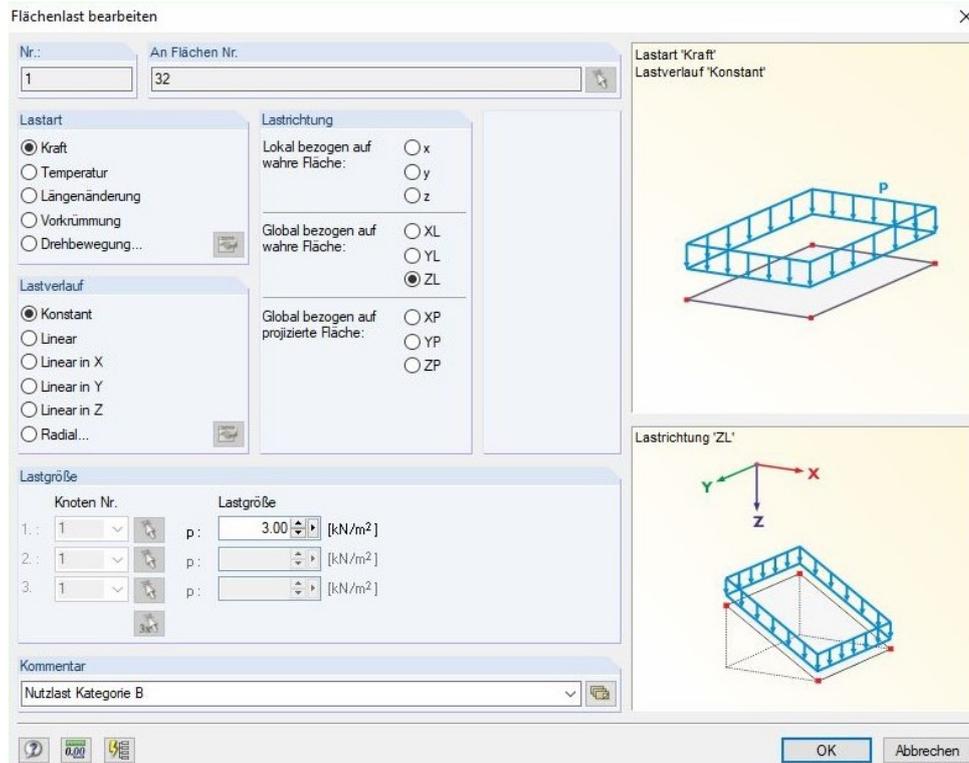
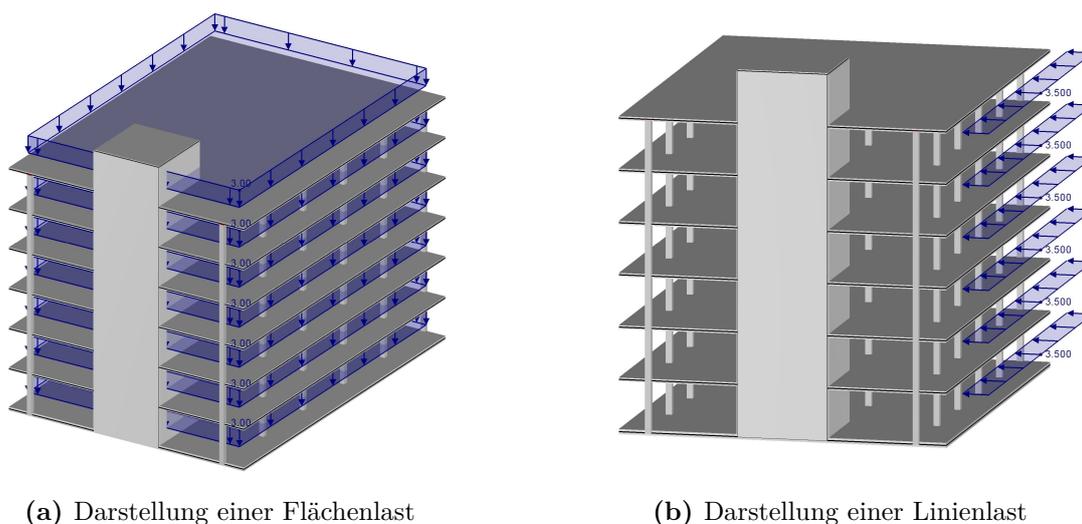


Abb. 3.5: Definition einer Flächenlast

Es sind dies die Art der Last (hier eine Kraft), ihr Verlauf (hier konstant) sowie ihre Größe (hier 3 kN/m^2) und die Wirkungsrichtung (hier vertikal). Die Definition von Punkt- oder Linienlasten erfolgt in analoger Weise über ähnliche Eingabemasken. Nach Bestätigung des Eingabefensters wählt man jene Flächen, Knoten oder Stäbe per Mausklick aus, auf denen die zuvor definierte Last wirken soll. Die so aufgebrauchten Einwirkungen können in RFEM grafisch angezeigt und dadurch auf Richtigkeit überprüft werden. Abbildung 3.6 zeigt zwei Beispiele der grafischen Darstellung von Lasten: Abbildung 3.6a die Flächenlast und Abbildung 3.6b die horizontal wirkende Linienlast.

Zum Abschluss der Modellierung fehlt somit nur mehr die Festlegung der Auflagerbedingungen für das Modell. Wie in Abschnitt 2.4.2 bereits kurz angedeutet stellen sie im Wesentlichen den Baugrund einer Konstruktion dar. Für das gegenständliche Projekt erfolgt die Lagerung der Bodenplatte mittels einer sogenannten Flächenbettung und jene der Stützen über zusätzliche Punktlager unter der Bodenplatte. Die Definition der Auflager geschieht analog zu den Gelenkbedingungen. Bei jenen Freiheitsgraden, die nun gesperrt sein sollen (wo also ein Lager vorhanden sein soll), wird ein Häkchen gesetzt. Ist kein Häkchen gesetzt, ist der Widerstand standardmäßig

²Auf Grund der fehlenden Außenmauern wird die Windlast, die ja eigentlich als Flächenlast auf die Gebäudehülle wirkt, üblicherweise mit der jeweiligen Stockwerkshöhe multipliziert und in der Folge als Linienlast auf die Geschoßdecken aufgeteilt.



(a) Darstellung einer Flächenlast

(b) Darstellung einer Linienlast

Abb. 3.6: Grafische Darstellung von Lasten in RFEM

auf „0“ gestellt und ließe sich durch Eingabe eines Wertes erhöhen. Der im vorliegenden Beispiel verwendete Wert für die Flächenbettung entspricht einem guten, tragfähigen Kies als Baugrund.

3.4 Berechnung

Bevor nun mit der Berechnung des Modells begonnen werden kann, sind zunächst noch einige Einstellungen die Berechnung selbst betreffend festzulegen bzw. zu kontrollieren. Davor erfolgt jedoch eine kurze Erläuterung der Berechnungsmethode moderner Statik-Programme – die Finite Elemente Methode (FEM).

3.4.1 Grundlagen zur Methode der Finiten Elemente

Die Berechnung nach dieser Methode bezeichnet man auch als „FE-Analyse“. Dabei wird das Tragwerk in viele kleine Teilsysteme zerlegt – die sogenannten finiten Elemente. Für Stabelemente erfolgt die Unterteilung dabei in kleinere Stabteile, für Flächen normalerweise in Vierecke. An den Rändern der Flächen können mitunter auch Dreiecke zur Anwendung kommen.

Auf Grund der vielen Unterteilungen der Bauteile spricht man auch vom FE-Netz, das für jedes Bauteil erzeugt werden muss. Für jedes Element des FE-Netzes sind Gleichungen zu lösen, die wiederum zu einzelnen Ergebnissen für jedes Element führen. Die Wahl der Größe der FE-Netz-Elemente, also die Maschenweite des FE-Netzes, obliegt alleine dem Anwender. Die jeweils für die aktuelle Bemessungssituation erforderliche FE-Netzgröße stellt einen Erfahrungswert dar und ist abhängig von der gewünschten Genauigkeit der Berechnung. Es gilt aber Folgendes zu beachten: [4, S. 272]

„Die Diskretisierung (Unterteilung, Anm.) ist ein entscheidender Punkt für die nachfolgende FE-Analyse: Eine zu feine Maschenweite verzögert die Berechnung, ohne die Qualität der Ergebnisse wesentlich zu erhöhen. Bei zu grober Maschenweite werden die Randbedingungen in ungenügender Weise erfasst. Als Orientierung für die anzustrebende Seitenlänge der finiten Elemente dient folgende Empfehlung: Es sollen etwa acht bis zehn Elemente zwischen den Randlinien einer Fläche generiert werden. Eine Mindestanzahl von vier Elementen sollte nach Möglichkeit nicht unterschritten werden.“

Das Bauwesen ist indessen bei Weitem nicht die einzige Disziplin, in der Berechnungen nach der Methode der finiten Elemente durchgeführt werden. Auch im Maschinenbau, der Autoindustrie sowie in der Luftfahrt erfolgt die Untersuchung von Bauteilen mittels dieser Berechnungsmethode. Mit ihrer Hilfe ist es möglich, Simulationen von realen Problemen durchzuführen und (beliebig) genaue Näherungslösungen zu erhalten. Für den weiteren inhaltlichen Verlauf dieser Diplomarbeit ist eine genauere Betrachtung der Methode der finiten Elemente nicht erforderlich und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Daher wird an dieser Stelle auf die in ausreichender Zahl und Tiefe vorhandene Literatur [20–22] zu diesem Thema verwiesen.

3.4.2 Berechnung des Tragwerks in RFEM

Die Größe der Finiten Elemente beträgt im gegenständlichen Modell 0,5 m für Flächen, Stäbe erhalten mindestens zehn Unterteilungen. Diese FE-Netz-Größe bei Flächen wäre bei einer Untersuchung in der Realität vermutlich etwas zu groß, da in diesem Fall allerdings die Verdeutlichung der Programmfunktionen im Vordergrund steht, kann dieser Umstand ignoriert werden. Da dem Programm nun alle für die Berechnung notwendigen Informationen vorliegen, ist der nächste Schritt der Start der Berechnung. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten: Es können die Lastfälle, Lastkombinationen oder Ergebniskombinationen jeweils einzeln berechnet werden oder direkt das gesamte Modell. Immer zu berücksichtigen ist bei dieser Entscheidung aber, dass mit steigender Anzahl an zu berechnenden Lastfällen und -kombinationen auch die Rechenzeit drastisch ansteigt. Die dadurch erhaltenen Ergebnisse sind die Beanspruchungen der einzelnen Bauteile (Schnittgrößen) und Verformungen des gesamten Tragwerks. Die in Abschnitt 2.4.3 angeführten baustatischen Nachweise führt das Programm allerdings nicht sofort.

Für diese baustatischen Nachweise bietet RFEM eine Vielzahl an sogenannten Zusatzmodulen an, mit deren Hilfe das Führen dieser baustatischen Nachweise jedoch möglich ist. Die gängigsten sind wohl jene für die Materialien Stahlbeton, Stahl und Holz. Diese Module greifen auf die Ergebnisse des globalen statischen Modells zurück und führen damit für vom Anwender bestimmte Bauteile die erforderlichen Nachweise. Selbstverständlich gilt natürlich auch hier der Grundsatz, dass das Programm nur so schlau wie sein Anwender sein kann und es ist demnach für die Bedienung dieser Module eine Kenntnis der Nachweise unbedingt erforderlich.

3.5 Ergebnisse

Sobald die Berechnung erfolgreich (also ohne Fehlermeldungen oder Warnungen) beendet ist, erfolgt die automatische Darstellung der Ergebnisse. Diese können dann sofort getrennt nach Lastfällen, Lastkombinationen oder, wenn nur die Extremwerte der Schnittgrößen aller Bauteile gesucht sind, nach Ergebniskombinationen angezeigt werden.

Abbildung 3.7 zeigt die typische Visualisierung der Ergebnisse einer Berechnung nach der FE-Methode. Es sind die vertikalen Verformungen der obersten Geschoßdecke im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit 120-fach überhöht dargestellt. Ohne Überhöhung wären die Verformungen nicht wahrnehmbar, da die größte Verformung (rot dargestellt) nur 8 mm beträgt, wie aus der Farbskala im linken Teil des Bildes hervorgeht.

Die Ergebnisse sämtlicher Zusatzmodule lassen sich ebenfalls im Hauptfenster von RFEM visualisieren, die Darstellung hängt dabei allerdings sehr stark vom Modul selbst ab. So zeigt das Modul für Holztragwerke beispielsweise sofort die Ausnutzung jedes berechneten Bauteils an, während im Stahlbeton-Modul angezeigt wird, ob die vorgesehene (vom Anwender definierte) Bewehrung³ im Bauteil ausreichend ist.

³Unter „Bewehrung“ wird im Stahlbetonbau jener Stahl verstanden, der im Betonquerschnitt eingelegt ist, um diesem die Aufnahme von Zugkräften zu ermöglichen.

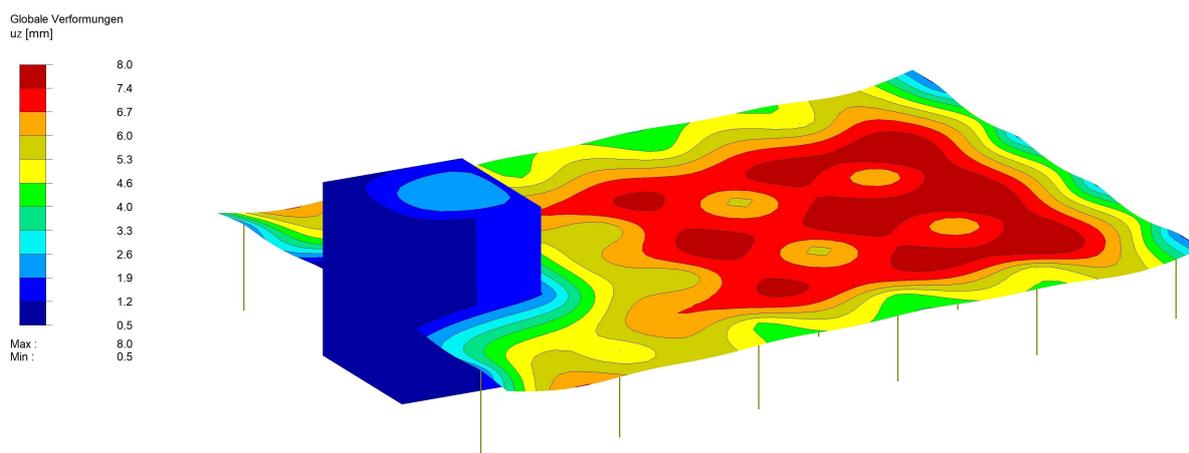


Abb. 3.7: Vertikale Verformungen einer Geschoßdecke

Ist das Ergebnis an einigen Stellen nicht zufriedenstellend oder sind Nachweise nicht erfüllt, erfolgt die Änderung und anschließende Neuberechnung des statische Modells. Dadurch löscht das Programm allerdings alle (!) vorhandenen Ergebnisse – auch die Ergebnisse jener Bauteile, die nicht direkt durch die Änderung betroffen sind. Dasselbe gilt für geometrische Änderungen, die sich durch eine geänderte Architekturplanung ergeben. Sobald das statische Modell eine Änderung erfährt, werden alle Ergebnisse in RFEM gelöscht und eine Neuberechnung des Modells ist erforderlich, was – abhängig von der Modellgröße – mitunter ziemlich zeitaufwändig sein kann.

Dieser Umstand bedeutet natürlich auch, dass RFEM selbst Ergebnisse nicht direkt vergleichen kann. Dies kann nur durch den Anwender geschehen, indem frühere Ergebnisse notiert oder zwischengespeichert werden.

3.6 Dokumentation

Ein großer Vorteil der Verwendung von konventionellen Statik-Programmen ist die mühelose Dokumentation der Berechnungsergebnisse nach einer statischen Berechnung. Der Anwender kann völlig frei darüber entscheiden, welche Informationen zum statischen Modell bzw. zu den Ergebnissen in die Dokumentation einfließen sollen. Teilweise wird diese Information automatisiert über die zugehörigen Befehle in die Dokumentation eingefügt. Darüber hinaus ist es auch möglich, manuell noch weitere Informationen hinzuzufügen, wie etwa Bilder des Tragwerks oder Visualisierungen der Ergebnisse.

Theoretisch könnte eine Dokumentation die gesamte Information zum geometrischen Aufbau eines Modells sowie die Ergebnisse aus allen Lastfällen und -kombinationen für jedes FE-Element enthalten. Dass eine derart umfangreiche Dokumentation aber hunderte, wenn nicht tausende von Seiten produziert und daher nicht sinnvoll ist, leuchtet ein. Die Kunst besteht auch hier wieder darin, festzulegen, welche Informationen in die Dokumentation einfließen sollen, um eine ausreichende Aussagekraft und in weiterer Folge Nachvollziehbarkeit und Prüffähigkeit zu erreichen.

3.7 Stärken und Schwächen

Dieses Kapitel verdeutlicht, welche Vorteile und Möglichkeiten die Verwendung konventioneller Berechnungsprogramme in der Tragwerksplanung bietet. Zum einen lässt sich an dieser Stelle festhalten, dass deutlich umfangreichere Tragwerke genauer berechnet werden können, als dies mit vertretbarem Aufwand bei Handrechnungen der Fall ist. Die Implementierung von Normen in derartige Software erlaubt zudem das Führen von nahezu allen erforderlichen Nachweisen im Zuge einer statischen Berechnung – zumindest für Aufgaben in der Hochbauplanung. Zum anderen ist durch diese Programme auch eine durch die iterative Berechnungsweise in der Tragwerksplanung erwünschte Variabilität und Anpassbarkeit der Berechnung gegeben. Schlussendlich sind die übersichtlichen Eingabefenster und intuitive Bedienung derartiger Software ein weiteres Charakteristikum dieser anwendungsfreundlichen „Super-Werkzeuge“. Diese Argumente belegen somit nicht nur den Nutzen digitaler Berechnungsmöglichkeiten, sondern illustrieren sehr anschaulich, warum deren Einsatz im Berufsalltag eines Tragwerksplaners zu einer Selbstverständlichkeit geworden ist.

Nichtsdestotrotz gibt es bei gewissen Aufgabenstellungen im beruflichen Alltag jedoch auch Einschränkungen, die mit dem Einsatz konventioneller Statik-Programme einhergehen und an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben sollen. Die bereits angeführte Variabilität ist dahingehend beschränkt, dass die Veränderungen an komplexen Rechenmodellen relativ aufwändig umzusetzen sind und ein parametrischer Aufbau des Modells einerseits sehr zeitintensiv und andererseits im Nachhinein (wenn das Modell bereits einmal *statisch* erstellt wurde) kaum mehr umsetzbar ist. Für die Durchführung mehrerer iterativer Berechnungsschritte mit jeweiliger Anpassung der Randbedingungen und neuerlicher Berechnung wäre darüber hinaus eine Automatisierung dieser Abläufe mit Hilfe von Algorithmen in der alltäglichen Tragwerksplanung von großem Vorteil. Zumindest im Fall von RFEM ist diese Möglichkeit nicht oder nur mit sehr fortgeschrittenen Programmierkenntnissen durchführbar und daher für den Großteil der Anwender nicht möglich. Als letzten Punkt der Einschränkungen bei der Verwendung von konventionellen Statik-Programmen sei der Umstand genannt, dass derartige Software üblicherweise als proprietäre Software (Gegenteil von *open source*) herausgegeben wird. Neben dem (positiven) Umstand einer professionellen Wartung und Aktualisierung geht damit allerdings auch eine gewisse Abhängigkeit der Programmfunktionen vom Entwickler einher, die eine Funktionserweiterung durch Dritte meist unmöglich macht.

Kapitel 4

Karamba – Grundlagen und Programmbeschreibung

Dieses Kapitel präsentiert ein Finite Elemente Programm, das in vielen Punkten von den Funktionen eines klassischen Statik-Programms abweicht. Mit den in Kapitel 3 vermittelten Grundlagen kann nun auf diese Unterschiede explizit hingewiesen und deren Bedeutung für die Tragwerksplanung besser erläutert werden.

KARAMBA wurde von Clemens Preisinger in Zusammenarbeit mit dem Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* (dem Wiener Standort von *Bollinger+Grohmann Ingenieure*) entwickelt. Wie Preisinger in [12] und [14] selbst schreibt, lag der ursprüngliche Schwerpunkt des Programms eigentlich nicht in der Tragwerksplanung, sondern in der Architektur zur Formfindung und für Variantenstudien in frühen Projektphasen. KARAMBA stellt daher ein in der Tragwerksplanung noch relativ unbekanntes Programm dar. So machte auch der Autor dieser Arbeit erst im Rahmen seiner Anstellung im Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* erste Bekanntschaft damit. In genanntem Unternehmen findet KARAMBA einerseits Anwendung zur Formfindung im Entwurfsstadium von Projekten und andererseits immer mehr auch für die Tragwerksberechnung unter Einbeziehung von Optimierungsaufgaben. Auf Grund der ständigen Weiterentwicklung in Richtung Tragwerksplanung bieten sich daher immer mehr Möglichkeiten für einen Einsatz in diesem Kontext.

Dieses Kapitel soll dem Leser – analog zu Kapitel 3 – eine Übersicht über das Programm mit seinen Funktionen verschaffen. Dabei wird selbstverständlich auch wieder auf die Modellierung sowie die Berechnung eines statischen Modells eingegangen und im Anschluss daran gezeigt, wie die erhaltenen Ergebnisse aussehen und was mit ihnen in weiterer Folge geschieht.

4.1 Arbeitsumgebung

KARAMBA ist kein eigenständiges Programm mit eigener Programmoberfläche, sondern eingebettet in der parametrischen Arbeitsumgebung von GRASSHOPPER, einem Plug-in der dreidimensionalen Modellierungssoftware „Rhinceros“ (im weiteren Text kurz RHINO genannt). Laut [15] ist RHINO mit seinen 3D-Freiform-Modellierwerkzeugen eigentlich auf dem Gebiet des Produktdesigns beheimatet, um „vom Flugzeug bis zum Schmuckstück alles zu entwerfen“.

Die Basis für den Einsatz von KARAMBA bildet folglich RHINO. Seine größte Stärke und damit auch der Grund, warum es von Designern so gerne verwendet wird, ist die hohe Zeichengenauigkeit des Programms, um die erstellte Geometrie zu erfassen. Diese Genauigkeit erreicht RHINO durch die Verwendung von sogenannten NURBS-Kurven und -Flächen [16]: „NURBS, Non-Uniform Rational B-Splines, sind mathematische Kurven, die beliebige Formen von 3D-Geometrie darstellen können, von einfachen 2D-Linien, Kreisen, Bogen oder Kurven bis zu komplexen organischen 3D-Freiformflächen und -Volumenkörpern“.

Folgende kurze jedoch aussagekräftige Beschreibung des Programms findet sich auf der Webseite [15] von RHINO: „Rhino kann NURBS-Kurven und -Flächen, Volumenkörper, Punktwolken

und Polygonnetze erzeugen, bearbeiten, analysieren, dokumentieren, rendern, animieren und übersetzen.“

Das in RHINO implementierte Zusatzprogramm GRASSHOPPER bietet die Möglichkeit, mit RHINO parametrisch zu entwerfen – also bestimmte Zeichenelemente mit Bedingungen zu verknüpfen, um diese dadurch nachträglich sehr leicht anpassen zu können. Mithilfe von in GRASSHOPPER eingebetteten Algorithmen¹ ist es damit auch möglich, Optimierungsaufgaben im Zusammenhang mit der vorhandenen Geometrie zu lösen. Kapitel 5 widmet sich dieser Thematik im Anschluss noch genauer. Allerdings verwendet GRASSHOPPER nur geometrische Informationen, also Linien, Flächen, Volumenkörper und keine baustatischen Elemente. Beim Starten von GRASSHOPPER über die Kommandozeile in RHINO öffnet sich ein eigenes Programmfenster, in dem über die vorhandenen Befehle bzw. Funktionen die Konstruktion der gewünschten Geometrie erfolgt. Diese so erstellte Geometrie kann allerdings nur im Hauptfenster von RHINO (!) betrachtet werden. Der folgende Abschnitt widmet sich der Konstruktion von Geometrie in GRASSHOPPER.

KARAMBA ist schließlich in GRASSHOPPER integriert und bildet damit die Brücke zum Bauwesen. Mithilfe von KARAMBA erfolgt die Zuteilung der für die statische Berechnung relevanten Informationen zu der in GRASSHOPPER und/oder RHINO gezeichneten Geometrie. Wie das KARAMBA-Handbuch [11, S. 7] explizit hervorhebt, ermöglicht es diese Tatsache, parametrisierte Geometriemodelle, FE-Berechnungen und Optimierungsalgorithmen zu kombinieren.

Da es der üblichen Anwendung des Autors entspricht, werden die Programme RHINO, GRASSHOPPER und KARAMBA in englischer Sprache verwendet. Dies bedingt, dass die Namen der verwendeten Befehle in englischer Sprache genannt, allerdings gegebenenfalls in deutscher Sprache erklärt werden. Die verwendeten Programmversionen sind RHINO Version 5 SR14, GRASSHOPPER Version 0.9.0076 und KARAMBA Version 1.3.0 WIP.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit stehen hauptsächlich die Funktionen von KARAMBA im Vordergrund. Da diese jedoch auf den Funktionen in GRASSHOPPER aufbauen, erläutert der nun folgende Abschnitt zuerst das Grundprinzip der Modellierung in GRASSHOPPER. Das bedeutet in weiterer Folge, dass im Unterschied zu Abschnitt 3.2 anfänglich nur die Geometrie modelliert wird und noch keine Bauteile.

4.2 Programmieren und Entwerfen mit Grasshopper

Alle Befehle in GRASSHOPPER werden durch Schaltflächen visualisiert, die alle nach demselben Prinzip funktionieren: Informationen fließen von links nach rechts. Die zu verarbeitende Information erhält der Befehl also an der linken Seite und das Ergebnis lässt sich an der rechten Seite auslesen. Richtig miteinander kombiniert führen die Befehle zur gewünschten Geometrie. Abbildung 4.1 zeigt eine Möglichkeit, in GRASSHOPPER eine Linie zwischen zwei Punkten zu konstruieren.

Die Namen der jeweiligen Schaltflächen (Befehle) sind im dazugehörigen Textfeld darüber ersichtlich. Der Befehl „Line“ benötigt als Eingangswerte zwei Punkte (oder zwei Listen von Punkten), zwischen denen eine Linie gezeichnet werden soll. Der Befehl „Construct Point“ erzeugt einen Punkt mit den voreingestellten Koordinaten (0,0,0). Durch erneute Auswahl dieses Befehls und Modifikation der x-Koordinaten erzeugt das Programm einen zweiten Punkt mit den Koordinaten (5,0,0). Die Koordinateneingabe geschieht dabei über ein Textfeld, das die Zahl „5“ beinhaltet und mit dem Eingangswert der x-Koordinate verbunden wird. Weil die Zeicheneinheit in RHINO auf „Meter“ eingestellt ist, beträgt der Abstand dieser Punkte nun 5 m. Wäre diese beispielsweise auf „Zentimeter“ gestellt, wären die Punkte logischerweise

¹Definition im Gabler Wirtschaftslexikon: Ein Algorithmus ist ein „Lösungsverfahren in Form einer Verfahrensweisung, die in einer wohldefinierten Abfolge von Schritten zur Problemlösung führt.“ [17]

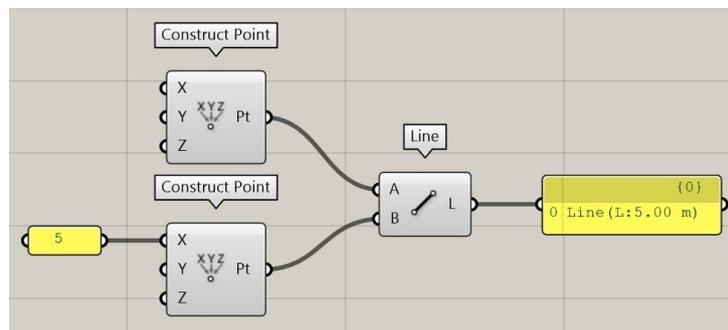


Abb. 4.1: Konstruktion einer Linie zwischen zwei Punkten in GRASSHOPPER

nur 5 cm voneinander entfernt. Die grauen Kabelverbindungen dienen der Visualisierung des Informationsflusses zwischen den verschiedenen Schaltflächen. Ein weiteres Textfeld (im weiteren Verlauf Panel genannt) zeigt die vorhandene Information am Ende des Befehls „Line“ an: es ist eine Linie mit der Länge 5 m. (Auf die Visualisierung in RHINO wird an dieser Stelle verzichtet, da es sich eben lediglich um eine Linie zwischen zwei Punkten handelt.)

