

Master's Thesis

# Interpretation rules for smooth digital data exchange between architecture and structural design

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

---

DIPLOMARBEIT

## Interpretationsregeln für reibungslosen digitalen Datenaustausch zwischen Architektur- und Tragwerksplanung

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

von

**Vitezslav Handl, BSc.**

Matr.Nr.: 1626531

unter der Anleitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Iva Kovacic**

Univ.Ass. Dipl.-Ing. **Goran Sibenik**

Institut für Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement  
Forschungsbereich E234-02 Integrale Bauplanung und Industriebau  
Technische Universität Wien,  
Karlsplatz 13/234-02, A-1040 Wien

Wien, im Mai 2022

---

### **Eidstaatliche Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, keine andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, sowie der Literatur wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche gekennzeichnet habe.



Wien, Montag, 9. Mai 2022

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich von ganzem Herzen bei allen bedanken, die mich bei Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein großer Dank Frau Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Iva Kovacic, die durch ihre Vorlesungen und Projektarbeiten mein großes Interesse an der Integralen Bauplanung geweckt und sich zur Übernahme der Hauptbetreuung meiner Diplomarbeit bereit erklärt hat.

Ein besonderer Dank gilt für die Betreuung dem Herrn Projektass. Dipl.-Ing. Goran Sibenik der mich allemal während der gesamten Zeit der Diplomarbeitstellung unterstützt hat, mir sehr viele Hilfestellungen sowie gute konstruktive Kritik gegeben hat.

Ich möchte mich weiter bedanken bei den Büros, die die Teststudien zur Verfügung gestellt haben.

Ein großes Dankeschön gebührt meiner Freundin deren Geduld und Unterstützung meine große Hilfe waren. Weiter möchte Ich mich viel bedanken bei meinem guten Freund Bernd für die Unterstützung. Ein großer Dank gilt auch meiner Familie und Studienkollegen, die mich auf unterschiedlicher Art und Weise bei dem Studium unterstützt haben.

Danke sehr!

1

---

<sup>1</sup> Der Autor legt großen Wert auf Gleichbehandlung. Im Sinne einer besseren Lesbarkeit vom Text wurde entweder die weibliche oder männliche Form von personenbezogenen Hauptwörtern gewählt. Dies impliziert keinesfalls eine Benachteiligung des jeweils anderen Geschlechts.

## Kurzfassung

Derzeit ist die Digitalisierung in fast allen Wirtschaftszweigen von großer Bedeutung. Der Fokus liegt hier insbesondere in der Optimierung relevanter Prozesse, welche vor allem zu einer Produktivitätssteigerung führen soll. Von diesen Entwicklungen ist unter anderem auch die Baubranche sowie deren Planung von Bauwerken betroffen. Seit mehreren Jahren verwenden viele Architekten und Tragwerksplaner für ihre Arbeit spezialisierte IT-Programme, in welchen Architektur- oder Tragwerksmodelle erstellt werden können. Exemplarisch nenne ich folgende Architekturprogramme (Autodesk Revit, Allplan Nemetschek, Graphisoft Archicad) und Statik-Programme (Dlubal RFEM, SCIA Engineer). Fokus dieser Diplomarbeit liegt auf dem Datenaustausch zw. Architektur und Tragwerksplanung, welche aus der inkompatiblen Übertragung der Daten zwischen Architektur Modell und Tragwerksmodell im digitalen Workflow immer noch mit Problemen behaftet sind. Da Architekten und Tragwerksplaner unterschiedliche Arbeits- und Betrachtungsweisen von Bauteilen haben, unterliegt ein und dasselbe Bauteil verschiedenen Darstellungen. Der Architekt stellt das Bauteil physisch da (z.B. Wand, Stütze) während der Tragwerksplaner das gleiche Bauteil analytisch (Wand als Scheibe, Stütze als Stab) betrachtet. Aus der facheinschlägigen Literatur und der Praxis ist bekannt, dass Architekturmodelle mithilfe der oben erwähnten IT-Programme in Tragwerksmodelle importiert werden können. Kritisch anzumerken ist jedoch, dass derzeit keine fehlerfreie Übertragung der Daten möglich ist. Nach dem Import entstehen vor allem geometrische Ungenauigkeiten, welche die händische Nachbearbeitung des Statik-Modells bedürfen. Es besteht derzeit großes Interesse daran, diese Doppelbearbeitung zu vermeiden und Technologien sowie Applikationen zu entwickeln, die die fehlerfreie Interoperabilität zwischen den beiden Programmen ermöglicht. An dieser Stelle ist zu sagen, dass die Übertragung der Modelle nicht standardisiert ist und es zurzeit keine exakte Literatur mit den genauen Interpretationsregeln gibt, wonach die Architektur-Modelle genau in Statik-Modelle überführt werden können. Diese Arbeit befasst sich mit der Analyse und Dokumentation der intuitiven Modellierungsschritte in der Tragwerks-Modellerstellung anhand der gegebenen Architekturplanung. Weiters steht die Gestaltung universeller Interpretationsregeln für die Tragwerksmodellbildung und der damit verbundene Erkenntnisgewinn im Mittelpunkt der Arbeit. Da es sehr viele intuitive Regeln zur Interpretation verschiedener Bauwerke gibt, fokussiert sich diese Arbeit auf Interpretationsregeln für Produktionshallen mit einem Flach-, Pult- oder Satteldach.

Diese Arbeit gliedert sich in vier Hauptteile. Zu Beginn wurden die Interpretationsregeln in der facheinschlägigen Literatur untersucht. Aus der Literatur konnten wertvolle Interpretationen gewonnen werden. Für die Tragwerksmodellerstellung als solche wurde keine Standardisierung gefunden. Es konnte festgestellt werden, dass der Architekt im Architekturprogramm das Modell eines Bauwerks aus den virtuellen 3D-Bauteilen als physisches Modell modelliert. Der Tragwerksplaner hingegen interpretiert das Modell des gleichen Bauwerks als die Zusammensetzung einzelner Tragwerkselemente, welche im Statik-FEM-Programm aus Knotenpunkten und Linien bestehen. In der Fachliteratur wurden Regeln, welche einzelne Tragwerkselemente beschreiben, gefunden. Diese Regeln umfassen ein Kriterium, das die reinen geometrischen Eigenschaften des Elementes beschreibt, und Kriterium, das sich auf die Art und Richtung der Belastung bezieht, die das Tragwerkselement überträgt. Weiters wurden Regeln nach der Anzahl und Art der Reaktionskräfte und geometrische Position für Lagertypen aus der Literatur festgestellt. Im zweiten Teil wurde Tragwerksmodell einer Pilotstudie modelliert und parallel dazu wurden die Interpretationsregeln während der Modellierung schrittweise analysiert und dokumentiert. Als Ergebnis der Abstimmung zwischen dem Tragwerksplaner und dem Architekten wurde Statik-Konzept angefertigt. Weitere geometrische Interpretationsregeln (z.B. Anschluss Träger an Stütze), welche bei der Statik-Modellbildung verwendet wurden, wurden mithilfe Euronormen und Fachliteratur erläutert. Im

dritten Teil wurden drei Teststudien (Tragwerksmodelle) mit den bereits definierten und analysierten Interpretationsregeln nachmodelliert und die Interpretationen grafisch und tabellarisch dokumentiert. Es konnte sich festhalten, dass die Interpretationsregeln aus den Teilen eins und zwei an die drei Teststudien gut anwendbar sind. Im vierten Teil wurden die erforschten Interpretationsregeln validiert. Validierung war teilweise erfolgreich. Das bedeutet die Validierung der Studie Nr. 3 gelungen ist. In der Teststudie Nr. 1 und Nr. 2 konnten die Flächenelemente nicht verglichen werden, da die entsprechenden Flächenlemente in den Praxismodellen fehlten und an Paar Stellen gewisse kleine geometrische Unterschiede vermerkt wurden. Die in dieser Arbeit vorgestellte Interpretationsregeln sind gut anwendbar im Gebiet der Industriebauten. Die Einbindung der Interpretationsregeln in einem Datenaustauschprozess zwischen dem Architekturprogramm und dem Statik-Programm sollte Automatisierung und fehlerfreien Datenaustausch ermöglichen. In diesem Fall kann der Einsatz von künstlicher Intelligenz große Chancen bieten, wobei die erforschten Interpretationsregeln Teil der Wissensbasis darstellen werden. Die in dieser Arbeit erforschte Interpretationsregeln können weiter erweitert werden, um komplexere Geometrien der 2D-Flächenelementen, und um zusätzliches Expertenwissen einzubeziehen.

## Abstract

Digitization is currently of great importance in almost all sectors of the economy. The focus here is particularly on the optimization of relevant processes, which should lead above all to an increase in productivity. Among other things, the construction industry and its planning of structures are also affected by these developments. For several years, many architects and structural engineers have been using specialized IT programs for their work, in which architectural or structural models can be created. Since architects and structural engineers have different ways of working with and viewing building components, one and the same building component is subject to different representations. The architect represents the component physically (e.g. wall, column) while the structural engineer considers the same component analytically (wall as a plate, column as a bar). It is known from the relevant literature and practice that architectural models can be imported into structural models with the help of software. However, it should be critically noted that currently no error-free transfer of the data is possible. After the import, mainly geometric inaccuracies occur, which require the manual post-processing of the structural model. There is currently great interest in avoiding this double processing and in developing technologies and applications that enable error-free interoperability between the two programs. At this point it should be said that the transfer of the models is not standardized and currently there is no exact literature with the exact interpretation rules according to which the architectural models can be accurately transferred into static models. This work deals with the analysis and documentation of the intuitive modeling steps in structural model generation based on a given architectural design. Furthermore, the design of universal interpretation rules for structural modeling and the related gain of knowledge is the focus of the work. Since there are a lot of intuitive rules for the interpretation of different structures, this work focuses on interpretation rules for production halls with a flat, monopitch or gable roof.

This thesis is divided into four main parts. At the beginning, the rules of interpretation in the relevant literature were examined. Valuable interpretations were obtained from the literature. No standardisation was found for structural modelling as such. It was found that the architect models the model of a structure from the virtual 3D components as a physical model in the architecture programme. The structural engineer, on the other hand, interprets the model of the same structure as the composition of individual structural elements, which in the structural FEM programme consist of nodes and lines. Rules describing individual structural elements have been found in the technical literature. These rules include a criterion that describes the pure geometric properties of the element and a criterion that refers to the type and direction of the load that the structural element transmits. Furthermore, rules according to the number and type of reaction forces and geometric position were determined for bearing types from the literature. In the second part, the structural model of a pilot study was modelled and in parallel the interpretation rules were analysed and documented step by step during the modelling. As a result of the coordination between the structural engineer and the architect, structural design concept was prepared. Further geometric interpretation rules (e.g. connection of beam to column), which were used in the structural modelling, were explained with the help of European standards and technical literature. In the third part, three test studies (structural models) were re-modelled with the previously defined and analysed interpretation rules and the interpretations were documented graphically and in tabular form. It was found that the interpretation rules from parts one and two could be applied well to the three test studies. In part four, the interpretation rules explored were validated. Validation was partially successful. This means that the validation of test study no. 3 was successful. In test study no. 1 and no. 2 the surface elements could not be compared because the corresponding surface elements were missing in the practice models and certain small geometric differences were noted in pairs. The interpretation rules presented in this paper are well applicable in the field of industrial buildings. The integration of the

interpretation rules in a data exchange process between the architectural programme and the structural analysis programme should allow automation and error-free data exchange. In this case, the use of artificial intelligence can offer great opportunities, where the researched interpretation rules will be part of the knowledge base. The interpretation rules explored in this work can be further extended to include more complex geometries of 2D surface elements, and to include additional expert knowledge.

# Inhaltsverzeichnis

Danksagung .....	III
Kurzfassung .....	IV
Abstract .....	VI
Inhaltsverzeichnis .....	VIII
Abkürzungsverzeichnis .....	X
1 Einleitung.....	1
2 Forschungsdesign .....	4
3 State-of-the-Art-Analyse .....	5
3.1 Betrachtungsweise des Architekturmodells.....	5
3.2 Betrachtungsweise des Tragwerkmodells.....	6
3.3 Bauteile und Tragwerkselemente .....	8
3.3.1 Seil .....	10
3.3.2 Stab.....	10
3.3.3 Balken .....	11
3.3.4 Bogen.....	11
3.3.5 Platte .....	12
3.3.6 Scheibe .....	13
3.3.7 Schale.....	14
3.3.8 Massive Tragwerkselemente.....	15
3.4 Lager des Tragwerks.....	16
3.4.1 Einspannung .....	16
3.4.2 Festlager .....	17
3.4.3 Loslager.....	18
3.4.4 Linienlager .....	18
3.4.5 Flächenlager .....	19
3.5 Planungsprozess – Architektur und Tragwerksplanung .....	20
4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie .....	22
4.1 Pilotstudie.....	22
4.2 Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners.....	23
4.3 Statik-Modell: 3D-FEM-Modellbildung.....	24
4.3.1 Geometrische Regel: Anschluss Stütze an Köcherfundament .....	27
4.3.2 Geometrische Regel: Anschluss Träger an Stütze .....	29
4.3.3 Geometrische Regel: Anschluss Platte an Träger .....	33
4.3.4 Geometrische Regel: Außermittigkeit der 1D-Linienelemente.....	36

4.4	Interpretationsregeln .....	38
4.4.1	Stützen.....	38
4.4.2	Köcherfundament.....	38
4.4.3	Träger .....	38
4.4.4	Plattendecken.....	38
4.4.5	Exzentrische Anbindung von den Trägern oder Plattendecken .....	38
4.4.6	Tragende Wände .....	38
4.4.7	Bodenplatte .....	39
5	Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien .....	40
5.1	Teststudie 1 .....	41
5.1.1	Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners .....	42
5.1.2	Interpretation der Bauteile – Details.....	45
5.1.3	3D-FEM-Statik-Modell .....	49
5.2	Teststudie 2 .....	54
5.2.1	Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners .....	55
5.2.2	Interpretation der Bauteile – Details.....	58
5.2.3	3D-FEM-Statik-Modell .....	61
5.3	Teststudie 3 .....	65
5.3.1	Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners .....	66
5.3.2	Interpretation der Bauteile – Details.....	68
5.3.3	3D-FEM-Statik-Modell .....	72
6	Validierung .....	78
6.1	Teststudie 1 .....	78
6.2	Teststudie 2 .....	85
6.3	Teststudie 3 .....	90
7	Diskussion.....	98
8	Conclusio .....	100
9	Referenzen .....	101

## Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ARCH	Architektur
<i>b</i>	Breite
BIM	Building Information Modeling bzw. Building Information Model
BPL	Bodenplatte
BSH	Brettschichtholz
BSP	Brettsperrholz
Bsp.	Beispiel
bzw.	beziehungsweise
EC 2	Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken
EC 3	Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten
EC 5	Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten
EC 6	Eurocode 6: Bemessung und Konstruktion von Mauerwerksbauten
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
FEM	Finite-Elemente-Methode
FOK	Fundament Oberkante
FUK	Fundament Unterkante
FT	Fertigteil
FW	Fachwerk
GK	Gipskarton
<i>h</i>	Höhe
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IT	Informationstechnologie
i. A.	im Allgemein
i. d. F.	in der Fassung
Kap.	Kapitel
k. A.	keine Angabe

KOK	Köcher Oberkante
KUK	Köcher Unterkante
/	Länge
LPH	Leistungsphase
MWK	Mauerwerk
Nr.	Nummer
OK	Oberkante
RDOK	Rohdecke Oberkante
RDUK	Rohdecke Unterkante
RRO	Rechteckrohr
s.	siehe
StB	Stahlbeton
Stk.	Stück
<i>t</i>	Dicke
Tab.	Tabelle
TWP	Tragwerksplanung
UK	Unterkante
Var.	Variante
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil
1D	Eindimensional (x)
2D	Zweidimensional (x, y)
3D	Dreidimensional (x, y, z)

## 1 Einleitung

Wie jedes Gebiet der menschlichen Betätigung unterliegt auch das Bauwesen ständigen Entwicklungen. Der Fokus liegt insbesondere auf der Schaffung eines optimalen Nutzens in jedem Prozess, wie es für die Gesellschaft möglich ist. Im Vergleich zu anderen Branchen stieg in den letzten Jahren die Produktivität im Bauwesen nicht so rasch. Die Autoren Niederrenk und Seemann verwiesen in einem Fachartikel aus dem Jahr 2018 auf den Umstand, dass seit 2010 die Baubranche lediglich einen Produktivitätszuwachs von 2,8 % zu verzeichnen hatte. Andere Branchen hingegen konnten einen wesentlich stärkeren Zuwachs verbuchen. Exemplarisch seien die Vorreiter aus der Informations- und Kommunikationsbranche angeführt, die sogar die Produktivität um ganze 23,7 % steigern konnten (vgl. Niederrenk und Seemann 2018).

Wie in fast allen Wirtschaftszweigen spielt derzeit die Digitalisierung eine große Rolle. Auch die Baubranche ist von dieser Entwicklung betroffen. Vor allem in der Planung der Bauwerke kommt der IT eine große Rolle zu. Was erwartet man sich von dieser? Natürlich eine Produktivitätssteigerung. Big Data ist auch im Bauwesen kein Schlagwort. So liegen immense Datenmengen bzw. Fakten digital vor. Nach der Analyse und Auswertung dieser elektronisch vorliegenden Informationen können die Prozesse in der Planung, Ausführung und Verwaltung von Bauwerken optimiert und effektiv gestaltet werden.

Gegenwärtig gibt es in der Baubranche IT-Programme und technische Instrumente, die nicht nur 2D- oder 3D-Zeichenmöglichkeiten bieten, sondern auch sogenanntes Building Information Modeling ermöglichen.

In der einschlägigen Literatur wird für Building Information Modeling das Akronym ‚BIM‘ verwendet. Darunter wird zweierlei verstanden: zum einen der Prozess des Entstehens und der Verarbeitung eines digitalen virtuellen Bauwerksmodells, um Entwurf, Pläne, Ausbau, Bauabläufe und Gebäudemanagement simulieren und generieren zu können. Zum anderen wird unter dem Kürzel ‚BIM‘ das resultierende Gebäudeinformationsmodell (Building Information Model) verstanden. Dieses ist reich an Daten und besteht aus intelligenten, parametrischen Objekten, die das reale Bauwerk abbilden. Aus diesem Modell können Ansichten und Daten, die den Bedürfnissen verschiedener Benutzer entsprechen, extrahiert und analysiert werden. Die daraus gewonnenen Informationen sollen zur besseren Entscheidungsfindung und Optimierung der Prozesse dienen (vgl. Azhar et al. 2008, S. 1). Auch im Abkürzungsverzeichnis dieser Arbeit wird auf die zweifache Bedeutung verwiesen.

Seit einigen Jahren verwenden viele Architektinnen und Architekten IT-Programme, in denen sie physische Modelle (BIMs) erstellen. Zur Verdeutlichung nenne ich exemplarisch folgende Architekturprogramme: Autodesk Revit, Graphisoft ArchiCad, Allplan Nemetschek. Mit dieser Software werden physische BIM-Architekturmodelle erstellt.

Architekten und Tragwerksplaner haben unterschiedliche Arbeits- und Betrachtungsweisen von Bauteilen. Ein und dasselbe Bauteil unterliegt verschiedenen Darstellungen. Der Architekt stellt das Bauteil physisch dar (z. B. Wand, Stütze) und der Tragwerksplaner das gleiche Bauteil analytisch (Wand als Scheibe, Stütze als Stab). Das physische BIM-Architekturmodell erfasst genau die Geometrie, die dem realen Objekt entspricht. Das analytische Tragwerksmodell ist ein idealisiertes Berechnungsmodell für die statische Berechnung (vgl. Talebitari, S. 70). Es ist ein geometrisch vereinfachtes Modell des Bauteils, das die Grundlage für die weitere statische Berechnungen (z.B. von Spannungen und Verformungen) bietet (vgl. Borrmann et al. 2015, S. 278).

## 1 Einleitung

Aus der facheinschlägigen Literatur und der Praxis ist bekannt, dass BIM-Architekturmodelle mithilfe einer Software in Statik-Modelle importiert werden können. Kritisch anzumerken ist, dass derzeit keine fehlerfreie Übertragung von den Daten funktioniert. So entstehen vor allem geometrische Ungenauigkeiten (vgl. Nöldgen et al. 2014, S. 254). Da die Überführung nicht einwandfrei verläuft, haben die Tragwerksplaner dann mithilfe von allen möglichen Anpassungswerkzeugen (Voreinstellungen, Umstellung, Geometrie Angleichung, ...) händisch Anpassungen durchzuführen (vgl. Kepplin et al. 2017, S. 221). Einfach gesagt, ist ein bidirektionaler fehlerfreier Austausch zwischen Architekturprogramm und Statik-Software kaum möglich. Aufgrund mangelnder Interoperabilität sind die Vorteile des BIMs nicht richtig nutzbar (vgl. Ramaji und Memari 2016, S. 1). Bereits im Jahr 2009 wies McGraw Hill auf diese Problematik in den USA hin (vgl. Hu et al. 2015, S. 30).

In einem Fachartikel aus dem Jahr 2018 schlagen die Autoren Ramaji und Memari vor, dass durch interpretierten Datenaustausch Prozess, Genauigkeit und Zuverlässigkeit des importierten Modells verbessert werden kann und keine zeitaufwendigen Anpassungen dann stattfinden müssen. Wobei der interpretierter Datenaustausch außerhalb von Architekturprogramm oder Statik-Programm stattfindet (vgl. Ramaji und Memari 2018, S. 122) .

An dieser Stelle ist zu sagen, dass die Übertragung der Modelle nicht standardisiert ist, und es keine exakte Literatur mit den genauen Interpretationsregeln gibt, wonach die Architektur-Modelle genau in Statik-Modelle überführt werden können. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass die BIM-Philosophie die Arbeit an sich erleichtern soll, obwohl es zu Nachbearbeitungsprozessen beim Übertragen ins Statik-Modell kommt (vgl. Talebitari, S. 70).

Für mittelgrößere Bauprojekte ist es üblich, dass mehrere Tragwerkplanungsbüros involviert sind, die mit verschiedener Statik-Software arbeiten. Die Softwarewerkzeuge haben eine uneinheitliche und inkompatible semantische und geometrische Darstellung von Daten. Dies schränkt die Zusammenarbeit ein, erschwert die Arbeitsabläufe und wirkt sich nachteilig auf die Produktivität aus (vgl. Hu et al. 2015, S. 34). Erstrebenswert ist, dass sich die Modellierungsstandards inklusive der Import-Schnittstellen der einschlägigen Programme weiter in Richtung einer der Planungspraxis angepassten Lösung verbessern (vgl. Kovacic et al. 2014, S. 32).

In der Planung hat man großes Interesse, dass Technologien auf den Markt kommen, die die Interoperabilität und fehlerfreie Übertragung von den Modelldaten zwischen der Software reibungslos vermitteln (vgl. Hu et al. 2015, S. 29) und (vgl. Ramaji und Memari 2018, S. 119). Aus diesem beschriebenen Problemaufriss des nicht kompatiblen Datentransfers zwischen dem Architektur- und Statik-Modell leite ich folgende Forschungsfragen für diese Arbeit ab:

- a) *Gibt es universale Interpretationsregeln für die Erstellung von Tragwerksmodellen (Statik-Modellen) anhand von vorhandener Architekturplanung in der Leistungsphase LPH 3 - Entwurfsplanung?*
- b) *Wie werden Tragwerksmodelle aus den Architektur Unterlagen intuitiv modelliert?*

In dieser Arbeit umfassen die Architektur Unterlagen die Architekturplanung in der Leistungsphase LPH 3 – Entwurfsplanung, wie in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) definiert. Diese kann sowohl in Papierform als auch in digitaler Form aufgezeichnet werden. Papierform bezieht sich auf gedruckte Pläne (Grundrisse, Schnitte, Ansichten, Skizzen oder Visualisierungen). In digitaler Form können sowohl Pläne als auch Modelle aufgezeichnet werden. Konkret werden die folgenden Beispiele der digitalen Form genannt: ein Grundriss des Gebäudes im PDF-Format, ein Gebäudeschnitt des Objektes im dwg-Format oder ein BIM-Architekturmodell im ifc-

## 1 Einleitung

Format. Derzeit ist eine der gängigsten Formen des Austauschs im Laufe der Planung zwischen Architekten und Tragwerksplanern die digitale Form von Plänen im PDF. Es werden in dieser Arbeit auch Teststudien modelliert. Die Architektur Unterlagen mit diesen Studien, wo Architekturplanung in der Entwurfsphase (LPH 3) dargestellt ist, wurden auch als Pläne im PDF-Format zur Verfügung gestellt. Daher werden die Tragwerksmodelle in dieser Arbeit aus den Architektur Unterlagen, die in dieser Form vorliegen, modelliert.

Da es sehr viele intuitive Regeln zur Interpretation verschiedener Bauwerke gibt, fokussiert sich diese Arbeit auf Interpretationsregeln für Produktionshallen mit einem Flachdach, Pultdach oder einem Satteldach. Charakteristisch sind für diese Hallen große und stützenfreie Räume. Das Tragwerk besteht aus Stützen und Bindern (Haupttragelemente) und Pfetten, Trapezblechen oder Platten (Nebentragelemente) (vgl. Grimm und Kocker 2011, S. 8). Das Fundament sowie die Stützen der Hallen werden aus Stahlbeton bevorzugt und die Dachkonstruktion besteht aus Holz oder aus Stahl.

## 2 Forschungsdesign

Um die Forschungsfragen zu beantworten, werden mehrere Methoden berücksichtigt. Die Masterarbeit ist dabei in vier Hauptteile gegliedert (s. Abb 2-1). Im ersten Schritt wird die Literaturrecherche als Methode zur Findung von Interpretationsregeln angewendet. Im zweiten Schritt wird das Nachmodellieren einer Pilotstudie und deren Dokumentation durchgeführt. Im dritten Schritt werden drei Teststudien aus der Praxis nachmodelliert und Interpretationen dokumentiert. Im vierten Schritt wird ein visueller Vergleich der Teststudien als Methode benutzt.

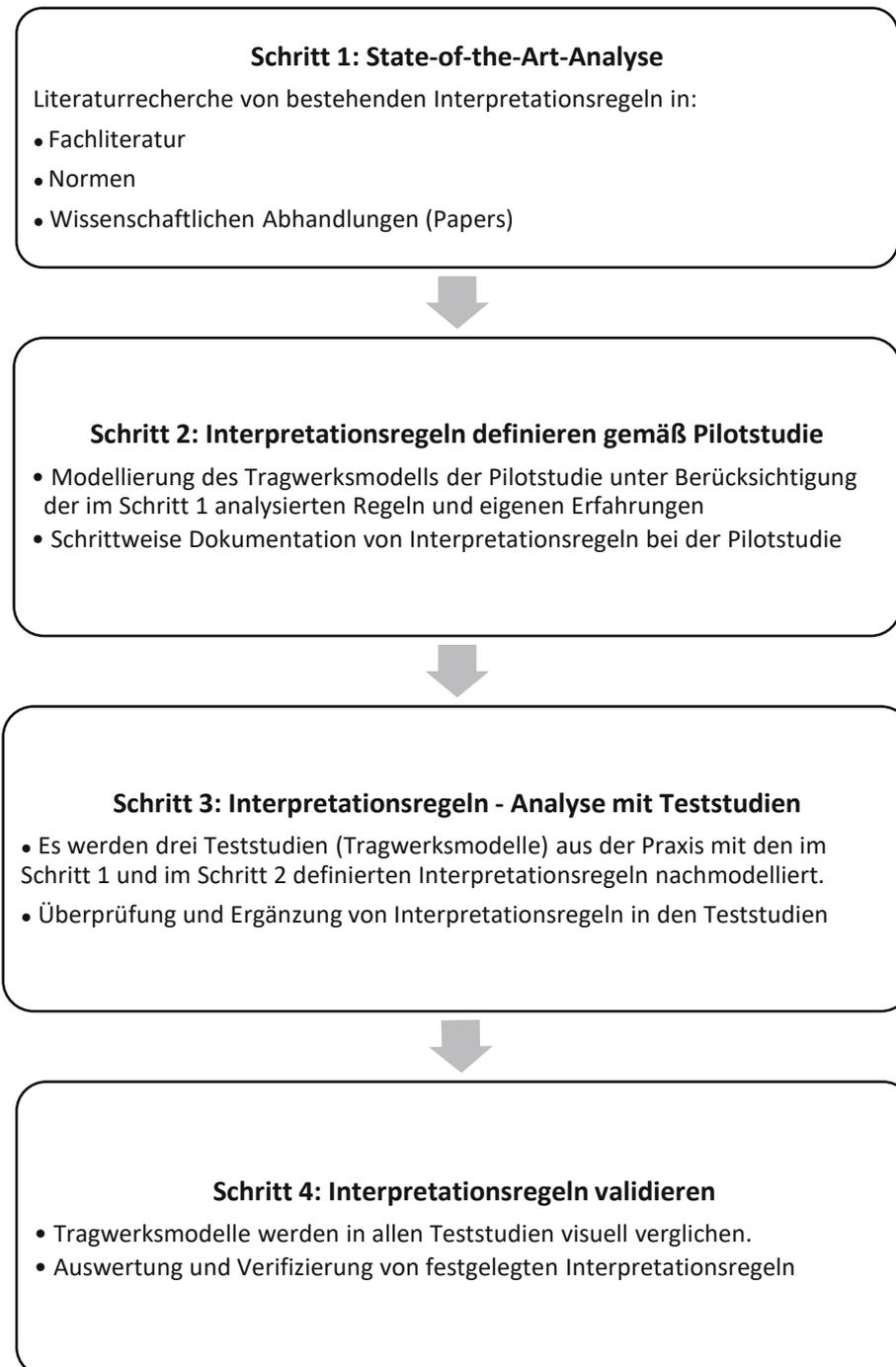


Abbildung 2-1 – Aufbau des Forschungsdesign zur Ermittlung von universalen Interpretationsregeln

### 3 State-of-the-Art-Analyse

Wie im vorherigen Kapitel angeführt, wird in diesem die Literaturrecherche zur Analyse der bestehenden Interpretationsregeln verwendet. Dabei wird der aktuelle Stand der Technik bei der Tragwerksmodellerstellung auf der Grundlage eines bestimmten architektonischen Entwurfs in wissenschaftlichen Abhandlungen und facheinschlägiger Literatur untersucht. Zu Beginn dieser Analyse wird ermittelt, ob es Normen bzw. Standardisierungen für Tragwerksmodellerstellung gibt. Anschließend wird erforscht, wie die aktuelle BIM-Arbeitsweise (modellbasierte Planung) in den Prozess der Tragwerksmodellerstellung einbezogen wird. Die Informationen über die Architekturarbeitsweise und Tragwerksplanungsarbeitsweise werden als wichtige Quelle zur Beschreibung des Prozesses der Tragwerksmodellerstellung beschrieben.

#### 3.1 Betrachtungsweise des Architekturmodells

Derzeit modellieren schon viele Architektinnen und Architekten digitale physische Architekturmodelle (BIMs) in Architekturprogrammen. Bei dieser Vorgehensweise wird das Modell aus Einzelteilen zusammengebaut. Das heißt, der Architekt platziert im Architekturprogramm virtuelle 3D-Bauteile (vgl. Gasteiger 2015, S. 18). Diese Bauteile enthalten außer der Geometrie auch die geometrieunabhängigen Sachinformationen wie Baustoffe, Brandverhalten, Schallschutzparameter etc. (vgl. Kovacic et al. 2019, S. 19). Das Tragwerk des Modells ist aus den einzelnen tragenden Bauteilen wie Wand, Stütze, Träger, Geschossdecke, Fundament, Attika usw. modelliert, die im Architekturprogramm vorhanden sind (s. Abbildung 3-1). Nichttragende Bauteile des Bauwerkes (Fenster, Tür, Luftanlage, Luftkanäle etc.) sind aus den nichttragenden Bauteilen (s. Abbildung 3-2) modelliert. Die Materialeigenschaften der einzelnen virtuellen 3D-Bauteile sind aus dem im Architekturprogramm zur Verfügung stehenden Materialkatalog genommen oder sind selbsterstellt.

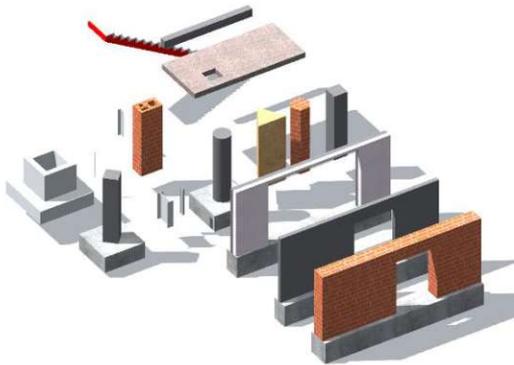


Abbildung 3-1 – virtuelle tragende 3D-Bauteile (eigene Darstellung)

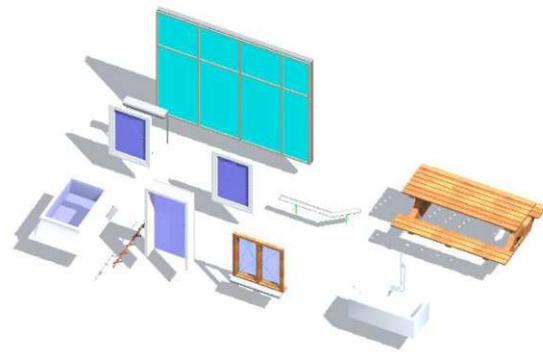


Abbildung 3-2 – virtuelle nichttragende 3D-Bauteile (eigene Darstellung)

Im Architekturprogramm verfügt jedes virtuelle 3D-Bauteil die oben erwähnten Sachinformationen und deren Funktionsfähigkeit, die ihn definieren. Zur Veranschaulichung erwähne ich einen virtuellen 3D-Träger. Dieser besitzt Informationen über die Materialeigenschaften und Geometrieeigenschaften, sowie Informationen über die Lage (es ist ein horizontales tragendes Bauteil in der Höhe von Z und spannt zwischen der Stütze X und Wand Y (vgl. Schinler und Nelson 2008).

### 3.2 Betrachtungsweise des Tragwerkmodells

Tragwerksplaner arbeiten anhand der Regeln der Bauingenieurwissenschaften. Dies sind vor allem die Grundsätze der Mathematik, Physik, Technischen Mechanik, Baudynamik etc. Fachkundige Definitionen wie Kraft, Vektor, starrer Körper, deformierbarer Körper, Verzerrung, Gleichgewicht, mechanische Eigenschaften, Spannung usw. spielen bei der Modellierung und Bemessung der Tragwerke die Hauptrolle.

Die Tragwerksplaner müssen reale Bauwerke auf die Berechnungsmodelle abstrahieren. In diesem Prozess erstellen sie Statik-Modelle (z. B. Abbildung 3-3). Diese werden auch analytische Modelle, Tragwerksmodelle oder statische Modelle genannt (vgl. Rustler 2017). Mit den Adjektiven analytisch oder statisch wird gezeigt, dass diese Modelle mit numerischen Methoden berechenbar sind. Diese Modelle sind idealisierte gedankliche mechanische Ersatzmodelle für reale Bauwerke. Die Behauptung, dass ein Statik-Modell ein idealisiertes gedankliches mechanisches Modell ist, ist auch in der ÖNORM EN 1992-1-1 in dem Kapitel 5 verankert, worin folgendes festgehalten ist: „Bei der Schnittgrößenermittlung werden sowohl eine idealisierte Tragwerksgeometrie als auch ein idealisiertes Tragverhalten angenommen. Die Idealisierungen sind entsprechend der zu lösenden Aufgabe zu wählen“ (ÖNORM EN 1992-1-1 2015, S. 57). Bei gegebener Architekturplanung (Entwurfsplanung – LPH 3) leiten Tragwerksplaner das Statik-Modell des Tragwerks aus diesem Entwurf ab. Damit interpretieren sie dieses Modell als Zusammensetzung der tragenden Bauteile, welche im Bereich der Fundamente lagern. Die Geometrie für das Modell wird aus der Architekturplanung durch Vereinfachung der Bauteilgeometrie erhalten (vgl. Albert 2016, S.2.52, Kapitel 3.5.2). Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist derzeit eine der Hauptmethoden zur Bemessung in der Tragwerksplanung. Um die räumlichen Bauwerke zu bemessen, arbeiten Tragwerksplaner überwiegend mit 3D-FEM-Programmen, auch sogenannter FEM-Software. In diesen Programmen werden räumliche Statik-Modelle nachgebildet. Für eine detailliertere Beschreibung des Statik-Modells stelle ich die Sichtweise aus der Perspektive der Finite-Elemente-Methode dar. Aus Sicht der FEM sind, die im FEM-Programm erstellten Statik-Modelle, gleichzeitig FEM-Modelle.

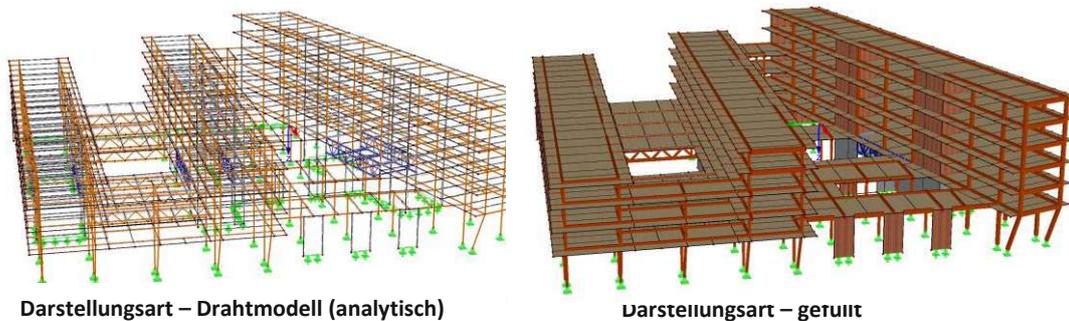
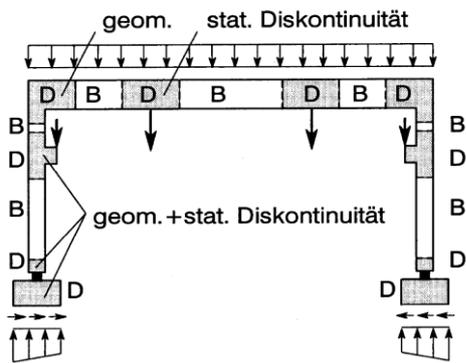


Abbildung 3-3 – 3D-FEM-Statik-Modell (eigene Darstellung)

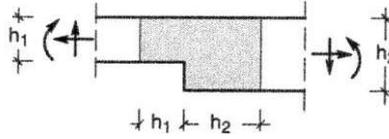
Im Folgenden wird die Modellbildung des Statik-3D-FEM-Modell beschrieben. Bei der Modellierung sind Vereinfachungen der Tragwerksgeometrie notwendig, damit die Statik-Modelle überhaupt funktionieren. Geometrische Versätze sowie Exzentrizitäten oder Diskontinuitätsbereiche des Tragwerks müssen bei der Modellbildung simplifiziert werden. Facheinschlägig benannte Diskontinuitätsbereiche sind Bereiche im Tragwerk, wo der Kraftfluss gesondert untersucht, werden muss. Diese Bereiche sind gekennzeichnet durch eine ausgeprägte nichtlineare Dehnungsverteilung, hervorgerufen durch eine geometrische oder statische Diskontinuität (s. Abb. 3-4). Geometrische Diskontinuitäten liegen bei Querschnittsprüngen, Knicken, Rahmenecken, Konsolen oder Aussparungen vor. Statische Diskontinuitäten ergeben sich bei der Einleitung von Einzellasten und Auflagerkräften (König und Tue 1998, S. 317). Diese Bereiche

### 3 State-of-the-Art-Analyse

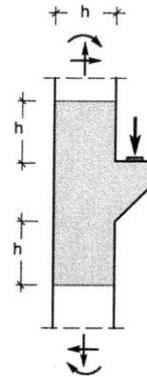
und komplexe Details sind dann separat speziell mit spezifischen Werkzeugen nachgewiesen (vgl. Kepplin et al. 2017, S. 222).



Diskontinuitätsbereiche am Stahlbetonrahmen



Querschnittsprung:  
geometrische Diskontinuität



Konsole: statische und geometrische  
Diskontinuität

Abbildung 3-4 – Diskontinuitätsbereiche im Stahlbetonbau (Schlaich et al. 2010, s. 17-19)

Bei der Modellierung verwenden Tragwerksplaner Knotenpunkte und Linien. Der Prozess der Modellierung besteht aus Platzierung und Verbindung der Knotenpunkte mit den Linien. Mit diesen werden einzelne tragende Elemente (Tragwerkselemente) des Tragwerks gebildet. Anhand der geometrischen Eigenschaften können 1D-, 2D- und 3D-Elementtypen modelliert werden (s. Tab. 3-1).

	<p><b>1D-Elemente</b> heißen Stäbe. Diese sind Eigenschaften von Linien (Dlubal Software o. J.). Zwischen zwei Punkten (Knoten) wird eine Linie erzeugt und dieser Linie wird das Element „Stab“ zugewiesen. Durch die Zuweisung eines Querschnitts erhält der Stab eine Steifigkeit. Die Linie liegt im Schwerpunkt von einem Querschnitt.</p>
	<p><b>2D-Elemente</b> heißen Flächen, welche durch geschlossene Linien geometrisch definiert sind. Eigenschaften wie Dicke und Material werden den Flächen zugewiesen. Außenlinien, die die Fläche definieren, liegen immer in der Mittelebene der Flächendicke.</p>
	<p><b>3D-Elemente</b> sind Volumenkörper, welche durch Volumenbegrenzungsflächen definiert sind (s. Dlubal Software o. J., Kapitel 4.5).</p>

Tabelle 3-1 – Elementtypen der Statik-FEM-Modellbildung (eigene Darstellung)

In der Praxis werden am meisten 1D- und 2D-Elemente bei der Modellbildung verwendet. Die 3D-FEM-Statik-Modelle sind im globalen kartesischen 3D-Koordinatensystem referenziert.

### 3.3 Bauteile und Tragwerkselemente

Für die Zwecke dieser Arbeit werden die Begriffe Tragwerk, Bauteil und Tragwerkselement in diesem Kapitel näher spezifiziert. Weiter wird die Gliederung der Tragwerkselemente, welche Tragwerksplaner für die Statik-Modellbildung verwenden, definiert. In dieser Arbeit werden die Begriffe Tragwerk und Bauteil gemäß ÖNORM EN 1990: 2013 definiert. Diese Norm im Abschnitt 1.5.1.6 definiert Tragwerk als planmäßige Anordnung miteinander verbundener Bauteile, die so entworfen sind, dass sie ein bestimmtes Maß an Tragfähigkeit und Steifigkeit aufweisen. Im Abschnitt 1.5.1.7 dieser Norm ist das Bauteil als physisch unterscheidbarer Teil des Tragwerks definiert, z. B. eine Stütze, ein Träger, eine Deckenplatte, ein Gründungspfahl (s. ÖNORM EN 1990 2013, S. 11).

Abbildung 3-5 veranschaulicht, wie das Tragwerk als Zusammensetzung von einzelnen tragenden Bauteilen abgebildet ist. Auf dem Bild sind auch die fachspezifischen Begriffe (Innenstütze, Platte, Unterzug etc.) der Bauteile angeführt. Diese Benennung der Bauteile gilt allgemein für das Spektrum der Beton-, Holz- oder Stahltragwerke.

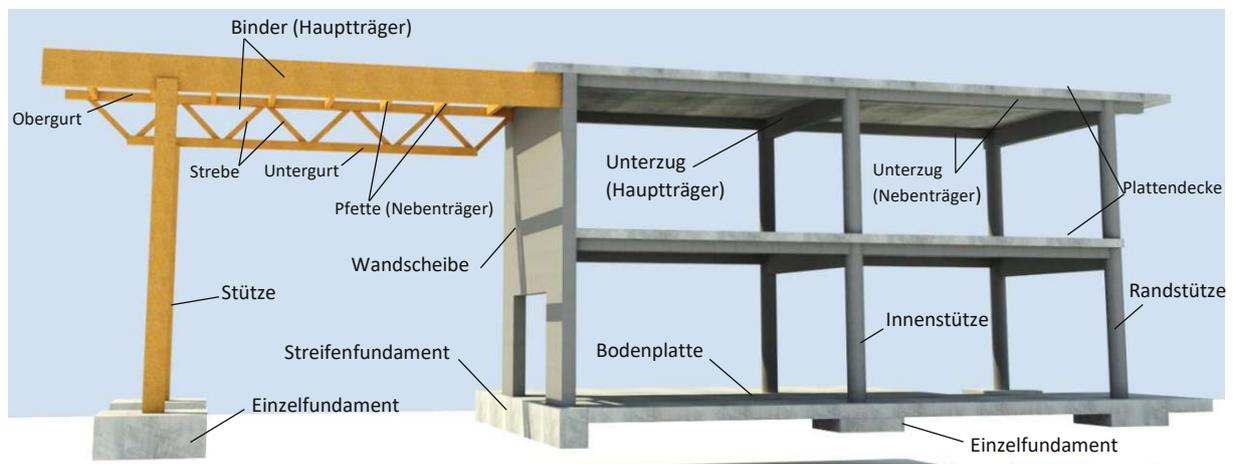


Abbildung 3-5 – architektonische Darstellung des Tragwerks mit physischen Bauteilen (eigene Darstellung)

Jetzt wird das tragende Bauteil aus Sicht des Tragwerksplaners für Statik-Modellbildung näher spezifiziert und damit der Begriff Tragwerkselement abgegrenzt. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, müssen Tragwerksplaner Statik-Modelle für die statische Berechnung anfertigen. Tragende Bauteile müssen daher in dem Statik-Modell analytisch abgebildet werden. In dieser Masterarbeit werden sie als Tragwerkselemente definiert. Das heißt, die Tragwerkselemente sind als statische (analytische) Modelle der einzelnen tragenden Bauteile definiert.

Tragwerksplaner klassifizieren die Tragwerkselemente laut den Regeln der technischen Mechanik. Die Klassifizierung basiert hauptsächlich auf zwei Kriterien. Das erste Kriterium sind rein geometrische Eigenschaften (Abmessungen und Krümmung). Die Abmessungen und ihre Verhältnisse des Tragwerkselementes definieren, ob es sich um 1D-Linienelement, 2D-Flächenelement oder 3D-Volumenelement handelt. Die Krümmung des Tragwerkselementes (z. B. Platte und Scheibe sind flach, Schale ist gebogen) stellt die vertiefende geometrische Beschreibung dar. Das zweite Kriterium ist die Art und Richtung der Belastung, welche das Tragwerkselement übertragen kann (z. B. Zug, Druck, Biegung, Scherung). Die Kombination dieser zwei Kriterien (geometrisches Kriterium und Kriterium der Belastungsarten) ergibt die Klassifizierung der verschiedenen Tragwerkselemente.

Die Tragwerkselemente werden laut dem geometrischen Kriterium gemäß der Fachliteratur in dieser Arbeit in drei Gruppen eingeordnet: 1D-Linienelemente, 2D-Flächenelemente und 3D-

### 3 State-of-the-Art-Analyse

Volumenelemente. In der folgenden Abbildung 3-6 ist die Klassifizierung für Zwecke dieser Arbeit bildhaft dargestellt. Danach sind einzelne Tragwerkselemente in den Gruppen im Detail beschrieben.

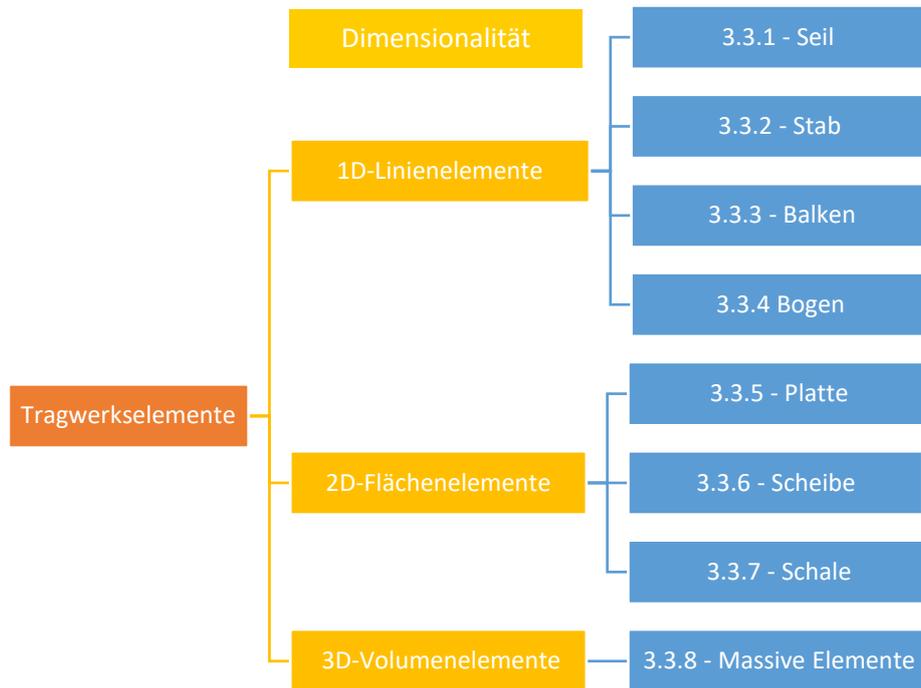


Abbildung 3-6 – Klassifizierung der ausgewählten Tragwerkselementen für Statik-Modell

#### 1D-Linienelemente

Bei zahlreichen Bauteilen sind jedoch die Abmessungen der Querschnitte klein im Vergleich zur Länge. Sie können dann häufig als *linienhafte* Körper betrachtet werden. Die Regel der Modellbildung solcher Elemente ist, dass ihre Gestalt durch die Angabe der Verbindungslinie der Schwerpunkte aller Querschnitte (*Achse*) und dem Querschnitt beschrieben wird (vgl. Gross et al. 2014, S. 161). Zur Veranschaulichung ist in der Abbildung 3-7 ein Linientragwerk und das dazugehörige Statik-Modell dargestellt.

