

Diplomarbeit

BEAMS2FEM: Automatisierte Generierung parametrischer FEA-Modelle aus Scandaten zur Tragwerksanalyse und vertikalen Aufstockung von Bestandsindustrialgebäuden

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

BEAMS2FEM: Automated generation of parametric FEA models from scan data for structural analysis and vertical extension of existing industrial buildings

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Vitus Neppl

Matr.Nr.: 12209507

Betreuung: Assistant Prof. ⁱⁿ Dipl.-Ing. ⁱⁿ Dr. ⁱⁿ techn. **Julia Reisinger**
Institut für Hochbau und Industriebau
Forschungsbereich Integrale Planung und Industriebau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/210-01, 1040 Wien, Österreich

Wien, im März 2025

Kurzfassung

Die zunehmende Flächenversiegelung und der steigende Wunsch zukünftig nachhaltiger zu bauen, erfordern innovative Ansätze zur effizienteren Nutzung bestehender Industriegebäude. Diese Arbeit untersucht die automatisierte Generierung parametrischer Finiter-Elemente Modelle aus Scandaten für die Bewertung des Bestandtragwerks und des Aufstockungspotenzials von Industriegebäuden.

Hierzu wurde das BEAMS2FEM Framework Tool entwickelt. Dieses Tool ergänzt Strukturinformationen aus Scandaten mit Nutzereingaben, um effizient FE-Analysemodell für eine schnelle Bewertung der tragenden Struktur zu erstellen. Der Workflow kombiniert dabei Excel, zur Daten Ein- und Ergebnisausgabe, mit der Tragwerksberechnungssoftware Dlubal RFEM über ein, auf Python basiertes, Backendskript. Diese Methodik ermöglicht eine effektive Analyse der Tragfähigkeit bestehender Strukturen und reduziert den Planungsaufwand bei Aufstockungen.

Zur Validierung des Tools wurde BEAMS2FEM an zwei realen Industriebauwerken getestet. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Kombination von Scandaten und Nutzereingaben realistische Tragwerksmodelle semi-automatisch, schnell und unkompliziert generiert und analysiert werden können. Für beide untersuchten Hallen wurde ein Aufstockungspotenzial identifiziert. Eine Einschränkung des Tools liegt in der derzeit noch fehlenden Berücksichtigung horizontaler Lasten.

Diese Arbeit leistet einen Beitrag zur digitalen Tragwerksanalyse und zur nachhaltigeren Nutzung bestehender Industriebauwerke. Künftige Forschungsarbeiten könnten das Framework durch eine ganzheitlichere Lastenbetrachtung und die Implementierung gezielter Bestandsertüchtigungsmaßnahmen erweitern.

*Für bessere Lesbarkeit wird das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und weitere Geschlechteridentitäten sind ausdrücklich mitgemeint.

Abstract

The increasing land sealing and the growing demand for more sustainable construction methods require innovative approaches for the more efficient use of existing industrial buildings. This thesis examines the automated generation of parametric finite element models from scan data for structural assessment and potential for vertical extensions in industrial buildings.

For this purpose, the BEAMS2FEM framework tool was developed. This tool combines structural information from scan data with user inputs to efficiently create FE analysis models for quick evaluation of the load-bearing structure. The workflow integrates Excel for data input and result output with the structural calculation software Dlubal RFEM through a Python-based backend script. This methodology enables efficient analysis of the load-bearing capacity of existing structures and reduces planning uncertainties when for extensions.

To validate the approach, the method was tested on two real industrial halls. The results show that realistic structural models can be semi-automatically generated and analysed quickly by combining scan data and user inputs. For both examined halls, potential for vertical extensions was identified. A current limitation of the tool is the lack of consideration of horizontal loads.

This work contributes to digital structural analysis and the more sustainable use of existing industrial buildings. Future research could extend the framework by considering a more comprehensive load analysis and implementing targeted reinforcement measures for existing structures.

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CSV	Comma-Separated Values
EC	Eurocode
EN	Europäische Norm
ÖN	Österreichische Norm
FE	Finite Elemente
FEA	Finite Elemente Analyse
FEM	Finite Elemente Methode
GUI	Graphical User Interface
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
VE	Vertikale Extension
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Menschen bedanken, die mich während meines Studiums begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin, Frau Ass.-Prof. Dipl.-Ing.in Dr.in techn. Julia Reisinger, die mich während der Erstellung dieser Arbeit stets mit konstruktivem Feedback und großem Engagement unterstützt hat.

Ebenso danke ich meinen Eltern, meinen beiden Schwestern und meinen Großeltern, danke für Eure unermüdliche Unterstützung und dafür, dass Ihr immer für mich da seid.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meinen Freunden in Wien, München und meiner Heimatstadt Straubing bedanken – insbesondere bei meiner Freundin Paula.

1 Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Forschungsprojekt: RE:STOCK INDUSTRY	1
1.3	Forschungsfragen.....	2
1.4	Methodik.....	2
1.5	Ergebnisse	2
1.6	Umfang des entwickelten BEAMS2FEM Framework Tools.....	3
1.7	Einsatzbereich des BEAMS2FEM Framework Tools.....	4
2.	Literaturrecherche und State of the Art.....	4
2.1	Das Prisma Prinzip zur systematischen Literaturrecherche.....	4
2.2	Scan to FEM.....	4
2.2.1	Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart.....	4
2.2.2	Aktueller Forschungsstand	5
1.1.1	Digitale Erfassung von Gebäuden.....	7
1.1.2	Ergebnisse dieser Literaturrecherche.....	7
1.2	Potenzialanalyse und vertikale Extension.....	8
1.2.1	Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart.....	8
1.2.2	Aktueller Forschungsstand	9
1.2.3	Vertikale Aufstockung mit Raumzellen	9
1.2.4	Ergebnisse dieser Literaturrecherche.....	10
1.3	Digitale Tools für FE-Analyse von Bestandstragwerken	10
1.3.1	Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart.....	10
1.3.2	Aktueller Forschungsstand	11
1.3.3	Design Space	11
1.3.4	Grundlagen der Softwareentwicklung.....	12
1.3.5	Software.....	12
1.3.6	Ergebnisse dieser Literaturrecherche.....	13
3.	Methodische Vorgehensweise	15
3.1	Datenanalyse.....	15
3.1.1	Allgemeine Differenzierung von Plan- und Scandaten.....	15
3.1.2	Benötigte Bauwerksinformationen	16
3.2	Erprobung verschiedener Ansätze zur Entwicklung eines FEA Framework Tools	18
3.2.1	Definieren des Design Spaces zur Softwareauswahl	18
3.2.2	Approach 1 (Grasshopper – Karamba 3D).....	19

3.2.3	Approach 2 (Grasshopper – RFEM)	21
3.2.4	Finaler Approach 3 (Python – RFEM).....	23
4.	BEAMS2FEM Framework Tool.....	25
4.1	Pipeline.....	25
4.2	Excel Benutzeroberfläche	26
4.3	Python Backend	26
4.3.1	Python – RFEM-Schnittstelle und Repository.....	26
4.3.2	Codierung	27
4.4	Lastkombinatorik und Betonbemessung	28
4.5	Workflow.....	29
4.5.1	Verarbeitung der Scandaten.....	29
4.5.2	Eingabe der Modellparameter	29
4.5.3	Definition der vertikalen Extension	29
4.5.4	Eingabe der Lastsituationen	29
4.5.5	Ergebnisabgabe und Betonbemessung.....	30
5.	Proof of Concept.....	31
5.1	Vorbemerkung	31
5.2	Proof of Concept Use Case A	31
5.2.1	Use-Case A	31
5.2.2	Tragwerkselemente	32
5.2.3	Gebäudescan	33
5.2.4	Geplante vertikale Extension.....	34
5.2.5	Angesetzte Lasten.....	34
5.2.6	Tragwerkserstellung	35
5.2.7	Ergebnisse.....	37
5.3	Proof of Concept Use Case B.....	38
5.3.1	Use Case B	38
5.3.2	Tragwerkselemente	39
5.3.3	Gebäudescan	40
5.3.4	Geplante vertikale Extension.....	40
5.3.5	Angesetzte Lasten.....	40
5.3.6	Tragwerkserstellung	41
5.3.7	Ergebnisse.....	43
5.4	Ergebnisse des Proof of Concept	44
6.	Schlussfolgerung und Ausblick	45

Literaturverzeichnis	47
Abbildungsverzeichnis	50
Tabellenverzeichnis	51

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

In Österreich ist das Wirtschaftswachstum ein zentrales Mittel zur Wohlstandssicherung. Dieses Wachstum führt zu einer kontinuierlichen Bautätigkeit und damit zu einer zunehmenden Flächenversiegelung. Bis 2021 wurden bereits insgesamt 5.800 km² Bodenfläche verbaut – dies entspricht etwa 7 % der gesamten Landesfläche Österreichs. Ein erheblicher Teil dieser Fläche entfällt dabei auf Industrie- und Lagergebäude. [1].

Trotz zahlreicher brachliegender Industrie- und Gewerbeflächen mit Nachnutzungspotenzial werden Neuansiedlungen und Erweiterungen nur selten in bestehende Strukturen integriert. Häufig fehlen die dazu notwendigen Informationen zur Tragfähigkeit der Bestandsstrukturen. Zudem existieren kaum Methoden, die die vorhandenen Tragwerksbestände präzise erfassen und bewerten können. [2]

CO₂-Emissionen, Abfallaufkommen und Bodenversiegelung könnten bei einer Nachnutzung solche Bestandsindustriengebäude, z.B. durch nachträgliche Aufstockung und die Implementierung vertikaler Produktionsprozesse, erheblich reduziert werden. [3]

1.2 Forschungsprojekt: RE:STOCK INDUSTRY

Das Forschungsprojekt RE:STOCK INDUSTRY ist ein bis 2027 laufendes Forschungsprojekt unter der Hauptkoordination der Technischen Universität Wien. Eines der zentralen Ziele ist die Entwicklung einer digitalen Methodik zur Analyse und Bewertung von Bestandstragwerken im Hinblick auf Wiederverwendung, Modernisierung und Ertüchtigung bei vertikaler Extension.

Durch den Einsatz von LIDAR-Scans, Photogrammetrie und KI-gestützten Algorithmen sollen Bestands FEM-Modelle automatisiert erstellt werden. Diese Modelle sollen nicht nur eine präzise Tragwerksanalyse, sondern auch eine kreislaforientierte Dokumentation ermöglichen. Zudem sollen vertikale Nutzungskonzepte und Modernisierungsmaßnahmen integriert werden. Eine Augmented Reality Anwendung soll Re-Use-Konzepte direkt am Bauplatz visualisieren, und Entscheidungen über den Bestandserhalt und die Wiederverwendung von Tragwerksstrukturen unterstützen. Das Projekt richtet sich dabei an ein breites Spektrum von Akteuren und setzt auf eine praxisnahe, innovative Umsetzung durch ein interdisziplinäres Expertenteam. [2]

Teil dieses Forschungsprojekts ist bereits eine Forschungsarbeit, in der das SCAN2BEAMS Framework [4] entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um eine Methode zur Identifikation tragender Bauwerksstrukturen aus 3D-Photogrammetriedaten in Industriebauwerken.

Diese Diplomarbeit wird zum Teil auf die Ergebnisse des im Kapitel 2.2 näher erläuterten SCAN2BEAMS Framework aufbauen.

1.3 Forschungsfragen

Ziel der Diplomarbeit ist die Beantwortung folgender Forschungsfragen:

- RQ1: Wie können parametrische Finite-Elemente-Modelle für Industriebaustrukturen automatisiert aus Punktwolken und Plandaten generiert werden?
- RQ2: Wie können innerhalb eines Finite-Elemente-Analyse-Prozesses automatisiert vertikale Aufstockungen integriert werden, um Potentialanalysen und Variantenvergleiche durchzuführen?

1.4 Methodik

Die Methodik dieser Arbeit folgt einer systematischen, dreistufigen Literaturrecherche. Die Recherche orientiert sich am dabei am PRISMA-Prinzip (siehe Kapitel 2.1) und deckt die Themenbereiche „Scan to FEM“, „Potenzialanalyse und vertikale Extension“ sowie „Digitalen Tools für FEA von Bestandstragwerken“ ab.

Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen erfolgt eine Analyse und Strukturierung der relevanten Eingabedaten, die aus Scandaten, Planunterlagen, und Nutzerangaben bestehen. Diese Datenbasis dient der Entwicklung und Evaluierung verschiedener Frameworks. In einer Variantenstudie werden drei spezifische Frameworks verglichen, wobei schließlich eine Excel-Python-RFEM Variante ausgewählt wird.

Dieser finale Ansatz führt zur Entwicklung des BEAMS2FEM Framework Tools, das einen effizienten Workflow zur Tragwerksbewertung und Aufstockungspotenzialanalyse bestehender Industriegebäude auf Grundlage von Scandaten ermöglicht.

Die Anwendbarkeit des entwickelten Tools wird abschließend anhand zweier realer Use Cases überprüft. Diese Validierung dient der praxisnahen Bewertung des Workflows und bildet die Grundlage für die abschließende Schlussfolgerungen sowie den Ausblick.

1.5 Ergebnisse

Im Rahmen dieser Diplomarbeit werden folgende Ergebnisse erarbeitet:

- Entwicklung des BEAMS2FEM Framework Tools zur Bestandstragwerksanalyse und Potenzialanalyse für Aufstockungen von Industriegebäude auf Basis von Scandaten.
- Durchführung eines Proof of Concept zur Bewertung der Tragfähigkeit und der vertikalen Erweiterungsmöglichkeiten an zwei realen Industriegebäuden.

1.6 Umfang des entwickelten BEAMS2FEM Framework Tools

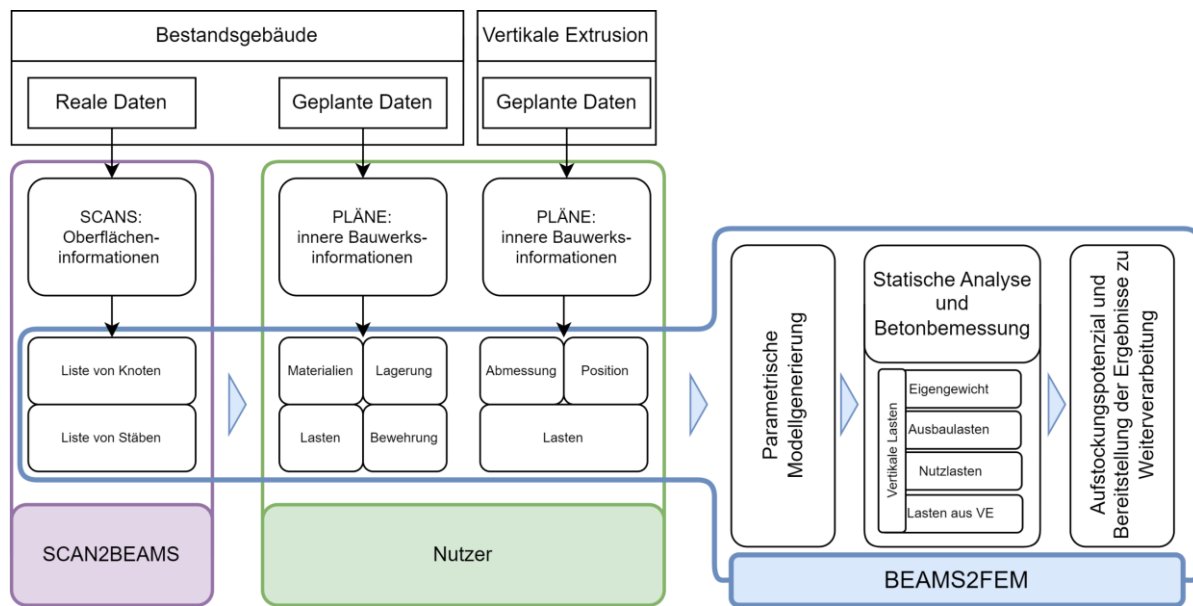


Abbildung 1.1: In Blau umrandet der Umfang des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Tools

Das entwickelte BEAMS2FEM Framework Tool fokussiert sich auf folgende in Abbildung 1.1 dargestellten Kernfunktionen:

- Integration der aus dem SCAN2BEAMS Framework gewonnenen Scandaten.
- Einbindung der vom Nutzer aus den Plandaten des Bestands entnommenen Informationen.
- Einbindung der vom Nutzer aus den Plandaten der vertikalen Extrusion (VE) entnommene Informationen.
- Parametrische Modellierung des Bestandstragwerks sowie der vertikalen Extension.
- Statische Analyse und Betonbemessung (Berücksichtigt ausschließlich vertikale Lasten)
- Bewertung des Aufstockungspotenzials mithilfe der Betonbemessung und Bereitstellung der Ergebnisse für eine weiterführende Nutzung.

Aktuell noch nicht Bestandteil des BEAMS2FEM Tools sind:

- Horizontale Lasten auf das Bestandstragwerk und die vertikale Extension (z. B. Windlasten).
- Betrachtung der Aussteifung des Bestandstragwerks oder der vertikalen Extension.
- Nachweise zur Standsicherheit der vertikalen Extension.
- Detaillierte Ausarbeitung von Anschlüssen der vertikalen Extension.
- Fundierungsnachweise.
- Ertüchtigungsmaßnahmen für das Bestandstragwerk.

1.7 Einsatzbereich des BEAMS2FEM Framework Tools

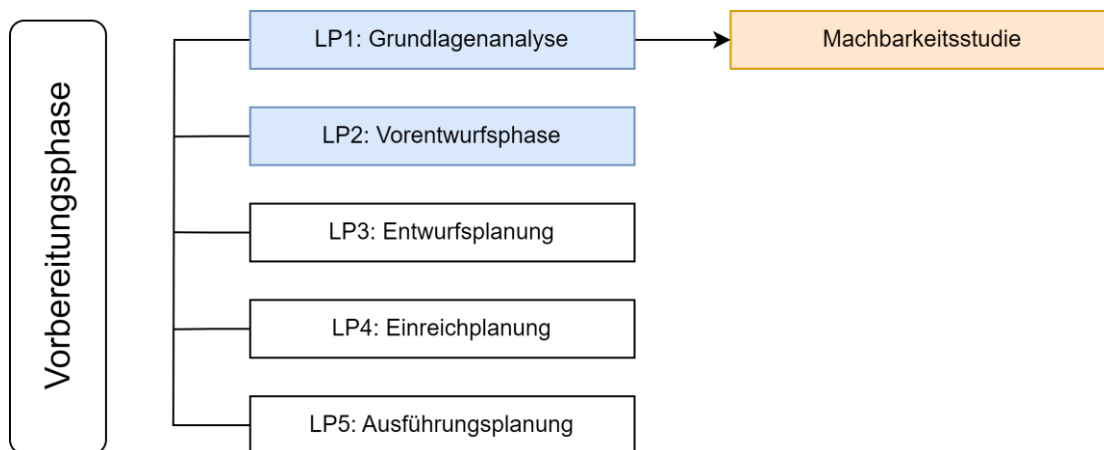


Abbildung 1.2: Leistungsphase zum Einsatz des BEAMS2FEM Framework Tool

Das entwickelte BEAMS2FEM Framework Tool eignet sich besonders für einen Einsatz in den ersten beiden Leistungsphasen (siehe Abbildung 1.2, blau markiert) und insbesondere für die Erstellung von Machbarkeitsstudien. Dank der einfachen und schnellen Modellgenerierung lassen sich Variantenvergleiche durchführen, die eine erste datenbasierte Einschätzung der Tragfähigkeit des Bestands ermöglichen. Dadurch können fundierte Entscheidungen über mögliche vertikale Extension bereits in einer frühen Planungsphase getroffen werden.

Das entwickelte Tool unterstützt somit Planende in der frühen Bauphase.

2. Literaturrecherche und State of the Art

2.1 Das Prisma Prinzip zur systematischen Literaturrecherche

Das PRISMA-Prinzip (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) ist eine evidenzbasierte Literaturmethode, die ursprünglich für die Erstellung von Metaanalysen entwickelt wurde. Die Erstellung von sogenannten „Prisma Flow Charts“ (vgl. z.B. Abbildung 2.1) hilft bei der Identifikation, Auswahl und Auswertung relevanter Literatur. Das Prinzip liefert so einen strukturierten Ansatz um den aktuellen Forschungsstand, transparent und vollständig widerzuspiegeln. [5]

2.2 Scan to FEM

2.2.1 Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart

SCOPUS und Web of Science wurden nach passenden wissenschaftlichen Papers durchsucht. Die Suche beschränkte sich auf peer-reviewed Artikel aus dem Gebiet des Ingenieurwesens aus den Jahren 2014-2024. Die Titelsuchbegriffe „Scan FEM“, „Cloud FEM“, „Skeleton Frame Scan“, „Skeleton Frame Scan FEM“, „Industrial Building Scan“ wurden mit Logik Operatoren (or/and) verbunden, um eine umfassende Übersicht über den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich zu erhalten.