An dieser Stelle sei erwähnt, dass es für jede Konstruktion bzw. jedes „Problem“ mehrere Lösungsmöglichkeiten gibt. So könnte man bei obigem Beispiel etwa auch beide Punkte manuell in RHINO setzen und die sodann in RHINO vorhandene Geometrie mittels eines anderen Befehls importieren und danach an den Befehl „Line“ anschließen. Abbildung 4.2 zeigt eine Erweiterung von Abbildung 4.1.

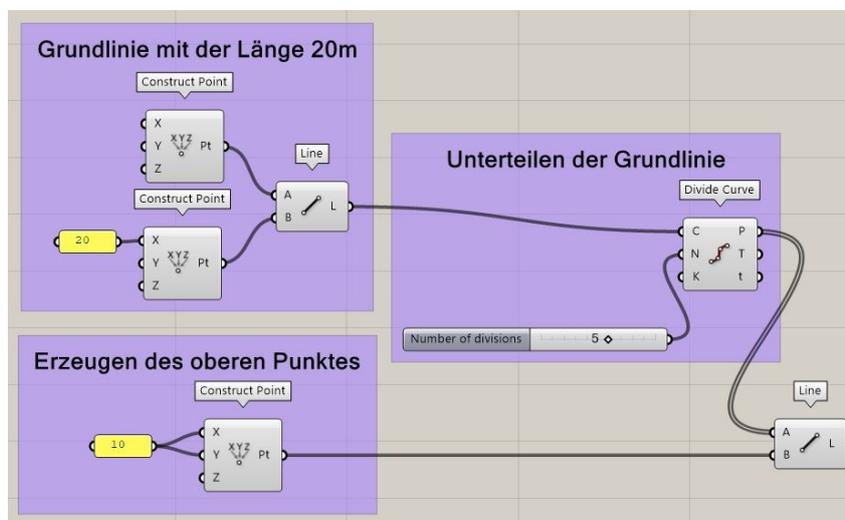


Abb. 4.2: Unterteilung einer Linie in mehrere Abschnitte

Die soeben erstellte Linie wurde nun auf 20m verlängert und ein weiterer Punkt mit den Koordinaten (10,10,0) erstellt. Der Befehl „Divide Curve“ unterteilt die Linie in eine bestimmte Anzahl an Teillinien, die Anzahl der Teilungen bestimmt in diesem Fall ein Schieberegler. An der Stelle „P“ auf der rechten Seite des Teilungsbefehls gibt dieser die durch die Teilung erhaltenen Punkte aus. Mit einem neuerlichen Befehl „Line“ zeichnet das Programm jeweils eine Linie zwischen einem Teilungspunkt und dem neu erstellten Punkt.

Abbildung 4.3 zeigt die beiden Ergebnisse der Schaltung aus Abbildung 4.2. Die konstruierte Geometrie für fünf Unterteilungen ist in Abbildung 4.3a dargestellt, jene für zehn Unterteilungen

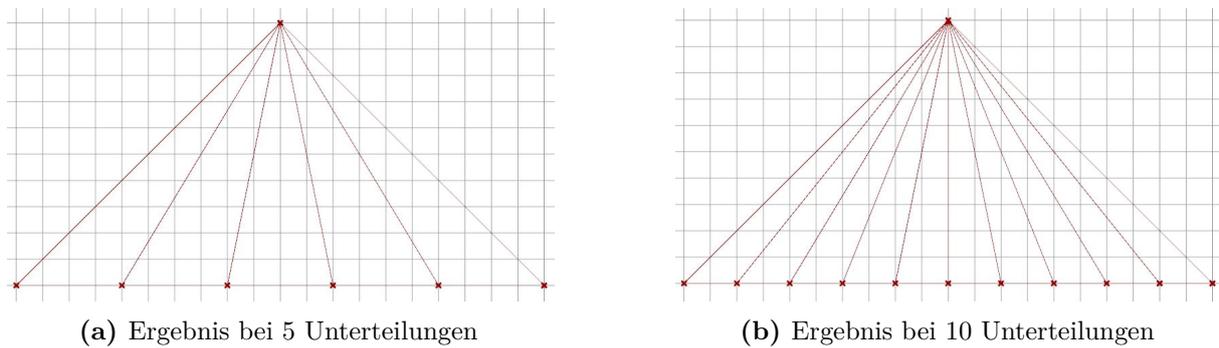


Abb. 4.3: In RHINO dargestellte Geometrie der Schaltung aus Abbildung 4.2

der Linie in Abbildung 4.3b. Die Anzahl dieser Segmente steuert ein Schieberegler und das Ergebnis ist in Echtzeit in RHINO sichtbar.

Es ist leicht erkennbar, dass die Geometrie nicht direkt konstruiert wird, wie das bei üblichen CAD-Programmen² und auch bei konventioneller Statik-Software der Fall ist. Stattdessen programmiert der Anwender eigentlich einen Ablauf, der von unterschiedlichsten *Parametern* abhängig ist und dessen Ergebnis die entworfene Struktur ist. Dieser parametrische Ablauf lässt sich auf unendlich viele Aufgabenstellungen anwenden, es ist nur die Veränderung des jeweiligen Parameters erforderlich.

Für eine einfache Aufgabenstellung wie jene in Abbildung 4.3 steht der Nutzen des parametrischen Aufbaus selbstverständlich nicht in Relation zu dem Mehraufwand verglichen mit einer herkömmlichen Modellierung per Hand oder mit CAD-Software. Je komplexer dieser Ablauf allerdings wird oder je mehr Varianten (gesteuert über Parameter) man untersuchen bzw. visualisieren möchte, desto mehr überwiegen die Vorteile der Parametrisierung.

Die nachträgliche Änderung von Entwurfsparametern erlaubt eine rasche und übersichtliche Betrachtung von verschiedenen aber doch ähnlichen Varianten. Wie Preisinger und Heimrath in [14] schreiben, ist dies gerade in frühen Planungsphasen von enormer Bedeutung, da in diesen Phasen oftmals eine Vielzahl an Variantenstudien zu unterschiedlichen Kriterien durchgeführt wird.

Der folgende Abschnitt beschreibt nun die notwendigen Schritte, um das geometrische Modell in GRASSHOPPER mit jenen Informationen auszustatten, damit eine statische Berechnung in KARAMBA erfolgen kann.

4.3 Aufbau eines Rechenmodells in Karamba

Genauso wie Kapitel 3 nicht den vollen Funktionsumfang von RFEM präsentiert, kann auch hier keine vollständige Erläuterung aller Programmfunktionen von KARAMBA und GRASSHOPPER erfolgen. Vielmehr wird ein Verständnis des Arbeitsablaufs und die Vorstellung der wichtigsten Komponenten für eine einfache statische Berechnung angestrebt. Die Vorgangsweise der Erläuterung orientiert sich dabei an jener aus Abschnitt 3.2. Bevor im Folgenden die Erläuterung der einzelnen Schritte zur Erstellung eines Beispielmmodells erfolgt, bildet ein Überblick über das Grundschemata in KARAMBA den Einstieg in die Thematik. Dieses ist immer in derselben Reihenfolge erforderlich, um in KARAMBA von der in RHINO oder GRASSHOPPER definierten Geometrie zu einem statischen Modell mit Ergebnissen zu kommen.

²CAD steht für Computer Aided Design und beschreibt allgemein das Entwerfen mit Hilfe von Computern.

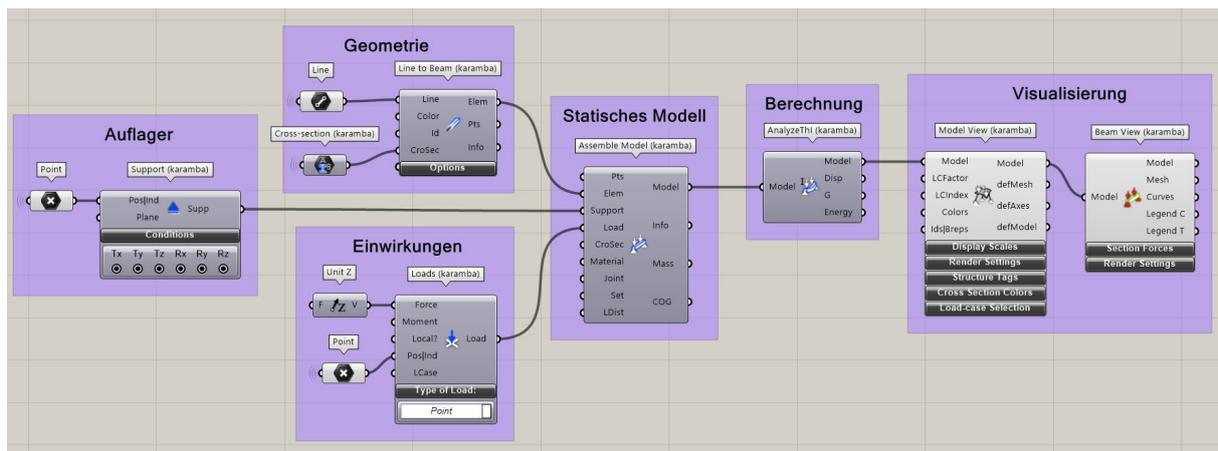


Abb. 4.4: Schema eines Rechenmodells in KARAMBA

Abbildung 4.4 zeigt eine abstrahierte Darstellung dieses Schemas an, deren Idee aus dem KARAMBA-Handbuch [11] stammt. Die genauen Bezeichnungen der verwendeten Befehle werden auch hier wieder in den hellgrauen Textfeldern dargestellt, wobei Befehle aus KARAMBA an dem Zusatz „(karamba)“ erkennbar sind.

Der zu programmierende Ablauf gliedert sich demnach in folgende Schritte:

- Umwandlung der gezeichneten Geometrie in berechenbare Bauteile
- Bestimmung statischer Informationen (Auflager, Einwirkungen etc.)
- Zusammenführung dieser Informationen zu einem statischen Modell
- Berechnung und Analyse des Modells
- Visualisierung des Modells mit seinen Ergebnissen

Jeder einzelne dieser Punkte wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch genauer erklärt. Zur Veranschaulichung der Funktionen dient – analog zu Kapitel 3 – wieder ein fiktives Tragwerk, diesmal allerdings selbstverständlich mit GRASSHOPPER und KARAMBA erstellt. Auf Grund des höheren Modellierungsaufwands in GRASSHOPPER erfolgt die Vermittlung der erforderlichen Eingaben nun aber nicht über ein Gebäude, sondern eine Stahlfachwerkkonstruktion wie sie in Abbildung 4.5a dargestellt ist.

Der programmierte Ablauf in GRASSHOPPER, um zu dieser parametrischen Konstruktion zu gelangen, ist zur Verdeutlichung des Modellierungsaufwands in Abbildung 4.5b dargestellt. Auf der linken Seite sind die variablen Geometrieparameter definiert, die als Eingangswerte für weitere Befehle dienen, um schlussendlich zum gewünschten Fachwerk zu gelangen.

Wie bereits in Abschnitt 4.2 erwähnt, gibt es für die Lösung einer Aufgabenstellung in GRASSHOPPER (und damit auch in KARAMBA) immer mehrere Möglichkeiten. Das heißt, dass der in Abbildung 4.5b gezeigte Konstruktionsablauf natürlich nicht der einzig mögliche ist.

4.4 Eingabedaten

Der programmierte Ablauf zur Konstruktion der Geometrie des Fachwerks soll nicht Gegenstand dieser Erläuterung sein, da die Vermittlung der Grundlagen in KARAMBA zur Berechnung eines

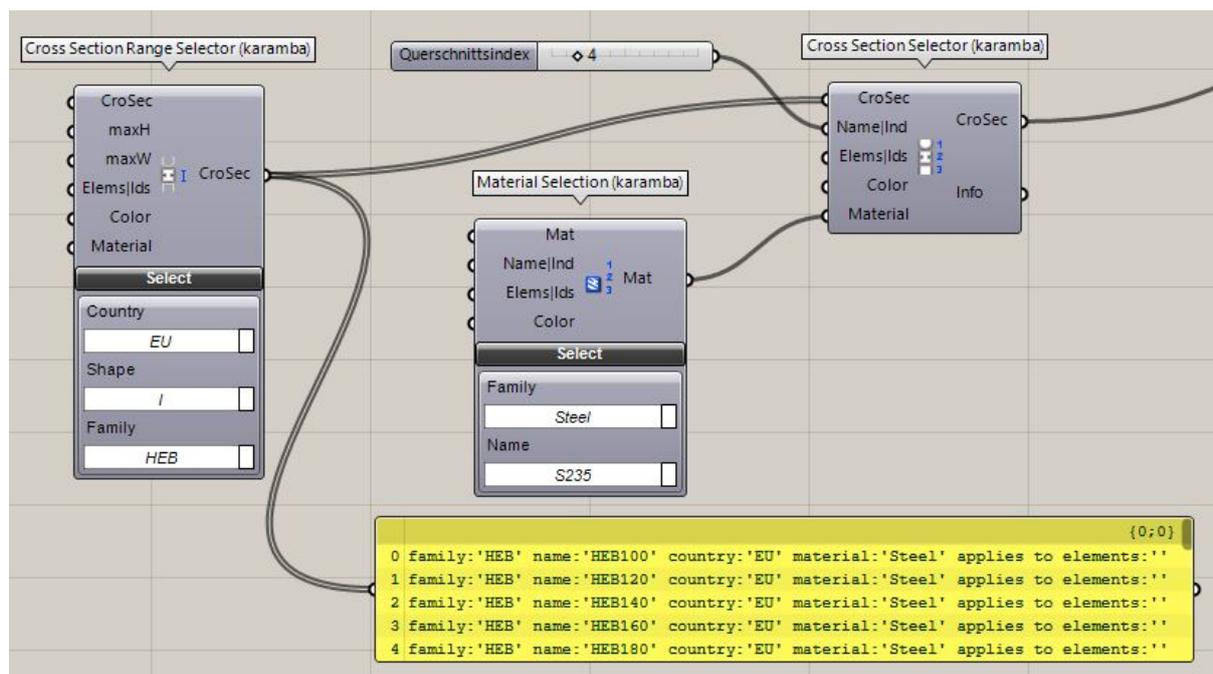


Abb. 4.7: Auswahl eines Querschnitts in KARAMBA

Unter Verwendung der Komponenten „Cross Section Range Selector“, „Material Selection“ sowie „Cross Section Selector“ erzeugt KARAMBA einen eindeutig definierten Querschnitt. Abbildung 4.7 zeigt die Anordnung ebendieser Komponenten in der korrekten Reihenfolge.

Jene Querschnittsinformationen, die KARAMBA für die Berechnung verwendet, sind in einer Querschnittsbibliothek in Form einer Excel-Tabelle erfasst. Die erstgenannte Komponente definiert einen Bereich in dieser Tabelle, aus dem der gewünschte Querschnitt ausgewählt werden soll. Für dieses Beispiel fiel die Wahl auf einen standardisierten Stahlquerschnitt HEB aus der Familie der I-Profile. Darüber hinaus könnte man an dieser Komponente eine eigene Querschnittstabelle anschließen oder etwa Maximalabmessungen des Querschnitts vorgeben, was hier allerdings nicht zur Anwendung kommt. Die ersten fünf Einträge in der Liste der HEB-Querschnitte sind exemplarisch im gelb hinterlegten Panel dargestellt.

Die zweite Komponente, „Material Selection“, wählt das Material bzw. dessen Güte aus – hier mit Baustahl S235 definiert. Diese beiden Befehle liefern die Grundlage für die letzte Komponente – den „Cross Section Selector“. Dieser Befehl ermöglicht es nun, aus der zuvor definierten Liste jenen Querschnitt auszuwählen, dessen Index im Reiter „Name|Ind“ definiert ist. Um auch hier bei der späteren Berechnung sehr einfach und unkompliziert mehrere Querschnitte testen zu können, wird dieser Index über einen Schieberegler definiert. Für das vorliegende Fachwerk ist dies also vorläufig der Querschnitt mit Index 4 in der vorgegebenen Liste. Im gelb hinterlegten Panel lässt sich erkennen, dass damit die Wahl auf einen Stahlquerschnitt HEB 180 fällt. Diese Information gelangt sodann an die nachfolgende Komponente.

Abbildung 4.8 beschreibt den darauffolgenden notwendigen Schritt zum Aufbau eines statischen Modells. Der Befehl „Line to Beam“ erhält als Eingangsinformation eine Liste von Linien, die in Stäbe umgewandelt werden sollen sowie den Querschnitt und eine eindeutige Bezeichnung (ID) für die Stäbe. Die Informationen zum gewünschten Querschnitt stammen dabei aus den in Abbildung 4.7 dargestellten Befehlen. Zur Reduktion der Kabelverbindungen zwischen diesen Befehlsgruppen dient ein Container für den Querschnitt, der die ankommende Information jedoch

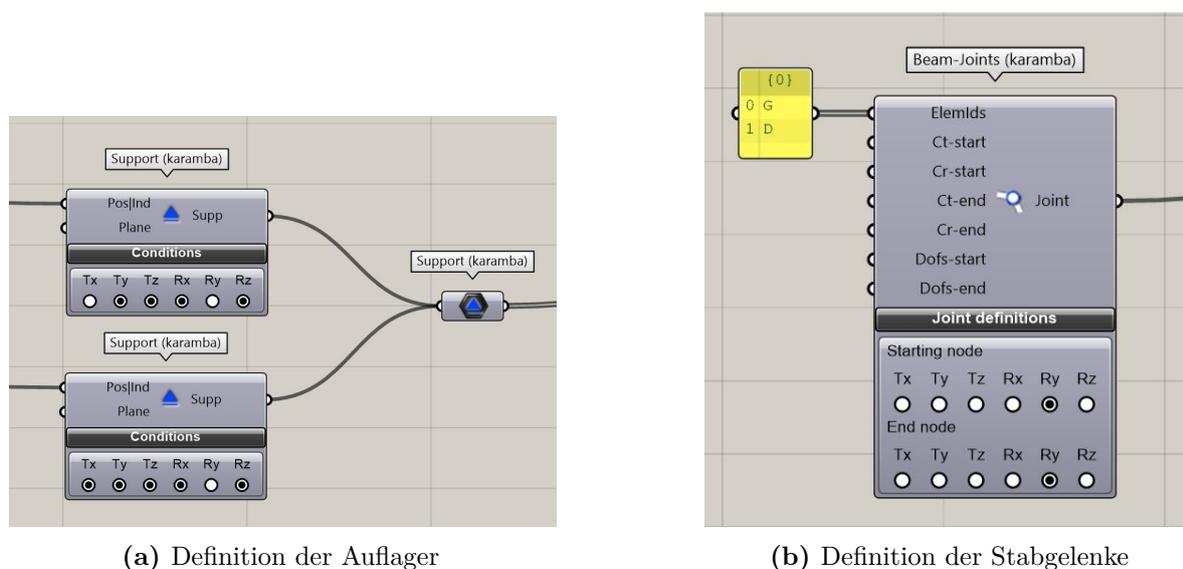


Abb. 4.9: Definition von Auflagern und Gelenken in KARAMBA

Nachgiebigkeiten für Translationen und Rotationen zu definieren, jedoch gelten diese dann für alle Freiheitsgrade des Gelenks (also jeweils in x-, y- und z-Richtung) gleichermaßen.

Die bislang noch nicht definierten statischen Informationen sind die Einwirkungen auf das Tragwerk. Aus Gründen der Übersichtlichkeit beinhaltet dieses Beispiel nur zwei Typen von Lasten, nämlich die Schwerkraft und Punktlasten am Obergurt des Fachwerks. Die Definition dieser Einwirkungen ist in Abbildung 4.10 dargestellt.

In beiden Fällen geschieht dies mit dem Befehl „Loads“, der eine direkte Auswahl des Lasttyps ermöglicht. Neben den Typen Schwerkraft und Punktlast gibt es noch zahlreiche weitere Typen wie Linienlasten, Flächenlasten und so weiter. Mit Ausnahme der Schwerkraft benötigen diese Komponenten außerdem eine Information, auf welchen Elementen des statischen Modells die

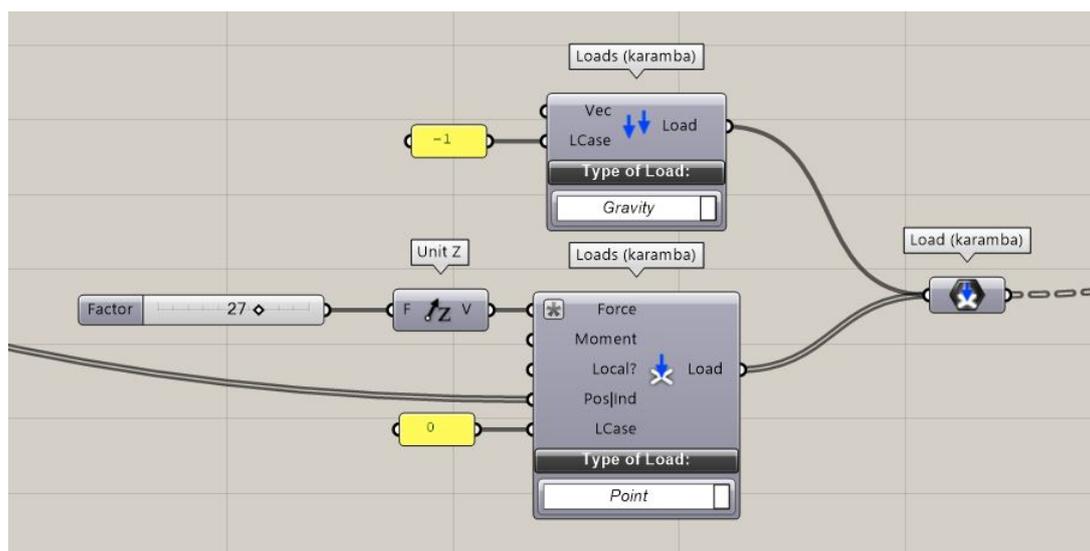


Abb. 4.10: Definition der Einwirkungen in KARAMBA

Last wirken soll. Im gegenständlichen Beispiel dienen als Lastangriffspunkte der Punktlast alle Kreuzungspunkte des Obergurts mit den Vertikalstäben.

Zusätzlich zu diesen Angaben erfolgt auch die Vergabe einer Lastfallnummer, um generell eine Unterscheidung zu ermöglichen und nach der Berechnung die Ergebnisse nach Lastfallnummern getrennt anzeigen zu können. Lastkombinationen, wie sie in RFEM selbstverständlich sind, gibt es in KARAMBA nicht. Dies funktioniert nur über die mehrfache Vergabe gleicher Lastfallnummern bei zu kombinierenden Einwirkungen. Dabei ist aber die übliche Zählweise in GRASSHOPPER bzw. KARAMBA zu berücksichtigen, die immer bei 0 startet. Der erste Eintrag einer Liste erhält somit immer den Index 0. Daher muss auch der erste Lastfall den Index bzw. die Lastfallnummer 0 aufweisen. Ein Sonderfall ist die Lastfallnummer „-1“. Ist eine Einwirkung so definiert, erfolgt eine Überlagerung mit allen anderen Lastfällen, was für die Schwerkraft natürlich wünschenswert ist.

Die Größe der Einwirkung kann, wie in diesem Beispiel dargestellt, variabel über einen Schieberegler definiert werden. Ihre Wirkungsrichtung ist über einen Richtungsvektor bestimmt, allfällige (Sicherheits-)Faktoren sind über zusätzliche Multiplikationskomponenten zu berücksichtigen.

Da nun alle wesentlichen Elemente des statischen Modells definiert sind, können die einzelnen Informationen zusammengefügt werden. Dies geschieht über die Schaltfläche „Assemble Model“, die somit die zentralste Stellung einnimmt. In Abbildung 4.11 ist erkennbar, dass hier alle Informationen des Modells an der linken Seite getrennt eintreffen – das sind die Elemente des Modells (Stäbe), die Auflager, die Lasten und die Gelenke – und das Ergebnis das fertige statische Modell ist.

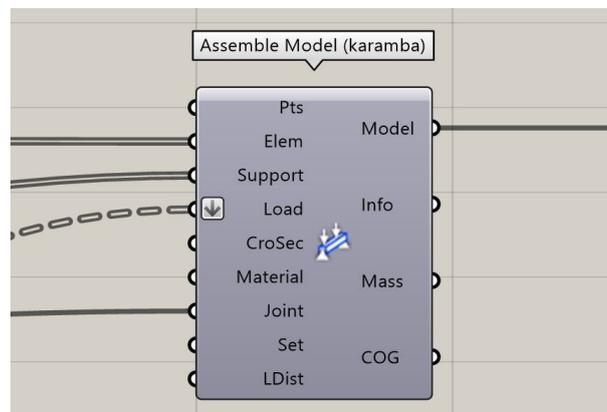


Abb. 4.11: Zusammenführen aller Informationen zu einem statischen Modell

Im Hauptfenster von RHINO sind zu diesem Zeitpunkt allerdings noch immer Linien und noch keine der zuvor definierten Daten des statischen Modells visualisiert. Um eine Darstellung der Modelldaten (Auflager, Einwirkungen, etc.) sowie der Stäbe (Querschnitte) zu erreichen, muss das Modell mit den Befehlen „Model View“ und „Beam View“ verbunden werden. Diese beiden Schaltflächen sind dann in weiterer Folge auch zur Darstellung der Berechnungsergebnisse erforderlich, weshalb zuvor die Erläuterung der Berechnung erfolgt.

4.5 Berechnung und Ergebnisse

Auch bei der Berechnung des Modells gibt es wesentliche Unterschiede zu konventionellen Statik-Programmen. Die Grundlage der Berechnung bildet zwar auch in KARAMBA wieder die in Abschnitt 3.4.1 erläuterte Methode der Finiten Elemente, der Berechnungsablauf ist jedoch

grundsätzlich verschieden, da die Berechnung des Modells nicht manuell gestartet wird. Sie erfolgt unmittelbar nach Verbindung des Modells mit der jeweiligen Berechnungskomponente. Das gesamte Modell reagiert bei Änderungen der Modellparameter, beispielsweise oben definierter Schieberegler, sofort mit einer Neuberechnung und die Ergebnisse stehen somit unmittelbar zur Verfügung. Im Gegensatz zu konventionellen Statik-Programmen, bei denen die Ergebnisse immer nur für einen expliziten Modellzustand vorliegen, können bei der Tragwerksanalyse mit KARAMBA die Auswirkungen von Veränderungen am statischen System wie bei einem Film betrachtet werden, wie es Preisinger in [12] bezeichnet. Allerdings hat dies zur Folge, dass bei großen Tragwerken die Rechenleistung des Computers permanent gefordert ist und diese Funktion (die auch deaktiviert werden kann) bei aufwändigen Modellen äußerst leistungsfähige Geräte erfordert.