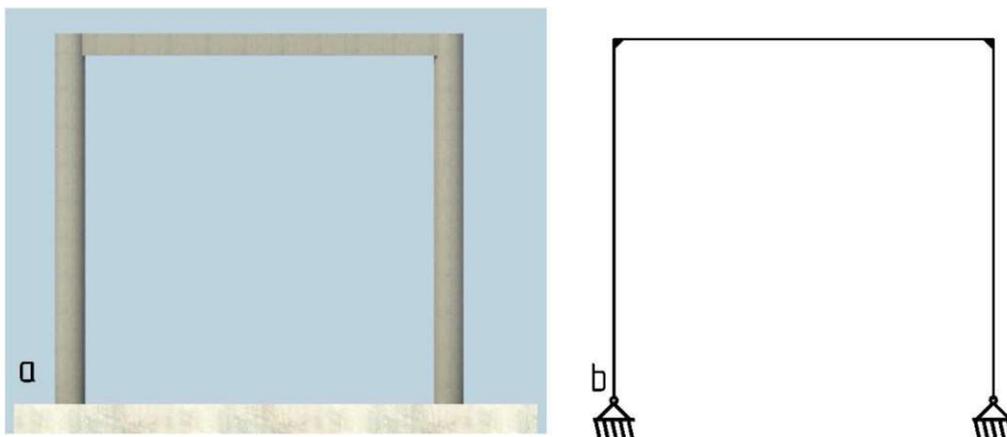


Abbildung 3-7 – Linientragwerk: Zweigelenrahmen (eigene Darstellung)  
(a) Tragwerk (physisches Modell) (b) Statik-Modell (analytisches Stabmodell)

### 3 State-of-the-Art-Analyse

#### 3.3.1 Seil

Es wird beschrieben als „Körper, dessen Querschnittsabmessungen sehr klein gegenüber der Längsabmessung sind und der nur Zugkräfte in Richtung seiner Längsachse aufnehmen kann“ (Gross et al. 2011, S. 30). In der Abbildung 3-8 ist das Modell des Seiles abgebildet.

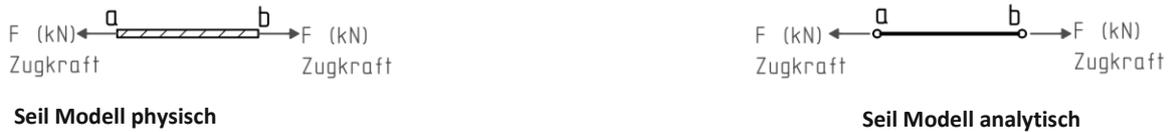


Abbildung 3-8 – Seil und das dazugehörige statische (analytische) Modell (vgl. Gross et al. 2011, S. 31)

#### 3.3.2 Stab

Das Tragswerkelement „Stab“ (s. Abb. 3-9 und 3-10) ist ein Element, wo die „Querschnittsabmessungen sehr klein im Vergleich zur Längsabmessung sind“. Der Stab ist meist in Richtung seiner Längsachse belastet. Der typische Bauteil, welcher als Tragwerkelement Stab modelliert ist, ist die Stütze. Sie ist meist ein durch Druck beanspruchtes Bauteil. Für die Berechnung gilt allgemein dieses geometrische Kriterium:  $l \geq 2b$  bzw.  $l \geq 2h$  (vgl. Zilch und Zehetmaier 2006, S. 12).

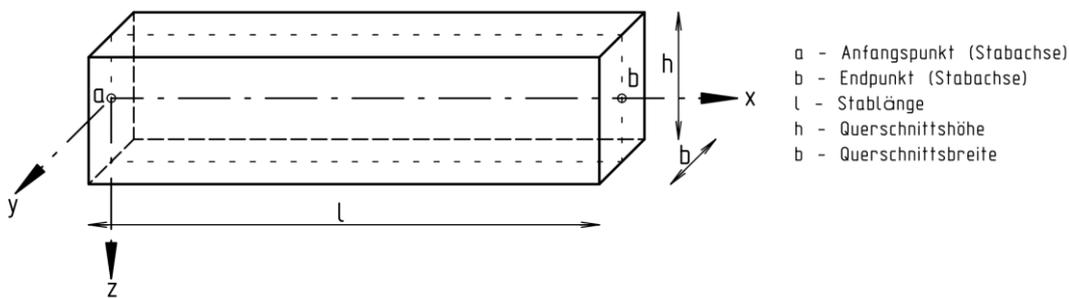


Abbildung 3-9 – Stab mit konstantem Querschnitt (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 160)

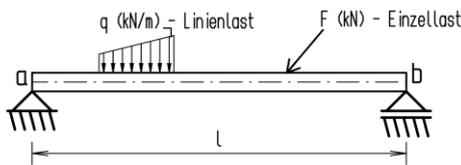
Zudem ist in der ÖNORM EN 1992-1-1 im Absatz 7 des Kapitels 5.3.1 als Kriterium der Stütze normiert, dass die Querschnittsbreite nicht mehr als das 4-fache seiner Querschnittshöhe und dessen Gesamtlänge mindestens das 3-fache seiner Querschnittshöhe beträgt ( $b \leq 4h$  und  $l \geq 3h$ ). Im Falle anderer Querschnittsabmessungen ist sie in der Regel als Wand anzusehen (ÖNORM EN 1992-1-1 2015, S. 62).



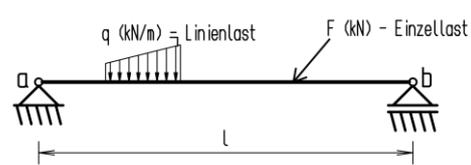
Abbildung 3-10 – Stab: statisches (analytisches) Modell mit weißer Linie dargestellt (eigene Aufnahme)

### 3.3.3 Balken

Dieser wird in der technischen Mechanik als ein stabförmiges Element definiert, dessen Querschnittsabmessungen sehr viel kleiner sind als seine Länge und im Unterschied zum Stab jedoch hauptsächlich senkrecht zu seiner Längsachse belastet ist (vgl. Gross et al. 2012, S. 88). Der Balken (s. Abb. 3-11 a 3-12) ist daher meist ein auf Biegung beanspruchtes stabförmiges Tragwerkelement. Ein klassisches Beispiel für den Balken ist ein Träger. In der ÖNORM EN 1992-1-1 in Kapitel 5.3.1 ist unter dem Absatz 3 das Tragwerksmodelle für statische Berechnungen normiert. So wird der Balken als ein Bauteil, dessen Stützweite nicht kleiner als die 3-fache Gesamtquerschnittshöhe ist, beschrieben. Andernfalls ist es in der Regel als wandartiger Träger anzusehen (ÖNORM EN 1992-1-1 2015, S. 61). Dieses geometrische Kriterium bedeutet:  $l \geq 3h$ . Der wandartige Träger ist dagegen als 2D-Flächenelement klassifiziert.



**Balkenmodell physisch mit Querschnitt**



**Balkenmodell analytisch**

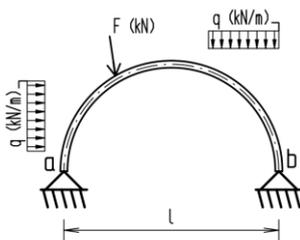
Abbildung 3-11 – Einfeld Balken und das dazugehörige statische (analytische) Modell (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 175), (vgl. Gross et al. 2011, S. 175)



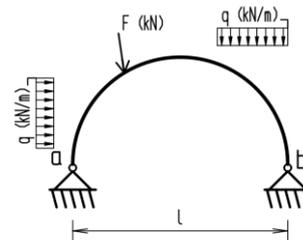
Abbildung 3-12 – Balken: Interpretation des statischen (analytischen) Modells ist mit weißer Linie dargestellt (Pech et al. 2018, S. 16)

### 3.3.4 Bogen

Definiert wird der Bogen als Balken (s. Abb. 3-13, 3-14) mit dem geometrischen Kriterium der gekrümmten Achse. Die Last kann in beliebiger Richtung auf den Bogen wirken (vgl. Gross et al. 2014, S. 161).



**Bogenmodell physisch mit Querschnitt**



**Bogenmodell analytisch**

Abbildung 3-13 – Bogen und das dazugehörige statische (analytische) Modell (vgl. Kadlčák und Kytýr 2009, S. 173–175) (vgl. Gross et al. 2011, S. 135)



Abbildung 3-14 – Bogen: Interpretation des statischen (analytischen) Modells ist mit schwarzer Linie dargestellt (Pech et al. 2018, S. 17)

### 2D-Flächenelemente

Flächenhafte Körper heißen Flächentragwerke bzw. Flächenelemente (s. Abb. 3-15). Das geometrische Kriterium lautet, dass die Flächenelemente eine Abmessung ( $t$  - Dicke) haben, die sehr klein gegenüber den restlichen Abmessungen ist. Im Statik-Modell sind die Flächenelemente durch die Angabe der Mittelfläche und der Dicke  $t$  beschrieben. Flächenelemente werden nach geometrische Form der Mittelfläche und der Art der Belastung unterschieden (vgl. Gross et al. 2014, S. 161).

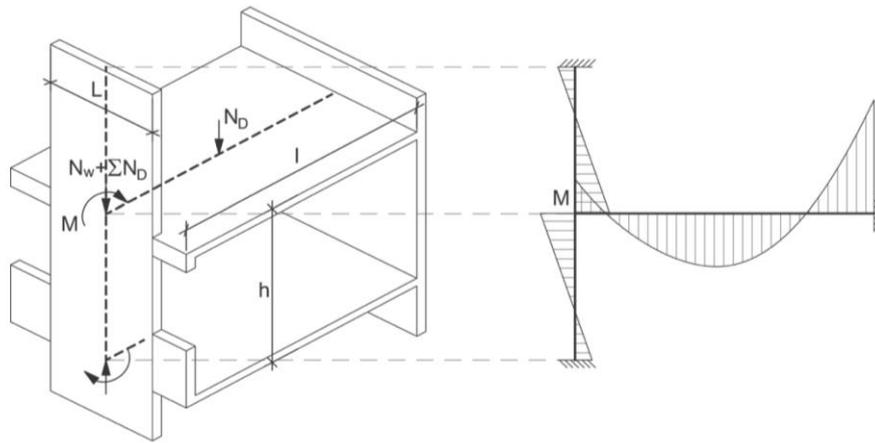


Abbildung 3-15 – Flächentragwerk: links physisches Modell, rechts statisches (analytisches) Modell im Schnitt (Pech und Kolbitsch 2005, S. 3)

### 3.3.5 Platte

Die Platte (s. Abb. 3-16, 3-17) wird definiert durch ebene Mittelflächen und die Last, die senkrecht zur Mittelfläche wirkt (vgl. Gross et al. 2014, S. 161). In der ÖNORM EN 1992-1-1 in Kapitel 5.3.1 ist im Absatz 4 festgehalten, dass die Platte ein Bauteil ist, dessen kleinste Abmessung nicht kleiner als seine 5-fache Gesamthöhe hat (ÖNORM EN 1992-1-1 2015, S. 61). Das geometrische Kriterium ist daher  $l_1$  und  $l_2 \geq 5t$ .

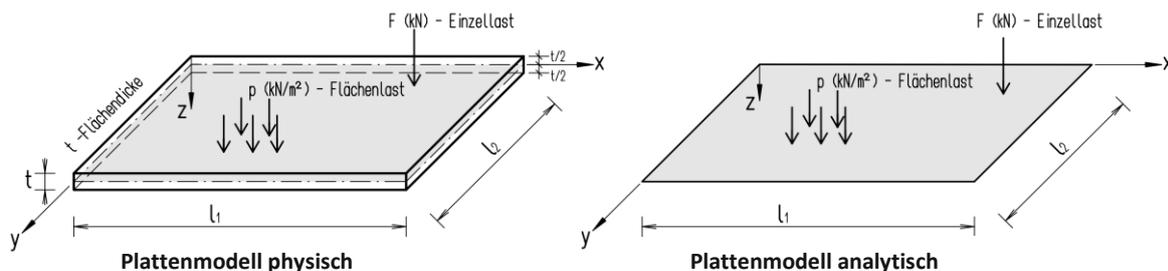


Abbildung 3-16 – Platte und das dazugehörige statische (analytische) Modell (vgl. Gross et al. 2014, S. 197), (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 0162)

### 3 State-of-the-Art-Analyse

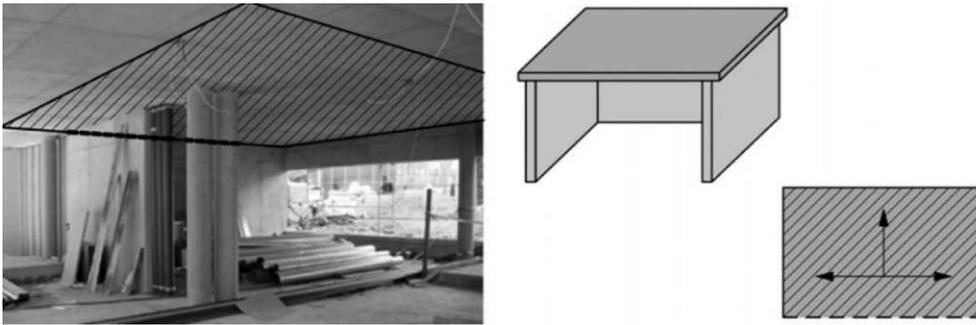
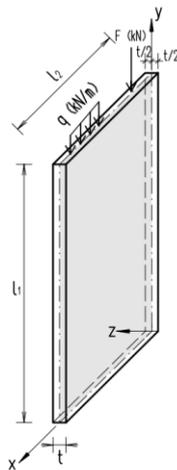


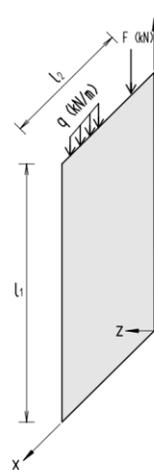
Abbildung 3-17 – Platte: Interpretation des statischen (analytischen) Modells der Platte mit schwarzer Schraffur dargestellt (Pech et al. 2018, S. 18)

#### 3.3.6 Scheibe

Die Scheibe (s. Abb. 3-18, 3-19) ist geometrisch gleich als Platte durch ebene Mittelfläche gekennzeichnet. Aber die Belastungsrichtung ist anders. Die Last wirkt nicht senkrecht zu der Mittelfläche, sondern in der Mittelfläche (vgl. Gross et al. 2014, S. 161). Ein spezieller Fall der Scheibe, welche überwiegend auf Biegung beansprucht ist, heißt wandartiger Träger.



Scheibenmodell physisch



Scheibenmodell analytisch

Abbildung 3-18 – Scheibe und das dazugehörige statische (analytische) Modell im rechten Teil der Abbildung

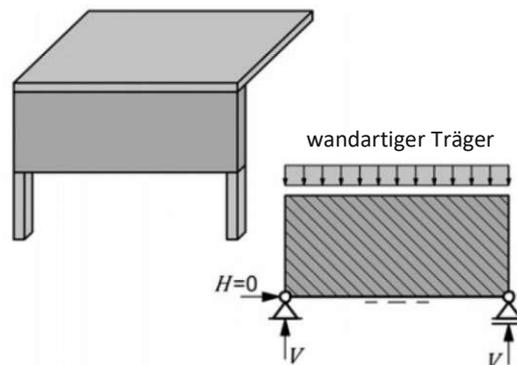


Abbildung 3-19 – Scheibe: statisches (analytisches) Modell, Interpretation mit schwarzer Schraffur dargestellt (Pech et al. 2018, S. 18)

### 3.3.7 Schale

Die Schale (s. Abb. 3-20, 3-21) ist gekennzeichnet durch eine gekrümmte Mittelfläche und die Last, die beliebig auf die Mittelfläche wirkt (vgl. Gross et al. 2014, S. 161).

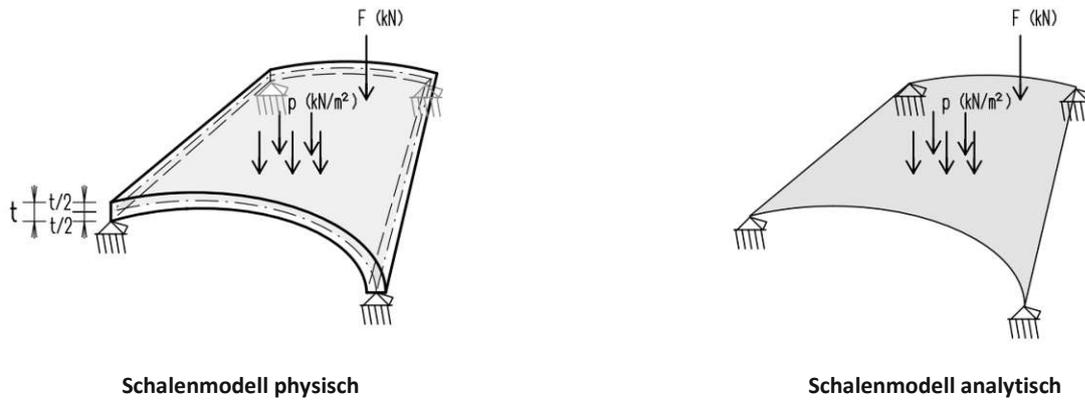


Abbildung 3-20 – Schale und das dazugehörige statische (analytische) Modell

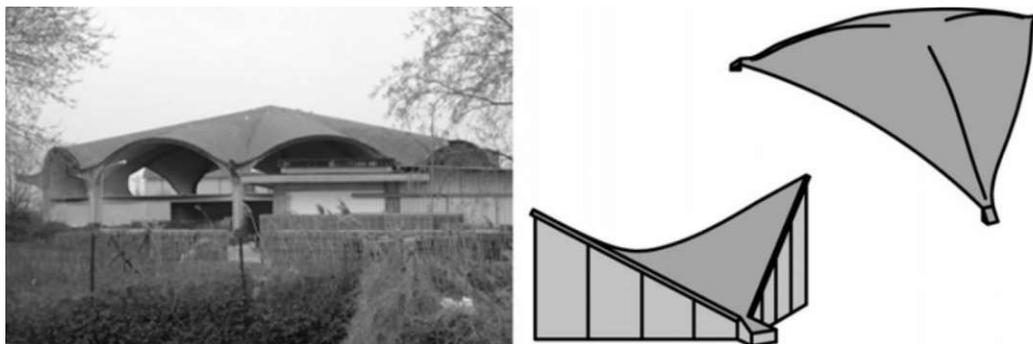


Abbildung 3-21 – Schale (Pech et al. 2018, S. 19)

**3D - Volumenelemente**

**3.3.8 Massive Tragwerkselemente**

Diese sind dadurch gekennzeichnet, dass keine von den Abmessungen wesentlich die anderen Abmessungen überragt. Daher lautet dieses Kriterium:  $l \cong b \cong h$ . Es geht um räumliche 3D Elemente. Als Beispiel kann ein abgeschrägtes Einzelfundament (s. Abb. 3-22) angeführt werden (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 163).

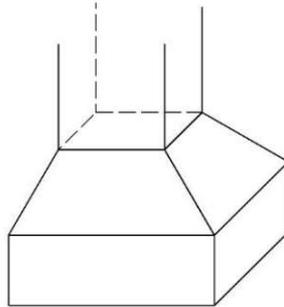


Abbildung 3-22 – Volumenelement: abgeschrägtes Einzelfundament

**Zusammenfassung der Tragwerkselemente**

In der Tabelle 3-2 werden die geometrische Eigenschaften der Tragwerkselemente zur Übersicht tabellarisch zusammengefasst.

TRAGWERKSELEMENT	GEOMETRISCHE VERHÄLTNISSSE	DIMENSIONALITÄT
SEIL	$l \gg 2h; l \gg 2b$	1D – LINIENELEMENT
STAB	$l \geq 2b; l \geq 3h; b \leq 4h$	1D – LINIENELEMENT
BALKEN	$l \geq 3h; h \geq b$	1D – LINIENELEMENT
BOGEN	$l \geq 3h; h \geq b$	1D – LINIENELEMENT
PLATTE	$l_1, l_2 \geq 5t$	2D – FLÄCHENELEMENT
SCHEIBE	$l_1, l_2 \geq 5t$	2D – FLÄCHENELEMENT
SCHALE	$l_1, l_2 \geq 5t$	2D – FLÄCHENELEMENT
MASSIVE ELEMENTE	$l \cong b \cong h$	3D – VOLUMENELEMENT

$\cong$  ungefähr gleich  
 $\gg$  viel größer als  
 $\geq$  größer oder gleich  
 $l$  die Länge  
 $t$  die Stärke  
 $b$  die Breite  
 $h$  die Höhe

Tabelle 3-2 – geometrische Eigenschaften der Tragwerkselemente anhand von Verhältnis Länge, Breite und Höhe

Die einzelnen Tragwerkselemente wurden in den vorherigen Kapiteln 3.3.1 bis 3.3.8 definiert.

### 3.4 Lager des Tragwerks

Jedes Tragwerk muss gelagert sein. Das Lager (auch genannt Auflager) dient zur Fixierung des Tragwerkes in seiner Lage und realisiert die Kraftübertragung im Untergrund (vgl. Selke 2018, S. 21). Es gibt verschiedene Lagertypen und Gliederungsmöglichkeiten. Die technische Mechanik gliedert die Lagertypen nach der Anzahl der Lagerreaktionen. Diese Lagerreaktionen sind Reaktionskräfte, welche durch die Beschränkung der Bewegungsfreiheit, entstehen (vgl. Gross et al. 2011, S. 12). Die Bewegungsfreiheit beschreibt näher die Freiheitsgrade. Im Raum haben Objekte sechs unabhängige Freiheitsgrade. Diese Freiheitsgrade bedeuten Verschiebungen in drei unabhängige Richtungen und Verdrehungen um die drei Achsen (vgl. Selke 2018, S. 153). Einfach gesagt, verursacht die Versperrung bzw. die Einschränkung von dem Freiheitsgrad im Lager die Entstehung der Auflagerreaktion.

FEM-Programme gliedern die Lagertypen anhand der Fixierung des Tragwerkes entweder im Knotenpunkt, entlang der Linie oder in der Fläche. In dieser Arbeit wird der Fokus auf die Statik-Modellbildung gelegt, somit wird die Gliederung der Lagertypen, welche FEM-Programme anbieten, bevorzugt. Im Folgenden werden Lagertypen beschrieben, welche für die Modellbildung der Hochbaumodelle wesentlich sind. Da in dieser Arbeit räumliche Tragwerksmodelle modelliert werden, werden die 3D-Lagertypen definiert.

#### Knotenlager

Diese Lager fixieren das Tragwerk in einem Knotenpunkt. Durch das Knotenlager werden die Bewegungsmöglichkeiten im Knoten gesperrt oder eingeschränkt (vgl. Dlubal Software o. J., Kapitel 4.7). Dieser Knoten muss Teil eines Linienelementes (Stab, Bogen, etc.) oder Flächenelementes (Platte, Scheibe, etc.) sein. Dieser Lagertyp ist typisch für die Lagerung der Linienelemente. Knotenlager werden weiter gegliedert nach der Anzahl der Reaktionskräfte bzw. der Entnahme der Freiheitsgrade.

#### 3.4.1 Einspannung

Die *Einspannung* lässt keine Bewegungen im Lager zu. Diese sperrt im Raum Verschiebungen in alle drei Richtungen und auch Verdrehungen um alle drei Achsen. Es entstehen daher sechs Auflagerreaktionen (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270). In der Abbildung 3-23 ist ein typischer Fall des eingespannten Kragbalkens dargestellt. Die Einspannung ist mit dem Symbol (s. Tab. 3-3) der technischen Mechanik abgebildet.

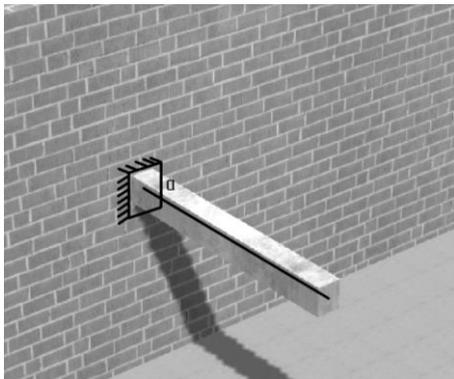


Abbildung 3-23 – Einspannung des Kragbalkens (eigene Darstellung)

grafische Darstellung	
2D	3D

Tabelle 3-3 – Darstellung der Einspannung (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270)

### 3.4.2 Festlager

Das *Festlager* sperrt die Verschiebungen im Raum in alle drei Richtungen, lässt aber die Verdrehungen um die drei Achsen zu. Das Festlager weist drei Auflagerreaktionen auf (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270). In der Fachliteratur benennt man Festlager auch als festes Gelenklager oder Fixlager. Die konstruktive Durchführung eines Festlagers an realem Tragwerk ist in Abbildung 3-24 und 3-25 dargestellt. In der Abbildung 3-25 wird eine Stahldachkonstruktion gezeigt, wobei das Festlager als Anschluss des Fachwerks an der Oberkante der Stahlstütze abgebildet wird (Punkt a). Grafische Darstellung des Lagers ist in der Tab. 3-4 abgebildet.



grafische Darstellung	
2D	3D

Tabelle 3-4 – Darstellung des Festlagers  
(vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270)

Abbildung 3-24 – Festlager (eigene Aufnahme)



Abbildung 3-25 – Festlager des Stahlfachwerks (eigene Aufnahme)

### 3.4.3 Loslager

Das *Loslager* verhindert nur die vertikalen Verschiebungen. Im Raum sperrt die Verschiebung in eine Richtung. Verdrehungen um alle drei Achsen sind möglich. Das Loslager wird nur durch eine Auflagerreaktion beschrieben (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270). In der Fachliteratur ist es auch als verschiebliches Auflager, verschiebliches Gelenklager bekannt (s. Abb. 3-26). Grafische Darstellung des Loslagers abbildet die Tabelle 3-5.



Abbildung 3-26 – Loslager der Holzbrücke (eigene Aufnahme)

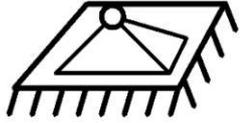
grafische Darstellung	
2D	3D
	

Tabelle 3-5 – grafische Darstellung des Loslagers (vgl. Kadlčák und Kytýr 2010, S. 270)

### 3.4.4 Linienlager

Ein *Linienlager* beschreibt die Lagerung eines Tragwerkselementes entlang seiner Länge. Im FEM-Programm kommen entlang der Linie interne Knoten vor. Bei Anordnung des Linienlagers „können die Verschiebungen und Verdrehungen an diesen internen Knoten verhindert oder durch Weg- und Drehfedern eingeschränkt werden.“ (Dlubal Software o. J., Kapitel 4.8). Dieses Lager wird bei der Lagerung von Flächenelementen angewendet. Zur Verdeutlichung wird ein Beispiel des Linienlagers angeführt. In der Abbildung 3-27 ist eine Wand ersichtlich, welche auf einem Streifenfundament lagert. Dieses bildet für die Wand ein Linienlager (vgl. Jäger et al. 2002, S. 112). In der Abbildung 3-28 wird ein Statik-Modell einer Wand mit einem Linienlager, welches grün gekennzeichnet ist, dargestellt.

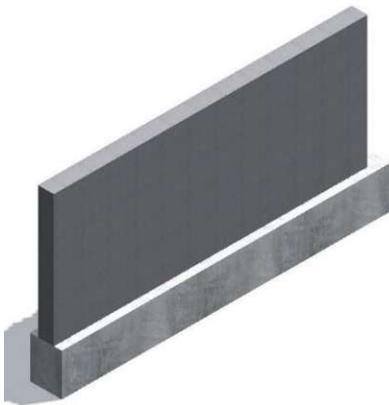


Abbildung 3-27 – Wand mit einem Streifenfundament (eigene Darstellung)

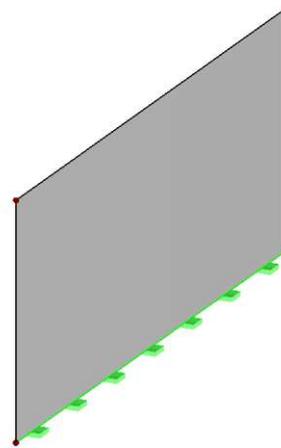


Abbildung 3-28 – Statik-Modell der Wand mit einem Linienlager (eigene Darstellung)

### 3.4.5 Flächenlager

Es simuliert die Auflagerung auf einem Untergrund unter einem entsprechenden flächigen Fundamentbauteil. Es gibt mehrere Verfahren und Ansätze zur Modellierung der Boden-Bauwerk-Interaktion sowie Bodenmodelle. Diese werden anhand der Zusammenarbeit zwischen dem Tragwerksplaner und dem Experten im Bereich der Geotechnik festgestellt. Hier wird angezeigt, dass das Flächenlager in dem Statik-Modell als Bettung der Fläche angegeben werden kann. Diese Bettung beschreibt die Auflagerbedingungen dar (vgl. Dlubal Software o. J., Kapitel 4.9). In der Abbildung 3-30 ist eine flächige Bodenplatte auf dem Baugrund ersichtlich. In der Abbildung 3-29 wird die Bodenplatte, die sich auf dem Flächenlager befindet, als Statik-Modell dargestellt. Das Flächenlager ist hier mit den zackigen Linien abgebildet.

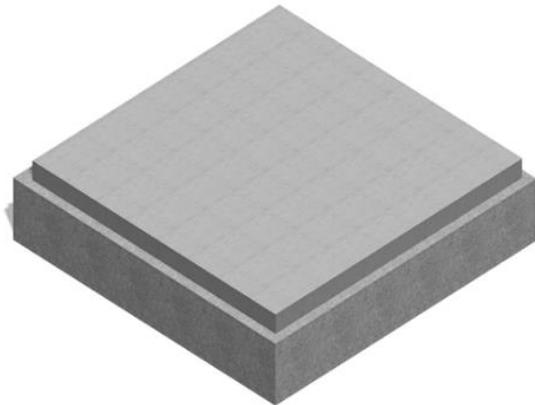


Abbildung 3-30 – die Bodenplatte ist auf dem Untergrund (eigene Darstellung) gelagert

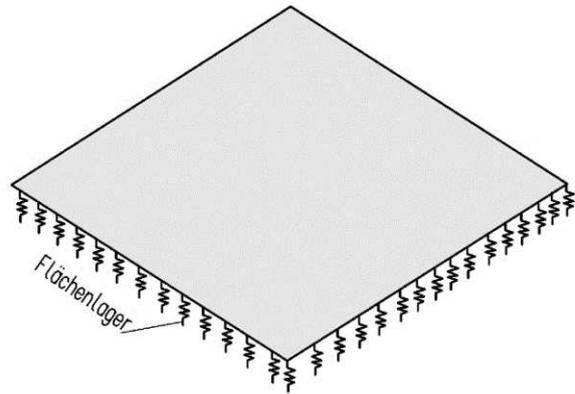


Abbildung 3-29 – Statik- Modell der Bodenplatte mit dem Flächenlager

### 3.5 Planungsprozess – Architektur und Tragwerksplanung

Die einzelnen Aufgaben und Leistungsumfänge sowohl der Architektinnen und Architekten als auch der Bauingenieure sind in der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) übersichtlich aufgelistet (HOAI 2013-Textausgabe/HOAI 2013-Text Edition 2013). In der HOAI sind die Leistungen in einzelne Leistungsphasen (LPH) gegliedert. Generell ist zu sagen, dass am Anfang der Planung es wichtig ist, den Workflow zwischen den Architekten und den Tragwerksplaner festzulegen (s. Kovacic et al. 2014, S. 33).

Als erster Schritt analysiert und klärt der Architekt mit dem Bauherrn die Aufgabenstellung. Anhand der abgestimmten Aufgaben- und Zielvorstellungen macht der Architekt erste Modelle, Machbarkeitsstudien und erarbeitet den Vorentwurf (laut HOAI Leistungsphase 2 – LPH 2). Bei der Bearbeitung des Vorentwurfes integriert oftmals der Architekt die Tragwerksplaner in den Planungsprozess. Die Tragwerksplanung liefert Daten über die Machbarkeit und Wirtschaftlichkeit in statisch konstruktiver Hinsicht. Dabei unterstützt der Tragwerksplaner den Architekten bei der Findung von zweckhaften Objektrastern, entsprechenden Materialien und allen Belangen der Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit (s. Lechner 2014b, S. 4). Nach Anfertigung des Vorentwurfes durch den Architekten überprüft im Idealfall der Tragwerksplaner diesen.

Wenn der Vorentwurf (LPH 2) abgeschlossen ist, startet die Bearbeitung des Entwurfes (LPH 3). In der Entwurfsphase entwickelt der Architekt die Planung unter Berücksichtigung der wesentlichen Zusammenhänge, Vorgaben und Bedingungen (z. B. städtebauliche, gestalterische, technische, wirtschaftliche, funktionale, etc.) weiter. Der Architekt inkorporiert die Beiträge von anderen Fachexperten in den Entwurf und koordiniert andere Planungsleistungen. Anschließend werden Entwurfspläne gezeichnet (Grundrisse, Schnitte, Ansichten Details) oder als digitales BIM-Modell dargestellt. Der Architekt stellt die Arbeitsergebnisse anderen an der Planung fachlich Beteiligten bereit (Lechner 2017) .

Die Tragwerksplaner erarbeiten in der Entwurfsphase Tragwerkslösung bis zu der zeichnerischen Darstellung. Dabei beachten sie die Angaben der Architekten und anderen integrierten Fachplanern (Lechner 2014b). Zu Beginn der Entwurfsphase entsteht eine enge Zusammenarbeit zwischen Architekten und Tragwerksplanern. Dabei entwickelt die Tragwerksplanung in Zusammenarbeit mit dem Architekten das Statik-Konzept. In diesem definiert der Tragwerksplaner ein statisches System, wie die Kräfte in dem Tragwerk abgeleitet werden und über welche Tragwerkelemente in der Konstruktion die Kräfte bis in die Fundierung übertragen werden. Das Statik-Konzept gehört zwischen dem Architekten und dem Tragwerksplaner abgestimmt (vgl. Spaett Architekten GmbH 2017(1:14-2:25)). Heutzutage erfolgt in der Praxis die Zusammenarbeit zwischen Architekten und Tragwerksplanern mithilfe von Bauzeichnungen, E-Mail-Korrespondenz, Telekommunikation und eventuell auch über den Austausch des digitalen BIM-Architekturmodells. Wenn die Architekten das Modell am Anfang der Entwurfsphase an die Tragwerksplaner übergeben, sind schon die tragenden Bauteile (Stützen, Wände, Decken, Träger, ...) bereits modelliert. In manchen Architekturprogrammen und BIM-Programmen ist die Definition (tragend/nicht-tragend) von den Bauteilen möglich. Der Tragwerksplaner definiert die tragenden Bauteile und stimmt mit dem Architekten das Statik-Konzept ab. Nach beiderseitiger Übereinstimmung erfolgt die Freigabe des Statik-Konzeptes. Dabei werden die tragenden Bauteile im Architekturprogramm gekennzeichnet und als ‚tragend‘ oder ‚nicht tragend‘ markiert. Die Tragwerksplaner erarbeiten im Konstruktionsentwurf die statische Berechnung und die Dimensionierung der maßgebenden tragenden Bauteile. Weiters werden die konstruktiven Details sowie die Hauptabmessungen des Tragwerks bestimmt. Die Tragwerksplaner wirken an der Kostenberechnung, der Objektbeschreibung, bei der Terminplanung und bei Verhandlungen mit

### 3 State-of-the-Art-Analyse

anderen an der Planung fachlich Beteiligten über die Genehmigungsfähigkeit mit (Lechner 2014b). Allgemein lässt sich sagen, dass ab dem Zeitpunkt, wo der Tragwerksplaner die Bauzeichnungen oder fallweise noch ein BIM-Modell vom Architekten bekommt und das Statik-Konzept zwischen diesen beiden freigegeben wurde, fangen die Tragwerksplaner mit den statischen Berechnungen an. Ab diesem Zeitpunkt startet Modellierung des Statik-Modells.

Für die Planung der Fundamente sind Bauingenieure zuständig. Es entsteht eine Kooperation zwischen dem Geotechniker und dem Tragwerksplaner. Geotechniker sind spezialisierte Bauingenieure in Bereich der Geotechnik. Ihr Hauptaufgabengebiet bezieht sich auf die Ausarbeitung von erdstatischen Berechnungen und geotechnischen Gutachten (Lechner 2014a, S. 4). Das geotechnische Gutachten dient als Basis für die Definition der Fundamente. Anhand dieses Gutachtens entwerfen weiter die Tragwerksplaner die Fundamente, wobei es in dieser Phase immer wieder zu Absprachen mit dem Architekten kommt.

Die Ergebnisse der Entwurfsplanung dokumentiert der Architekt sowie der Tragwerksplaner zeichnerisch, textlich und rechnerisch. Der Architekt stellt zeichnerisch die Bauzeichnungen nach Art und Größe des Objekts im erforderlichen Umfang und Detailierungsgrad unter Berücksichtigung aller fachspezifischen Anforderungen bereit. In der Regel handelt es sich um Grundrisse, Schnitte, Ansichten und ausführungsfähige Details. Textlich dokumentiert der Architekt die Objektbeschreibung im technischen Bericht. Rechnerisch stellt der Architekt die mögliche Kostenberechnung nach ÖN B 1801-1 bereit und schreibt die Terminpläne fort (Lechner 2014c, S. 5). Als Output der Entwurfsplanung stellt der Tragwerksplaner die Bauzeichnungen (Positionspläne, Schalungspläne, Detailpläne mit ausführungsfähiger Tiefe) für das Tragwerk bereit. Für die Kostenberechnung ermittelt dieser die Massen für den Stahlbetonbau, den Stahlbau sowie den Ingenieurholzbau. Die Beschreibung des Tragwerkes durch den Tragwerksplaner ist im technischen Bericht erfasst. (Lechner 2014b, S. 4). Grafisch ist der Prozess in der Abbildung 3—31 zusammengefasst.

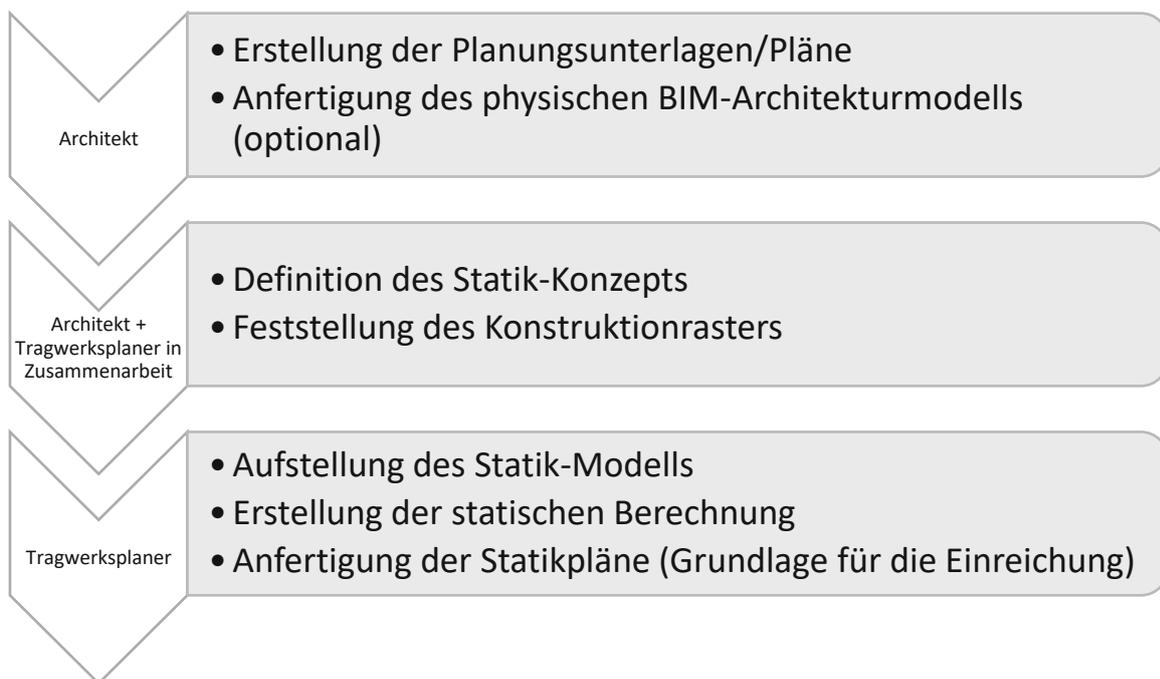


Abbildung 3-31 – Aufgabengebiete des Architekten und des Tragwerksplaners in dem Planungsprozess (Entwurf - LPH 3)

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

In diesem Abschnitt werden Interpretationsregeln mithilfe von einer Pilotstudie definiert. Es wird ein Statik-Modell der Pilotstudie modelliert. Parallel mit der Modellierung werden schrittweise die Interpretationsregeln analysiert und dokumentiert. Das Studentenprojekt einer Produktionshalle wird im Folgenden als Pilotstudie dienen. Anhand von Entwurfsplänen (Grundriss und Schnitt) der Halle wird selbst das Statik-Modell nachgebildet. Die im vorigen Kapitel 3 definierten Regeln und Verfahren aus der Fachliteratur sowie eigene Erfahrungen werden zur Modellbildung herangezogen. Wenn die Regeln aus dem Kapitel 3 nicht genügen, werden weitere Regeln ergänzt. Es wird die bestmögliche Art von Tragwerksmodellerstellung herangezogen. Die Dokumentation von den einzelnen Modellierungsschritten wird als Text beschrieben, mit den Bildern aus dem 3D-FEM-Programm ergänzt und weitere Detailzeichnungen erläutert. Ziel der Analyse der einzelnen Schritte der Tragwerksmodellerstellung ist die Konkretisierung von Interpretationsregeln. Am Ende dieses Kapitels werden die Interpretationsregeln vorgestellt.

### 4.1 Pilotstudie

Die Entwurfspläne der Produktionshalle wurden im Rahmen einer Projektarbeit an der TU Wien erstellt. Diese wurde im Sommersemester 2019 in dem Fach ‚Planungsprozesse mit BIM‘ erarbeitet. Als erstes wird zur Veranschaulichung der zugehörige Entwurfsplan angeführt (s. Abb. 4-1, 4-2).

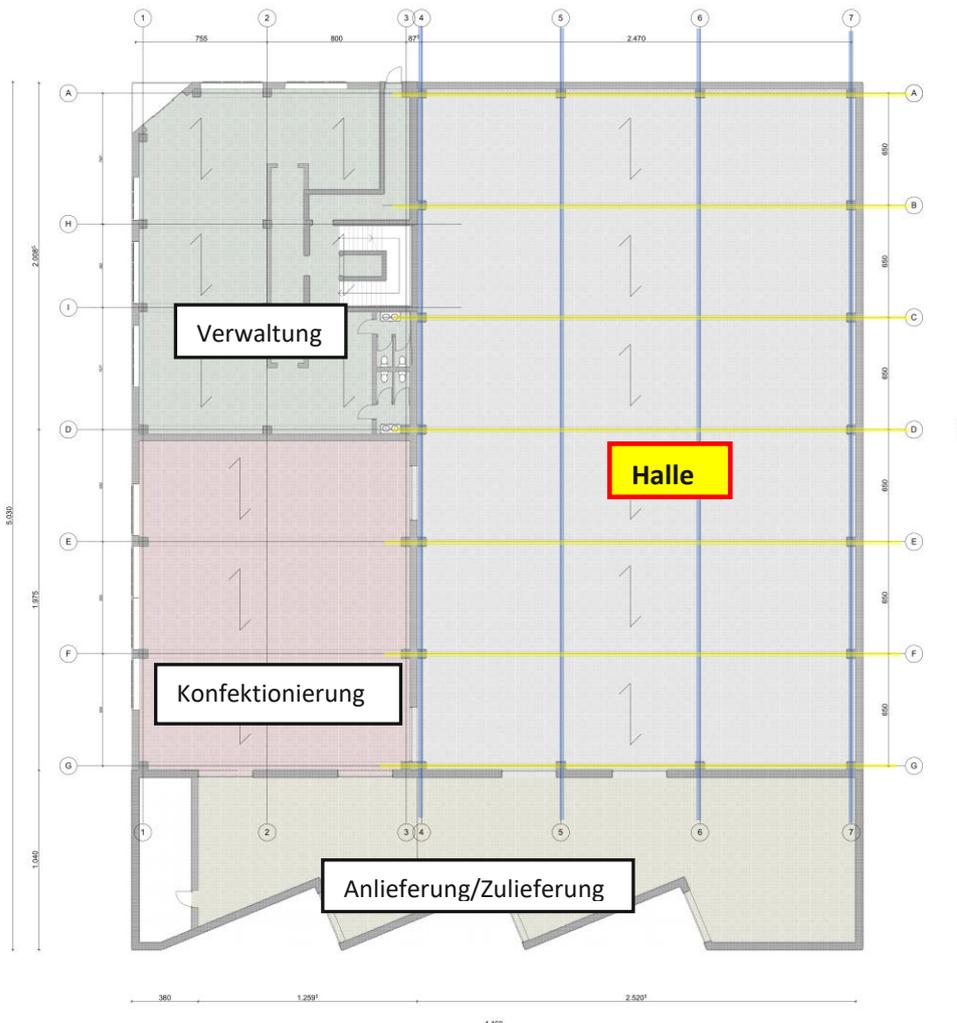


Abbildung 4-1 – Entwurfsplan erstellt vom Architekten: Grundriss

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

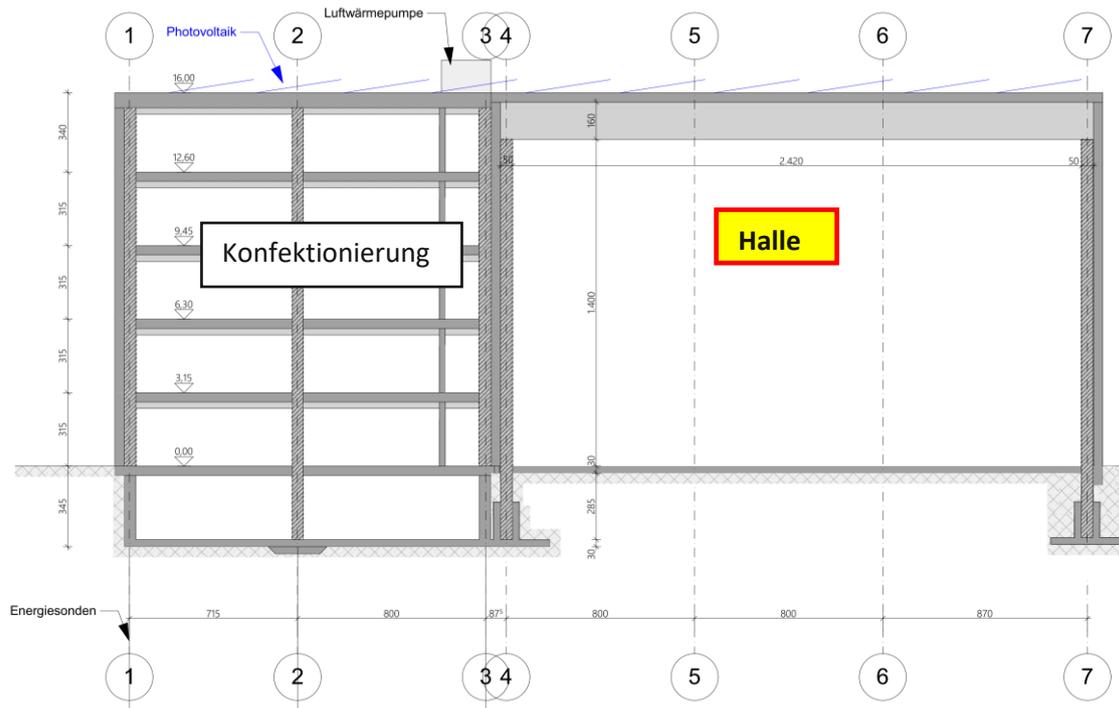


Abbildung 4-2 – Entwurfsplan: Schnitt

Die architektonischen Entwurfspläne (Grundriss, Schnitt) sind die endgültige Grundlage für das Tragwerksmodell. Der Architekt hat in den Entwurfsplänen das Raumprogramm, die Bauwerksgeometrie sowie die Bauteile und die Materialien vorgegeben (vgl. Lechner 2014c). In der frühen Entwurfsphase der Pilotstudie hat die Zusammenarbeit zwischen dem Architekten und dem Tragwerksplaner stattgefunden. In diesem Entwurf ist das Statik-Konzept bereits implementiert. Nachfolgend wird das Konzept näher beleuchtet.

### 4.2 Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners

Die Aufzeichnung des Konzepts dient dazu, ein tieferes Verständnis für die einzelnen Beziehungen im Tragwerk zu gewinnen, die dann bei der Statik-Modellbildung verwendet werden. Im Folgenden werden die Hauptpunkte des Statik-Konzepts vorgestellt:

- Die Halle ist aus Stahlbeton und Holz geplant.
- Um das Tragwerk richtig positionieren und geometrisch exakt beschreiben zu können, ist das Achsraster definiert. Dieses ist zeichnerisch im Grundriss und im Schnitt der Halle dargestellt. Das Achsraster beträgt 24,7 m x 39,5 m. Die Längsachsen (4 bis 7) sind im Grundriss in Abbildung 4-1 blau markiert, und die Querachsen (A bis G) sind gelb markiert. Der Achsabstand zwischen den Querachsen ist regelmäßig und beträgt 6,5 m. Zwischen den Längsachsen ist der Abstand unregelmäßig.
- Die vorgefertigten Stahlbetonstützen werden in den Köcherfundamenten eingespannt. Es handelt sich daher um Kragstützen.
- Die Mittellinie (Achse) der Stützen ist geometrisch im Grundriss an den Kreuzungen des Achsrasters positioniert.
- Der Stützenquerschnitt ist quadratisch.
- Die geometrische Position der Köcherfundamente ist durch die Position der Stütze gegeben.
- Der Hauptträger (Binder) der Dachkonstruktion besteht aus dem Brettschichtholz und spannt in Querrichtung zwischen den Stützen im Achsabstand 6,5 m.
- Die Hauptträger sind an der Oberkante der Stützen aufgelagert.