Zudem wurde die Forschungsarbeit SCAN2BEAMS [4], die bereits im Rahmen des Forschungsprojekts RE:STOCK Industry entstanden ist, mit einbezogen.

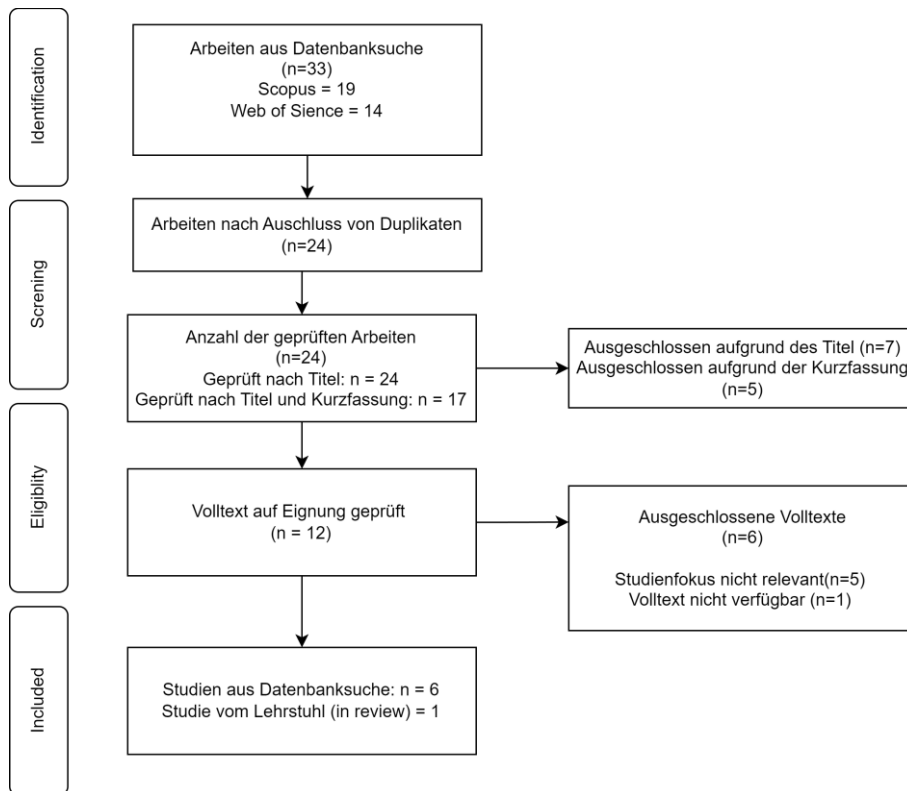


Abbildung 2.1: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Scan to FEM“, final wurden sieben wissenschaftliche Arbeiten ausgewählt

Abbildung 2.1 zeigt das Prisma Flow Chart zur Literaturrecherche zu „Scan to FEM“. Zur Darstellung des aktuellen Forschungsstands im Bereich Scan to FEM wurden insgesamt sieben wissenschaftliche Arbeiten berücksichtigt.

2.2.2 Aktueller Forschungsstand

Die von Castellazzi et al. (2015) [6] vorgestellte Studie bildet die Grundlage zahlreicher weiterer wissenschaftlicher Arbeiten im Bereich SCAN2FEM. Sie beschreibt einen halbautomatisierten Arbeitsablauf zur Umwandlung von lasergescannten Punktwolken in Finite-Elemente-Modelle (FEM) durch die Vereinfachung von Punktwolkendaten. Dadurch wird die Modellierung historischer Gebäude mit komplexen Strukturen ermöglicht. Aufbauend auf dieser Studie präsentierten Castellazzi et al. (2022) [7] die *Cloud2FEM* Software, eine Open-Source-Software, die die Konvertierung von Punktwolken in FE-Netze automatisiert.

Ein parametrischer Ansatz zur Modellierung von Denkmälern wird in der Studie von Funari et al. (2021) [8] vorgestellt. Dieser Ansatz basiert auf einer visuellen Programmierung mit Grasshopper die eine schnelle Überführung von Punktwolken in geometrische FE-Modelle ermöglicht. Der Studienfokus liegt dabei vor allem auf gemauerten historischen Strukturen.

Xu et al. (2017) [9] entwickelten einen Ansatz zur Segmentierung von Punktwolken durch voxelbasierte und probabilistische Modelle (VPM). Dabei dienen die inneren Attribute der Voxel als Grundlage zur Analyse geometrischer Beziehungen zwischen diesen (ein Voxel bezeichnet in der Computergrafik einen Gitterpunkt in einem 3D-Gitter, vergleichbar mit einem Pixel in einer 2D-Struktur). Eine auf Wahrscheinlichkeiten basierende Methode modelliert die Konnektivität zwischen Voxel und fasst ausgewählte zu Segmenten zusammen. Diese Methode liefert auch bei ungleichmäßigen Punktdichten oder Rauschen noch robuste Ergebnisse.

Für die Modellierung der Unterkonstruktion von Stahlbrücken entwickelten Yan et al. (2022) [10] ein Verfahren zur automatisierten Erstellung der Geometrie, in dem auch vom Scan selbst nicht erfasste Bereiche approximiert werden.

Eine Studie von Selman et al. (2022) [11] konzentriert sich auf die Modellierung von Holzkonstruktionen, insbesondere der Dachkonstruktion des Aachener Doms. Hierbei identifiziert und approximiert ein automatisches Verfahren die Holzbalkenstruktur durch die Erkennung von Balken und deren Verbindungen innerhalb der Punktwolke.

2.2.2.1 Forschungsarbeit *SCAN2BEAMS*

Das Paper *SCAN2BEAMS* (in review) von Reisinger et al. (2025) [4] präsentiert ein Framework zur automatisierten Identifikation von Tragwerksstrukturen industrieller Gebäude auf der Basis von, aus Bilddaten generierten, 3D-Punktwolken. Da diese Diplomarbeit, auf den Ergebnissen der *SCAN2BEAMS* Forschungsarbeit aufbaut, wird im Folgenden kurz detaillierter dessen Inhalte eingegangen.

Die *SCAN2BEAMS* Methode besteht im Wesentlichen aus vier Schritten:

1. Punktwolkenverarbeitung und Rasterdiskretisierung:

Basierend auf der gegebenen Punktwolke wird die Datenmenge in ein Raster mit einer benutzerdefinierten Auflösung unterteilt. Innerhalb jedes Rasterpunkts werden Punktkoordinaten zu Zellen akkumuliert, wodurch ihrer Punktdichten, räumlichen Verteilungen und struktureller Relevanz bewertet werden können. Diese Diskretisierung ermöglicht es Punktzugehörigkeiten im Scanbereich nachzuvollziehen.

2. Extraktion struktureller Elemente:

Es wird angenommen, dass Träger und Stützen achsenparallel über den gesamten Raum verlaufen (Stützen erstrecken sich kontinuierlich vom Boden bis zur Decke). Dadurch vereinfacht sich die Problemstellung auf die Erkennung achsenparalleler Linien. Die extrahierten Linien repräsentieren die Kerngeometrie der Strukturelemente. Diese werden anschließend weiter nachbearbeitet, um ihrer Präzision zu verbessern.

3. Hough-Transformation zur Linienerkennung:

Um die lineare Geometrie von Trägern und Stützen zu identifizieren, wird eine Hough-Transformation auf jede achsenparallele Ebene (also auf die XY-, XZ- und YZ-Ebenen) des diskretisierten Rasters angewendet. Diese Technik erkennt lineare Merkmale im Datensatz, die potenzielle Kandidaten für Strukturelemente darstellen. Die erkannten Linien werden anschließend gefiltert, wobei die Orientierung, Länge, Dichte und räumliche Anordnung berücksichtigt wird. Dieser Schritt gewährleistet die präzise Klassifikation und Rekonstruktion von Stützen und Trägern.

4. .CSV Tragwerkssystem Daten als Output:

Das Endergebnis des *SCAN2BEAMS* Framework sind .CSV-Dateien, die Informationen über Knotenkoordinaten und die über Knoten definierten Träger und Stützen enthalten.

Diese .CSV-Dateien werden in der hier vorgestellten Diplomarbeit implementiert und zur automatisierten Erstellung des Bestandtragwerks genutzt.

1.1.1 Digitale Erfassung von Gebäuden

Die digitale Erfassung von Gebäuden ist wesentlicher Bestandteil der *SCAN2BEAMS* Methode und somit auch wichtig für diese Diplomarbeit. Deshalb soll im folgendem kurz auf die gebräuchlichsten Verfahren, insbesondere auf die beim *SCAN2BEAMS* genutzte Photogrammetrie, eingegangen werden.

Die digitale Erfassung von Gebäuden bildet die Grundlage für eine computergestützte Datenverarbeitung. Zur Digitalisierung realer Bauteile und Baustellenumgebungen kommen hauptsächlich Kameras und 3D-Laserscanner zum Einsatz. Die gewonnenen 3D-Daten lassen sich in verschiedenen Formaten darstellen, darunter Tiefenbilder, Punktwolken und Gitternetze. Ein besonders häufig genutztes Format für die digitale Erfassung von 3D-Modellen ist die Punktwolke. Diese stellt die Geometrie der Umgebung durch eine Vielzahl von Raumpunkten dar und wird in den Bereichen Vermessung, Gaming, autonomem Fahren und dem Bauwesen angewendet. [12]

Ein konkretes Anwendungsbeispiel zeigt Abbildung 2.2, hier wurde eine Baugrube mitsamt Baumaschinen durch Laserscanning und photogrammetrische Aufnahmen digitalisiert. Während die Laserscan-basierte Methode (b) ein Tiefenmodell ohne Farbinformationen liefert, enthalten die photogrammetrischen Punktwolken (c) zusätzlich Farb- und Texturinformationen. [9]

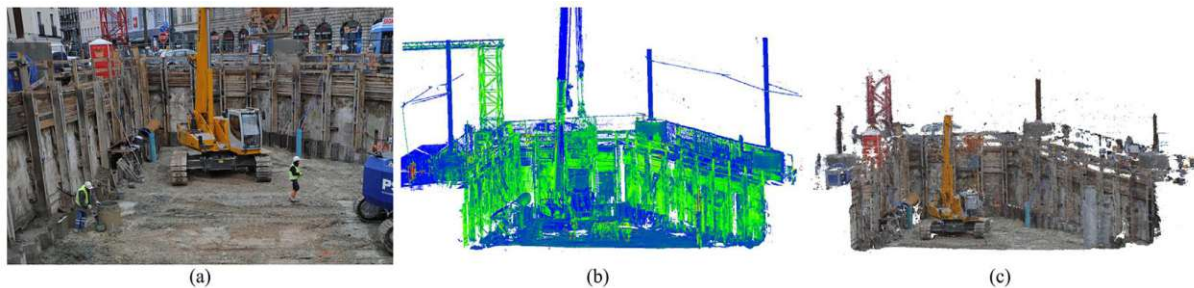


Abbildung 2.2: Baugruben- (a) Fotografie (b) Punktwolke aus Laserscan (c) Punktwolke aus Photogrammetrie [9]

Das Prinzip der Photogrammetrie basiert auf der Erfassung und Analyse von Bildern, die aus verschiedenen Winkeln aufgenommen wurden. Die Stereophotogrammetrie verwendet die Triangulationsmethode und funktioniert ähnlich wie das menschliche binokular Sehen. Dabei werden die Entfernungen und Winkel zwischen zwei oder mehreren Punkten gemessen, um deren Position im dreidimensionalen Raum zu bestimmen. Zwei oder mehr überlappende Fotos eines Objekts werden dazu aus leicht unterschiedlichen Perspektiven aufgenommen. Eine Spezialisierte Software analysiert diese Bilder, identifiziert gemeinsame Merkmale und berechnet die Positionsunterschiede zwischen den Aufnahmen. Durch Triangulation dieser Unterschiede kann die Software die 3D-Position der Merkmale bestimmen. Daraus können dann 3D-Modell oder Punktwolken erstellt werden. [13]

In der Literatur werden Ergebnisse photogrammetrischer Verfahren gelegentlich als „Scans“ oder „Scandaten“ bezeichnet, obwohl sie streng genommen keine direkten Distanzmessungen enthalten, sondern aus Bildanalysen rekonstruiert werden. Um die in der Literatur teils übliche Konnotation beizubehalten, wird in dieser Arbeit der Begriff „Scan“ auch für photogrammetrische Erfassungen verwendet. Dabei ist zu beachten, dass alle in dieser Arbeit betrachteten Scandaten ausschließlich mit der *SCAN2BEMAS* Method ermittelt wurden und somit aus photogrammetrischen Verfahren stammen.

1.1.2 Ergebnisse dieser Literaturrecherche

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass SCAN to FEM Methoden zwar erhebliche Fortschritte erzielt haben, ihre Anwendung auf industrielle Gebäudestrukturen – insbesondere Skelettbauten –

jedoch noch nicht ausreichend untersucht wurde. Aktuell gibt es noch keine veröffentlichten Studien, die sich mit der Erstellung von FE-Modellen aus Scandaten von Industriebauten beschäftigen.

Die Forschungsarbeit *SCAN2BEAMS* [4] (in review) beschäftigt sich mit dieser Forschungslücke. Die dort vorgestellte Methode extrahiert aus Scandaten von Industriegebäuden .CSV-Dateien, die das statisch relevante Tragwerk abbilden. Diese Diplomarbeit baut auf den Ergebnissen des *SCAN2BEAMS* Framework auf.

Photogrammetrie wird neben *SCAN2BEAMS* [4] und auch in anderen SCAN to FEM Verfahren genutzt. Durch ihre Anwendung lassen sich aus Bilddaten Punktwolken erstellen die Farb-, Textur- und Tiefeninformationen beinhalten. Vereinfachend werden auch die Ergebnisse photogrammetrischer Verfahren als in dieser Arbeit als „Scans“ bezeichnet.

1.2 Potenzialanalyse und vertikale Extension

1.2.1 Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart

SCOPUS und *Web of Science* wurden nach passenden wissenschaftlichen Papers durchsucht. Die Suche beschränkte sich dabei auf Artikel aus dem Ingenieurwesen und den Computerwissenschaften der Jahre 2014-2024. Die Titelsuchbegriffe „Vertical extrusion“, „Vertical extension“, „Potential“, „FEM“, „FEA“, „Industrial Building“ wurden mit Logik Operatoren (or/and) verbunden, um eine umfassende Übersicht über den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich zu erhalten.

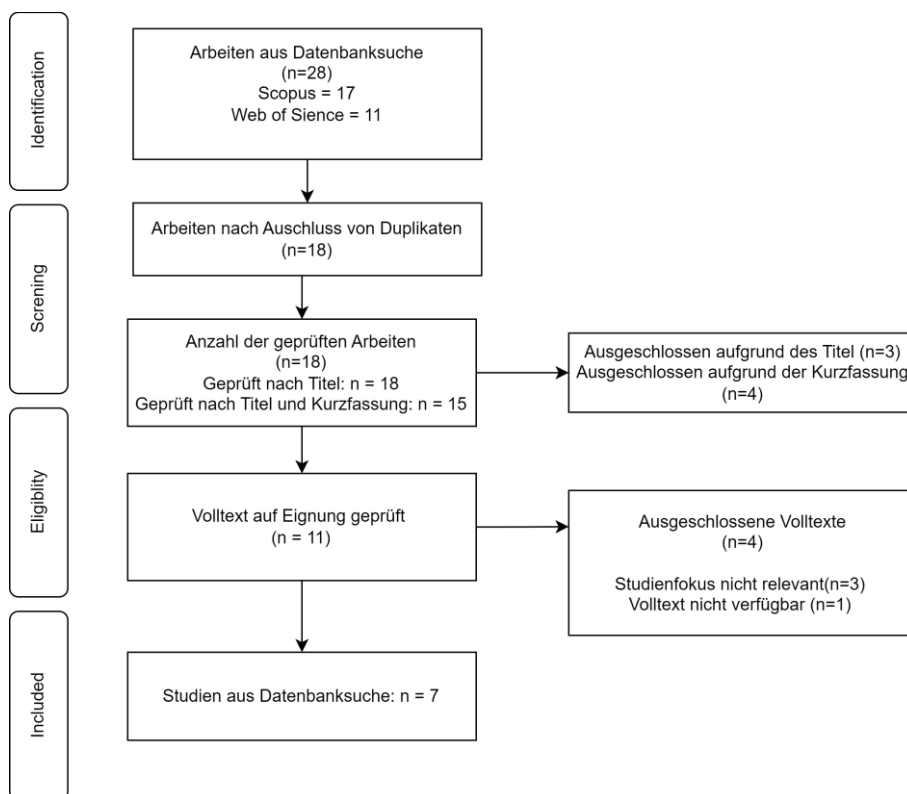


Abbildung 2.3: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Potenzialanalyse und VE“, final wurden sieben wissenschaftliche Arbeiten ausgewählt

Abbildung 2.3 zeigt das Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Potenzialanalyse und VE“. Zur Darstellung des aktuellen Forschungsstands im Bereich Potenzialanalyse und vertikalen Extension (VE) wurden insgesamt sieben wissenschaftliche Arbeiten berücksichtigt.

1.2.2 Aktueller Forschungsstand

C. Gillott (2022) [14] führt eine umfassende Analyse zur Motivation und den Schwierigkeiten der vertikalen Extension durch. Diese ergibt, dass wirtschaftliche Faktoren die Hauptmotivation für VE sind, während ökologische Vorteile meist nur als positiver Nebeneffekt wahrgenommen werden. Die größte Herausforderung stellen technische Aspekte, insbesondere die Ermittlung der Reservetragfähigkeit der Gebäude dar. Die Arbeit zeigt, insbesondere für Gebäude in suburbanen Gebieten, großes Potenzial für Aufstockungen.

Zudem analysierten C. Gillot et al. (2024) [15] die Tragfähigkeitsreserven von Gebäuden in Stahlrahmenbauweise. Hier zeigt sich, dass in optimal nach Eurocode entworfenen Gebäuden durchschnittlich 10% Reservetragfähigkeit vorhanden sind, während ältere Gebäude und konservative Entwurfsansätze bis zu 30% ungenutzte Tragfähigkeit aufweisen. Je nach Aufstockungsszenario könnten 9–89% der elf untersuchten Gebäude ohne weitere Ertüchtigungsmaßnahmen aufgestockt werden.

Mei et al. (2024) [16] untersuchten Stahlbetonstützen in Großbritannien und zeigten, dass insbesondere Wohngebäude aus den 1960er Jahren über hohe Tragfähigkeitsreserven verfügen. Die Reserven für Stützen liegen demnach bei mindesten 32%, meist aber auch deutlich höher bei bis zu 85%. Dies deutet darauf hin, dass für Stützen in vielen Aufstockungsfällen keine Ertüchtigungsmaßnahmen notwendig sind, wodurch sich Kosten, Bauzeiten und Störungen für Bewohner reduzieren lassen.

Julistiono et al. (2024) [17] analysierten in ihrer Arbeit bereits realisierte VE-Projekte. Eine Auswertung von 172 Projekten zeigt, dass die meisten Extensionen aus ein bis zwei zusätzlichen Stockwerken bestehen. Höhere Erweiterungen sind bei innovativen Leichtbauweisen und speziellen Tragwerkskonzepten möglich. Es zeigt sich, dass besonders Industriegebäude aufgrund ihrer oft hohen strukturellen Kapazität ein großes Erweiterungspotenzial bieten.

Ebenfalls von Julistiono et al. (2023) [18] wurden Entscheidungsprozesse und Herausforderungen bei der Umsetzung von VE-Projekten untersucht. Demnach liegt die Hauptmotivation für VE in wirtschaftlichen Gewinnen, gefolgt von Nachhaltigkeitszielen und dem Wunsch, bestehende Standorte weiter zu nutzen. Die größten Herausforderungen sind die komplexe Planung, die Koordination der verschiedenen Akteure und die baulichen Limitierungen im Bestand.

In einer konkreten Fallstudie wurde von Bahrami et al. (2022) [19] mit Hilfe einer FEM-Analyse die vertikale Extension eines Studentenwohnheims in Stahlbetonbauweise untersucht. Unterschiedliche Verstärkungsstrategien werden dabei vorgestellt und bewertet.

Eine weitere Fallstudie von Kamalakannan et al. (2021) [20] untersuchte die Umwandlung eines zehnstöckigen Bürogebäudes in ein Rechenzentrum. Hierbei wurde zwischen der Errichtung eines Neubaus und der Weiternutzung des Bestands durch Ertüchtigungen verglichen. Es zeigt sich, dass durch die Verstärkung der Stützen des Skeletbaus, die zusätzliche Lastanforderungen erfüllt werden können. Kosten, Arbeitsaufwand und Umweltbelastung reduzieren sich dadurch im Vergleich zum Neubau.

1.2.3 Vertikale Aufstockung mit Raumzellen

Da im Kapitel 5 „Proof of Concept“ die Bestandsgebäude mit Raumzellen aufgestockt werden, soll nachfolgend diese Art der Aufstockung kurz näher erläutert werden.