Für die eigentliche Berechnung des Tragwerks bietet KARAMBA mehrere Befehle an, aus denen abhängig von der Aufgabenstellung bzw. nach baustatischem Erfordernis ausgewählt werden kann. Zur Berechnung des vorliegenden Modells kam die Komponente „AnalyzeThI“ zum Einsatz, die Berechnungen nach Theorie I. Ordnung durchführt, also ohne Untersuchung von Stabilitätsproblemen oder großen Verformungen. Neben dem berechneten Modell lässt sich aus der Berechnungskomponente auch die maximale Verformung des Modells, das Gesamtgewicht der Konstruktion sowie die elastische Verformungsenergie³ auslesen. Diese Werte erlauben etwa die Bewertung von Tragwerksvarianten im Zuge eines Formfindungsprozesses: Je effizienter (optimaler) ein Tragwerk ist, desto kleiner ist die maximale Verformung, das eingesetzte Material sowie die gesamte elastische Energie (siehe [11]). Zur grafischen Darstellung der Berechnungsergebnisse sowie Filterung der Ergebnisse nach Lastfällen benötigt KARAMBA noch die Komponenten „Model View“ und „Beam View“. Abbildung 4.12 zeigt diese drei letzten Befehle für die Berechnung eines statischen Modells mit KARAMBA.

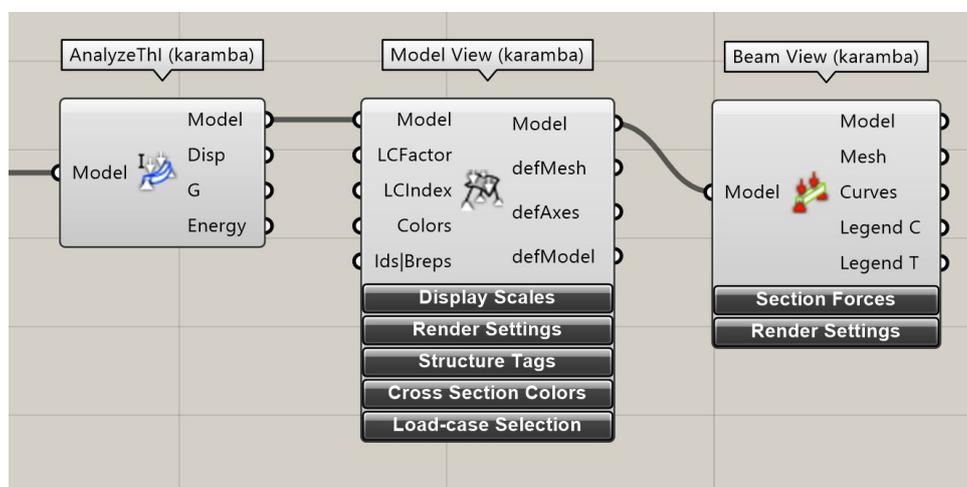


Abb. 4.12: Berechnung und Darstellung der Ergebnisse

Wie aus dieser Abbildung hervorgeht, haben diese beiden Visualisierungsbefehle verschiedene Optionen zur gefilterten Darstellung der Ergebnisse (erkennbar an den dunkelgrauen Schaltflächen). Mit der Schaltfläche „Model View“ können verschiedenste Informationen des Modells ein- oder ausgeblendet oder eine selektive Darstellung nur gewisser Lastfälle vorgenommen werden. Darüber hinaus kann diese Komponente die verformte Struktur als (neue) Geometrie interpretieren, was eine Weiterverwendung der verformten Geometrie erlaubt.

³Bei der elastischen Verformung eines Tragwerks zufolge Lasteinwirkung speichert das Tragwerk Energie, die bei Wegfall der Kraft wieder freigegeben wird.

Der Befehl „Beam View“ ermöglicht die Visualisierung von Querschnitten und Durchbiegungen sowie weitere statisch relevante Informationen wie Schnittgrößenverteilungen in den Stäben des Tragwerks. Diese Schnittgrößenverteilungen können bei dieser Komponente ebenfalls als neue Geometrie interpretiert werden, was vor allem aus tragwerksplanerischer Sicht vielfältigste Möglichkeiten bietet, um die Struktur zu optimieren. Dieser Funktion widmet sich später noch Abschnitt 4.6.1.

Bezüglich der hier verwendeten Berechnungskomponente ist zu ergänzen, dass KARAMBA selbstverständlich auch Stabilitätsuntersuchungen und Berechnungen nach Theorie II. Ordnung durchführen kann. Auf eine Aufzählung aller möglichen Berechnungskomponenten und deren Einschränkungen wird jedoch verzichtet und stattdessen auf das KARAMBA-Handbuch [11] verwiesen. Diese zeigen die Grenzen für den jeweiligen Anwendungsfall einer statischen Berechnung mit KARAMBA auf. Abbildung 4.13 bietet eine Übersicht der in diesem Kapitel erläuterten Gruppen von Komponenten zur Berechnung des Fachwerks in KARAMBA.

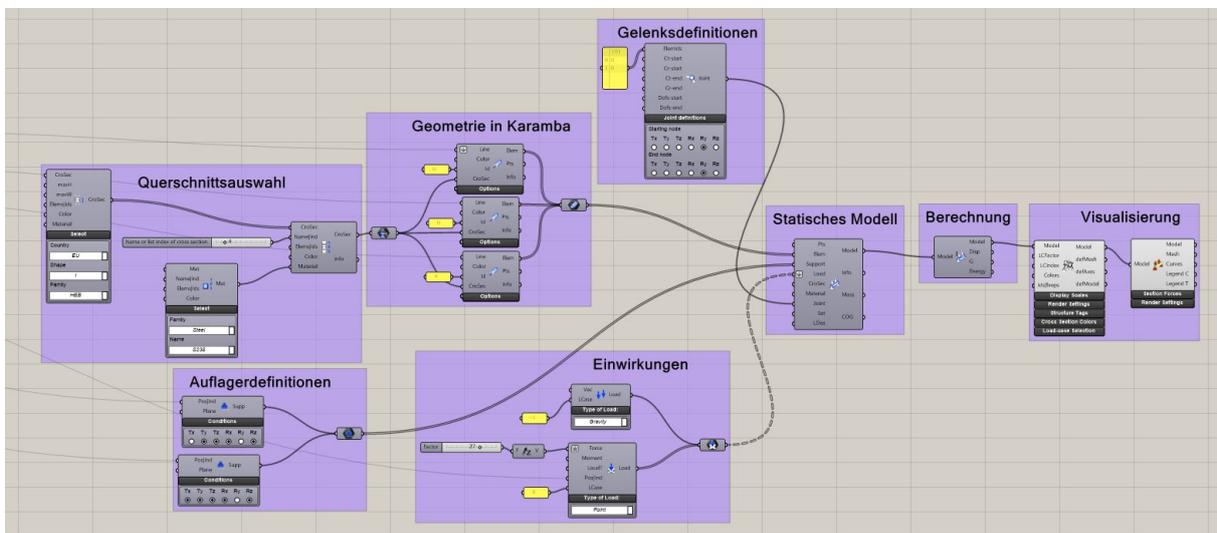


Abb. 4.13: Parametrisches statisches Modell des Fachwerks in KARAMBA

Die zu diesem programmierten Konstruktions- und Berechnungsablauf gehörige Visualisierung im Hauptfenster von RHINO ist in Abbildung 4.14 ersichtlich. Sie zeigt das berechnete statische Modell mit allen statisch relevanten Informationen und der hervorgerufenen Durchbiegung zufolge wirkender Schwerkraft und den definierten Punktlasten.

Bei Variation der Modellparameter wie Höhe und Länge des Fachwerks, Anzahl der Diagonalen, Größe der Einwirkung oder Änderung des Querschnitts passt sich das Ergebnis des Fachwerks sofort an und die Auswirkung dieser Änderungen kann in Echtzeit verfolgt werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.4.4 erläutert, sind für eine vollständige statische Berechnung Ausnutzungsgrade der verwendeten Bauteile erforderlich. Diese Nachweise sind aber bislang nicht für alle Materialien in KARAMBA implementiert. Daher kann zum aktuellen Zeitpunkt keine vollständige statische Berechnung sämtlicher Tragwerke in KARAMBA erfolgen. Lediglich für Stahlkonstruktion sind nahezu sämtliche erforderlichen Nachweise in KARAMBA verfügbar, was eine Berechnung von Ausnutzungsgraden erlaubt. Dies geschieht mit der Komponente „Utilization of Elements“, die alle Nachweise laut Eurocode 3 beinhaltet, mit der Ausnahme von Knicknachweisen, für die es jedoch andere Berechnungskomponenten gibt.

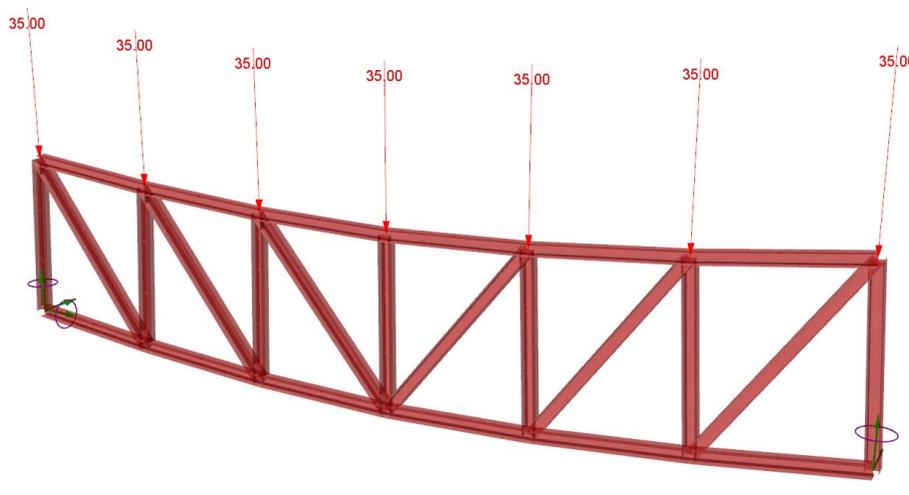


Abb. 4.14: Darstellung des statischen Modells mit Verformung

4.6 Weiteres Vorgehen

Für die weiteren Schritte nach einer erfolgten (ersten) Berechnung eines statischen Modells gibt es in KARAMBA im Wesentlichen zwei Möglichkeiten, auf die nun genauer eingegangen werden soll. Gemeint sind die Weiterentwicklung bzw. Optimierung des Tragwerks mit einer weiteren Iteration in KARAMBA selbst oder der Export in ein konventionelles Statik-Programm. Dies ist nötig zur Erstellung einer Dokumentation der statischen Berechnung oder für spezifische Berechnungen, die aus tragwerksplanerischer Sicht noch zusätzlich erforderlich, aber in KARAMBA nicht durchführbar sind (zum Beispiel Brandfallberechnung bei Holzbauten).

4.6.1 Optimierung in Karamba

Für die Optimierung von Tragwerken in KARAMBA gibt es mehrere Optionen, von denen einige nun kurz vorgestellt werden. Der Hauptteil dieser Arbeit widmet sich in der Folge einer ausführlichen Behandlung einiger dieser Optimierungsvarianten anhand einer konkreten Aufgabenstellung.

Die einfachste Variante ist die Verwendung der Berechnungskomponente „Optimize Cross Section“. Sie eignet sich am besten für Stabtragwerke aus Stahl, kann jedoch auch zur Optimierung von anderen Materialien und Schalentragwerken zum Einsatz kommen. Für die Verwendung dieser Komponente bedarf es der Definition einer „Querschnittsfamilie“. Dabei handelt es sich um eine Gruppe an ähnlichen Querschnitten. Dieser Algorithmus startet mit dem ursprünglich definierten Querschnitt jedes Elements und berechnet dessen Ausnutzung. Ist diese größer als 1 (bzw. größer als der vom Anwender definierte Wert), so wählt der Algorithmus den nächstgrößeren Querschnitt aus der vorgegebenen Querschnittsfamilie aus und kontrolliert die Ausnutzung erneut. Diese Schritte werden solange wiederholt, bis ein ausreichender Querschnitt vorliegt oder die Höchstzahl an Iterationen erreicht ist (vgl. [11]). Diese Komponente optimiert das Tragwerk also nahezu ohne Eingreifen des Anwenders hinsichtlich Tragfähigkeit. In manchen Strukturen können jedoch auch Gebrauchstauglichkeitsnachweise maßgebend sein, wie etwa maximal zulässige Verformungen. Daher erlaubt dieser Algorithmus auch die Vorgabe von zulässigen Verformungen, die in einem weiteren Schritt berechnet werden und gegebenenfalls zu einer Anpassung der Querschnitte führen. Für detailliertere Informationen zu den vom Algorithmus geführten Nachweisen wird an dieser Stelle auf das sehr ausführliche Handbuch zu KARAMBA [11] verwiesen.

Eine weitere sehr einfache Möglichkeit zur Optimierung eines Tragwerks bietet sich in der bereits kurz erwähnten Interpretation von Schnittgrößenverläufen als neue Geometrie. In der Tragwerksplanung ist es nicht unüblich, manche Strukturen zur Verringerung von Gesamtverformungen entgegen ihrer natürlichen Verformungstendenz vorzuverformen. Dazu wird beispielsweise bei einem horizontalen Träger das Verformungsverhalten zufolge seines Eigengewichts berechnet und der Träger danach mit dieser Durchbiegung, jedoch „gespiegelt nach oben“, gekrümmt hergestellt, um die Gesamtverformung im Endzustand zu reduzieren. KARAMBA erlaubt es dazu, die Verformungslinie eines Tragwerks unter der negativen Schwerkraft als neue Geometrie aufzufassen und in einer zweiten Entwurfsiteration neuerlich zu berechnen. Das bedeutet also, dass es mehr oder weniger ein zweites statisches Modell gibt, das sich über die Ergebnisse eines ersten statischen Modells definiert.

Die letzte hier vorgestellte Optimierungsvariante in KARAMBA ist die Verwendung sogenannter genetischer Algorithmen, wie sie im Funktionsspektrum von GRASSHOPPER integriert sind. Die folgende Beschreibung ist [14] sinngemäß entnommen. Genetische Algorithmen erhalten ihre Bezeichnung anhand ihrer Funktionsweise, die sich an der natürlichen Selektion der Natur orientiert. Es werden unter der Verwendung von zufällig ausgewählten Werten (Elterngeneration) Ergebnisse generiert (Nachkommenpopulation) und deren Eignung zur Erfüllung einer Fitnessfunktion überprüft. Daraufhin werden die am besten geeigneten „Nachkommen“ – also die Ergebnisse des ersten Schrittes – für die Produktion der Ergebnisse der „Nach-Nachkommenpopulation“ verwendet. Mit dieser Funktionsweise nähert sich der Algorithmus immer mehr dem bestmöglichen Ergebnis an und liefert brauchbare Optimierungsergebnisse. Diese Funktionsweise ist dabei für beliebige Optimierungsaufgaben und Problemstellungen einsetzbar. Vereinfacht bedeutet das, dass genetische Algorithmen Aufgaben nicht nur lösen, sondern deren Ergebnisse über die *Fitnessfunktion* auch evaluieren können und daraufhin in der Lage sind, sich in der nächsten *Generation* an die beste Lösung „heranzutasten“. Das Wesen einer Problemlösung durch genetische Algorithmen ähnelt also jenem einer statischen Berechnung mit ihrer iterativen Berechnungsweise, bei der die Ergebnisse durch einen Tragwerksplaner evaluiert und die Ausgangslage gegebenenfalls angepasst wird. Diese Möglichkeit der Optimierung und eine detailliertere Beschreibung genetischer Algorithmen ist im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Inhalt von Kapitel 5.

4.6.2 Export in ein konventionelles Statik-Programm

Auch das KARAMBA-Handbuch [11] hält ausdrücklich fest, dass KARAMBA nicht den Anspruch stellt, konventionelle Statik-Programme zu ersetzen, sondern will als Ergänzung zu diesen auftreten. Daher ist die Möglichkeit des Exports eines statischen Modells von immenser Bedeutung, um die in KARAMBA geleistete Vorarbeit zum Geometrieaufbau nicht in einem anderen Programm wiederholen zu müssen. Die zwei häufigsten Gründe für einen notwendigen Export sind einerseits die Erstellung einer Dokumentation des statischen Modells sowie der Ergebnisse und andererseits die erforderliche Durchführung zusätzlicher Berechnungen auf Grund von unzureichender Genauigkeit oder nicht vorhandener Möglichkeit in KARAMBA.

Für den Export eines Rechenmodells gibt es zwei verschiedene Möglichkeiten: den Direkt-Export aus KARAMBA oder der „Umwegs“ über RHINO. Die erste Möglichkeit findet über die selbsterklärende Komponente „Export Model to DStV“ statt. Sie erzeugt aus dem in KARAMBA vorhandenem statischen Modell ein Dateiformat, das seinen Namen vom Deutschen Stahlbauverband bekommen hat und von Programmen wie Dlubal RStab oder RFEM gelesen werden kann. Über diese Komponente ist es möglich, sämtliche in KARAMBA definierten Lasten sowie Querschnittsinformationen von Stäben zu exportieren. Der Export von Flächen ist über diese Komponente jedoch nicht möglich, weshalb an dieser Stelle nun die zweite Variante folgt.

Sie beschreibt die Übertragung der mit GRASSHOPPER und KARAMBA erstellten Geometrie bzw. Bauteile in RHINO. Wie zu Beginn dieses Kapitels festgehalten, dient RHINO zur Konstruktion von exakter starrer Geometrie und darüber hinaus zur Visualisierung der Befehle und Abläufe in GRASSHOPPER und KARAMBA. Geometrie, die über Befehle bzw. Befehlsketten in GRASSHOPPER entsteht, ist dort also nicht abgespeichert. Durch die Funktion „bake“ kann die in GRASSHOPPER erstellte Geometrie jedoch in die RHINO-Datei übertragen und von dort über die in RHINO implementierten Export-Möglichkeiten exportiert werden. Diese Export-Möglichkeiten in RHINO im Sinne von vorhandenen Dateiformaten für den Export sind natürlich weitaus umfangreicher als bei der direkten Option in KARAMBA.

Die nach dem Export notwendigen Schritte zur Optimierung oder weiteren Berechnung des Tragwerks finden somit nicht mehr in KARAMBA statt und es wird an dieser Stelle auf den Inhalt von Kapitel 3 verwiesen.

4.7 Unterschiede zu konventionellen Statik-Programmen

Wie auch bereits am Beginn des vorliegenden Kapitels angemerkt, ist der Funktionsumfang der parametrischen Berechnungssoftware KARAMBA ein gänzlich anderer als jener von konventionellen Statik-Programmen. Die Stärken von KARAMBA liegen eindeutig in den umfangreichen Möglichkeiten eines parametrischen Aufbaus von Berechnungsmodellen, die ihrerseits wiederum die Grundlage für die Anwendung von Algorithmen auf verschiedenste Aufgabenstellungen (nicht nur in der Tragwerksplanung) bilden. Neben diesen beiden Aspekten darf allerdings auch ein weiterer wesentlicher Unterschied zu klassischer proprietärer Software nicht außer Acht gelassen werden: Die nahtlose Einbindung von KARAMBA in die Arbeitsumgebung von GRASSHOPPER erlaubt problemlos die Verwendung aller durch die GRASSHOPPER-Community programmierten Werkzeuge und zusätzlichen Programmen, die einer ständigen Erweiterung und Überarbeitung unterliegen – wie etwa die oben bereits angeführten Optimierungsalgorithmen, die sich teilweise als eigenständige, von KARAMBA unabhängige Komponenten verstehen. Dieser Umstand führt zu der Tatsache, dass der Funktionsumfang von GRASSHOPPER (und damit selbstverständlich auch jener von KARAMBA) praktisch täglich zunimmt, ohne jedoch einer Abhängigkeit von nur einer einzigen Entwicklerstelle zu unterliegen.

Den für den Einsatz in der Tragwerksplanung unzureichenden bzw. fehlenden Funktionen kann dabei durch den Export und die weiterführende Analyse in einem konventionellen Statik-Programm entgegengewirkt werden. Die durch die Lektüre dieses Kapitels und der Erläuterungen aus Kapitel 3 sichtbar gewordenen Unterschiede erlauben nun eine deutliche Abgrenzung der Aufgaben dieser beiden Programme. Damit liegt auch der Schluss nahe, dass eine *ergänzende* Verwendung beider Programmtypen nicht nur den Arbeitsablauf in der Tragwerksplanung erleichtert, sondern auch neue Möglichkeiten der Berechnung (und damit der Planung und Herstellung) von Tragwerken eröffnet.

Im weiteren Verlauf dieser Diplomarbeit sollen nun anhand einer realen Aufgabenstellung ebendiese Möglichkeiten und Potentiale des kombinierten Einsatzes beider Programmtypen aufgezeigt werden.

Kapitel 5

Projektstudie

Der nun folgende Hauptteil dieser Diplomarbeit soll eine Möglichkeit aufzeigen, wie die in Kapitel 3 und 4 beschriebenen Programmfunktionen miteinander kombiniert werden können. Diese Kombination erlaubt eine Vereinigung der Vorteile eines parametrischen Berechnungsmodells mit jenen eines konventionellen Statik-Programmes. Selbstverständlich würde es den Umfang einer Diplomarbeit sprengen, alle Einsatzmöglichkeiten parametrischer Berechnungsmodelle anhand konkreter Aufgabenstellungen aufzuzeigen. Die unumgängliche Selektion veranlasste daher den Autor dieser Arbeit, einen konkreten Einsatzbereich bzw. eine konkrete Aufgabenstellung auszuwählen und im Rahmen dieser Diplomarbeit deren Bedeutung für die Tragwerksplanung aufzuzeigen. Die Entscheidung fiel dabei auf die Optimierung von Tragwerken mithilfe genetischer Algorithmen, da dies einen neuartigen Berechnungsansatz entspricht, der jedoch zugleich dem Wesen einer statischen Berechnung (und Optimierung) sehr ähnlich ist (vgl. Abschnitt 4.6.1). Ziel ist es, eine vorhandene Tragstruktur in KARAMBA unter Zuhilfenahme eines genetischen Algorithmus hinsichtlich Materialeinsatz und Effizienz zu optimieren und die erhaltene Tragstruktur anschließend in RFEM zu überprüfen. Um die Anschaulichkeit und den Nutzen dieser Kombination beider Programmtypen noch stärker zu verdeutlichen, bedient sich dieses Kapitel eines realen Projekts, welches im folgenden Abschnitt vorgestellt wird. Wesentlicher Bestandteil dieses Kapitels ist darüber hinaus die detaillierte Dokumentation des Workflows, den Abschnitt 5.2 übersichtlich erläutert. Durch die darauffolgende „Schritt-für-Schritt-Anleitung“ soll diese Arbeit die Simplizität und nicht zuletzt den Nutzen der Anwendung genetischer Algorithmen für Problemstellungen in der Tragwerksplanung unterstreichen. Damit soll diese Arbeit einen Beitrag leisten, diese Methode zur Bearbeitung von Aufgabenstellungen in der Tragwerksplanung zu verbreiten.

5.1 Projektbeschreibung und Aufgabenstellung

Im Kontext des 50-jährigen Bestandsjubiläums der Johannes Kepler Universität Linz im Oktober 2016 erfolgte die Ausschreibung eines Architekturwettbewerbs zur Umgestaltung, Sanierung und Erweiterung des Universitätscampus [2], den das Linzer Architekturbüro *Riepl Riepl Architekten ZT GmbH* für sich entscheiden konnte. Den Auftrag für die Tragwerksplanung erteilte das Architekturbüro dem Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* aus Wien. Der gesamte Wettbewerb umfasst vier Bauteile: zwei Neubauten sowie zwei Aufstockungen bestehender Universitätsgebäude, darunter auch der Umbau der Universitätsbibliothek, der als thematische Grundlage für dieses Kapitel dient. Die nachfolgende Gebäudebeschreibung entstand auf Basis der Einreichpläne von *Riepl Riepl Architekten ZT GmbH* mit dem Planstand vom 20.12.2017 in Kombination mit dem Tragwerkskonzept entwickelt von *Bollinger und Grohmann ZT GmbH*.

Das Bestandsgebäude aus den 1980er Jahren ist eine Stahlbetonkonstruktion, die sich über vier Geschoße erstreckt. Neben einem gänzlich unterirdischen Kellergeschoß verfügt es über drei oberirdische Geschoße, wobei das Erdgeschoß auf Grund des vorliegenden Geländeverlaufs nur teilweise über dem Geländeniveau liegt. Die Hauptabmessungen des im Grundriss annähernd

rechteckigen Gebäudes betragen rund 55 m mal 40 m. Die Gebäudehöhe beträgt derzeit rund 13 m. Der vertikale Lastabtrag im Bestand erfolgt hauptsächlich über Stahlbetonstützen, während die horizontale Aussteifung des Gebäudes drei Stahlbetonkerne gewährleisten, die auch zur vertikalen Erschließung dienen. Im Zuge des Umbaus und der Erweiterung des Bibliotheksgebäudes wird dieses um ein Geschöß aufgestockt. Die Geometrie des neuen Baukörpers orientiert sich dabei am Bestandsgebäude. Seine Abmessungen betragen rund 55 m mal 52 m, die Höhe der Aufstockung ist mit rund 7 m geplant. Dieses zusätzlich geschaffene dritte Obergeschoß ist jedoch im Grundriss in Richtung der kürzeren Gebäudeseite verschoben, weshalb ungefähr die Hälfte der Aufstockung über das Bestandsgebäude hinausragt und in diesem Bereich von sechzehn vertikalen Stützen unterstellt ist. Diese Stützen weisen einen zwischen 7,5 m und 10,5 m variierenden Achsraster auf. Zur direkten Erschließung des neuen Geschößes vom Vorplatz der Bibliothek aus dient eine ebenfalls neu zu errichtende Außentreppe. Abbildung 5.1 zeigt ein Rendering des geplanten Bibliotheksgebäudes mit Vorplatz.



Abb. 5.1: Rendering des neuen Bibliotheksgebäudes [Tobias Riepl]

Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Diplomarbeit (Frühjahr 2018) steht dieses Projekt bereits am Übergang zwischen Einreichplanung und Ausführungsplanung. Das bedeutet in der Folge auch, dass die in Abbildung 5.1 dargestellte Tragstruktur in ihren groben Zügen fixiert ist und allenfalls nur mehr kleinere Änderungen am Tragwerk auftreten. Unter Beibehaltung der projektspezifischen Rahmenbedingungen sowie Gebäudeabmessungen ist in Hinblick auf die Tragstruktur allerdings ein Optimierungspotential gegeben, welches durch eine Beschreibung des Lastabtrags im aktuellen Tragwerk sichtbar wird und auch auf das äußere Erscheinungsbild des Gebäudes einen bedeutsamen Einfluss hat.