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

- Die Aussteifung der Halle ist durch eingespannte Kragstützen gewährleistet.
- Die Nebenträger der Dachkonstruktion bestehen aus Brettsper Holzplatten. Diese spannen zwischen den Hauptträgern in Längsrichtung. Die Unterkante der Platten liegt auf dem Obergurt der Hauptträger.
- Der Tragwerksplaner interpretiert, dass diese Brettsper Holzplatten eine aussteifende Platte in der Dachebene bilden.
- Die RDOK des Dachs ist auf +16,0 m gesetzt.
- Die Holzfassade ist vertikal ausgerichtet.
- Die Holzfassade wird an den horizontalen Vollholzträgern, welche zwischen den Stützen über die 6,5 m spannen, befestigt. Diese Vollholzträger sind in vertikalem Abstand von 3 m geplant.
- Die Bodenplatte wird als schwimmende Industriebodenplatte mit  $h = 30$  cm in Ortbetonbauweise hergestellt. Die RDOK der Bodenplatte wird auf  $\pm 0,000$  m gesetzt.

### 4.3 Statik-Modell: 3D-FEM-Modellbildung

Für das Statik-Modell werden nur die tragenden Bauteile aus dem Entwurf entnommen. Es besteht lediglich die Möglichkeit, selbst aus den Plänen das Statik-Modell aufzubauen. Der Tragwerksplaner legt die konstruktiven Details und Hauptabmessungen des Tragwerks für zB. tragende Querschnitte, Aussparungen und Fugen, fest. Weiter definiert er die Ausbildung der Auflager- und Knotenpunkte sowie die Festlegung der Verbindungsmittel, der Materialangaben; evtl. macht er auch die Herstellungsanweisungen (vgl. Lechner 2014b). Damit können die Randbedingungen der Verbindungen und Auflager im Statik-Modell definiert werden.

Nun wird der Workflow ohne BIM-Architekturmodell vorgestellt. Das bedeutet, dass ausschließlich die Entwurfspläne des Architekten vorliegen. Der Tragwerksplaner definiert im 3D-FEM-Programm das Koordinatensystem, den Nullpunkt und konstruiert das Achsraster, welches schon im Grundriss festgehalten ist. Dann wird das Modell schrittweise aufgebaut. Laut den Regeln, welche in den Kapiteln 3.2 bis 3.4 vorgestellt wurden, werden die einzelnen Bauteile als Tragwerkselemente analytisch abgebildet. Zuerst müssen Knotenpunkte und Linien konstruiert werden. In den Achsen der 1D-Linienelemente werden Linien zwischen den Knotenpunkten geführt und für die 2D-Flächenelemente werden an den Ecken der Mittelfläche die Knotenpunkte konstruiert und die Linien an den Rändern geführt.

An dieser Stelle ist anzumerken, dass es ein zweites mögliches Szenario des Workflows gibt. Wenn das BIM-Architekturmodell der Halle vorhanden wäre, ist es für das Tragwerk wichtig, dass die tragenden Bauteile im Architekturmodell richtig parametrisiert und geometrisch präzise platziert sind. Dadurch ist es möglich, ein Tragwerk im BIM-Architekturmodell auszuwählen und ins Statik-Programm zu importieren. Nach dem Import wird das Tragwerk in dem Statik-Programm nachbearbeitet und angepasst, damit das Statik-Modell für statische Berechnungen funktionsfähig ist.

In den folgenden Abbildungen 4-3 und 4-4 ist die Interpretation des statischen Systems in den architektonischen Entwurfsplänen mit roter Linie prinzipiell dargestellt. Die Punkte veranschaulichen Knotenpunkte und die Linien die Achsen des Systems.

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

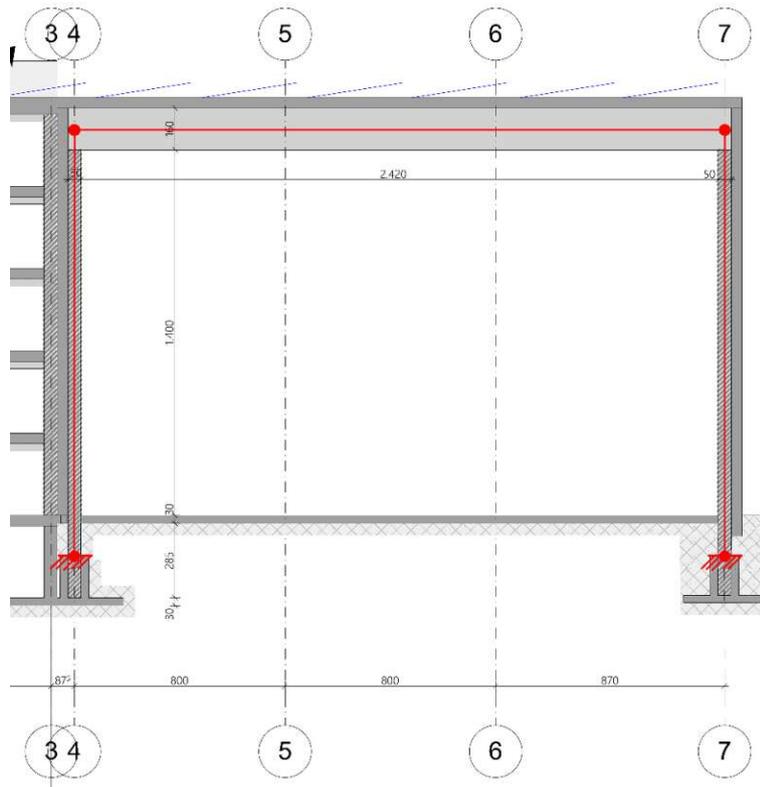


Abbildung 4-3 – Interpretation des statischen Systems ist im Schnitt rot gekennzeichnet

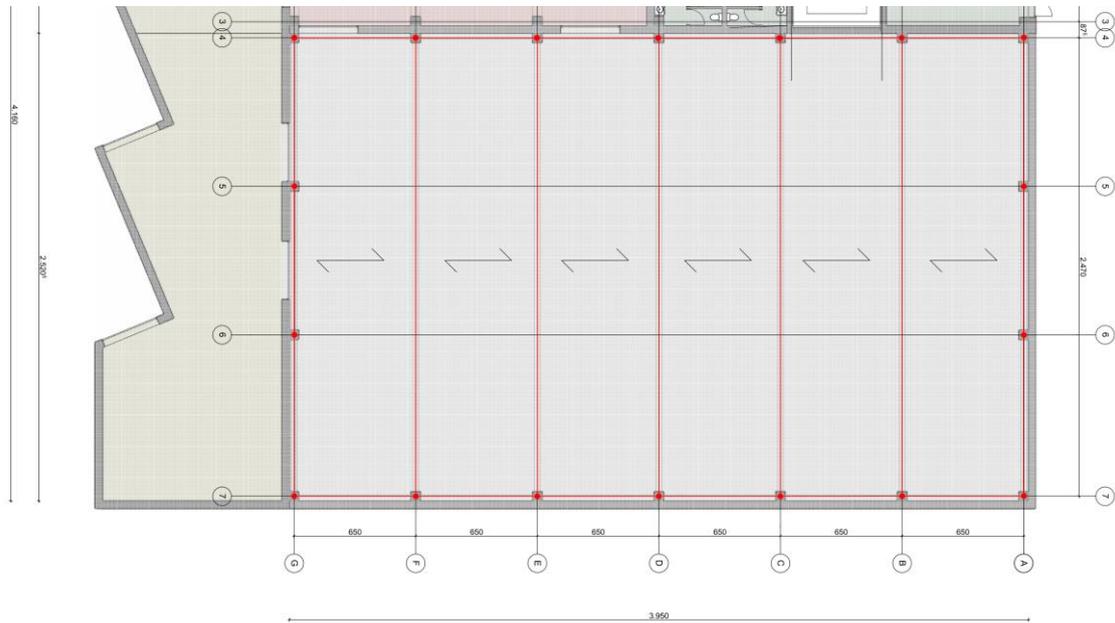


Abbildung 4-4 – Interpretation des statischen Systems ist im Grundriss rot gekennzeichnet

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

An dieser Stelle wird mit der Modellbildung fortgesetzt. Im Statik-Programm wird als eine Option das 3D-Modell mit kartesischem Koordinatensystem XYZ [0,0,0] ausgewählt. Die Z-Achse wird nach unten ausgerichtet (Abb. 4-5).

Isometrie



Abbildung 4-5 – Auswahl des globalen Koordinatensystems: z-Achse ist nach unten ausgerichtet

Im nächsten Schritt konstruiert man das Achsraster (Abb. 4-6). Dieses wird aus dem Grundriss entnommen. Für die Übersichtlichkeit, Kommunikation und Kontrolle der Geometrie ist das Achsraster im Statik-Modell wichtig.

Isometrie

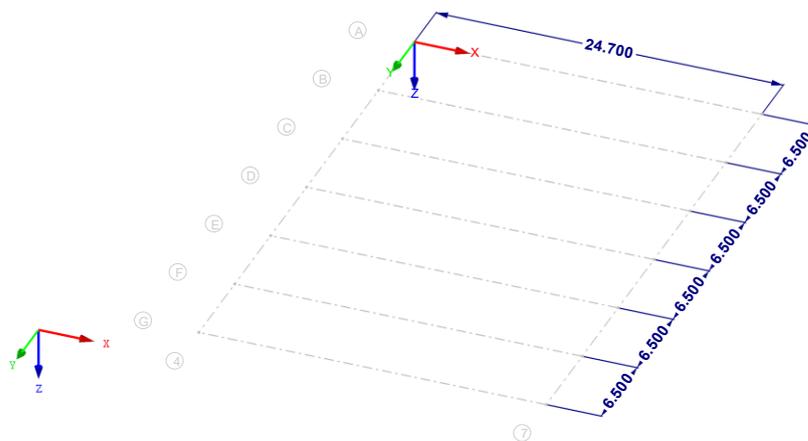


Abbildung 4-6 – Erzeugung des Achsrasters

Der nächste Schritt ist die Konstruktion der Stütze. Diese wird als 1D-Linienelement - Stab interpretiert. Die Regel für den Stab ist im Kap. 3.3.2 beschrieben. Die Querschnittsachse muss konstruiert werden. Für die Bestimmung der Achse werden mindestens zwei Punkte benötigt. Der untere und obere Knotenpunkt muss konstruiert werden, damit die Querschnittsachse definiert ist. Die Stablänge entspricht dem Abstand zwischen den beiden Knotenpunkten.



#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

Bei Anwendung von *Köcherfundamenten mit glatter Oberfläche* ist es anhand des dargestellten Übertragungsmechanismus zwischen Stütze und Fundament, der in der ÖNORM EN 1992-1-1:2015 beschrieben ist, abzuleiten, dass das größte Bemessungsmoment für die Stütze an der Oberkante des Köchers entsteht. Daraus folgt, dass für 3D-Statik-Modelle, wo die Stützenkräfte zu ermitteln sind, auch die Unterkante der Stütze auf der KOK abgebildet wird.

*RF Fund Pro – Bemessung von Fundamenten* ist spezielles Modul zur Bemessung von Einzelfundamenten im Statik-Programm RFEM. In diesem Modul können Tragsicherheitsnachweise gemäß der Normen EN 1992-1-1 und EN 1997-1 geführt werden. Zur Auswahl steht die Bemessung von Köcherfundamenten mit glatten Köcherinnenseiten und mit rauen Köcherinnenseiten, Einzelfundamentplatten und Blockfundamenten mit rauen Köcherinnenseiten sowie glatten Köcherinnenseiten. In der Abbildung 4-9 sind die Fundamenttypen übersichtlich dargestellt (vgl. Dlubal Software 2016, S. 10).

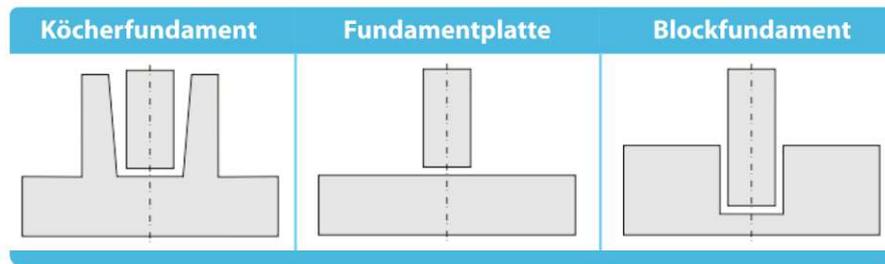


Abbildung 4-9 – Fundamenttypen aus dem Handbuch RF Fund Pro

In Abb. 4-11 ist dargestellt, wie der untere Stützenknotenpunkt an der Köcheroberkante explizit für den Fall der Gründung der Stützen ins Köcherfundament mit rauen Köcherinnenseiten positioniert ist. Das Koordinatensystem ist an KOK platziert. Das gleiche gilt für das Köcherfundament mit glatten Oberflächen (s. Abb. 4-10). Die hierfür angenommene Interpretationsregel resultiert aus der Analyse der Normenwerke, Fachliteratur und den Handbüchern des Statik-Programms. Diese Regel kann noch mit Expertenwissen geprüft werden

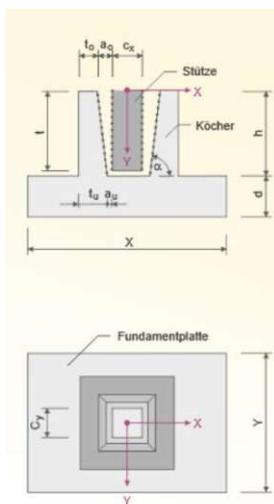


Abbildung 4-11 – Teilbild aus der Maske Geometrie für Köcherfundamente mit rauen Köcherinnenseiten im Modul RF-Fund Pro

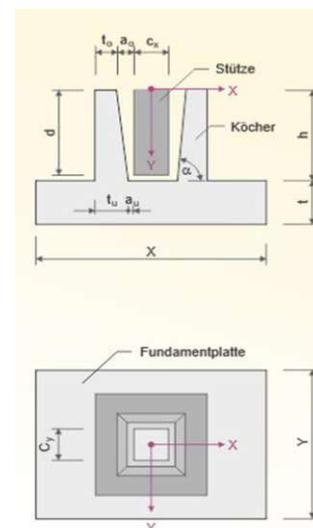


Abbildung 4-10 – Teilbild aus der Maske Geometrie für Köcherfundamente mit glatten Köcherinnenseiten im Modul RF-Fund Pro

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

Anschließend muss der obere Knotenpunkt der Stütze konstruiert werden. Hierzu ist es zuerst wichtig zu definieren, wie der Brett-schichtholz-(BSH)-Hauptträger zu interpretieren ist. Dieser wird laut der Regel in Kap. 3.3.3 als Tragwerkselement - Balken interpretiert. Weitere Regeln für die statische Bemessung von Holzbauteilen sind in EN 1995 – Eurocode 5 erfasst. In Kapitel 5 des Eurocodes werden die Grundlagen der Berechnung für Holzwerkstoffe erläutert. Die Holzelemente werden in dieser Arbeit auch in Anlehnung an die ÖNORM B 1995-1-1:2019 modelliert. Diese in dem Abschnitt 5.4.2, Bild 5.1 enthält die Definitionen der Holzstruktur und der Modellelemente, wie das Stabtragwerk mit den Systemlinien definiert ist (Abb. 4-12). Diese Tatsache unterstützt die Interpretation, dass der BSH-Hauptträger als Tragwerkselementbalken gemäß der Regel in Kap. 3.3.3 definiert ist.

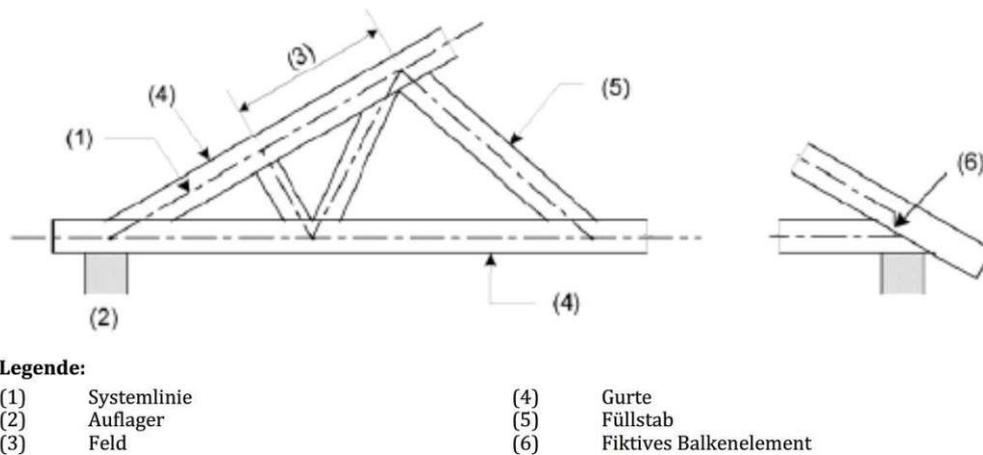
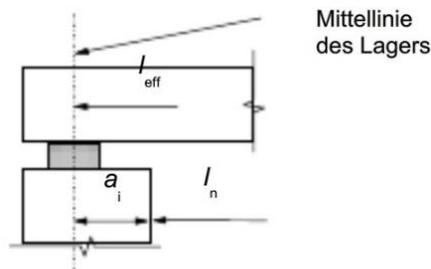


Abbildung 4-12 – Bild 5.1: Abschnitt 5.4.2 (ÖNORM B 1995-1-1: 2019)

#### 4.3.2 Geometrische Regel: Anschluss Träger an Stütze

Der Tragwerksplaner hat bestimmt, dass die Auflagerung des Brett-schichtholz-trägers auf der OK-Stütze auf das Lager gelenkig konstruiert ist. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass es zur Schnittstelle von zwei Baustoffen kommt, was für diese Hallenbauweise üblich ist. Geometrische Hinweise für die Anordnung eines Lagers sind in ÖNORM EN 1992-1-1:2015, Abschnitt 5.3.2.2 (1), Bild 5.4 d) und in ÖNORM B 1995-1-1: 2019, Abschnitt 6.1.7 (3), Bild NA. 6.6- E1 ersichtlich. Die Abbildungen 4-13 und 4-14 zeigen die Ausschnitte aus den einschlägigen ÖNORMEN.



#### (d) Anordnung eines Lagers

Abbildung 4-13 – Auflagerung des Trägers auf das Lager, zentrisch: Bild 5.4 (ÖNORM EN 1992-1-1:2015)

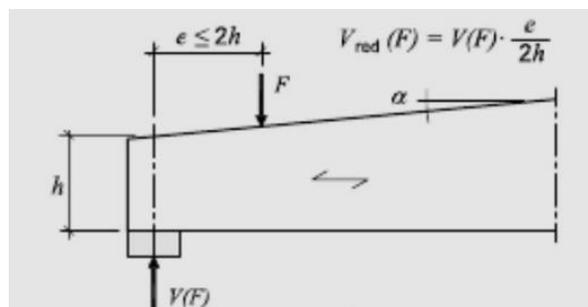


Abbildung 4-14 – Auflagerung des Holzträgers auf das Lager, zentrisch: Bild NA 6.6 – E1 (ÖNORM B 1995-1-1:2019)

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

### Typ-A

Der obere Knotenpunkt der Stütze wird an der Kreuzung der Querschnittachse der Stütze und der Querschnittachse des Trägers erzeugt (Abb. 4-15). Höhenmäßig liegt dieser Punkt an der Koordinate  $z = +14,8 \text{ m}$  (in den Bauzeichnungen die Mittelachse des BSH-Hauptträgers). Das Lager liegt zentrisch auf der OK-Stütze. Hier ist an der Verbindung von Stütze und Träger gemeint, dass die Auflagerkraft aus dem BSH-Träger zentrisch in die Stütze abgeleitet wird.

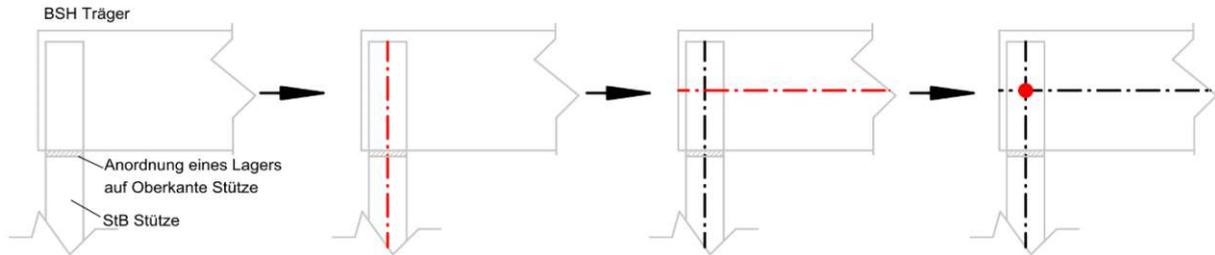


Abbildung 4-15 – Der obere Knotenpunkt der Stütze wird auf der Kreuzung der Mittelachse des Trägers und der Stütze konstruiert.

Die hier angenommene Interpretation ist eine Vereinfachung der Bauteilgeometrie, die an der sicheren Seite für die Schnittkräfte der Stützen liegt. Es kann sich auch vorgestellt werden, dass das Stützenstück, das zwischen der Mittelachse des Trägers und OK-Stütze liegt, als Kopplungsstab mit dem gleichen Querschnitt wie die Stütze dient.

### Typ-B

Es besteht auch eine zweite Möglichkeit, den Anschluss Stütze–Träger zu modellieren, wobei der obere Knotenpunkt der Stütze genau auf die Oberkante sichergestellt wird. Ein Tragwerksplaner kann im Modell mit dem Kopplungsstab den Anschluss abbilden. Die hier beschriebene Variante ist an der dargestellten Prinzip-Skizze 4-16 illustriert.

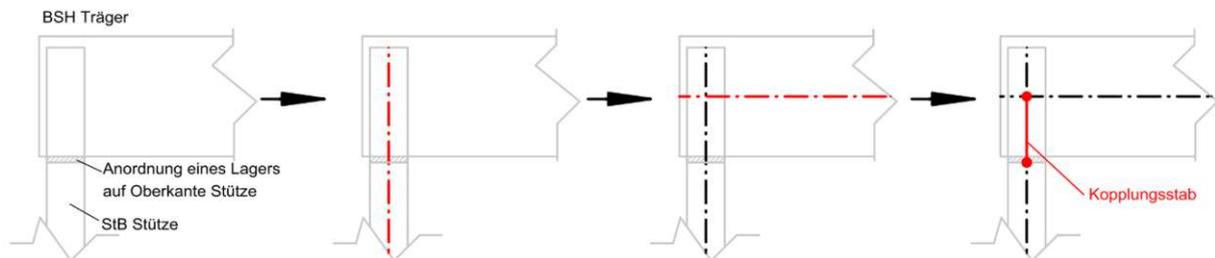


Abbildung 4-16 – Der obere Stützenknotenpunkt liegt auf der OK-Stütze und der Kopplungsstab verbindet den Träger mit der Stütze

Im Modell wird der herkömmliche Typ-A verwendet und zwischen dem unteren sowie dem oberen Knotenpunkt eine Linie ausgezogen (Abb. 4-17). Diese Linie repräsentiert die Mittelachse der Stütze. Dieser wird der Stab zugewiesen.

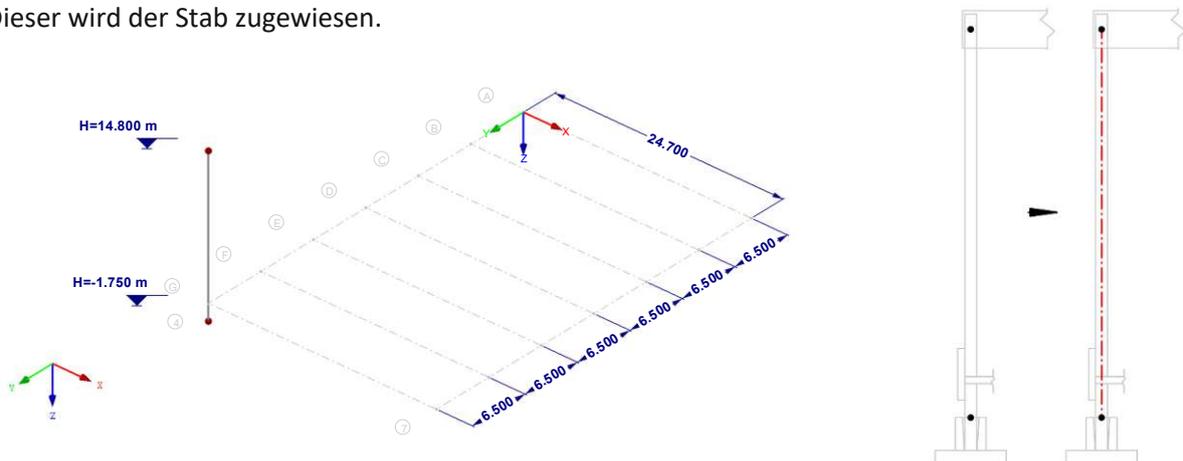


Abbildung 4-17 – Die Knotenpunkte für die Stütze in den Achsen 4/G werden mit einer Linie verbunden

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

Als Nächstes wird die Stütze in der Achse 7/G erzeugt. Es wird einfach die Stütze kopiert, die an der Kreuzung der Achsen 4/G liegt, und an die Kreuzung der Achsen 7/G eingefügt (Abb. 4-18).

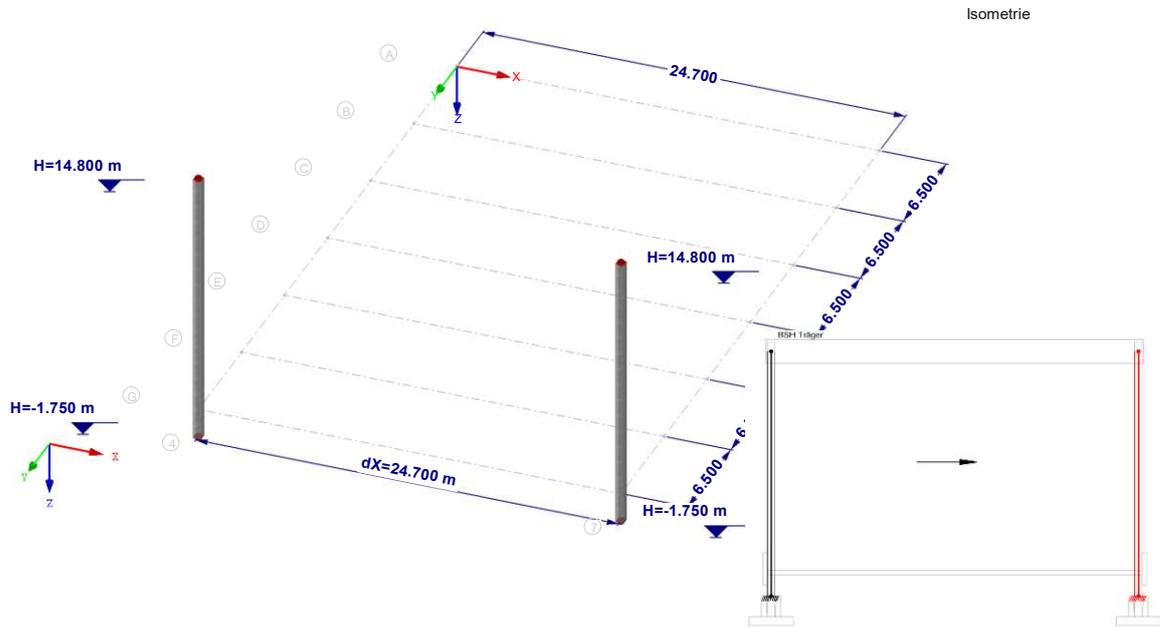


Abbildung 4-18 – Stütze in Achsen 7/G wird erzeugt

Weiter wird zwischen den zwei Hauptstützen der BSH-Hauptträger konstruiert, der als Balken interpretiert wird. Die Trägerachse (Systemlinie) ist als Verbindungslinie der oberen Knotenpunkte der Stützen definiert (s. Abb. 4-19 und Abb. 4-20). Ein Tragwerksplaner hat die Querschnittsabmessungen 30/160 des Trägers schon bei der Bearbeitung des Tragwerkskonzepts abgeschätzt. Diese Informationen über den Querschnitt sind bereits in den Entwurfsplänen vorhanden und werden im Statik-Modell angegeben. Er hat entschieden, dass der Träger aus Brettchichtholz der Holzklasse GL 28 h bestehen wird. Die Holzklasse entspricht den Normen EN 14080 und EC 5.

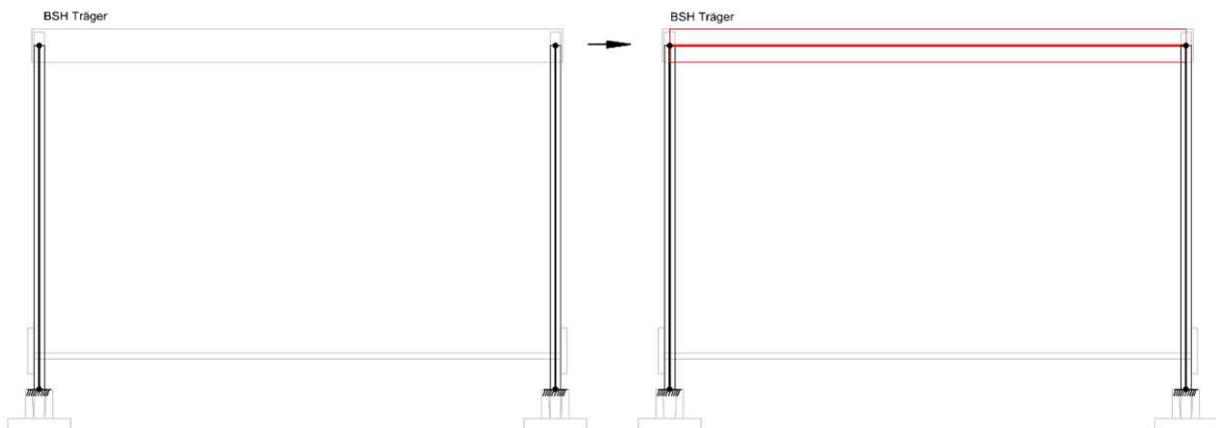


Abbildung 4-19 – BSH-Träger-Modellierung

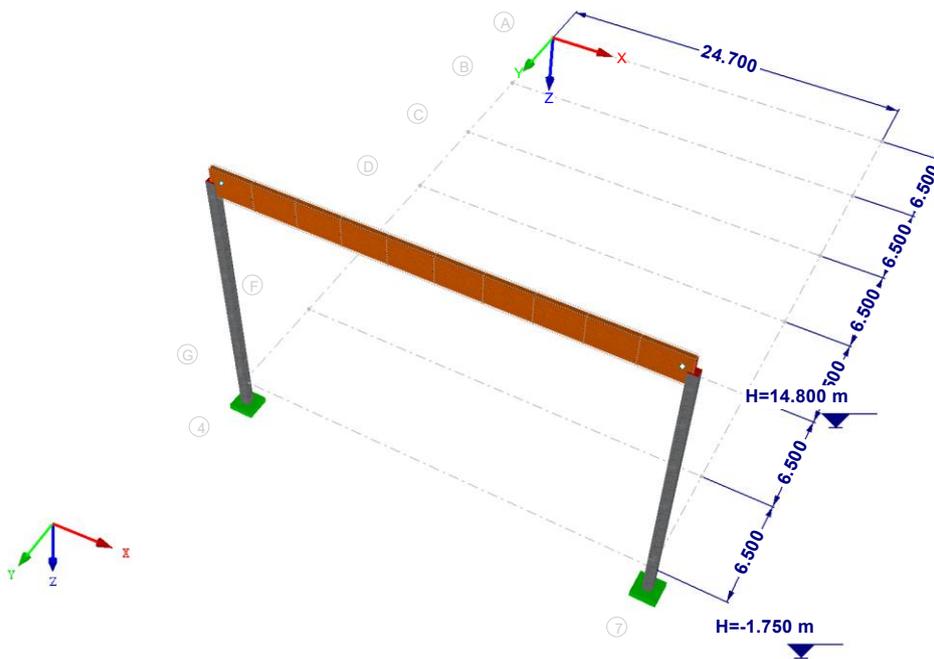


Abbildung 4-20 – Der erste Rahmen in Achse G wird erzeugt.

Im nächsten Schritt wird der Hauptrahmen in Richtung  $y = -6,5 \text{ m}$  in alle Schnittpunkte des Achsrasters kopiert (s. Abb. 4-21).

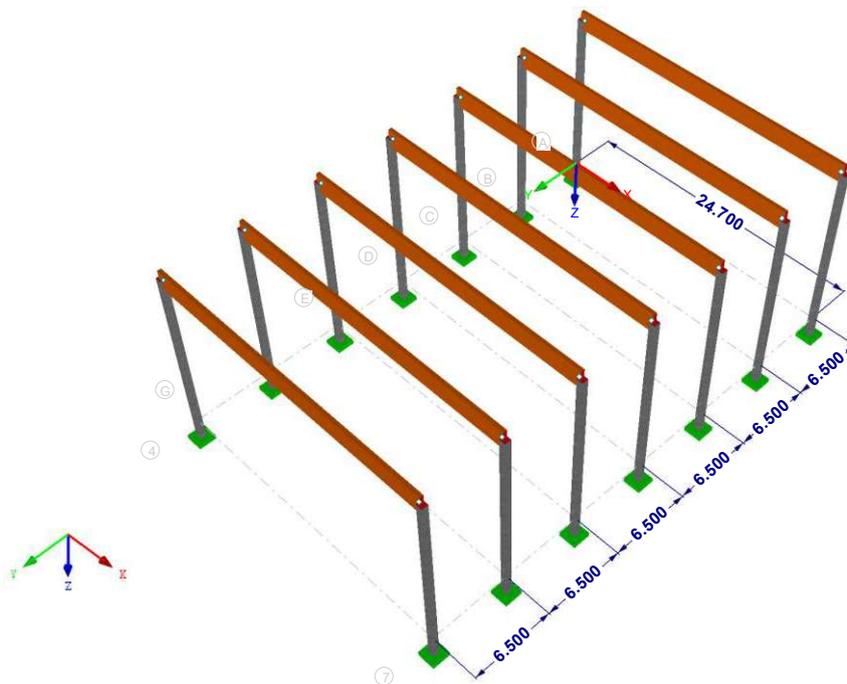


Abbildung 4-21 – Rahmen an allen Raster-Schnittpunkten werden erzeugt.

Im nächsten Schritt wird die Dachebene modelliert, die hier beispielhaft aus Brettsperrholzplatten besteht. Die Brettsperrholzplattenbreite ist gemäß den Angaben des Transportes und der Herstellung auf 2,5 m beschränkt. Der Tragwerksplaner hat 20 cm Plattendicke vorgeschlagen. BSP-Platten

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

werden laut der Regel in Kap. 3.3.5 als 2D-Flächenelement-Platte interpretiert. Die Platten sind durch die Mittelfläche definiert und werden in der entsprechenden Lage zwischen den Haupttrahmen erzeugt. Eine Platte wurde mithilfe der Außenbegrenzungslinien konstruiert und zwischen diesen Linien wird die 20 cm dicke Fläche hergestellt. Brettsperrholz ist ein orthotropes Material und deshalb beschreibt der Tragwerksplaner diese als orthotrope Platte.

### 4.3.3 Geometrische Regel: Anschluss Platte an Träger

#### Typ-A

Dieser ist gekennzeichnet durch eine grobe Vereinfachung der Bauteilgeometrie. Die Mittelfläche der Platten ist in der Ebene der Trägerachse abgebildet und mit der Trägerachse verbunden (Abb. 4-22 bis 4-25). Danach werden die Auflagerrandbedingungen im Statik-Programm (z. B. Liniengelenke) der Platte zugewiesen.

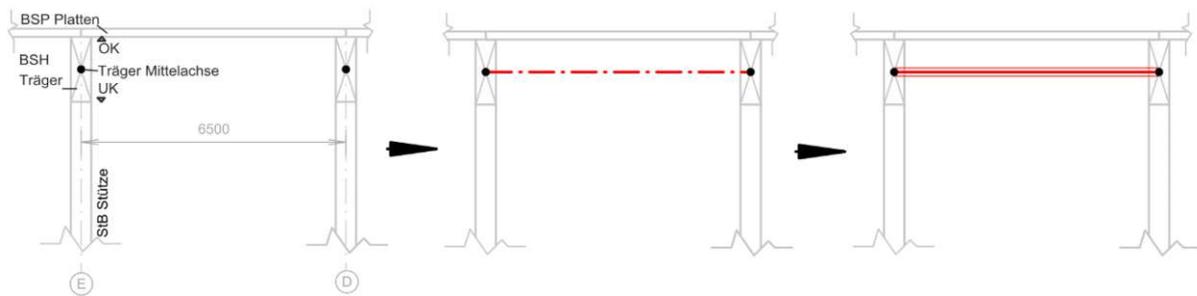


Abbildung 4-22 – Die Platte wird in der Ebene der Trägerachse modelliert.

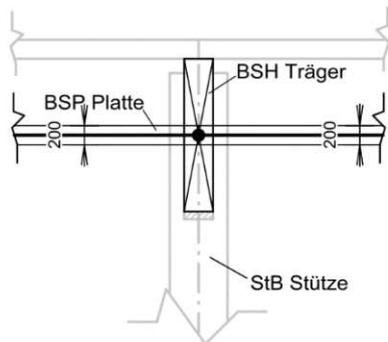


Abbildung 4-25 – Anschluss der Platte an Träger im Schnitt: Vereinfachung der Bauteilgeometrie

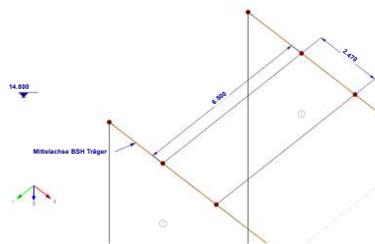


Abbildung 4-24 – analytische Abbildung

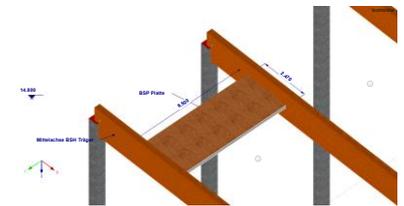


Abbildung 4-23 – Visualisierung

#### Typ-B-1

In der Realität sind die Platten auf dem Trägerobergurt befestigt. Es muss eine Verbindung zwischen den Platten und dem Träger gewährleistet sein, um die Kräfte übertragen zu können. Im Statik-Programm kann diese geometrische Information mittels Eingabe der Exzentrizität gesteuert werden. Durch die Zuweisung einer Exzentrizität ist es möglich, den Höhenversatz für die Fläche anzuordnen und weiter den Kraftfluss zu übertragen (Dlubal Software o. J.). Typ-B-1 besteht darin, die Platten mit den Trägern zu verbinden und den Platten die Exzentrizität zu zuweisen (Abb. 4-26 bis 4-28). Für die Pilotstudie beträgt die Exzentrizität der Platten zwischen der Mittelachse des Trägers und der Mittelfläche der Platte 900 mm.

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

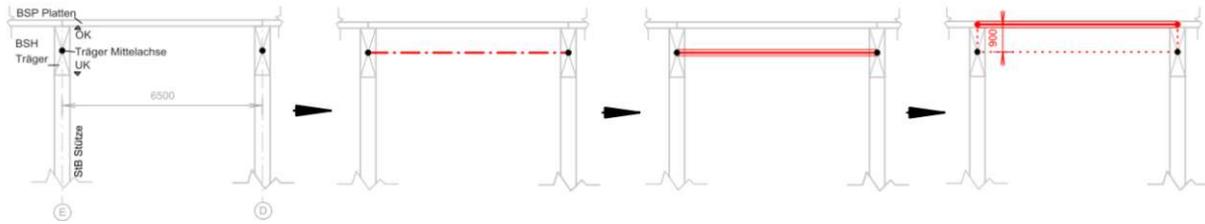


Abbildung 4-26 – Die Exzentrizität der Platte zur Trägerachse ist im Programm eingegeben.

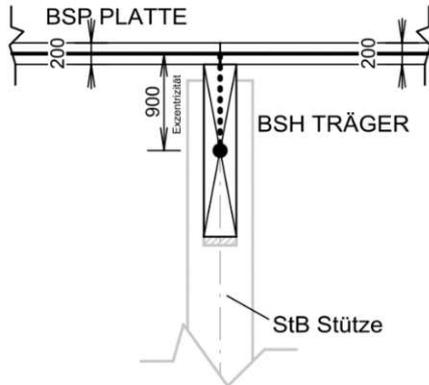


Abbildung 4-27 – exzentrische Plattenanbindung

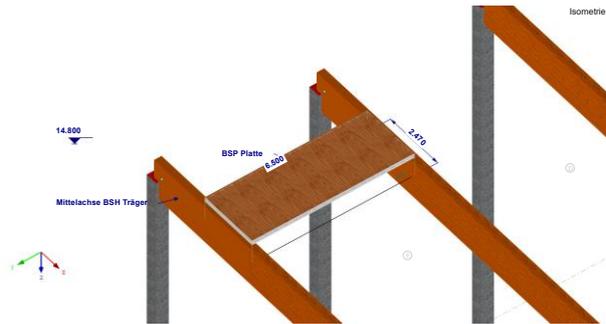


Abbildung 4-28 – Visualisierung

Durch **Typ-B-2** wäre theoretisch die Exzentrizität mithilfe der Kopplungselemente zu gewährleisten. Kopplungselemente können entweder z. B. nah angeordnete Kopplungsstäbe oder Kopplungsflächen sein (s. Abb. 4-29 bis 4-31). An dieser Stelle ist zu bemerken, dass diese Variante bei großen Projekten die Berechnungsleistung negativ beeinflussen kann, außerdem spiel erfahrungsbasiertes Expertenwissen bei der Interpretation der Anschlüsse mittels Kopplungselemente eine große Rolle.

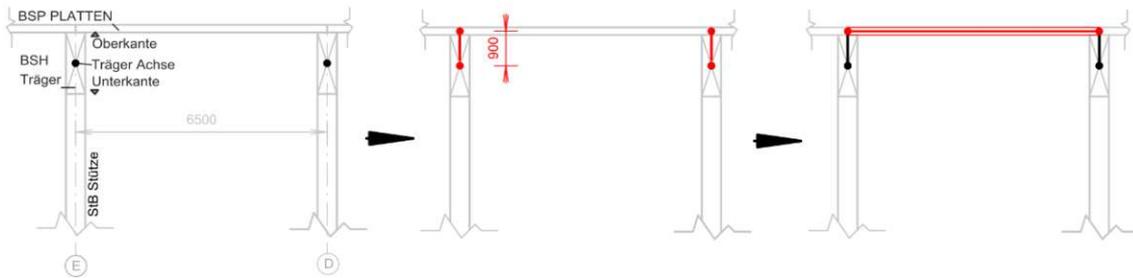


Abbildung 4-29 – Verbindung von Platte und Träger mit einem Kopplungselement

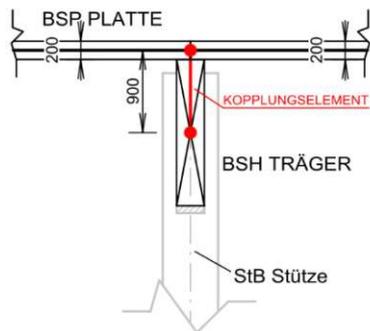


Abbildung 4-31 – Verbindung mit Kopplungselement

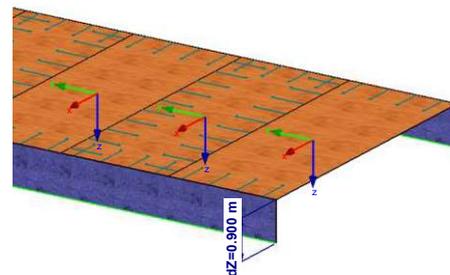


Abbildung 4-30 – beispielhaft angeführte Kopplungsplatte (blau)

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

Bei der Pilotstudie wurden die Platten mit Exzentrizität (Kap. 4.3.3 – Typ-B-1) modelliert und Auflagerbedingungen der Platten mit Liniengelenken simuliert (Abb. 4-32).

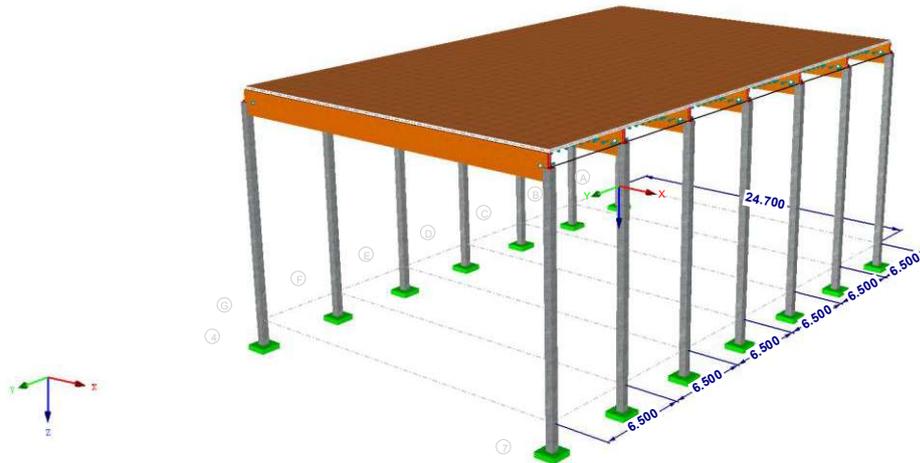


Abbildung 4-32 – Haupttrahnen mit Dachebene modelliert

Jetzt werden die Giebelstützen (s. Abb. 4-33 - 4-34) ins Modell ergänzt, die sich an den Achsen A und G des Achsrasters befinden. Giebelstützen werden nach der gleichen Art als Randstützen interpretiert. Die Oberkante der Stütze ist so ausgeführt, dass der Hauptträger bei vertikalen Verformungen die Stütze nicht berührt. Das hat die Auswirkung, bei einer zukünftigen möglichen Erweiterung der Halle, dass die Giebelstützen demontiert sein können und sich das statische System des Hauptrahmens nicht ändert.

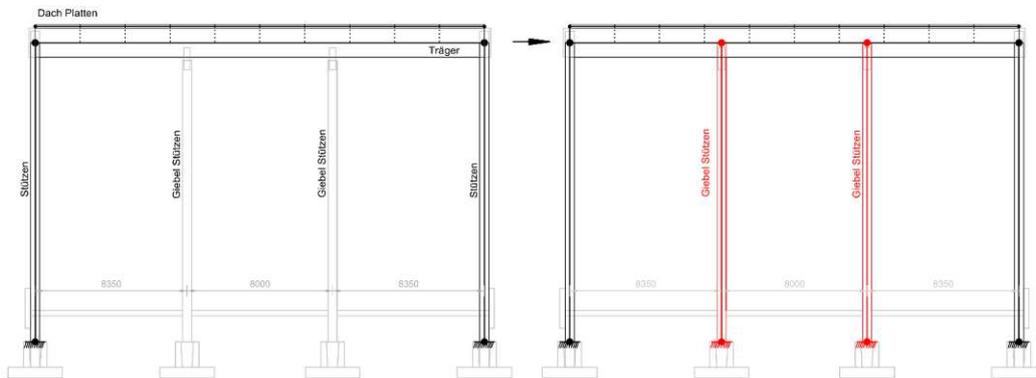


Abbildung 4-33 – Giebelstützen werden als 1D-Linienelement – Stab interpretiert.

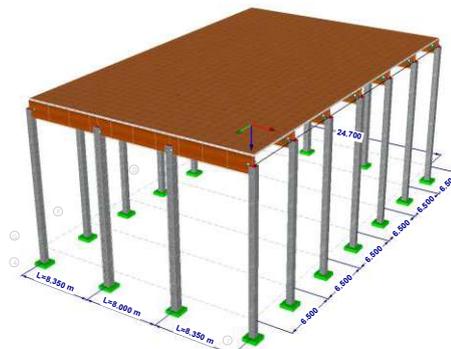


Abbildung 4-34 – Giebelstützen werden in das Modell ergänzt.

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

Alle vertikalen Konstruktionen sind fertig. Es werden zwischen den Stützen horizontale Träger für die Fassademontage modelliert. Den Querschnitt hat der Tragwerksplaner als Rechteck 30/30 und Holzklasse C24 vorgeschlagen. Diese werden als Balken (Regel laut Kap. 3.3.3) modelliert. Der Anschluss des Trägers an die Stütze wird laut der geometrischen Regel aus Kap. 4.3.2 – Typ-A abgebildet.

### 4.3.4 Geometrische Regel: Außermittigkeit der 1D-Linienelemente

Die Außenkante der Fassadenträger sollte zur Außenkante der Stützen passen. Über Exzentrizitäten ist es möglich, die Linienelemente durch spezifische Stabendabschnitte außermittig anzuschließen (Dlubal Software o. J.). Der Fassadenträger (Balken) wurde zuerst genau in der Ebene der Stützenachse modelliert und anschließend wurde ihm die Exzentrizität zugewiesen (Abb. 4-35 bis 4-37).