Raumzellen sind vorgefertigte, modulare Bauelemente, die vor Ort zu Gebäuden zusammengesetzt werden. Sie können sowohl tragend als auch nichttragend ausgeführt sein und beinhalten häufig bereits Haustechnik und Innenausbau. Sie eignen sich besonders für Gebäude mit regelmäßigen

Grundrissen und kurzen Montagezeiten, sowohl für temporäre als auch dauerhafte Nutzungen. Sind sie tragend ausgeführt können Raumzellen oft flexibel vertikal und horizontal kombiniert werden. [21]

Die Gebäudeaufstockung mit Raumzellen stellt eine effiziente Lösung zur Schaffung zusätzlichen Wohnraums in dicht besiedelten urbanen Gebieten dar. Durch den Einsatz vorgefertigter Module lassen sich die Bauzeiten verkürzen und Störungen für die Umgebung minimieren. Zudem ermöglicht die modulare Bauweise eine flexible Anpassung an verschiedene Nutzungsanforderungen. [22]

In Kapitel 5 „Proof of Concept“ werden exemplarisch Stahlblechcontainer als Raumzellen für die Aufstockung der Industriehallen verwendet. Container als industriell gefertigten, genormten Module können im Werk weitgehend vorproduziert und auf der Baustelle schnell an die Wasser- und Elektroversorgung angeschlossen werden. Sie bieten somit eine relative einfache Möglichkeit zur modularen Aufstockung. [21]

1.2.4 Ergebnisse dieser Literaturrecherche

Die Literaturrecherche zeigt, dass die vertikale Aufstockung von Bestandsgebäuden wirtschaftliches und ökologisches Potenzial besitzt. Während wirtschaftliche Faktoren die Hauptmotivation für solche Maßnahmen darstellen, können dadurch auch Nachhaltigkeitsziele erreicht werden. Im suburbanen Raum und bei Industriebauwerke gibt es besonderes Potenzial für Aufstockungen. Bei Stahl- und Stahlbetonbauten existieren häufig Tragfähigkeitsreserven, die eine Aufstockung gegebenenfalls auch ohne aufwendige Verstärkungsmaßnahmen ermöglichen. Industriegebäuden in Stahlbetonbauweise bieten somit erhebliches Potenzial für Aufstockungen. Vor allem die Analyse der Bestandstragwerksstruktur stellt allerdings eine Herausforderung dar.

Raumzellen sind eine einfache Art der Aufstockung, vorgefertigte Module lassen sich unkompliziert auf das Bestandstragwerk aufsetzen. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Lasterhöhung durch Aufstockungen liegt und andere Aspekte eine untergeordnete Rolle spielen werden im Kapitel 5 „Proof of Concept“ exemplarisch Stahlblechcontainer als Raumzellen für die vertikale Aufstockung verwendet.

1.3 Digitale Tools für FE-Analyse von Bestandstragwerken

1.3.1 Datenbankrecherche mit Prisma Flow Chart

SCOPUS und Web of Science wurden nach passenden wissenschaftlichen Studien durchsucht. Die Suche beschränkte sich auf Artikel aus dem Ingenieurwesen, den Materialwissenschaften und den Computerwissenschaften aus den Jahren 2014-2024. Die Begriffe „Digital“, „FEA“, „FEM“, „Tool“, „Framework“, „Industrial“ und „Building“ wurden als Titel, teil des Abstracts oder Schlagwort mit Logik Operatoren (or/and) verbunden, um eine umfassende Übersicht über den Stand der Wissenschaft in diesem Bereich zu erhalten.

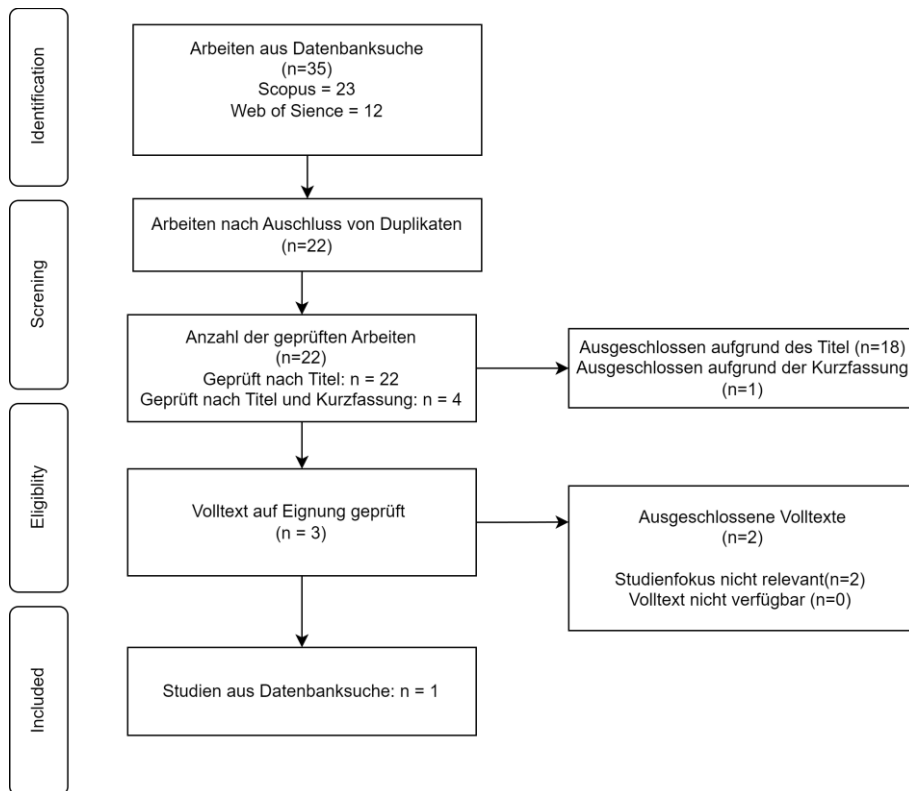


Abbildung 2.4: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Digitalen Tools für FEA von Bestandstragwerken“, final wurde eine wissenschaftliche Arbeit ausgewählt

Abbildung 2.4 zeigt das Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Digitalen Tools für FEA von Bestandstragwerken“. Im Bereich digitale Tools für FEA von Bestandstragwerken wurde nur eine relevante Arbeit gefunden.

1.3.2 Aktueller Forschungsstand

Nach Anwendung des PRISMA-Prinzips bleibt lediglich eine wissenschaftliche Arbeit übrig, in dieser wird von Reisinger et al. (2024) [23] das laufende Forschungsprojekt RE:STOCK INDUSTRY (2024–2027) [2] vorgestellt. Da diese Diplomarbeit Teil dieses Projekts ist, wird die bestehende Forschungslücke deutlich. Durch die Entwicklung des BEAMS2FEM Framework Tools soll diese Lücke zumindest teilweise geschlossen werden.

1.3.3 Design Space

Da es sich bei der Entwicklung des Tools auch um einen Designprozess handelt soll im Folgenden kurz auf den theoretischen Hintergrund des „Design Space“ eingegangen werden.

Ein Designproblem besteht aus einer Reihe von Variablen, wobei jeder Variable einen Raum an Auswahlmöglichkeiten besitzt. Leistungsorientiertes Design zielt darauf ab, den Wert der Summe der gewählten Möglichkeiten zu maximieren. Um dies zu erreichen, müssen die vorhandenen Variablen und ihre Möglichkeiten gesammelt, abgewogen und dokumentiert werden. Der dabei entstehende Design Space (vgl. Abbildung 2.5) ist das Produkt aller Auswahlmöglichkeiten. [24]

In der Planungsliteratur wird empfohlen, innerhalb der begrenzenden Faktoren (z.B. Zeit / Budget) einen möglichst großen Design Space zu erfassen. Die Definition von Zielen hilft den Wert der getroffenen Entscheidungen zu verifizieren und die Designalternative mit dem maximalen Wert (vgl. Alternative 1 „Präferenz“ in Abbildung 2.5) zu finden. [24]

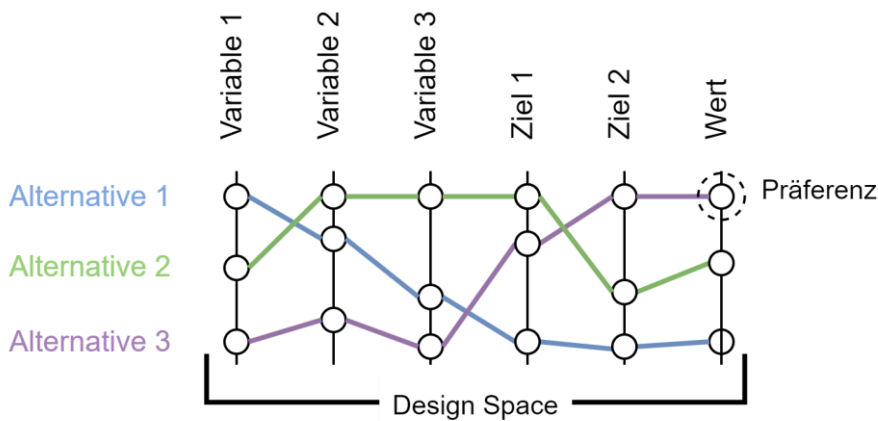


Abbildung 2.5: Beispiel für einen Design Space mit Variablen, Zielen und Wert

1.3.4 Grundlagen der Softwareentwicklung

Bei der Entwicklung von Software spielen Design Patterns eine wichtige Rolle, da sie bewährte Lösungen für häufige Herausforderungen in der Softwarearchitektur bieten. Besonders das Buch „*Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*“ (Gamma et al., 1994) [25] vermittelt eine fundierte Grundlage für die Strukturierung und Implementierung solcher Patterns. Es beinhaltet kategorisierte Designmuster die jeweils spezifische Probleme der Softwareentwicklung adressieren. Diese Muster fördern durch ihre klare Struktur die Wiederverwendbarkeit, Erweiterbarkeit und die Wartbarkeit von Code. [25]

1.3.5 Software

1.3.5.1 Verwendete Software

Zur Entwicklung des Framework Tools wurden verschiedenen Softwarelösungen verwendet. Alle genannten Softwarelösungen wurden im Entwicklungsprozess eingebunden, jedoch sind nicht alle Bestandteil des finalen Frameworks.

- RHINOCEROS 8

Rhino, häufig als Rhino bezeichnet, ist eine Software zur 3D-Modellierung, die auf die Erstellung und Bearbeitung von NURBS-Geometrien (Non-Uniform Rational B-Splines) spezialisiert ist. Diese Technologie ermöglicht die Darstellung und Manipulation von Freiformflächen und komplexen Geometrien.

- GRASSHOPPER

Grasshopper ist eine visuelle Programmierschnittstelle, die in Rhino integriert ist und als Entwicklungsumgebung für parametrisches Design dient. Es erlaubt Anwendern, geometrische und algorithmische Prozesse durch die Verwendung grafischer Elemente – sogenannter „Nodes“ und „Wires“ – zu steuern, anstatt auf textbasierte Programmiersprachen zurückzugreifen. Grasshopper unterstützt zusätzlich die Integration von Plugins.

- KARAMBA 3D

Karamba ist ein solches Plugin für Grasshopper in Rhino. Es ermöglicht strukturelle Analysen und Simulationen direkt innerhalb der visuellen Programmierumgebung durchzuführen. So sind FE Berechnungen Theorie 1. und 2. Ordnung oder die normgemäße Bemessung von Stahltragwerken nach EC 3 möglich. Die Durchführung von Betonbemessung nach EC 2 ist aktuell noch nicht möglich.

- DLUBAL RFEM 6.08

RFEM 6 von der Dlubal GmbH ist eine 3D Software für die Finite-Elemente-Analyse (FEA) und die Bemessung von Tragwerken. Sie wird in der Bauingenieurpraxis und -forschung eingesetzt, um statische und dynamische Berechnungen für Bauwerke aller Art durchzuführen.

- PYTHON 3.11

Python ist eine vielseitige Programmiersprache. Sie zeichnet sich durch ihre einfache und lesbare Syntax aus. Zudem gibt es zahlreiche Sammlungen von vorgefertigten Modulen und Funktionen in Form von sogenannten Bibliotheken.

- Microsoft EXCEL

Microsoft Excel ist eine weit verbreitete Software für Tabellenkalkulationen. Sie ist Bestandteil von Microsoft Office und bietet Funktionen für Datenorganisation, Analyse und Visualisierung. Excel wird in zahlreichen Bereichen wie Finanzen, Wissenschaft, Bildung und Geschäftsverwaltung verwendet.

- XLWINGS

Xlwings ist ein Python-Add-In für Microsoft Excel, das Interaktionen zwischen Excel und Python ermöglicht. Python-Skripte können dadurch direkt aus Excel heraus ausgeführt und Excel-Daten in Python manipuliert werden.

1.3.5.2 Programmschnittstellen

Da Excel, Grasshopper, RFEM und Python über APIs miteinander kommunizieren, die teilweise Webservices verwenden, werden die grundlegenden Begrifflichkeiten dazu im Folgenden kurz erklärt.

Ein Application Programming Interface (API) ist eine Schnittstelle, die es Softwareprogrammen ermöglicht, miteinander zu kommunizieren. Sie definiert, wie Anfragen gesendet und Daten ausgetauscht werden. APIs gibt es in vielen Formen, z. B. als Betriebssystem-Schnittstellen oder Web-APIs (Webservice). [26]

Ein Webservice ist eine spezielle Art von API, die über das Internet oder ein Netzwerk erreichbar ist. Er ermöglicht die Kommunikation zwischen Systemen mithilfe standardisierter Protokolle wie HTTP und Datenaustauschformaten wie XML. Alle Webservices sind APIs, aber nicht alle APIs sind Webservices. APIs können auch lokal (z. B. innerhalb eines Betriebssystems) existieren, während Webservices immer nur über ein Netzwerk erreichbar sind. [26]

Die Extensible Markup Language (XML) ist eine vom World Wide Web Consortium (W3C) entwickelte Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Textform. Sie ermöglicht sowohl Menschen als auch Maschinen das Lesen und Verarbeiten von Informationen. Seit ihrer Veröffentlichung im Jahr 1998 hat XML breite Anwendung in verschiedenen Bereichen gefunden, insbesondere im plattform- und implementationsunabhängigen Datenaustausch über das Internet. [27]

1.3.6 Ergebnisse dieser Literaturrecherche

Das Prisma Prinzip der Literaturrecherche zeigt, dass es keine bestehenden wissenschaftlichen Arbeiten zu digitalen Tools für die Finite-Elemente-Analyse (FEA) von Bestandsindustrietragwerken gibt. Diese Arbeit soll diese Forschungslücke zumindest teilweise schließen.

Um den Entwicklungsprozess des Tools zu unterstützen können „Design Spaces“ helfen optimierte Lösung zu finden.

Zur Strukturierung des Codes werden in der Softwareentwicklung bewährte Design Patterns eingesetzt. Die verwendeten Programme umfassen RHINOCEROS 8 für 3D-Modellierung, Grasshopper für parametrisches Design, Karamba 3D für strukturelle Analysen, RFEM 6 für FE-Berechnungen, sowie Python zur Programmierung und Excel mit xlwings zur Datenverarbeitung.

APIs und Webservices ermöglichen die Interoperabilität zwischen diesen Tools, wobei XML eine Schlüsselrolle im Datenaustausch spielt.

3. Methodische Vorgehensweise

Die Methodik dieser Forschungsarbeit folgt einem systematischen Ansatz zur Entwicklung eines FEA-Framework-Tools zur Tragwerks- und Potenzialanalyse von Bestandstragwerken im Industriebau unter Berücksichtigung der vertikalen Aufstockung inklusive der Implementierung von Scandaten.

Zunächst wurde anhand des Prisma-Prinzip eine dreistufige systematischen Literaturrecherche durchgeführt, dieses deckt die Themenbereiche „SCAN-to-FEM“, „Potenzialanalysen und vertikale Extension“ und „Digitale Tools für die FE-Analyse von Bestandstragwerken“ ab.

Anschließend werden die für das Framework Tool benötigten Daten analysiert. Hierbei werden nutzerspezifische Parameter, Plandaten sowie Scandaten von Bestandsgebäuden unterschieden. Diese Kategorisierung hilft bei der Entwicklung des FEA-Framework-Tools alle benötigten Parameter zu berücksichtigen.

Anschließend werden verschiedene Tool-Designs erprobt, um geeignete methodische Ansätze für die Softwareentwicklung zu evaluieren. Es werden drei unterschiedliche Methoden untersucht: Grasshopper in Kombination mit Karamba 3D, Grasshopper in Verbindung mit RFEM sowie ein finaler Ansatz, der auf einem Python-RFEM-Framework basiert. Die Erkenntnisse dieser Evaluierung ermöglichen die Entwicklung des finalen BEAMS2FEM Framework Tools.

Dieses besteht aus einem Excel File als Graphical User Interface (GUI) und eine Python Skript (Backend). In der Excel Datei können Daten eingegeben und Ergebnisse ausgelesen werden. Aus den eingelesenen Daten erstellt das Python Skript eine Tragwerksmodell und übergibt dieses zur Berechnung an die kommerzielle FE Berechnungssoftware RFEM. Nach der Berechnung werden die Ergebnisse der statischen Analyse und der Betonbemessung über das Python Skript wieder zurück an die Excel Datei übergeben und dort gespeichert. Die Berechnungsergebnisse können nun von dort aus weiterverarbeitet werden. (siehe Workflow BEAMS2FEM Abbildung 3.8).

Dieser Workflow ermöglicht die Analyse des Bestandstragwerks und eine Potenzialanalyse hinsichtlich vertikaler Extension. Zusätzlich ist die Integration von Scandaten, die über das *SCAN2BEAMS* [4] Framework ermittelten wurden, möglich.

Die Anwendbarkeit des entwickelten Tools wird anschließend durch eine Validierung anhand zweier realer Use-Cases überprüft. Diese praxisnahe Evaluierung dient der Bewertung der Leistungsfähigkeit und des Workflows des Tools.

3.1 Datenanalyse

3.1.1 Allgemeine Differenzierung von Plan- und Scandaten

Daten aus Plänen basieren in der Regel auf theoretischen Entwürfen und Konstruktionszeichnungen. Sie beinhalten die „äußeren“ Geometrischen Abmessung sowie die „inneren“ Bauwerkseigenschaften. Diese Daten repräsentieren den beabsichtigten Zustand eines Gebäudes.

Im Gegensatz dazu erfassen Gebäudes scans nur die „äußeren“ geometrischen Informationen, welche aber den tatsächlichen, (as-built) Informationen eines Bauwerks entsprechen. Sie liefern räumliche Informationen, einschließlich unvorhergesehener Abweichungen und Deformationen, die in Plänen nicht dokumentiert sind.

3.1.2 Benötigte Bauwerksinformationen

3.1.2.1 Benötigte Informationen aus den Planunterlagen

Tabelle 3.1 enthält die aus den Planunterlagen zu entnehmenden Daten.

Tabelle 3.1: Aus Plan Daten zu ermittelnde „innere“ Bauwerksinformationen

Bauliche Dimensionen	Querschnittsform der Stützen
	Querschnittsabmessungen der Stützen
	Querschnittsform der Träger
	Querschnittsabmessungen der Träger
Materialien	Beton – Klassifizierung
	Bewehrungsstahl - Klassifizierung
Betondauerhaftigkeit	Expositionsklasse
Lager	Lagerung der Stützen
	Lagerung der Träger auf den Stützen
Bewehrung	Querkraftbewehrung
	Längsbewehrung

3.1.2.2 Benötigte Informationen aus den Gebäudescons

In den untersuchten Use-Cases wurden die Innenräume mit einer, an einer Drohne befestigten, Kamera erfasst. Durch die Flugmuster und Aufnahmestrategien wurden eine vollständige räumliche Abdeckung sowie hochauflösende Details für die photogrammetrische Rekonstruktion gewährleistet. [4]

Beispielhaft ist die daraus generierte Punktwolke des Use-Case A in Abbildung 3.1 dargestellt.



Abbildung 3.1: Punktwolke des Use Case A mit erkennbarer Stützen-Träger Tragwerksstruktur

Aus den Punktwolken extrahiert die *SCAN2BEAMS* Methode [4] Informationen über die tragenden Bauwerksstrukturen. Die Informationen werden in .CSV-Dateien abgespeichert. Diese Daten enthalten für jeden Gebäudescon zwei Tabellen: eine mit Nodes, die durch ihre Koordinaten definiert sind, und eine mit Beams, die durch ihre Start- und End-Nodes beschrieben werden.

Werden diese Daten in eine 3D-Umgebungssoftware übertragen ergibt sich, wie in Abbildung 3.2 dargestellt, ein System aus Knoten und Linien. Für eine FE-Modellierung ist dieses System aufgrund der ungenügenden Genauigkeit der Knotenpunkte ungeeignet. Die einzelnen Rahmen laufen nicht in

einer Flucht, stehen nicht parallel zueinander und besitzen unterschiedliche Spannweiten sowie Stützhöhen. Zudem fehlen die Querschnitte und die „inneren“ Bauwerksinformationen.