Der vertikale Lastabtrag des neuen Baukörpers erfolgt für den auskragenden Bereich über neu errichtete Stützen und für den restlichen Teil der Aufstockung über die Bestandsstützen. Da einige dieser Stützen allerdings keine zusätzlichen Tragreserven besitzen, sind für 30 Stützen (über alle Bestandsgeschoße betrachtet) Verstärkungsmaßnahmen vorgesehen. Für die Beschreibung des horizontalen Lastabtrags sind die beiden orthogonalen Wirkungsrichtungen X und Y definiert. Die horizontale Aussteifung des Gebäudes in X-Richtung erfolgt einerseits über die Ausbildung einer Außenstütze als massive Wandscheibe (ausgerichtet in Richtung X) und andererseits über die bestehenden Gebäudekerne. Da sich sowohl diese Scheibe als auch die Kerne bis in die neue Dachebene durchziehen, ist es möglich, auch horizontale Kräfte in der Dachebene über denselben Weg abzutragen. Der horizontale Lastabtrag in Y-Richtung (quer zur Wandscheibe) findet ausschließlich über die Gebäudekerne statt, von denen zwei allerdings dazu auch keine Tragreserven mehr (in Richtung Y) besitzen und dementsprechend verstärkt werden müssen. Wegen dieser zu geringen Tragreserven ist es auch angedacht, dass das Dach keine horizontalen Kräfte in Y-Richtung direkt an den Kern weiterleitet. Stattdessen unterstützen zwei weitere Schubwände im Innenraum der Aufstockung den horizontalen Lastabtrag in Y-Richtung, indem die Kräfte aus der Dachebene über ebendiese Schubwände in die neue Decke über dem Bestandsgebäude gelangen und von dort erst in die Kerne. Als Verstärkungsmaßnahmen für die Bestandsstützen sind zusätzliche Stahlstützen geplant, die unmittelbar an die bestehenden Stahlbetonstützen angebracht werden. Die Ertüchtigungsmaßnahmen in den Gebäudekernen für den zusätzlichen Lastabtrag in Y-Richtung beinhalten das Einschlitzen von Stahl-Laschen und Aufkleben von CFK¹-Lamellen an den Kernwänden.

Die Beurteilung der Tragreserven des Bestandsobjekts erfolgte in einem dreidimensionalen statischen Modell, erstellt im Zuge der Projektbearbeitung vom Büro Bollinger und Grohmann. Eine perspektivische Ansicht der Tragstruktur des Bestandsgebäudes sowie der Aufstockung zeigt Abbildung 5.2. In diesem Modell sind neben der massiven Wandscheibe in X-Richtung auch die beiden kleineren Wandscheiben in Y-Richtung im Innenraum zur Umleitung der Horizontalkräfte von der Dachscheibe in die Stahlbetonplatte leicht erkennbar.

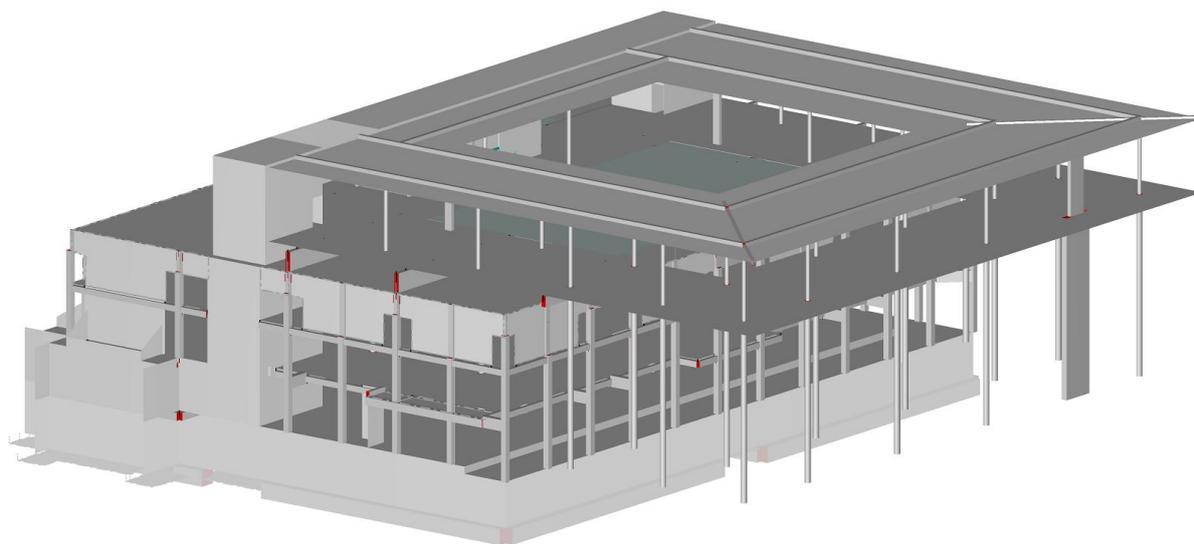


Abb. 5.2: Gesamtmodell der Aufstockung inklusive Bestandstragwerk modelliert in RFEM

¹CFK=Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff

Neben dem Umstand, dass Verstärkungsmaßnahmen im Bestand sehr kostspielig sind, hat das Aussteifungskonzept auch einen Einfluss auf das architektonische Erscheinungsbild. Selbst für Architektur-Laien ist erkennbar, dass die zur horizontalen Aussteifung erforderliche massive Wandscheibe unter fünfzehn kreisrunden Stützen optisch eindeutig hervorsteicht. Die Verstärkungsmaßnahmen für den vertikalen Lastabtrag sind wegen des zusätzlichen Gewichts der Aufstockung unvermeidbar. Die Verstärkungsmaßnahmen an den Kernen sowie die Ausbildung einer Wandscheibe, die lediglich aus dem horizontalen Lastabtrag resultieren, könnten jedoch möglicherweise durch alternative Aussteifungskonzepte reduziert werden oder im besten Fall sogar entfallen. Daher liegt der Gedanke nahe, über alternative Tragwerksvarianten nachzudenken. Als eine mögliche Variante bieten sich beispielsweise schräg gestellte Stützen an Stelle der vertikalen Ausrichtung an. Eine derartige Stützenanordnung kann – richtig platziert – sowohl vertikale als auch horizontale Lasten des Tragwerks aufnehmen und sicher in den Untergrund ableiten. Jedoch ist eine schräge Positionierung von Stützen in einem Tragwerk sehr komplex und mit konventionellen Methoden sehr aufwändig, da die Anzahl der möglichen (und zu berechnenden) Tragwerksvarianten durch eine verschiedenartige Neigung jeder Stütze in mehrere Richtungen schlagartig ansteigt. Problemstellungen, die sich unter anderem durch eine aufwändige Berechnung oder eine große Zahl an zu evaluierenden Lösungsmöglichkeiten definieren, sind allerdings mit Computern relativ einfach zu bewerkstelligen – vorausgesetzt man verfügt über das notwendige „Werkzeug“.

Die Aufgabe und das Ziel dieses Kapitels sind folglich, jene Stützenstellung(en) zu finden, die eine ausreichende horizontale Aussteifung gewährleisten und darüber hinaus natürlich auch weitere Kriterien einer statischen Berechnung berücksichtigen (wie etwa zulässige Verformungen des Tragwerks oder Materialbeanspruchungen). Dadurch sollen die zur Aussteifung erforderliche Wandscheibe überflüssig und die Verstärkungsmaßnahmen im Bestand auf ein absolutes Minimum reduziert werden.

Um die beste Tragwerkslösung zu finden, ist es erforderlich, jede einzelne Tragwerksvariante (Stützenanordnung) zu berechnen und die Ergebnisse hinsichtlich den allgemeinen Kriterien einer statischen Berechnung zu überprüfen. Danach ist ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Varianten untereinander möglich, der in der Folge auf die geeignetste Anordnung führt. Die vorliegende Aufgabenstellung der Variation von Stützenstellungen mit einhergehender statischer Berechnung und Evaluierung der Ergebnisse eignet sich demnach sehr gut für die Anwendung von genetischen Algorithmen, wie sie im Funktionsumfang von GRASSHOPPER zur Verfügung stehen und dadurch eine Kombination mit den Funktionen bzw. Befehlen von KARAMBA erlauben.

5.2 Vorgangsweise und Workflow

Mit Vorliegen der Aufgabenstellung können somit nun die wesentlichen Arbeitsschritte sowie deren Abfolge festgelegt und genauer erläutert werden. Dies soll dem Leser einen sanfteren Einstieg in den Hauptteil dieser Arbeit ermöglichen und die Nachvollziehbarkeit der einzelnen Abläufe stärken. Die Projektbearbeitung startet mit der Geometrie-Modellierung in RHINO bzw. GRASSHOPPER und setzt sich in einer statischen Berechnung mit KARAMBA fort. Das für GRASSHOPPER verfügbare Plug-in OCTOPUS optimiert anschließend das Ausgangsmodell, bevor im darauffolgenden Schritt für das sodann optimierte Rechenmodell der Export nach RFEM für die weitere Bearbeitung und detailliertere statische Bemessung bzw. Kontrolle erfolgt. Abbildung 5.3 zeigt eine grafische Darstellung dieses Workflows.

Wie bei jeder statischen Berechnung steht ganz am Beginn die Abbildung der Geometrie sowie die Abstrahierung des Baukörpers im Vordergrund. Die unveränderliche Grundgeometrie (fixe Gebäudeabmessungen, keine Parametrisierung erforderlich) wird beim vorliegenden Projekt direkt

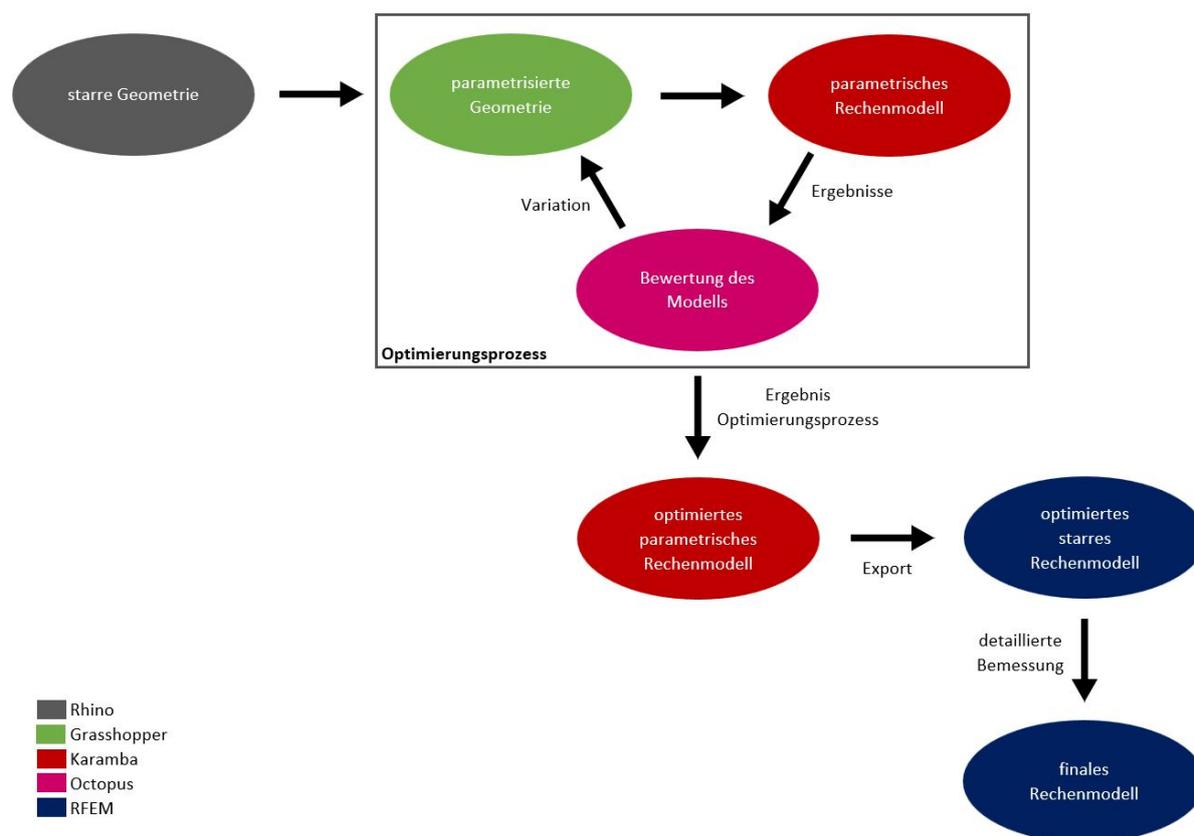


Abb. 5.3: Workflow bei der Bearbeitung des Projekts

in RHINO modelliert. Die im Zuge des Optimierungsprozesses veränderlichen Teile der Struktur (hier: Stützenpositionen) werden jedoch für die spätere Verwendung im genetischen Algorithmus in GRASSHOPPER erzeugt. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, bereits bei der Modellierung der parametrischen Struktur die Arbeitsweise des genetischen Algorithmus zu berücksichtigen. Wie in Kapitel 4 mehrmals betont, gibt es für die Umsetzung einer Parametrisierung immer mehrere verschiedene Möglichkeiten. Je komplexer eine Aufgabenstellung jedoch aufgebaut ist, desto aufwändiger und zeitintensiver gestaltet sich allerdings auch der Optimierungsprozess.

Sobald die Geometrie erzeugt ist, erstellt KARAMBA mit den baustatisch erforderlichen Zusatzinformationen das statische Rechenmodell. Dabei ist bereits zu definieren, welche Bauteile am späteren Optimierungsprozess teilnehmen sollen. Der Optimierungsvorgang selbst läuft über das bereits erwähnte Plug-in OCTOPUS für GRASSHOPPER ab. Es erlaubt die Anwendung eines genetischen Algorithmus, der nach mehreren Zielen sucht und damit auch einen Lösungsraum mit mehreren optimalen Ergebnissen bereitstellt. Diese Möglichkeit der Optimierung nach mehreren Zielen ist auch die Voraussetzung für eine Anwendung auf Problemstellungen in der Tragwerksplanung, da ein *optimales* statisches Modell nie nur von einem Parameter abhängig ist. Eine genauere Vorstellung dieses Plug-ins sowie die Definition der Optimierungsziele erfolgt allerdings erst in Abschnitt 5.5.

Liegen ausreichend gute Ergebnisse des Optimierungsprozesses vor, können mehrere gute Tragwerksvarianten in RHINO visualisiert und je nach gewünschter Gewichtung der verschiedenen Optimierungsziele das geeignetste ausgewählt werden. Das Ergebnis ist sodann das optimierte

statische Modell und der nächste Schritt der Export in ein konventionelles Statik-Programm für eine detailliertere statische Berechnung, ohne jedoch wesentliche Änderungen am statischen Modell vorzunehmen. Diese vertiefte Bemessung ist deshalb erforderlich, da das in KARAMBA optimierte Tragwerk großteils aus Stahlbeton besteht, dessen Bemessung in KARAMBA derzeit noch nicht dem in den Eurocodes geforderten Stand der Technik entspricht. Diese Tatsache ermöglicht jedoch auch einen interessanten Vergleich, wie weit bzw. wie genau die in KARAMBA erhaltenen Ergebnisse an jene aus RFEM heranreichen. Den Abschluss der Projektbearbeitung bildet die Erläuterung, wie eine Dokumentation der erhaltenen Ergebnisse erfolgen kann.

5.3 Erzeugen der Geometrie in Rhino und Grasshopper

Am Beginn der Bearbeitung stellt sich die Frage, welche Informationen das Geometriemodell bzw. in weiterer Folge das Rechenmodell des realen Bauwerks für die vorliegende Aufgabenstellung beinhalten soll. Da es in Hinblick auf den Optimierungsprozess ratsam ist, die Modellgröße so gering wie möglich zu halten, wird vom gesamten Tragwerk lediglich die halbe Aufstockung (jener über den Bestand hinausragende Teil) und davon nur die Stahlbeton-Platte mit den darunterliegenden Stützen modelliert. Weil sich eine manuelle Modellierung starrer Geometrie in RHINO wesentlich einfacher gestaltet als etwa in GRASSHOPPER, übernimmt RHINO die Modellierung sämtlicher Teile des Tragwerks, die keine parametrischen Eigenschaften aufweisen müssen. Dies betrifft hauptsächlich die Stahlbetonplatte selbst, deren Außenabmessungen fixiert sind. Dazu werden in RHINO drei ebene Teilflächen erstellt, die die Stahlbetonplatte idealisieren. Die Stützen im Inneraum der Aufstockung, auf denen das Dachtragwerk aufliegt, sind ebenfalls als starre Geometrie anzusehen und leiten darüber hinaus Lasten in die eben modellierte Platte ein. Deren Modellierung erfolgt allerdings nur über Punkte, die im späteren Rechenmodell in KARAMBA als Lastangriffspunkte für das Eigengewicht des Dachtragwerks sowie der Stützen selbst dienen. Für den Optimierungsprozess ist es auch erforderlich, dem Algorithmus einen Bereich für die Platzierung der Stützenfüße zu definieren. Dieser ist ebenfalls als unveränderlich anzusehen und somit Teil der starren Modellgeometrie in RHINO. Abbildung 5.4 zeigt die starre Modellgeometrie, wie sie in RHINO modelliert ist.

In Abbildung 5.4 ist die in 13 m Höhe „schwebende“ idealisierte Plattengeometrie ersichtlich sowie deren Umrisse am Boden mit dem umlaufend um 2 m erweiterten Bereich für die Stützenfüße. Die Bemaßung zwischen den einzelnen Punkten der Fläche beschreibt den Abstand der Innenstützen zueinander.

Im nächsten Schritt erfolgt die Erweiterung des Geometriemodells in GRASSHOPPER um jene Teile der Struktur, die parametrisch zu definieren sind (hier sind das die Stützen des Tragwerks), um sie in weiteren Verlauf dieser Arbeit einer Optimierung mit OCTOPUS unterziehen zu können. Dieser Teil des geometrischen Modells ist sozusagen das Herzstück des gesamten Projekts, da der Optimierungsprozess nur in einem parametrischen Modell möglich ist. Die Funktionsweise eines genetischen Algorithmus (vgl. auch Abschnitt 5.5.1) baut darauf auf, dass dieser einen Werteraum zur Verfügung gestellt bekommt, aus dem er mögliche Lösungen generieren kann. Je größer dieser Werteraum der Ausgangswerte ist, desto größer ist naturgemäß auch der Lösungsraum. Daher gilt es, den goldenen Weg der Mitte zu finden: Viele Parameter ermöglichen eine detaillierte Modellierung, bedeuten jedoch gleichzeitig einen riesigen Lösungsraum und dementsprechend lange Rechenzeit, bis der Algorithmus auf gute Ergebnisse stößt. Im Gegensatz dazu kann allerdings eine zu vereinfachte Schaltung auch nur sehr vereinfachte bzw. ungenaue Ergebnisse liefern, diese dafür in kürzerer Zeit.

Für die Qualität der Ergebnisse aus dem Optimierungsprozess kommt es auch auf die Qualität der Modellierung des Tragwerks an. Ein Algorithmus kann nicht „denken“, sondern nur Zahlen

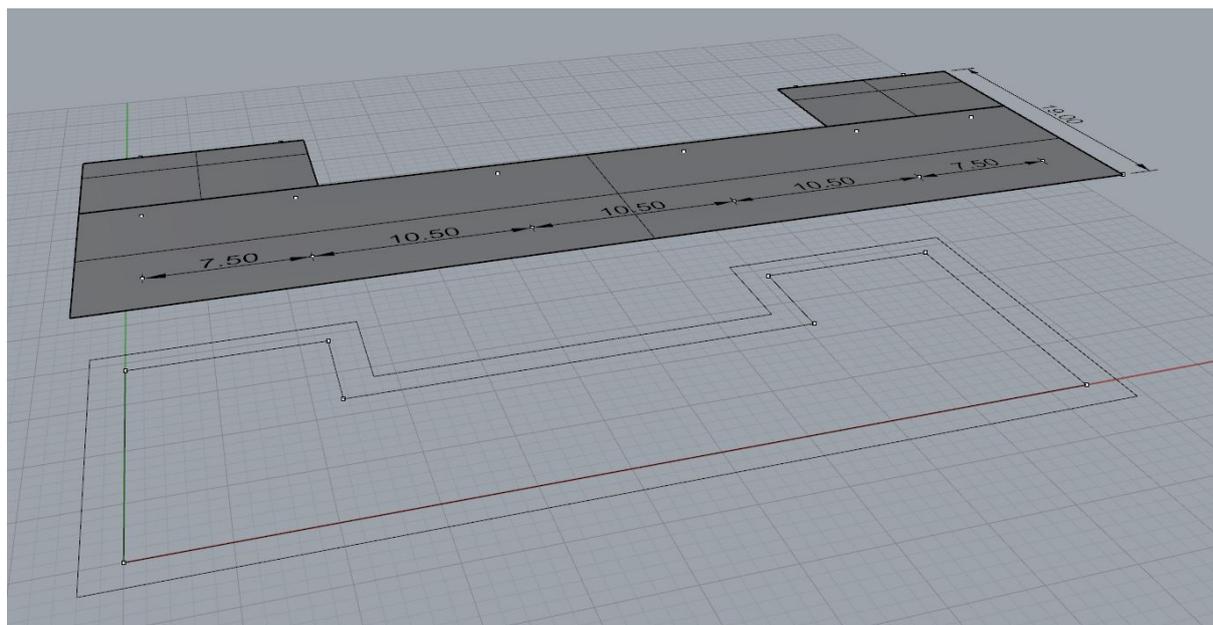


Abb. 5.4: Starre Modellgeometrie in RHINO modelliert

miteinander kombinieren und die Ergebnisse, die wiederum in Zahlen ausgedrückt werden, miteinander vergleichen. Erfahrung und Wissen des Anwenders – bei der vorliegenden Aufgabenstellung „Ingenieurverstand“ – sollten daher in Einschränkungen der Suchmöglichkeiten des Algorithmus resultieren. Im Fall des vorhandenen Modells stellt sich nun die Frage, ob es sinnvoll ist, alle 16 Stützen frei bewegen zu lassen oder deren Bewegungsmöglichkeiten einzuschränken. Die Tatsache, dass es aus tragwerksplanerischer Sicht immer besser ist, Stützen geschoßweise miteinander zu verbinden, sie also „übereinander“ zu platzieren, führt zu der Einschränkung, dass die Position der Stützenköpfe nicht variiert werden soll, sondern diese direkt an die Innenstützen der Aufstockung anschließen. Die Anzahl der Parameter zur exakten Beschreibung einer Stützenstellung halbiert sich demnach und damit einhergehend halbiert sich auch der Werteraum der Ausgangswerte. Eine weitere wesentliche Überlegung im Zusammenhang mit der Optimierung durch genetische Algorithmen ist die Kausalität zwischen Ausgangs- und Lösungswerten. Kleine Veränderungen im Werteraum der Ausgangswerte sollen folglich auch zu kleinen Veränderungen im Lösungsraum führen. Andernfalls sind die Ergebnisse für den Algorithmus nicht „nachvollziehbar“, was eine Evaluierung der Ergebnisse erschwert. Abbildung 5.5 zeigt die Schaltung für die in GRASSHOPPER erstellte variable Geometrie für die Stützenstellungen.

Die parametrische Definition der Stützenstellung erfolgt über ein System aus Polarkoordinaten, in dem die Schiefstellung einer Stütze durch deren Drehung im Grundriss und Winkel zur Vertikalen definiert ist. Dies sind somit auch bereits jene beiden Werte einer Stütze, die der genetische Algorithmus verändern kann, um eine andere Schiefstellung zu erreichen. Die Definition der Werterräume für die Ausgangswerte erfolgt in GRASSHOPPER mithilfe sogenannter „Gene-Pools“. Der erste Gene-Pool beinhaltet die Werte für die Drehung einer Stütze im Grundriss, der zweite jene für den Winkel einer Stütze zur Vertikalen. Die Drehung der Stützen im Grundriss ist zwischen 0° und 360° möglich, jedoch nicht in 1° -Schritten (das wären 361 Werte pro Stütze für die Drehung im Grundriss), sondern in 10° -Schritten, was zu einer weiteren Reduktion der Parameteranzahl führt. Gleichzeitig hat diese Einschränkung praktisch keinen Einfluss auf das Finden der optimalen Stützenstellung – immerhin beträgt der maximale Abstand (bei

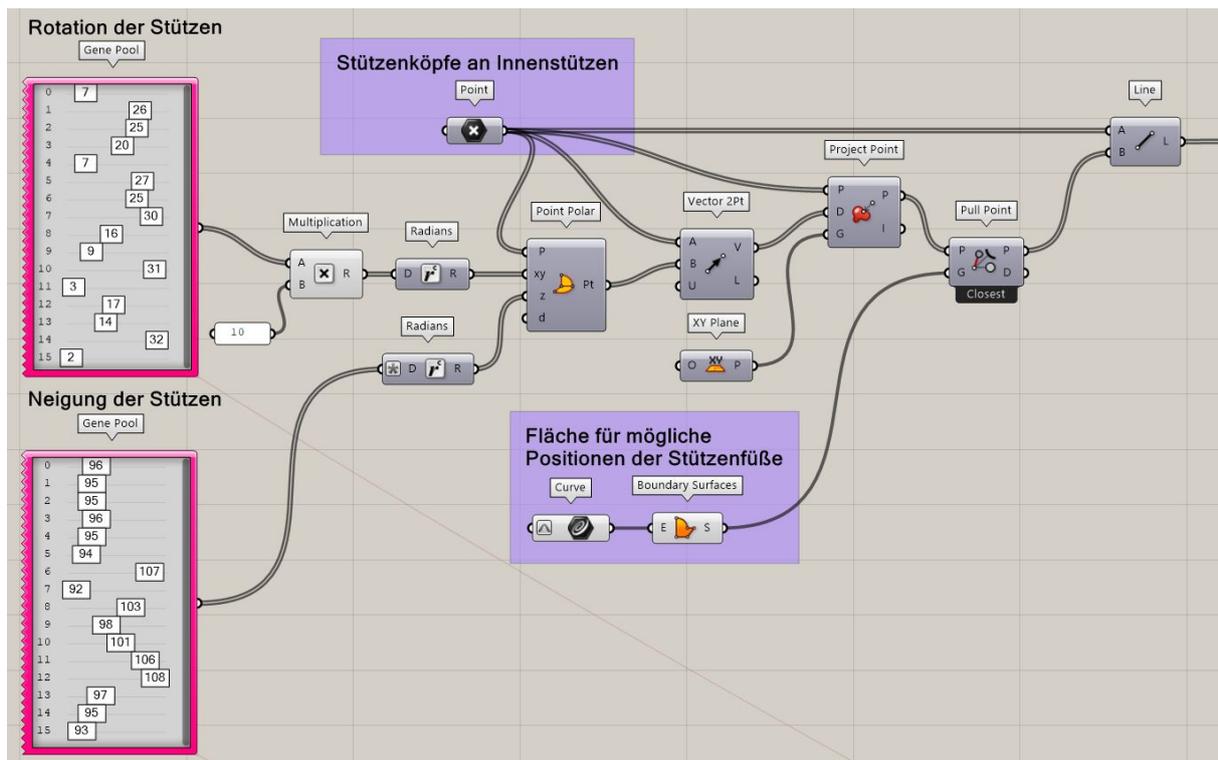


Abb. 5.5: Definition der variablen Stützenstellungen in GRASSHOPPER

20° Neigung) zweier möglicher Fußpunkte derselben Stütze nur 0,82 m. Da sich die Drehung außerdem am globalen Koordinatensystem in RHINO orientiert, dem auch die Geometrie der Platte angepasst ist, ist eine Anordnung der Stützen in Richtung der orthogonalen Windrichtungen (0°, 90°, 180° 270°) möglich. Die Neigung im Aufriss ist zwischen 0° und 20° möglich, erfolgt jedoch in 1°-Schritten. Diese Definition erleichtert auch hier das Einbringen von Ingenieurverstand, indem sehr anschaulich der maximal zulässige Winkel zwischen Stütze und Vertikaler festgelegt werden kann.