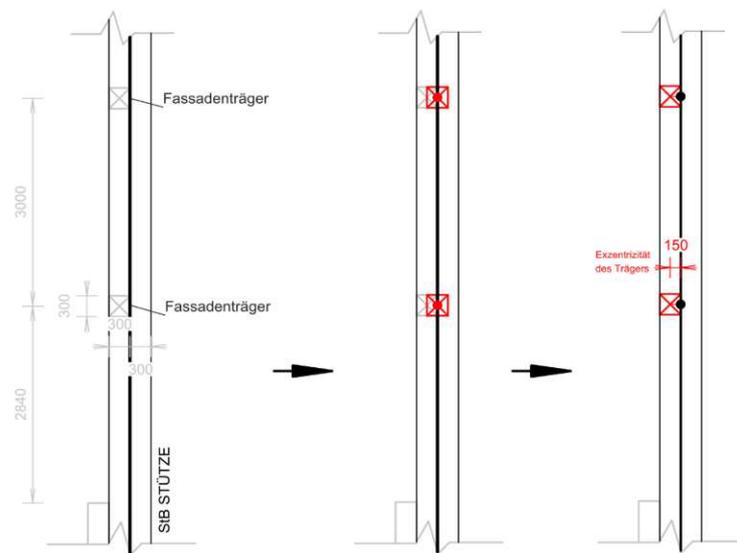


Abbildung 4-35 – Fassadenträger-Konstruktionsprinzip

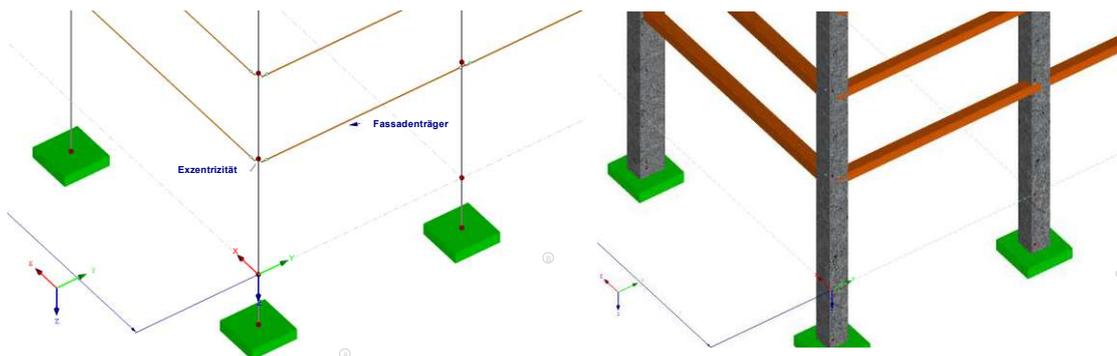


Abbildung 4-36 – analytische Darstellung

Abbildung 4-37 – Visualisierung

Die Auflagerungen (Gründungssystem) des Haupttragwerks sind mit den eingespannten Stützen definiert (in Abb. 4-36 als grünes Rechteck dargestellt) und daher kann das Statik-Modell ohne Bodenplatte bemessen werden. Als Nächstes wird dargestellt, wie die Bodenplatte behandelt wird. Der Tragwerksplaner hat mit dem Architekten abgestimmt, welche Nutzung in der Halle vorgesehen ist. Daraus bestimmt der Tragwerksplaner, welche Verformung für die jeweilige Nutzungsart noch zulässig ist. Bei dieser Pilotstudie wurde festgestellt, dass es sich um sehr gute Bodenverhältnisse handelt. In der Halle werden Verpackungen und Paletten mit Kosmetikartikeln gelagert. Daher kann

#### 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

die Flachgründung ohne spezielle Anforderungen an die Verformungen der Halle angesetzt werden. Es ist geplant, dass es sich um eine schwimmende Bodenplatte handelt. Der Boden unter der Bodenplatte ist sehr gut verdichtet und die Stärke sowie auch der Bewehrungsgrad der Bodenplatte ermöglicht eine normgerechte Setzung. Die Bodenplatte wirkt statisch als separates Gründungselement. Diese wird als 2D-Flächenelement-Platte (Regel in Kap. 3.3.5) modelliert (s. Abb. 4-38) und mittels Bettung flächig aufgelagert (Regel in Kap. 3.4.5). Diese wurde in Zusammenarbeit zwischen dem Tragwerksplaner und einem Geotechniker ermittelt.

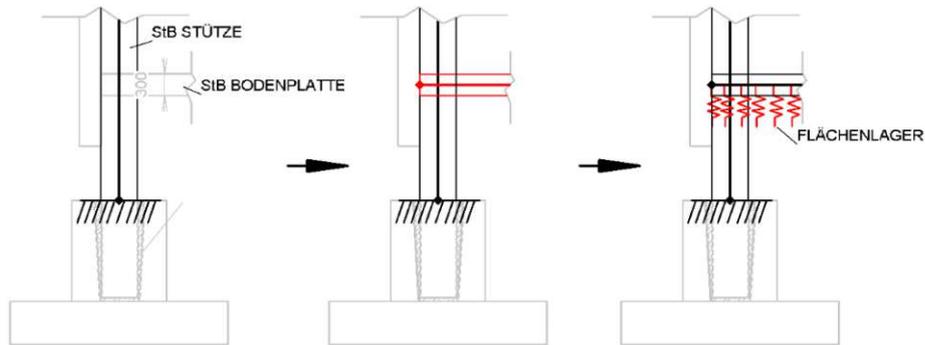


Abbildung 4-38 – Bodenplatte wird als 2D-Platte interpretiert.

Das finale Tragwerksmodell der Pilotstudie ist in Abbildung 4-39 dargestellt.

#### Anmerkung

Für schlechte Bodenverhältnisse, die der Geotechniker auswertet, oder für große Anforderungen an die Verformung des Gründungssystems sind spezifische und kompliziertere Gründungen vorgesehen. Einige der möglichen Varianten werden hier beispielhaft aufgelistet:

- Die Bodenplatte wird z. B. auf einem Pfahlrost aufgelagert und kann als Decke bemessen werden.
- Der Tragwerksplaner wählt eine dicke Bodenplatte, mit Pfählen regelmäßig aufgeteilt.
- Der Tragwerksplaner wählt Köcherfundamente mit Pfahlanordnung.
- Der Tragwerksplaner plant eine Bodenplatte mit Vouten und Pfählen.

Erfahrungsmäßig um zu sehen, wie bei komplexeren Gründungssystemen die Gründung mit dem Gebäude zusammenwirkt, sollte ein räumliches 3D-FEM-Modell auch die Gründung beinhalten.

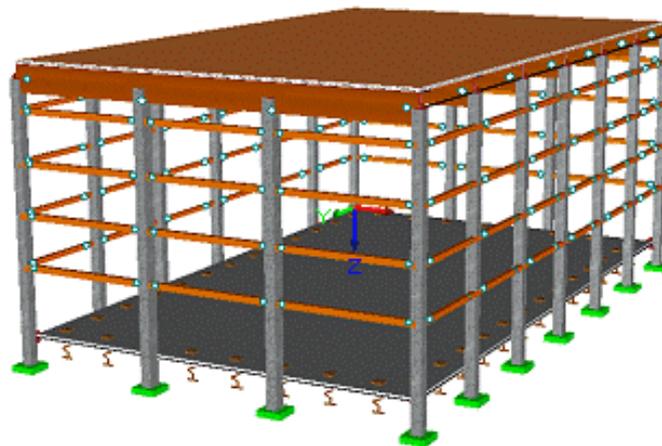


Abbildung 4-39 – 3D-FEM-Statik-Modell

## 4.4 Interpretationsregeln

Wie bereits in der Fachliteratur, den Normen und der Pilotstudie untersucht, gibt es Regeln, die Tragwerksplaner für die Tragwerksmodellbildung benutzen. Diese werden folgendermaßen anhand der Bauteile gegliedert:

### 4.4.1 Stützen

Die Stütze wird als 1D-Linienelement-Stab mit der Längsachse interpretiert (Regel in Kap. 3.3.2). Die Achse ist mit dem unteren und oberen Knotenpunkt in der Statik-Software definiert (Abb. 4-17). Der Stab mit dem dazugehörigen Querschnitt ist im Statik-Programm der Achse zugewiesen. Geometrische Regeln des Stabes sind:  $l \geq 2b$ ;  $l \geq 3h$ ;  $b \leq 4h$ , wie in Abbildung 3-9 schematisch dargestellt. Koordinaten der Knotenpunkte sind geometrisch im Raum definiert, in der Abhängigkeit der Auflagerung und Verbindungspunkte mit anderen Tragwerkselementen. Bei der Auflagerung im Köcherfundament wird der Knotenpunkt auf der Oberkante des Köchers platziert (Regel in Kap. 4.3.1). Beim Anschluss des Trägers an die Stütze wird der Knotenpunkt an der Kreuzung der Längsachsen der beiden Tragwerkselemente konstruiert (Regel in Kap. 4.3.2 – Typ-A).

### 4.4.2 Köcherfundament

Da dieser Fundamenttyp keine Bewegungen der Stütze zulässt, wird im 3D-FEM-Statik-Modell als Knotenlager-Einspannung interpretiert (Regel in Kap. 3.4.1). In Abb. 4-20 ist die Einspannung als grünes Rechteck unter der Stütze im Statik-Modell dargestellt. Der Einspannhorizont wurde laut der Regel aus Kap. 4.3.1 an der OK des Köchers positioniert (Abb. 4-7).

### 4.4.3 Träger

Der Träger ist als 1D-Linienelement-Balken mit der Längsachse interpretiert (Regel in Kap. 3.3.3). Geometrische Regeln für den Balken sind:  $l \geq 3h$  und gleich  $h \geq b$ , wie in Abbildung 3-9 schematisch dargestellt. Die Achse ist mit dem Anfangspunkt (Abb. 3-11 Punkt *a*) und dem Endpunkt (Abb. 3-11 Punkt *b*) des Balkens definiert. Anfangs- und Endpunkt ergeben sich aus den Auflagerbedingungen bzw. Anschlüssen mit den anderen Tragwerkselementen (s. Abb. 4-13 bis 4-19). Bei dem Anschluss des Balkens an den Stab oder ein anderes Linienelement wird der Knotenpunkt an der Kreuzung der Längsachsen der beiden Tragwerkselemente konstruiert (Regel in Kap. 4.3.2 – Typ-A).

### 4.4.4 Plattendecken

Plattendecken sind als 2D-Flächenelemente-Platte mit ebener Mittelfläche definiert (Regel in Kap. 3.3.5). Geometrische Regeln für die Platte sind  $l_1$  und  $l_2 \geq 5t$ , wie in Abbildung 3-16 schematisch dargestellt. Die Mittelfläche ist mit den Randabgrenzungslinien  $l_1$  und  $l_2$  definiert (s. Abb. 3-16 und Abb. 4-22 bis 4-29) und Plattendicke  $t$  wird als Eigenschaft der Mittelfläche im Statik-Programm eingegeben. Der Anschluss der Platte mit anderen Tragwerkselementen wird entlang der gemeinsamen Linie durchgeführt, die in der Kreuzung der Elemente entsteht (Regel s. Kap. 4.3.3).

### 4.4.5 Exzentrische Anbindung von den Trägern oder Plattendecken

Tragwerkselemente, die sich nicht in der gleichen Ebene mit sich anschließenden Tragwerkselementen befinden, können mithilfe der Exzentrizität angeschlossen werden. Die exzentrische Anbindung der Platte an den Balken ist in Kap. 4.3.3 unter dem Typ-B-1 definiert (s. Abb. 4-26 bis 4-28). Die exzentrische Anbindung des Balkens an den Stab ist in Kap. 4.3.4 beschrieben (s. Abb. 4-35 bis 4-37).

### 4.4.6 Tragende Wände

Diese sind als 2D-Flächenelemente-Scheibe mit ebener Mittelfläche definiert (Regel in Kap. 3.3.6). Geometrische Regeln für die Scheibe sind  $l_1$  und  $l_2 \geq 5t$ , wie in Abbildung 3-18 schematisch dargestellt. Die Mittelfläche ist mit den Randabgrenzungslinien  $l_1$  und  $l_2$  definiert (s. Abb. 3-18) und

## 4 Definition der Interpretationsregeln anhand der Pilotstudie

die Scheibendicke  $t$  wird als Eigenschaft der Mittelfläche im Statik-Programm eingegeben. Der Anschluss der Scheibe mit anderen Tragwerkselementen wird entlang der gemeinsamen Linie durchgeführt, die in der Kreuzung der Elemente entsteht (Regel s. Kap. 4.3.3). Wenn die tragenden Wände auf den Streifenfundamenten lagern, werden sie im Statik-Modell als Scheiben auf Linienlager gelagert (Regel in Kapitel 3.4.4) interpretiert.

### 4.4.7 Bodenplatte

Bodenplatten sind als 2D-Flächenelemente-Platte mit ebener Mittelfläche definiert (Regel in Kap. 3.3.5) und das Modell ist in Abb. 4-38 dargestellt. Geometrische Regeln für die Platte sind  $l_1$  und  $l_2 \geq 5t$ , wie in Abbildung 3-16 schematisch dargestellt. Die Auflagerung der Bodenplatte auf dem Untergrund erfolgt über das Flächenlager (Regel in Kap. 3.4.5 definiert).

#### Anmerkung

Am Ende des Kapitels 3.3 sind in Tabelle 3-2 die geometrischen Interpretationsregeln der Tragwerkselemente anhand von Abmessungen zusammengefasst.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

Drei Teststudien (Statik-Modelle) der Produktionshallen werden mithilfe der bereits in den Kapiteln 3 und 4 definierten Interpretationsregeln und anhand von vorhandenen Architekturentwürfen selbst nachmodelliert. Aus verschiedenen Ingenieurbüros werden Unterlagen (Architektur Entwurfspläne, Statik-Modelle) für die Teststudien erworben. Die in Kapitel 5 selbst nachmodellierten Statik-Modelle der Hallen werden nachher im nächsten Kapitel 6 mit den Modellen aus den Ingenieurbüros verglichen. Im Vergleich wird überprüft, was mit den vorgeschlagenen Interpretationsregeln übereinstimmt, was fehlt, was anders und was gleich ist. Zwischen den Teststudien und der Pilotstudie werden dieselben Prinzipien und Ähnlichkeiten in den Interpretationen von Tragwerksmodellierung angewendet.

Um die konkreten Interpretationsregeln besser analysieren zu können und auch zu Vergleichszwecken, werden ähnliche Objekte von Produktionshallen untersucht. Zur weiteren Erforschung der Interpretationsregeln, werden auch Unterschiede zwischen den drei Objekten untersucht. Eine Übersicht der drei Teststudien und die einzelnen Ähnlichkeiten und Unterschiede sind in der Tab. 5-1 dargestellt.

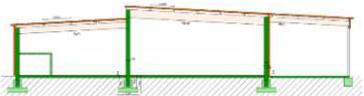
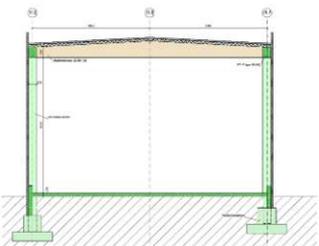
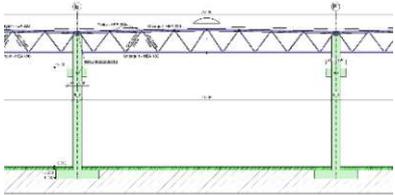
	Teststudie	Ähnlichkeiten	Unterschiede
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>Der Aufbau des Tragwerkes erfolgt mit den ähnlichen Bauteilen.</li> <li>Alle drei Objekte weisen geometrische Ähnlichkeiten auf.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Teststudie Nr. 2 ist eine einschiffige Halle, wobei die Teststudien Nr. 1 und Nr. 3 dreischiffige Hallen sind.</li> <li>Die Dachkonstruktion der Teststudie Nr. 1 und Nr. 3 besteht aus dem Hauptträger und Nebenträger (Pfetten). In der Teststudie Nr. 2 sind keine Nebenträger (Pfetten) geplant.</li> </ul>
2		<ul style="list-style-type: none"> <li>Das Statik-Konzept der Teststudien ist ähnlich aufgebaut.</li> <li>Die Abmessungen der vertikalen Bauteile geben ähnliche Maße an.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ganze Dachkonstruktion ist in der Teststudie Nr. 3 aus Stahl geplant. Im Gegensatz dazu ist die Dachkonstruktion der Studien Nr. 1 und Nr. 2 aus Holz gefertigt.</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>Die Materialauswahl für vertikale Bauteile und Fundamente ist bei allen drei Objekten gleich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>In der Teststudie Nr. 1 und Nr. 2 sind die Stützen in Köcherfundamenten eingespannt, wobei in der Teststudie Nr. 3 die Stützen auf Blockfundamenten gelagert sind.</li> </ul>

Tabelle 5-1 - Übersicht der Teststudien

### 5.1 Teststudie 1

Als erstes wird zur Übersicht die zugehörige Architekturplanung schematisch angeführt. Dieser (Abb. 5-1 und Abb. 5-2) wurde ausschließlich für die Forschungszwecke dieser Masterarbeit zur Verfügung gestellt.

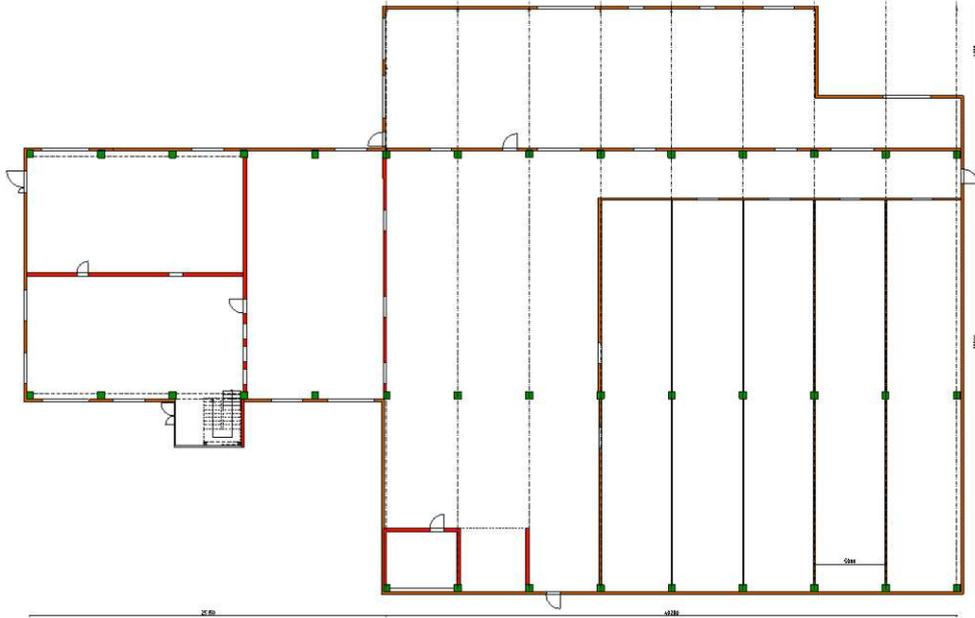


Abbildung 5-1 – Grundriss: Entwurf (ARCH)

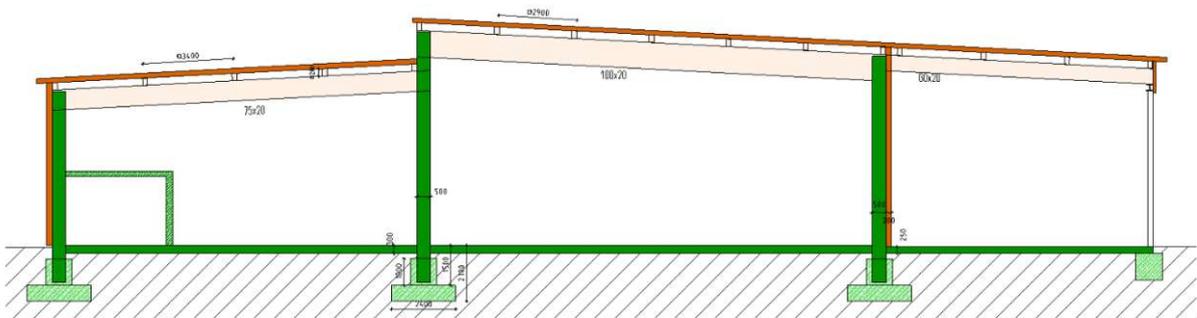


Abbildung 5-2 - Schnitt: Entwurf (ARCH)

### 5.1.1 Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners

In diesem Kapitel wird das Statik-Konzept der Halle beschreiben. Diese Aufzeichnung dient dazu, ein tieferes Verständnis für die einzelnen Beziehungen im Tragwerk zu gewinnen, die dann bei der Statik-Modellbildung verwendet werden. Alle Annahmen zum Tragwerk wurden nur aus dem Entwurf abgeleitet. Am Ende dieser Aufzeichnung wird eine Tabelle angeführt, in der die Interpretationen der tragenden Bauteile zusammengefasst sind. Für eine bessere Orientierung im Konzept wurden die Halle in drei Bereiche (Produktion, Verwaltung, Logistik) aufgeteilt (s. Abb. 5-3).



Abbildung 5-3 - Zuordnung der Bereiche (eigene Darstellung)

- Das Tragwerk der Halle besteht aus dem tragenden Skelett, das wiederum hauptsächlich aus den Stützen und den Balken zusammengesetzt ist. Die Außenhülle der Halle besteht laut der Legende aus Paneelen, die Gründung aus Flachfundamenten. Innenräume sind mittels Zwischenwänden gegliedert.
- In den Plänen ist kein genaues Achsraster sichtbar. Im Bereich der Produktion sind nur Strich-Punkt-Linien entlang der Stützenachse ersichtlich. Eine genaue horizontale und vertikale Gliederung des Baukörpers mit dem beschrifteten Achsraster ist nicht erkennbar.
- Das Dach der Halle ist als Holzkonstruktion entworfen, bestehend aus Hauptträgern und Nebenträgern.
- Die Hauptträger sind als BSH-Vollholzbinder in den Schnitten abgebildet. Hauptträger sind auf den Stahlbetonstützen aufgelagert. In dem Schnitt ist erkennbar, dass die Hauptträger in den Randfeldern andere Querschnittsabmessungen (ca. 75 x 20 und ca. 60 x 20) als im mittleren Feld (ca. 100 x 20) aufweisen.
- Die Nebenträger spannen in Querrichtung zwischen den Hauptträgern. Sie sind wie Hauptträger aus Brettschichtholz konstruiert. Aus dem Schnitt wurde abgeleitet, dass ein Nebenträger einen Rechteckquerschnitt von ca. 28 x 18 cm besitzt. Der Zwischenabstand der Nebenträger liegt im Bereich von 2,9 m bis 3,4 m.
- Die Stützen bestehen aus Stahlbeton.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

- Es ist ersichtlich, dass die Stützen in Köcherfundamenten eingespannt sind. Daher handelt es sich aus statischer Sicht um die Kragstützen (37 Stk.). Der Stützenquerschnitt ist als Viereck von 50 x 50 cm dargestellt.
- Im Entwurf sind keine Verbände als Aussteifungselemente sichtbar. Die horizontalen Einwirkungen (Wind, Erdbeben, etc.) werden mithilfe der Kragstützen übernommen. In der Dachebene werden vermutlich im Weiteren nach Anfertigung der statischen Berechnung die Verbände vom Tragwerksplaner noch angeordnet.
- Die Fundierung erfolgt über die Köcherfundamente, die Bodenplatte und die Streifenfundamente.
- Bei den Köcherfundamenten kann nicht beurteilt werden, ob ein Köcher mit glatter oder mit profilierter Oberfläche vorliegt.
- Die FUK der Köcherfundamente liegt bei etwa -2,1 m, die FOK (KUK) bei -1,5 m und die KOK bei -0,5 m (s. Abb. 5-4). Es wird angenommen, dass die untere Fundamentplatte der Köcherfundamente quadratisch (ca. 2,4 m x 2,4 m) entworfen ist.
- Streifenfundamente sind unter den Mauerwerkswänden und am Rand der Halle



Abbildung 5-4 – Abmessungen der Bodenplatten und der Köcherfundamente

- Die Bodenplatte weist Stärken von 30 cm und 25 cm auf (Abb. 5-5).

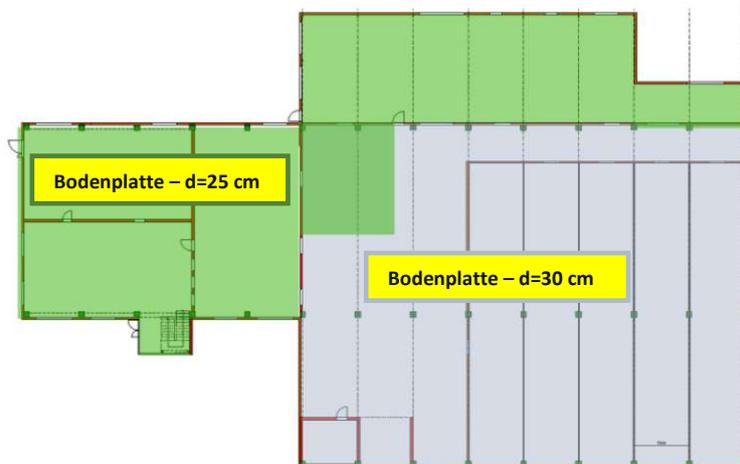


Abbildung 5-5 – Stärken der Bodenplatten

- Der Verwaltungsbereich (grüner Teil in Abb. 5-3) der Halle besteht aus zwei Geschossen. Im Erdgeschoss sind tragende MWK-Wände zu sehen. Die Decke über dem Erdgeschoss ist als Stahlbetondecke ( $t = 25 \text{ cm}$ ) gezeichnet. Diese lagert auf den Unterzügen zwischen den Kragstützen und MWK-Wänden.
- Die Stiege im Verwaltungsbereich sind aus Stahlbeton gezeichnet. Es kann nicht beurteilt werden, ob die Stiege als Fertigteil oder in Ortbetonbauweise geplant sind.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

Eine Zusammenfassung der tragenden Bauteile, die der Architekt im Entwurf gezeichnet hat, ist im linken Teil der Tabelle 5-2 zu sehen. Eine entsprechende Zusammenfassung, die der Tragwerksplaner als Tragwerkselemente oder Auflager im Statik-Modell interpretiert, befindet sich in Tabelle 5-2 im rechten Teil. Diese Tabelle basiert auf den Interpretationsregeln der Tragwerkselemente, die in Kapitel 3 und auch Kapitel 4 bereits definiert wurden. Weiters gibt diese Tabelle zusätzlich Interpretationen der Materialkennwerte an. Im linken Teil der Tabelle ist ersichtlich, wie der Architekt im Architekturplan bzw. Architekturmodell Material definiert. Im rechten Teil der Tabelle ist dargestellt, wie der Tragwerksplaner dieses Material interpretiert. Die Betongüte, Holzklasse sowie Mauerwerksklasse werden aus Sicht des Tragwerksplaners laut entsprechenden Eurocodes eingeordnet. Die Eurocodes stellen europaweit Normen und Regeln für die Bemessung der Tragwerke im Bauwesen dar.

ARCHITEKTUR			TRAGWERKSPLANUNG		
BAUTEIL	MATERIAL	MAß	TRAGWERKSELEMENT LAUT KAP. 3.3	MATERIAL	DIMENSIONALITÄT
Stütze	StB	50 x 50	Stab	C 40/50	1D-LINIENELEMENT
Hauptträger	BSH	20/100, 20/75, 20/60	Balken	GL28h	1D-LINIENELEMENT
Nebenträger	BSH	18/28	Balken	GL28h	1D-LINIENELEMENT
Wand	MWK	25	Scheibe	Ziegel Gruppe 3, M5	2D-FLÄCHENELEMENT
Decke über EG	StB	25	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
Bodenplatte	StB	25, 30	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
Randträger	StB	40 x 30	Balken	C 30/37	1D-LINIENELEMENT
Stiegenlauf	StB	20	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
Podest	StB	20	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
			AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	[-]
Köcherfundament	StB	100 x 100 x 100, 240 x 240 x 60	Knotenlager: Einspannung		
Streifenfundament	StB	100 x 100, 50 x 100	Linienlager		
Anmerkungen:					
Mass ist in <i>cm</i> angegeben					
<i>b x h</i> - Betonquerschnitt					
<i>b/h</i> - Holzquerschnitt					
<i>l<sub>1</sub> x l<sub>2</sub> x t</i> oder nur t-Plattenquerschnitt					
GL28h - Holzklasse nach EN 14080 und EC 5					
Ziegel Gruppe 3, M5 - nach EC 6					
C 30/37; C 40/50 - Betongüte nach EN 206-1 und EC 2					

Tabelle 5-2 – Teststudie 1 – Interpretationen der Bauteile

### 5.1.2 Interpretation der Bauteile – Details

Der Hauptträger (Dachbinder) ist als Balken (Regel laut 4.4.3) interpretiert. Dieses Linienelement benötigt eine Definition des Anfangspunkts und des Endpunkts. Der Anfangspunkt wird anhand der geometrischen Regel (Kap. 4.3.2 Typ-A) am Übergang zwischen Randstütze und Dachbinder konstruiert (s. Abb. 5-6). Es wird angenommen, dass die Auflagerung des Binders an die Stütze zentrisch erfolgt. Es werden die Mittelachsen der Stütze und der Hauptträger konstruiert und danach Knotenpunkte an der Kreuzung der Mittelachsen gebildet.

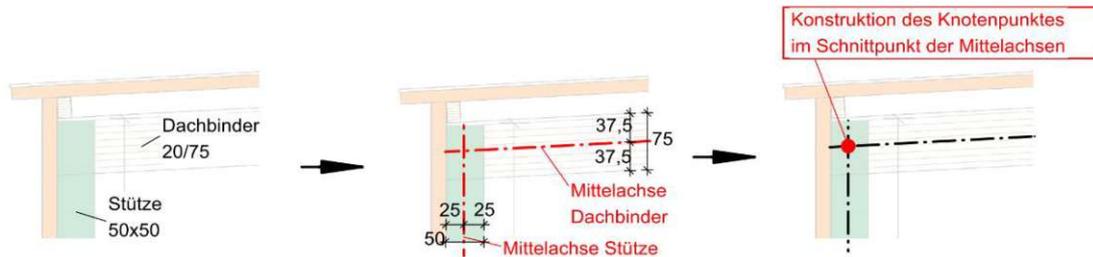


Abbildung 5-6 – Anschluss des Binders an die Randstütze

Der Anschluss des Binders an die Randstütze im Statik-Modell zeigt die Abbildung 5-18 im nächsten Kapitel 5.1.3. Der Endpunkt des Dachbinders wird nach demselben Prinzip als Anfangspunkt konstruiert (Abb. 5-7).

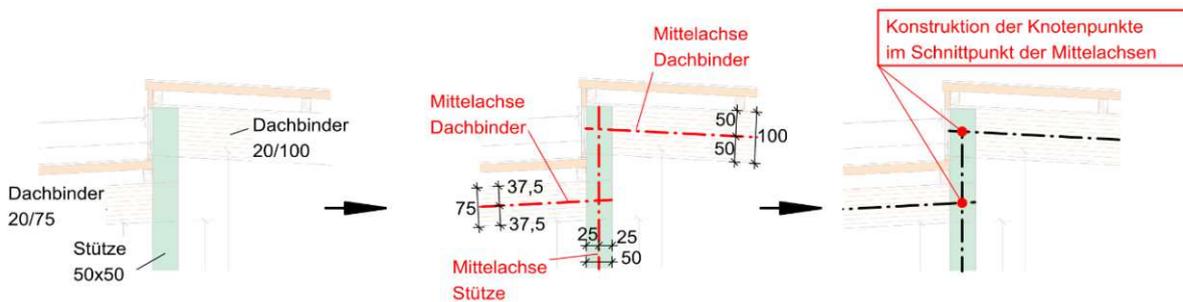


Abbildung 5-7 – Anschluss des Binders an die Mittelstütze

Wenn die Anfangs- und Endpunkte fertig sind, wird zu den Mittelachsen der Balken mit dem Trägerquerschnitt zugewiesen (Abb. 5-8).

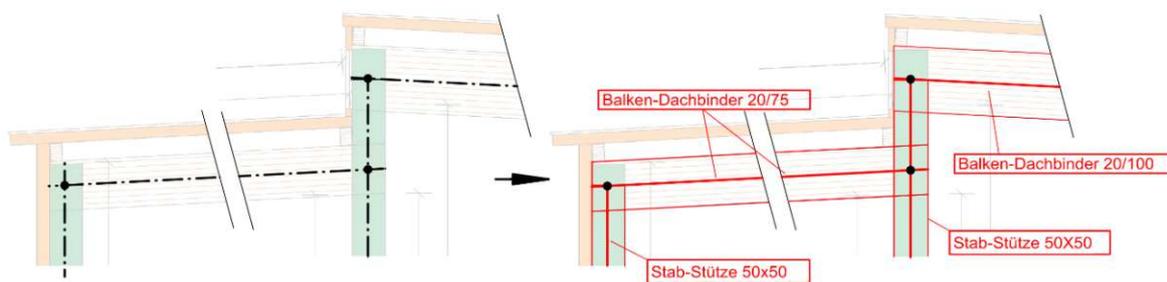


Abbildung 5-8 – Erzeugung der Stäbe

In Abbildung 5-8 ist schon der obere Bereich der Stützen ersichtlich. Stützen sind als Stäbe (Regel Kap. 4.4.1) interpretiert. Der Anschluss der Binder an die Mittelstützen ist im Statik-Modell in der Abbildung 5-19 im nächsten Kapitel 5.1.3 dargestellt. Es wird angenommen, dass die Stützen in den Köcherfundamenten mit profilierter Oberfläche eingespannt sind. Der untere Knotenpunkt der

Stützen wird daher an der Köcheroberkante konstruiert (Regel laut Kap. 4.4.2). Die Interpretation des Köcherfundamentes ist in der Abbildung 5-9 zu sehen.



Abbildung 5-9 – unterer Stützen Knotenpunkt + Köcherfundament

Die Einspannung ist im Statik-Modell als grünes Viereck unter den Stützen im nächsten Kapitel (Abb. 5-15 bis 5-20) abgebildet.

Nebenträger, die die Dachhaut tragen, spannen zwischen den Hauptträgern. Nebenträger werden als Balken interpretiert (Regel in Kap. 4.4.3) und sind in der Realität auf dem Obergurt des Dachbinders befestigt. Um eine realitätsnahe Verbindung des Dachbinders mit dem Nebenträger zu ermöglichen, werden diese Balken mit exzentrischer Anbindung konstruiert (Regel 4.4.5). Die Modellbildung des Nebenträgers ist in Abb. 5-10 ersichtlich.

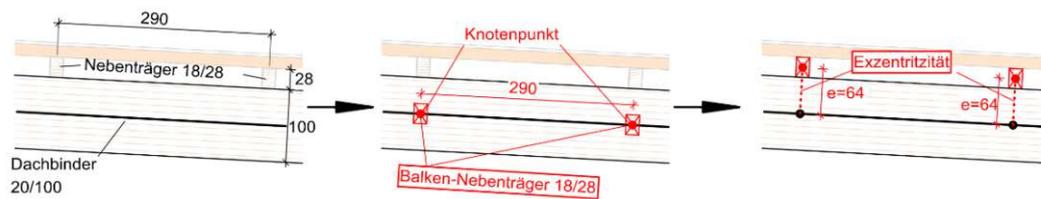


Abbildung 5-10 – Konstruktion der Nebenträger

### Zubau

In der Halle ist ein kleiner Zubau mit einer Stahlbetondecke und Mauerwerkswänden geplant. Diese werden als 2D-Flächenelemente interpretiert. Die Decke wird als Platte (s. Kap. 4.4.4) modelliert und die Wände als Scheiben (s. Kap. 4.4.6). Die Konstruktion des Statik-Modells und einzelne Details sind in Abbildung 5-11 bildhaft dargestellt. Zuerst werden die Mittellinien der Wände und der Decke konstruiert (Abb. 5-11: 2). Im Schnittpunkt der Linien werden die Knotenpunkte und die Schnittlinien erzeugt (Abb. 5-11: 3). Es entstehen Außenbegrenzungslinien, die die Flächen im Raum geometrisch definieren. Zwischen diesen werden die Decke, die Bodenplatte und die Wände (Abb. 5-11: 4) konstruiert. Das Statik-Modell des Zubaus zeigt Tabelle 5-3 in Kapitel 5.1.3.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

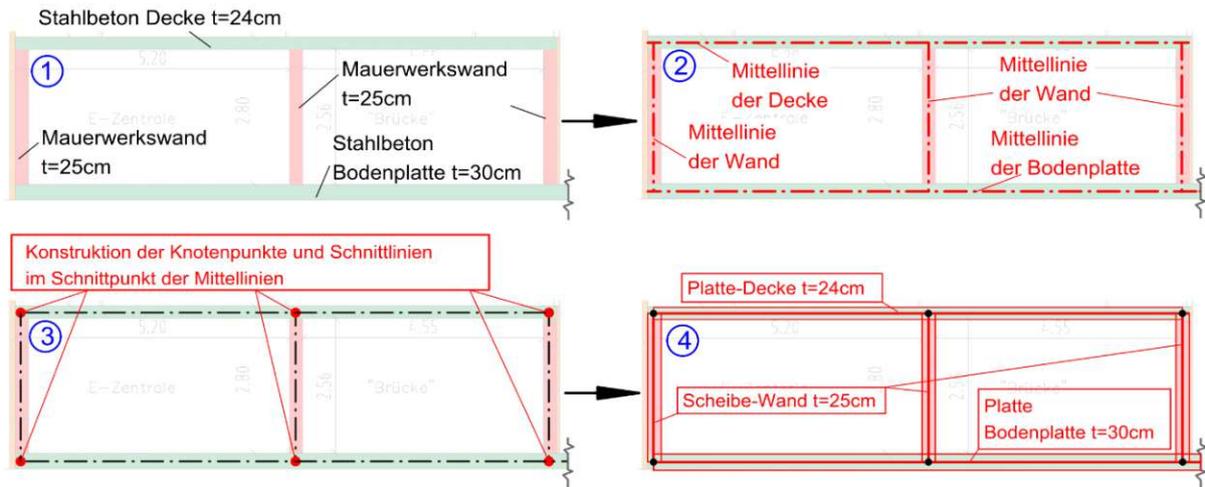


Abbildung 5-11 – Zubau in der Halle – Darstellung im Schnitt

Der Verwaltungsbereich der Halle besteht aus einem Erdgeschoss und einem Obergeschoss. Die Plattendecke über dem Erdgeschoss ist aus Stahlbeton abgebildet. Diese Decke ist auf Mauerwerkswänden und Randträgern aufgelagert. Die Decke wird als Platte (s. Kap. 4.4.4) modelliert und die Wände (s. Kap. 4.4.6) als Scheiben. Die Interpretation der Bauteile wird nach demselben Prinzip wie der vorherige Zubau durchgeführt (Abb. 5-12). Die Wände sind auf den Streifenfundamenten gelagert. Diese Streifenfundamente werden im Statik-Modell als Linienauflager interpretiert (Regel in Kap. 4.4.6).

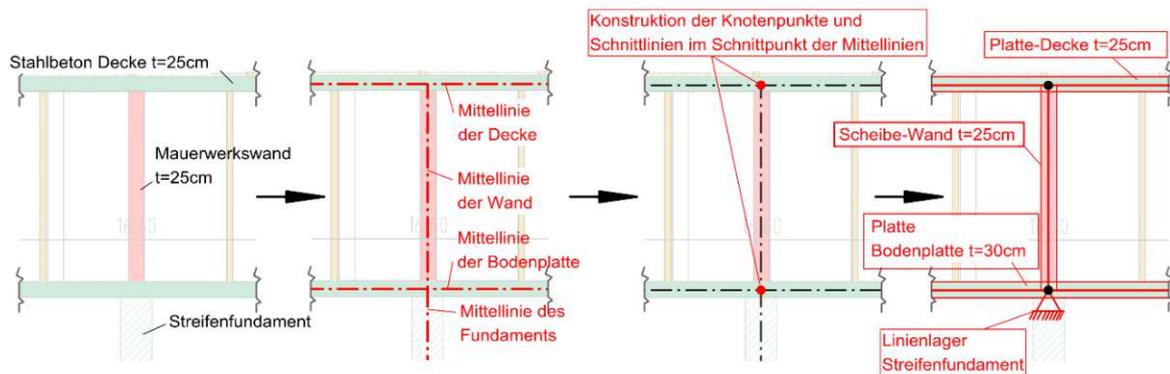


Abbildung 5-12 – Konstruktion der Flächenelemente im Verwaltungsbereich – Darstellung im Schnitt

### Stiege

Im Verwaltungsbereich der Halle befinden sich im Obergeschoss Stahlbetonstiege. Bei den Stiegen ist es immer wichtig zu untersuchen, welches Statik-Konzept angewendet wird. Es gibt Träger- und Plattensysteme der Stiege. Diese sind im Zusammenhang mit den verwendeten Materialien zu sehen (vgl. Pech et al. 2005, S. 24). Die Stiege bestehen im Entwurf aus den StB-Laufplatten und StB-Podesten. Daher werden die Stiege als Plattensystem interpretiert, bestehend aus den Laufplatten und den Podestplatten (Regel in Kap. 4.4.4). Stiege lagern auf den Randträgern, Stützen und Streifenfundament (Abbildung 5-13: 1). Randträger werden als Balken modelliert (Regel in Kapitel 4.4.3), Stützen als Stäbe (s. Kap. 4.4.1) und Streifenfundament als Linienlager (Regel in Kap. 3.4.4). Es werden Mittellinien der Platten sowie Stützen, Träger und Streifenfundamente konstruiert (Abbildung 5-13: 2). Danach werden Schnittpunkte und Schnittlinien im Schnittpunkt der Mittellinien gebildet und Außenbegrenzungslinien für die Platten definiert (Abbildung 5-13: 3). Zwischen den Außenbegrenzungslinien werden Plattenelemente konstruiert (Abbildung 5-13: 4). Das Statik-Modell der Stiege ist im nächsten Kapitel 5.1.3 in Tabelle 5-4 ersichtlich.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

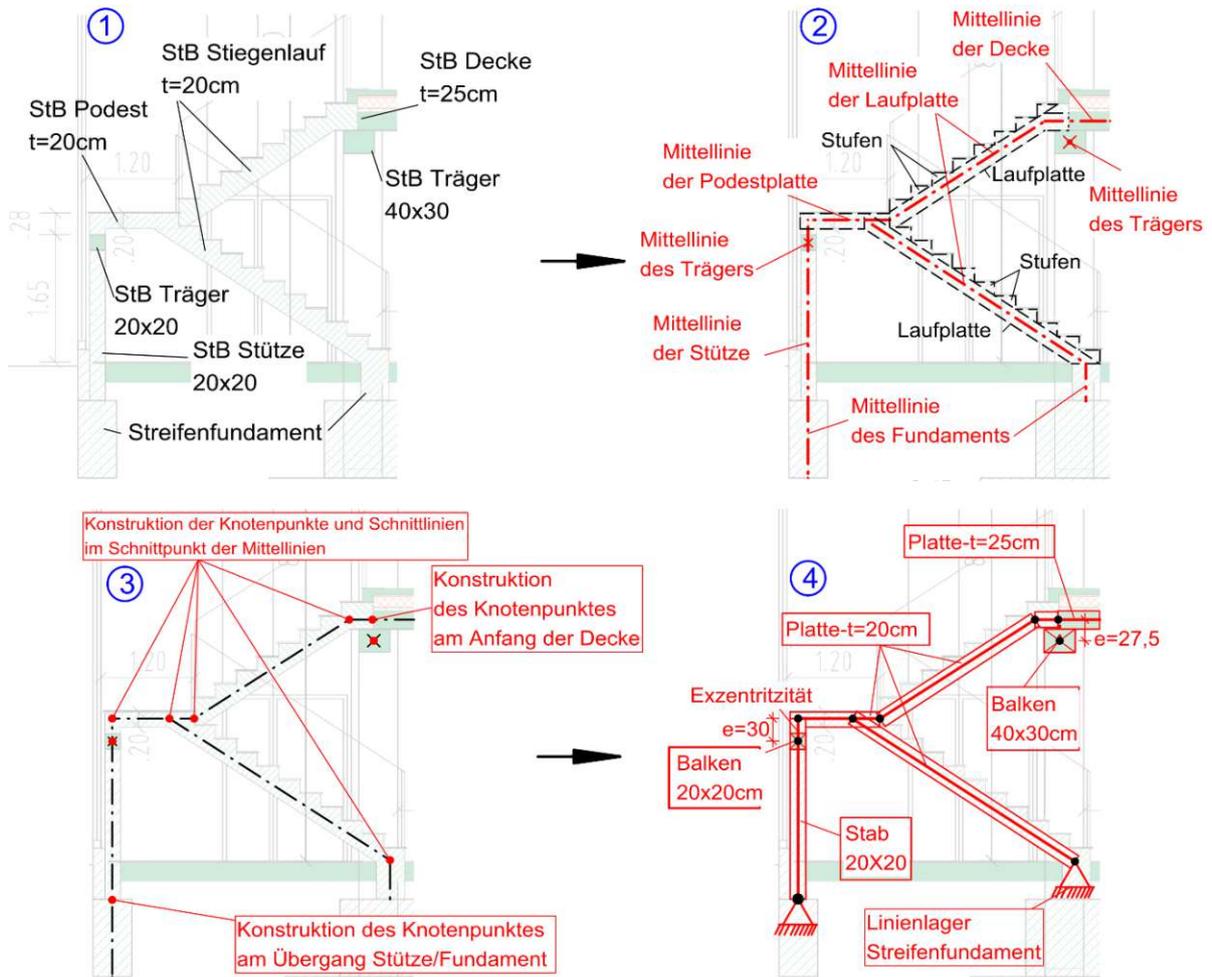


Abbildung 5-13 – Interpretation der Stiege

### 5.1.3 3D-FEM-Statik-Modell

Das Statik-Modell wurde mit definierten Interpretationsregeln (von Kap. 3 bis Kap. 5.1.2) selbst nachmodelliert und an den folgenden Abbildungen 5-14 bis 5-20 und in den Tabellen 5-3 und 5-4 dargestellt.