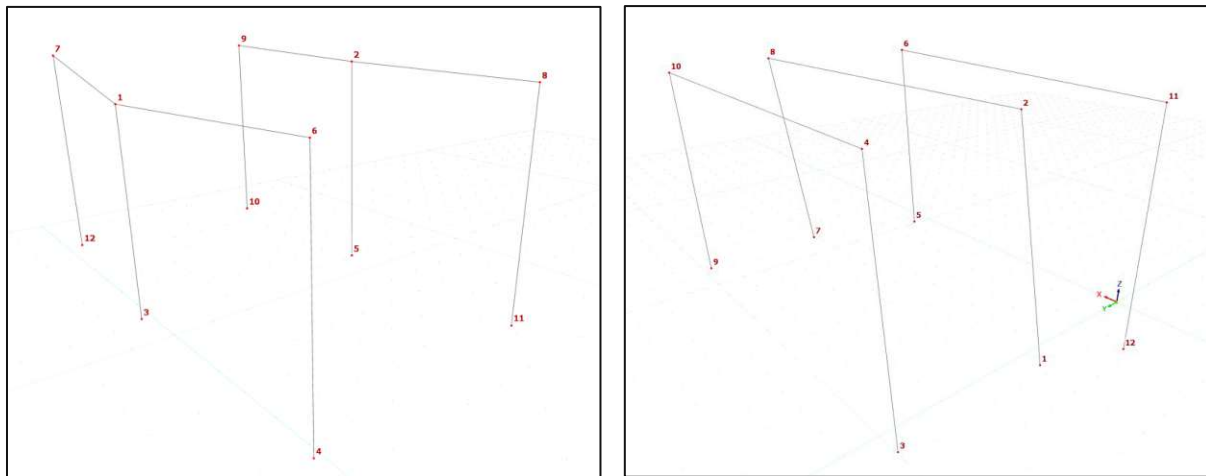


Abbildung 3.2: SCAN2BEAMS Outputs für Use Case A (links) und Use Case B (rechts)

Aus den Scandaten müssen die in Tabelle 3.2 aufgeführten Informationen über die Gebäudegeometrie ermittelt werden. Sollte keine Scandaten vorhanden sein, könnten diese Informationen aus Plänen entnommen werden.

Tabelle 3.2: Vom Tool aus den Scandaten zu ermittelnden geometrischen Daten

Gebäudegeometrie	Anzahl der Rahmen Felder pro Rahmen Gesamtspannweite der Rahmen Rahmenabstand Stützhöhe
-------------------------	---

3.1.2.3 Benötigte Informationen vom Nutzer

Um die Lasten und die Dimensionen der geplanten vertikalen Extension festzulegen müssen vom Nutzer die in Tabelle 3.3 definierten Daten festgelegt werden.

Tabelle 3.3: Vom Nutzer festzulegende, zur Aufstockungsanalyse benötigte Daten

Lasten	Lasten vor der vertikalen Extension Lasten während der vertikalen Extension Lasten nach der vertikalen Extension
Vertikale Extension	Rahmennummer an der die VE beginnt Abstand der VE von der Gebäudekante Rechts Abstand der VE von der Gebäudekante Links Rahmennummer an der die VE endet Höhe der VE

3.2 Erprobung verschiedener Ansätze zur Entwicklung eines FEA Framework Tools

3.2.1 Definieren des Design Spaces zur Softwareauswahl

Entsprechend zu Kapitel 1.3.3 Design Space wird nun der Design Space des Tools definiert.

Die Wahl der Software beeinflusst maßgeblich die Eigenschaften des Tools. Folgende fünf Aufgaben müssen vom Tool erfüllt werden:

- Grafische User Input Umgebung (GUI)
- Modellgenerierung
- Modellansicht
- Modellberechnung
- Grafische User Output Umgebung (GUI)

Für jede dieser Aufgaben gibt es mindestens zwei Software-Optionen, was insgesamt 32 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten ergibt.

Ziele des Tools sind:

- Implementierung der aus dem *SCAN2BEMAS* Framework gewonnenen Scandaten.
- Implementierung der vom Nutzer festgelegten Daten.
- Implementierung der Bewehrung.
- Parametrische Modellierung des Bestandstragwerks sowie der vertikalen Extension.
- Statische Analyse des Modells.
- Bewertung des Aufstockungspotenzials durch Betonbemessung.
- Bereitstellung der Ergebnisse für eine weiterführende Nutzung in Excel.

Abbildung 3.3 zeigt den aus den Zielen resultierenden Design Space des Tools. Darin sind drei näher analysierte Design-Ansätze mit den ausgewählten Softwarelösungen und ihren Zielerreichungen dargestellt. Diese Ansätze werden im folgenden Kapitel ausführlicher erläutert. Approach 3 erzielt dabei die besten Ergebnisse und wird schließlich als BEAMS2FEM Framework Tool in dieser Diplomarbeit ausgearbeitet.

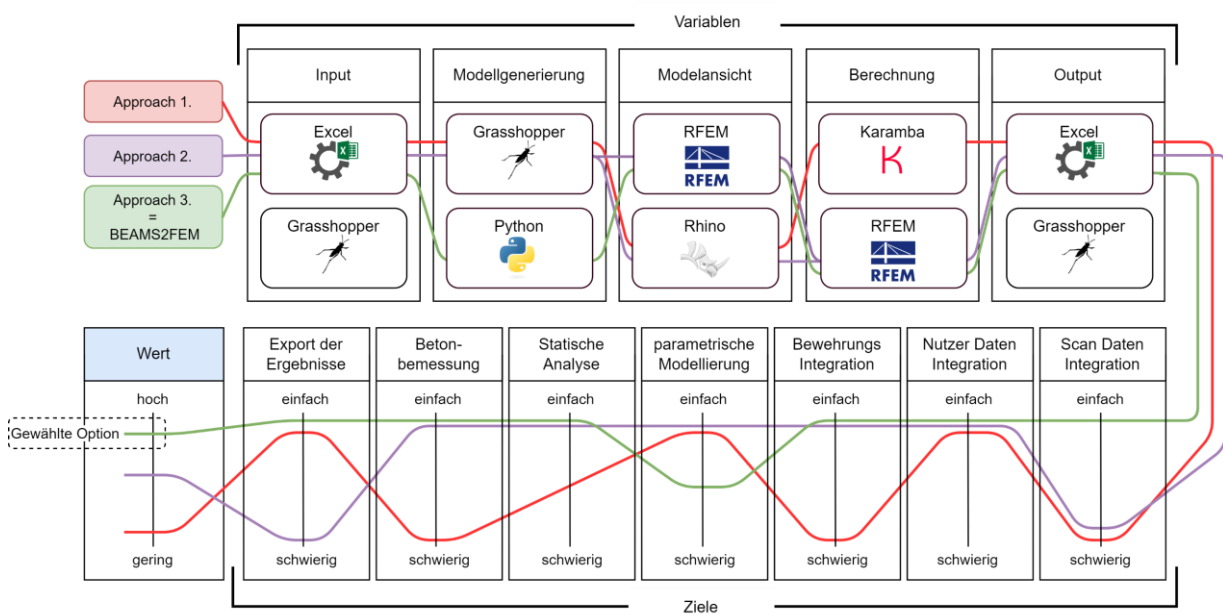


Abbildung 3.3: Getestete FEA Framework Ansätze, Approach 3 wird final als BEAM2FEM Framework Tool entwickelt.

3.2.2 Approach 1 (Grasshopper – Karamba 3D)

Design Approach 1 verbindet die Softwarelösungen:

Excel - Grasshopper – Rhino – Karamba – Excel. (siehe Abbildung 3.3).

Abbildung 3.4 zeigt den dadurch entstehenden Workflow. Die Schwachstellen sind rot markiert.

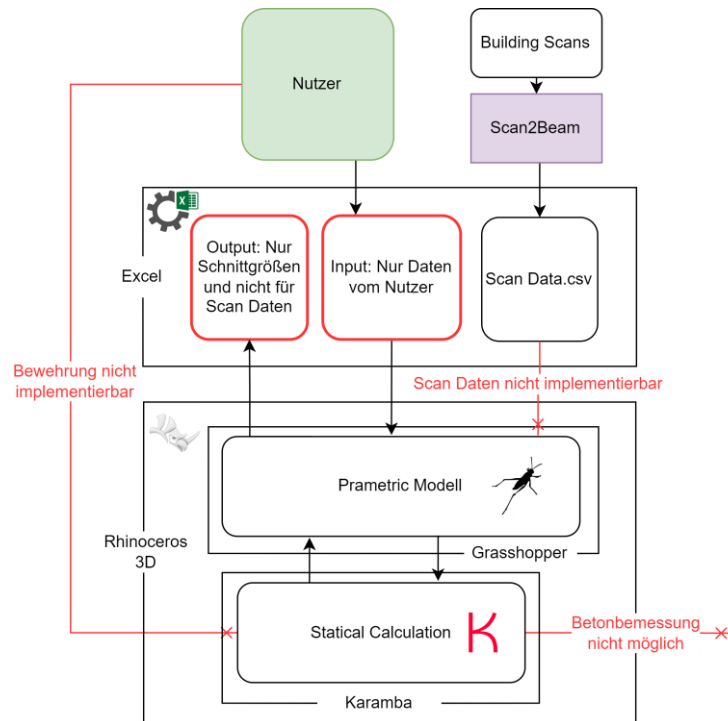


Abbildung 3.4: Workflow des Approach 1. mit rot markierten Schwachstellen

Input

Die Eingabedaten werden vom Nutzer über eine Excel-Datei bereitgestellt. Da die Verarbeitung der Daten aus dem *SCAN2BEAMS* Framework in Grasshopper ohne ein zusätzliches Programm nicht möglich ist, bietet Approach 1 keine Möglichkeit zur Implementierung der Scandaten.

Modellgenerierung

Das parametrische Modell wird in Grasshopper über eine Reihe von mathematischen Operationen aus den Eingaben des Nutzers erstellt. Das entstandene parametrisches Drahtmodell entspricht dem bestands Hallentragwerk.

Modellansicht

Die Modellansicht erfolgt über das im Hintergrund von Grasshopper geöffnete Rhino.

Berechnung

Die statischen Berechnungen werden mit dem Grasshopper Add-in Karamba ausgeführt. Dieses ist in der Lage die entsprechenden Schnittgrößen zu berechnen, allerdings gibt es keinen implementierten Betonnachweise, diese müssten also selbst erstellt werden. Zudem kann die dafür benötigten Bewehrung nicht über eine einfache Syntax eingegeben werden.

Output

Deshalb können nur Schnittgrößen für ausschließlich vom Nutzer manuell definierte Tragwerke berechnet werden. Diese Outputs werden in einer Excel Datei gespeichert.

Abbildung 3.5 zeigt einen Screenshot des Approach 1. Auf der linken Seite befindet sich die Grasshopper Struktur zu Modellbildung, rechts die Modellansicht in Rhino mit den in Karamba berechneten My-Schnittgrößen für das Eigengewicht.

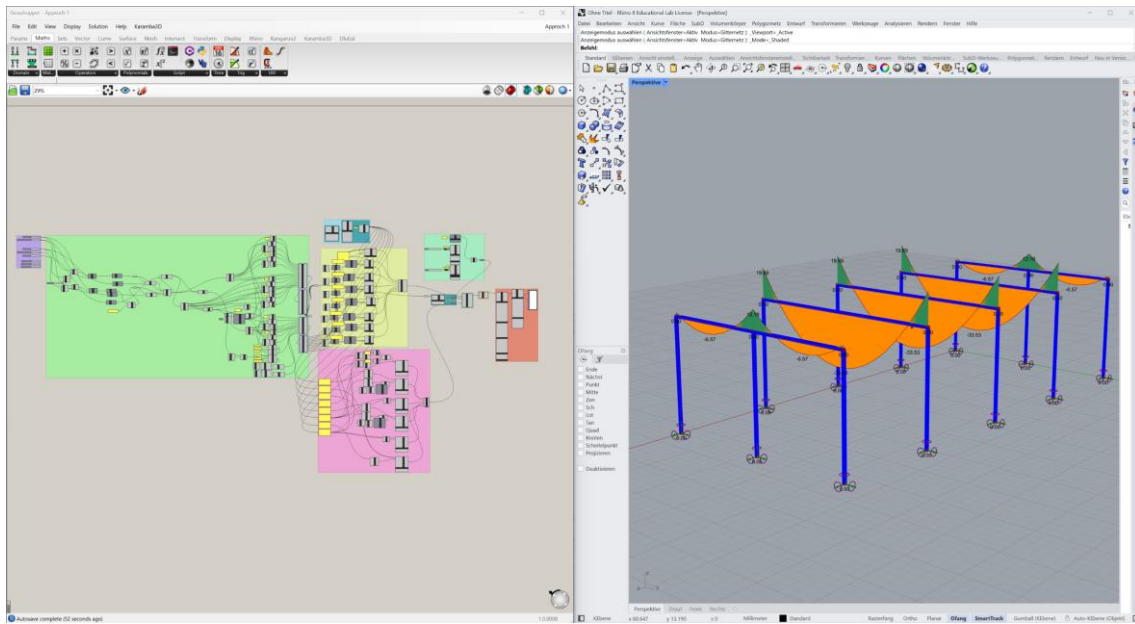


Abbildung 3.5: Screenshot Approach 1, links: Modellgenerierung mit Grasshopper, rechts: berechnete Schnittgrößen mit Karamba 3D

Fazit:

Der Approach 1 eignet sich aufgrund der nicht implementierbaren Scandaten, der nicht implementierbaren Bewehrung und der somit fehlenden Betonnachweisführung nicht als Design Tool. Deshalb wurde diese Methode nicht weiterverfolgt.

3.2.3 Approach 2 (Grasshopper – RFEM)

Design Approach 2 verbindet die Softwarelösungen:

Excel - Grasshopper – Rhino/RFEM – RFEM – Excel. (siehe Abbildung 3.3)

Abbildung 3.6 zeigt den dadurch entstehenden Workflow. Die Schwachstellen sind rot markiert.

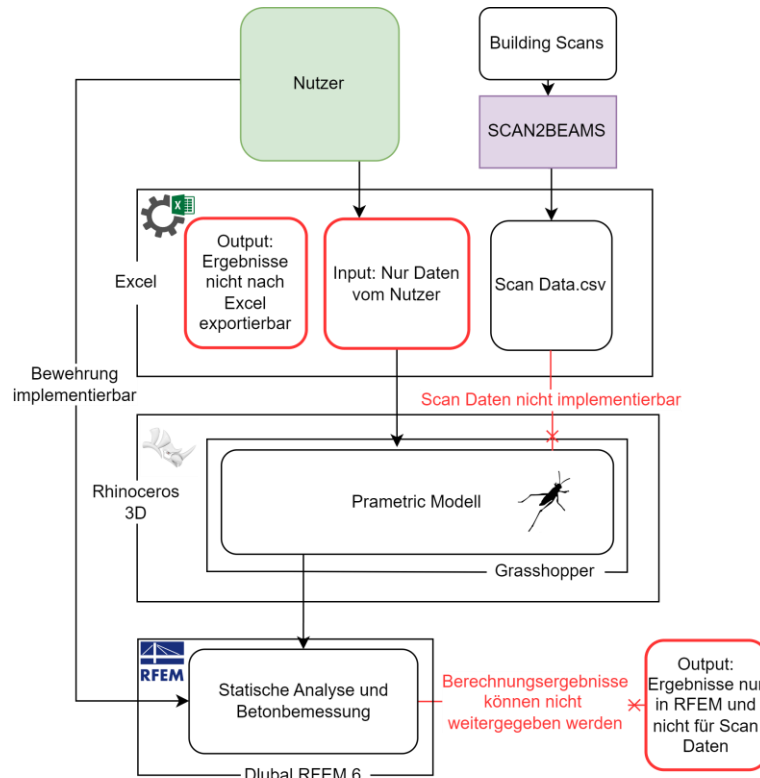


Abbildung 3.6: Workflow des Approach 2. mit rot markierten Schwachstellen

Input

Die Eingabedaten werden vom Nutzer über eine Excel-Datei bereitgestellt. Da die Verarbeitung der Daten aus dem SCAN2BEAMS Framework in Grasshopper ohne ein zusätzliches Programm nicht möglich ist, bietet auch Approach 2 keine Möglichkeit zur Implementierung der Scandaten.

Modellgenerierung

Das parametrische Modell wird in Grasshopper über eine Reihe von mathematischen Operationen aus den Eingaben des Nutzers erstellt. Das entstandene parametrisches Drahtmodell entspricht dem bestands Hallentragwerk.

Modellansicht

Die Modellansicht erfolgt über das im Hintergrund von Grasshopper geöffnete Rhino oder in RFEM.

Berechnung

Zur statischen Berechnung wird das parametrische Grasshopper Modell über eine RFEM 6 Export Schnittstelle nach RFEM übermittelt und dort berechnet. In RFEM können die Bewehrungsinformationen direkt vom Nutzer über eine einfache Syntax eingegeben werden, wodurch die bereits in RFEM implementierten Betonnachweise genutzt werden können.

Output

Die Outputs sollen wieder in einer Excel Datei gespeichert werden. Allerdings ist eine automatisierte Übertragung der Ergebnisse aus RFEM nach Excel mit Grasshopper nicht möglich

Abbildung 3.7 zeigt einen Screenshot des Approach 2. Auf der linken Seite befindet sich die Grasshopper Struktur zu Modellbildung, rechts oben die Modellansicht in Rhino mit einer möglichen Aufstockung in Rot und rechts unten die Ergebnisse der My-Schnittgrößen für die Belastung aus Eigengewicht.

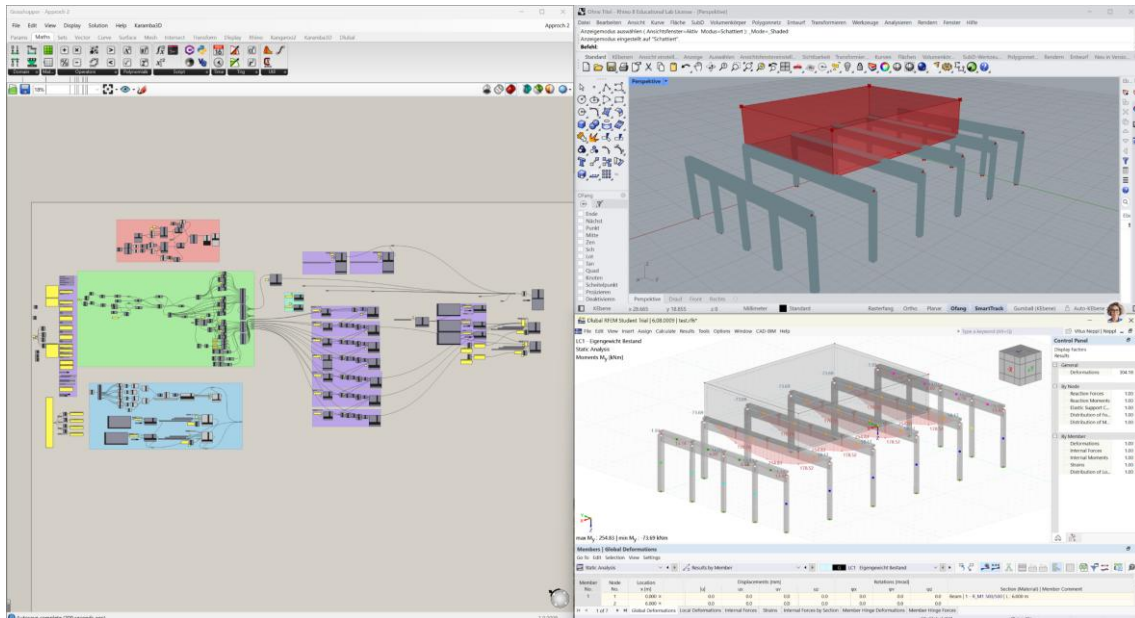


Abbildung 3.7: Screenshot Approach 2, links: Grasshopper Workflow, rechts oben: Modellansicht in Rhino, rechts unten: berechnete Schnittgrößen mit RFEM

Fazit

Der Approach 2 eignet sich aufgrund der nicht implementierbaren Scandaten und der nicht nach Excel exportierbaren RFEM Berechnungsergebnisse nicht als Design Tool. Deshalb wurde Approach 2 nicht weiterverfolgt.

3.2.4 Finaler Approach 3 (Python – RFEM)

Design Approach 3 verbindet die Softwarelösungen:

Excel - Python – RFEM – RFEM– Excel. (siehe Abbildung 3.3)

Abbildung 3.8 zeigt den dadurch entstehenden Workflow.