Die Parameter des ersten Gene-Pools können daher die Werte 0–36 annehmen, erfahren jedoch eine Multiplikation mit dem Faktor 10, damit sich ein Bereich zwischen 0° und 360° ergibt. Die Parameter des zweiten Gene-Pools bewegen sich zwischen den Extremwerten 90 und 110, wobei 90 einer vertikalen Stütze und 110 einer 20° geneigten Stütze entspricht. Die Werte des Gene-Pools werden zur weiteren Verwendung in GRASSHOPPER in Radian umgerechnet und dann an die Komponente „Point Polar“ weitergegeben. Diese Komponente benötigt als Informationen eine Liste an Punkten (hier: die Innenstützen bzw. Kopfenden der Außenstützen), die eine Drehung erfahren sollen, sowie die Winkel der gewünschten Drehung in der x-y-Ebene und in Richtung der globalen z-Achse. Standardmäßig beträgt die Entfernung zwischen neuem, gedrehten Punkt und Ausgangspunkt 1 m. Die volle Stützenlänge ist erreicht, wenn dieser Punkt durch die Verlängerung auf die Ebene $z = 0$ trifft. Die Komponente „Project Point“ ermöglicht genau diese Verlängerung entlang eines vorgegebenen Vektors bis zu einer definierten Ebene. Der dafür erforderliche Vektor ist festgelegt durch die Verbindungslinie zwischen Ausgangspunkt und dem soeben erstellten, gedrehten Punkt mit der Distanz 1 m. Da es durch diese Art der Konstruktion passieren kann, dass eine Stütze sehr weit über den Abschluss des Gebäudes hinausragt, kommt noch eine weitere Komponente hinzu. Die Komponente „Pull Point“ zieht – wie der Name bereits verrät – einen

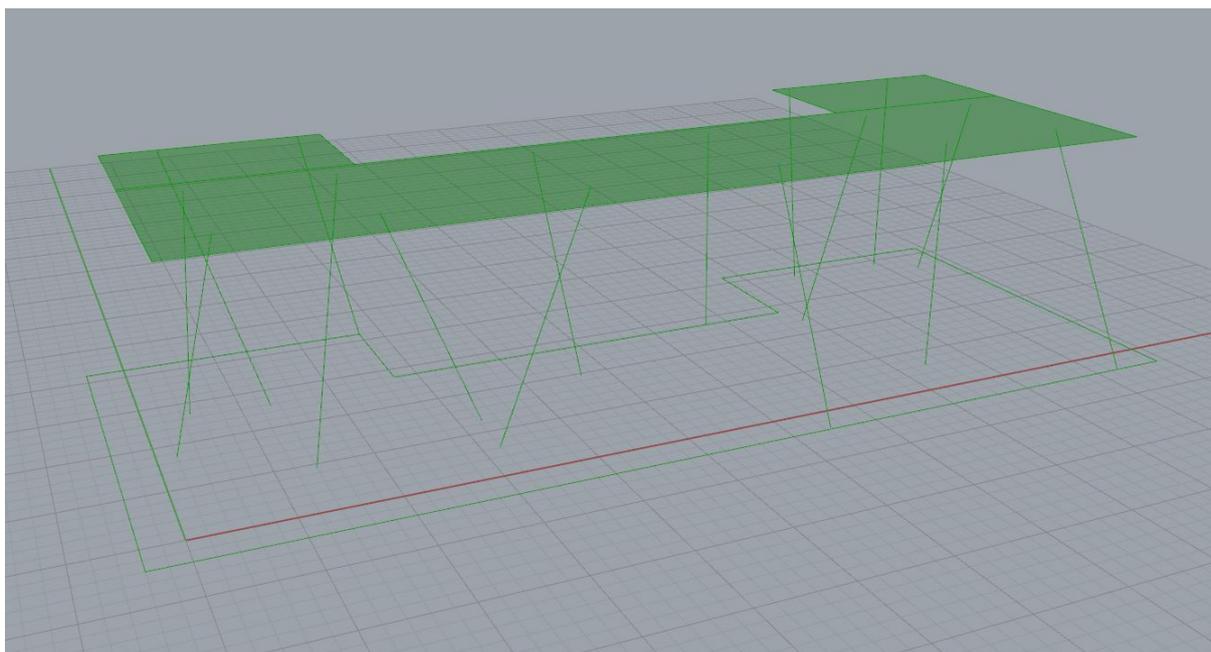


Abb. 5.6: Visualisierung der Stützenstellungen in RHINO

Punkt, der sich außerhalb eines definierten Bereichs befindet, zurück an dessen Kontur, die bereits als starre Geometrie in RHINO gezeichnet wurde. Die Geometrie der Stützen definiert sich somit als Linie zwischen den Kopffenden und den konstruierten Fußpunkten in der Ebene $z = 0$. Die zugehörige Visualisierung in RHINO der in Abbildung 5.5 gezeigten GRASSHOPPER-Schaltung ist in Abbildung 5.6 dargestellt.

Abbildung 5.6 zeigt auch bereits aus dem RHINO-Hauptfenster in die GRASSHOPPER-Schaltung integrierte starre Plattengeometrie. Damit ist sowohl die starre als auch die parametrische Geometrie vollständig erstellt. Als nächstes kann somit der Aufbau des Rechenmodells mit den KARAMBA-Komponenten erfolgen.

5.4 Rechenmodell in Karamba

Der nun folgende Abschnitt behandelt die Zuweisung der baustatischen Modelleigenschaften zur jeweiligen Geometrie sowie die Definition der Lasten, die auf das Bauwerk wirken. Im Gegensatz zu Kapitel 4, in dem zur Konstruktion des Fachwerks nur Stäbe zum Einsatz kamen, beinhaltet das vorliegende Modell sowohl stabförmige Bauteile (Stützen) als auch eine Fläche (Betonplatte). Aus diesem Grund kommen einige weitere Komponenten zur Schaltung hinzu, der grundsätzliche Ablauf zum Aufbau eines Rechenmodells, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, ändert sich jedoch selbstverständlich nicht.

5.4.1 Definition der Querschnitte

Neben der Optimierung der Stützenpositionen durch den genetischen Algorithmus ist während der Berechnung des Modells auch eine Querschnittsoptimierung über die Komponente „Optimize Cross Section“ geplant, die in Abschnitt 4.6.1 bereits kurz erläutert wurde. Damit ist garantiert, dass für die jeweilige Stützenstellung, die der genetische Algorithmus während des Optimierungsprozesses „austestet“, auch der bestmögliche Stützen- und Plattenquerschnitt eingesetzt ist. Für die

Verwendung dieser Komponente ist daher die Definition von „Querschnittsfamilien“ erforderlich, deren Mitglieder als Auswahlmöglichkeit bei der Querschnittsoptimierung fungieren. Diese beinhalten für die Stützenfamilie mehrere runde Betonquerschnitte, deren Durchmesser mit jedem Eintrag in der Familie zunimmt. Die Querschnittsfamilie für die Platte soll analog zu den Stützen mehrere verschiedene Plattenstärken beinhalten. Über eine einfache Kombination mehrere GRASSHOPPER-Komponenten lässt sich eine derartige Familie sehr leicht erstellen. Zuerst erfolgt die Zuteilung des Stützenquerschnittes. Die zugehörige Schaltung der Komponenten ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

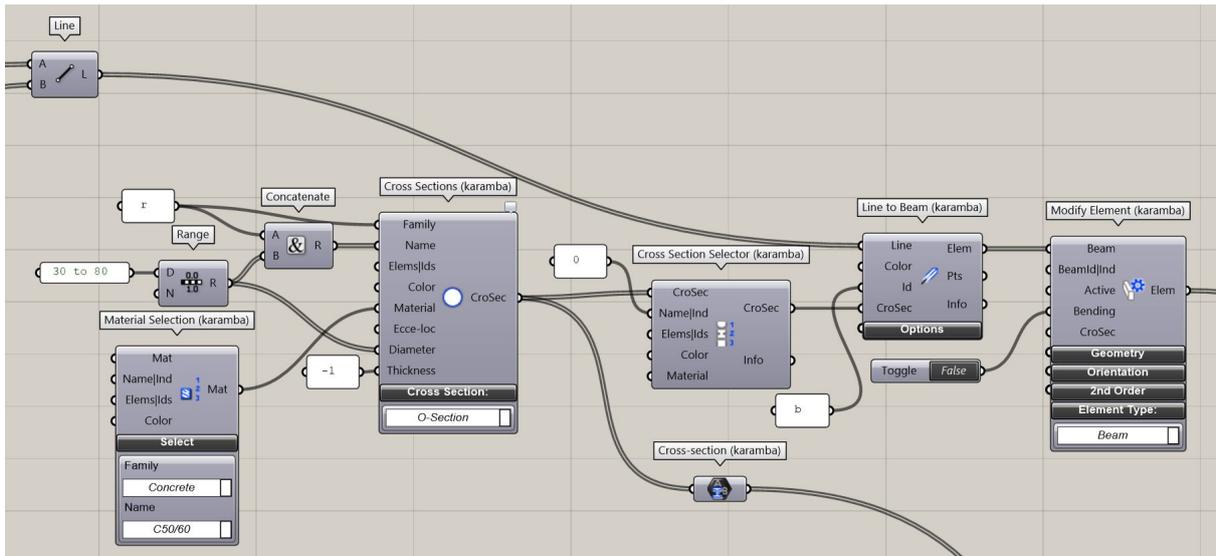


Abb. 5.7: Definition einer Querschnittsfamilie für die Stützen

Die Stützen bestehen aus Stahlbeton mit der Betongüte C50/60. In den Ausschreibungsunterlagen vom Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* sind aktuell Schleuderbetonstützen² aus Beton C70/85 mit einem Durchmesser von 45 cm geplant. Eine nachträgliche Änderung der Betongüte hat auf die optimale Stützenstellung praktisch keinen Einfluss, sondern nur auf die Querschnittsabmessungen der Stütze. Dies kann demnach auch in der vertieften Bemessung in RFEM erfolgen. Der mögliche Variationsbereich des Stützendurchmessers soll zwischen 30 cm und 80 cm liegen. Die Erstellung einer Familie geschieht mit den Komponenten „Cross Sections“ sowie „Range“ und „Concatenate“. Erstere definiert die Querschnittsform (hier: O-Section, also rund) und benötigt dafür einen Namen für die Familie, die einzelnen darin enthaltenen Querschnitte sowie das zugehörige Material, den Durchmesser und eine „Dicke“ (Wandstärke). Letzteres benötigt dieser Befehl nur zur Definition von hohlen Kreisquerschnitten – zur Erstellung eines ausgefüllten Kreisquerschnittes (wie das hier der Fall ist) wird die Wandstärke -1 (cm) vorgeben. Die Komponente „Range“ erstellt die Anzahl der Zwischenschritte zwischen 30 cm und 80 cm. Bei einer gewünschten Abstufung von 5 cm sind somit 10 Zwischenschritte erforderlich. „Concatenate“ verbindet anschließend die erhaltenen Durchmesser mit dem Buchstaben „r“, der für „Rundstütze“ steht, zu einem Textbaustein. Die Familie soll ebenfalls den Namen „r“ erhalten und deren einzelne Einträge (also Querschnitte) heißen folglich $r30$, $r35$, $r40$ usw. Damit ist

²Schleuderbetonstützen sind eigentlich Ringquerschnitte, da der Beton durch Zentrifugalkräfte beim Schleudern an den Rand gedrängt und dadurch verdichtet wird. Sie weisen sehr hohe Bewehrungsgrade auf und können im Fertigteilwerk unter „Laborbedingungen“ hergestellt werden. Daher ist auch eine Verwendung von sehr hohen Betonfestigkeiten möglich, die bei einer Herstellung auf der Baustelle zu Problemen führen würde.

die Querschnittsfamilie erstellt und deren Inhalt kann an die nächste Komponente gelangen. Der „Cross-section“-Container transferiert außerdem die erstellte Querschnittsfamilie zu jener Komponente, die in weiterer Folge die Querschnittsoptimierung durchführt.

Der „Cross Section Selector“ wählt aus der soeben erstellten Familie einen Querschnitt aus (hier: der erste Eintrag mit Index „0“) mit dem in der Berechnung gestartet werden soll. Die Komponente „Line to Beam“ teilt der Stützengeometrie den gewünschten Querschnitt zu und definiert für alle hier von Linien in Stäbe umgewandelten Elemente die Gruppen-ID „b“ (für engl. beam), um in der weiteren Berechnung leichter auf diese Elemente referenzieren zu können. Der letzte Befehl „Modify Element“ definiert die Stützen als „Fachwerkstäbe“ bzw. „Pendelstützen“, um sie schlanker ausführen zu können. Dies geschieht über einen „True-False-Operator“, der eine Biegung im entsprechenden Querschnitt verhindert. Das Ergebnis der in Abbildung 5.7 dargestellten Schaltung sind die zur Berechnung erforderlichen Informationen über die 16 Elemente (Stützen), die an die Komponente „Assemble Model“ weitergegeben werden.

Die Zuweisung der Plattenquerschnitte läuft praktisch ident zu den Stützenquerschnitten ab. Allerdings muss zuerst noch eine Umwandlung der in RHINO erstellten starren Geometrie erfolgen. In Analogie zur bereits bekannten KARAMBA-Komponente „Line to Beam“ für stabförmige Elemente gibt es für Flächen den Befehl „Mesh to Shell“. Um eine Berechnung von Flächen mit KARAMBA zu ermöglichen, müssen daher allgemeine Flächen aus RHINO oder GRASSHOPPER (Bezeichnung „surface“) zunächst in ein „Mesh“³ (dt. Netz) umgewandelt werden und im zweiten Schritt in eine „Shell“. Ein Mesh nähert die zugrundeliegende Geometrie durch Dreiecke an, egal wie kompliziert eine in RHINO vorhandene NURBS-Geometrie auch sein mag. Mit dieser Information liegt der Schluss nahe, dass durch die Annäherung einer allgemeinen Fläche durch ebene Dreiecks-Elemente der Schritt zu einer FE-Berechnung nicht mehr weit sein kann, da bei der Generierung eines FE-Netzes in einem konventionellen FE-Programm mehr oder weniger genau dasselbe passiert. (vgl. auch Abschnitt 3.4.1) Die erforderlichen Komponenten für die Generierung des Meshes sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

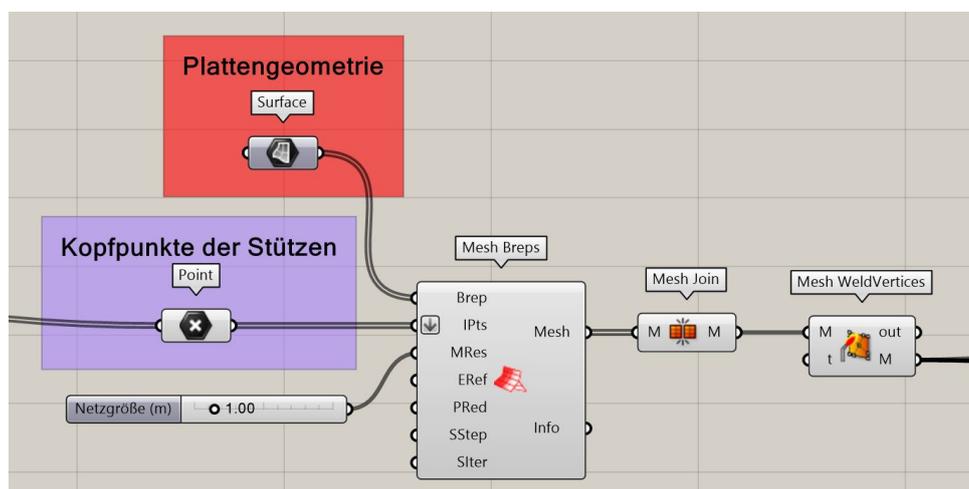


Abb. 5.8: Generierung des FE-Netzes in GRASSHOPPER aus einer Fläche

Der Befehl „Mesh Breps“ nimmt die Umwandlung bzw. Generierung des FE-Netzes vor. Der Begriff „Brep“ beschreibt eine aus mehreren Flächen zusammengesetzte Geometrie, folglich werden die drei in RHINO erstellten Teilflächen der Platte über den „surface“-Container in GRASSHOPPER

³auch in diesem Kapitel werden für Begriffe aus GRASSHOPPER oder KARAMBA die gebräuchlicheren englischen Begriffe verwendet

integriert und an die Komponente weitergegeben. Diese Komponente bietet darüber hinaus auch die Möglichkeit, einzelne Punkte explizit für die Integration in das FE-Netz auszuwählen. Dies ist wichtig für die Stützenköpfe, damit die Platte auch wirklich mit den Stützen verbunden ist. Das Ergebnis der „Mesh Breps“-Komponente sind (wegen der drei Teilflächen) auch drei einzelne Meshes, was die Vereinigung zu einem großen Mesh nahelegt. Die letzte Komponente „Mesh WeldVertices“ fasst eng aneinander liegende Punkte zusammen und ermöglicht so eine gleichmäßigere Netzverteilung.

Im nächsten Schritt erfolgt nach dem bei den Stützen bereits angewandten Prinzip die Erstellung einer Querschnittsfamilie für die Platte sowie die Zuweisung eines speziellen Querschnitts. Abbildung 5.9 zeigt die dafür benötigte Schaltung.

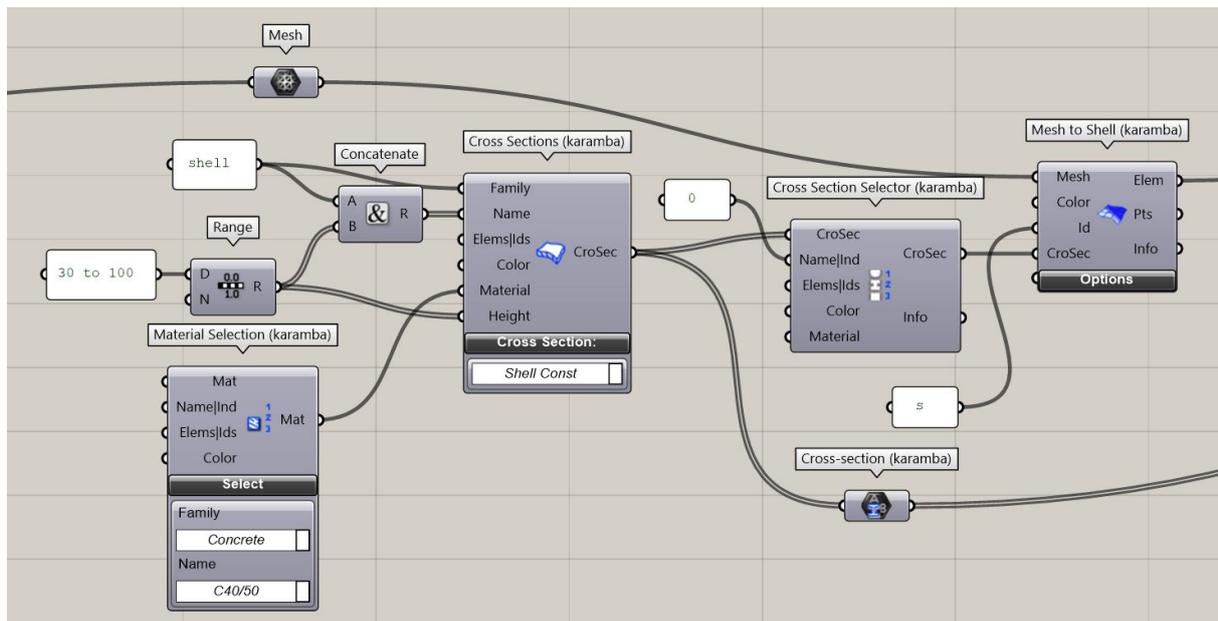


Abb. 5.9: Definition einer Querschnittsfamilie für die Platte

Der Bereich der Plattenstärke ist zwischen 30 cm und 100 cm vorgegeben. Die Materialgüte des Betons ist mit C40/50 festgelegt. In den Ausschreibungsunterlagen ist für den auskragenden Teil derzeit eine Plattenstärke von 45 cm bei einer Betongüte C50/60 vorgesehen. Zusätzlich ist geplant, Cobiax-Hohlkörpererelemente zur Gewichtsersparnis in die Decke einzulegen. Deren Modellierung in einem FE-Programm ist sehr aufwändig, weshalb üblicherweise eine Modellierung als normale Stahlbetondecke stattfindet und das geringere Gewicht auf Grund der Hohlkörpererelemente als „negativ wirkendes Eigengewicht“ berücksichtigt wird. Da beim vorliegenden Modell jedoch die Ermittlung der optimalen Stützenstellung im Vordergrund steht, beinhaltet dieses „nur“ eine normale Stahlbetondecke ohne Berücksichtigung der Gewichtsersparnis. Auf Grund der Tatsache, dass durch die Komponente „Mesh to Shell“ eigentlich jedes einzelne Flächenelemente des Meshes einen Querschnitt zugewiesen bekommt, ist hier die Vergabe einer Gruppen-ID sehr wichtig. Ohne die Definition einer Gruppen-ID (hier: „s“) bei der Querschnittsoptimierung im Zuge der Berechnung würde jedes Plattenelement eine andere Dicke zugewiesen bekommen, was ausführungstechnisch natürlich nicht sinnvoll ist.

5.4.2 Definition der Lasten

Da die primäre Tragstruktur des betrachteten Modells die Stahlbetonplatte ist, wirken auch fast alle Lasten direkt auf die Platte und daher als Flächenlast. Lediglich die Lasten aus den Innenstützen treten als Punktlasten auf und wirken direkt auf die Außenstützen. In Kapitel 4 kamen Flächenlasten nicht zum Einsatz, da es sich um ein reines Stabtragwerk mit Punktlasten handelte. Die Definition derartiger Flächenlasten geschieht allerdings prinzipiell in analoger Weise zu den Punktlasten – sogar über dieselbe Komponente „Loads“. Folgende Einwirkungen sind im KARAMBA-Rechenmodell eingearbeitet:

- Eigengewicht der Konstruktion (EG)
- Ausbaulasten wie Fußbodenaufbau etc. (A)
- Nutzlast für Nutzung als Bibliothek bzw. Lernräume (NL)
- Windlast in X-Richtung (WX)
- Windlast in Y-Richtung (WY)
- Schneelast am Dach (S)

Da das Gebäude in der Erdbebenzone 0 steht, ist der Lastfall Erdbeben als weitere horizontale Beanspruchung des Bauwerks gegenüber der Windbeanspruchung nicht maßgebend. Die Kombination der angeführten Einwirkungen erfolgt über die Angabe der Kombinationsbeiwerte als Multiplikationsfaktoren im jeweiligen „KARAMBA-Lastfall“, wobei dadurch eigentlich bereits Lastkombinationen erstellt sind. Dies ist durch die Tatsache bedingt, dass KARAMBA nur den Begriff „LoadCase“, also Lastfall, kennt und keine Lastkombinationen. Beanspruchungen des Tragwerks aus der (relativ hohen) Nutzlast sowie der Windlast sind als maßgebend klassifiziert und daher in der Folge jeweils als Leiteinwirkungen geführt. Insgesamt beinhaltet das Modell folgende acht Lastkombinationen:

- LC 0: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 1,0 \cdot NL + 0,6 \cdot WX + 0,5 \cdot S$
- LC 1: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 1,0 \cdot NL - 0,6 \cdot WX + 0,5 \cdot S$
- LC 2: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 1,0 \cdot NL + 0,6 \cdot WY + 0,5 \cdot S$
- LC 3: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 1,0 \cdot NL - 0,6 \cdot WY + 0,5 \cdot S$
- LC 4: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 0,7 \cdot NL + 1,0 \cdot WX + 0,5 \cdot S$
- LC 5: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 0,7 \cdot NL - 1,0 \cdot WX + 0,5 \cdot S$
- LC 6: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 0,7 \cdot NL + 1,0 \cdot WY + 0,5 \cdot S$
- LC 7: $1,0 \cdot EG + 1,0 \cdot A + 0,7 \cdot NL - 1,0 \cdot WY + 0,5 \cdot S$

Für die Eingabe der Punktlasten wird an dieser Stelle auf Abschnitt 4.4 verwiesen. Neben der Einwirkung „Eigengewicht“ (aus der Dachkonstruktion sowie jenes der Innenstützen selbst) leiten die Innenstützen auch die Lasten aus der Einwirkung „Schnee“ als Punktlasten in die schrägen Stützen ein. Aus Gründen der leichteren Modellierung sollen auf allen Kopfbenden der schrägen Stützen dieselben Lasten wirken. Die Werte stammen dabei aus dem vorhandenen Gesamtmodell vom Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* in RFEM, wobei jeweils der Maximalwert aller

Stützen herangezogen wurde. Zu beachten gilt es jedoch, dass die vier Stützen am Übergang zum Bestandsgebäude auch einen Teil der Lasten der Stahlbetonplatte über dem Bestandsgebäude abtragen. Da dieser Teil jedoch im vorliegenden Modell nicht modelliert ist, ist sowohl das in KARAMBA berechnete Eigengewicht als auch die Nutzlast (beide wirken natürlich nur auf die modellierte Fläche) für die Randstützen zu gering angesetzt. Näherungsweise soll bei diesen vier Stützen ein um 100 kN erhöhtes Eigengewicht diesem Umstand Rechnung tragen. Die Lastwerte der Punktlasten ergeben sich daher wie folgt: 130 kN für das Eigengewicht (bzw. 230 kN für jene vier Stützen, die am Übergang zum Bestandsgebäude stehen) und 120 kN für die Schneelast.

KARAMBA berücksichtigt das Eigengewicht der modellierten Geometrie automatisch, sofern ein Lasttyp „Gravity“ angelegt ist. Die ständig wirkende Last des Innenausbaus ist mit $2,5 \text{ kN/m}^2$ auf der Stahlbetonplatte angesetzt. Diese beiden Lasten erhalten die Zuweisung zum Lastfall mit dem Index „-1“, um sie in allen Lastfällen bzw. Kombinationen zu berücksichtigen (vgl. auch Abschnitt 4.4). Die Definition der Nutzlast als Flächenlast mit 5 kN/m^2 ist in Abbildung 5.10 dargestellt.