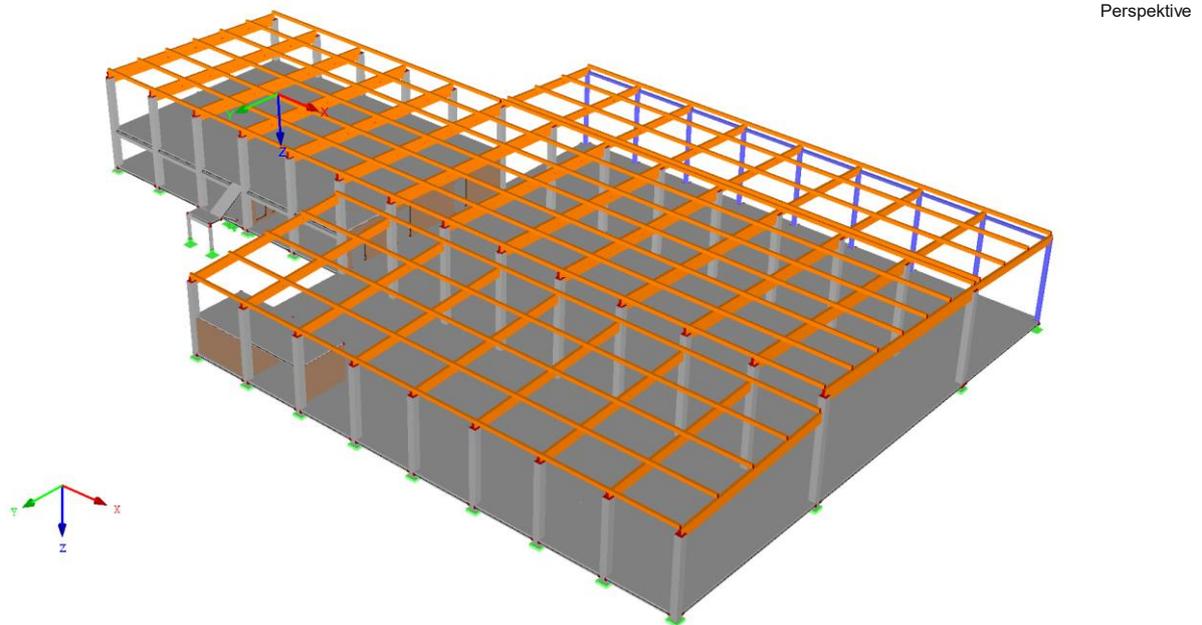


Abbildung 5-14 – Gesamtübersicht – Darstellung gefüllt

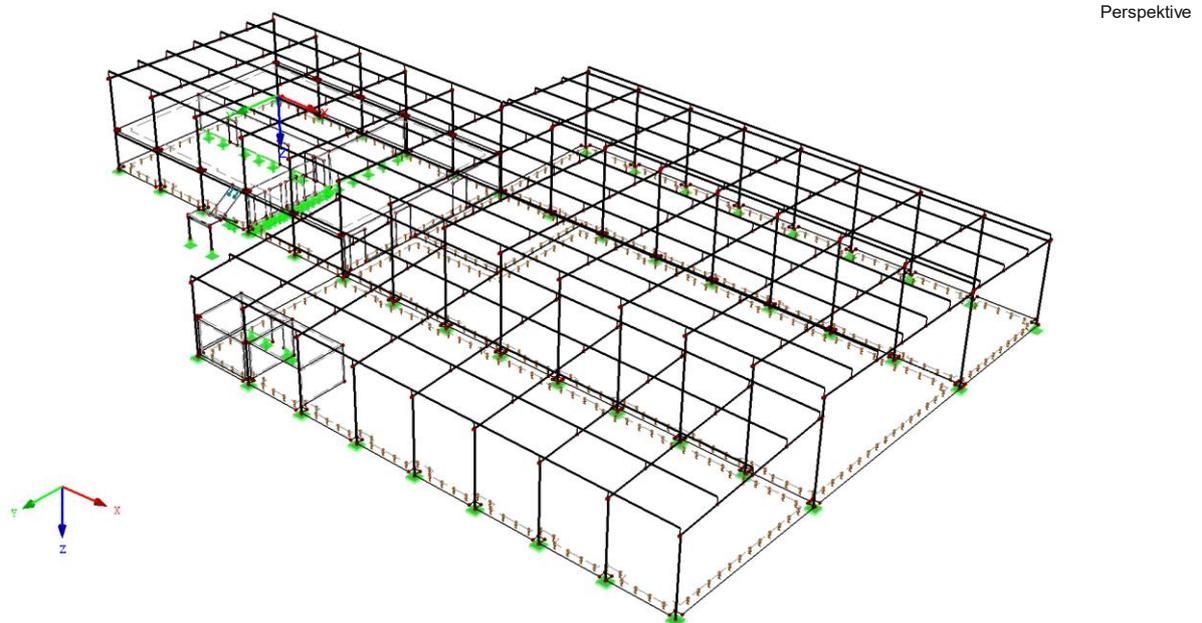


Abbildung 5-15 – Gesamtübersicht – Darstellung analytisch

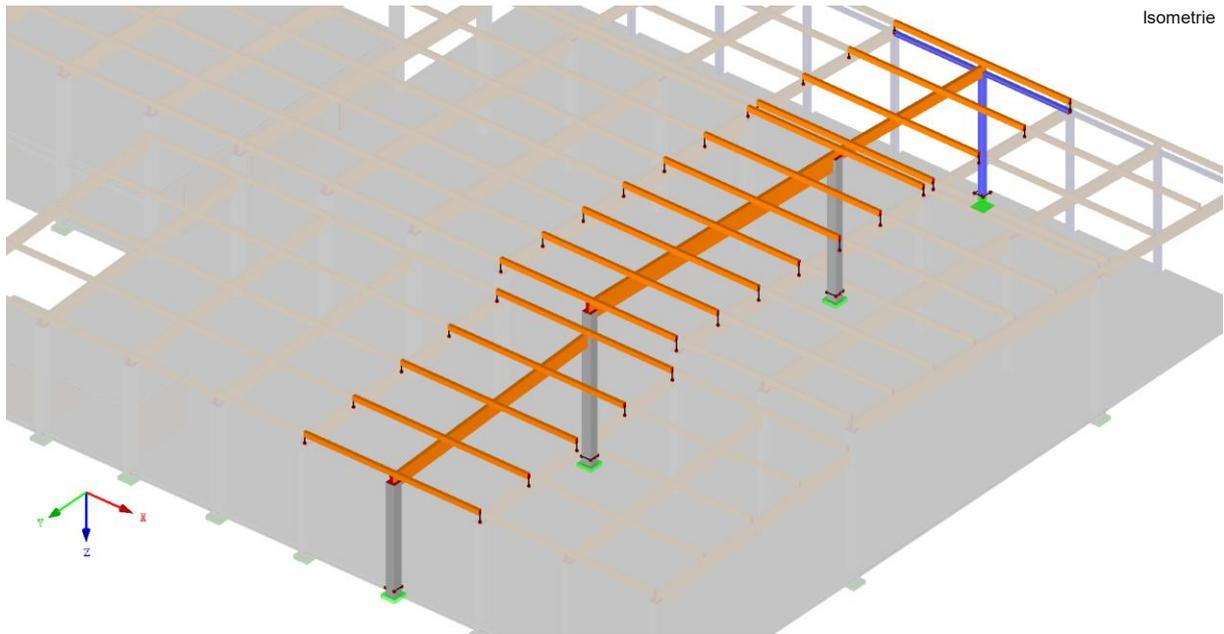


Abbildung 5-16 – Übersicht der Hauptrahmen und der Nebenträger, mit Exzentrizität modelliert

Entgegen der X-Richtung

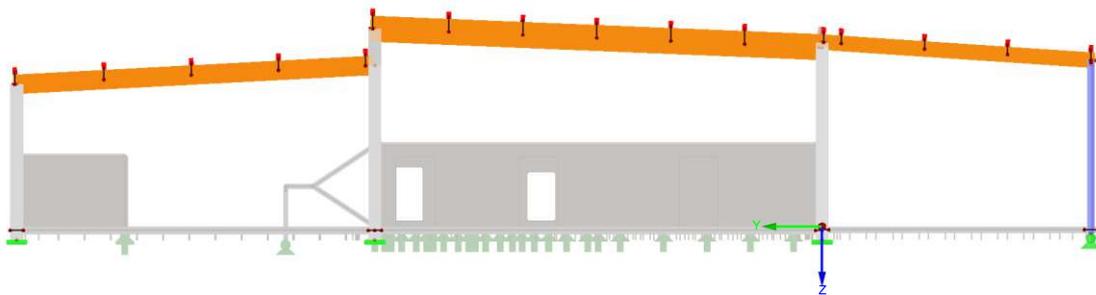


Abbildung 5-17 – Übersicht der Hauptrahmen und der Nebenträger, mit Exzentrizität modelliert

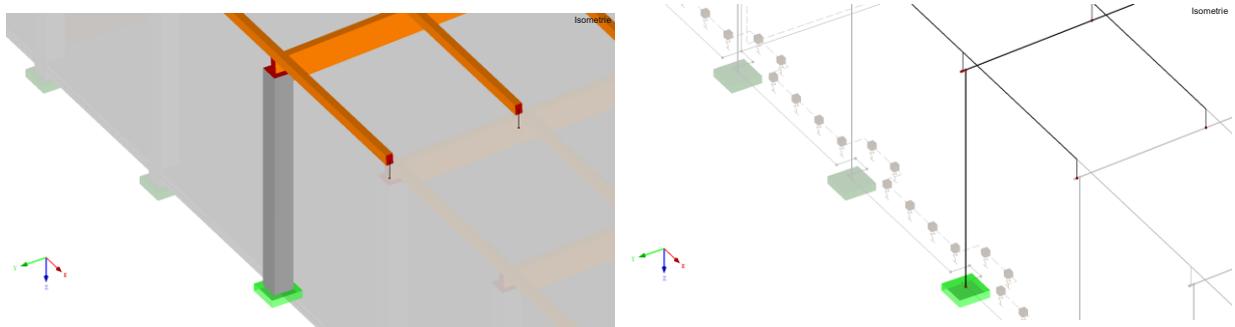


Abbildung 5-18 – Randstütze, Dachbinder und Nebenträger als 1D-Linienelemente interpretiert (links gefüllt, rechts analytisch)

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

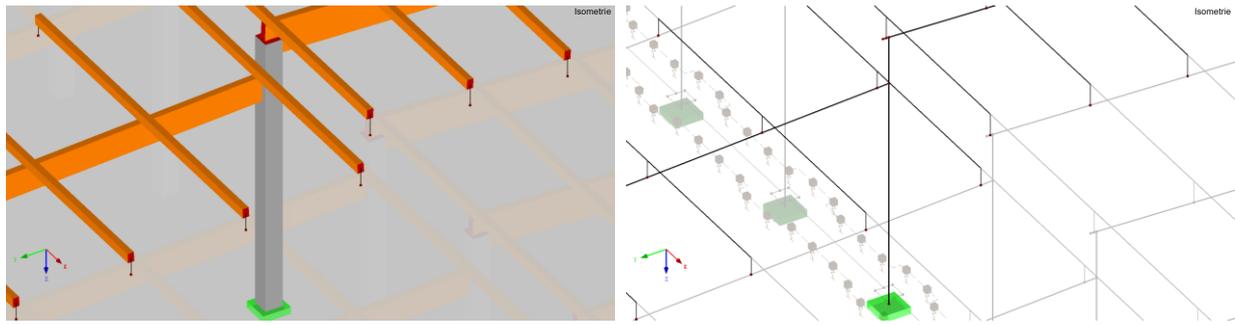


Abbildung 5-19 – Innenstütze, Dachbinder und Nebenträger als 1D-Linienelemente interpretiert (links gefüllt, rechts analytisch)

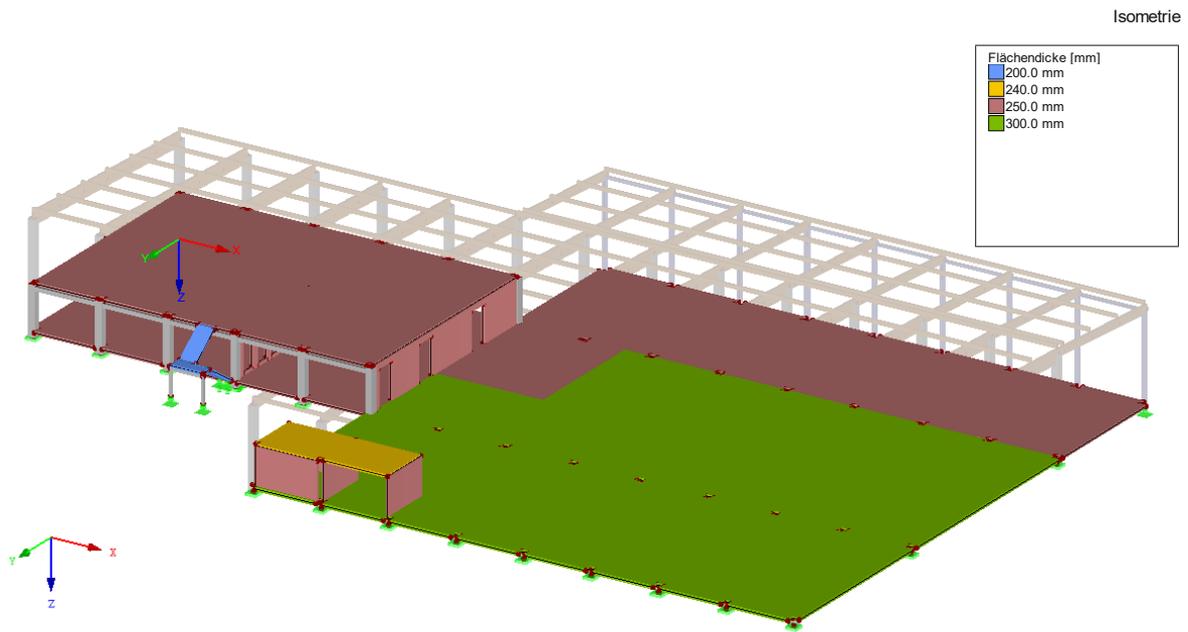


Abbildung 5-20 – Platten und Wandscheiben sind als 2D-Flächenelemente interpretiert und mit der Flächendicke dargestellt

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

In Tabelle 5-3 ist ein Statik-Modell des Zubaus zu sehen. Es wurden zwei isometrische Ansichten dargestellt und jeweils drei Arten der Darstellung angewendet.

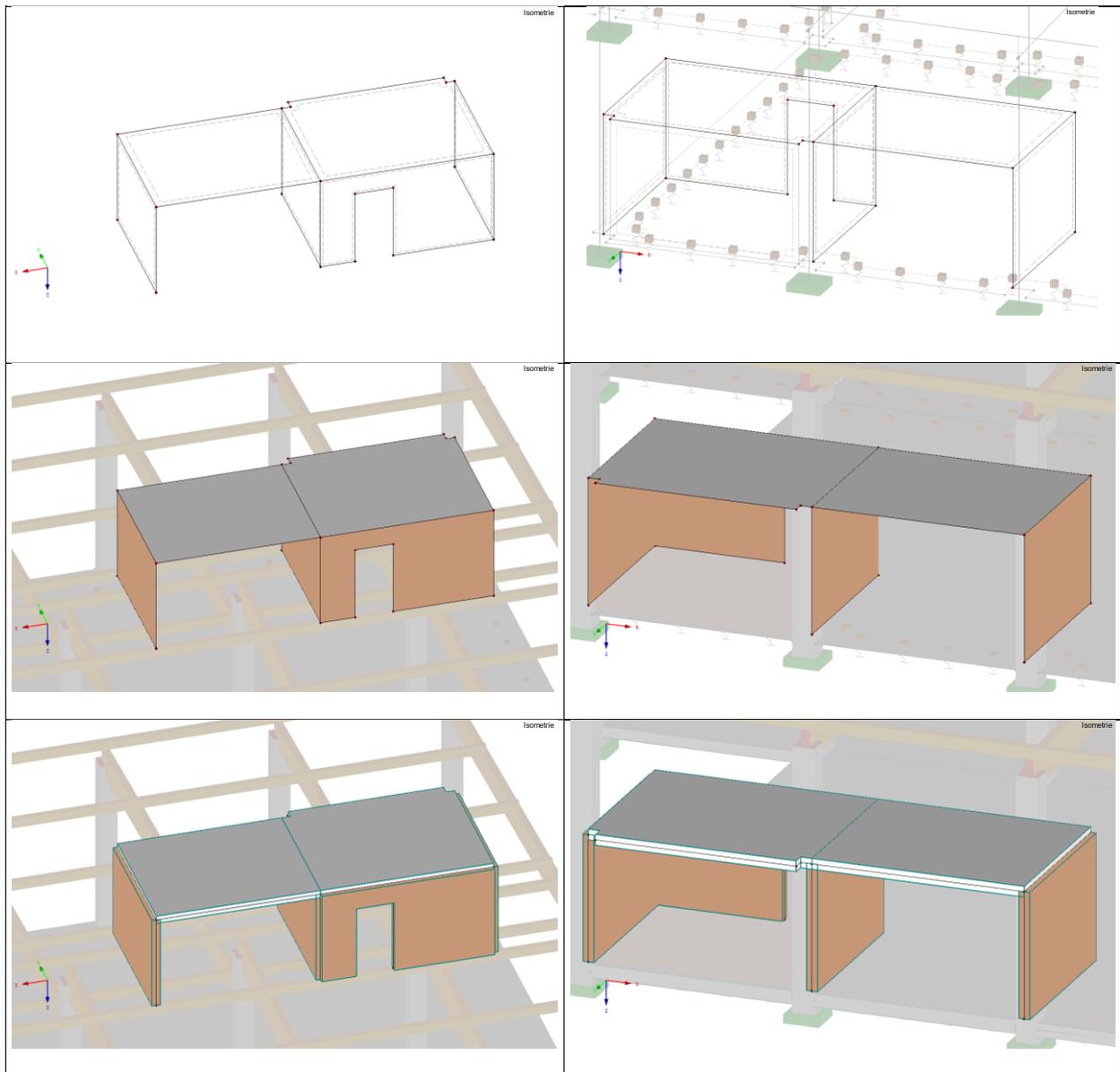


Tabelle 5-3 – Statik-Modell des Zubaus

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

In Tabelle 5-4 ist das Statik-Modell der Stiege dargestellt. Es wurden zwei Ansichten dargestellt und jeweils drei Arten der Darstellung angewendet.

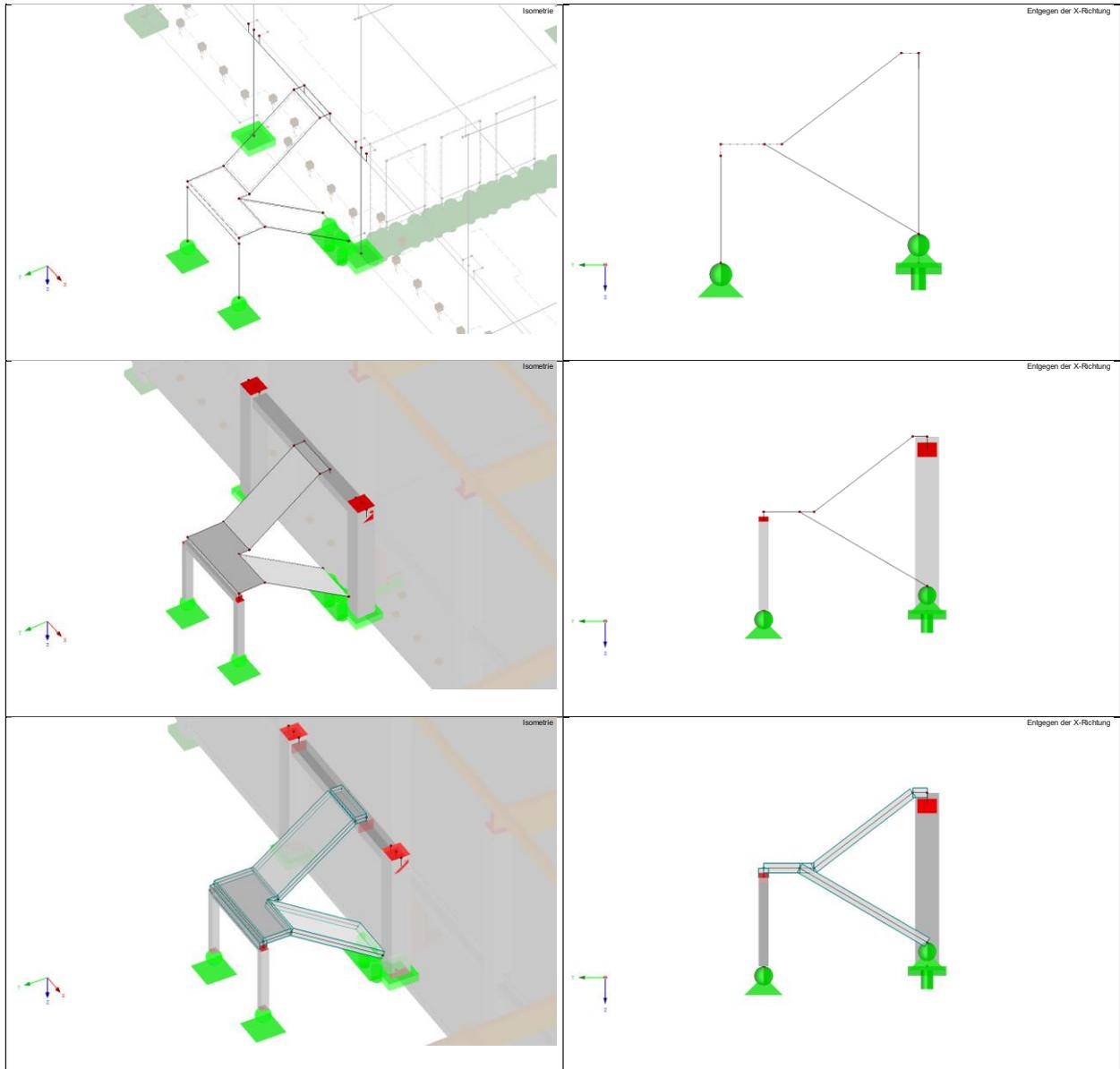


Tabelle 5-4 – Statik-Modell der Stiege

## 5.2 Teststudie 2

Als erstes werden zur Übersicht die zugehörigen Architekturunterlagen schematisch angeführt. Dieser (Abb. 5-21 bis 5-22) wurde ausschließlich für die Forschungszwecke dieser Masterarbeit zur Verfügung gestellt.

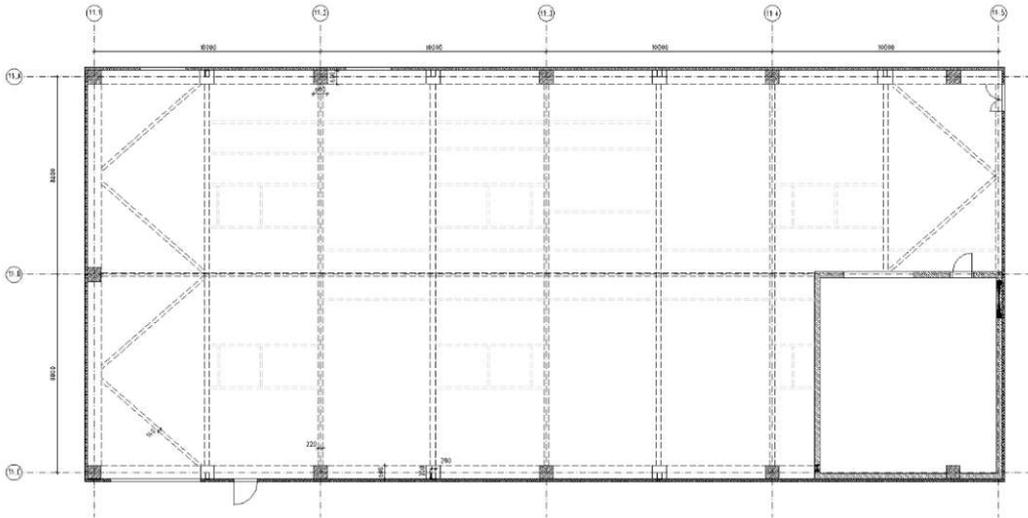


Abbildung 5-21 – Grundriss: Entwurf (ARCH)

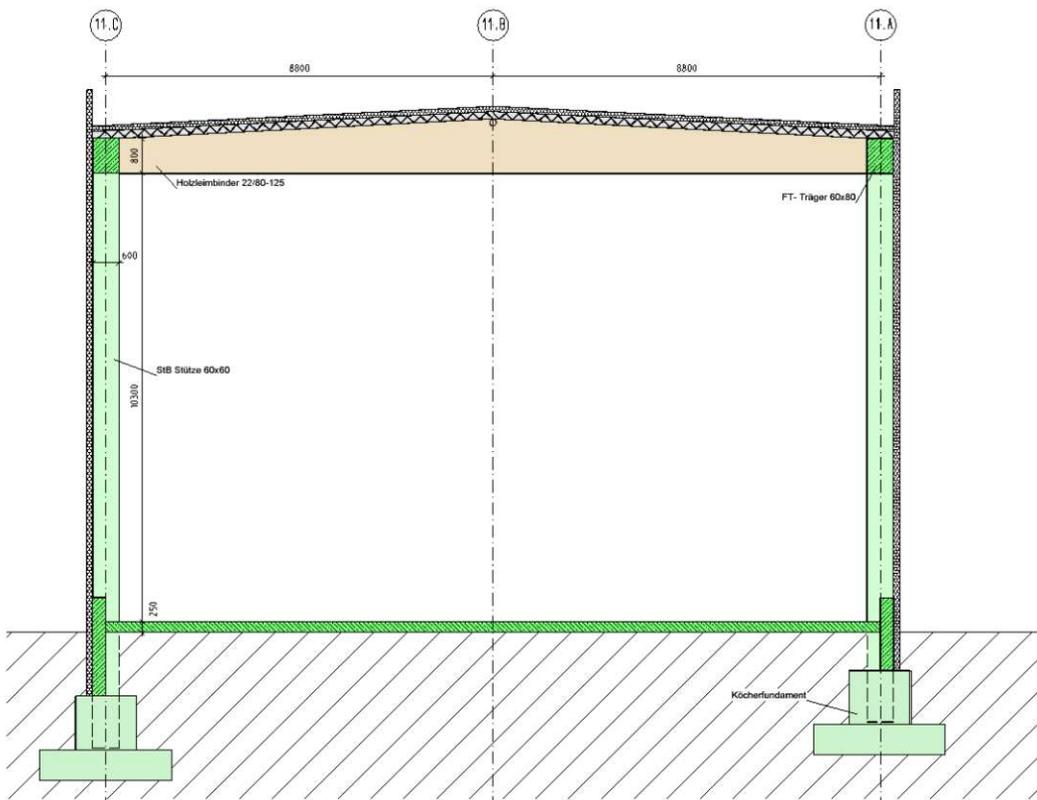


Abbildung 5-22 – Schnitt: Entwurf (ARCH)

### 5.2.1 Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners

Das Konzept in diesem Kapitel wurde nach demselben Stil wie in Kapitel 5.1.1 erstellt.

- Die Tragkonstruktion der Halle besteht aus dem tragenden Skelett, gebildet aus den Stützen und Trägern. Die Außenhülle der Halle besteht aus den Paneelen und die Gründung aus Flachfundamenten.
- Im Entwurf ist ein Achsraster sichtbar. Längsachsen (11.A bis 11.C) weisen einen Abstand von 8,8 m auf, Querachsen (11.1 bis 11.5) 10,0 m.
- Das Haupttragwerk der Halle besteht aus Stahlbeton-Fertigteilen, die Hauptträger (Holzleimbinder) und Aussteifungsverbände in der Dachebene aus Stahl.
- Zur Übersicht sind in Abbildung 5-23 FT-Träger rot markiert, Hauptträger (Holzleimbinder) braun und der Stahlverband blau.
- FT-Träger (60 x 80) lagern auf den Fertigteilstützen am Rande der Halle umlaufend. Zwischen diesen Fertigteilträgern spannen in Querrichtung Hauptträger (Holzleimbinder 22/80-125) im Abstand von 5,0 m. Es ist ersichtlich, dass die Hauptträger die Form des Satteldachbinders mit geradem Untergurt aufweisen. In Längsrichtung der Halle spannt über diese das Trapezblech als Dachhaut.
- In den Randfeldern der Dachkonstruktion ist der Aussteifungsverband aus Rundrohren (RO 139.7 x 3) sichtbar.

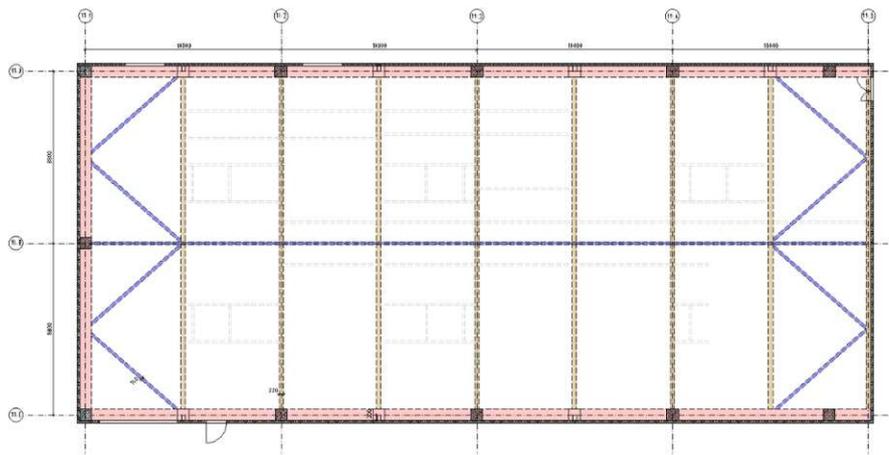


Abbildung 5-23 – Übersicht der Dachkonstruktion

- Im Entwurf sind StB-Stützen (60 x 60) und Stahlstützen (RRO 300 x 200 x 10) ersichtlich.
- Es lässt sich folgern, dass die StB-Stützen als Hauptstützen und für die Fassade Stahlstützen benötigt werden.
- StB-Stützen sind in den Köcherfundamenten eingespannt.
- Die Fundierung erfolgt über die Köcherfundamente, die Bodenplatte und Streifenfundamente.
- Die Köcher sind mit profilierter Oberfläche.
- Die KOK (Köcheroberkante) der Köcherfundamente liegt bei -0,50 m bei allen Stützen in der Längsachse 11.C sowie an der Kreuzung der Längsachse 11.A mit den Querachsen 11.1 und 11.2 (in Abb. 5-24 rot und violett dargestellt). An der Kreuzung der Längsachse 11.A mit den Querachsen 11.3 bis 11.5 liegt die FOK der Köcher bei +0,08 m (in Abbildung 5-24 gelb dargestellt).

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

- Bei den violett und gelb markierten Köcherfundamenten in Abbildung 5-24 betragen die Abmessungen der Fundamentplatte  $3,3 \times 3,0 \times 0,7$  m, bei den rot markierten  $3,5 \times 4,1 \times 0,8$  m.
- Die Bodenplatte ( $t = 25$  cm) hat die Oberkante auf  $+1,2$  m. Am Rande der Halle ist umlaufend eine Frostschräge ( $t = 30$  cm) geplant.
- Unter den Fassadenstützen befindet sich ein stabförmiges Einzelfundament mit den Abmessungen  $0,6 \times 0,6 \times 3,4$  m (in der Abbildung 5-24 blau dargestellt)

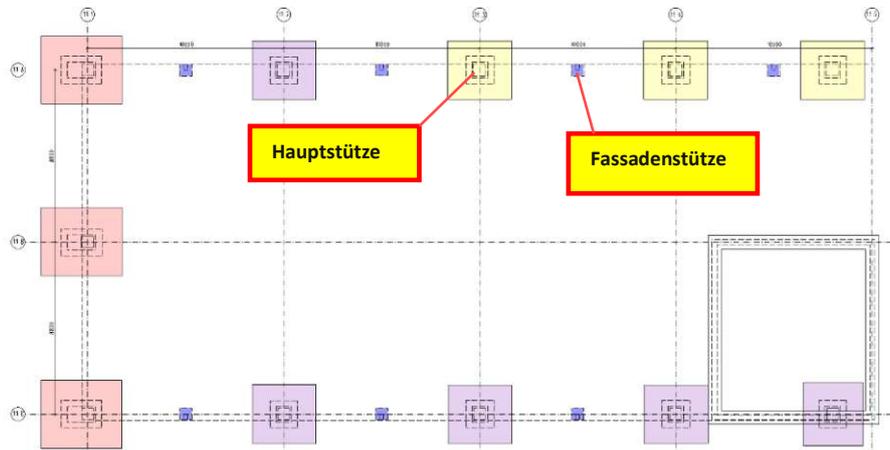


Abbildung 5-24 – Übersicht Fundierung

- Zwischen den Achsen 11.B und 11.4 bis 11.5 ist ein zweigeschossiger Raum (ca.  $9$  m  $\times$   $8$  m) in der Halle ersichtlich.
- Laut des Entwurfs handelte sich um eine Stahlbeton-Konstruktion, gebildet aus Stahlbetonwänden ( $t = 25$  cm, in Abbildung 5-25 gelb markiert) zwischen den Streifenbetonfundamenten (in Abbildung 5-25 lila markiert) und Stahlbetondecken ( $t = 25$  cm, in Abbildung 5-25 grün markiert), aufgelagert auf den Wänden.

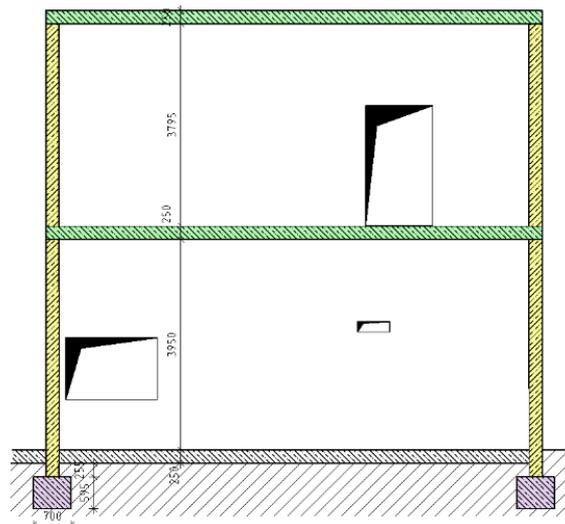


Abbildung 5-25 – Schnitt (ARCH)

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

Am Ende des Konzepts ist Tabelle 5-5 angeführt, die die Interpretationen der tragenden Bauteile zusammenfasst. Diese Tabelle wurde im gleichen Stil und mit gleichem Sinn wie Tabelle 5-2 in Kapitel 5.1 erstellt.

ARCHITEKTUR			TRAGWERKSPLANUNG		
BAUTEIL	MATERIAL	MAß	TRAGWERKSELEMENT LAUT KAP. 3.3	MATERIAL	DIMENSIONALITÄT
Stütze	StB	60 x 60	Stab	C 40/50	1D-LINIENELEMENT
Fassadenstütze	Stahl	30x20x1.0	Stab	S 235	1D-LINIENELEMENT
Hauptträger (Holzleimbinder)	BSH	22/80-125	Balken	GL28h	1D-LINIENELEMENT
FT Träger	StB	60 x 80	Balken	C 40/50	1D-LINIENELEMENT
Verband (Aussteifung)	Stahl	RO 13.97x0.3	Stab	S 235	1D-LINIENELEMENT
Wand	StB	25	Scheibe	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
Plattendecke	StB	25	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
Bodenplatte	StB	25	Platte	C 30/37	2D-FLÄCHENELEMENT
			AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	[-]
Köcherfundament	StB	140 x 140 x 125, 205 x 145 x 92, 325 x 300 x 70, 350 x 410 x 80	Knotenlager: Einspannung		
Streifenfundament	StB	60x70, 35x95	Linienlager		
Anmerkungen:					
Mass ist in <i>cm</i> angegeben					
<i>b x h</i> - Betonquerschnitt					
<i>b/h</i> - Holzquerschnitt					
<i>l<sub>1</sub> x l<sub>2</sub> x t</i> oder nur t-Plattenquerschnitt					
GL28h - Holzklasse nach EN 14080 und EC 5					
S 235 - Stahlgüte nach EN 10025 und EC 3					
C 30/37; C 40/50 - Betongüte nach EN 206-1 und EC 2					

Tabelle 5-5 – Teststudie 2 - Interpretationen der Bauteile

### 5.2.2 Interpretation der Bauteile – Details

An dieser Stelle werden die Übersichten mit der Statik-Modellbildung der Bauteile dargestellt. In Abbildung 5-26 ist zu sehen, wie Köcherfundamente als Einspannung der Stütze interpretiert sind (Regel in Kap. 4.4.2).

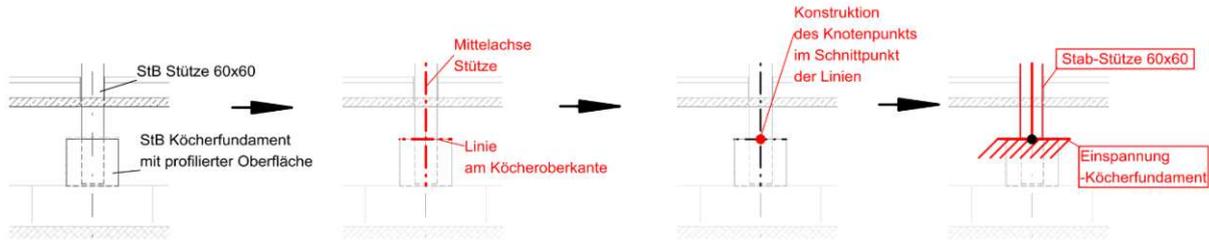


Abbildung 5-26 – Interpretation Einspannung Stütze (Ansicht)

Oberhalb der Stützen sind FT-Träger aufgelagert. Diese spannen zwischen den Stützen, die werden laut der Regel aus Kap 4.4.1 als Stäbe modelliert. In der Fassadenansicht in Abbildung 5-27 ist die Interpretation der Linienelementen (Stützen und Träger) dargestellt. Knotenpunkte sind an dem Schnittpunkt der Mittellinien der einzelnen Elemente konstruiert (Regel in Kap. 4.3.2 – Typ-A).

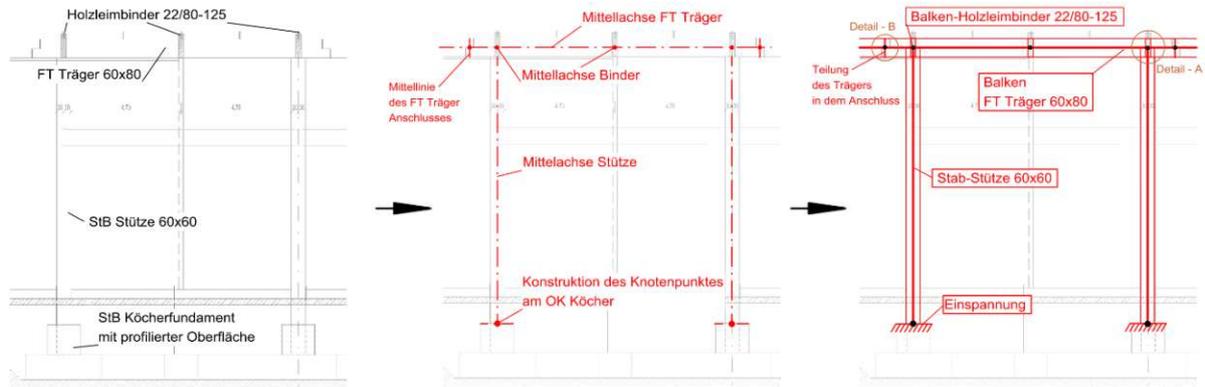


Abbildung 5-27 – Fassadenansicht

In Detail A (s. Abb. 5-28) ist der Anschluss des Hauptträgers an den FT-Träger im Bereich des Stützenkopfs genau erläutert. Der obere Knotenpunkt der Stütze, die auf die Mittellachse des FT-Trägers modelliert ist, bildet auch den Randknoten des Hauptträgers. Laut der Detailbildung ist der Binder exzentrisch an den FT-Träger angebunden. Bei dieser Modellbildung wurde eine Kombination der beiden Regeln aus Kap. 4.4.3 und 4.4.5 verwendet.

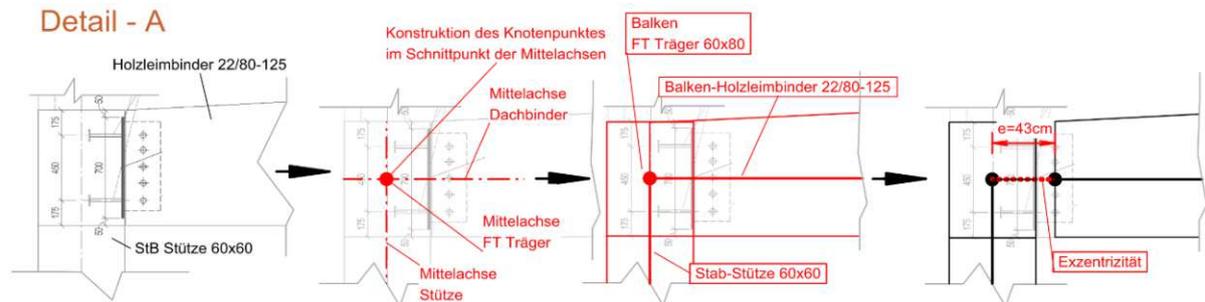


Abbildung 5-28 – Anschluss des Binders an den FT-Träger im Bereich der Stütze (Seitenansicht)

#### Trägeranschluss entlang der Trägerachse

Detail B (Abb. 5-29) stellt die Konstruktion des Trägeranschlusses zwischen den FT-Trägern dar. Der Anschluss ist mithilfe eines L-förmigen Ausschnitts im FT-Träger und in der Ankerstange ausgeführt.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

Der Anschluss wird so interpretiert, dass im Zentrum des Anschlusses der Träger mit dem Knotenpunkt geteilt wird.

### Detail - B

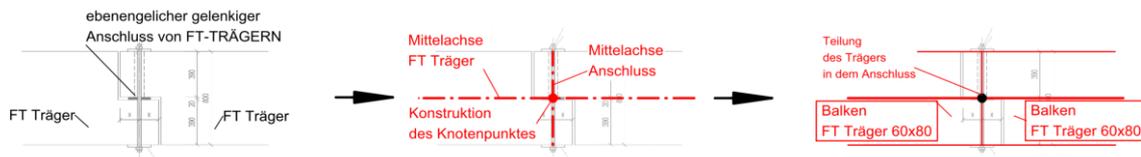


Abbildung 5-29 – Interpretation der FT-Träger-Verbindung im Statik-Programm (Gelenk im Knotenpunkt)

Die Fassadenstütze ist im oberen Bereich mit dem FT-Träger verbunden und auf dem stabförmigen Einzelfundament im unteren Bereich aufgelagert (s. Abb. 5-30). Stütze sowie Einzelfundament erfüllen die Kriterien des Stabes (s. Kap. 4.4.1). Der obere Knotenpunkt der Stütze wird an der Kreuzung der Mittelachse der Stütze und der Mittelachse des FT-Trägers erzeugt (Kap. 4.3.2 – Typ-A). Der untere Stützenknotenpunkt wird am OK-Einzelfundament platziert. Das Einzelfundament ist fest mit der Fundamentplatte verbunden, daher sind die Bedingungen für die Einspannung laut Kap. 3.4.1 erfüllt.

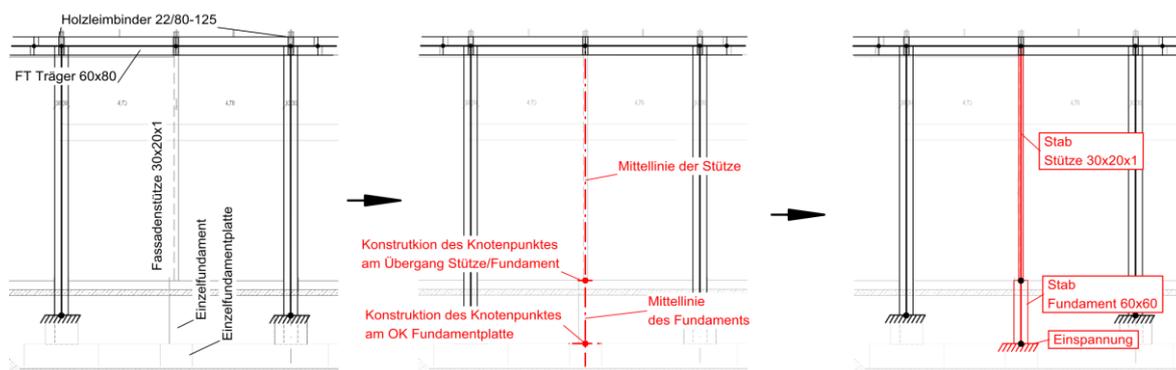


Abbildung 5-30 – Konstruktion der Fassadenstütze (Seitenansicht)

### Verband

Die Tragelemente des Dachverbandes sind Stäbe, die die Horizontalkräfte übertragen (Regel laut Kap. 3.3.2). Bedeutend ist, dass diese mit den anderen angrenzenden Elementen kraftschlüssig zusammenwirken. Es werden die Mittellinien des Dachverbandes konstruiert und mit vorhandenen Elementen an den Kreuzungspunkten die Knoten kreiert. An Knotenpunkte, die bereits vorhanden sind, werden die Achsen des Dachverbandes gebunden. Der ganze Prozess der Modellbildung des Verbandes ist in Abb. 5-31 dargestellt.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

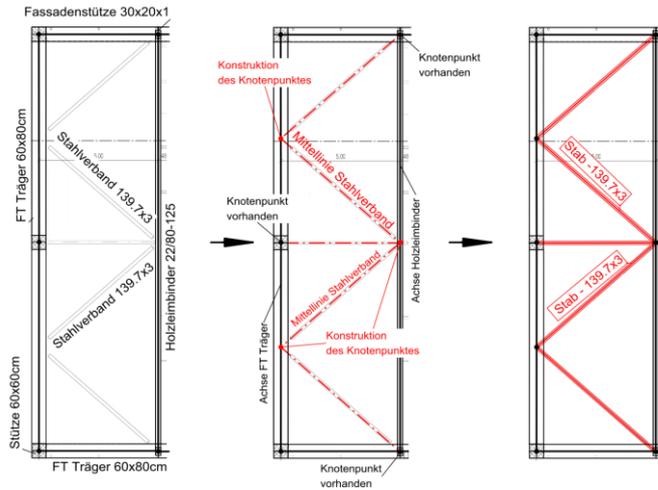


Abbildung 5-31 – Interpretation des Verbandes (Deckenansicht)

Der zweigeschossige StB-Raum in der Halle besteht aus Wänden, Plattendecken und lagert auf Streifenbetonfundamenten (s. Abb. 5-32: 1). Die Modellbildung erfolgt nach den gleichen Prinzipien wie der Zubau in Kap. 5.1.2. Wände werden als Scheiben (s. Kap. 4.4.6), Decken als Platten (s. Kap. 4.4.4) und Streifenfundamente als Linienlager (s. 3.4.4) interpretiert. Es werden die Mittellinien von den Wänden und den Decken konstruiert. Wo sich die Öffnungen befinden, werden die Abgrenzungslinien konstruiert (Abb. 5-32: 2). In den Schnittpunkten der Mittellinien und Abgrenzungslinien werden die Knotenpunkte geschaffen (Abb. 5-32: 3). Zwischen den Knotenpunkten und den abgrenzenden Mittellinien werden Scheiben und Platten konstruiert. Zu den Abgrenzungslinien der Öffnungen werden die Öffnungen zugewiesen (Abb. 5-32: 4).

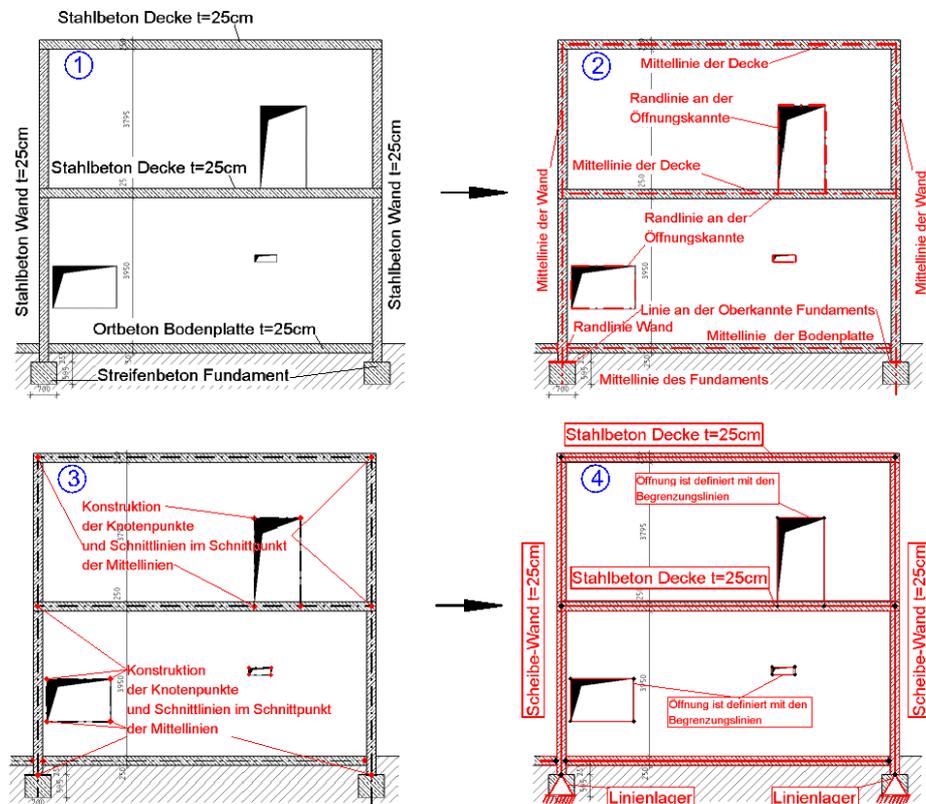


Abbildung 5-32 – Flächentragwerk: Abstellraum in der Halle (Schnitt)

### 5.2.3 3D-FEM-Statik-Modell

Das Statik-Modell wurde mit definierten Interpretationsregeln (von Kap. 3 bis Kap. 5.2.2) selbst nachmodelliert und in den folgenden Abbildungen 5-33 bis 5-42 dargestellt.