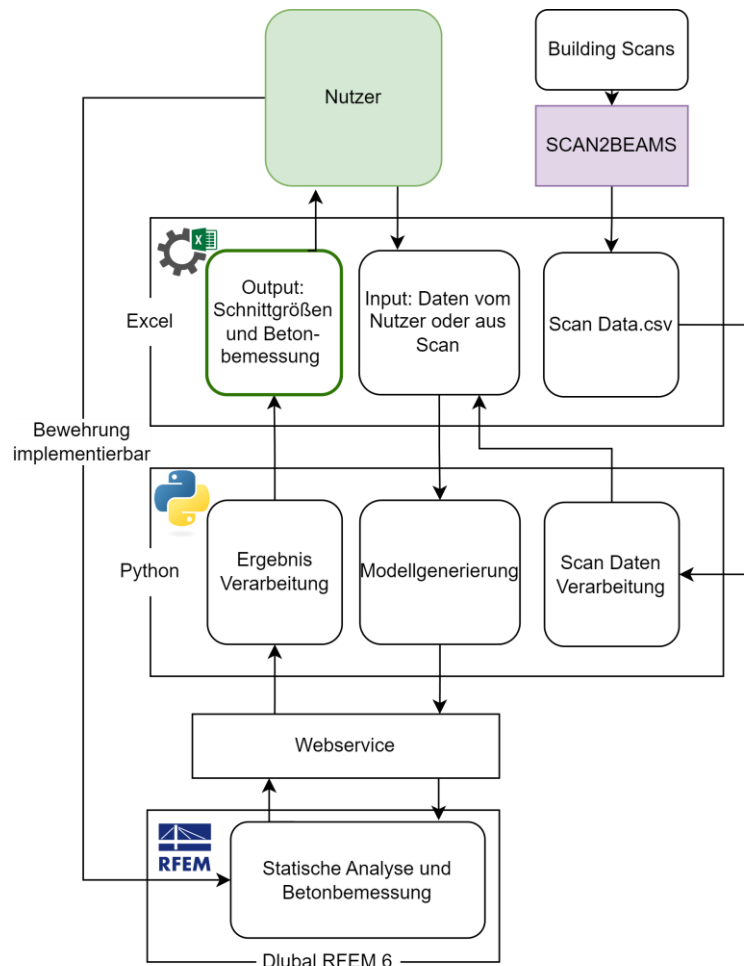


Abbildung 3.8: Workflow des BEAMS2FEM Framework Tool (Approach 3)

Input

Die Eingabedaten werden vom Nutzer über eine Excel-Datei bereitgestellt. Die Daten aus dem SCAN2BEAMS Framework können mit Hilfe des erstellten Python Codes verarbeitet werden. Approach 3 bietet somit die Möglichkeit zur Implementierung der Scandaten. Die Daten der Excel Datei werden über die Applikation xlwings in das Python Skript überführt. (vgl. 4.5.1 Verarbeitung der Scandaten)

Modellgenerierung

Das parametrische Modell wird in Python über eine Reihe von mathematischen Operationen aus den Nutzereingaben erstellt. Die Tragwerksgeometrie kann dazu aus den Scandaten übernommen werden. Das Parametrische Modell wird über einen Webservice nach RFEM exportiert.

Modellansicht

Die Modellansicht erfolgt über RFEM.

Berechnung

Die statischen Berechnungen werden mit RFEM ausgeführt. In RFEM kann die Bewehrung der Bauteile vom Nutzer eingegeben werden. Dadurch können die bereits in RFEM implementierten Betonnachweise genutzt werden

Output

Die Outputs werden wiederum über den Webservice in das Python Skript überführt und von dort aus über xlwings in der Excel Datei gespeichert.

Abbildung 3.9 zeigt einen Screenshot des Approach 3 (BEAMS2FEM Framework Tool). Auf der linken Seite ist das Excel Input und Output File abgebildet, rechts oben der Python Code und rechts unten die Ergebnisse der Durchbiegung für die Belastung aus Eigengewicht.

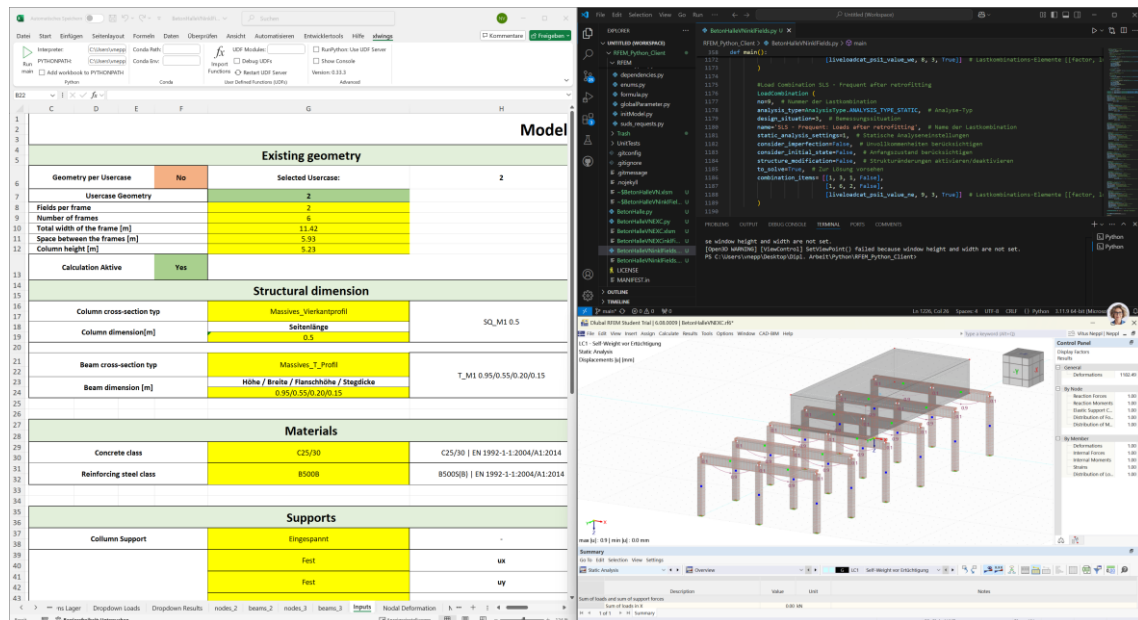


Abbildung 3.9: Screenshot BEAMS2FEM Framework Tool (Approach3.) links: Input in Excel, rechts oben: Python Code, rechts unten: Ergebnisse für Durchbiegung unter Eigengewicht in RFEM

Fazit

Der Approach 3 erfüllt am besten die festgelegten Ziele und wird daher als finales Framework Tool weiterentwickelt. In Anlehnung an die Forschungsarbeit *SCAN2BEAMS* [4] wird das basierend auf Approach 3 entwickelte Tool BEAMS2FEM Framework Tool genannt.

4. BEAMS2FEM Framework Tool

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, wird durch eine umfassende Analyse und Erprobung verschiedener Verfahren das BEAMS2FEM Framework Tool entwickelt. In diesem Kapitel wird die BEAMS2FEM Methode detailliert vorgestellt und erläutert.

4.1 Pipeline

Abbildung 4.1 zeigt die BEAMS2FEM Pipeline angewandt auf die Scandaten des Use Case A.

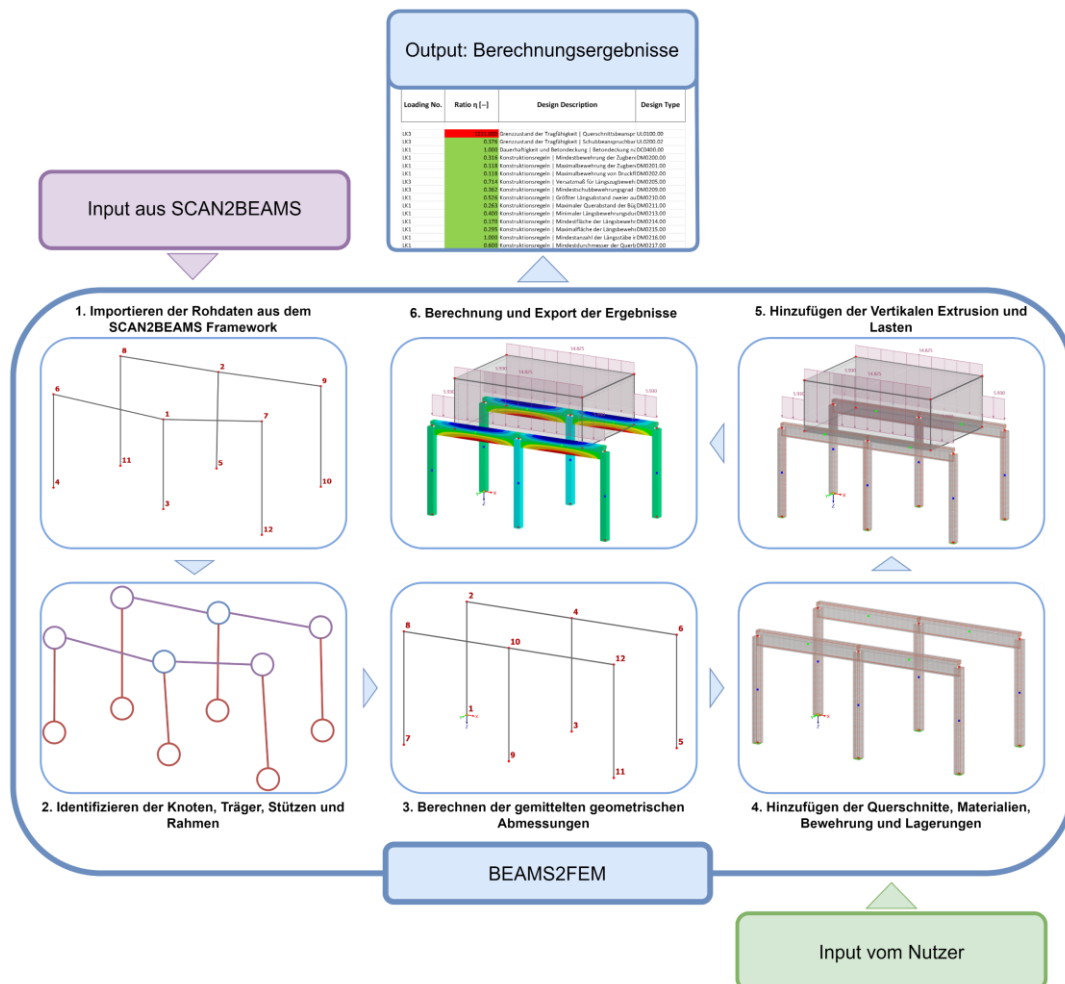


Abbildung 4.1: BEAMS2FEM Pipeline (Scandaten des Use Case A)

Die Schritte der Pipeline sind:

1. Importieren der „ungeordneten“ Rohdaten aus dem SCAN2BEAMS Framework.
2. Identifizieren der Knoten, Träger, Stützen und der zusammenhängenden Rahmen.
3. Berechnung der gemittelten Bauwerksabmessungen und Erstellung des „geordneten“ Tragwerks.
4. Hinzufügen der Querschnittsdimensionen, Materialien, Bewehrung und Lager aus Nutzerangaben.
5. Hinzufügen der geplanten vertikalen Extension und der Lasten Nutzerangaben.
6. Berechnung des Tragwerks und Exportieren der Ergebnisse in das Excel File des Tools.

4.2 Excel Benutzeroberfläche

Als grafische Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) wird eine Excel-Datei genutzt, die über das Add-In *xlwings* eine Schnittstelle zu Python bildet und dadurch eine Kommunikation mit RFEM ermöglicht. Excel eignet sich als GUI, da es eine weit verbreitete und vertraute Arbeitsumgebung bietet, die ohne eine zusätzliche Softwareinstallationen zugänglich ist. Die tabellarische Struktur erleichtert die systematische Erfassung, Verarbeitung und Visualisierung von Eingabe- und Ergebnisdaten. Zusätzlich ermöglichen integrierte Funktionen wie Dropdown-Menüs, Formeln und Makros eine benutzerfreundliche Umgebung. Durch die Anbindung an Python mittels *xlwings* können auch die Berechnungsergebnisse automatisiert in tabellarischer Form gespeichert und anschließend weiterverarbeitet werden. Die Excel-Datei fungiert somit sowohl als Eingabe- als auch als Ergebnisdatei und gewährleistet eine effiziente Datenverwaltung innerhalb des Workflows.

Verarbeitung der *SCAN2BEAMS* Daten

Die Scandaten, die mit dem *SCAN2BEAMS* Framework erzeugt wurden, können über den .CSV-Import in die Excel-Datei eingelesen werden. Die importierten Daten behalten dabei ihre ursprüngliche Struktur bei und bleiben jederzeit abrufbar. Die mit Hilfe des Python Codes daraus berechneten geometrischen Abmessungen können bei Bedarf angepasst werden.

Eingabedaten aus den Plänen

Querschnitte, Materialien, Expositionsclassen sowie die Lagerung von Trägern und Stützen können durch den Benutzer festgelegt werden. Zur effizienten Dateneingabe stehen Dropdown-Menüs zur Verfügung.

Eingabedaten durch den Benutzer

Aufbaulasten und Nutzlasten inklusive Kategorien können explizit für jede Lastsituation (siehe Kapitel 4.4) eingegeben werden. Das Eigengewicht der Konstruktion wird automatisiert berechnet, kann optional, aber auch manuell eingegeben werden.

Ergebnisausgabe

Die Ergebnisse können in Tabellenform eingesehen und weiterverarbeitet werden.

4.3 Python Backend

4.3.1 Python – RFEM-Schnittstelle und Repository

4.3.1.1 *Dlubal Webservice*

Die Dlubal Software GmbH bietet mit ihrem Webservice eine XML-basierte Schnittstelle für ihre Programme, die eine direkte Client-Server-Kommunikation ermöglicht. Dies erlaubt es Anwendern, die Programme in eigene Anwendungen zu integrieren und somit individuelle Berechnungs- und Bemessungssysteme zu erstellen. Für eine möglichst einfache Implementierung werden Code Bibliotheken (Repositorys) auf GitHub bereitgestellt. [28]

4.3.1.2 *Dlubal GitHub Repository*

Das GitHub Repository der Dlubal Software GmbH [29] dient als zentrale Plattform zur Bereitstellung, Verwaltung und Versionierung von Code, Skripten und Anwendungsbeispielen. Im Repository finden sich Skripte, die es Anwendern ermöglichen Berechnungen zu automatisieren und individuelle Erweiterungen vorzunehmen. Konkret heißt das, dass im eigenen Code auf von Dlubal zur Verfügung gestellte Codebausteine zugegriffen werden kann. Das Repository folgt den Prinzipien der Open-

Source-Kollaboration, wodurch Nutzer nicht nur auf vorhandene Ressourcen zugreifen, sondern auch eigene Beiträge erstellen können. [29]

4.3.2 Codierung

Das gesamte Python Skript des BEAMS2FEM Framework Tool umfasst 1932 Codezeilen und besteht im Wesentlichen aus folgenden fünf Schritten:

4.3.2.1 Auswertung der Scandaten

Im ersten Teil des Codes werden die .CSV-Scandaten importiert und ausgewertet. Zunächst wird die Use-Case-Bezeichnung aus dem Input Excel File ausgelesen, um die relevanten Tabellenblätter für Knoten (Nodes) und Träger (Beams) zu laden. Aus den Daten der Beams werden Start- und Endknoten extrahiert. Anschließend werden die Knoten, basierend auf der Anzahl ihrer Verbindungen, identifiziert und in die Gruppen eingeteilt. Daraufhin wird die gesamte Konstruktion als Graph modelliert, wobei Knoten als Punkte und Träger als Kanten dargestellt werden (siehe Codeausschnitt). Mit Hilfe der Bibliothek NetworkX werden die jeweils zusammenhängenden Komponenten als Rahmen erkannt. Für jeden Rahmen wird ein separater Datensatz erstellt. Der Code berechnet geometrische Eigenschaften der Rahmen. Dies umfasst den Mittelpunkt des Rahmens, sowie die Abstände zwischen den Mittelpunkten benachbarter Rahmen. Ebenso werden die durchschnittliche Stützhöhe und die durchschnittliche Feldspannweite berechnet. Die Ergebnisse der Analysen werden in tabellarischer Form gespeichert und an die Excel Datei zurückgegeben.

```

113     # Einteilen der Nodes in Rahmengruppen
114     # Graph erstellen
115     graph = nx.Graph()
116     graph.add_edges_from(zip(beamsData['Start_Node_ID'], beamsData['End_Node_ID']))
117
118     # Verbundene Komponenten ermitteln
119     frames_ID = list(nx.connected_components(graph))
120
121     # Gruppen in separate DataFrames speichern
122     group_tables = {}
123     for i, group in enumerate(frames_ID):
124         group_tables[f'Group_{i+1}'] = pd.DataFrame({'Node_ID': list(group)})
125
126     # Anzahl der Rahmen berechnen
127     no_frames = len(frames_ID)

```

4.3.2.2 Einlesen der Input Daten

Zunächst werden die Geometrische Parameter wie Felder pro Rahmen, Anzahl der Rahmen, Spannweite, Rahmenabstand und Stützhöhe eingelesen, ebenso Querschnittsdaten für Stützen und Träger. Anschließend werden Materialeigenschaften für Beton und Bewehrungsstahl aus den entsprechenden Zellen der Excel Datei geladen. Lagerbedingungen werden anhand der Benutzereingabe bestimmt, wobei zwischen eingespannter und gelenkiger Lagerung unterschieden wird. Zusätzlich werden Freiheitsgrade und Gelenkparameter wie Verschiebungen und Verdrehungen verarbeitet. Schließlich werden die Lasten, die zugehörigen Lastkategorien und entsprechenden Kombinationsbeiwerte erfasst. Sofern die vertikale Extension im Excel File aktiviert wurde, wird auch die Abmessung und Position der Aufstockung eingelesen.

4.3.2.3 Modellgenerierung

Falls noch kein Modell mit dem Namen „BEAMS2FEM“ geöffnet ist, wird ein neues erstellt. Anschließend werden die Add-Ons für die Betonbemessung aktiviert und die Basiseinstellungen festgelegt. Es folgt die Generierung von Knoten für die Rahmengemetrie. Dabei werden

Knotenpositionen basierend auf der Anzahl der Felder, Rahmen und Abstände im Raum berechnet. Optional wird die vertikale Extension hinzugefügt. Stützen und Träger werden zwischen den Knoten definiert, wobei für ihre Eigenschaften und Freigaben die zuvor eingelesenen Parameter verwendet werden. Darüber hinaus werden die Knotenlager erstellt und die Betondauerhaftigkeit entsprechend den Nutzerangaben definiert.

4.3.2.4 Lastgenerierung und Berechnung

Zunächst werden die Lastfälle für Eigengewicht, Ausbau- und Verkehrslasten in den Phasen „vor“, „während“ und „nach“ der vertikalen Extrusion des Tragwerks definiert (vgl. Lastkombinatorik Kapitel 4.4). Anschließend werden die Lasten den einzelnen Tragwerkselementen zugewiesen, wobei die Lastgrößen je nach Rahmenelement variieren. Danach werden die Lastkombinationen mit den zugehörigen Lastfällen, Faktoren und Einflussgrößen erstellt. Im nächsten Schritt werden die Konfigurationsparameter für die Betonbemessung festgelegt. Abschließend generiert der Code die Lastfälle und -kombinationen und führt – sofern aktiviert – die Berechnung des Gesamtmodells durch.

4.3.2.5 Exportieren der Berechnungsergebnisse

Zunächst werden die relevanten Tabellenblätter für verschiedene Ergebnistypen wie Knotenverformungen, Knotenlagerreaktionen, Stabverformungen, Schnittgrößen und Betonbemessungsergebnisse adressiert. Anschließend werden z.B. für die Knotenverformung für jeden Knoten die Verformungen aus den RFEM-Ergebnissen ermittelt und in Arrays gespeichert. Die gesammelten Daten werden anschließend in numerische Arrays konvertiert und in die entsprechenden Tabellenblätter der Excel-Datei eingetragen. Vor der Dateneingabe werden alte Ergebnisse gelöscht, um eine konsistente Darstellung sicherzustellen.

4.4 Lastkombinatorik und Betonbemessung

Zilch et al. (2021) [30] unterscheiden in der 2021 erschienen Nachweisführung von Verstärkungen mit CFK-Lamellen drei Lastsituationen. Die Lastsituation vor der Verstärkung, hier wirken die ursprünglichen Lasten. Die Lastsituation während der Verstärkung, hier wirken nur die Eigenlasten. Und die Lastsituation nach der Verstärkung, hier wirken erhöhte Lasten. Simultan dazu sollen die Lastsituationen im BEAMS2FEM Framework Tool unterschieden werden in:

- Lastsituation 1: Belastung vor der vertikalen Extension des Gebäudes (Bestandszustand).
- Lastsituation 2: Belastung während der vertikalen Extension des Gebäudes (Bauzustand).
- Lastsituation 3: Belastung nach der vertikalen Extension (Endzustand).