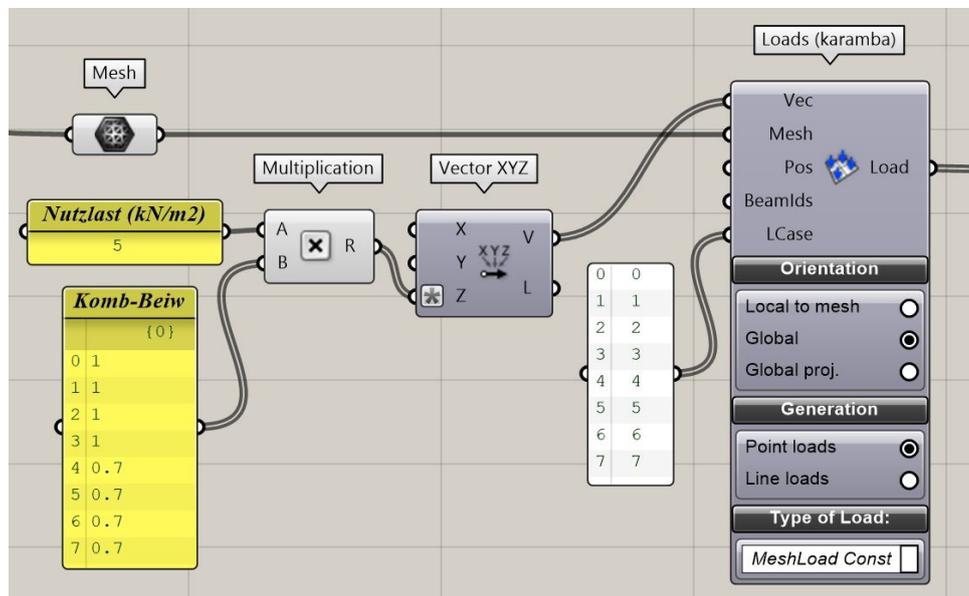


Abb. 5.10: Definition der Nutzlast als Flächenlast mit Kombinationsbeiwerten

Bei Änderung des Lasttyps auf „MeshLoad Const“ ändert sich die gesamte Komponente. Deren linke Seite verlangt nun nach einem Mesh, auf dem die Last wirken soll (hier: das für die Stahlbetonplatte generierte Mesh). Die Definition der Last selbst erfolgt über mehrere GRASSHOPPER-Befehle, die eine übersichtliche Darstellung der Lastgröße sowie der Kombinationsbeiwerte ermöglichen. So finden sich die Multiplikationsfaktoren für die Nutzlast in den einzelnen Lastkombinationen, wie sie in oben angeführter Aufzählung aufscheinen, hier im Panel „Komb-Beiw“ wieder. Die so erhaltenen Lastwerte in Z-Richtung sind wegen der Definition des globalen Koordinatensystem in RHINO natürlich nach oben gerichtet, weshalb deren Vorzeichen geändert werden muss, indem diese Werte beim Eingang in den Vektor eine Multiplikation mit „-1“ erfahren (angedeutet durch das Stern-Symbol). Die Zuweisung dieser Lastwerte (bzw. Lastvektoren) zur jeweiligen Kombination erfolgt über ein weiteres Panel, das an den Anschlusspunkt „LCase“ angehängt ist. Die in der zweiten Spalte dieses Panels eingetragenen Zahlen (hier: chronologisch von Index 0–7) beziehen sich auf die Zeilennummern im Panel „Komb-Beiw“, sodass eine Zuweisung der dortigen Multiplikationsfaktoren bzw. Lastvektoren zur jeweiligen Lastkombination den Zeilen entsprechend geschehen kann.

Die Modellierung der Windlasten im RFEM-Beispielmodell in Abschnitt 3.3.2 geschah über Linienlasten, die auf die Geschoßdecken wirken. Dieser Ansatz wäre für die Definition der Windlasten natürlich auch hier sehr praktikabel, allerdings lässt KARAMBA Linienlasten nur bei Stäben zu, nicht jedoch bei Flächen. Daher muss eine andere Möglichkeit gefunden werden, die Beanspruchung des Bauwerks durch Windkräfte zu berücksichtigen. Abhilfe schafft die Modellierung der Außenwände der Aufstockung als Flächen bzw. Meshes, was außerdem auch zu einer sehr anschaulichen Visualisierung führt. Die Erzeugung einer Flächenlast in KARAMBA, die auf ebendiese Außenwände angreift, ist darüber hinaus problemlos möglich. Wichtig zu beachten ist nur, dass die Meshes der Außenwände direkt an die Konturen der Mesh der Stahlbetonplatte anschließen. Die Ermittlung der Windbeanspruchung nach ÖNORM EN 1991-1-4 sowie ÖNORM B 1991-1-4 sieht für die Beanspruchung der Außenwände durch Wind eine Kombination aus Druckbeanspruchung auf der Luv-Seite sowie Sogbeanspruchung auf der Lee-Seite des Bauwerks vor. Vereinfachend können diese beiden Beanspruchungen jedoch als zusammengefasste Komponente auf nur einer Wand in der betreffenden Windrichtung angesetzt werden. Daher ist es ausreichend, pro Windrichtung nur eine Außenwand zu modellieren. Die Visualisierung einer Außenwand für die Windbeanspruchung in Richtung der globalen X-Achse ist in Abbildung 5.11 dargestellt.

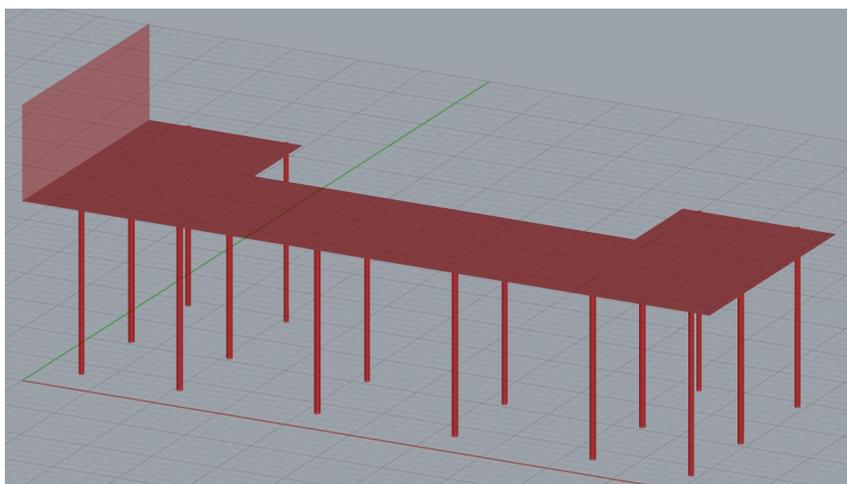


Abb. 5.11: Visualisierung des Modells in RHINO mit einer Außenwand für die Windeinwirkung

Die zur Konstruktion der Außenwand sowie zur Erzeugung der Windlast erforderlichen Komponenten zeigt Abbildung 5.12. Der Befehl „Mesh Edges“ extrahiert die Konturen der Stahlbetonplatte, jedoch als einzelne Linien entsprechend der FE-Netzgröße. Die darauffolgende Komponente „Join Curves“ verbindet diese Linien zu einer der Kontur entsprechenden Polylinie, deren Eckpunkte die Komponente „Discontinuity“ ausgibt. Die Sortierung dieser Punkte geschieht in der Folge über die Analyse deren X-Koordinaten, um jene zwei Punkte zu erhalten, deren X-Koordinaten „annähernd 0“ betragen. Dazu werden alle Eckpunkte der Polylinie in ihre Koordinaten zerlegt, die X-Werte an einen „Smaller Than“-Operator weitergegeben und entsprechend dem Evaluierungsergebnis (dieses kann entweder „Richtig“ oder „Falsch“ sein) über den Befehl „Dispatch“ in zwei Gruppen aufgeteilt. Gruppe A enthält sodann nur jene zwei Punkte, deren X-Koordinaten kleiner als „0,1“ sind.

Der Befehl „Fit Line“ konstruiert eine Linie zwischen diesen beiden extrahierten Punkten, die als Grundlinie der Außenwand dient. Von dieser Linie ausgehend spannt die Komponente „Extrude“ eine Fläche auf, wobei die Höhe dieser Fläche über einen Vektor vorgegeben ist. Der bereits bekannte Befehl „Mesh Breps“ generiert aus der soeben erzeugten Fläche ein

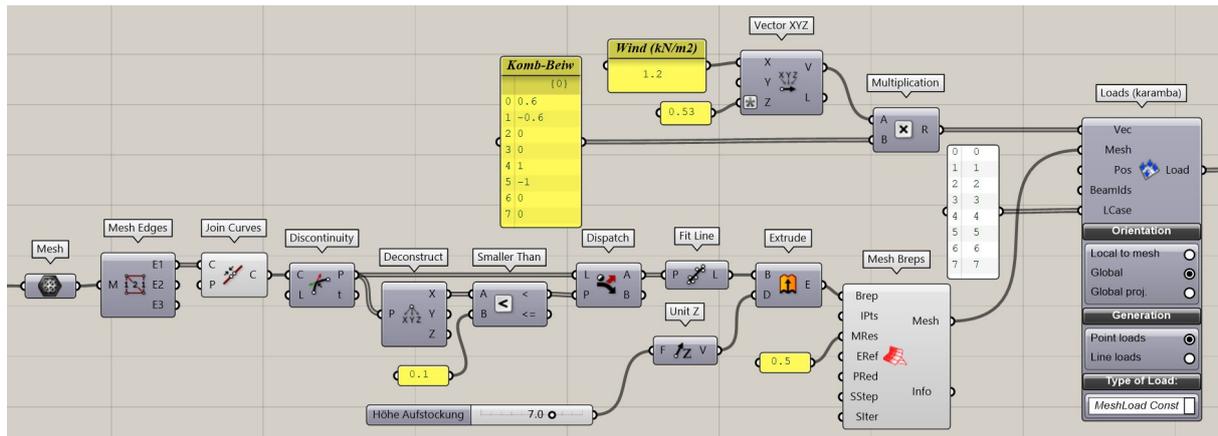


Abb. 5.12: Erzeugen der Außenwände sowie Ansatz der Windbeanspruchung

neues Mesh, das der Windlast als Referenzfläche dient. Da alle dieser neuen Mesh zu Grunde liegenden Informationen aus dem bereits vorhandenen Mesh der Stahlbetonplatte resultieren, ist garantiert, dass die neue Mesh direkt an jenes der Stahlbetonplatte anschließt. Die neuen Windlasten wirken jeweils in den Randpunkten des FE-Netzes der Stahlbetonplatte, und zwar im Verhältnis der Größe der angrenzenden FE-Netz-Elemente der Außenwand. Die Netzgröße für das Mesh der Stahlbetonplatte ist mit 1 m festgelegt, um die Rechengeschwindigkeit zu erhöhen. Da allerdings für die Windlast eine möglichst feine Verteilung der Kräfte an der Kante der Stahlbetonplatte anzustreben ist, soll die Netzgröße für das Mesh der Windlast 0,5 m betragen. Die übrigen Komponenten zur Erzeugung der Windlast sowie der Multiplikationsfaktoren entsprechen jenen der Nutzlast, weshalb sie an dieser Stelle nicht noch einmal erläutert werden. Aus den Kombinationsbeiwerten geht jedoch hervor, dass die Wirkung jeweils in positiver und negativer X-Richtung berücksichtigt ist. Die Einträge mit den Werten „0“ weisen darauf hin, dass in diesen Kombinationen jeweils eine Beanspruchung durch Wind in Y-Richtung erfolgt. Die hier verwendete Modellierung der Windlast in KARAMBA ist somit ident mit dem Ansatz einer Linienlast in RFEM. Der Ablauf zur Konstruktion der Windlast in Y-Richtung läuft selbstverständlich analog zur jener in X-Richtung ab.

5.4.3 Definition von Auflagern und Stabgelenken

Die letzten erforderlichen Eingabedaten vor der statischen Berechnung betreffen die Festlegung der Auflagerbedingungen. Eine explizite Definition von Stabendgelenken ist nicht erforderlich, da durch die in Abschnitt 5.4.1 gewählte Eigenschaft, die Stützen als Fachwerkstäbe zu behandeln, das Programm automatisch Momentengelenke an beiden Stützenenden vorsieht. Bei der Definition der Auflagerbedingungen werden jedoch die Besonderheiten des Rechenmodells noch einmal sichtbar: Die Platte ist gelenkig an die 16 Pendelstützen angeschlossen, deren Fußenden wiederum nur gegen Verschiebungen in X-, Y- und Z-Richtung gehalten sind. Würden die 16 Stützen also alle vertikal stehen, so würde das Modell umfallen bzw. die Platte seitlich wegkippen und eine statische Berechnung wäre gar nicht möglich. Die Stabilität und damit auch die Tragfähigkeit dieser Struktur ergeben sich demnach ausschließlich aus der korrekten Anordnung aller 16 Stützen, die allerdings auf die einwirkenden Kräfte angepasst sein muss.

5.4.4 Fertigstellung des Modells und Berechnung

Zur Fertigstellung des parametrischen Rechenmodells fehlen nun nur noch wenige Komponenten. Alle bisher getroffenen Einstellungen und vorhandenen Informationen laufen an der bereits bekannten Komponente „Assemble Model“ zusammen. Danach erfolgt die Berechnung des Modells über einen oder mehrere Berechnungsbefehle. Im Zuge der statischen Berechnung eines Modellzustandes (also einer Stützenstellung) soll eine Querschnittsoptimierung sowohl der Stützen als auch der Platte stattfinden. Während für die Platte aus ausführungstechnischen Gründen jedoch eine einheitliche Plattenstärke vorgesehen ist, können die Stützenquerschnitte von Stütze zu Stütze variieren. Diese Berechnung des Modells mit einer Querschnittsoptimierung erfolgt über die Komponente „Optimize Cross Section“, die in Abschnitt 4.6.1 bereits vorgestellt wurde. Diese Berechnungskomponente berechnet Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung und optimiert Querschnitte nach den berechneten Ausnutzungsgraden, wie sie im Eurocode 3 für Stahlbauten vorgegeben sind. Für Stäbe berücksichtigt dieser Algorithmus Ausnutzungen zufolge Normalkraft, Querkraft, Zweiachsige Biegung und Torsion. Darüber hinaus berücksichtigt sie auch Stabilitätsprobleme wie Biegeknicken und Biegedrillknicken. Zur Optimierung von Flächen wird in jedem FE-Knoten die maximale Von-Mises-Spannung (Vergleichsspannung) berechnet und mit der Materialfestigkeit verglichen. Ist die Ausnutzung höher als jener der Komponente vorgegebene Wert (dieser muss nicht zwingend „1“ sein), so nimmt der Algorithmus den nächsthöheren Querschnitt aus der Querschnittsfamilie. In dieser Erklärung liegt gleichzeitig die Begründung, wieso diese Komponente auch für Betonquerschnitte verwendet werden kann: Unter Berücksichtigung niedrigerer Ausnutzungsgrade bleibt eine zusätzliche Sicherheit erhalten, die bei der anschließenden detaillierteren Bemessung in einem konventionellem Statik-Programm erforderlich sein kann.

Aber es gibt noch einen weiteren Grund, warum in diesem Beispiel ein Ausnutzungsgrad kleiner als 1 ohnehin erforderlich ist, den es an dieser Stelle unbedingt zu berücksichtigen gilt: Die in Abschnitt 5.4.2 eingeführten Lasten am Modell sind allesamt charakteristische Werte und keine Bemessungslasten. Der Grund dafür liegt in der Evaluierung der Tragwerksverformungen im Optimierungsprozess für die Stützenstellungen. Gleichzeitig bedeutet dies aber, dass keine Berechnung des Tragwerks im Grenzzustand der Tragfähigkeit mit Design-Lasten ablaufen kann. Schon alleine aus diesem Grund sollte der berechnete Ausnutzungsgrad der Konstruktion ungefähr bei 0,7 liegen. Dieser Wert ergibt sich aus der Berücksichtigung der Teilsicherheitsbeiwerte für ständige (1,35) und veränderliche (1,5) Lasten. Deren Kehrwerte liegen zwischen 0,75 und 0,65 und dienen als Richtwerte für die Ausnutzung der mit charakteristischen Lasten berechneten Konstruktion. Der konkret anzusetzende Wert für einen Ausnutzungsgrad der Konstruktion, der neben der Tragwerksberechnung mit charakteristischen Lasten auch die vereinfachte Betonbemessung in KARAMBA berücksichtigt, stellt einen Erfahrungswert im Umgang mit diesem Programm dar und wird im gegenständlichen Beispiel mit 0,5 festgelegt.

Die letzten benötigten Informationen für die „Optimize Cross Section“-Komponente betreffen die Auswahl der Querschnitte: Für die Querschnittsoptimierung müssen die in Abschnitt 5.4.1 erstellten Querschnittsfamilien noch an die Berechnungskomponente weitergeleitet werden, um daraus den optimalen Querschnitt auswählen zu können. Um trotz der Querschnittsoptimierung die bereits erwähnte einheitliche Plattenstärke beizubehalten (maßgebend ist somit das meistbeanspruchte FE-Element), benötigt die Komponente außerdem noch die ID der Plattenelemente (hier: „s“). Da für das vorliegende Tragwerk eine Berechnung in KARAMBA nach Theorie I. Ordnung als ausreichend erscheint (Pendelstützen), braucht keine weitere Rechenkomponente zusätzlich zur oben genannten eingeführt werden. Abbildung 5.13 zeigt die Zusammenführung aller Informationen in der Komponente „Assemble Model“ sowie die beschriebene Berechnungskomponente.

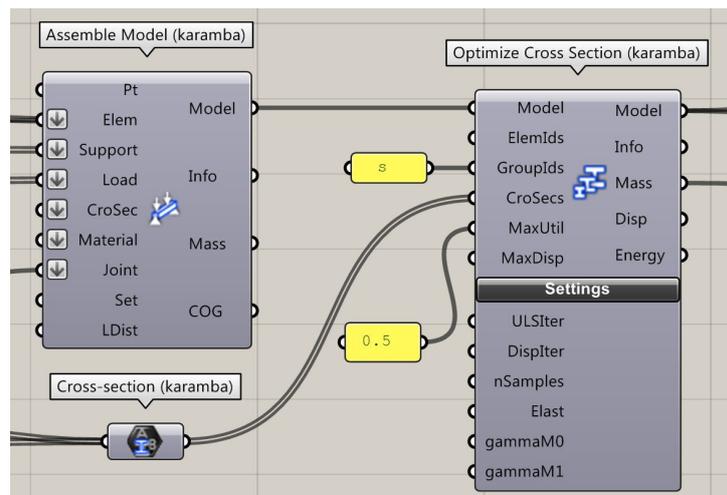


Abb. 5.13: KARAMBA-Komponenten für die Modellerstellung und Berechnung

Analog zur in Kapitel 4 beschriebenen Vorgangsweise ist nach der Berechnung über die Komponenten „Model View“, „Shell View“ und „Beam View“ eine Visualisierung der einzelnen Elemente des statischen Modells sowie der Ergebnisse in den Stützen und der Platte möglich.

Mit der Fertigstellung des parametrischen Rechenmodells liegt nun gleichzeitig auch schon ein berechneter Modellzustand (Stützenstellung in der Ausgangslage) vor. Das Ergebnis eines berechneten Modellzustands sind beispielsweise Kräfte, Verformungen und die für den jeweiligen Modellzustand ermittelten optimalen Bauteilquerschnitte. Durch Verändern eines einzelnen Parameters verändert sich sofort der Modellzustand und das Ergebnis passt sich an diesen geänderten Zustand an.

5.5 Optimierungsprozess

Um verschiedene Stützenstellungen miteinander vergleichen zu können, ist es erforderlich, Vergleichskriterien zu definieren. Im vorliegenden Beispiel sollen dies die Verformung des Gesamtmodells in Vertikal- und Horizontalrichtung sowie die Gesamtmasse des Bauwerks sein. Die Ermittlung einer „guten“ Stützenstellung könnte nun theoretisch durch manuelles Verändern der Parameter und Vergleichen der Ergebnisse geschehen – stattdessen kommen jedoch die in der GRASSHOPPER-Umgebung eingebetteten genetischen Algorithmen ins Spiel. Davon gibt es einige zur Auswahl, wobei die meisten „nur“ nach einem Ziel optimieren können, wie das für genetische Algorithmen üblich ist. Eine Sonderstellung nimmt daher die bereits erwähnte Komponente OCTOPUS ein, die von Robert Vierlinger im Zuge einer Diplomarbeit [18] an der Technischen Universität Wien entwickelt wurde und seither in einer Kooperation zwischen dem Büro *Bollinger und Grohmann ZT GmbH* und der *Universität für Angewandte Kunst Wien* einer ständigen Erweiterung unterliegt. Sie ermöglicht die Durchführung eines Optimierungsprozesses mit der Suche nach mehreren Zielen gleichzeitig. Daher ist das Ergebnis auch nicht ein einziges gutes Ergebnis, sondern eine Gruppe von guten Ergebnissen, aus denen nach Abwägung der Kriterien zueinander das geeignetste ausgewählt werden kann. Diese Gruppe an guten Ergebnissen wird auch als *Pareto-Front*⁴ bezeichnet. Um den Optimierungsvorgang und damit in weiterer Folge die

⁴Eine sehr gute Definition des Begriffs „Pareto-Optimum“ findet sich in Wikipedia: „Ein Pareto-Optimum (auch Pareto-effizienter Zustand) ist ein Zustand, in dem es nicht möglich ist, eine (Ziel-)Eigenschaft zu verbessern, ohne zugleich eine andere verschlechtern zu müssen. (...) Die Menge aller Pareto-Optima heißt auch Pareto-Menge (auch Pareto-Front)“ [19]

Ergebnisfindung zu verdeutlichen, folgt an dieser Stelle ein kurzer Exkurs zur Definition von genetischen Algorithmen und anschließend in Abschnitt 5.5.2 die Beschreibung des in GRASSHOPPER programmierten Ablaufs.

5.5.1 Exkurs: Definition und Funktionsweise genetischer Algorithmen

Die nun folgende Definition genetischer Algorithmen ist sinngemäß aus [3] entnommen. Die Funktionsweise genetischer Algorithmen orientiert sich am Evolutionsgedanken der Natur. Aus einer Startpopulation von Individuen werden mithilfe genetischer Operatoren (Selektion und Variation) Nachkommen produziert, die für das Optimierungsproblem eine bessere Lösung als ihre Elterngeneration darstellen. Somit nähert sich der Algorithmus mit jeder Generation mehr und mehr dem Optimum an. Die *Selektion* gibt ihm dabei die Suchrichtung im Lösungsraum vor und wählt (selektiert) aus allen Eltern-Individuen die geeignetsten für die Produktion der Nachkommen aus. Sie bevorzugt gute Individuen der Elterngeneration gegenüber den schlechteren. Die Bewertung der Individuen erfolgt dabei mithilfe einer „Fitnessfunktion“, die die Fitness eines einzelnen Individuums bestimmt – also die Eignung eines Individuums als Lösung für das Optimierungsproblem.

Da durch diesen Selektionsvorgang (der für die Suche nach einem Optimum sehr wichtig ist) jedoch die Vielfalt des insgesamt vorhandenen „Erbguts“ leidet, kommt der *Variation* der Nachkommen eine erhebliche Bedeutung zu. Die Variationsoperatoren „Rekombination“ und „Mutation“ wirken dem Diversitätsverlust entgegen, indem sie neue Nachkommen aus der Elterngeneration erzeugen.

„Um eine neue Generation von Individuen zu generieren, werden jeweils Individuen aus der vorhandenen Population abhängig von ihrer Fitness selektiert, aus ihnen durch Variation zwei neue Individuen erzeugt und in die neue Population eingefügt.“ [3, S. 152] Der Arbeitsprozess eines genetischen Algorithmus ist in Abbildung 5.14 dargestellt.

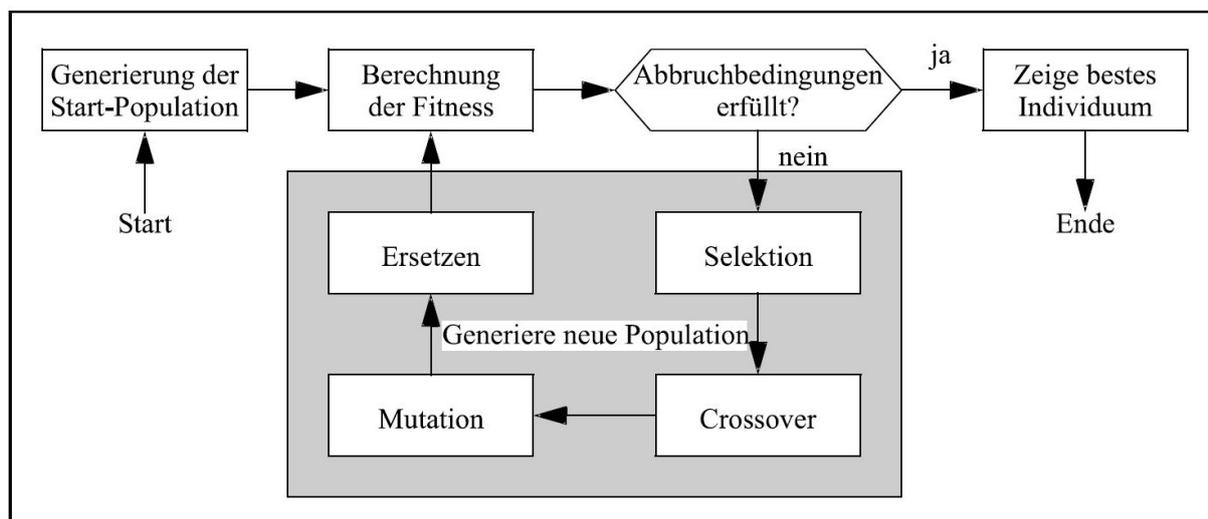


Abb. 5.14: Ablauf eines genetischen Algorithmus (aus [3])

Die in Abbildung 5.14 angeführten Abbruchbedingungen müssen bei einer Optimierungsaufgabe natürlich nicht zwingend vorhanden sein. Beispiele für derartige Bedingungen sind etwa eine maximale Rechenzeit (Arbeitszeit des Algorithmus) oder eine maximale Anzahl an Generationen. Auch trotz eventuell vorhandener Abbruchkriterien, die zu einem Ende der Suche führen, bleibt

allerdings eine besondere Eigenschaft genetischer Algorithmen bestehen: Ein tatsächliches Ende der Suche wird nie erreicht, weil theoretisch durch eine sehr, sehr kleine Veränderung des bis dahin besten Individuums ein noch besseres entstehen könnte. Für die Diskussion über genetische Algorithmen sind außerdem einige Begriffe erforderlich, von denen manche bereits verwendet wurden, jedoch in Folge noch einmal detaillierter erklärt sind.

Individuen, Genome und Gene

Der Begriff „Individuen“ bezeichnet die möglichen Lösungen des Optimierungsproblems. Ein Individuum kann – je nach Optimierungsaufgabe – aus mehreren „Genomen“ (auch Chromosomen genannt) aufgebaut sein, die ihrerseits wiederum aus den einzelnen „Genen“ bestehen. Individuen sind somit die Träger der genetischen Informationen und deren Fitness kann über die Fitnessfunktion evaluiert werden.

Selektion und Elitismus

Die Elterngeneration t besteht aus der Population $P(t)$ mit einer Anzahl von n Individuen. Der genetische Algorithmus erzeugt aus dieser Population eine neue Population $P(t + 1)$, die Kindergeneration. Aus zwei Individuen der Elternpopulation entstehen dabei zwei neue Individuen, somit besteht die Kindergeneration ebenfalls wieder aus n Individuen. Damit sich der genetische Algorithmus der optimalen Lösung immer mehr annähert, bevorzugt er die fitteren Individuen aus der Elternpopulation gegenüber den weniger geeigneten. Die Auswahl der Individuen aus der Elternpopulation erfolgt dabei über den genetischen Operator der „Selektion“. Sie läuft in zwei Schritten ab: Zuerst wird über den fitnessabhängigen Erwartungswert die erwartete Anzahl der Nachkommen eines Individuums in der Nachkommenpopulation festgelegt. Erst danach erfolgt die tatsächliche Auswahl der Individuen, wodurch ein Individuum auch mehrmals zur Reproduktion ausgewählt werden kann.

Der *Selektionsdruck* beschreibt „das Verhältnis der Wahrscheinlichkeit der Auswahl des besten Individuums einer Population zur durchschnittlichen Selektionswahrscheinlichkeit aller Individuen.“ [3, S. 154] Ein kleiner Selektionsdruck bedeutet demnach, dass auch schlechtere Individuen die Chance haben, für die Produktion der Nachkommengeneration ausgewählt zu werden, während ein hoher Selektionsdruck nur die fittesten Individuen auswählt. Bei zu niedrigem Selektionsdruck besteht somit die Gefahr, dass der Algorithmus sehr lange braucht, um ein Optimum zu finden. Ist der Druck zu hoch, läuft der Algorithmus allerdings in Gefahr, in einem lokalen Optimum zu konvergieren und ein Globales zu „übersehen“.