Isometrie

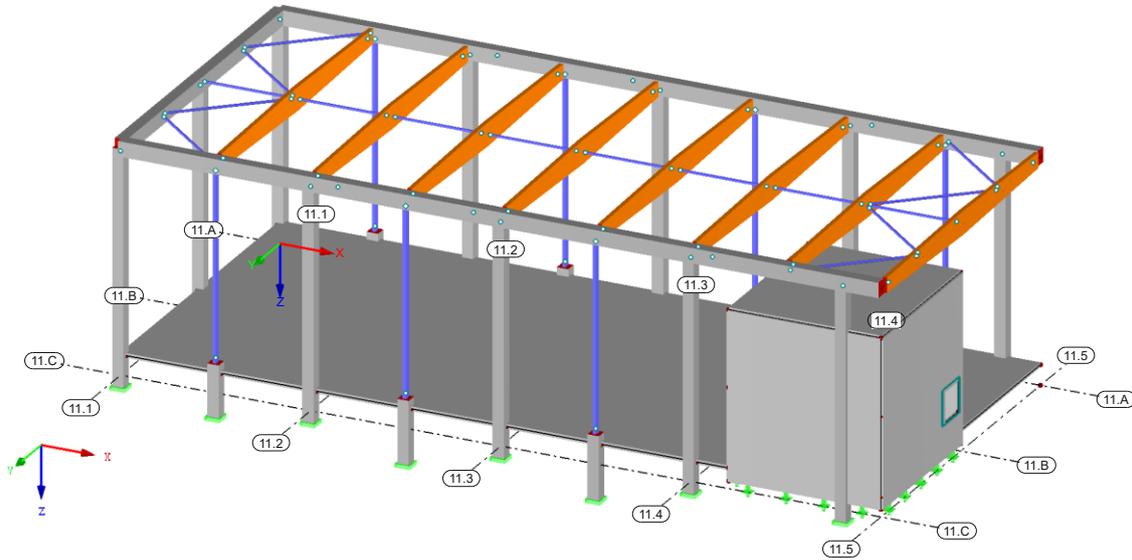


Abbildung 5-33 – Gesamtübersicht – Darstellungsart gefüllt

Isometrie

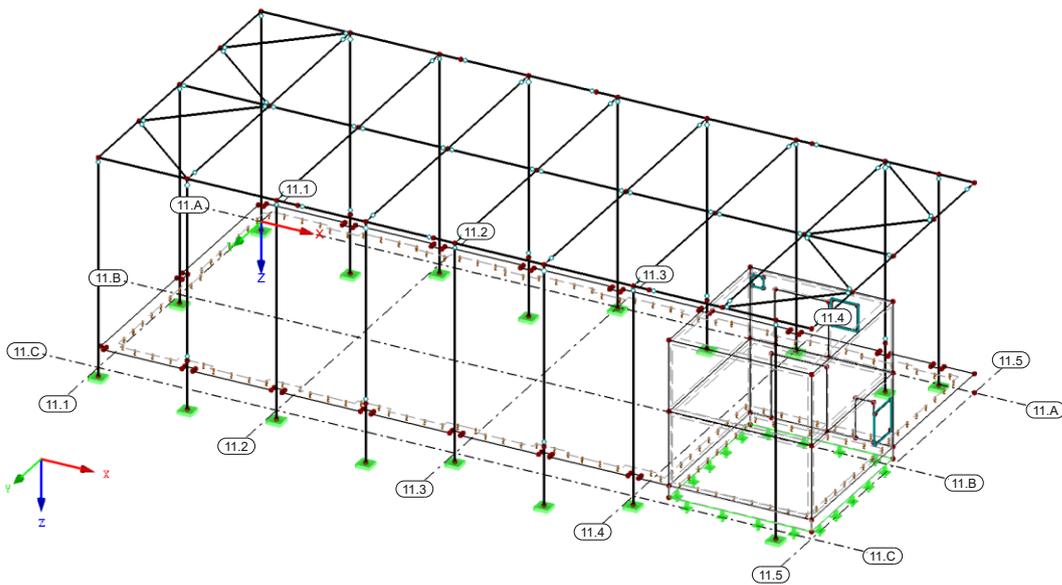


Abbildung 5-34 – Gesamtübersicht – Darstellungsart analytisch

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

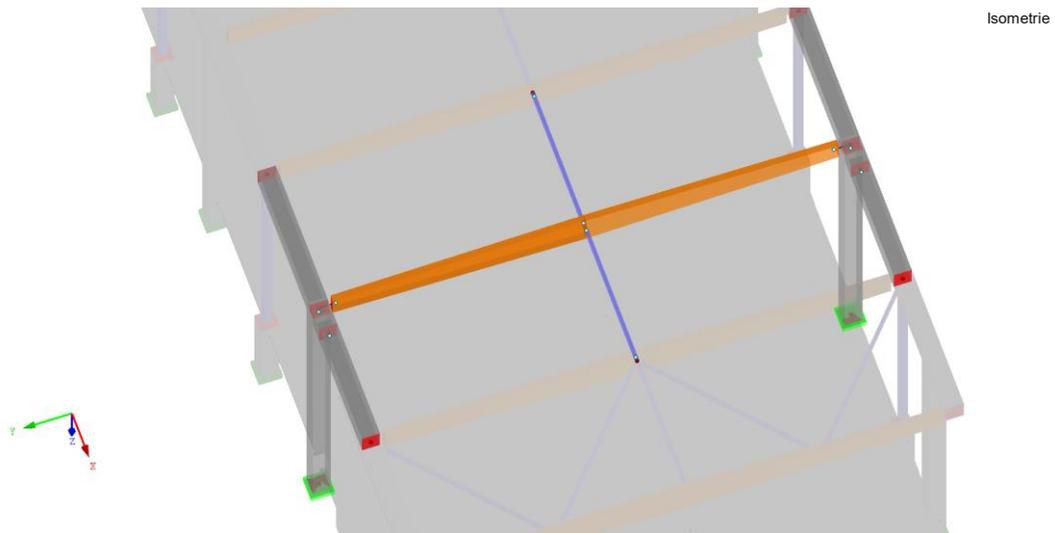


Abbildung 5-35 – exzentrische Anbindung des Hauptträgers an den FT-Träger und die Stütze – Darstellungsart gefüllt

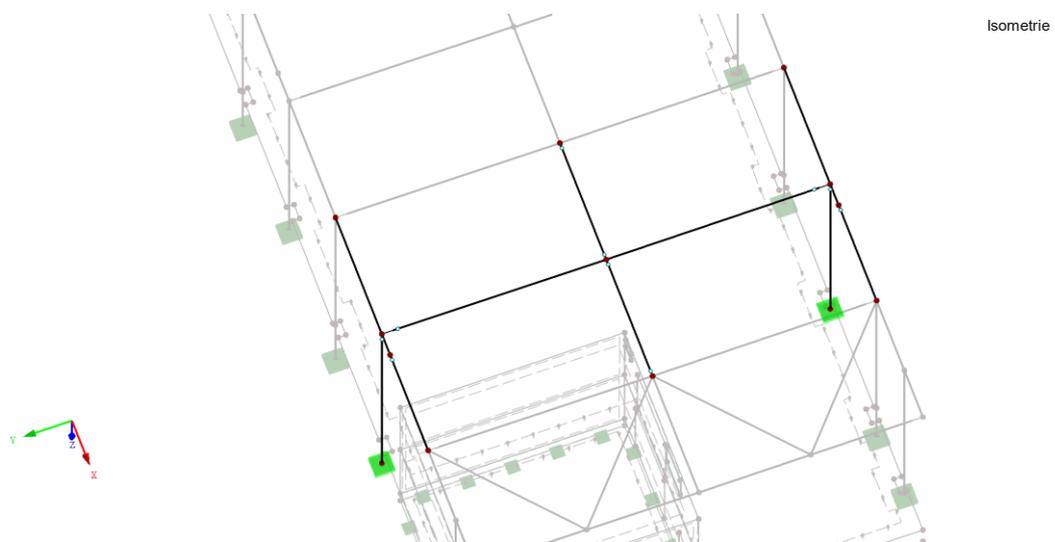


Abbildung 5-36 – exzentrische Anbindung des Hauptträgers an den FT-Träger und die Stütze – Darstellungsart analytisch

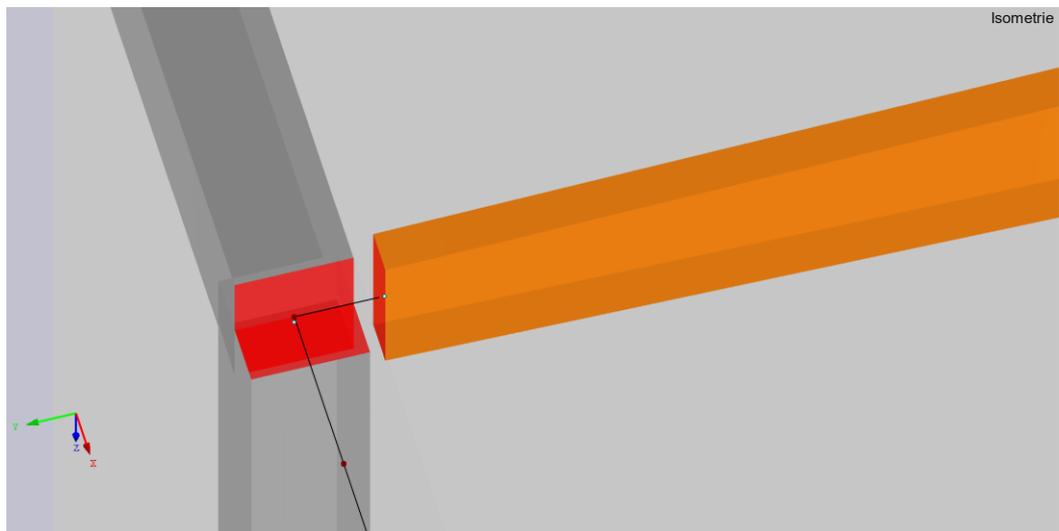


Abbildung 5-37 – exzentrische Anbindung des Hauptträgers an den FT-Träger und die Stütze (Detail)

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

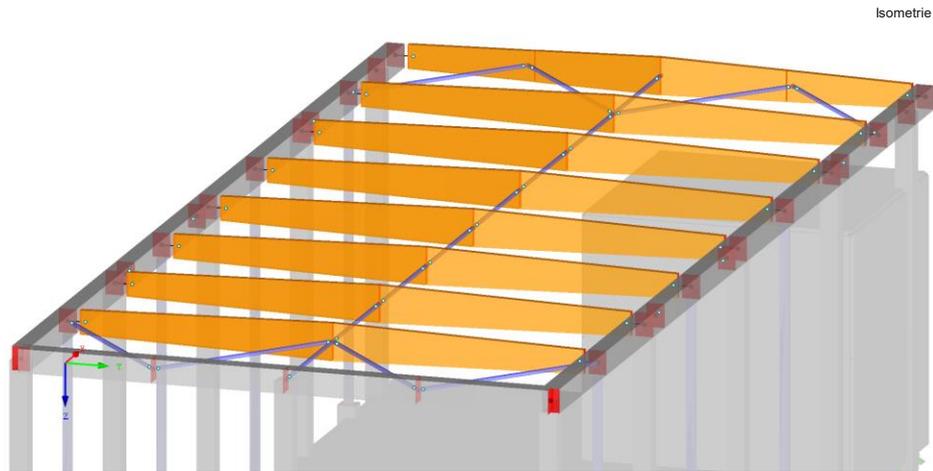


Abbildung 5-38 – Der Stahlverband (RO 139.7x3) ist zentrisch in der Querschnittsmitte des Hauptträgers und des FT-Trägers platziert.

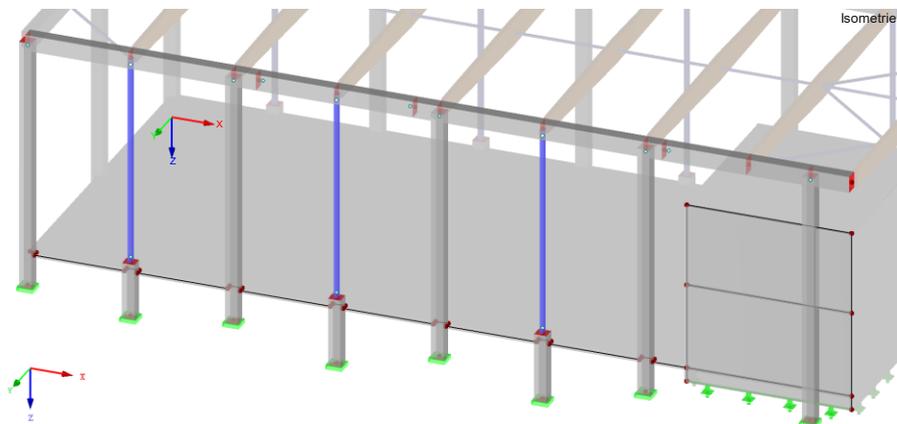


Abbildung 5-39 – Übersicht der Fassadenstützen (Auflager der Hauptstützen – Einspannung an der Köcheroberkante, Auflager der Stahlstützen – Einzelfundament im Fußpunkt eingespannt)

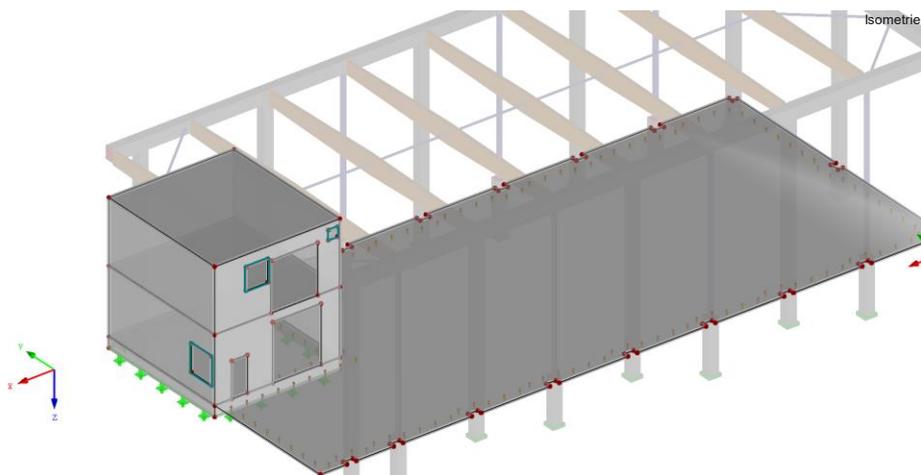


Abbildung 5-40 – Zubau und Bodenplatte sind aus 2D-Flächen gebildet.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien



Abbildung 5-41 – Wände und Decken einschließlich Dicken dargestellt



Abbildung 5-42 – Wände und Decken ohne Dicke dargestellt

### 5.3 Teststudie 3

Als Erstes werden zur Übersicht die zugehörigen Architekturunterlagen schematisch angeführt. Auch dieser (Abb. 5-43 bis 5-45) wurde ausschließlich für die Forschungszwecke dieser Masterarbeit zur Verfügung gestellt.

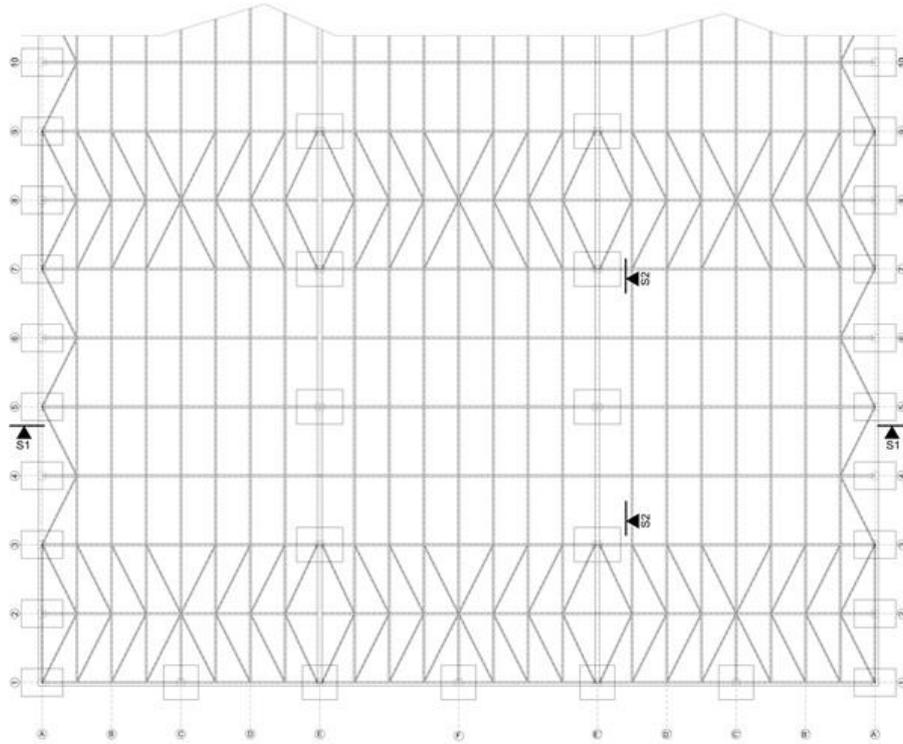


Abbildung 5-43 – Entwurf (ARCH)

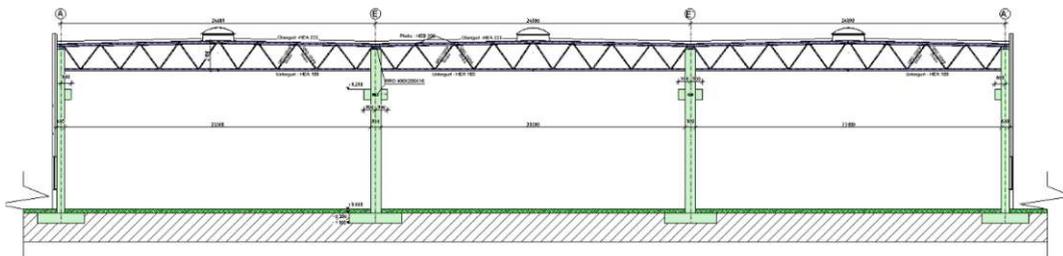


Abbildung 5-44 – Querschnitt S1

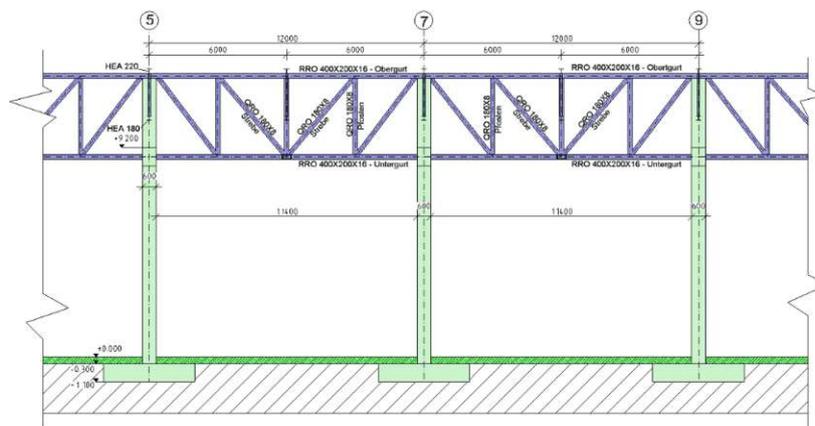


Abbildung 5-45 – Längsschnitt S2

### 5.3.1 Statik-Konzept aus Sicht des Tragwerksplaners

Das Konzept in diesem Kapitel wurde im gleichen Stil wie in Kapitel 5.1.1 erstellt.

- Das Bauwerk ist eine eingeschossige dreischiffige Halle, die flach fundiert ist.
- Das Hallentragwerk wird aus dem tragenden Skelett gebildet. Die Außenhülle besteht aus den Sandwich-Paneelen.
- Im Entwurf ist das Achsraster sichtbar. Längsachsen (A bis E) haben einen Abstand von 6 m, ebenso die Querachsen (1 bis 21).
- Das Dachtragwerk besteht aus den Pfetten, den Fachwerkbindern und den Längsträgern.
- In Abbildung 5-46 sind die Pfetten grün markiert, Binder rot und Längsträger blau.
- Binder, die in Querrichtung angeordnet werden, sind als Fachwerkträger geplant. Die Spannweite der Binder beträgt 24 m, sie sind auf den Längsträgern und der OK-Stütze aufgelagert.
- Pfetten spannen über 6 m zwischen den Bindern in der Längsrichtung.
- Längsträger sind kompakt aus den geschlossenen Profilen als Fachwerk geplant und spannen 12 m zwischen den Mittelstützen.
- Stützen sind mit rechteckigem Querschnitt und aus Stahlbeton entworfen. Mittelstützen weisen einen Rechteckquerschnitt (60 x 80) und Randstützen eine quadratische Querschnittsform (60 x 60) auf.
- Stützen sind auf Blockfundamenten gelagert und die Lasten in der Halle werden über die 30-cm-Bodenplatte in den Untergrund übertragen.
- Die Aussteifung erfolgt durch Dachverbände in Verbindung mit Wandverbänden.
- In Abbildung 5-46 sind die Dachverbände violett markiert und Wandverbände gelb.

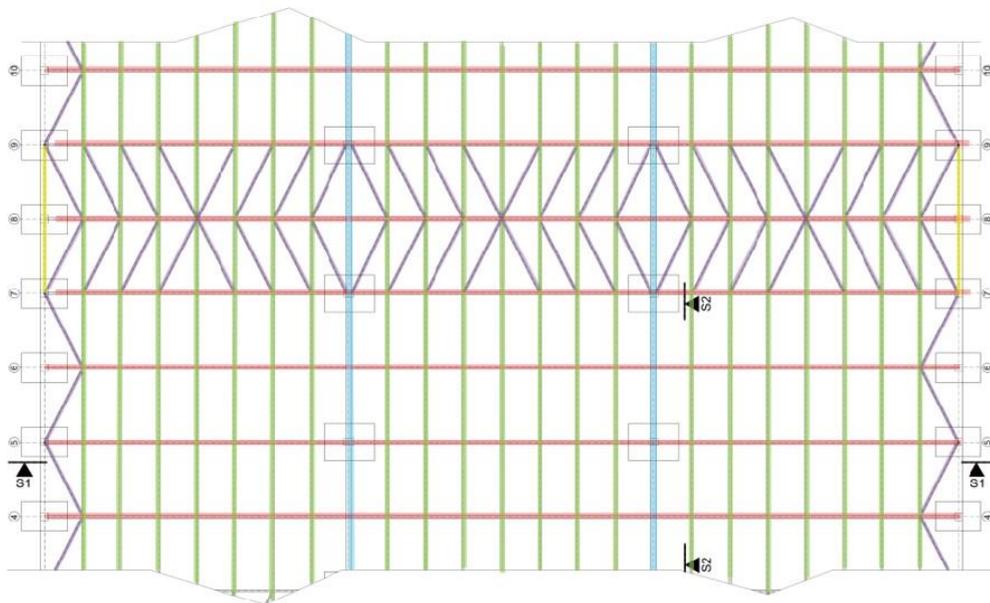


Abbildung 5-46 – Übersicht der Dachkonstruktion

Am Ende des Konzeptes ist Tabelle 5-6 angeführt, die die Interpretationen der tragenden Bauteile zusammenfasst. Diese Tabelle wurde im gleichen Stil und für die gleichen Zwecke wie Tabelle 5-2 in Kapitel 5.1 erstellt.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

ARCHITEKTUR			TRAGWERKSPLANUNG		
BAUTEIL	MATERIAL	MAß	TRAGWERKSELEMENT LAUT KAP. 3.3	MATERIAL	DIMENSIONALITÄT
Mittelstütze	StB	60 x 80	Stab	C 35/45	1D-LINIENELEMENT
Stützenkonsole (Mitte)	StB	60 x 80	Stab	C 35/45	1D-LINIENELEMENT
Randstütze	StB	60 x 60	Stab	C 35/45	1D-LINIENELEMENT
Stützenkonsole (Rand)	StB	60 x 60	Balken	C 35/45	1D-LINIENELEMENT
Binder- Obergurt	Stahl	HEA 220	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Binder - Untergurt	Stahl	HEA 180	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Binder - Strebe	Stahl	QRO 10x0.8	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Pfette	Stahl	HEB 200	Balken	S 355	1D-LINIENELEMENT
Längsträger - Obergurt	Stahl	RRO 40x20x1.6	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Längsträger - Strebe	Stahl	QRO 18x0.8	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Längsträger- Pfosten	Stahl	RRO 40x20x1.6	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Längsträger - Untergurt	Stahl	RRO 40x20x1.6	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Dachverband	Stahl	QRO 20x1	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
Wandverband	Stahl	QRO 20x1	Stab	S 355	1D-LINIENELEMENT
			AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	[-]
Blockfundament	StB	400 x 300 x 80, 360 x 240 x 80	Knotenlager: Festlager		
Anmerkungen:					
Mass ist in cm angegeben					
<i>b x h</i> - Betonquerschnitt					
<i>b/h</i> - Holzquerschnitt					
<i>l<sub>1</sub> x l<sub>2</sub> x t</i> oder nur t-Plattenquerschnitt					
GL28h - Holzklasse nach EN 14080 und EC 5					
S 355 - Stahlgüte nach EN 10025 und EC 3					
C 35/45 - Betongüte nach EN 206-1 und EC 2					

Tabelle 5-6 – Teststudie 3 – Interpretationen der Bauteile

### 5.3.2 Interpretation der Bauteile – Details

Stützen lagern in der Realität auf der Oberkante der Flachfundamente. Der untere Stützenknotenpunkt wird daher auf der OK des Fundaments konstruiert (s. Abb. 5-47). Der Knotenpunkt ist im Schnittpunkt der Mittellinie der Stütze und der Linie an der Oberkante des Fundaments abgebildet. Da der Anschluss der Stütze an das Flachfundament keine Bewegungen zulässt, aber die Verdrehungen nicht vollständig gesperrt sind, wird er laut der Regel aus Kap. 3.4.2 als Festlager modelliert.

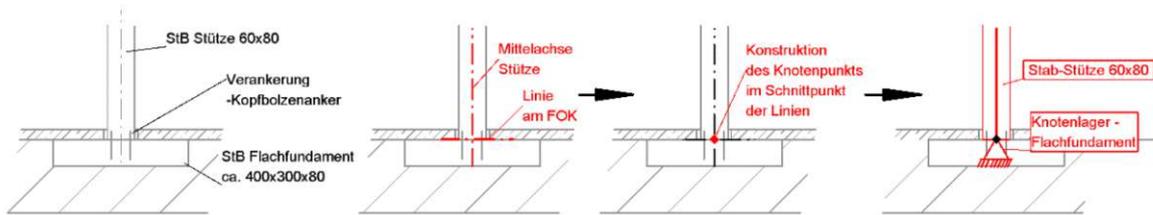


Abbildung 5-47 – Interpretation der Auflagerung der Stütze auf das Flachfundament (Schnitt)

Der obere Knotenpunkt der Stützen (s. Abb. 5-48) wird an der Kreuzung der Mittellachse der Stütze und der Mittellachse des Obergurtes des Längsträgers konstruiert (Regel laut Kap. 4.4.1).

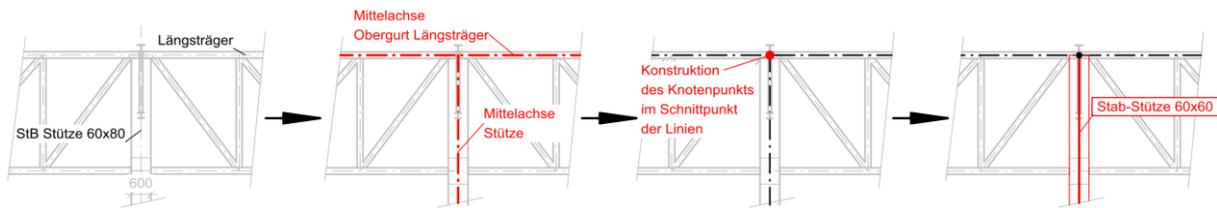


Abbildung 5-48 – Interpretation Oberkante Stütze (Seitenansicht)

### Konsole

An der Stütze ist die StB-Konsole angeschlossen. Diese stellt, wie in Kap. 3.2 beschrieben, einen Diskontinuitätsbereich dar (s. Abb. 3-4). Es muss eine Vereinfachung der Geometrie zur Modellbildung des 3D-Statik-Modells angenommen werden. Diese Konsole überträgt die Lasten in die Stütze. Da sie meist der Biegebeanspruchung unterliegt, wird an dieser Stelle die Regel aus Kap. 3.3.3 angewendet, und die Konsole als Balken modelliert. Es wird zuerst die Achse der Konsole konstruiert (s. Abb. 5-49). Am Anfang der Konsole werden die Knotenpunkte erzeugt. Der zweite Knotenpunkt der Konsole ist an der Kreuzung der Stützenachse und der Mittellachse der Konsole konstruiert. Zu den Mittellinien zwischen den Knotenpunkten wird im Statik-FEM-Programm der Balkenstab zugewiesen.

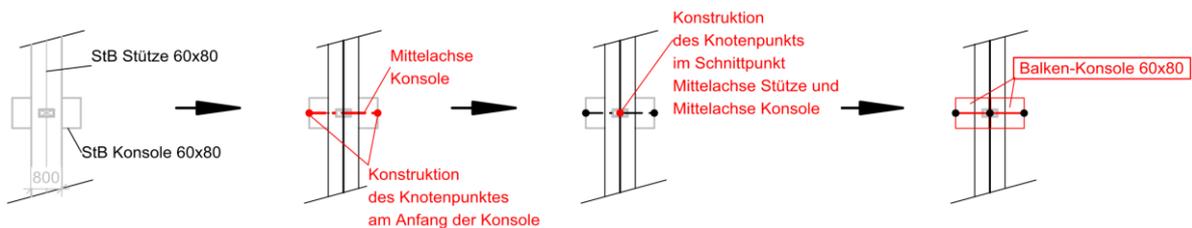


Abbildung 5-49 – Konsole als Balken (Seitenansicht)

### Fachwerkträger

Der Längsträger besteht aus mehreren, miteinander verbundenen schlanken Stäben (Regel s. Kap. 3.3.2), die Dreiecke bilden. Facheinschlägig ist dieses Stabwerk als ‚Fachwerk‘ bekannt. Bei jedem Stab wird zuerst die Mittelachse gebildet. Danach werden im Schnittpunkt der Mittelachsen die Knotenpunkte erzeugt. Sobald die Knotenpunkte konstruiert sind, werden den Mittelachsen die Stäbe mit den entsprechenden Querschnitten zugewiesen. Der ganze Prozess ist in Abbildung 5-50 detailliert dargestellt.

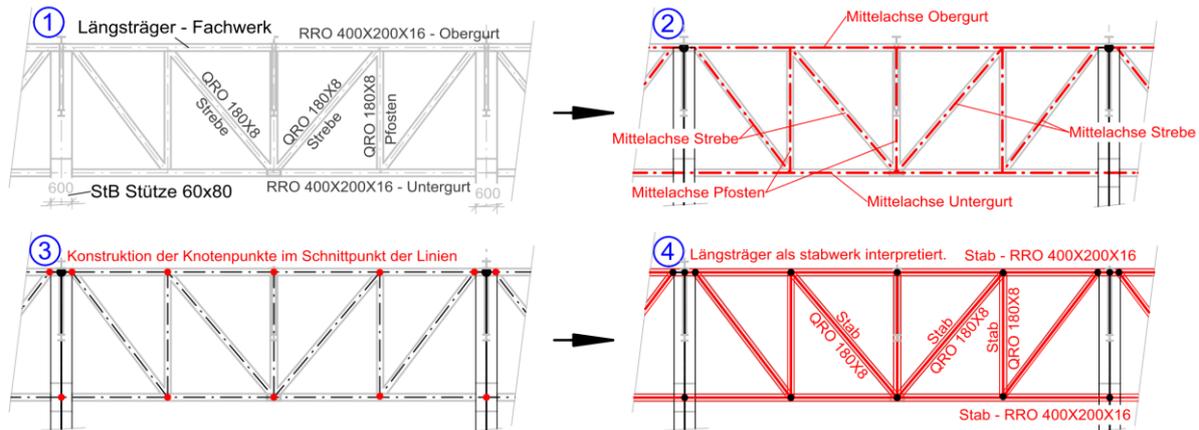


Abbildung 5-50 – Längsträger-Interpretation (Seitenansicht)

Weil der Binder auch Fachwerkträger darstellt, wird nach demselben Schema wie vorher die Längsträger interpretiert. Die Konstruktion ist in Abbildung 5-51 dargestellt.

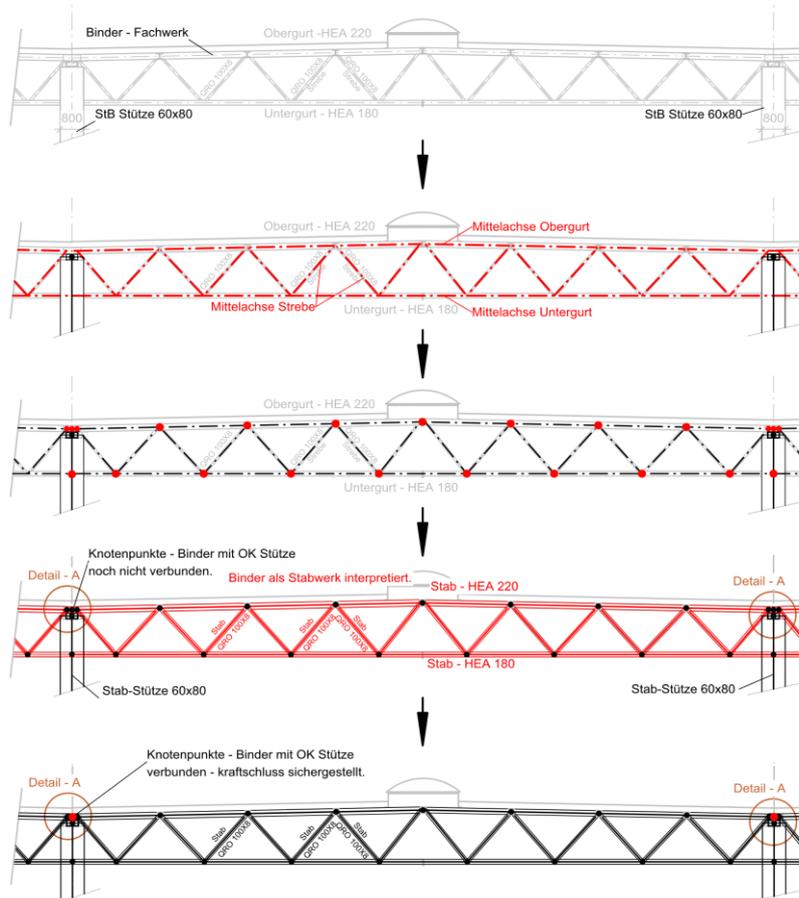


Abbildung 5-51 – FW-Binder als Stabwerk interpretiert (Seitenansicht)

In Detail A (s. Abb. 5-52) ist dargestellt, wie der Binder mit der Stütze bzw. dem Längsträger verbunden ist. Es muss ein Kraftschluss zwischen den angebotenen Elementen sichergestellt werden. Dieser ist durch einen gemeinsamen Knotenpunkt herzustellen. Alle drei Stabelemente (Stütze, Längsträger Obergurt, Binder Obergurt) werden in einem gemeinsamen Knotenpunkt verbunden. Durch diesen gemeinsamen Knotenpunkt wird der Kraftschluss sichergestellt. Es handelt sich um Vereinfachung der Bauteilgeometrie.

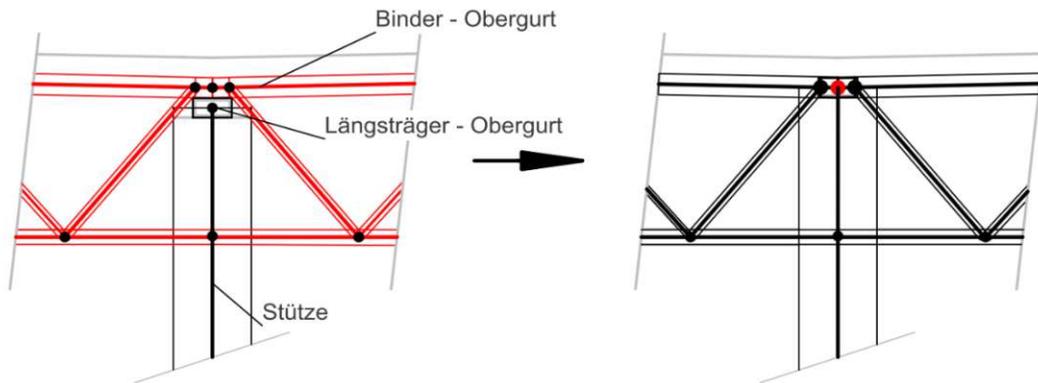


Abbildung 5-52 – Detail A (Schnitt)

### Verband

Auf der nächsten Seite ist in Abbildung 5-53 beschrieben, wie der Dachverband und die Pfetten im Modell konstruiert sind. Der Verband ist ein schlankes Bauteil, das in Richtung seiner Längsachse beansprucht wird, daher ist es laut der Regel aus Kap. 3.3.2 als Stab zu modellieren. Pfetten sind schlanke Bauteile, meist auf Biegung beansprucht. Laut der Regel aus Kap. 3.3.3 sind diese als Balken zu modellieren. Die Modellbildung erfolgt nach dem gleichen Prinzip wie der Verband in Kap. 5.2.2 oder der Fachwerkträger in diesem Kapitel. Die Mittellinien (Achsen) der Stäbe und der Balken sind ausgezogen, danach werden Knotenpunkte in den Schnittpunkten konstruiert und zwischen diesen Knotenpunkten sind den Achsen Stäbe zugewiesen. Bestehende Knotenpunkte werden zur Anbindung der Stäbe genutzt.

## 5 Interpretationsregeln - Analyse mit Teststudien

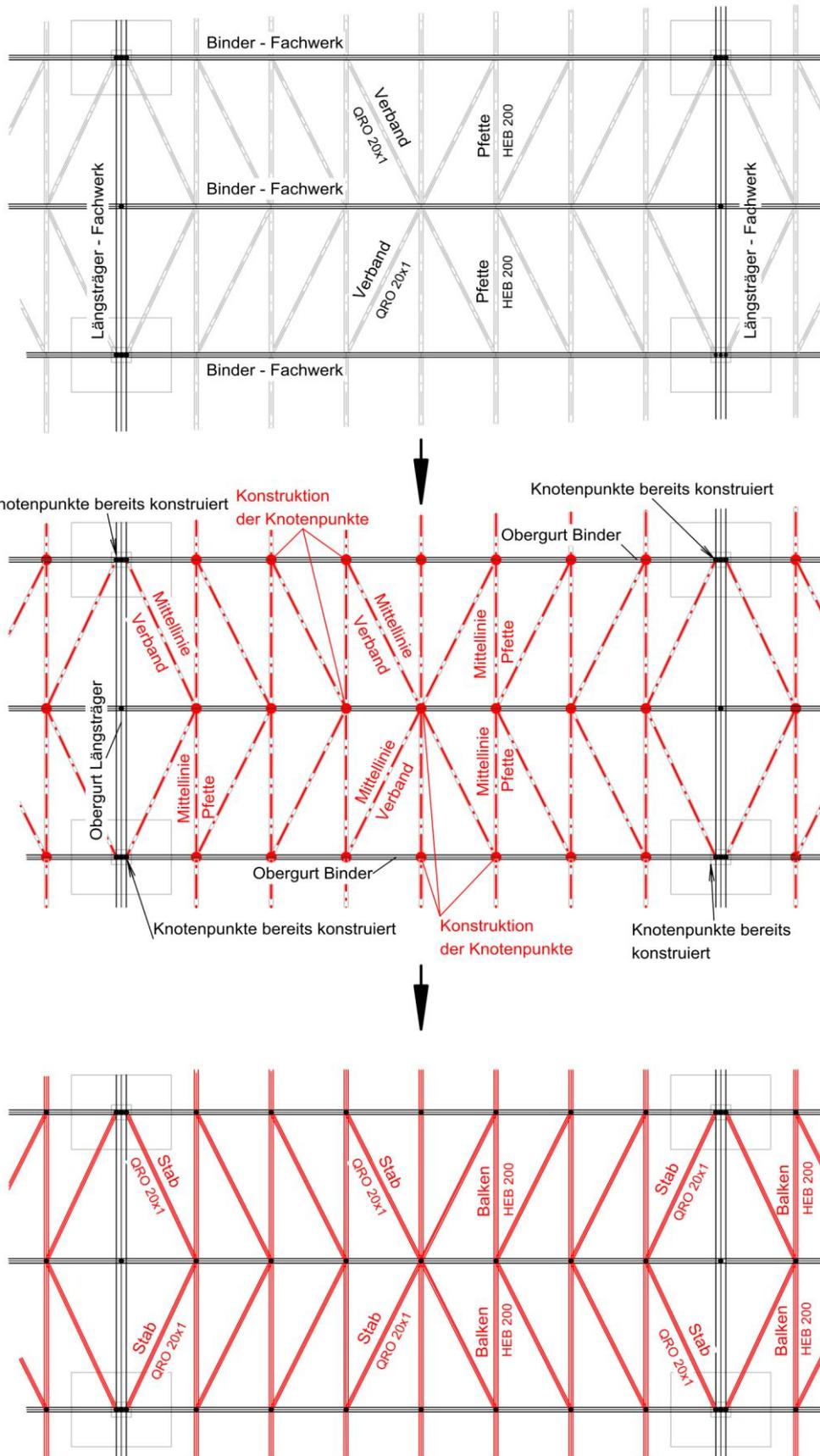


Abbildung 5-53 – Interpretation des Dachverbandes und der Pfetten (Grundriss)



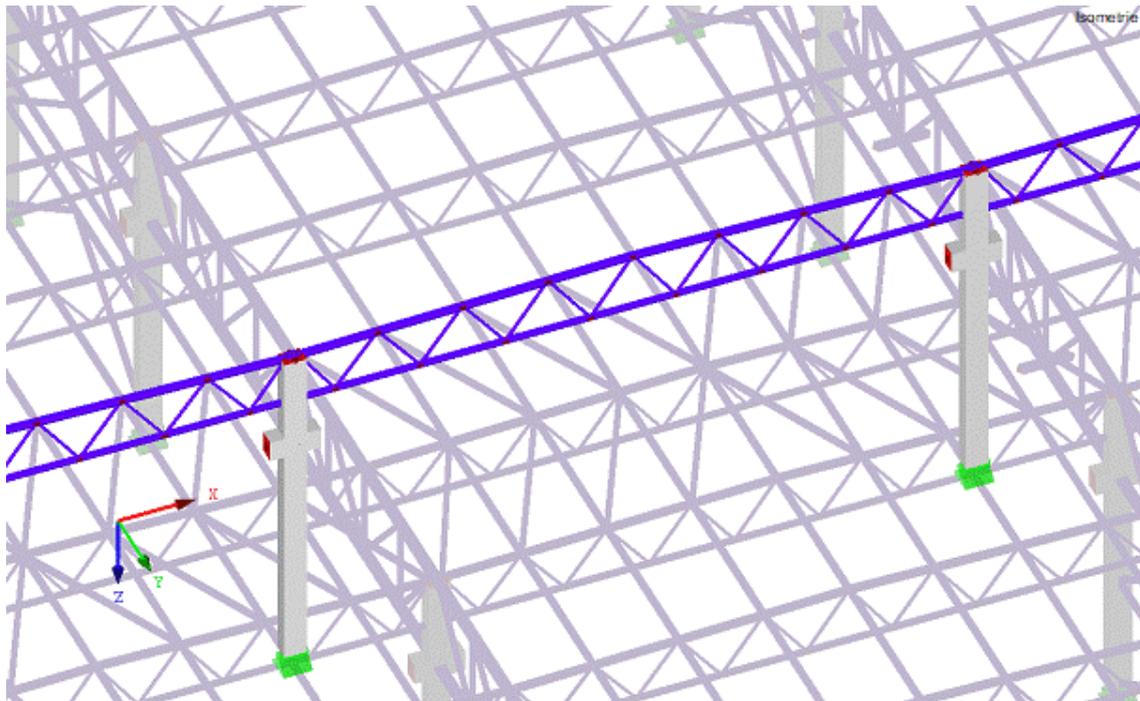


Abbildung 5-56 – Übersicht der Fachwerksbinder – Darstellungsart gefüllt

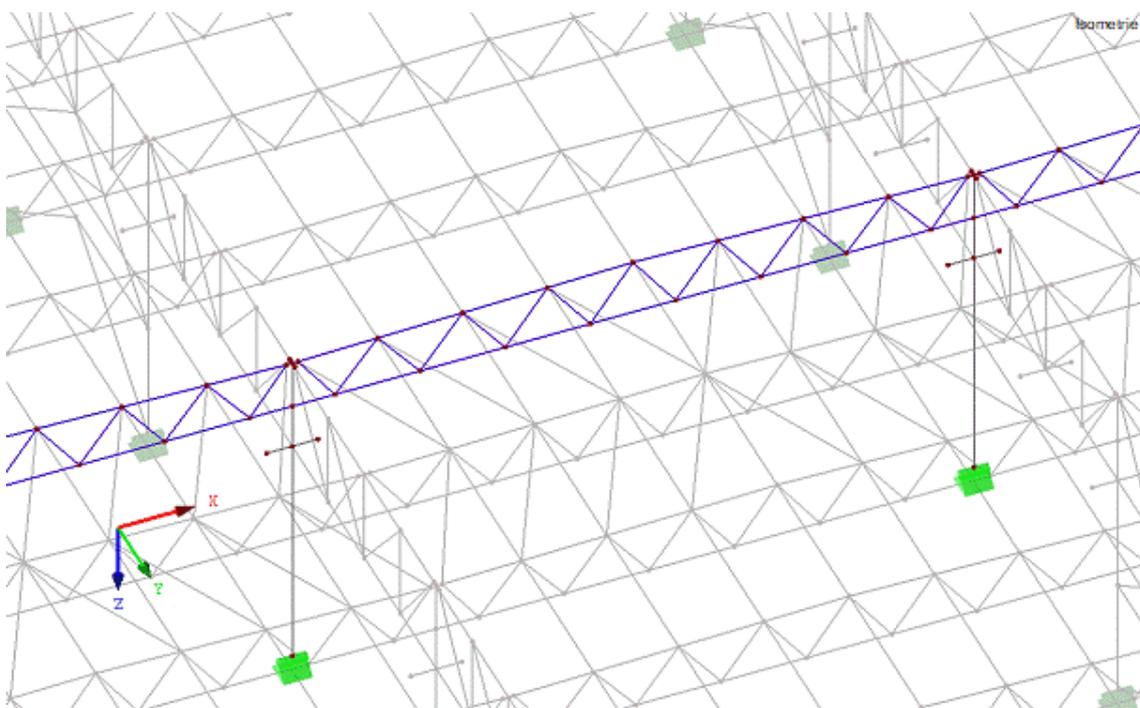


Abbildung 5-57 - Übersicht der Fachwerksbinder – Darstellungsart analytisch

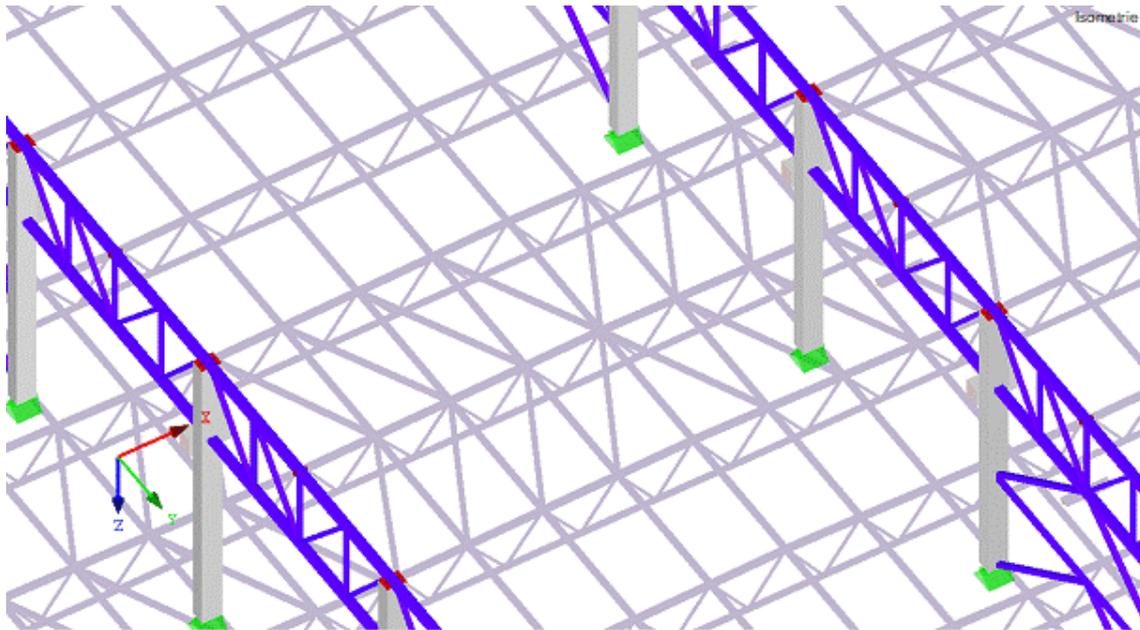


Abbildung 5-58 – Übersicht der Längsträger – Darstellungsart gefüllt

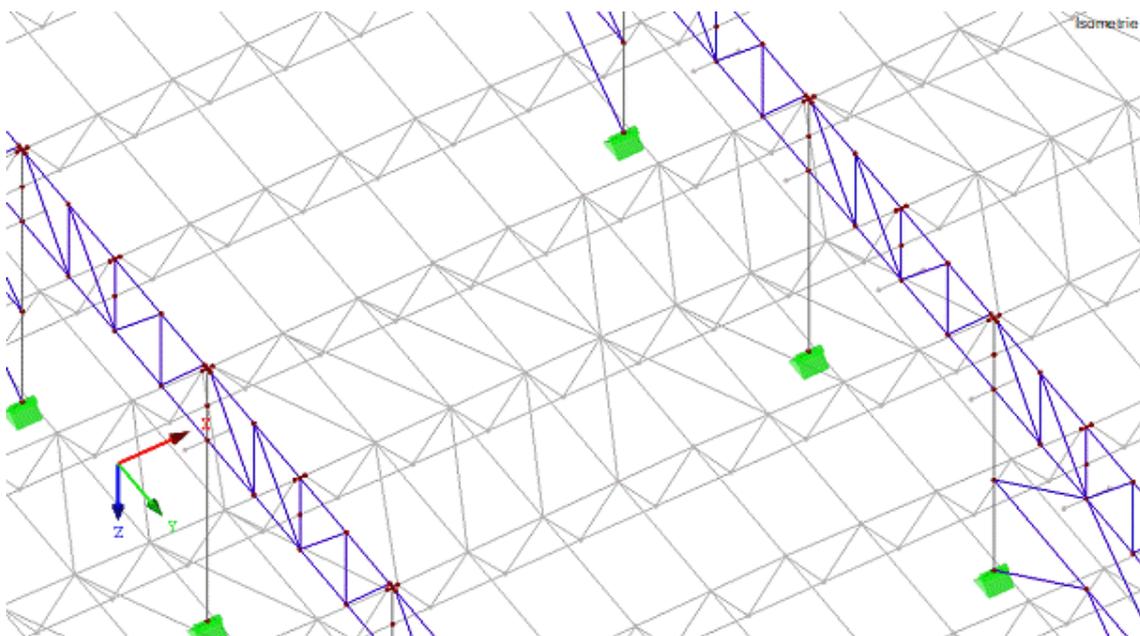


Abbildung 5-59 – Übersicht der Längsträger – Darstellungsart analytisch

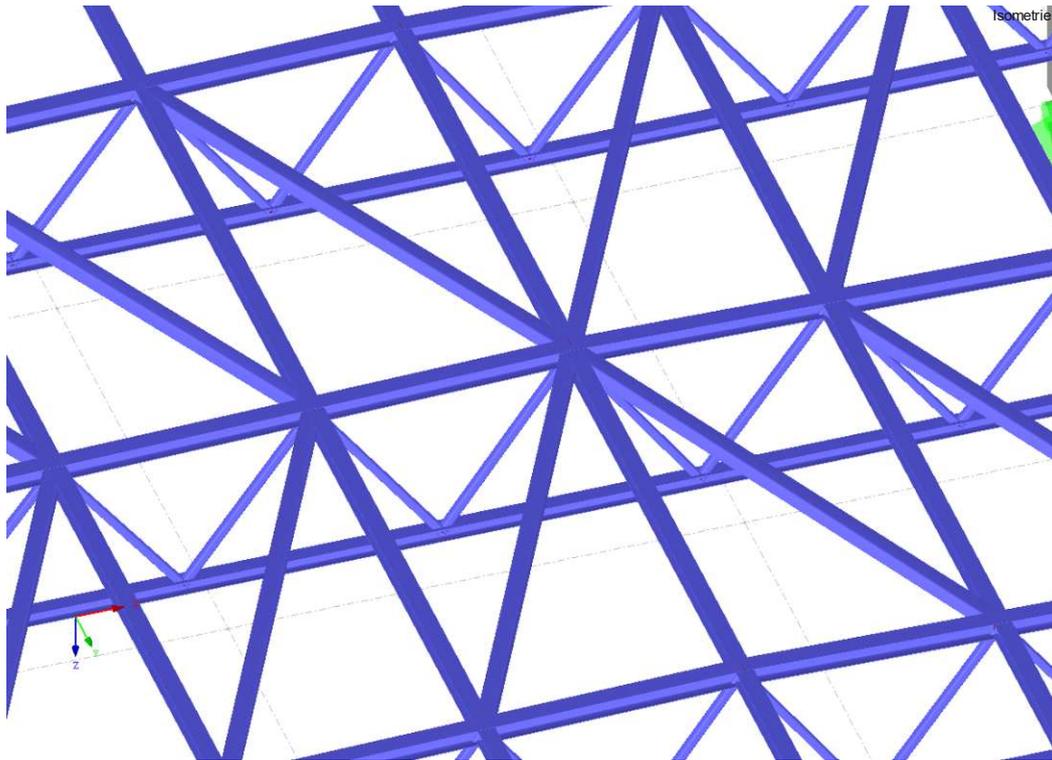


Abbildung 5-60 – Detail der Pfetten und des Dachverbandes in der Dachebene – Darstellungsart gefüllt