Für die Bewertung der Aufstockung werden Lastfallkombinationen für die Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und die Nachweise für den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) benötigt. Diese Lastfallkombinationen ergeben sich gemäß ÖNORM EN 1990: 2013-03 [31] mit dem zugehörigen Nationalen Anhang [32]. Für den Grenzzustand der Tragfähigkeit wird die ständige und vorübergehende Bemessungssituation maßgebend, diese ergibt sich laut Gleichung 6.10 [31] zu:

$$P_d = \gamma_G * (g_{1,k} + g_{2,k}) + \gamma_Q * q_k$$

$$P_d = 1,35 * (g_{1,k} + g_{2,k}) + 1,5 * q_k$$

Die Belastungen für die Charakteristische Kombination, die Häufige Kombination und die Quasi-ständige Kombination im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit berechnet sich unter Einbeziehung

der gewählten Einwirkungskategorie nach den im Eurocode ÖNORM EN 1990: 2013-03 [31] angegebenen Formeln (6.14a – 6.16b) mit dem zugehörigen Kombinationsbeiwerte aus Tabelle A.1.1. Auf die Berücksichtigung günstig wirkender Lastfelder wird vereinfachend verzichtet.

Die implementierte Betonbemessung erfolgt nach ÖNORM EN 1992-1-1 [33] inklusive den entsprechenden Nationalen Anhängen [34]. Die Norm enthält detaillierte Vorschriften für Biegung, Schub, Torsion, Verankerung und Duktilität, besondere Anforderungen an Dauerhaftigkeit und Rissbreitenbegrenzung werden ebenfalls spezifiziert. [33]

4.5 Workflow

4.5.1 Verarbeitung der Scandaten

Zunächst werden die .CSV-Dateien der Use Cases als einzelne Arbeitsblätter in die Excel Datei des BEAMS2FEM Framework Tools importiert. Zur Generierung der geometrischen Abmessungen des gewünschten Use Cases wird dieser über ein Dropdown-Menü ausgewählt. Anschließend das zugehörige Python-Skript ausgeführt, welches die Abmessungen berechnet und die Ergebnisse in die Excel-Datei zurückschreibt. Diese Werte können bei Bedarf manuell angepasst werden. Tabelle 4.1 zeigt die aus den Scandaten des Use Case A berechneten Tragwerksabmessungen.

Tabelle 4.1: aus den Scandaten generierte Abmessungen des Use Case A

Existing geometry			
Import geometric data form Use Case	Yes	Select Use-case:	A
Geometry from Use Case		A	If you want to import geometric data, select the Use Case in the blue field and press "run main" in the "xlwings" tab.
Fields per frame		2	
Number of frames		2	
Total width of the Building in frame direction [m]		11.42	
Space between the frames [m]		5.93	
Column height [m]		5.23	

4.5.2 Eingabe der Modellparameter

Im nächsten Schritt lassen sich über verschiedene Dropdown-Menüs die Abmessungen der Stützen und Träger, die Materialeigenschaften, die Betondauerhaftigkeit sowie die Lagerung der Stützen und Träger spezifizieren. Zur Modellkontrolle können diese Daten auch ohne die Eingabe einer vertikalen Extension oder von Lasten an das RFEM-Programm übermittelt werden. In RFEM selbst muss lediglich die Bewehrung noch angepasst werden.

4.5.3 Definition der vertikalen Extension

In diesem Schritt wird die vertikale Extension aktiviert und deren Position sowie Abmessungen definiert. Zur Überprüfung der Abmessungen der VE besteht die Möglichkeit, die VE nach RFEM zu exportieren, ohne unmittelbar eine Berechnung durchzuführen.

4.5.4 Eingabe der Lastsituationen

Die Lasten werden entsprechend der festgelegten Lastkombinatorik (Kapitel 4.4) in drei Lastsituationen unterteilt. Neben der Angabe der jeweiligen Lastamplituden werden hier auch die entsprechenden Nutzlastkategorien definiert. Die jeweiligen Kombinationsbeiwerte (Psi-Werte) nach der ÖNORM EN 1990 Tab. A.1.1 [31] sind breites im Excel File hinterlegt und müssen somit nicht eingegeben werden.

4.5.5 Ergebnisausgabe und Betonbemessung

Nach der Ausführung des Python-Skripts und der Berechnung des Modells in RFEM werden die Knotenverschiebungen, Auflagerkräfte, Stabverschiebungen, Schnittgrößen sowie eine Ergebniszusammenfassung in der Excel-Datei ausgegeben.

Zusätzlich werden die Ergebnisse der Betonbemessung gemäß ÖNORM EN 1992-1-1 [33] in separaten Arbeitsblättern innerhalb der Excel-Datei tabellarisch ausgegeben. Diese enthalten neben einer Übersicht der wichtigsten Ergebnisse auch eine detaillierte Tabelle zur Bauteilnutzung.

5. Proof of Concept

5.1 Vorbemerkung

Um die Ergebnisse der Forschungsarbeit zu validieren wird das entwickelte BEAMS2FEM Tool anhand von zwei realen Use Cases geprüft.

Als Use Cases werden zwei Stahlbeton Hallen in einem Niederösterreichischen Industrieareal gewählt. Von diesen Gebäuden sind Plan und Scandaten vorhanden. Geprüft werden soll, ob für die Erweiterung der Büroflächen eine vertikale Aufstockung der Hallen mit einem Raumzellensystem durchführbar ist.

5.2 Proof of Concept Use Case A

5.2.1 Use-Case A

Die betrachtete Immobilie besteht aus einem zweigeschossigen, umlaufenden Bürotrakt sowie einer angrenzenden zweigeteilten Halle, die sich über die gesamte Höhe des Bürobereichs erstreckt. Diese teilt sich in einen Arbeitsbereich und ein Archiv. Das Tragwerk des Gebäudes wurde in Stahlbetonskelettbauweise errichtet, die Fassade besteht aus vorgesetzten Gasbeton-Wandelementen mit hinterlüftetem Trapezblech. Das Dach ist als Warmdach mit tragenden Gasbeton-elementen ausgeführt. Die Fertigteilstützen und -träger der Halle wirken statisch als Rahmen.

Abbildung 5.1 zeigt die Nordansicht des Use Case A mit dem Windfang und dahinterliegendem Bürotrakt auf der linken Seite sowie dem Hallenbereich auf der rechten Seite. In Abbildung 5.2 ist der Grundriss des Gebäudes im Obergeschoss mit umlaufendem Bürotrakt und Hallenteil dargestellt, der Scanbereich ist rot markiert.



Abbildung 5.1: Nordansicht Use Case A mit Bürotrakt und Hallenbereich [35]

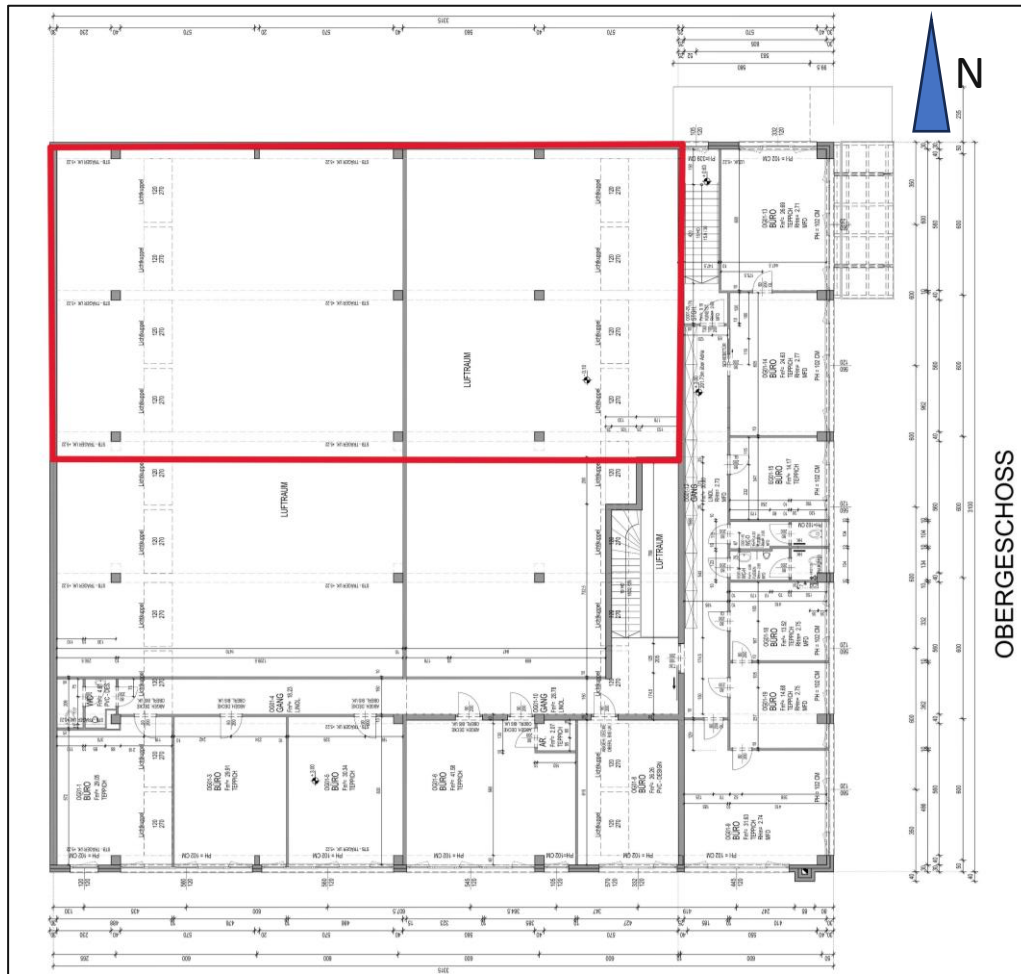


Abbildung 5.2: Grundriss im OG des Use Case A mit rot markiertem Scanbereich [35]

5.2.2 Tragwerkselemente

Die Tabelle 5.1 beinhaltet die Abmessungen, die Materialien und Lagersituationen der verbauten Träger und Stützen. Die Informationen stammen aus den Bestandsplänen [35] und dem Energieausweis [36]. Wo keine detaillierten Informationen vorlagen, wurden Annahmen entsprechend der Bauweise des Gebäudes getroffen. Diese sind in Tabelle 5.1 unterstrichen dargestellt.

Tabelle 5.1: Tragwerksdaten für Use Case A

Elemente	Beschreibung	Abmessung [cm]
Stützen	Fertigteil Q-Stahlbetonstützen	Breite / Dicke /Höhe: 0.40/0.40/ <u>5.20</u>
Täger	Fertigteil T-Stahlbetonbinder	Höhe / Breite / Flanschhöhe / Stegdicke 0.80/0.40/ <u>0.20</u> / <u>0.20</u>

Material	Materialklasse	Expositionsklasse
Beton	<u>C30/37</u>	<u>XC1</u>
Betonstahl	<u>B500(S)B</u>	

Lager	Beschreibung	Freiheitsgrade
Stützenfundament	<u>Beton Köcher Fundament</u>	<u>[-] Einspannung</u>
Trägerlager	<u>Gabelkopflager</u>	<u>[phi y] Verdrehung in Trägerquerrichtung möglich</u>

Tabelle 5.2 enthält die Bewehrung der Stützen und Träger. Da über den Bewehrungsgrad keine Informationen vorliegen handelt es sich hier ebenfalls um Annahmen.

Tabelle 5.2: Bewehrung der Tragwerkselemente

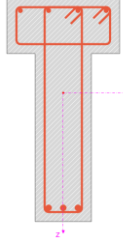
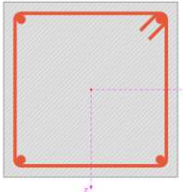
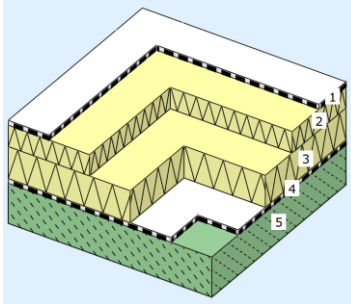
Träger		Schnitt (erstellt mit RFEM [37])
Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	
B Unsymmetrisch	A Zwei Schenkel Geschlossen Hacken 135°	
Oberseite: <u>4Ø14</u> Unterseite: <u>3Ø20</u>	<u>Ø8/20</u>	
Stützen		
Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	
C Gleichmäßig umlaufend	A Zwei Schenkel Geschlossen Hacken 135°	
<u>4Ø18</u>	<u>Ø8/20</u>	

Tabelle 5.3 enthält den Dachaufbau des Use Cases. Der Aufbau ist dem Energieausweise aus dem Jahr 2020 [36] entnommen.

Tabelle 5.3: Dachaufbau Use Case A

Nr.	Schicht	Dicke [cm]	Dichte [Kg/m ³]	Aufbau in 3D- Ansicht (erstellt mit eco2soft [38])
1	Bituminöse Abdichtung	1,00	1050	
2	EPS aus Sanierung	8,00	19,5	
3	EPS aus Bestand	12,00	19,5	
4	Dampfsperre	0,20	650	
5	Porenbeton Platten	15,00	775	

5.2.3 Gebäudescan

Wie in Kapitel 3.1.2.2 beschrieben, wurde mit Hilfe einer Drohne eine Photogrammetrische Gebäudescan erstellt. Aus der daraus erhaltenen Punktwolke (Abbildung 5.3) wurde mit Hilfe des SCAN2BEAMS Framework [4] die das Tragwerk beschreibende .CSV-Daten extrahiert.

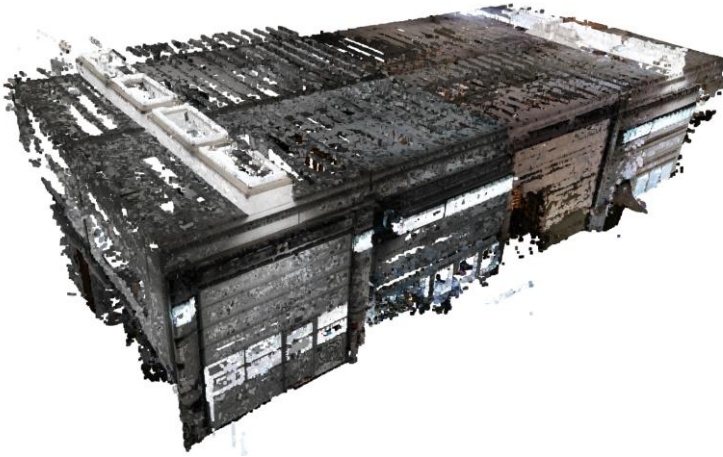


Abbildung 5.3: Punktwolke aus dem Gebäudescan für USE Case A

Im Grundriss (Abbildung 5.2) ist der gescannte Bereich der Halle rot markiert.

5.2.4 Geplante vertikale Extension

Geplant wird eine kurzfristige Aufstockung zur Erweiterung der Büroflächen. Dazu sollen Bürocontainer im mittleren nördlichen Bereich der Halle platziert werden.

5.2.5 Angesetzte Lasten

Eigengewicht des Tragwerks

Das Eigengewicht der Tragwerksrelevanten Bauteile wird eigenständig von RFEM über die Wichte der Bauteile und ihre Abmessungen berechnet. Das Eigengewicht des Tragwerks bleibt in allen drei betrachteten Lastfällen gleich (vgl. Tabelle 5.4 g_1, k).

Ausbaulasten

Die Ausbaulasten aus dem Dachaufbau ergeben sich durch den in Tabelle 5.7 gezeigten Aufbau inklusive einer Last durch die Installationstechnik von $0,05 \text{ kN/m}^2$ zu $1,35 \text{ kN/m}^2$.

Die zusätzlichen Ausbaulasten durch die Bürocontainer ergeben sich, bei vollständig ausgestatteten, ISO-genormten 20-Fuß-Bürocontainer vom Typ BM20 mit Außenabmessungen von $6,055 \text{ m}$ Länge $\times$ $2,435 \text{ m}$ Breite $\times$ $2,590 \text{ m}$ Höhe und einem Gewicht von 1.990 kg , ebenfalls zu $1,35 \text{ kN/m}^2$ pro Container. [39]

Nutzlasten

Nach ÖNORM B 1991-1-1 [40] Tab. 6. beträgt die Nutzlast für nicht zugängliche Dächer (Kategorie H) 1 kN/m^2 . Auf eine Begrenzung der Lastfläche wird vereinfachend verzichtet.

Die Nutzlasten der Nutzungskategorie B2 für Büroflächen in nicht Bürogebäuden ergeben sich nach ÖNORM B 1991-1-1 [40] zu $2,0 \text{ kN/m}^2$.

Die sich in Abhängigkeit der übereinander gestapelten Containeranzahl n für die drei differenzierten Lastsituationen insgesamt ergebenden Belastungen sind in Tabelle 5.4 abgebildet. Da es bei diesem Use Case keinen „Bauzustand“ gibt, in dem z.B. durch Entfernen des Dachaufbaus eine neue Lastsituation vorliegt, ist keine Unterscheidung zwischen Lastsituation 1 und 2 nötig.

Es wird vereinfachend angenommen, dass es sich bei den zusätzlichen Lasten um, im Bereich der Aufstockung, gleichmäßig verteilte Flächenlasten handelt.

5.2.6 Tragwerkserstellung

Basierend auf den durch die Scandaten ermittelten Tragwerksabmessungen wird das Tragwerk auf die gesamte Hallenfläche erweitert. Dabei wird angenommen, dass der gescannte Tragwerksteil repräsentativ für das gesamte Hallentragwerk ist und sich dieses durch Multiplikation entsprechend ableiten lässt.

Bei einer Gebäudelänge von 30,50 m in Spannrichtung der Rahmen ergibt sich aus der durch den Scan bestimmten Spannweite von 5,71 m eine rechnerische Anzahl von 5,34 Rahmenfeldern. Durch Rundung auf 5 Rahmenfelder ergibt sich eine angepasste Spannweite von 6,10 m.

In Rahmenquerrichtung beträgt die Gebäudelänge 31,00 m. Basierend auf den, aus den Scandaten ermittelten, Rahmenabstand von 5,93 m wären, für eine Länge von 31 m, eine Anzahl von 5,22 Zwischenräume erforderlich. Durch Rundung auf 5 Zwischenräumen ergibt sich der Rahmenabstand zu 6,20 m und eine Anzahl von 6 Rahmenreihen.

Die durch die Scandaten ermittelte Stützhöhe beträgt 5,23 m, diese wird auf 5,20 m gerundet.

In Tabelle 5.4 sind unter dem Abschnitt Bestandsgeometrie die gewählten Abmessungen nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Input Parameter Use Case A, Lasten in Abhängigkeit der gestapelten Container n

Bestandsgeometrie		
Geometrie von USE CASE	A	
Felder pro Rahmen	5	
Anzahl der Rahmen	6	
Gebäudelänge in Rahmenrichtung [m]	30,50	
Rahmenabstand [m]	6,20	
Stützenhöhe [m]	5,20	
Tragwerkselemente		
Stützen Querschnittstyp	Massives_Vierkantprofil	SQ_M1 0.4
Stützen Dimension [m]	Seitenlänge 0.4	
Träger Querschnittstyp	Massives_T_Profil	T_M1 0.80/0.40/0.20/0.20
Träger Dimension [m]	Höhe / Breite / Flanschhöhe / Stegdicke	
	0.80/0.40/0.20/0.20	
Materials		
Träger		
Betonfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37 EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Bewehrungsstahlgüte	B500B	B500S(B) EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Stützen		
Betonfestigkeitsklasse	C30/37	C30/37 EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Bewehrungsstahlgüte	B500B	B500S(B) EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Betondauerhaftigkeit		
Expositionsklasse	XC1	
Lagerung		
Stützen Lagerung	Eingepannt	-
Träger auf Stützen Lagerung	Fest	ux
	Fest	uy
	Fest	uz
	Fest	phi x
	Frei	phi y
	Fest	phi z
Vertical Extension		
Beginn der VE Rahmennummer	2	
Abstand der VE in richtung +x [m]	0	
Abstand der VE in richtung -x [m]	12,20	
Ende der VE Rahmennummer	3	
Höhe der VE [m]	2.6	
Lasten		
	Laststiuation 1: Lasten vor der Vetikalen Extrusion = Laststiuation 2: Lasten während der Vetikalen Extrusion	Laststiuation 3: Lasten nach der Vetikalen Extrusion
g1,k Eigengewicht [kN/m]	calculat automatically	calculat automatically
g2,k Ausbaulasten [kN/m2]	1.35	1.35 + 1.35 * n
qk Nutzlasten [kN/m2]	1.00	2 * n
Nutzlastkategorie	QI H Imposed loads - category H: roofs	QI B Imposed loads - category B: office areas

Abbildung 5.4 zeigt die aus den Input Parametern automatisiert in RFEM erstellte Tragwerksstruktur des Use Case A inklusiver der geplanten Aufstockung.