Übliche Selektionsverfahren tauschen die gesamte Elternpopulation durch die neue Kindergeneration aus. Dadurch kann es allerdings passieren, dass bereits sehr gute Ergebnisse aus der Elterngeneration verloren gehen. Aus diesem Grund ersetzt das Prinzip des „Elitismus“ die schlechtesten Nachkommen durch die besten Individuen der Elternpopulation. Dieser Wert wird üblicherweise über einen Prozentsatz der Population gesteuert.

Variation, Rekombination und Mutation

Wie bereits erläutert, hält die „Variation“ die Vielfalt des Erbguts aufrecht. Dies geschieht über die beiden Variationsoperatoren „Rekombination“ und „Mutation“. Die Bildung zweier Nachkommen durch Mischen der Gene zweier Eltern-Individuen findet über die Rekombination (bei genetischen Algorithmen auch *Crossover* oder *Kreuzung* genannt) statt. Die *Crossover-Rate* legt fest, ob es überhaupt zum Crossover zwischen zwei Eltern-Individuen kommt bzw. welcher Prozentsatz der Gene gekreuzt wird. Einschlägige Literatur [7] empfiehlt eine Crossover-Rate größer als 0,6. Ohne ein Crossover werden die durch die Selektion ausgewählten Individuen der Elterngeneration unverändert in die neue Population übertragen.

Da die Rekombination die Gene nicht verändert, sondern in den Nachkommen nur anders kombiniert, bringt die Mutation von Genen noch zusätzliche Vielfalt in das Erbgut. „Bei der

Mutation wird jedes Gen eines Genoms mit einer geringen Wahrscheinlichkeit p_M negiert (...). Für die damit genbezogene Mutationswahrscheinlichkeit p_M werden meist Werte von 0,01 oder 0,001 gewählt.“ [3, S. 156] Mit einer „Mutations-Rate“ ist wiederum der Prozentsatz der zu mutierenden Gene festgelegt. Die Mutation ändert also einzelne Gene eines Individuums und erzeugt damit eine deutlichere Unterscheidung von den Eltern. Das Crossover ermöglicht somit größere Sprünge im Lösungsraum, während die Mutation hilft, weitere Individuen in der Nähe vorangegangener Individuen zu finden.

5.5.2 Aufbau des Optimierungsprozesses

Damit OCTOPUS eine Evaluierung der getesteten Modellzustände vornehmen kann, benötigt die Komponente jene Informationen, die die Optimierungsziele darstellen. Eine in diesem Zusammenhang sehr bedeutende Information ist die Tatsache, dass der in OCTOPUS implementierte genetische Algorithmus Zielwerte nur *minimieren* kann. Die Ziele müssen also so definiert sein, dass eine bessere Lösung durch niedrigere Zielwerte gekennzeichnet ist. Ist jedoch eine Maximierung der Zielwerte gewünscht, lässt sich diese „Einschränkung“ durch eine „Minimierung des negativen Wertes“, also eine Multiplikation des bzw. der Zielwerte mit -1 , relativ leicht umgehen. Bei der Auswahl der richtigen Optimierungsziele ist selbstverständlich auch hier wieder Ingenieurverstand gefragt, damit der Algorithmus schneller zum Ziel findet.

Im Fall des vorliegenden Rechenmodells soll die Stützenanordnung so gewählt sein, dass einerseits möglichst kleine Verformungen der Struktur auftreten und andererseits natürlich ein wirtschaftliches Tragwerk entsteht. Zusätzlich könnte als weiteres Optimierungsziel theoretisch auch die Definition eines stützenfreien Bereichs dienen, um diesen Raum für die große, neue Zugangstreppe frei zu halten. Dadurch würde sich der Lösungsraum jedoch um eine weitere Dimension erhöhen und der Optimierungsprozess länger dauern. Auf Grund der ohnehin beschränkten Variationsmöglichkeiten der Stützenpositionen ist eine maßgebliche Beeinträchtigung der Treppenkonstruktion jedoch auszuschließen. Konkret soll der Algorithmus nun also folgende drei Ergebniswerte der Struktur minimieren: die maximal auftretende Horizontalverformung, die maximal auftretende Vertikalverformung und die Gesamtmasse des Tragwerks. Vor allem das dritte Ziel steht jedoch mit den beiden ersten im Widerspruch, da zu große Verformungen im Allgemeinen durch Vergrößerung der Bauteilquerschnitte (also mehr eingesetztes Material) kompensiert werden. Die zur Extrahierung der Optimierungsziele aus den Ergebnissen erforderlichen Befehle sind in Abbildung 5.15 dargestellt.

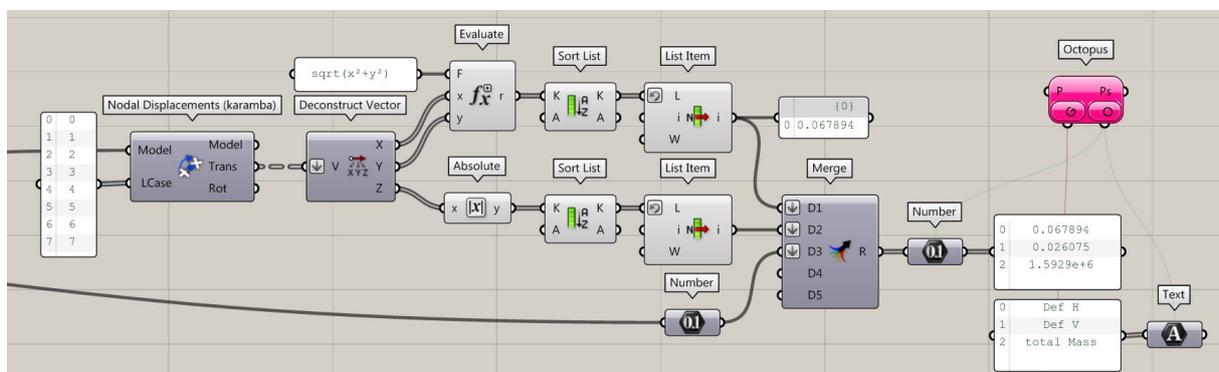


Abb. 5.15: Komponenten zur Definition des Optimierungsprozesses

Der Befehl „Nodal Displacements“ gibt die Verschiebung jedes einzelnen Modellknotens (Anzahl abhängig von der FE-Netzgröße) pro berechnetem Lastfall (bzw. Lastkombination) aus. Als Eingangsinformationen benötigt dieser Befehl ein berechnetes Modell sowie den zu behandelnden Lastfall. Mit dem vorgeschalteten Panel, welches eine Auflistung aller acht Lastkombinationen beinhaltet, werden somit für jeden Knoten des Modells acht Verschiebungsvektoren ausgegeben. Da das berechnete Modell aus 966 auszuwertenden Knoten besteht, sind das Ergebnis dieser Komponente 7728 Verschiebungsvektoren. Über den Befehl „Deconstruct Vector“ erfolgt eine Zerlegung dieser Vektoren in deren X-, Y- und Z-Anteile. Der gesamte Horizontalanteil eines dreidimensionalen Verschiebungsvektors lässt sich ermitteln aus dem Betrag des zweidimensionalen X-Y-Vektors, was über den Befehl „Evaluate“ und der Formel für den Betrag eines zweidimensionalen Vektors geschieht. Das Ergebnis sind folglich 7728 Verschiebungswerte in der Einheit m. Die Befehle „Sort List“ sowie „List Item“ sortieren diese Werte der Größe nach und weisen den Maximalwert aus.

Ähnliches passiert mit den Verschiebungsanteilen in Richtung der globalen Z-Koordinate. Da diese Verschiebungen jedoch sowohl positive als auch negative Werte annehmen können, erfolgt vor der Sortierung eine Normierung der Verschiebungsanteile. Den letzten Wert – das Gesamtgewicht der Konstruktion – gibt die Komponente „Optimize Cross Section“ unter dem Punkt „Mass“ aus (vgl. Abbildung 5.13). Dieser Wert ist in kg berechnet und in Abbildung 5.15 im Zahlen-Container enthalten. Die Komponente „Merge“ erstellt aus diesen drei einzelnen Werten eine Liste mit drei Einträgen, um sie in weiterer Folge in OCTOPUS integrieren zu können. Ein weiteres Panel mit den Bedeutungen der drei Zahlenwerte als Einträgen ordnet diesen dann in OCTOPUS deren Bezeichnung richtig zu.

Schlussendlich müssen noch die erforderlichen Einstellungen für OCTOPUS selbst erfolgen. Es ist leicht erkennbar, dass diese Komponente eine etwas andere Struktur aufweist, als alle übrigen in GRASSHOPPER implementierten Befehle. Die Verwendung der üblichen Eingangs- und Ausgangsanschlüsse hat keinen Einfluss auf den Optimierungsvorgang (sondern lediglich auf die Darstellung der Ergebnisse innerhalb der Komponente) und ist damit nicht zwingend erforderlich. An deren Stelle treten die an der Unterseite angeordneten Punkte „G“ für „Genome“ sowie „O“ für „Objectives“ (also Optimierungsziele). Als Genome werden die beiden Gene-Pools am Anfang der GRASSHOPPER-Schaltung definiert, die Optimierungsziele sind einerseits die drei Zahlenwerte im Zahlen-Container sowie die zugehörigen Bezeichnungen im Text-Container. Abbildung 5.16 zeigt eine Übersicht des gesamten Modells in GRASSHOPPER inklusive der visuellen Darstellung, wie die grafische Zuweisung der Gene und Optimierungsziele innerhalb des Modells mit OCTOPUS funktioniert.

Die in Abschnitt 5.5.1 vorgestellten Begriffe im Zusammenhang mit genetischen Algorithmen lauten für die vorliegende Aufgabenstellung wie folgt: Ein Individuum bezeichnet einen fertigen Modellzustand, also eine klar definierte Stützenanordnung. Die Genome der Individuen sind die beiden Gene-Pools, deren einzelne Parameter (für die Rotation sowie die Neigung der Stützen) als Gene der Individuen fungieren. Für den Optimierungsprozess in OCTOPUS ist es irrelevant, dass es noch zahlreiche weitere Parameter und Algorithmen gibt, die einen Einfluss auf das Modellergebnis ausüben (wie etwa der eigenständige Algorithmus zur Querschnittsoptimierung). Wie aus der Darstellung des parametrischen Gesamtmodells in Abbildung 5.16 hervorgeht, betrachtet OCTOPUS nur ein paar Werte am Beginn des Modells (die Gene) und untersucht die Auswirkungen auf die Optimierungsziele, die als Ergebnisse der statischen Berechnung ganz am Ende des parametrischen Modells herauskommen. Dem genetischen Algorithmus ist es also egal, was zwischen den Startwerten und den Zielwerten geschieht, und er weiß natürlich auch nicht, dass dazwischen eine statische Berechnung mit mehreren Lastkombinationen und Optimierung von Bauteilquerschnitten abläuft. Er kann nur feststellen, dass sich manche Gene für das Erreichen der ihm vorgegebenen Ziele besser eignen als andere.

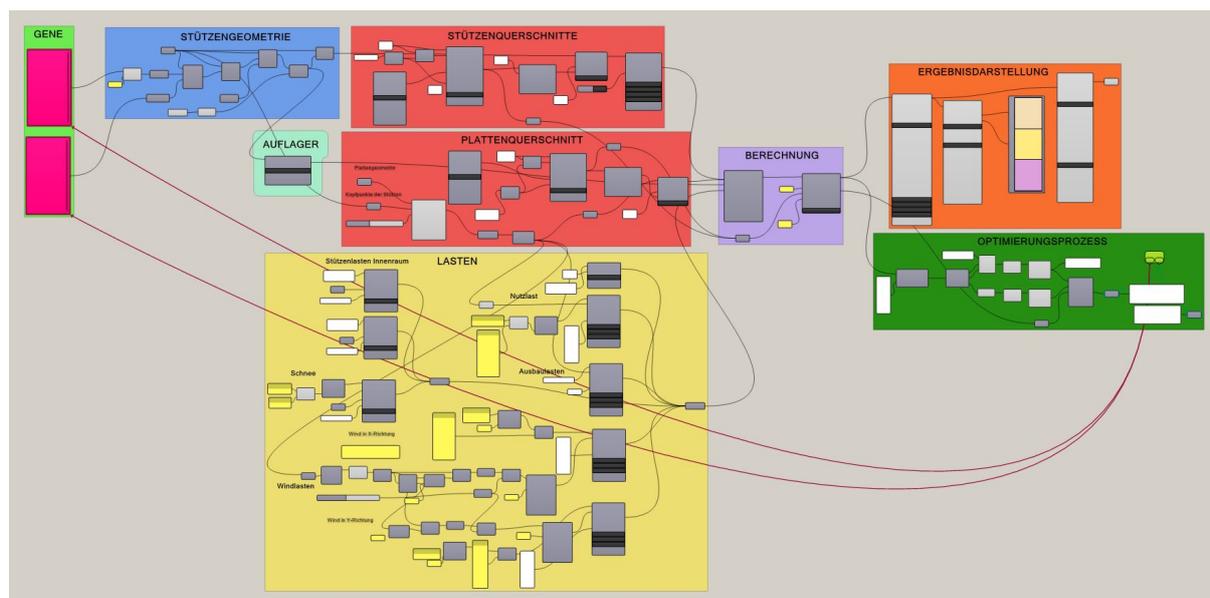


Abb. 5.16: Modellübersicht in GRASSHOPPER

Die zur vollständigen Erläuterung noch ausstehenden Begriffe betreffen die Funktions- bzw. Arbeitsweise eines genetischen Algorithmus und gehören demnach zu den Einstellungen des Algorithmus für die gegebene Aufgabenstellung. Sie finden sich auf der rechten Seite im OCTOPUS-Programmfenster wieder, welches sich durch Doppelklick auf die OCTOPUS-Komponente öffnet. Abbildung 5.17 zeigt das OCTOPUS-Programmfenster mit seinen Einstellungsmöglichkeiten.

Neben der Feinjustierung des Algorithmus hinsichtlich der oben erläuterten Begriffe wie *Elitismus*, *Mutationswahrscheinlichkeit*, *Mutations-Rate*, *Crossover-Rate* und *Populationsgröße* gibt es einige weitere Möglichkeiten, den Optimierungsprozess zu beeinflussen. Im Zusammenhang mit der Populationsgröße gilt es allerdings zu beachten, dass sich laut [18, S. 48] der dort eingetragene Wert nur auf die *neu erschaffenen* Individuen bezieht. Für den gegenständliche Fall bedeutet das: Bei der in OCTOPUS eingestellten Populationsgröße von 100 Individuen (Population Size 100) und dem hier definierten Elitismus von 0,5 (also 50%) beinhaltet eine Generation somit 200 Individuen. Darüber hinaus lässt OCTOPUS dem Anwender auch die Wahl zwischen zwei Selektionsverfahren („SPEA-2 Reduction“ und „HypE Reduction“) zur Auswahl der geeignetsten Individuen sowie drei Mutationsverfahren („Polynomial Mutate“, „Alt. Polyn. Mutate“ und „HypE Mutation“). Auf deren spezifische Unterschiede wird an dieser Stelle jedoch nicht näher eingegangen sondern stattdessen auf die Diplomarbeit [18] von Robert Vierlinger verwiesen. Am geeignetsten für die vorliegende Aufgabenstellung haben sich die in Abbildung 5.17 gewählten Einstellungen erwiesen. Liefert ein Optimierungsprozess auch nach langer Laufzeit und Veränderung der Parameterdefinition keine zufriedenstellenden Ergebnisse, kann es sich als hilfreich erweisen, ein anderes Selektions- bzw. Mutationsverfahren zu verwenden.

In der Mitte des Programmfensters ist ein dreidimensionales Achsensystem zu erkennen, welches zur Visualisierung des Lösungsraums verwendet wird. Die Zuteilung der Optimierungsziele zum Achsensystem erfolgt anhand der sich darunter befindlichen Liste mit den Bezeichnungen der Zielwerte. Dabei fällt auf, dass neben der Einteilung nach den genannten drei Achsen noch zwei weitere Möglichkeiten zur Darstellung der Ergebnisse im Lösungsraum existieren. Dies ist jedoch erst bei mehr als drei Optimierungszielen erforderlich, um eine bessere oder schlechtere Eignung der einzelnen Individuen erkennen zu können. Die Einteilung erfolgt in der vierten und fünften

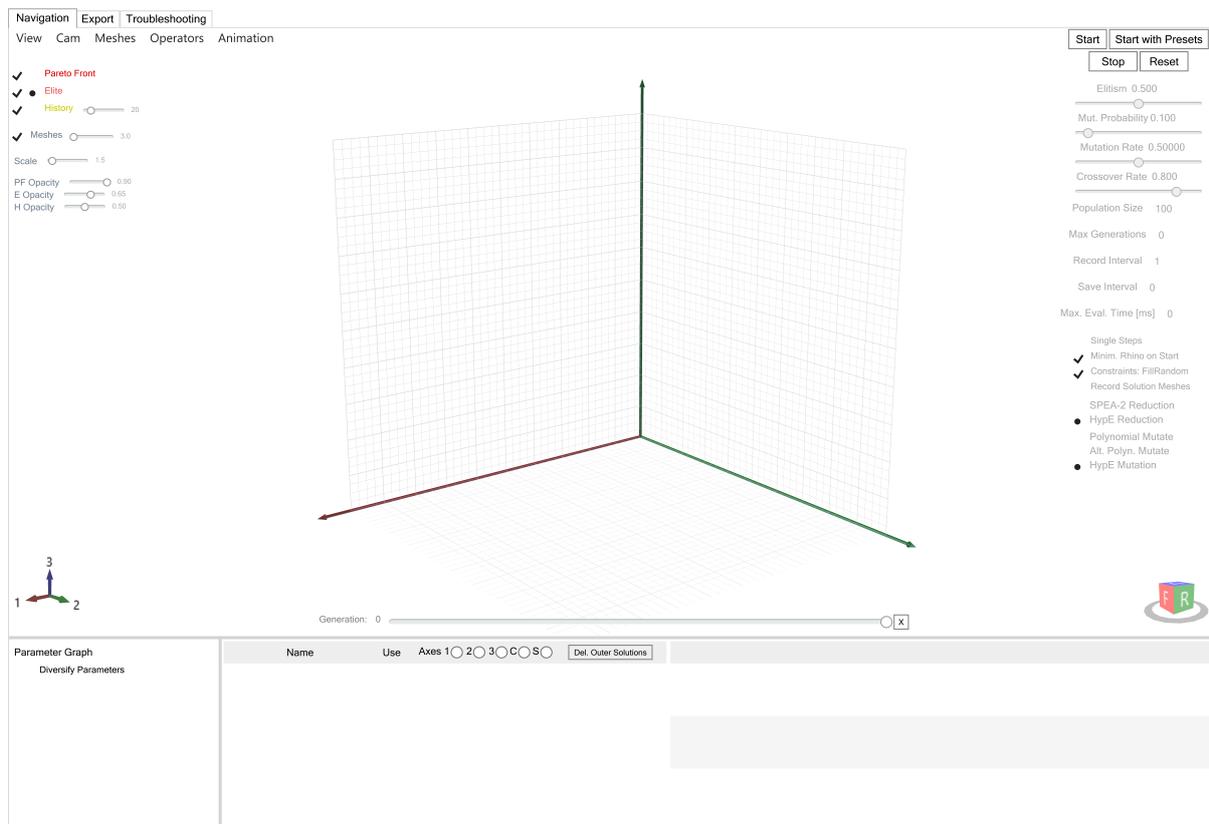


Abb. 5.17: Programmfenster der OCTOPUS-Komponente mit den möglichen Einstellungen

Dimension anhand der dargestellten Farbe einer Lösung oder deren Größe im Vergleich zu den anderen. Die linke Seite dieses Fensters beinhaltet außerdem einige weitere Einstellungen, die die allgemeine Darstellung der Lösungsmenge bzw. der Ergebniswerte betreffen. Im Wesentlichen können dadurch gewisse Teile der Lösungsmenge ein- bzw. ausgeblendet oder deren Transparenz verändert werden. Dies erleichtert die Suche und Auswahl der besten Lösungen bzw. deren Abwägung untereinander.

Der Start des Optimierungsvorgangs kann über zwei Varianten erfolgen: Durch Verwendung der Schaltfläche „Start“ beginnt der Algorithmus seine Arbeit mit einer Startpopulation aus zufällig generierten Werten. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, mit einem spezifischen Modellzustand bzw. mit vordefinierten Genen zu starten, um schneller gute Ergebnisse zu erhalten. Zudem muss vor dem Start festgelegt sein, ob etwaige Abbruchkriterien definiert werden, wie in Abschnitt 5.5.1 vorgestellt. Für die vorliegende Aufgabenstellung soll der genetische Algorithmus jedoch ganz „unvoreingenommen“ und ohne Abbruchbedingungen beginnen. Aus diesem Grund ist es jedoch umso wichtiger, einen Indikator zu haben, der während dem andauernden Optimierungsvorgang anzeigt, wie „gut“ die bereits gefundenen Lösungen sind. Eine Einschätzung ist einerseits über die Echtzeit-Eintragung der Lösungen im Lösungsraum durch den Algorithmus möglich sowie andererseits die Darstellung des „Parameter Graph“, der bei Vorhandensein von Ergebnissen im OCTOPUS-Interface unten links zu sehen ist. Dieser Graph visualisiert die pro Individuum verwendeten Startwerte im Gene-Pool über Verbindungslinien und variiert demnach immer weniger, je mehr sich der Algorithmus der optimalen Lösung nähert (vgl. auch Abbildung 5.18 im

folgenden Abschnitt). Selbstverständlich besteht auch die Möglichkeit, den Optimierungsvorgang zwischenzeitlich anzuhalten und zu einem späteren Zeitpunkt wieder fortzusetzen.

5.5.3 Ergebnisse des Optimierungsprozesses

Mit den in Abbildung 5.17 dargestellten Einstellungen und einer Laufzeit von rund 15 Stunden (Start gegen 18:00 Uhr, Stopp gegen 9:00 Uhr des Folgetages) erfolgte die Evaluierung von 311 Generationen bzw. 31 200 Modellzuständen. Die Pareto-Front der 311. Generation besteht aus 95 Individuen, die in der Folge als Grundlage zur Auswahl der geeignetsten Lösung dienen. Der Fortschritt des genetischen Algorithmus in der Lösungsfindung lässt sich sehr anschaulich über die Entwicklung des Parameter-Graphen über mehrere Generationen hinweg darstellen. Abbildung 5.18 zeigt die Parameter-Graphen der Pareto-Front für die Generationen 1, 150 und 311.

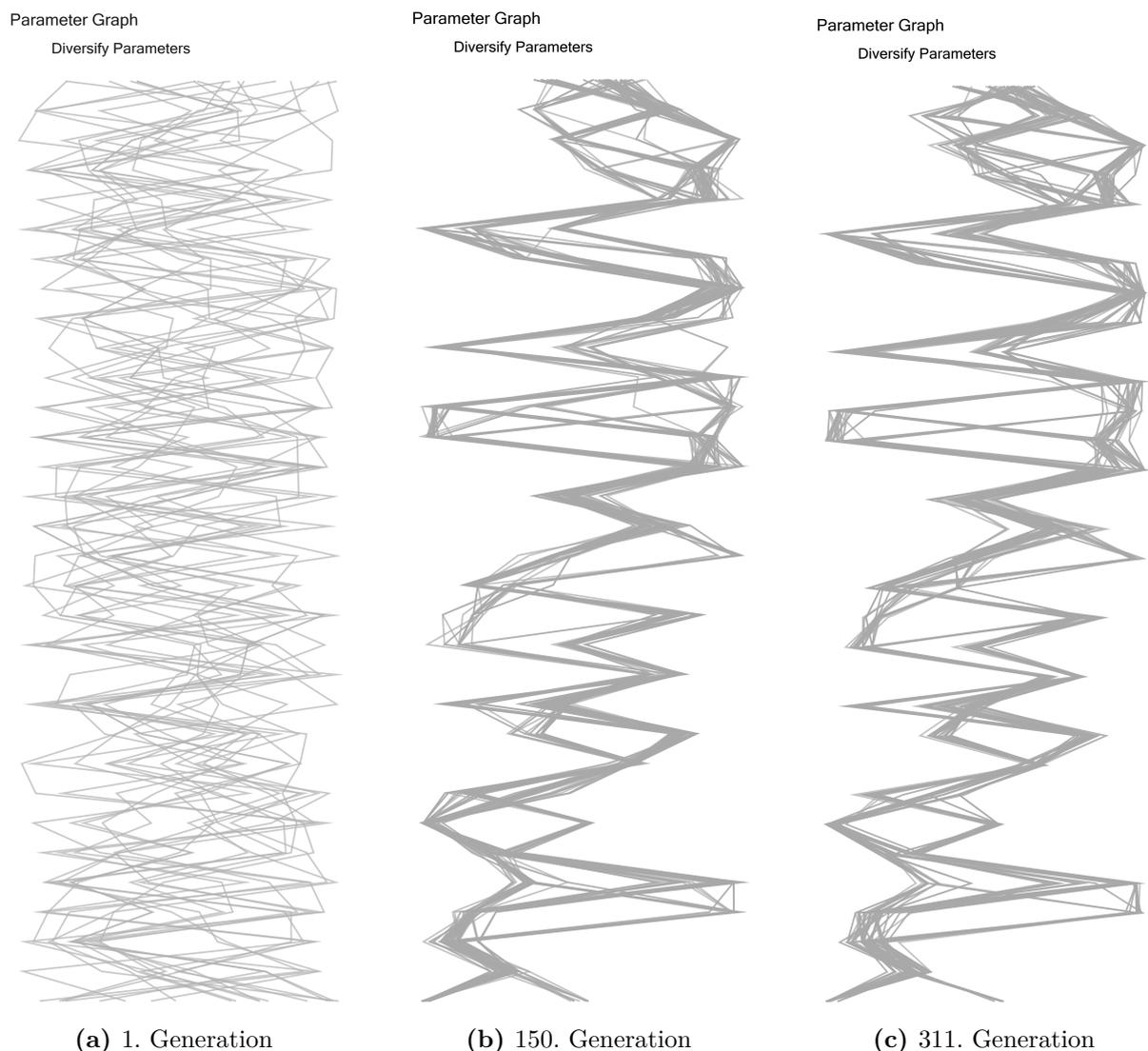


Abb. 5.18: Parameter-Graph für die Pareto-Front der jeweiligen Generation

Deutlich erkennbar ist die chaotische Verteilung der Gene in der ersten Generation, während der Unterschied zwischen 150. und 311. Generation schon nicht mehr so gravierend ist. Auffällig

ist jedoch auch, dass es auch in der 311. Generation keinen eindeutigen Strang gibt, um den sich alle Verbindungslinien gruppieren. Abhängig von der Definition der Optimierungsziele bzw. deren Abhängigkeit zueinander ist es ein klares Merkmal der multi-objektiven Optimierung, dass es eben nicht *die eine* optimale Lösung gibt, sondern bei Vorliegen der Pareto-Front (also der Gruppe an besten Lösungen) immer noch eine Abwägung zwischen den Optimierungszielen erfolgen muss. So ist es gerade im vorliegenden Fall mit den sehr gegensätzlichen Zielen unmöglich, eine eindeutige Lösung zu finden, wenn man die Ergebnisse nur nach deren Zahlenwerten vergleicht. Es wird immer eine Lösung geben, die in zumindest einem Ziel noch besser ist und dafür in einem anderen Ziel schlechter (dies entspricht ja auch die Definition der Pareto-Front). Es obliegt somit wiederum dem Anwender, zusätzliches Wissen in das System einzubringen und beispielsweise mittels einer Präferenz für ein Ziel eine weitere Abstufung bzw. Reihung der Ergebnisse vorzunehmen. Auf die gegenständliche Aufgabenstellung umgelegt bedeutet dies eine Abwägung zwischen der erlaubten Horizontalverformung, Vertikalverformung und der gewünschten Bauteilgeometrie. Mit der Festlegung einer annehmbaren Verformung kann somit eine weitere Reihung der Ergebnisse erfolgen und auf dieser Reihung aufbauend die Wahl auf die Variante mit dem geringsten Materialeinsatz fallen.