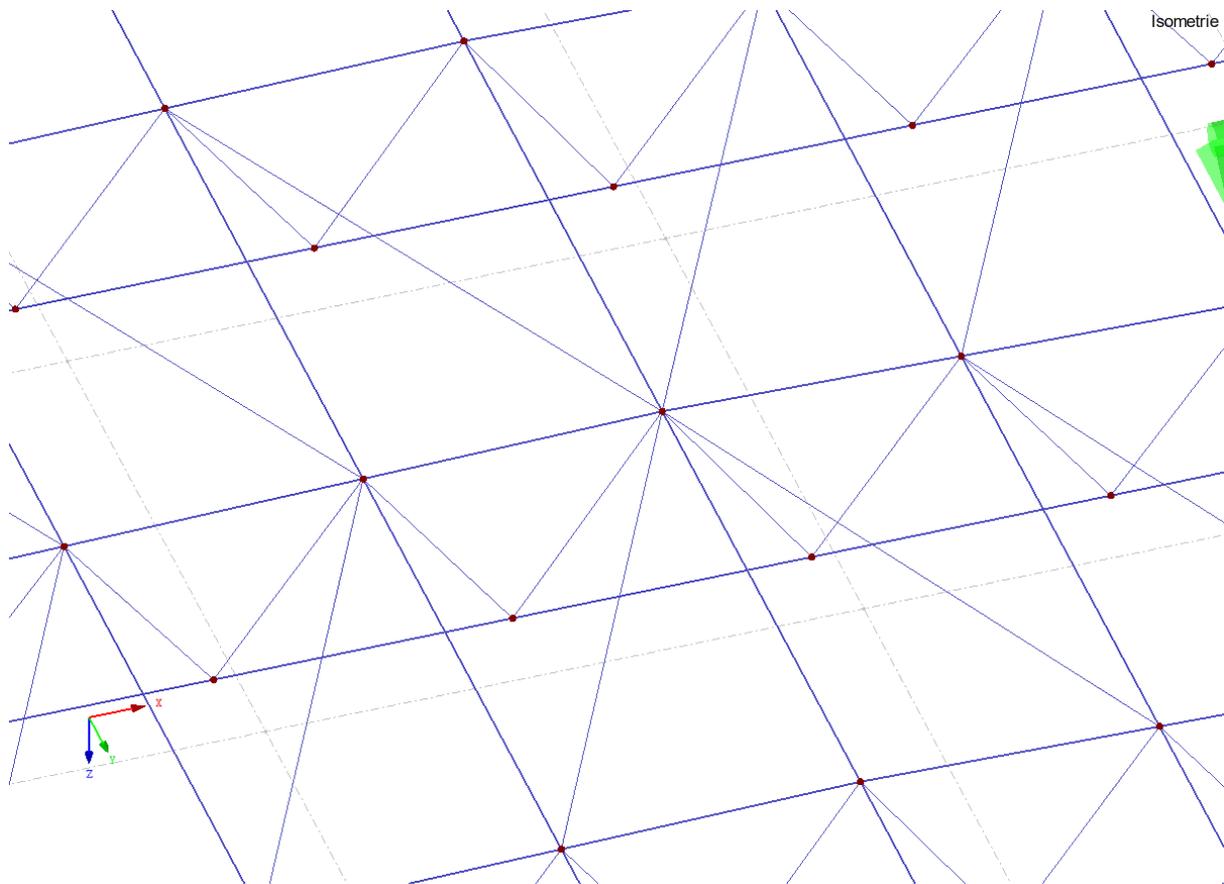


Abbildung 5-61 – Detail der Pfetten und des Dachverbandes in der Dachebene – Darstellungsart analytisch

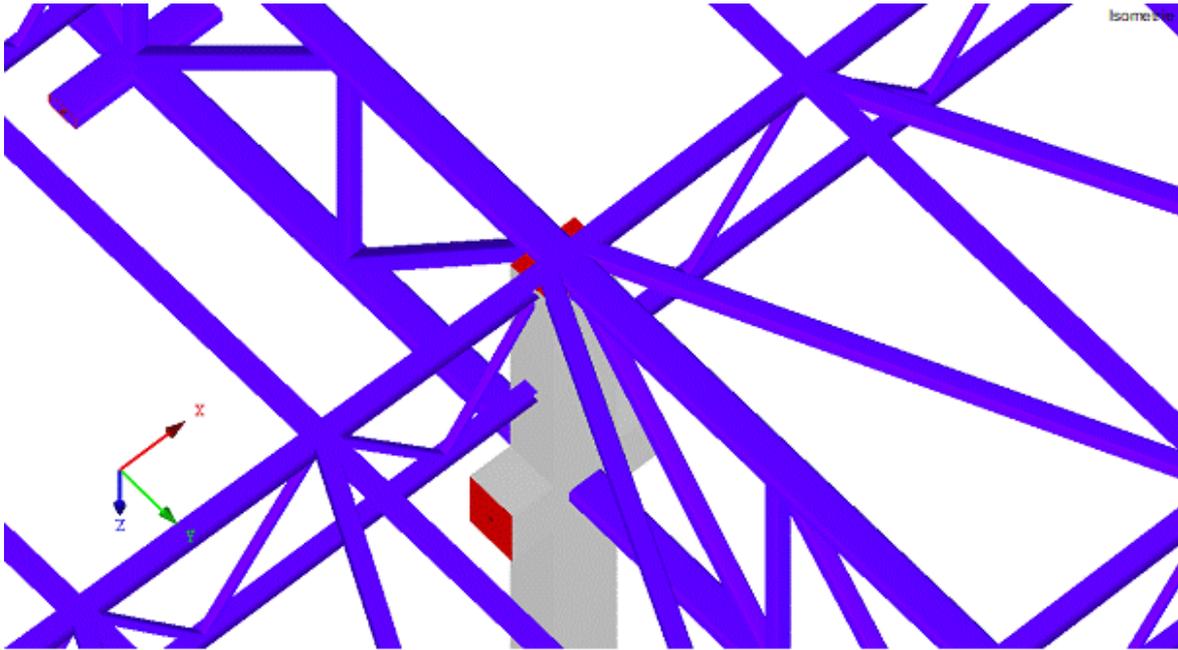


Abbildung 5-62 – Detail der Auflagerung des Binders und des Längsträgers auf der OK-Stütze – Darstellungsart gefüllt

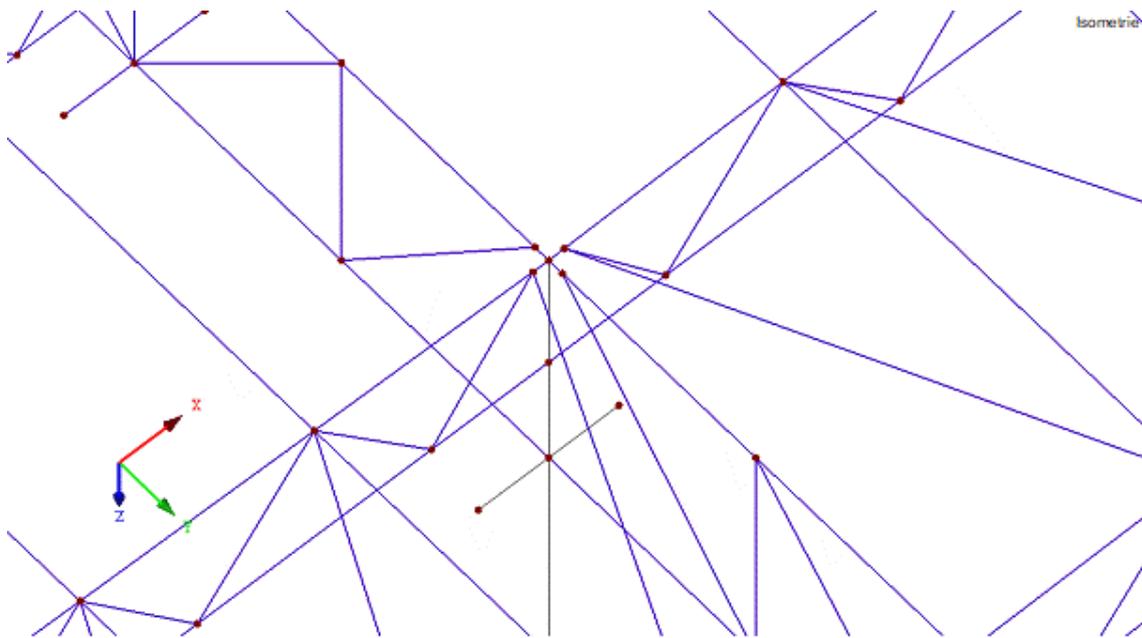


Abbildung 5-63 – Detail der Auflagerung des Binders und des Längsträgers auf der OK-Stütze – Darstellungsart analytisch

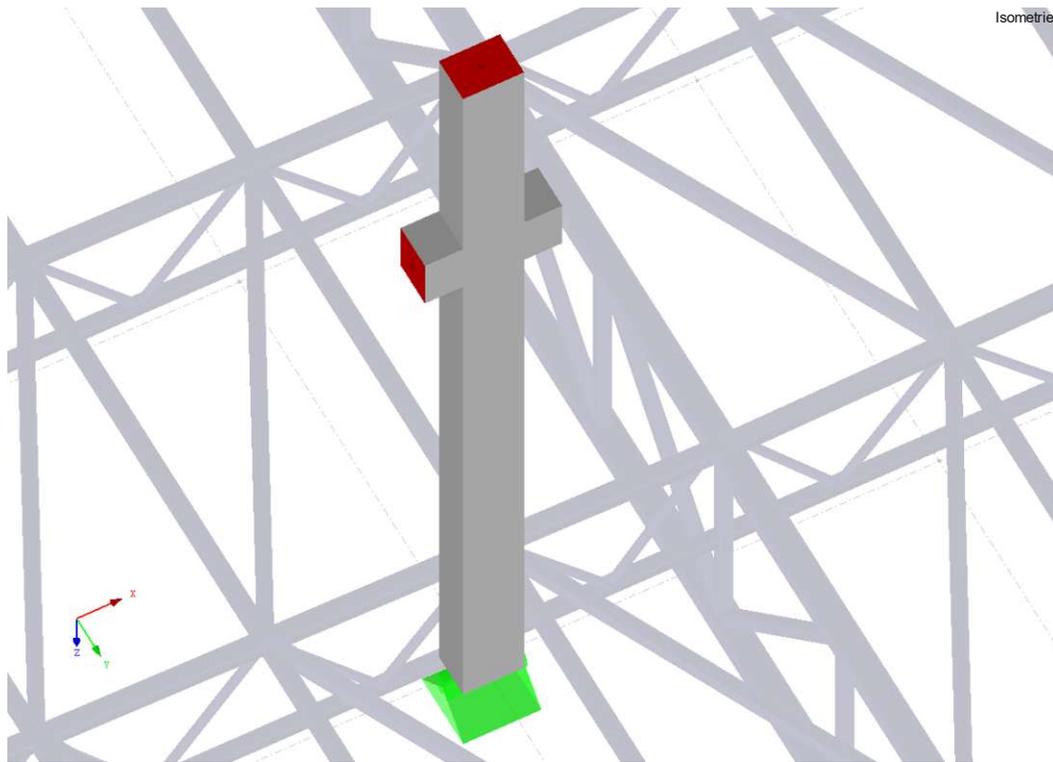


Abbildung 5-64 – Übersicht der StB-Mittelstütze mit kleiner Konsole – Darstellungsart gefüllt

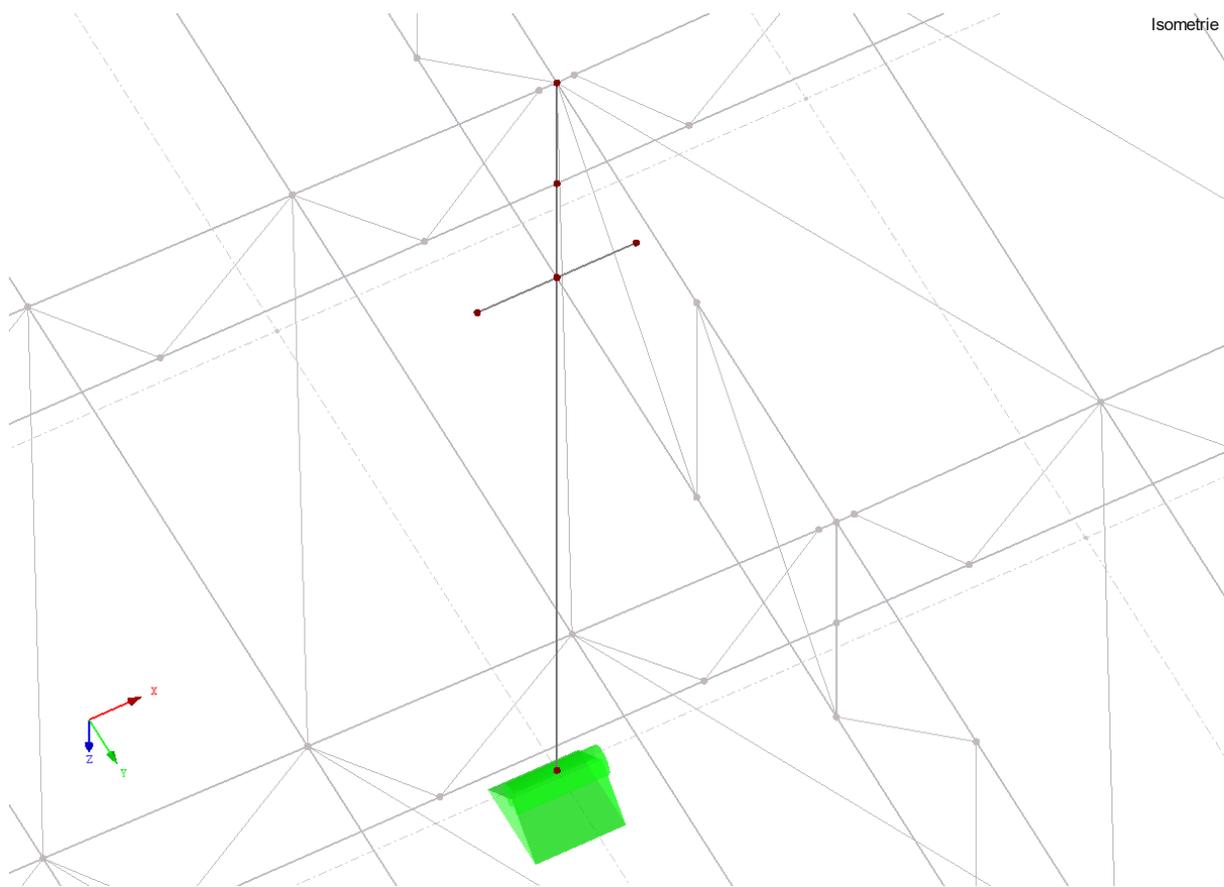


Abbildung 5-65 – Übersicht der StB-Mittelstütze mit kleiner Konsole – Darstellungsart analytisch

## 6 Validierung

In diesem Teil der Forschung werden die selbst modellierten Statik-Modelle der Teststudien mit den Statik-Modellen aus der Praxis überprüft. Die Überprüfung der Modelle bzw. der Interpretationen erfolgt visuell. Zuerst werden die einzelnen Interpretationen der Bauteile in Tragwerkselementen verglichen. Danach werden die einzelnen Interpretationen der Details verglichen. Dazu werden immer Vergleichsabbildungen aus den Modellen dargestellt. Es werden die Übereinstimmungen, Ähnlichkeiten und Unterschiede erkannt. Die geometrische Position der Elemente und der Anbindungen wird kontrolliert. Die Kontrolle erfolgt visuell und geometrisch. Tabellarisch werden die Ergebnisse quantitativ abgebildet.

### 6.1 Teststudie 1

Die Methodologie der Validierung ist in Kapitel 6 im ersten Absatz beschrieben. Im ersten Teil der Validierung werden die einzelnen Interpretationen der Bauteile verglichen. Danach wird der Fokus auf die Interpretation von Details gelegt.

Auf der nächsten Seite zeigen die Abbildungen 6-1 und 6-2 das selbst modellierte FEM-Tragwerksmodell vom Teststudie 1. Der Prozess der Entstehung des Tragwerkmodells und die einzelnen Interpretationen sind in Kapitel 5.1. dokumentiert. Abbildung 6-2 zeigt das Modell wie im Abbildung 6-1 dargestellt, aber ohne Wände und Bodenplatten. Abbildung 6-3 zeigt das FEM-Tragwerksmodell aus der Praxis, das für Forschungszwecke zur Validierung zur Verfügung gestellt wurde. Es ist ersichtlich, dass in dem Modell aus der Praxis keine Flächenelemente (Bodenplatte, Wände, Decken) modelliert wurden.

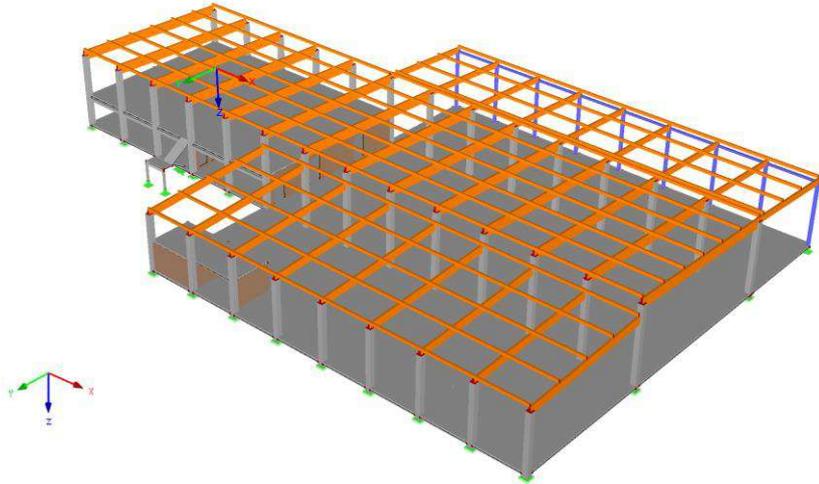


Abbildung 6-1 – Modell selbst modelliert

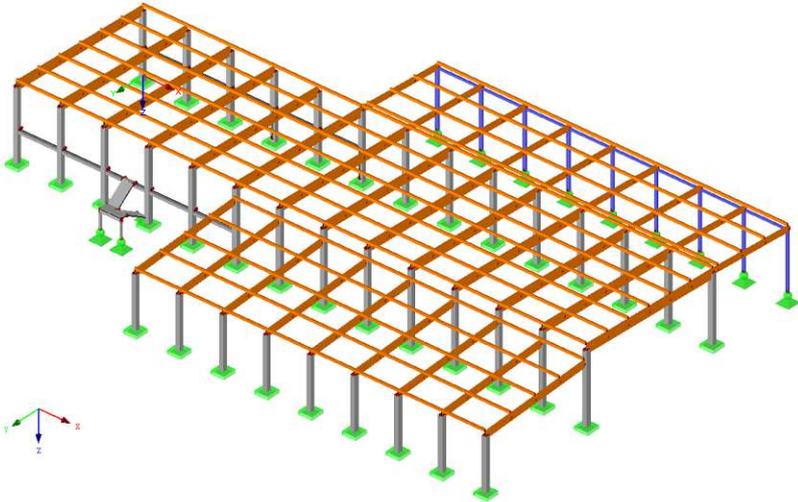


Abbildung 6-2 – Modell selbst modelliert, ohne Wände und Bodenplatte dargestellt

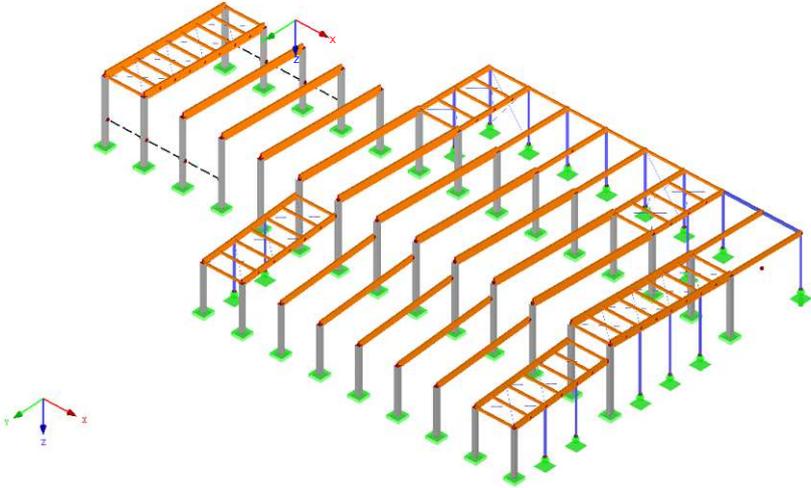


Abbildung 6-3 – Modell aus der Praxis

### Validierung der Bauteile

Der Vergleich der zwei 3D-FEM-Statik-Modelle ist tabellarisch in Tabelle 6-1 zusammengefasst. Die Tabelle gibt Auskunft über den Vergleich der Tragwerkselemente. Als Basis wurde Tabelle 5-2 genommen und zu Validierungszwecken erweitert. Es wurde verglichen, ob die Bauteile, die im architektonischen Entwurf gezeichnet sind, als Tragwerkselemente in den beiden Tragwerksmodellen gleich interpretiert sind. Die Bewertung erfolgt anhand einer farbigen Skala. Unter der Tabelle ist die Legende der Skala erläutert.

ARCHITEKTUR	TRAGWERKSPLANUNG				Bewertung
	Modell selbst modelliert		Modell aus der Praxis		
BAUTEIL	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	
Stütze	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	■
Hauptträger	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	■
Nebenträger	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	■ ■
Wand	Scheibe	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	■
Decke über EG	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	■
Bodenplatte	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	■
Randträger	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	■
Stiegenlauf	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	■
Podest	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	■
	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	■
Köcherfundament	Knotenlager: Einspannung		Knotenlager: Einspannung		■
Streifenfundament	Linienlager		nicht vorhanden		■
<b>Anmerkungen:</b>					
Bewertungsskala					
■	Interpretationen der Bauteile sind gleich				
■	Interpretationen der Bauteile sind teilweise gleich				
■	Interpretationen der Bauteile sind unterschiedlich				
■	Tragwerkselement ist nicht vorhanden in dem Modell aus der Praxis				

Tabelle 6-1 – Vergleich der Statik-Modelle der Tragwerkselemente

Bauteile wie Stützen, Dachbinder und Nebenträger wurden als Tragwerkselemente gleich interpretiert. Die Querschnitte waren ebenfalls einig. Einige Nebenträger waren im Modell aus der Praxis nicht vorhanden (s. Abb. 6-3). Die Köcherfundamente wurden auch, wie im selbstgebauten Modell, als Knotenlager (Einspannung) im Modell aus der Praxis gleich interpretiert. Der Randträger, auf denen die Decke über EG aufgelagert ist, ist im Tragwerksmodell aus der Praxis als Starrstab modelliert. Im selbst gebauten Modell ist es als Balken mit dem zugehörigen Querschnitt aus dem Das heißt die Interpretation vom Randträger ist in beiden Modellen ein 1-D Linienelement, aber die Steifigkeit und der Typ der einzelnen Elemente ist anders.

Der Vergleich der Flächenelemente wie Wände, Bodenplatte, Decke über EG, Stiegenlauf oder Podest konnte nicht durchgeführt werden, denn diese Elemente waren im Modell aus der Praxis nicht vorhanden.

### Validierung der Details

Im nächsten Schritt werden die Details in den beiden Modellen verglichen. Das erste Detail wird Anschluss des Binders an die Randstütze überprüft.

Die Abbildungen in Tabelle 6-2 zeigen die Ausschnitte aus den 3D-FEM-Modellen. Zur Übersichtlichkeit wurden immer zwei Darstellungen des Modells abgebildet, zuerst die Darstellungsart gefüllt und darunter die Darstellungsart analytisch. In der linken Spalte der Tabelle befinden sich die Ausschnitte aus dem selbst modellierten Modell und in der rechten Spalte sind

## 6 Validierung

Ausschnitte aus dem Praxismodell. Die Interpretation der Anbindung des Binders an die Stütze ist in beiden Modellen gleich.

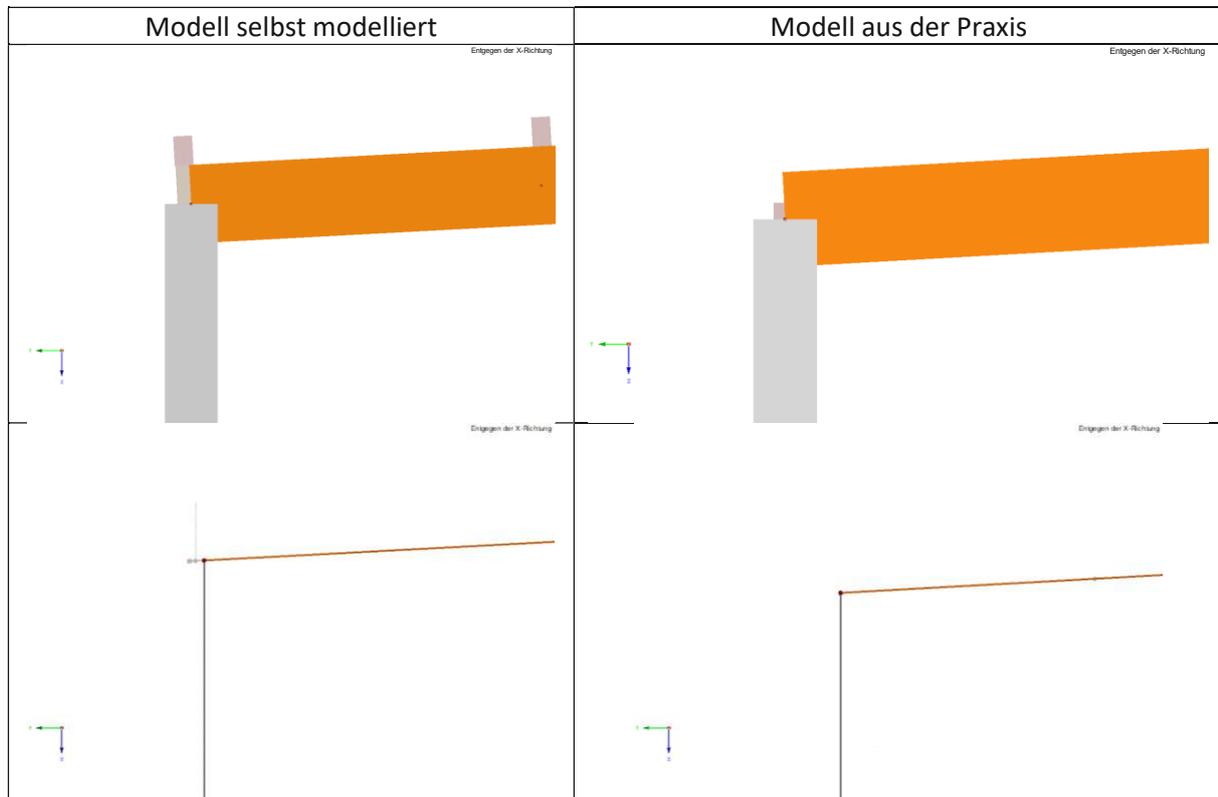


Tabelle 6-2 – Vergleich des Anschlusses des Binders an die Stütze

## 6 Validierung

Als Nächstes wird der Anschluss des Binders an die Mittelstütze verglichen.

Der Anschluss der Binder ist in beiden Modellen fast gleich, jener des rechten Binders ist gleich interpretiert. Dies ist in den Abbildungen in Tabelle 6-3 ersichtlich.

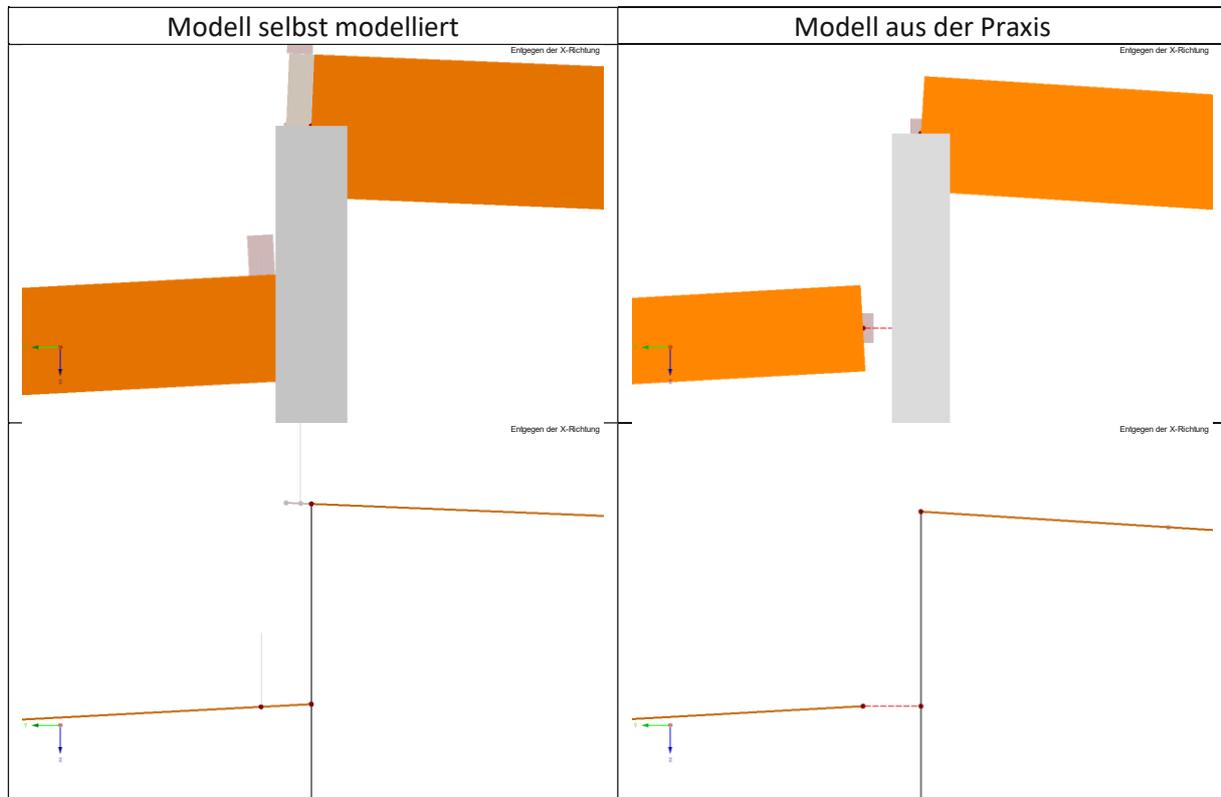


Tabelle 6-3 – Vergleich des Anschlusses des Binders an die Mittelstütze

Beim Anschluss des linken Binders wird im Modell aus der Praxis ein Stab mit rot strichlierter Linie dargestellt. Diese Linie stellt einen Kopplungsstab dar. Es handelt sich daher um eine Anbindungsvariante mit Kopplungsstab. Solche Interpretation des Anschlusses wurde in Kapitel 4.3 zur Pilotstudie bereits formuliert. Explizit ist diese Interpretation in Abbildung 4-16 dargestellt. Diese ist in Kapitel 4.3.2 beschrieben als der Typ-B.

Im nächsten Schritt wird die Interpretation der Köcherfundamente validiert.

In Tabelle 6-4 sind der Hauptrahmen mit den in Stahlbeton Köcherfundamenten eingespannten Stützen am unteren Knotenpunkt dargestellt. Die Einspannung ist mit einem grünen Rechteck in den Abbildungen dargestellt. In beiden Modellen sind die Köcherfundamente als Einspannung interpretiert. Im selbst modellierten Modell ist die Einspannung an der Oberkante des Köchers laut dem Regeln in Kapitel 4.4.2 gewählt. Die Längen der Stützen sind in beiden Modellen gleich. Daraus resultiert, dass die Einspannung im Modell aus der Praxis auch an der Oberkante des Köchers gewählt wurde.

## 6 Validierung

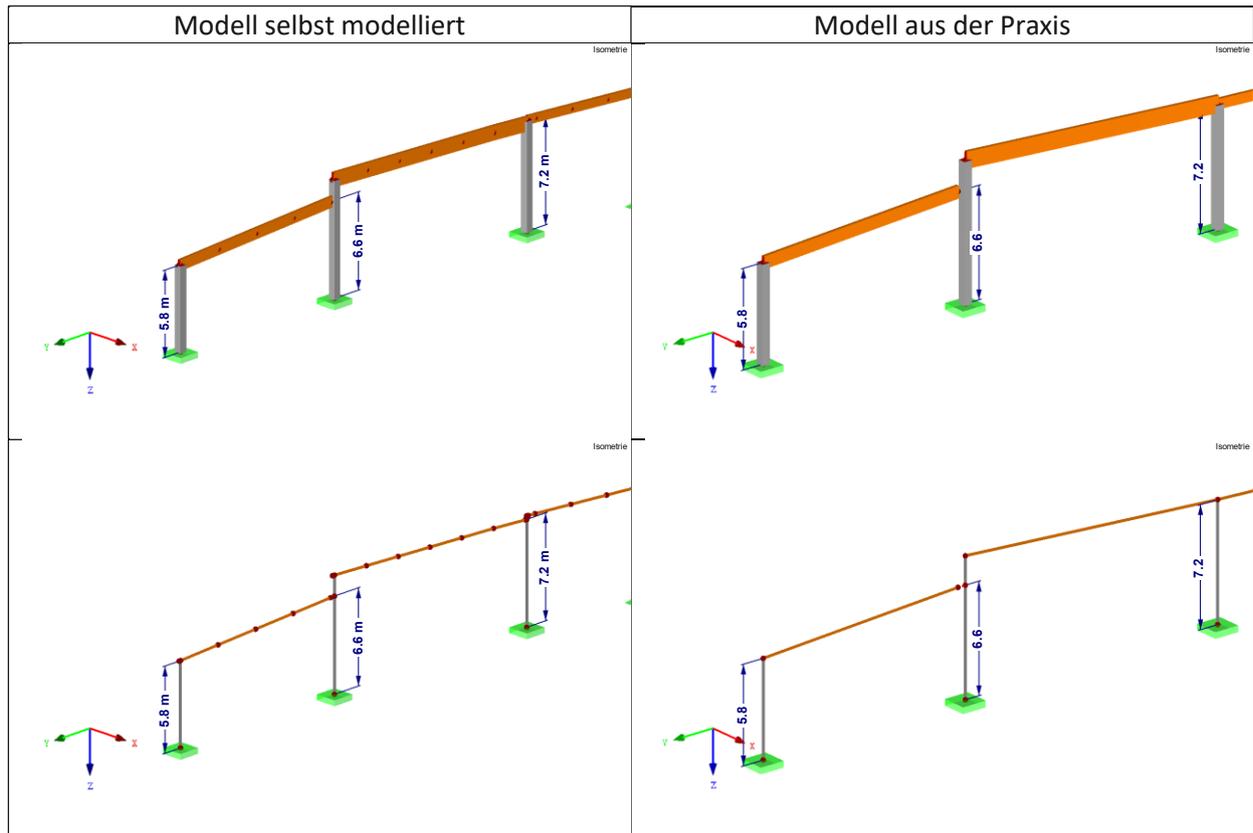


Tabelle 6-4 – Vergleich der Interpretation der Köcherfundamente

Als Nächstes werden die Nebenträger überprüft (s. Tab. 6-5).

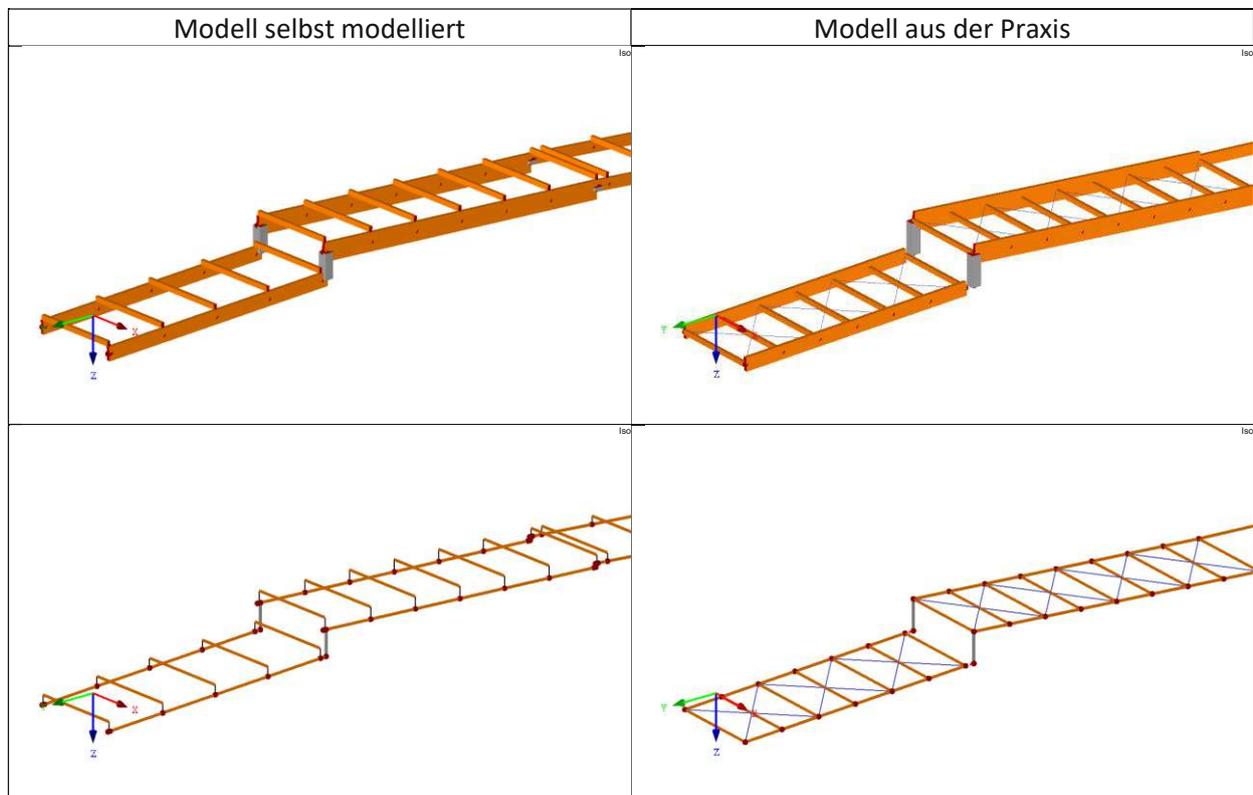


Tabelle 6-5 – Vergleich der Nebenträger

Die Lage der Träger ist in beiden Modellen gleich. Im Modell aus der Praxis wurden die Nebenträger vereinfacht in der Binderebene zentrisch modelliert (im rechten Teil von Tabelle 6-5 abgebildet). In

## 6 Validierung

der Teststudie wurden die Interpretationen der Nebenträger mit Exzentrizität angewendet (linker Teil von Tabelle 6-5).

Im Modell aus der Praxis ist noch der Dachverband ersichtlich, bestehend aus den Zugstäben. Diese Zugstäbe waren in der Architekturplanung nicht vorhanden, daher sind in der Teststudie nicht modelliert. Es wurden aber die Dachverbände in Kapitel 5.1.1 vermerkt.

Es wird weiters die Interpretation des Randträgers im Bereich der Verwaltung angezeigt (s. Tabelle 6-6).

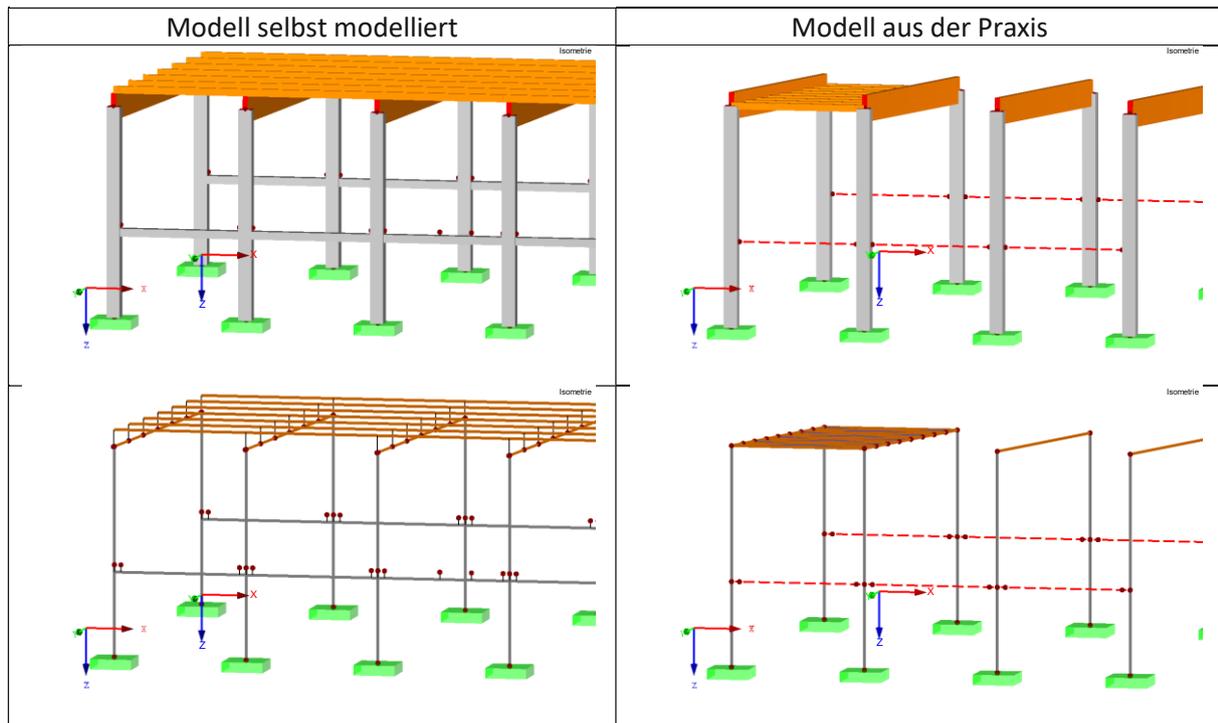


Tabelle 6-6 – Vergleich der Randträger

In beiden Modellen ist der Randträger als Linienelement interpretiert. Im selbst gebauten Modell ist der Randträger als Balken mit dem zugehörigen Querschnitt sowie der zugehörigen Exzentrizität modelliert. Im Modell aus der Praxis ist dieser Randträger vereinfacht als Starrstab ohne Exzentrizität (rot strichliert dargestellt in der rechten Spalte der Tabelle 6-6) interpretiert. Es gibt Unterschied in der Interpretation des Stabes.

Die Validierung der Details der Flächenelemente konnte nicht durchgeführt werden, weil die Flächenelemente im Modell aus der Praxis nicht vorhanden waren.

## 6.2 Teststudie 2

Die Validierung der Teststudie 2 wird nach dem gleichen Prinzip wie bei der Teststudie 1 gemacht. Die Abbildung 6-4 zeigt das selbst modellierte FEM-Tragwerksmodell der Teststudie 2. Abbildung 6-5 zeigt das FEM-Tragwerksmodell aus der Praxis, das für die Forschungszwecke zur Validierung zur Verfügung gestellt wurde.

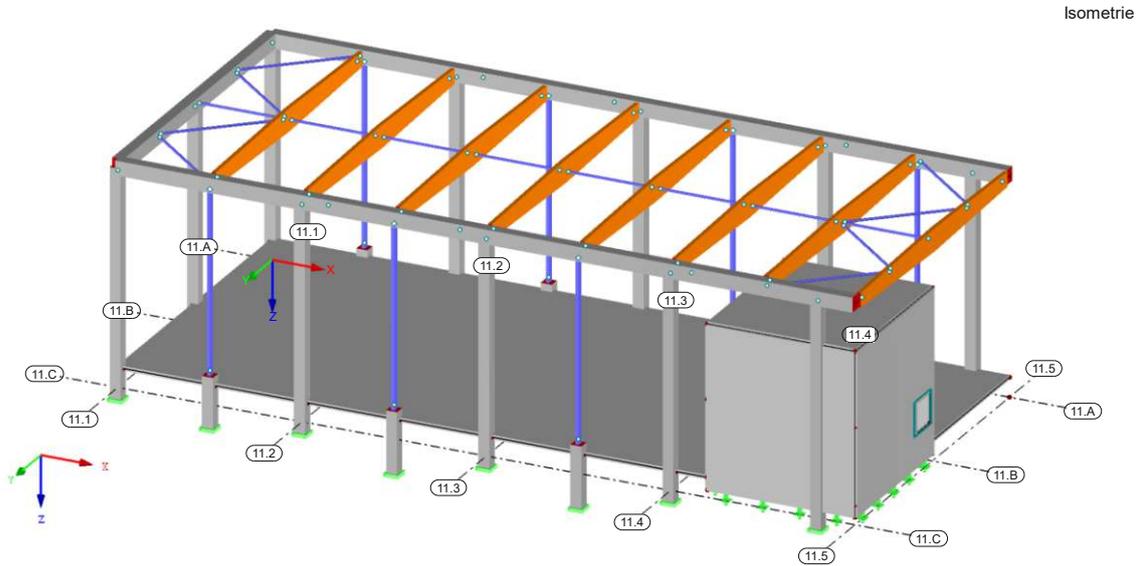


Abbildung 6-4 – Modell selbst modelliert

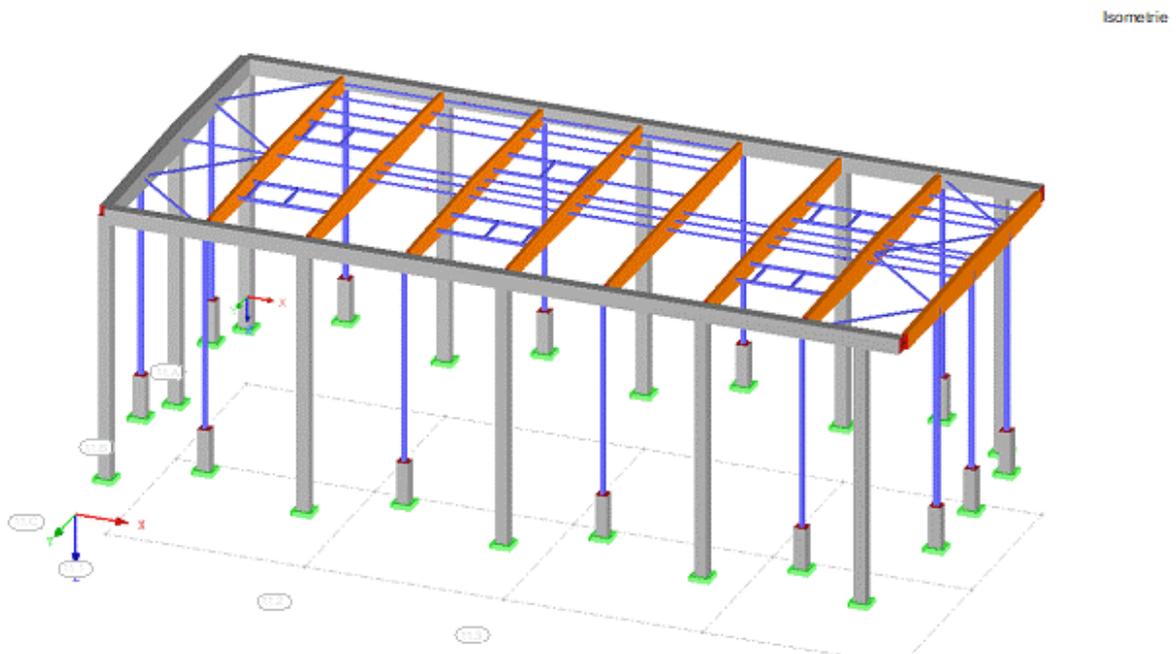


Abbildung 6-5 – Modell aus der Praxis

### Validierung der Bauteile

Der Vergleich der zwei FEM-Tragwerksmodelle ist tabellarisch in Tabelle 6-7 zusammengefasst.

ARCHITEKTUR	TRAGWERKSPLANUNG				Bewertung
	Modell selbst modelliert		Modell aus der Praxis		
BAUTEIL	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	
Stütze	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Fassadenstütze	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Hauptträger (Holzleimbinder)	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
FT Träger	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Verband (Aussteifung)	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Wand	Scheibe	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	
Plattendecke	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	
Bodenplatte	Platte	2D-FLÄCHENELEMENT	nicht vorhanden	2D-FLÄCHENELEMENT	
	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	
Köcherfundament	Knotenlager: Einspannung		Knotenlager: Einspannung		
Streifenfundament	Linienlager		nicht vorhanden		
<b>Anmerkungen:</b>					
Bewertungsskala					
	Interpretationen der Bauteile sind gleich				
	Interpretationen der Bauteile sind unterschiedlich				
	Tragwerkselement ist nicht vorhanden in dem Modell aus der Praxis				

Tabelle 6-7 – Vergleich der Statik-Modelle der Tragwerkselemente

Bauteile wie Stützen, Holzleimbinder, FT-Träger und Stahlverbände wurden als Tragwerkselemente gleich interpretiert. Die Querschnitte waren ebenfalls einig. Die Köcherfundamente wurden auch, wie im selbst gebauten Modell, als Knotenlager (Einspannung) im Modell aus der Praxis gleich interpretiert. Der Vergleich der Flächenelemente wie Wände, Bodenplatte, Decke über EG, Stiegenlauf oder Podest konnte nicht durchgeführt werden, denn diese Elemente waren in dem Modell aus der Praxis nicht vorhanden.

### Validierung der Details

Im nächsten Schritt werden die Details in den beiden Modellen verglichen. Das erste Detail wird Anschluss des Binders an den Randträger im Bereich der Stütze überprüft (s. Tab. 6-8).

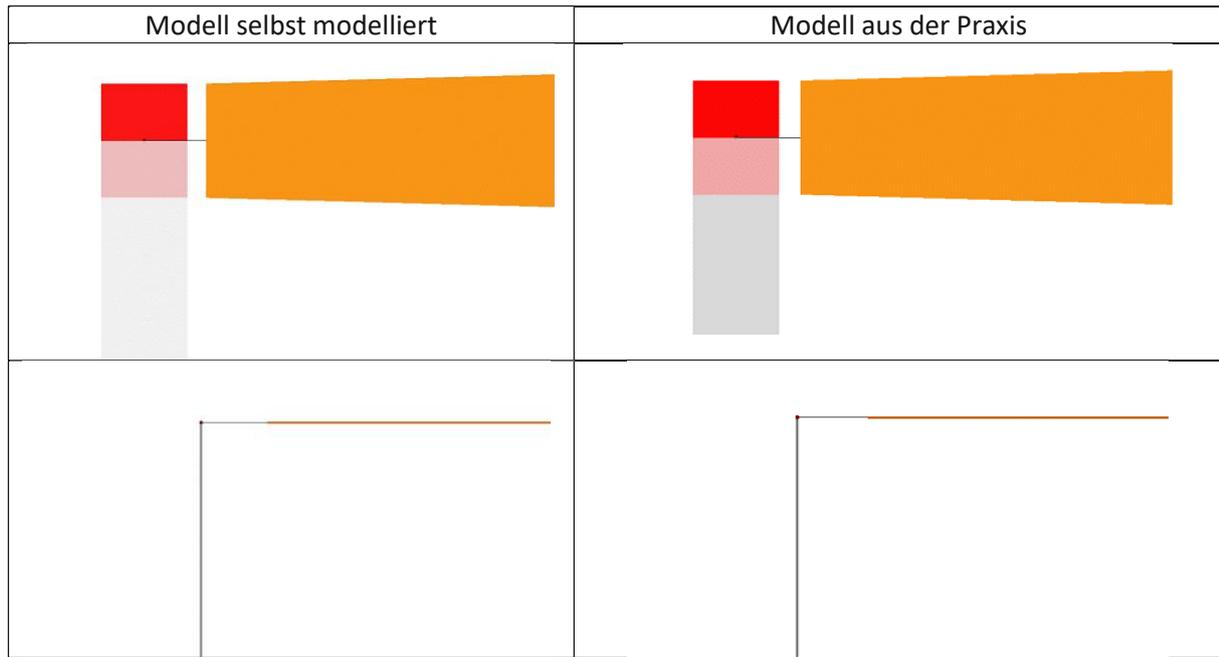


Tabelle 6-8 – Vergleich des Anschlusses des Binders an den FT-Träger im Bereich der Stütze

Der Anschluss des Binders ist in beiden Modellen gleich interpretiert. Der Vergleich ist in den Abbildungen in Tabelle 6-8 dargestellt. Weiters wird der Anschluss des Binder an den FT-Träger im Bereich der Fassadenstütze verglichen. Zur besseren Übersicht wurde eine isometrische Darstellung gewählt (s. Tabelle 6-9).