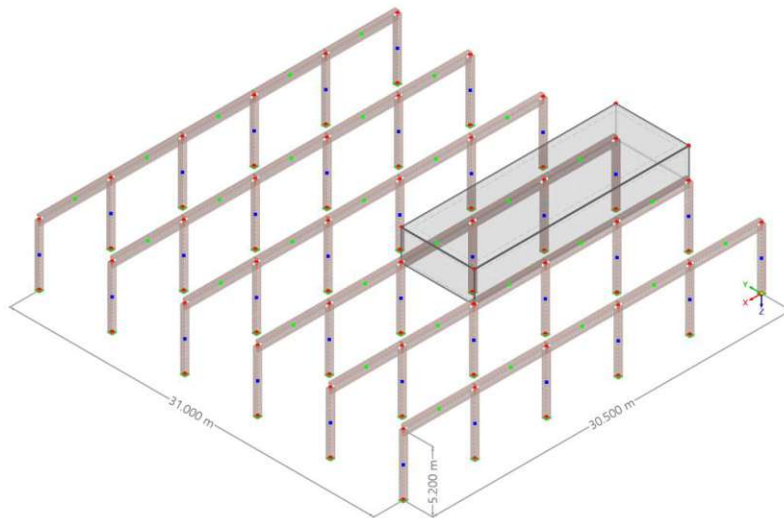


Abbildung 5.4: Tragwerksstruktur des Use Case A mit geplanter Aufstockung

5.2.7 Ergebnisse

Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 zeigen die Ergebnisse der Betonbemessung nach ÖNORM EN 1992 2015-02 [34] für die Träger und Stützen des Tragwerks. Die Ausnutzung wird dabei gestaffelt nach der Anzahl der übereinander aufgestockten Stockwerke angegeben. Ohne Aufstockung werden die Hallenträger zu maximal 39% ausgenutzt. Bei der Aufstockung von einem Stockwerk können noch alle Nachweise erfüllt werden. Die Nachweise der Träger können ab zwei Stockwerken nicht mehr eingehalten werden. Dabei wird die Querschnittsbeanspruchbarkeit im GZT maßgebend. Beim Aufsetzen weiterer Stockwerke wird auch im GZG die Spannungsbegrenzung der Bewehrung und im GZT die Schubbeanspruchbarkeit überschritten. Für die Stützen können hingegen alle Nachweise eingehalten werden. Auch bei einer Aufstockung mit vier Stockwerken ergibt sich lediglich eine maximale Auslastung von 23%.

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Betonbemessung für die Träger nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE A

Träger					
Stockwerke der Vertikalen Extrusion	GZT – Ständig und vorübergehend	GZT – Ständig und vorübergehend	GZG Charakteristisch	GZG Quasi - ständig	GZG Häufig
	Querschnittsbeanspruchbarkeit	Schubbeanspruchbarkeit - Bewehrungsschubtragfähigkeit	Spannungsbegrenzung in der Bewehrung	Begrenzung der Verformungen	Rissbreitenbegrenzung - Mindestbewehrungsfläche
0	0.392	0.223	0.335	0.031	keine Rissbildung
1	0.687	0.390	0.585	0.138	keine Rissbildung
2	1.115	0.635	0.942	0.281	keine Rissbildung
3	1.534	0.916	1.268	0.404	keine Rissbildung
4	1.972	1.244	1.366	0.519	keine Rissbildung

Tabelle 5.6: Ergebnisse der Betonbemessung für die Stützen nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE A

Stützen		
Stockwerke der Vertikalen Extrusion	GZT – Ständig und vorübergehend	GZG Quasi - ständig
	Querschnittsbeanspruchbarkeit	Begrenzung der Verformungen
0	0.047	0.000
1	0.077	0.042
2	0.121	0.115
3	0.166	0.176
4	0.210	0.231

5.3 Proof of Concept Use Case B

5.3.1 Use Case B

Das Objekt M 36 umfasst einen zweigeschossigen Bürotrakt und eine angrenzende, abgeschlossene Lagerhalle. Der Bürotrakt ist ein Mauerwerksbau aus Hohllochziegel mit Stahlbetondecken. Die Fassade des Bürobaus wurde als Vollwärmeschutzfassade ausgeführt, das Dach als Warmdach.

Der Hallenbereich teilt sich in einen größeren flachen Hallenteil und in einen kleineren höheren Teil. Die Halle wurde in Stahlbetonskelettbauweise mit hinterlüfteter Trapezblechfassade errichtet. Das Dach ist ebenfalls als Warmdach mit einer tragenden Trapezblechkonstruktion ausgeführt. An der West- und Nordseite der Lagerhalle befindet sich eine Flugdachkonstruktion.

Die Fertigteil- Stützen und Träger der Halle wirken statisch als Rahmen.

Abbildung 5.5 zeigt die Westansicht des Use Case B. Auf der linken Seite befindet sich die längere niedrige Halle, in der Mitte die kürzere höhere Halle, rechts der Bürotrakt. In Abbildung 5.6 ist der Grundriss im Erdgeschoss mit blau gekennzeichnetem Scanbereich dargestellt.

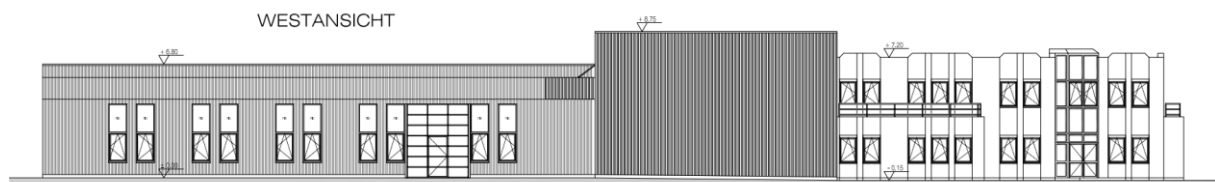


Abbildung 5.5: Westansicht Use Case B mit Bürotrakt und Hallenbereich [41]

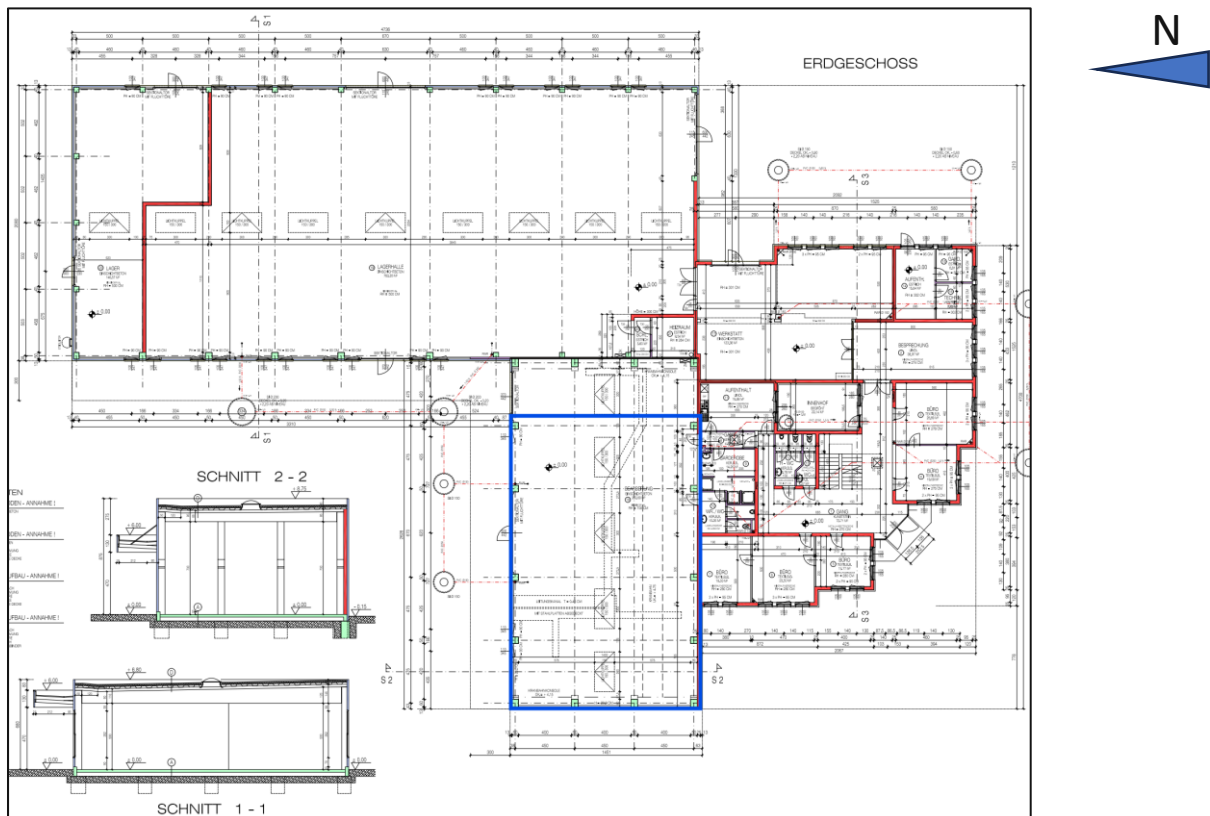


Abbildung 5.6: Grundriss im EG des Use Case B mit blau markiertem Scanbereich [41]

5.3.2 Tragwerkselemente

Tabelle 5.7 beinhaltet die Abmessungen, die Materialien und Lagersituationen der verbauten Träger und Stützen. Die Informationen stammen aus den Bestandsplänen [41], der Baubeschreibung [42] und dem Energieausweis [43]. Wo keine detaillierten Informationen vorlagen, wurden Annahmen entsprechend der Bauweise des Gebäudes getroffen. Die getroffenen Annahmen sind in Tabelle 5.7 unterstrichen dargestellt.

Tabelle 5.7: Aus Planunterlagen zu bestimmenden Bauwerksdaten für Use Case B

Elemente	Beschreibung	Abmessung [cm]
Stützen	Fertigteil Q-Stahlbetonstützen	Breite / Dicke /Höhe: 0.50/0.50/ <u>8.00</u>
Träger	Fertigteil T-Stahlbetonbinder	Höhe / Breite / Flanschhöhe / Stegdicke 0.95/0.50/ <u>0.20</u> / <u>0.25</u>

Material	Materialklasse	Expositionsklasse
Beton	<u>C35/45</u>	<u>XC1</u>
Betonstahl	<u>B500(S)B</u>	

Lager	Beschreibung	Freiheitsgrade
Stützenfundament	<u>Beton Köcher Fundament</u>	<u>[-] Einspannung</u>
Trägerlager	<u>Gabelkopflager</u>	<u>[phi y] Verdrehung in Trägerquerrichtung möglich</u>

Tabelle 5.8 enthält die Bewehrung der Stützen und Träger. Da über den Bewehrungsgrad keine Informationen vorliegen handelt es sich ebenfalls um Annahmen.

Tabelle 5.8: Bewehrung der Tragwerkselemente

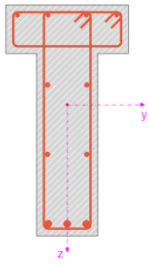
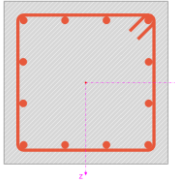
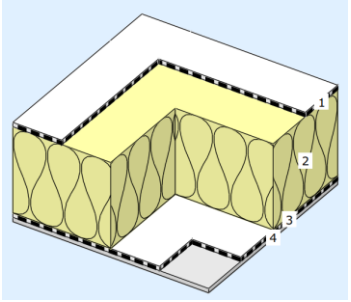
Träger		Schnitt (erstellt mit RFEM [37])
Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	
B Unsymmetrisch	A Zwei Schenkel Geschlossen Hacken 135°	
Oberseite: <u>4Ø16</u> Lateral Seite: <u>2Ø20</u> Unterseite: <u>3Ø30</u>	<u>Ø10/20.0</u>	
Stützen		
Längsbewehrung	Querkraftbewehrung	
C Gleichmäßig umlaufend	A Zwei Schenkel Geschlossen Hacken 135°	
<u>12Ø20</u>	<u>Ø10/20.0</u>	

Tabelle 5.9 enthält den Dachaufbau des Use Case B. Der Aufbau ist dem Energieausweis aus dem Jahr 2019 [43] entnommen.

Tabelle 5.9: Dachaufbau Use Case B

Nr.	Schicht	Dicke [cm]	Dichte [Kg/m ³]	Aufbau in 3D- Ansicht (erstellt mit eco2soft [38])
1	Folienabdichtung UV beständig	0,20	1300	
2	Steinwolle	22,00	50	
3	Dampfsperre	0,20	650	
4	Trapezblech	0,01	7800	

5.3.3 Gebäudescan

Wie in Kapitel 3.1.2.2 beschrieben, wurde mit Hilfe einer Drohne ein photogrammetrischer Gebäudescan erstellt. Aus der daraus erhaltenen Punktwolke (Abbildung 5.7) wurde mit Hilfe des *SCAN2BEAMS* Framework [4] die das Tragwerk beschreibende .CSV-Daten extrahiert.



Abbildung 5.7: Punktwolke aus dem Gebäudescan für USE Case B

In Abbildung 5.6 ist der gescannte Bereich der Halle blau markiert.

5.3.4 Geplante vertikale Extension

Geplant wird eine kurzfristige Aufstockung zur Erweiterung der Büroflächen. Dazu sollen Bürocontainer im mittleren Bereich der höheren Halle platziert werden.

5.3.5 Angesetzte Lasten

Eigengewicht des Tragwerks

Das Eigengewicht der Tragwerksrelevanten Bauteile wird eigenständig von RFEM über die Wichte der Bauteile und ihre Abmessungen berechnet. Das Eigengewicht des Tragwerks bleibt in allen drei betrachteten Lastfällen gleich (vgl. Tabelle 5.10 $g_{1,k}$).

Ausbaulasten

Die Ausbaulasten aus dem Dachaufbau ergeben sich durch den in Tabelle 5.9 gezeigten Aufbau inklusive einer Last durch die Installationstechnik von 0,05 kN/m² zu 1,62 kN/m².

Die zusätzlichen Ausbaulasten durch die Bürocontainer ergeben sich, bei vollständig ausgestatteten, ISO-genormten 20-Fuß-Bürocontainer vom Typ BM20 mit Außenabmessungen von 6,055 m Länge $\times$ 2,435 m Breite $\times$ 2,590 m Höhe und einem Gewicht von 1.990 kg, zu 1,35 kN/m² pro Container. [39]

Nutzlasten

Nach ÖNORM B 1991-1-1 [40] Tab. 6. beträgt die Nutzlast für nicht zugängliche Dächer (Kategorie H) 1 kN/m². Auf Begrenzung der Lastfläche wird vereinfachend verzichtet.

Die Nutzlasten der Nutzungskategorie B2 für Büroflächen in nicht Bürogebäuden ergeben sich nach ÖNORM B 1991-1-1 [40] zu 2,0 kN/m².

Die sich in Abhängigkeit der übereinander gestapelten Containeranzahl n für die drei differenzierten Lastsituationen insgesamt ergebenden Belastungen sind in Tabelle 5.10 abgebildet. Da es bei diesem Use Case keinen „Bauzustand“ gibt, in dem z.B. durch Entfernen des Dachaufbaus eine neue Lastsituation vorliegt, ist keine Unterscheidung zwischen Lastsituation 1 und 2 nötig.

Es wird vereinfachend angenommen, dass es sich bei den zusätzlichen Lasten um, im Bereich der Aufstockung, gleichmäßig verteilte Flächenlasten handelt.

5.3.6 Tragwerkserstellung

Basierend auf den durch die Scandaten ermittelten Tragwerksabmessungen wird das Tragwerk auf die gesamte Fläche der gescannten Halle erweitert. Dabei wird angenommen, dass der gescannte Tragwerksteil repräsentativ für das Hallentragwerk ist und sich dieses durch Multiplikation entsprechend ableiten lässt.

Die aus den Scandaten ermittelte Spannweite von 13,35 m wird entsprechend den Plandaten auf 13,50 m gerundet.

In Rahmenquerrichtung beträgt die Gebäudelänge 25,00 m. Basierend auf den, aus den Scandaten ermittelten, Rahmenabstand von 4,76 m wären, für eine Länge von 25 m, eine Anzahl von 5,25 Zwischenräume erforderlich. Durch Rundung auf 5 Zwischenräumen ergibt sich der Rahmenabstand zu 5,00 m und eine Anzahl von 6 Rahmenreihen.

Die durch die Scandaten ermittelte Stützhöhe beträgt 8,04 m, diese wird auf 8,00 m gerundet.

In Tabelle 5.10 sind unter dem Abschnitt Bestandsgeometrie die gewählten Abmessungen nochmals zusammengefasst.

Tabelle 5.10: Zusammenfassung der Input Parameter Use Case A, Lasten in Abhängigkeit der gestapelten Container n

Bestandsgeometrie		
Geometrie von USE CASE	A	
Felder pro Rahmen	1	
Anzahl der Rahmen	6	
Gebäudelänge in Rahmenrichtung [m]	13,50	
Rahmenabstand [m]	5,00	
Stützenhöhe [m]	8.00	
Tragwerkselemente		
Stützen Querschnittstyp	Massives_Vierkantprofil	SQ_M1 0.5
Stützen Dimension [m]	Seitenlänge 0.5	
Träger Querschnittstyp	Massives_T_Profil	T_M1 0.95/0.50/0.20/0.25
Träger Dimension [m]	Höhe / Breite / Flanschhöhe / Stegdicke 0.95/0.50/0.20/0.25	
Materials		
Träger		
Betonfestigkeitsklasse	C35/45	C35/45 EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Bewehrungsstahlgüte	B500B	B500S(B) EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Stützen		
Betonfestigkeitsklasse	C35/45	C35/45 EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Bewehrungsstahlgüte	B500B	B500S(B) EN 1992-1-1:2004/A1:2014
Betondauerhaftigkeit		
Expositionsklasse	XC1	
Lagerung		
Stützen Lagerung	Eingepannt	-
Träger auf Stützen Lagerung	Fest	ux
	Fest	uy
	Fest	uz
	Fest	phi x
	Frei	phi y
	Fest	phi z
Vertical Extension		
Beginn der VE Rahmennummer	2	
Abstand der VE in richtung +x [m]	1.5	
Abstand der VE in richtung -x [m]	1.5	
Ende der VE Rahmennummer	5	
Höhe der VE [m]	2.6	
Lasten		
	Laststiuation 1: Lasten vor der Vetikalen Extrusion = Laststiuation 2: Lasten während der Vetikalen Extrusion	Laststiuation 3: Lasten nach der Vetikalen Extrusion
g1,k Eigengewicht [kN/m]	calculat automatically	calculat automatically
g2,k Ausbaulasten [kN/m2]	1.35	1.62 + 1.35 * n
qk Nutzlasten [kN/m2]	1.00	2 * n
Nutzlastkategorie	QI H Imposed loads - category H: roofs	QI B Imposed loads - category B: office areas

Abbildung 5.8 zeigt die aus den Input Parametern automatisiert in RFEM erstellte Tragwerksstruktur des Use Case B inklusiver der geplanten Aufstockung.

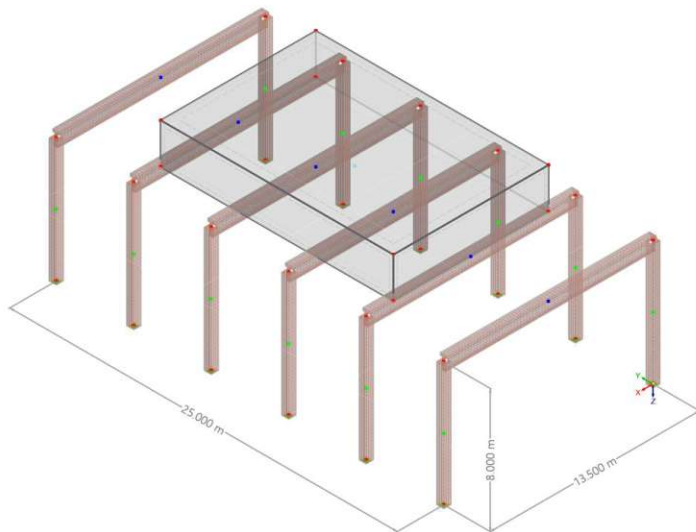


Abbildung 5.8: Tragwerksstruktur des Use Case B mit geplanter Aufstockung

5.3.7 Ergebnisse

Tabelle 5.11 und Tabelle 5.12 zeigen die Ergebnisse der Betonbemessung nach ÖNORM EN 1992 2015-02 [34] für die Träger und Stützen des Tragwerks. Die Ausnutzung wird dabei gestaffelt nach der Anzahl der übereinander aufgestockten Stockwerke angegeben. Ohne Aufstockung werden die Hallenträger zu maximal 61% ausgenutzt. Bei der Aufstockung von einem Stockwerk können noch alle Nachweise erfüllt werden. Die Nachweise der Träger können ab zwei Stockwerken nicht mehr eingehalten werden. Dabei wird die Querschnittsbeanspruchbarkeit im GZT und die Spannungsbegrenzung im GZG maßgebend. Beim Aufsetzen weiterer Stockwerke wird auch im GZT die Schubbeanspruchbarkeit und die Verformungsbegrenzung im GZG überschritten. Für die Stützen können hingegen alle Nachweise eingehalten werden. Auch bei einer Aufstockung mit vier Stockwerken ergibt sich lediglich eine maximale Auslastung von 20%.