Die einzelnen Lösungen stellt OCTOPUS als Punkte in einem dreidimensionalen Raum dar, aufgespannt durch die drei Optimierungsziele. Durch Auswahl eines Punktes aktualisiert sich die GRASSHOPPER- bzw. KARAMBA-Schaltung unter Verwendung dessen spezifischer Gene und die Stützenstellung sowie Bauteilquerschnitte sind sofort im Hauptfenster von Rhino ersichtlich. Die Anordnung der Lösungen der Pareto-Front im dreidimensionalen Lösungsraum gleicht einer konvexen Schale, die im Raum aufgespannt ist. Je höher das Gewicht der Tragstruktur (aufgetragen auf der Z-Achse), desto kleiner sind die Verformungen und umgekehrt. Abbildung 5.19 zeigt diese konvexe Schale der Pareto-Front in der 311. Generation.

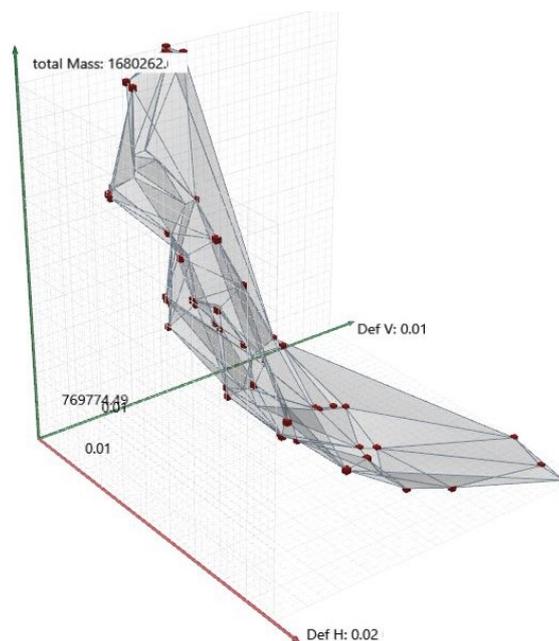


Abb. 5.19: Visualisierung der Pareto-Front der 311. Generation

Neben baustatischen Überlegungen bei der Auswahl eines Ergebnisses kann selbstverständlich auch eine optische bzw. architektonische Beurteilung der Stützenstellung einfließen. In diesem Zug kann so etwa auch manuell auf die Position der großen Zugangstreppe Rücksicht genommen werden. Im gegenständlichen Fall dient jedoch die Horizontalverformung (und hier die maximal

auftretende Verformung in Richtung des Bestandstragwerks) als wichtigstes Auswahlkriterium für die beste Stützenstellung. Als Richtwert für die maximal zulässige Verformung des hier modellierten Tragwerks in Y-Richtung gelten 2 cm. Verschiebungen dieser Größenordnung können über konstruktive Maßnahmen wie etwa die Ausbildung einer Bauteilfuge mit ausreichend Bewegungsspielraum problemlos aufgenommen werden, wodurch eine Lastübertragung der horizontalen Kräfte in das Bestandstragwerk ausgeschlossen ist. Die Darstellung der gewählten Stützenanordnung erfolgt jedoch erst nach dem Export in RFEM.

Die in Abbildung 5.15 gezeigte Schaltung extrahiert die gesamte Horizontalverformung der Struktur als Optimierungsziel. Durch weiteres Zerlegen in ihre X- und Y-Anteile können die maximal auftretenden Verformungen in X- und Y-Richtung direkt in GRASSHOPPER ausgelesen werden. Für die gewählte Stützenanordnung beträgt die in KARAMBA berechnete maximale horizontale Verformung 13,3 mm in Y-Richtung und ebenfalls 13,3 mm in X-Richtung bei einer Plattenstärke von 40 cm. Die Durchmesser der Betonstützen liegen zwischen 40 cm und 55 cm, wobei es drei Stützen mit einem Durchmesser von 40 cm gibt, fünf mit 45 cm, wieder drei mit 50 cm und die übrigen fünf Stützen weisen einen Durchmesser von 55 cm auf. Die vom Algorithmus gewählten Neigungen der Stützen nutzen den vorhandenen Spielraum zwischen den beiden Extremwerten 0° und 20° relativ gleichmäßig aus. Bemerkenswert ist die Rotation der Stützen im Grundriss, die sich nicht nur an den orthogonalen Belastungsrichtungen orientiert, sondern stellenweise sogar etwas chaotisch anmutet (vgl. dazu Abbildung 5.20 in Abschnitt 5.7.1). Für diese Stützenanordnung erfolgt im nächsten Schritt der Export nach RFEM.

5.6 Export nach RFEM

Die Übertragung von Geometriedaten, eventuell noch mit verknüpften baustatischen Informationen wie Lasten und Bauteilquerschnitten, zwischen verschiedenen Computerprogrammen (und damit Dateiformaten) stellt im modernen Bauwesen eine nicht unübliche Aufgabe dar. Gleichzeitig ist man dabei meistens mit dem Problem konfrontiert, dass mit dem Export zum gegenwärtigen Zeitpunkt praktisch immer ein Informationsverlust einhergeht. Da dieser Informationsverlust natürlich zusätzlichen Arbeitsaufwand bei der Wiederherstellung der Daten bedeutet, kommt der Auswahl der zu exportierenden Informationen sowie Exportmöglichkeiten erhebliche Bedeutung zu. Es ist daher oftmals eine Abwägung erforderlich, für welche Informationen sich der Export lohnt und welche Daten gegebenenfalls auch zeitsparend neu modelliert werden können.

Abschnitt 4.6.2 hat bereits die vorhandenen Möglichkeiten für den Export eines in KARAMBA berechneten Modells vorgestellt. Für die Übertragung der Stützenstellung inklusive Stützenquerschnitte eignet sich demnach die in KARAMBA integrierte Komponente für den Datenaustausch sehr gut. Der Export der Plattengeometrie mit dem Zwischenschritt der Übertragung in RHINO („bake“) führt auf eine in RFEM erhaltene Fläche, die entsprechend den Mesh-Einstellungen in GRASSHOPPER in viele kleine Dreiecke unterteilt ist. Eine Berechnung in RFEM als zusammenhängende Platte ist mit etwas Überarbeitung zwar möglich, auf Grund der beim gegenständlichen Projekt relativ einfachen Plattengeometrie ist eine Neumodellierung in RFEM jedoch die schnellere Variante. Von der gesamten Plattengeometrie erfolgt somit nur der Export der Konturlinien und in RFEM die anschließende Konstruktion einer neuen Fläche aus diesen Linien.

Ähnliches gilt für die im Modell vorhandene Belastung. Auf Grund der Unterschiede zwischen RFEM und KARAMBA in der Modellierung von Lasten werden Flächenlasten von KARAMBA mit den im vorliegenden Beispiel getroffenen Einstellungen eigentlich als Punktlasten behandelt und demnach auch als Punktlasten in RFEM übertragen. Die sehr übersichtliche und einfache Definition von Einwirkungen in RFEM erlaubt somit eine rasche Neumodellierung dieser Daten nach dem Export. Nichtsdestotrotz exportiert die Komponente „Export Model to DStV“

sämtliche Lasten des Modells, die jedoch anschließend in RFEM über die Auswahl der jeweiligen angelegten Lastkombinationen leicht entfernt werden können. Das KARAMBA-Handbuch weist den Anwender außerdem darauf hin, dass die Darstellung der Querschnitte in RFEM nur bei Verwendung der englischen Programmversion funktioniert. Die Programmsprache lässt sich über die Programmoptionen und einen Neustart von RFEM jedoch sehr leicht ändern. Für den Export wird der benötigte Befehl nach der Berechnungskomponente an das Modell angehängt und ferner der gewünschte Speicherort für die „.stp“-Datei definiert. Das Einspielen dieser Datei in RFEM erfolgt sodann über die Option „Importieren“.

5.7 Weiteres Vorgehen in RFEM

Ziel des nun folgenden Abschnitts ist es, das aus dem Optimierungsprozess in KARAMBA erhaltene optimierte statische Rechenmodell zu überprüfen und die noch zusätzlich erforderlichen Berechnungsschritte im Sinne einer korrekten und vollständigen statischen Berechnung der Tragwerksstruktur aufzuzeigen. Es ist jedoch ausdrücklich nicht Aufgabe dieser Diplomarbeit, einen „abgabereifen“ statischen Bericht für das vorliegende Tragwerk auszuarbeiten, sondern den Nutzen des Einsatzes genetischer Algorithmen in der Tragwerksplanung sowie die Vorteile aus der Kombination zweier dazu erforderlicher Statik-Programme aufzuzeigen. Der Fokus liegt damit primär auf der Überprüfung bzw. Bestätigung der Berechnungsergebnisse aus KARAMBA sowie einer Erweiterung des statischen Modells um die im Zuge der Bearbeitung mit diesem Programm eingeschränkt behandelten Punkte, die allerdings für eine seriöse Bewertung des Tragwerks erforderlich sind. Nach dieser Erweiterung des statischen Modells ist somit eine genauere Überprüfung der „Performance“ der ursprünglich durch den genetischen Algorithmus generierten Struktur möglich. Die für eine vollständige statische Berechnung noch fehlenden Arbeitsschritte lauten wie folgt:

- Erstellung von Lastkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit
- Berechnung und Auswahl der Bewehrung für die Betonbauteile
- Berechnung der Tragfähigkeit der Struktur nach Eurocode 2
- Berechnung der Gebrauchstauglichkeit nach Eurocode 2
- Dokumentation der Berechnungen in einem statischen Bericht

Speziell die detaillierte Nachweise der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit hinsichtlich der Rissbildung im Betontragwerk sowie Analysen betreffend das Langzeitverhalten von Beton (nicht-lineare Verformungen) stellen jedoch keinen Schwerpunkt dieser Diplomarbeit dar. Daher erfolgt im Anschluss nur eine Betrachtung bzw. Berechnung jener Ergebnisse, die eine aussagekräftige Bewertung des durch den genetischen Algorithmus erhaltenen Modellzustands erlauben.

Eine wesentliche Einschränkung bei der Berechnung des Tragwerks in KARAMBA war das Fehlen der Lastkombinationen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und die damit einhergehende „Ungenauigkeit“ durch deren Kompensation mit einer geringeren Ausnutzung der Bauteile. Darüber hinaus erfolgte die Bemessung bzw. Auswahl der Betonquerschnitte in KARAMBA eigentlich nach Eurocode 3 für Stahlbauten (vgl. Abschnitt 5.4.4) und nicht nach Eurocode 2 für Stahlbetonbauten. Bei Berechnung eines Stahltragwerks in KARAMBA müsste jetzt somit nur mehr eine Validierung der erhaltenen Ergebnisse erfolgen. Da es sich jedoch um ein Tragwerk aus Stahlbeton handelt, ist dessen genaue Berechnung nur in einem konventionellen Statik-Programm möglich. Wie in Abschnitt 3.4.2 bereits erwähnt, erlaubt RFEM mit seinen Zusatzmodulen

(Programmerweiterungen) eine Bemessung von Bauteilen mit den in einschlägigen Normen geforderten Nachweisen. Für das hier behandelte Tragwerk kann mit Hilfe dieser Zusatzmodule die Berechnung der erforderlichen Bewehrung der einzelnen Bauteile und außerdem eine genaue Bemessung nach Eurocode 2 inklusive Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens von Beton erfolgen.

Es ist außerdem zu überprüfen, ob die ermittelte Stützenstellung die Aufstockung des Bestandsgebäudes soweit gegen Horizontalkräfte aussteifen kann, dass keine weiteren Verstärkungsmaßnahmen im Kern erforderlich sind. Zur Bewertung der Eignung verzichtet diese Arbeit auf die Einpflegung der optimierten Stützenstellung in das Gesamtmodell, das weiter oben in Abbildung 5.2 dargestellt ist. Das optimierte Rechenmodell muss für sich alleine ohnehin tragfähig sein und die Kriterien der Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Wichtig ist es in diesem Zusammenhang nur, eine korrekte Ausführung der notwendigen Bauteilfuge zu garantieren, die eine Verschiebung der Platte um maximal 2 cm in Richtung Bestandsgebäude ermöglicht. Dieser Grenzwert für die Verformung in Y-Richtung soll somit bei einer Berechnung in RFEM nicht überschritten werden.

5.7.1 Ergebnisse nach Überarbeitung des Modells

Bei der genauen Bemessung der Stützen in RFEM unter Zuhilfenahme des Zusatzmoduls „RF-Beton Stützen“ konnte für jeweils eine Stütze mit Durchmesser 40 cm und 45 cm keine ausreichende Bewehrung gefunden werden. Aus diesem Grund erfolgte eine Vergrößerung der Durchmesser dieser beiden Stützen um jeweils 5 cm. Abbildung 5.20 zeigt die endgültigen Stützenquerschnitte nach genauerer Bemessung des statischen Modells in RFEM.

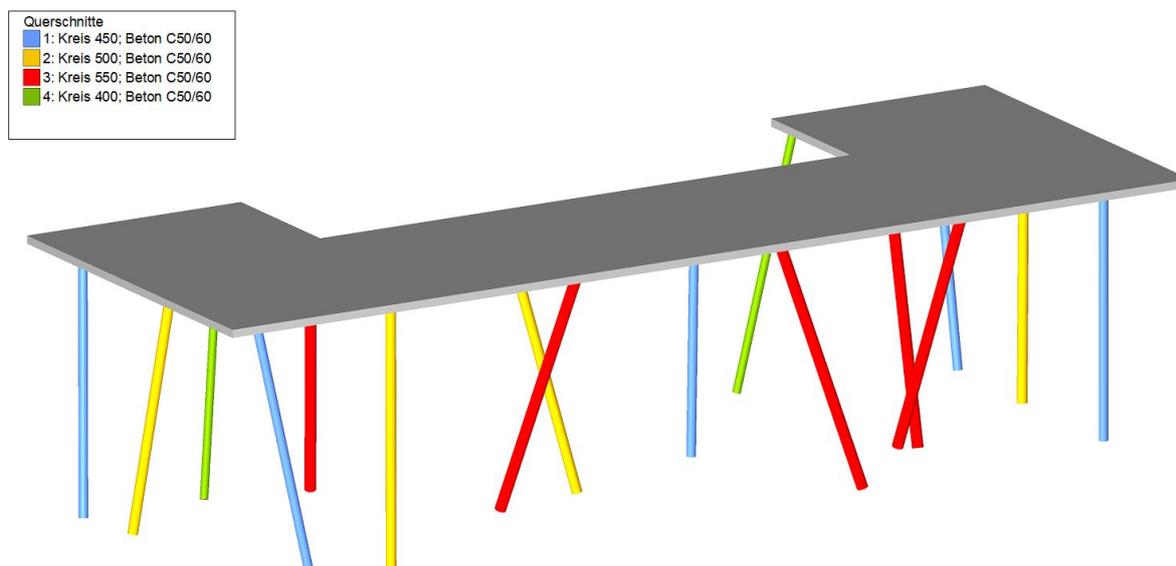


Abb. 5.20: Stützenquerschnitte nach Überarbeitung des statischen Modells in RFEM

Der maximal auftretende Bewehrungsgrad der Stützen beträgt rund 6,7%, was bei einer geplanten Ausführung als Fertigteilstützen akzeptabel ist. Die Bemessung der Platte erfolgte mit dem Modul „RF-Beton Flächen“. Die gewählte Grundbewehrung der Platte mit $\varnothing 12/10$ cm für die obere und untere Bewehrungslage in beide Verlegerichtungen deckt bis auf Zulagen in den Stützenanschlussbereichen die erforderliche Bewehrung der Platte ab und entspricht ebenfalls einer üblichen Bewehrungsmenge. Die der Berechnung zugrundeliegende Annahme einer gelenkigen

Neben den üblichen Inhalten eines statischen Berichts (Lasten, Lastkombination, Materialien, Querschnitte, Ergebnisse etc.) ist es für die Dokumentation der Ergebnisse des vorliegenden Modells natürlich unumgänglich, die exakte Stützenanordnung und die auftretende Verformung in Richtung Bestandsgebäude inklusive einer Erläuterung der Fugenausbildung in den statischen Bericht aufzunehmen. Auch die Auswirkungen auf das Bestandsgebäude müssen bei derartigen Projekten selbstverständlich in einen statischen Bericht aufgenommen werden. Die in KARAMBA geleistete Vorarbeit ist indirekt über das Vorhandensein der Geometrie natürlich auch dokumentiert und es empfiehlt sich ein Hinweis, wie die Generierung der Stützenstellung erfolgt ist.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Die Digitalisierung und damit die Veränderung der gewohnten Arbeitsprozesse hat längst auch im Bauwesen und damit selbstverständlich auch in der Tragwerksplanung Einzug gehalten. Eine relativ neuartige Methode zur Berechnung von Tragstrukturen ist jedoch die Verwendung parametrischer Rechenmodelle in Kombination mit automatisierten Optimierungsaufgaben.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Vorteilen parametrischer Tragwerksplanung und den damit einhergehenden Optimierungsmöglichkeiten im Zuge der statischen Berechnung. Neben diesen Vorteilen bei der Tragwerksberechnung an sich zeigt diese Arbeit auch auf, welchen Einfluss der Einsatz dieses Konzepts auf die architektonische Wirkung von Gebäuden haben kann. Diese Arbeit beinhaltet folgende Themen:

- Einführung in die Tragwerksplanung und Erläuterung einer statischen Berechnung
- Vorstellung der Fähigkeiten und Komponenten eines konventionellen Statik-Programms
- Vorstellung eines neuartigen, parametrischen Statik-Programms
- Darstellung der Vorteile einer Kombination beider Programme anhand einer Variantenstudie eines realen Projekts

6.1 Interpretation der Projektstudie

Das Ergebnis der Projektstudie aus Kapitel 5 verdeutlicht für die untersuchte Aufgabenstellung nicht nur die Möglichkeiten, die durch parametrische Rechenmodelle entstehen, sondern darüber hinaus auch den konkreten Nutzen für den Bauherrn durch Materialersparnis oder Wegfall von aufwändigen Sonderkonstruktionen. Gleichzeitig darf jedoch auch nicht unerwähnt bleiben, dass bei der untersuchten Aufgabenstellung dieser Nutzen nur durch die erfolgte Kombination der beiden Programmtypen entstehen konnte. Mit der alleinigen Verwendung eines Programmtyps wäre dieses Ergebnis nicht oder nur mit unverhältnismäßig großem Zeitaufwand erreicht worden.

Das Ergebnis der gegenständlichen Analyse verdeutlicht zudem auch die Auswirkung auf die Architektur, die mit dem Einsatz parametrischer Lösungsansätze einhergeht. Die für den Betrachter im ersten Moment chaotisch anmutende Tragstruktur stellt tatsächlich einen Bruch mit gewohnten Bauwerksgeometrien dar, die nicht zuletzt aus baustatischen Gründen zumeist eine gewisse Symmetrie und Orthogonalität aufweisen.

6.2 Ausblick

Der in den letzten Jahren eingesetzte Wandel bzw. die Entwicklungen im Zuge der Digitalisierung, auch in Hinblick auf *Building Information Modeling* (BIM), sind längst noch nicht abgeschlossen und weder aufhaltbar noch umkehrbar. Auch die scheinbare Frage, die sich derzeit bei der Bearbeitung von Projekten noch ergibt, ob der für die Implementierung von BIM anfallende

„Aufwand“ in Relation zum Nutzen steht, wird sich in den kommenden Jahren mehr und mehr erübrigen.

Diese Entwicklungen führen gleichzeitig auch zu einem Aufbrechen alter Denkmuster, Arbeitszeit als Zeitaufwand sei auf ein Minimum zu begrenzen ob der hohen Personalkosten. Bei der Automatisierung von Prozessen durch den Einsatz von Algorithmen für diverse Planungsaufgaben steht der dafür benötigte Zeitaufwand eher im Hintergrund, da ein wesentlicher Teil der Bearbeitungszeit automatisiert und ohne menschliches Zutun abläuft.

Wie diese Arbeit jedoch auch sehr deutlich hervorhebt, ist die Berücksichtigung limitierender Umweltfaktoren – zumindest derzeit noch – nicht in zufriedenstellendem Maße von Computern zu bewerkstelligen, was eine Beaufsichtigung genau so wie Interpretation der erhaltenen Ergebnisse unumgänglich macht.

Interessant wird in der Zukunft zu beobachten sein, welche Entwicklungen und/oder Computerprogramme sich für gewisse Aufgabenstellungen gegenüber anderen behaupten können. Bei konventionellen Statik-Programmen ist definitiv zu erwarten, dass auch sie sich der Automatisierung von Abläufen bzw. der Optimierung von Tragstrukturen stärker widmen werden – teilweise sind derartige Funktionen auch jetzt schon in begrenztem Ausmaß verfügbar.

Diese Diplomarbeit verdeutlicht sehr anschaulich den Nutzen, der durch die mit KARAMBA gelieferten Möglichkeiten entsteht. Da es sich dabei jedoch mehr um ein Konzept als eine patentierbare Idee handelt, nämlich das Konzept der parametrischen Tragwerksplanung, bleibt abzuwarten, ob die Zukunft weitere Programme mit ähnlichen Möglichkeiten hervorbringt oder KARAMBA jenes Werkzeug ist, das sich am deutlichsten profilieren kann. Auch die Entwicklung von KARAMBA ist selbstverständlich ein andauernder Prozess, der sich durch laufende Funktionserweiterungen verdeutlicht. So wird sich beispielsweise die in dieser Diplomarbeit beschriebene Einschränkung bei der Berechnung von Stahlbetontragwerken in den kommenden Jahren deutlich reduzieren, was nicht zuletzt auch die Implementierung einer Komponente zur Bewehrungsoptimierung in KARAMBA mit der letzten „Work In Progress-Version“ bestätigt.

Viele Jahrzehnte waren geprägt von einem gegenseitigen Unverständnis zwischen Architekten und Bauingenieuren bzw. Tragwerksplanern, da es als Widerspruch galt, Gebäude wirtschaftlich und architektonisch anspruchsvoll zu planen. Wie Clemens Preisinger, der Erfinder von KARAMBA, in [12] schreibt, erlauben und erleichtern diese neuartigen Werkzeuge jedoch die Vereinigung beider Ansprüche bei der Planung von Tragstrukturen. Gleichzeitig verlangen sie nach einer neuen Generation an Anwendern, die sowohl auf dem Gebiet der Tragwerksplanung als auch mit architektonischem Wissen ausgestattet sind. Preisinger drückt dies darin folgendermaßen aus:

Karamba is the instrument for this new generation of architectural engineers and engineering architects to play their new tunes on.

Man darf also gespannt sein auf noch kommende Entwicklungen, das Potential ist längst noch nicht ausgeschöpft. Wichtig in diesem Zusammenhang ist – neben einer gesunden Portion Skepsis – jedoch sicherlich Offenheit und Neugier gegenüber neuen Konzepten und die Überzeugung, dass der Fortschritt unaufhaltsam ist, ganz im Kontext der gern verwendeten Redewendung „Stillstand bedeutet Rückschritt“.

Literaturverzeichnis

- [1] Austrian Standards International. *Eurocodes – Eine stille Revolution im Bauwesen*. 2018. URL: <http://www.eurocode.at> (Zugriff am 08.03.2018).
- [2] Bundesimmobiliengesellschaft m.b.H. *Johannes Kepler Universität Linz - Neu- und Umgestaltung des JKU Campus*. 2018. URL: <http://www.big.at/projekte/jku-campus-linz/> (Zugriff am 06.05.2018).
- [3] M. Butteltmann und B. Lohmann. „Optimierung mit Genetischen Algorithmen und eine Anwendung zur Modellreduktion“. In: *at – Automatisierungstechnik* 52 (2004), S. 151–163.
- [4] Dlubal Software GmbH. *RFEM 5 Programm-Beschreibung*. Tiefenbach: Dlubal Software GmbH, 2015.
- [5] European Committee for Standardization. *CEN Members*. 2018. URL: <https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=CENWEB> (Zugriff am 08.03.2018).
- [6] H. Lechner und D. Heck (Hrsg.) *Leistungsmodell Tragwerksplanung [LM.TW]*. 2014. URL: https://www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/LM_VM_2014/lm_tragwerksplanung.pdf (Zugriff am 08.03.2018).
- [7] V. Nissen. *Einführung in Evolutionäre Algorithmen – Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg, 1997.
- [8] *OIB-Richtlinie 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit*. Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, März 2015.
- [9] *ÖNORM EN 1990:2013-03-15: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung*. Wien: Austrian Standards Institute, März 2013.
- [10] E. Podreka. „Generierung von Tragstrukturen im Bauwesen unter Zuhilfenahme parametrischer Berechnungsmodelle“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2014.
- [11] C. Preisinger. *Karamba – User Manual for Version 1.2.2*. Handbuch. Bollinger Grohmann Schneider ZT GmbH, jetzt: Bollinger und Grohmann ZT GmbH, 2013. 142 S.
- [12] C. Preisinger. „Linking Structure and Parametric Geometry“. In: *Architectural Design* 83 (2013), S. 110–113.
- [13] C. Preisinger und M. Heimrath. „Historical And Contemporary Approaches To Model-Driven Structural Design“. In: *Interlocking Digital And Material Cultures*. Hrsg. von S. Pfeiffer. Baunach: AADR, Spurbuchverlag, 2015, S. 121–133. ISBN: 978-3-88778-434-8.
- [14] C. Preisinger und M. Heimrath. „Karamba – A Toolkit for Parametric Structural Design“. In: *Structural Engineering International* 24 (2014), S. 217–221.
- [15] Robert McNeel & Associates. *Funktionen von Rhino 6*. 2018. URL: <https://www.rhino3d.com/6/features> (Zugriff am 15.03.2018).
- [16] Robert McNeel & Associates. *Was sind NURBS?* 2018. URL: <https://www.rhino3d.com/nurbs> (Zugriff am 15.03.2018).
- [17] Springer Gabler Verlag (Hrsg.) *Gabler Wirtschaftslexikon, Stichwort: Algorithmus*. 2018. URL: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/57779/algorithmus-v11.html> (Zugriff am 15.03.2018).

-
- [18] R. Vierlinger. „Multi Objective Design Interface“. Diplomarbeit. Technische Universität Wien, 2013.
- [19] Wikipedia, Die freie Enzyklopädie. *Pareto-Optimum*. 2018. URL: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Pareto-Optimum&oldid=176872233> (Zugriff am 14.05.2018).
- [20] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor und D. A. Fox. *The finite element method for solid and structural mechanics*. 7. Aufl. Oxford: Elsevier Ltd, Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN: 9780080951362.
- [21] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor und P. Nithiarasu. *The finite element method for fluid dynamics*. 7. Aufl. Oxford: Elsevier Ltd, Butterworth-Heinemann, 2014. ISBN: 9781856176354.
- [22] O. C. Zienkiewicz, R. L. Taylor und J. Zhu. *The finite element method: its basis and fundamentals*. 7. Aufl. Oxford: Elsevier Ltd, Butterworth-Heinemann, 2013. ISBN: 9781856176330.