Tabelle 5.11: Ergebnisse der Betonbemessung für die Träger nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE B

Träger					
Stockwerke der Vertikalen Extrusion	GZT – Ständig und vorübergehend	GZT – Ständig und vorübergehend	GZG Charakteristisch	GZG Quasi - ständig	GZG Häufig
	Querschnittsbeanspruchbarkeit	Schubbeanspruchbarkeit - Bewehrungsschubtragfähigkeit	Spannungsbegrenzung in der Bewehrung	Begrenzung der Verformungen	Rissbreitenbegrenzung - Berechnung von Rissbreiten
0	0.613	0.360	0.578	0.386	keine Rissbildung
1	0.951	0.437	0.892	0.668	keine Rissbildung
2	1.441	0.737	1.253	0.939	keine Rissbildung
3	1.931	1.087	1.266	1.206	keine Rissbildung
4	2.421	1.412	1.282	2.453	keine Rissbildung

Tabelle 5.12: Ergebnisse der Betonbemessung für die Stützen nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE B

Stützen		
Stockwerke der Vertikalen Extrusion	GZT – Ständig und vorübergehend	GZG Quasi - ständig
	Querschnittsbeanspruchbarkeit	Begrenzung der Verformungen
0	0.035	0.027
1	0.046	0.050
2	0.063	0.073
3	0.079	0.095
4	0.096	0.206

5.4 Ergebnisse des Proof of Concept

Der, anhand der beiden Use Cases A und B, durchgeführte Proof of Concept bestätigt die Funktionalität des entwickelten BEAMS2FEM Framework Tools. Eine schnelle Implementierung der, aus der SCAN2BEAMS-Methode generierten, .CSV-Daten ist durch die Einpflegung in die BEAMS2FEM Excel Datei möglich. Diese Daten können anschließend durch den Nutzer unkompliziert angepasst und erweitert werden. Eine Erweiterung der Daten ist, aufgrund des aktuell noch begrenzten Umfangs der Scandaten (siehe Abbildung 3.2), auch erforderlich. Die Eingabe der restlichen benötigten Bauwerksinformationen ist, durch die vorhandenen Dropdown-Menüs in der BEAMS2FEM Excel Datei, sehr benutzerfreundlich. Lediglich die Implementierung der Bewehrung und der nationalen Normen muss derzeit noch manuell in RFEM erfolgen, da hierfür noch keine RFEM Python Code Implementierungen existiert. Dies führt zu einer kleinen Feedbackloop im Eingabeprozess.

Nach dem Import der Scandaten und der Eingabe der restlichen Input Parameter wird das BEAMS2FEM-Python-Skript direkt in Excel über xlwings ausgeführt. Das Modell wird anschließend automatisiert in RFEM erstellt. Hier können nun die Eingabedaten überprüft und die Bewehrung und die nationalen Normen ergänzt werden. Danach wird die Berechnung in Excel aktiviert und das BEAMS2FEM-Python-Skript erneut ausgeführt. Nun erfolgt die automatisierte Berechnung der Tragstruktur. Das Auslesen der Ergebnisse erfolgt direkt in Excel, die Resultate können übersichtlich in den jeweiligen Arbeitsblättern aufgerufen werden.

Die Ergebnisse zeigen für beide Use Cases ein Aufstockungspotenzial von einem zusätzlichen Stockwerk (siehe Tabelle 5.5 / Tabelle 5.11).

Auffällig ist die geringe Auslastung der Stützen. Laut den Ergebnissen haben diese, selbst bei einer Aufstockung mit vier Stockwerke, noch Tragfähigkeitsreserven von etwa 80 % (siehe Tabelle 5.6 / Tabelle 5.12). Dies deckt sich zwar mit den Ergebnissen der Literaturrecherche (Mei et al. (2024) [16]), liegt aber wohl zu einem großen Teil an der fehlenden Berücksichtigung horizontaler Lasten. Da die Stützen aktuelle ausschließlich Richtung der Stützenachse auf Druck belastet werden, wird ihre tatsächliche Ausnutzung nur unvollständig erfasst.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche und Analyse der erforderlichen Eingangsdaten das neuartige BEAMS2FEM Framework Tool entwickelt. Dieses Tool ermöglicht eine semi-automatisierte Generierung und Analyse von Bestandstragwerken aus Punktwolken, einschließlich der Integration vertikaler Aufstockungen als zusätzliche Lasten auf das Tragwerk. Die Funktionalität von BEAMS2FEM wurde anhand zweier realer Anwendungsfälle validiert und liefert zuverlässige Aussagen über das Aufstockungspotenzial bestehender Tragwerksstrukturen.

Beantwortung der Research Question 1:

Durch die Entwicklung des BEAMS2FEM Framework Tools wird in dieser Arbeit die Forschungsfrage RQ1: „*Wie können parametrische Finite-Elemente-Modelle für Industriebaustrukturen automatisiert aus Punktwolken und Plandaten generiert werden?*“ beantwortet. Das entwickelte BEAMS2FEM Framework Tool ist ein semi-automatisierter Workflow. Zunächst werden aus den Scandaten die geometrischen Daten der Tragwerksstruktur extrahiert. Erst im nächsten Schritt erfolgt die Erstellung des FE-Modells. Diese Zweiteilung bietet den Vorteil, dass die aus den Punktwolken ermittelten geometrischen Abmessungen vor der Modellgenerierung vom Planer überprüft und bei Bedarf modifiziert oder ergänzt werden können. Im Hinblick auf die Parametrisierung handelt es sich bei BEAMS2FEM nicht um ein dynamisches, sondern um ein skriptgesteuertes Tool. Die Modellgenerierung erfolgt nicht in Echtzeit, sondern wird erst nach der Bestätigung durch den Nutzer ausgeführt. Informationen, welche nicht aus Scandaten extrahiert werden können, z.B. Materialeigenschaften oder Bewehrungsgrad, müssen vom User eingegeben werden.

Beantwortung der Research Question 2:

BEAMS2FEM ermöglicht die Integration vertikaler Aufstockungen, sowie eine automatisierte Betonbemessung, wodurch die Forschungsfrage RQ2: „*Wie können innerhalb eines FEA-Prozesses automatisiert vertikale Aufstockungen integriert werden, um Potentialanalysen und Variantenvergleiche durchzuführen?*“ beantwortet wird. Das entwickelte Tool ermöglicht es, durch einen einfachen Workflow, vertikale Aufstockungen automatisiert, in Form zusätzlicher Lastangaben sowie deren Verortung, im Berechnungstool zu implementieren und das Tragwerk entsprechend zu bemessen. Auf diese Weise könnten Bestandsnachweise um Neuplanungen erweitert werden. Anhand eines Proof of Concept durch zwei reale Industriehallen konnte die Funktionalität des entwickelten BEAMS2FEM Framework Tools nachgewiesen werden. Zudem wurde gezeigt, dass beide untersuchten Gebäude ein Aufstockungspotenzial besitzen.

Ausblick

Aufbauend auf die in dieser Arbeit entwickelten Grundlagen kann die Funktionalität des BEAMS2FEM Framework Tool in Zukunft noch erweitert werden. Zur genaueren Bemessung der Tragwerke könnten die berücksichtigten Eigen- Ausbau- und Nutzlasten um horizontal wirkende Lasten (z.B. Wind) erweitert werden. Auch eine Erweiterung um eine Gründungsbemessung, zur ganzheitlicheren Tragwerksanalyse, ist vorstellbar.

Ein weiterer wichtiger Schritt könnte auch die Implementierung von Ertüchtigungsmaßnahmen in das Tool sein. Falls das bestehende Tragwerkspotenzial überschritten wird, könnten geeignete Verstärkungsmaßnahmen je nach Versagensart automatisiert vorgeschlagen und direkt innerhalb des Tools bemessen werden.

Das im Rahmen dieser Diplomarbeit und des Forschungsprojekts RE:STOCK INDUSTRY [2] entwickelte BEAMS2FEM Framework Tool wird mit einer detaillierten Anleitung am Institut für Hoch- und Industriebau der Technischen Universität Wien archiviert und steht dort der künftigen Forschung zur Verfügung.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Enzinger, „Bodenverbrauch in Österreich,“ Umweltbundesamt, 2. Dezember 2022. [Online]. Available: <https://www.umweltbundesamt.at/news221202>. [Zugriff am 15. Jänner 2025].
- [2] „RE:STOCK INDUSTRY: Digitaler Framework zur kreislaufforientierten Wiederverwendung von Bestandstragwerken für vertikale Produktionen,“ Technische Universität Wien, 2024 - 2027.
- [3] E. Haselsteiner, V. Madner, H. Frey, L. Grob, B. Laa, M. Winder und K. Schwaigerlehner, Vertical Urban Factory: Innovative Konzepte der vertikalen Verdichtung von Produktion und Stadt, Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, 2019.
- [4] J. Reisinger, D. Marin, P. Ruffinatscha und P. Kan, „Scan2Beams: Moving Towards Automated Modeling and Analysis of Structural Industrial Building Stock,“ *International Council for Research and Innovation in Building and Construction*, 2025.
- [5] Page, M. Kenzie, Bossuyt, Boutron, Hoffmann und Mulrow, „The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting,“ *RESEARCH METHODS AND REPORTING*, 2021.
- [6] G. Castellazzi, A. M. D’Altri, G. Bitelli, I. Selvaggi und A. Lambertini, „From Laser Scanning to Finite Element Analysis of Complex Buildings by Using a Semi-Automatic Procedure,“ *Sensors*, Nr. 15, pp. 18360-18380, 2015.
- [7] G. Castellazzi, N. Lo Presti, A. M. D’Altri und S. de Miranda, „Cloud2FEM: A finite element mesh generator based on point clouds of existing/historical structures,“ *SoftwareX*, Nr. 18, 2022.
- [8] „A Parametric Scan-to-FEM Framework for the Digital Twin Generation of Historic Masonry,“ *MDPI Sustainability*, Nr. 13, 2021.
- [9] Y. Xu, S. Tuttas, L. Hoegner und U. Stilla, „Voxel-based segmentation of 3D point clouds from construction sites using a probabilistic connectivity model,“ *Pattern Recognition Letters*, pp. 67-74, 2018.
- [10] Y. Yan und J. F. Hajjar, „Geometric models from laser scanning data for superstructure components of steel girder bridges,“ *Automation in Construction*, Nr. 142, 2022.
- [11] Z. Selman, J. Musto und K. L., „Scan2FEM: From Point Clouds to Structured 3D Models Suitable for Simulation,“ *EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage*, 2022.
- [12] I. Brilakis und C. Haas, Infrastructure Computer Vision, M. Deans, Hrsg., Oxford: Elsevier, 2020.
- [13] R. Bolles, H. Baker und D. Marimont, „Epipolar-plane image analysis: An approach to determining structure from motion,“ *International Journal of Computer Vision*, pp. 7-55, 1987.
- [14] C. Gillott, Dissertation: Potential for the Vertical Extension of Existing Buildings, University of Sheffield: Department of Civil and Structural Engineering, 2022.

- [15] C. Gillott, B. Davison und D. Densley Tingley, „Reserve capacity and vertical extension potential in steel-frame buildings,“ *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Structures and Buildings*, 2024.
- [16] X. Mei, W. Hawkins, A. Darby und T. Ibell, „Realising the reserve capacity in existing reinforced concrete columns,“ *Structures*, Nr. 63, 2024.
- [17] E. K. Julistiono, P. Oldfield und L. Cardellicchio, „Up on the roof: a review of design, construction, and technology trends in vertical extensions,“ *Architectural Science Review*, Nr. 67, pp. 63-77, 2024.
- [18] E. K. Julistiono, P. Oldfield und L. Cardellicchio, „Vertical Extensions: Stakeholder Perspectives on Development Decisions and Construction Strategies,“ *American Society of Civil Engineers.*, 2023.
- [19] A. Bahrami, S. Deniz und H. Moalin, „Vertical Extension of a multi-story reinforced concrete building,“ *Sciendo*, Nr. 27, pp. 1-20, 2022.
- [20] Kamalakannan, Murali, Malik, Saravanan, Kumar und Umarani, „Retrofitting of an existing structure design and techniques,“ in *International Conference on Advances in Civil Engineering*, 2021.
- [21] G. Staib, A. Dörrhöfer und M. Rosenthal, *Modulares Bauen, Entwurf Konstruktion Neue Technologie*, Berlin: Birkhäuser, 2008.
- [22] C. A. Achammer, „Die Revolution steht vor der Türe – Planen und Bauen im industriellen Zeitalter,“ *Deutsche Bau Zeitschrift - Modulbau (Sonderheft)*, pp. 4 -10, 2019.
- [23] J. Reisinger, A. M. Zahlbruckner, P. Kán, I. Podkosova, H. Kaufmann und I. Kovacic, „RE:STOCK INDUSTRY: digital framework for the circular reuse of existing structures for vertical production,“ in *European Conference on Computing in Construction*, Chania, Crete, Greece, 2024.
- [24] J. Haymaker, M. Bernal, M. T. Marshall und V. Okhoya, „Design Space Construction: a framework to support collaborative, parametric decision making,“ *Journal of Information Technology in Construction*, Nr. 23, pp. 157-178, 2018.
- [25] E. Gamma, R. Helm, J. Ralph und J. Vlissides, *Design Patterns Elements of Reusable Object-Oriented Software*, London: Pearson Education Limited, 1994.
- [26] D. Dig und R. Johnson, „How do APIs evolve? A story of refactoring,“ *Journal of software maintenace and evolution: research and practice*, Nr. 00, pp. 1-26, 2006.
- [27] T. Bray, J. Paoli, C. M. Sperberg-McQueen, E. Maler, Yergeau und F. , „Extensible Markup Language (XML) 1.0 (Fifth Edition),“ *World Wide Web Consortium*, 2008.
- [28] Dlubal Software GmbH, „Programmierbare Schnittstelle für RFEM 6, RSTAB 9 und RSECTION 1,“ [Online]. Available: <https://www.dlubal.com/de/loesungen/online-dienste/webservice-und->

- api?srsId=AfmBOoq3G-dlvztG6eBHrvL5Y3slJDg2GJiighW4prpCSR1bkzQAKMr. [Zugriff am 20 Dezember 2024].
- [29] Dlubal Software GmbH, „Dlubal Git Hub Repository,“ [Online]. Available: <https://github.com/dlubal-software>. [Zugriff am 20 Dezember 2024].
- [30] K. Zilch, R. Niedermeier und W. Finckh, „Geklebte Verstärkung mit CFK-Lamellen und Stahlaschen,“ *Betonkalender 2021: Fertigteile; Integrale Bauwerke*, Bd. XII, pp. 1009-1105, 2021.
- [31] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1990 Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung, Wien, 2013.
- [32] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1991-1-1 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau, Wien: Austrian Standards International, 2013.
- [33] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM EN 1992-1-1 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetongtragwerken Teil 1-1: Allgemeine Regeln - Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke, Wien: Austrian Standards International, 2015.
- [34] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM B 1992-1-1 Eurocode 2: Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-1, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen, Wien: Austrian Standards International, 2018.
- [35] Bestandsplan Use Case A, Quelle anonymisiert, 2023.
- [36] Energieausweis Use Case A, Quelle anonymisiert, 2020.
- [37] Dlubal Software GmbH, FEM Statiksoftware: RFEM Student Testversion | 6.08.0009, 2025.
- [38] „eco2soft Ökobilanzierung für Gebäude,“ baubook GmbH, 2025. [Online]. Available: <https://www.baubook.at/eco2soft/>. [Zugriff am 10 Jänner 2025].
- [39] CONTAINEX Container Handelsgesellschaft m.b.H., Technische Beschreibung Büro-, Sanitär- und Verbindungscontainer, 2023.
- [40] Österreichisches Normungsinstitut, ÖNORM B 1991-1-1 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1991-1-1 und nationale Ergänzungen, Wien, 2020.
- [41] Bestandsplan Use Case B, Quelle anonymisiert, 2005.
- [42] Bau- und Ausstattungsbeschreibung Use Case B; Quelle anonymisiert, 2010.
- [43] Energieausweis Use Case B, Quelle anonymisiert, 2019.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: In Blau umrandet der Umfang des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Tools	3
Abbildung 1.2: Leistungsphase zum Einsatz des BEAMS2FEM Framework Tool	4
Abbildung 2.1: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Scan to FEM“, final wurden sieben wissenschaftliche Arbeiten ausgewählt	5
Abbildung 2.2: Baugruben- (a) Fotografie (b) Punktwolke aus Laserscan (c) Punktwolke aus Photogrammetrie [9]	7
Abbildung 2.3: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Potenzialanalyse und VE“, final wurden sieben wissenschaftliche Arbeiten ausgewählt	8
Abbildung 2.4: Prisma Flow Chart der Literaturrecherche zu „Digitalen Tools für FEA von Bestandtragwerken“, final wurde eine wissenschaftliche Arbeit ausgewählt	11
Abbildung 2.5: Beispiel für einen Design Space mit Variablen, Zielen und Wert	12
Abbildung 3.1: Punktwolke des Use Case A mit erkennbarer Stützen-Träger Tragwerksstruktur	16
Abbildung 3.2: SCAN2BEAMS Outputs für Use Case A (links) und Use Case B (rechts)	17
Abbildung 3.3: Getestete FEA Framework Ansätze, Approach 3 wird final als BEAM2FEM Framework Tool entwickelt.	18
Abbildung 3.4: Workflow des Approach 1. mit rot markierten Schwachstellen	19
Abbildung 3.5: Screenshot Approach 1, links: Modellgenerierung mit Grasshopper, rechts: berechnete Schnittgrößen mit Karamba 3D	20
Abbildung 3.6: Workflow des Approach 2. mit rot markierten Schwachstellen	21
Abbildung 3.7: Screenshot Approach 2, links: Grasshopper Workflow, rechts oben: Modellansicht in Rhino, rechts unten: berechnete Schnittgrößen mit RFEM	22
Abbildung 3.8: Workflow des BEAMS2FEM Framework Tool (Approach 3)	23
Abbildung 3.9: Screenshot BEAMS2FEM Framework Tool (Approach3.) links: Input in Excel, rechts oben: Python Code, rechts unten: Ergebnisse für Durchbiegung unter Eigengewicht in RFEM	24
Abbildung 4.1: BEAMS2FEM Pipeline (Scandaten des Use Case A)	25
Abbildung 5.1: Nordansicht Use Case A mit Bürotrakt und Hallenbereich [35]	31
Abbildung 5.2: Grundriss im OG des Use Case A mit rot markiertem Scanbereich [35]	32
Abbildung 5.3: Punktwolke aus dem Gebäudescan für USE Case A	34
Abbildung 5.4: Tragwerksstruktur des Use Case A mit geplanter Aufstockung	37
Abbildung 5.5: Westansicht Use Case B mit Bürotrakt und Hallenbereich [41]	38
Abbildung 5.6: Grundriss im EG des Use Case B mit blau markiertem Scanbereich [41]	38
Abbildung 5.7: Punktwolke aus dem Gebäudescan für USE Case B	40
Abbildung 5.8: Tragwerksstruktur des Use Case B mit geplanter Aufstockung	43

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 3.1: Aus Plan Daten zu ermittelnde „innere“ Bauwerksinformationen</i>	16
<i>Tabelle 3.2: Vom Tool aus den Scandaten zu ermittelnden geometrischen Daten</i>	17
<i>Tabelle 3.3: Vom Nutzer festzulegende, zur Aufstockungsanalyse benötigte Daten</i>	17
<i>Tabelle 4.1: aus den Scandaten generierte Abmessungen des Use Case A</i>	29
<i>Tabelle 5.1: Tragwerksdaten für Use Case A</i>	32
<i>Tabelle 5.2: Bewehrung der Tragwerkselemente</i>	33
<i>Tabelle 5.3: Dachaufbau Use Case A</i>	33
<i>Tabelle 5.4: Zusammenfassung der Input Parameter Use Case A, Lasten in Abhängigkeit der gestapelten Container n</i>	36
<i>Tabelle 5.5: Ergebnisse der Betonbemessung für die Träger nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE A</i>	37
<i>Tabelle 5.6: Ergebnisse der Betonbemessung für die Stützen nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE A</i>	37
<i>Tabelle 5.7: Aus Planunterlagen zu bestimmenden Bauwerksdaten für Use Case B</i>	39
<i>Tabelle 5.8: Bewehrung der Tragwerkselemente</i>	39
<i>Tabelle 5.9: Dachaufbau Use Case B</i>	40
<i>Tabelle 5.10: Zusammenfassung der Input Parameter Use Case A, Lasten in Abhängigkeit der gestapelten Container n</i>	42
<i>Tabelle 5.11: Ergebnisse der Betonbemessung für die Träger nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE B</i>	43
<i>Tabelle 5.12: Ergebnisse der Betonbemessung für die Stützen nach Lastfällen und Anzahl der Aufstockungen USE CASE B</i>	43