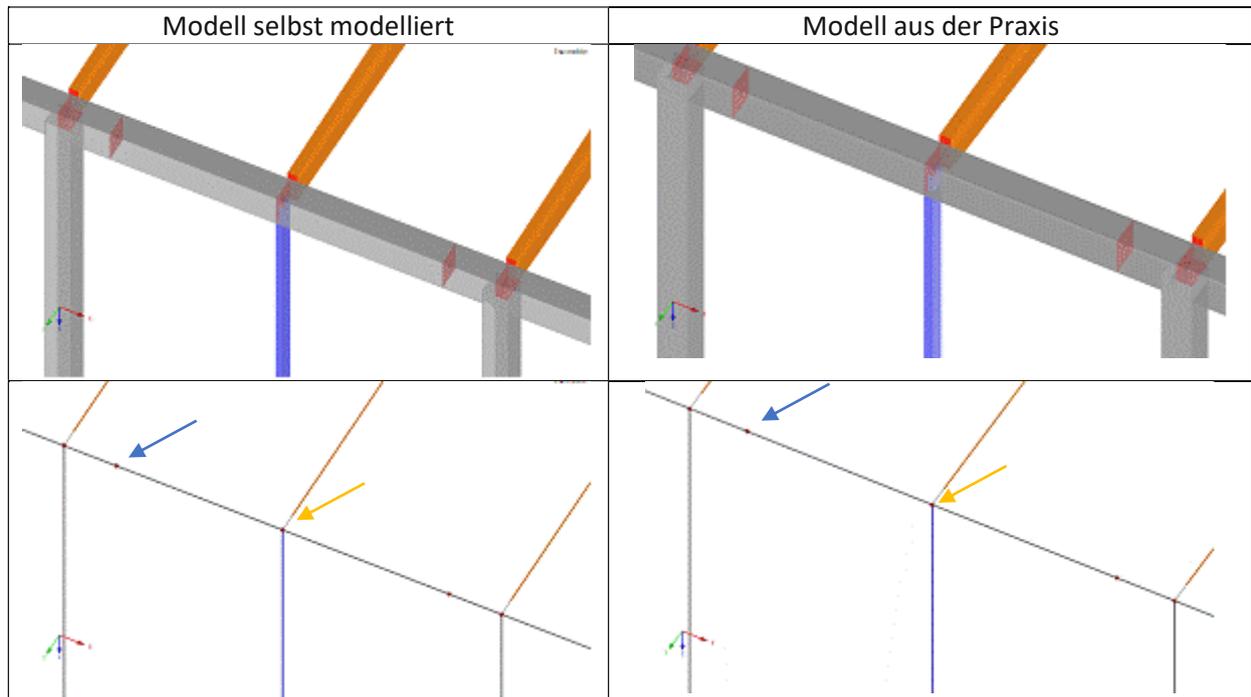


Tabelle 6-9 – Vergleich des Anschlusses des Binders an den FT-Träger im Bereich der Fassadenstütze

In den Abbildungen ist dieser Anschluss mit einem gelben Pfeil vermerkt. In beiden Modellen wurde dieser Anschluss gleich interpretiert. In den Abbildungen wird auf die Verbindung der FT-Träger mit einem blauen Pfeil gedeutet. Diese Verbindung wurde in beiden Modellen als Teilung des Trägers mittels Knotenpunktes durchgeführt.

Im Folgenden wird die Interpretation des Dachverbandes und der FT-Träger im Randbereich überprüft. Die Ausschnitte aus den FEM-Modellen sind in Tabelle 6-10 zusammengefasst.

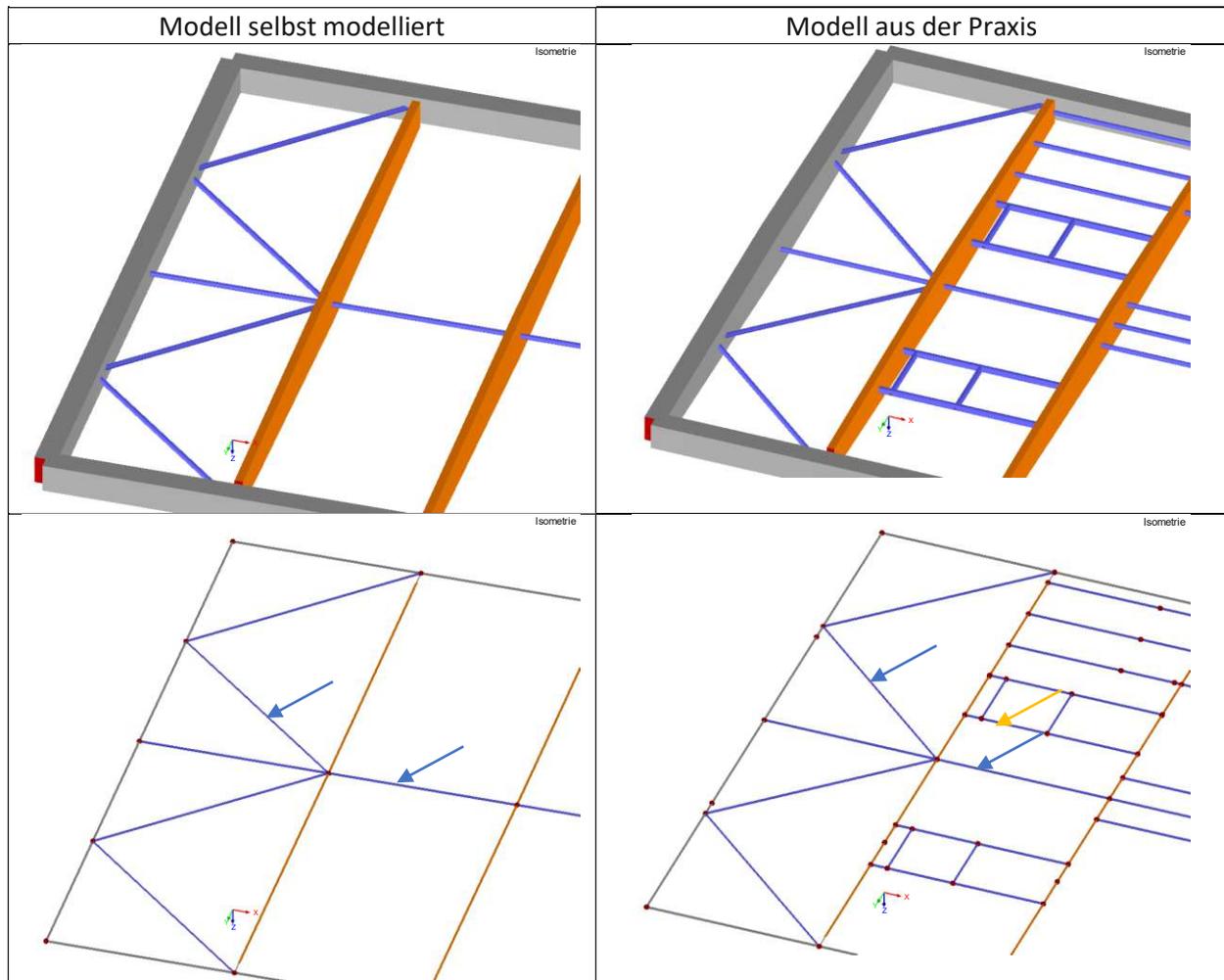


Tabelle 6-10 – Vergleich des Dachverbandes und der FT-Träger im Randbereich

Die Anbindungen der FT-Träger im Eck sowie die Anbindung und Interpretation des Dachverbandes ist in beiden Modellen gleich modelliert. Der Verband ist in den Abbildungen in Tabelle 6-10 mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet. Im Modell aus der Praxis sind Hilfsträger für die Aufhängung verschiedener Objekte modelliert. Diese Hilfsträger sind mit einem gelben Pfeil in der rechten Abbildung (Tabelle 6-10) gekennzeichnet. In der Teststudie wurden die Hilfsträger nicht modelliert, weil sie nicht Teil des Haupttragwerks sind.

Anschließend wird die Interpretation der Köcherfundamente überprüft. In nächster Tabelle 6-11 befinden sich Ausschnitte aus den Tragwerksmodellen mit Fokus auf Stützen und Stützenfundamente. In beiden Modellen sind die Köcherfundamente als Einspannung interpretiert. Damit sind die Modelle einig. Wo die Modelle nicht einig sind, ist eine Einspannhöhe. Zuerst wird die Einspannhöhe der StB-Stützen betrachtet (in den Bildern mit einem blauen Pfeil gekennzeichnet). Die Einspannhöhe bei dem selbst modellierten Modell liegt auf der OK der Köcher, doch beim Modell aus der Praxis liegt die Einspannhöhe auf ihrer Unterkante. Zur Klärung werde ich noch einen Ausschnitt aus dem Architekturplan vorzeigen, in dem der Unterschied zu sehen ist (s. Abb. 6-6). Die Fassadenstützen sind in beiden Modellen in gleicher Höhe aufgelagert (1,60 m). Unter diesen Stützen ist auch in beiden Modellen ein stabförmiges Fundament modelliert (mit einem gelben Pfeil gekennzeichnet). Der Unterschied liegt wiederum in der Einspannhöhe. Im selbst modellierten

## 6 Validierung

Modell ist die Einspannhöhe am Ende des Fundaments auf  $-1,75$  m gesetzt. Im Modell aus der Praxis liegt die Einspannhöhe bei  $-0,50$  m.

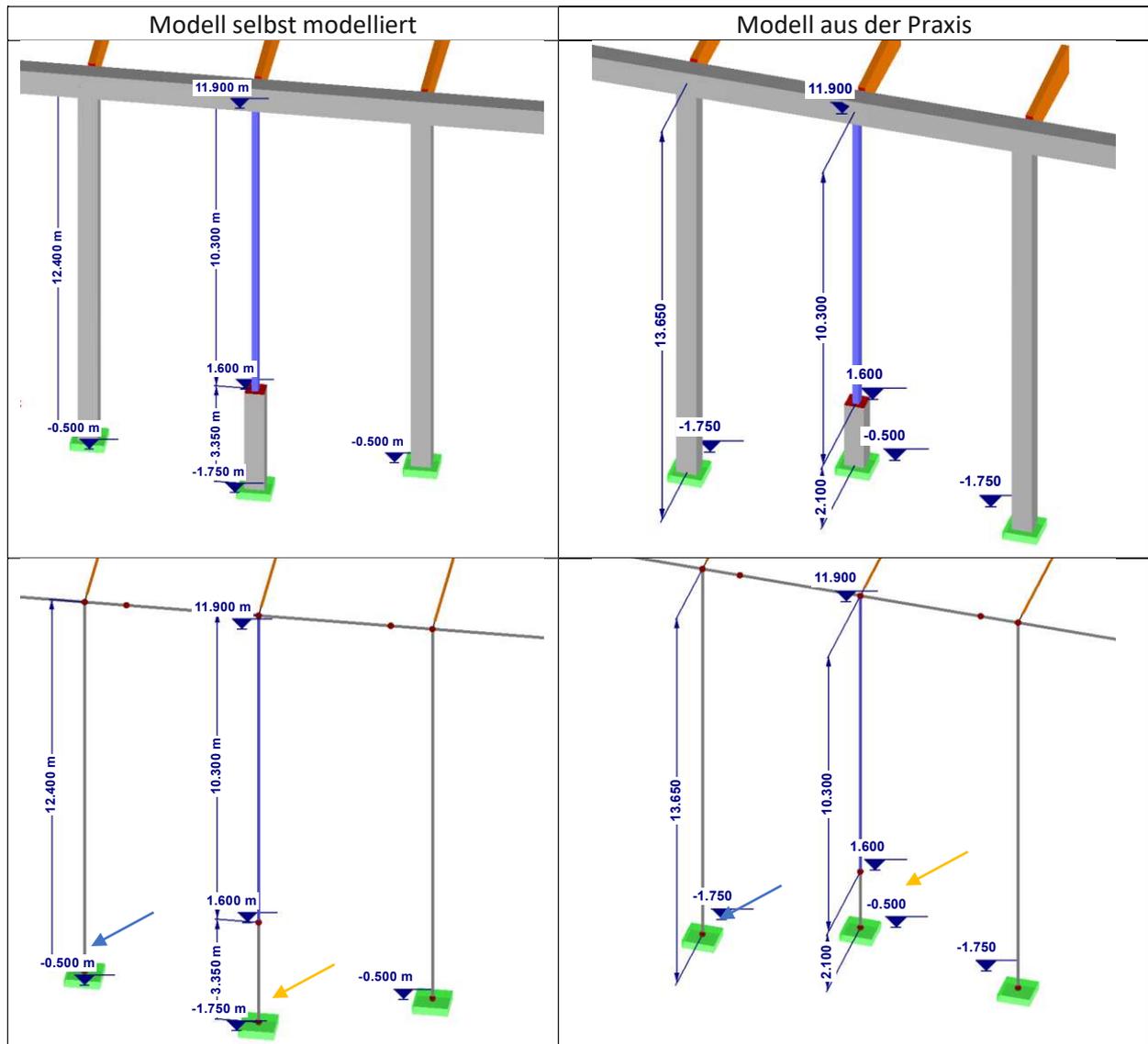


Tabelle 6-11 – Vergleich der Stützhöhe und Interpretation der Fundamente

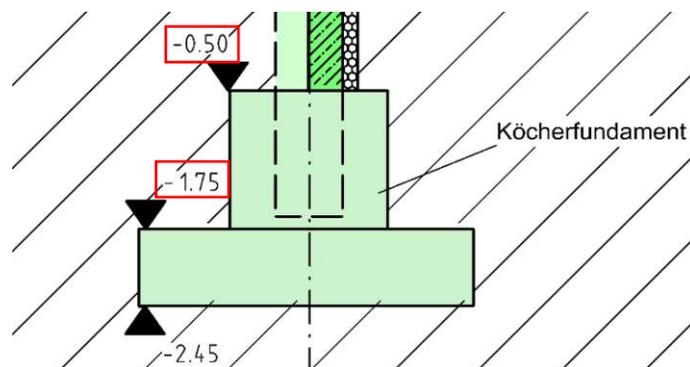


Abbildung 6-6 – Köcherfundament – Schnitt

### 6.3 Teststudie 3

Die Validierung der Teststudie 3 wird nach dem gleichen Prinzip wie bei der Teststudie 1 gemacht. Die Abbildung 6-7 zeigt das selbst modellierte FEM-Tragwerksmodell der Teststudie 3. Abbildung 6-8 zeigt das FEM-Tragwerksmodell aus der Praxis, das für die Forschungszwecke zur Validierung zur Verfügung gestellt wurde.

Isometrie

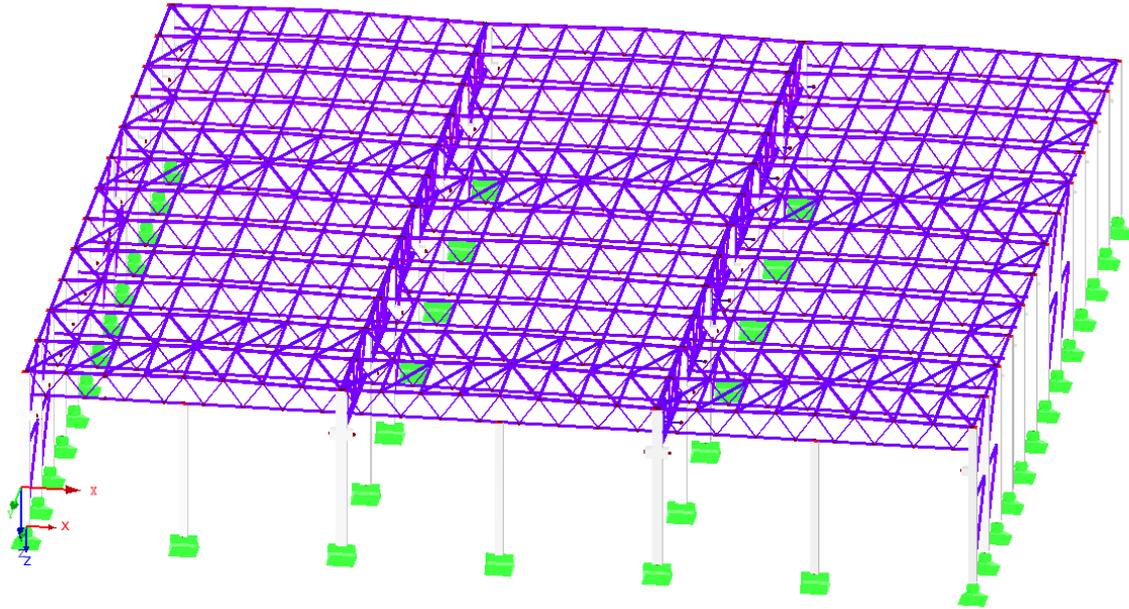


Abbildung 6-7 – Modell selbst modelliert

Isometrie

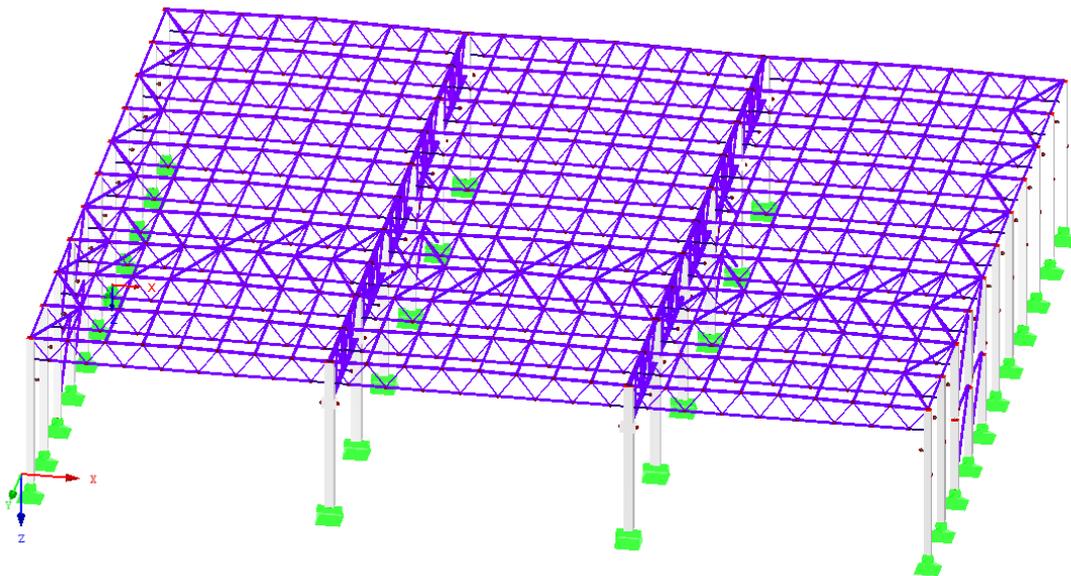


Abbildung 6-8 – Modell aus der Praxis

## Validierung der Bauteile

Der Vergleich der zwei FEM-Tragwerksmodelle ist tabellarisch in Tabelle 6-12 zusammengefasst.

ARCHITEKTUR BAUTEIL	TRAGWERKSPLANUNG				Bewertung
	Modell selbst modelliert		Modell aus der Praxis		
	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	TRAGWERKSELEMENT	DIMENSIONALITÄT	
Mittelstütze	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Stützenkonsole (Mitte)	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Randstütze	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Stützenkonsole (Rand)	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Binder- Obergurt	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Binder - Untergurt	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Binder - Strebe	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Pfette	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Längsträger - Obergurt	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Längsträger - Strebe	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Längsträger - Pfosten	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Längsträger - Untergurt	Balken	1D-LINIENELEMENT	Balken	1D-LINIENELEMENT	
Dachverband	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
Wandverband	Stab	1D-LINIENELEMENT	Stab	1D-LINIENELEMENT	
	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	AUFLAGER LAUT KAP. 3.4	[-]	
Blockfundament	Knotenlager: Festlager		Knotenlager: Festlager		
<b>Anmerkungen:</b>					
Bewertungsskala					
	Interpretationen der Bauteile sind gleich				
	Interpretationen der Bauteile sind unterschiedlich				
	Tragwerkselement ist nicht vorhanden in dem Modell aus der Praxis				

Tabelle 6-12 – Vergleich der Statik-Modelle anhand der Tragwerkselemente

**Validierung der Details**

Im nächsten Schritt werden die Details in den beiden Modellen verglichen. Als erstes Detail wird der Anschluss des Binders an die Randstütze überprüft.

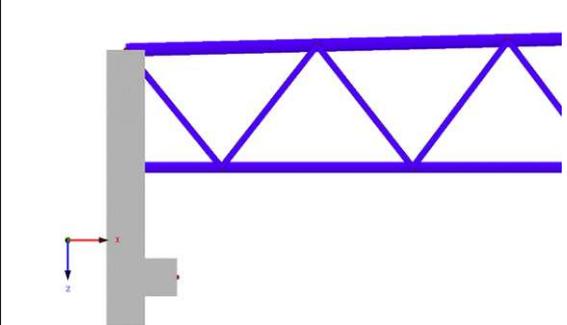
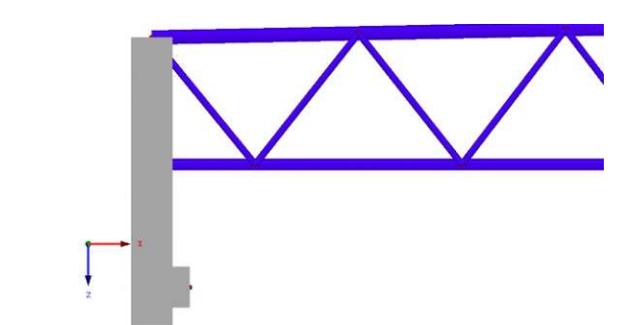
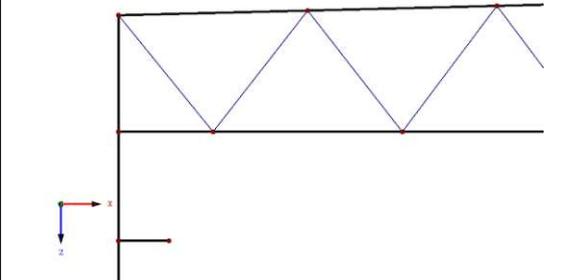
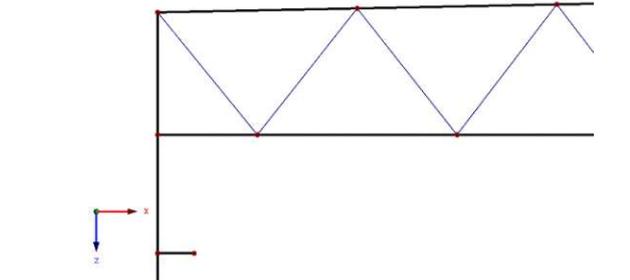
Modell selbst modelliert	Modell aus der Praxis
	
	

Tabelle 6-13 – Vergleich des Anschlusses des Fachwerkbinders an die Randstütze

Der Anschluss des Fachwerkbinders an die Randstütze ist in beiden Modellen gleich interpretiert. Der Obergurt des Binders ist mit dem Stützenkopf im oberen Knotenpunkt verbunden. Im gleichen Punkt wird die erste Strebe des Fachwerks angeschlossen. Der Vergleich der beiden Modelle ist in den Abbildungen in Tabelle 6-13 dargestellt.

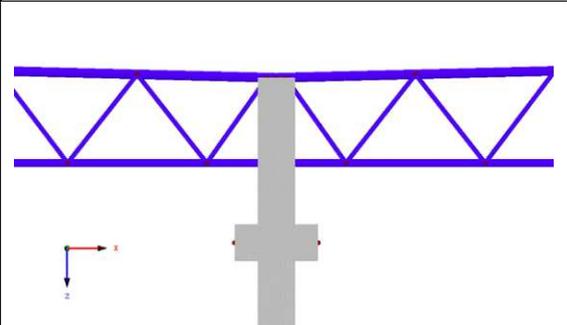
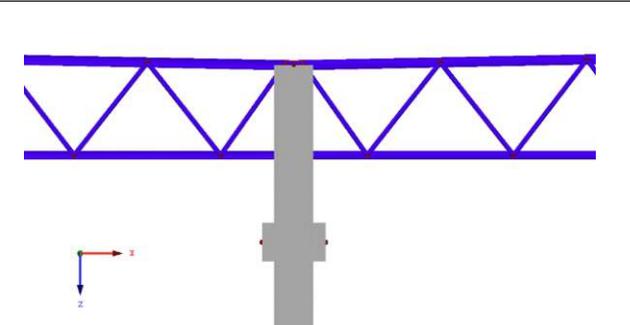
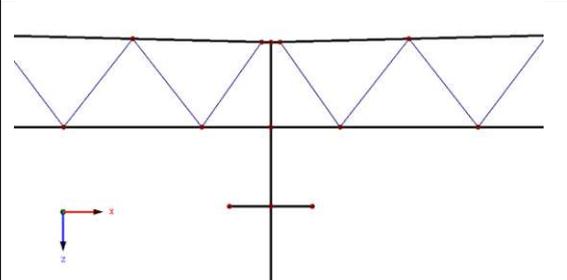
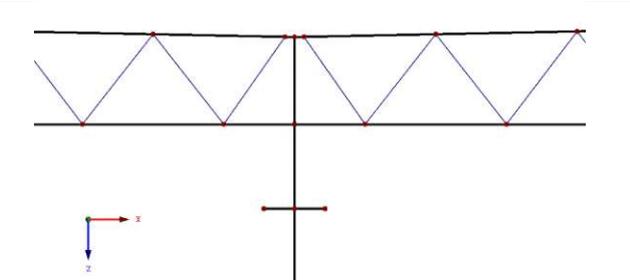
Modell selbst modelliert	Modell aus der Praxis
	
	

Tabelle 6-14 – Vergleich des Anschlusses der Fachwerkbinders an die Mittelstütze

## 6 Validierung

Der Anschluss der Fachwerkbinder an die Mittelstütze ist in beiden Modellen gleich interpretiert. Die Obergurte der Binder sind mit dem Stützenkopf in einem Knotenpunkt verbunden. Die Fachwerkstrebe ist bei beiden Modellen am Obergurt angeschlossen. Der Untergurt des Binders wird an die Stütze in der Kreuzung der Mittelachsen (Stütze/Untergurt) im Knotenpunkt angeschlossen. Der Vergleich der beiden Modelle ist in den Abbildungen in Tabelle 6-14 dargestellt. Dabei ist auch die kleine StB-Konsole unter dem Stahluntergurt in Tabelle 6-14 ersichtlich. Diese Konsole ist in beiden Modellen als Balken interpretiert.

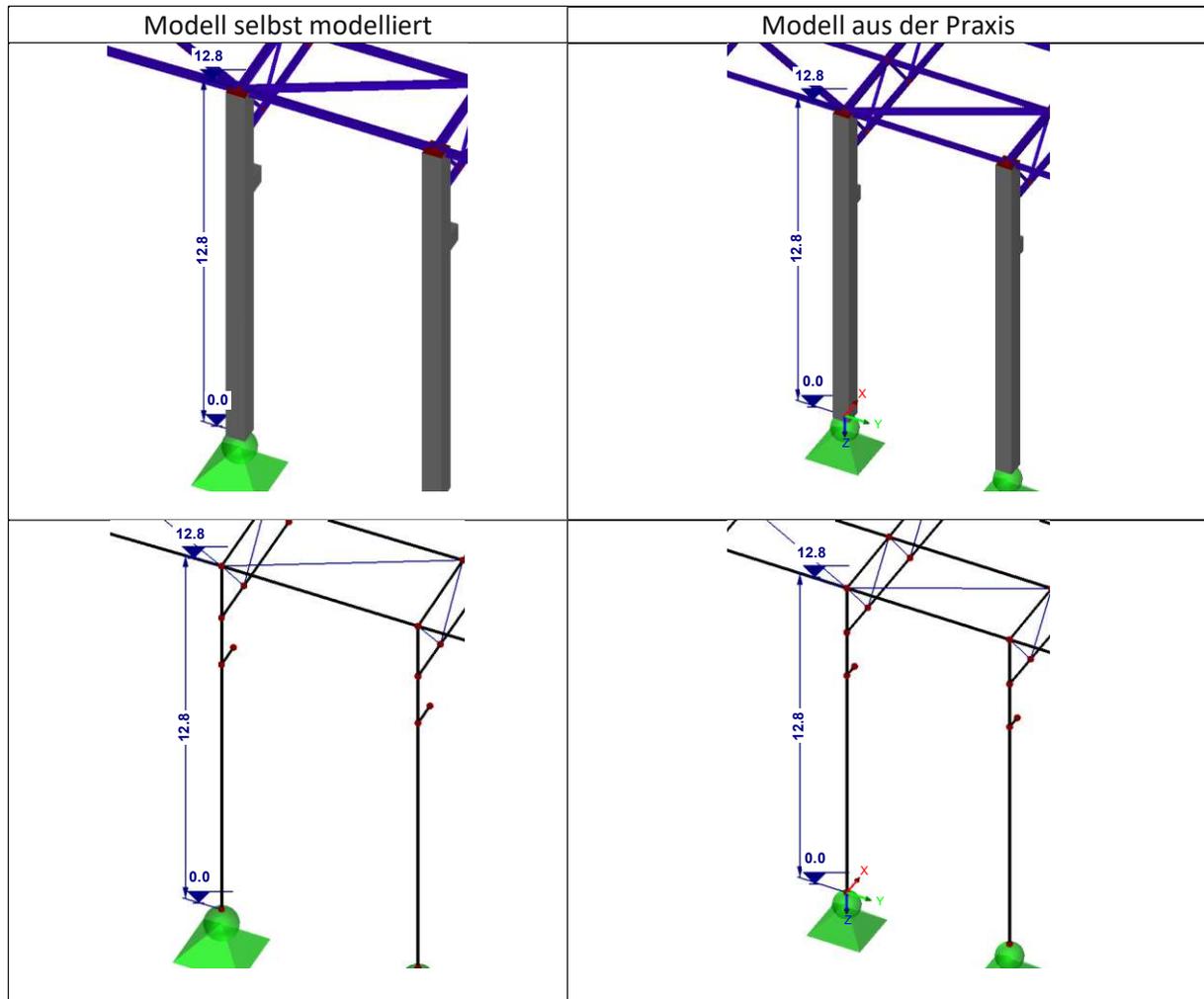


Tabelle 6-15 – Vergleich der Stützhöhe und Auflagerung

In Tabelle 6-15 ist der Vergleich des Randfeldes der Halle abgebildet. Die Stützhöhe ist in beiden Fällen gleich modelliert. Damit wird auch nachgewiesen, dass die Lagerung der Stützen in beiden Modellen auf gleichem Niveau erfolgt. Die Randstützen lagern auf massiven Fundamentplatten, die in beiden Tragwerksmodellen gleich als Festlager (grün dargestellt) interpretiert sind.

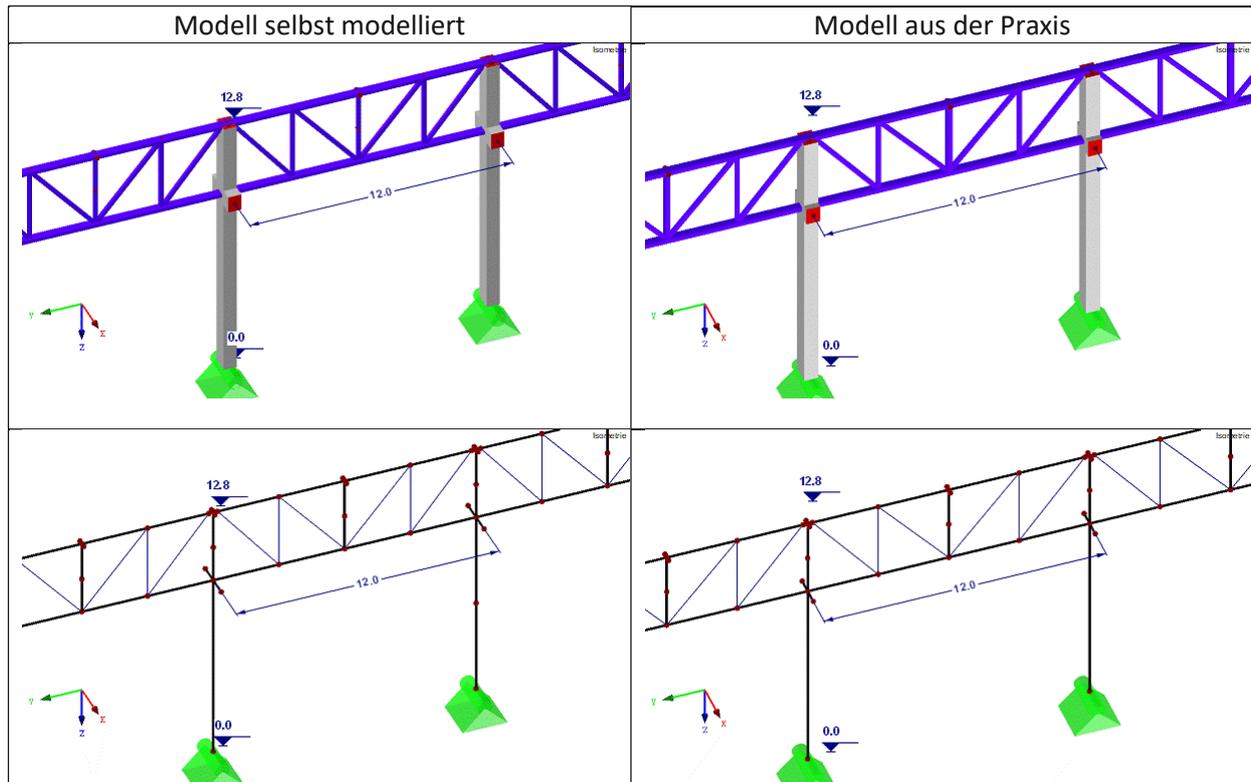


Tabelle 6-16 - Vergleich des Längsträgers und der Mittelstützen

In Tabelle 6-16 sind Abbildungen dargestellt, die den Vergleich des Längsträgers und der Mittelstützen zusammenfassen. Position, Abmessungen sowie Interpretationen sind in beiden Modellen gleich.

Weiters wird der Vergleich des Dachverbandes gezeigt. Die Abbildungen werden auf den nächsten zwei Seiten zur Übersichtlichkeit im großen Maßstab angezeigt. Die Abbildungen des selbst modellierten Modells sind in Tabelle 6-17 angeordnet, die Abbildungen des Modells aus der Praxis in Tabelle 6-18. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden drei Farben ausgewählt: Der Dachverband ist rot markiert, die Streben grün und Obergurte, Untergurte, Pfetten, Stützen und Konsolen blau. Das Hauptaugenmerk wird auf den Dachverband gelegt. In beiden Modellen werden der Dachverband sowie die Pfetten gleich interpretiert. Der Dachverband sowie die Pfetten sind aus einzelnen Stäben zusammengesetzt. Die Anordnung der Stäbe sowie die Knotenpunkte sind in beiden Modellen gleich.

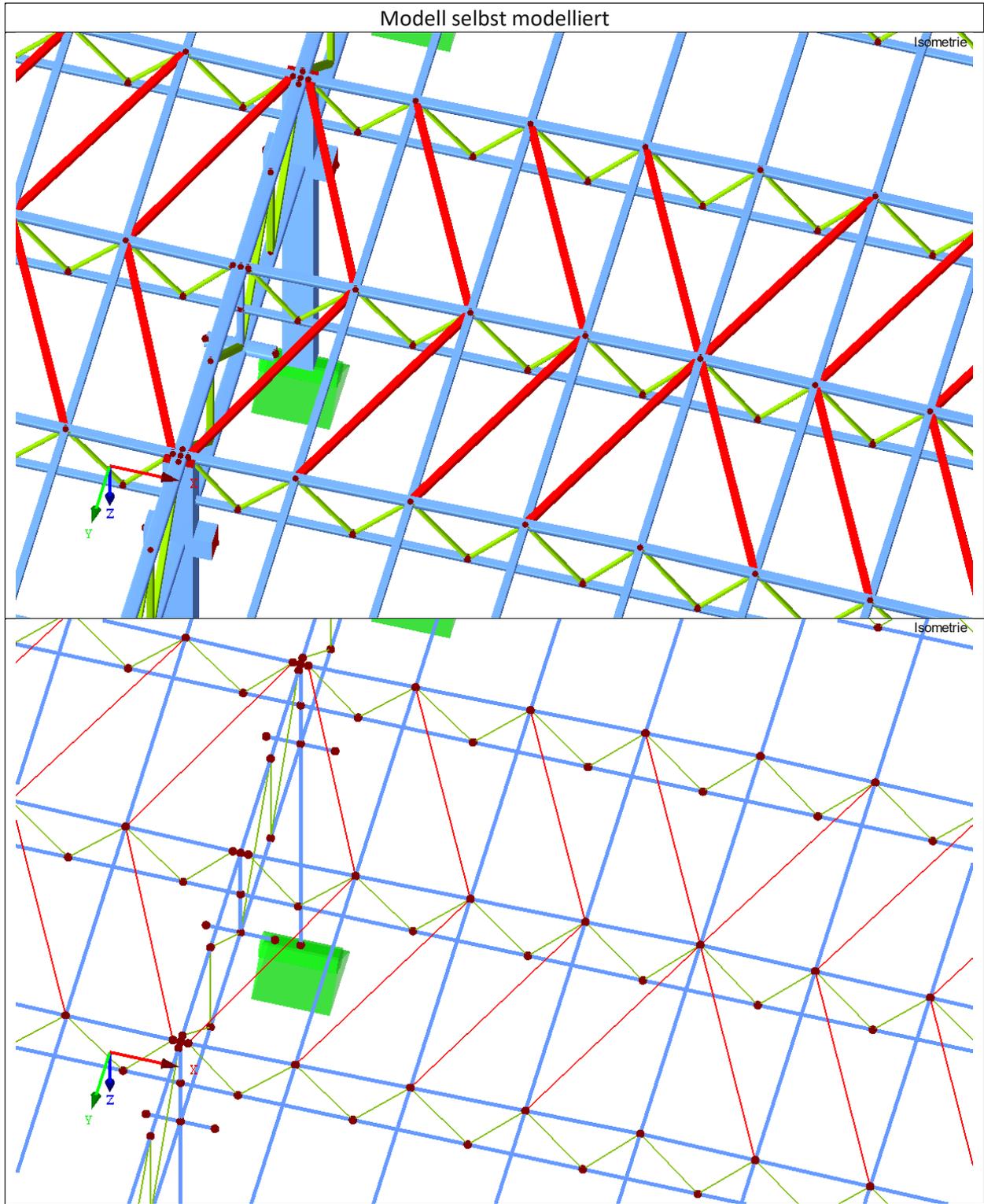


Tabelle 6-17 – Ausschnitt aus dem Modell mit dem Dachverband

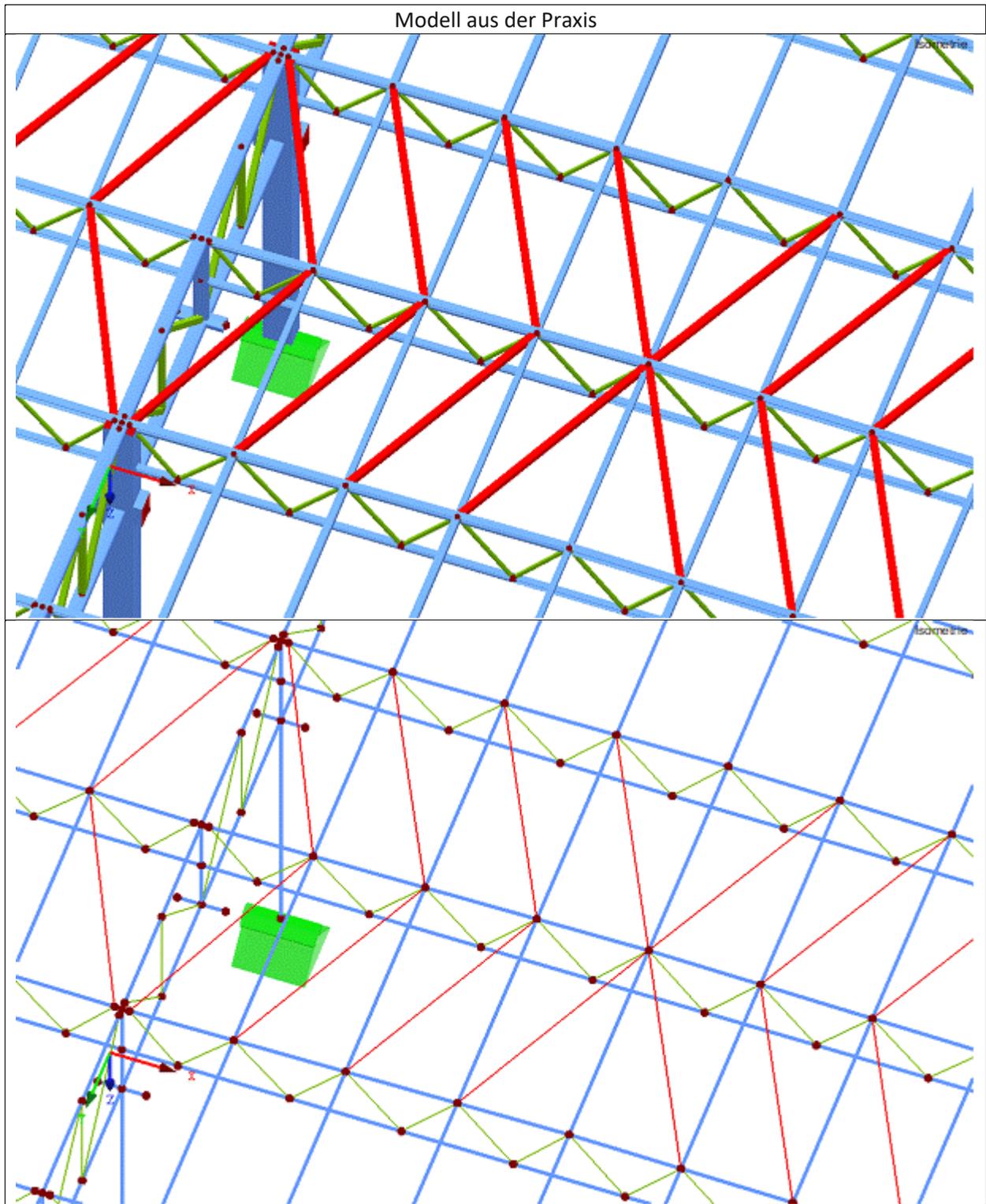


Tabelle 6-18 – Ausschnitt aus dem Modell mit dem Dachverband

Eine tabellarische Zusammenfassung von den Ähnlichkeiten und Unterschieden in allen Teststudien ist in der Tabelle 6-19 dargestellt.

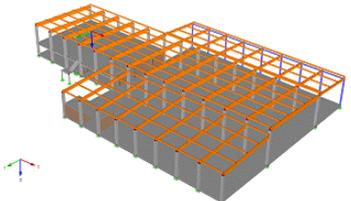
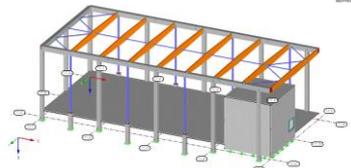
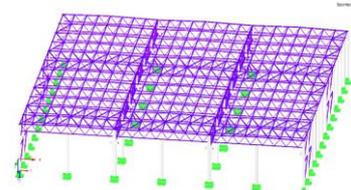
	Teststudie	Ähnlichkeiten	Unterschiede
1		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauteil Stütze sowie Träger ist in allen drei Studien gleich interpretiert.</li> <li>• Bauteil Köcherfundament ist in der Studie Nr. 1 sowie Nr. 2 gleich als Einspannung interpretiert.</li> <li>• Anschluss des Trägers an die Randstütze erfolgt in den Studien Nr. 1 und Nr. 2 Studien gleich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einspannhöhe des Köcherfundaments liegt in der Teststudie Nr. 2 im Gegensatz zur Studie Nr. 1 nicht auf Oberkante Köcher.</li> <li>• Anschluss des Hauptträgers an die Randstütze erfolgt in der Studie Nr. 2 wegen der geometrischen Detailbildung des Anschlusses im Gegensatz zu den Studien Nr. 1 und Nr. 2 mit der zusätzlichen Exzentrizität.</li> </ul>
2		<ul style="list-style-type: none"> <li>• In allen drei Teststudien ist zu merken, dass die stabförmigen Bauteile, unabhängig davon, ob sie aus Stahl, Beton oder Holz bestehen, als 1D – Linielemente interpretiert werden.</li> <li>• In den Teststudien Nr. 1 und Nr. 2 war es nicht möglich, die 2D-Flächenelemente sowie die Interpretation der Streifenfundamenten zu validieren, da diese nicht in den Modellen aus der Praxis modelliert wurden.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• In der Teststudie 3 sind die Stützen auf Blockfundamenten gelagert, weshalb eine andere Art des Lagers (Festlager) als in den Teststudien Nr. 1 und Nr. 2 verwendet wird.</li> </ul>
3		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei allen drei Teststudien ist zu sehen, dass die Verbindung zwischen einzelnen 1-D Elementen (Stäbe, Balken) geometrisch im Schnittpunkt der Mittelachsen dieser Elemente erfolgt.</li> </ul>	

Tabelle 6-19 – Validierung der drei Teststudien

## 7 Diskussion

In diesem Kapitel der Masterarbeit werden die Hauptpunkte zusammenfassend dargestellt. Zu Beginn dieses Abschnitts werden die Forschungsfragen nochmals erwähnt, nämlich:

- a) *Gibt es universale Interpretationsregeln für die Erstellung von Tragwerksmodellen (Statik-Modellen) anhand von vorhandener Architekturplanung in der Leistungsphase LPH 3 - Entwurfsplanung?*
  
- a) *Wie werden Tragwerksmodelle aus den Architektur Unterlagen intuitiv modelliert?*

Um die Interpretationsregeln für die Erstellung von Statik-Modellen anhand von Architekturentwürfen zu untersuchen, wurde die Forschungsarbeit in vier Schritten durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde die bestehende Fachliteratur, die Normen, wissenschaftliche Papers eingehend studiert, analysiert und deren Resultate dokumentiert. Daraus konnten wertvolle Interpretationen, welche Tragwerksplaner durchführen, gewonnen werden. Bei dieser Vorgehensweise lag ein Hauptaugenmerk auf der Prozessbetrachtung. Dabei ging es um die Beschreibung, welche Interpretationen im Planungsprozess bis zum Ende der Entwurfsphase zwischen dem Architekten und dem Tragwerksplaner stattfinden. In diesem Zusammenhang lässt sich feststellen, dass der Architekt im Architekturprogramm das Modell eines Bauwerks aus den virtuellen 3D-Bauteilen als physisches Modell modelliert. Der Tragwerksplaner hingegen interpretiert das Modell des gleichen Bauwerks als die Zusammensetzung einzelner Tragwerkselemente. Diese bilden ein statisch eigenes System, welches im Statik-FEM-Programm durch den Tragwerksplaner modelliert wird und aus Knotenpunkten und Linien besteht. Mit diesen werden einzelne tragende Elemente (Tragwerkselemente) des Tragwerks gebildet. In der Fachliteratur wurden Regeln, welche einzelne Tragwerkselemente beschreiben, gefunden. Diese Regeln beinhalten hauptsächlich zwei Kriterien. Ein Kriterium bezieht sich auf rein geometrische Eigenschaften (Abmessungen, Krümmungen und ihre Verhältnisse zueinander). Ein weiteres Kriterium ist die Art und Richtung der Belastung, welche das Tragwerkselement übertagen kann. Diese Regeln und Definitionen der einzelnen Tragwerkselemente mit der Klassifizierung wurden in Kapitel 3.3. näher beschrieben. Weiters wurde festgestellt, dass die Tragwerksplaner im Bereich der Fundamente das Modell mit den Lagern fixieren. Aus der Fachliteratur wurden Regeln für verschiedene Lagertypen in Kapitel 3.4 dokumentiert. Diese richten sich nach der Anzahl und der Art der Reaktionskräfte, welche im Lager entstehen und deren geometrische Position des Lagers. Diese geometrische Position bedeutet die Fixierung des Tragwerkes entweder im Knotenpunkt oder entlang der Linie oder in der Fläche.

Im zweiten Schritt wurde eine Pilotstudie angefertigt, indem ein Statik-Modell anhand eines Hallentragwerks erstellt wurde. Die Aufzeichnung des Statik-Konzepts diente dazu, tiefere Erkenntnisse für die einzelnen Beziehungen im Tragwerk zu gewinnen. Diese wurden dann bei der Statik-Modellbildung verwendet. Hier wurde die Modellierung des 3D-Statik-Modells des Hallentragwerks gezeigt. Daraus wurden die weiteren geometrischen Interpretationsregeln abgeleitet. Diese beschreiben vor allem die Modellierung der wichtigen Anschlüsse der Tragwerkselemente. Mithilfe der Fachliteratur und der Euronormen wurden geometrische Regeln erläutert. Dabei handelt es sich um Regeln, welche folgende Aspekte beschreiben: Anschluss der Stütze an das Köcherfundament, Anschluss des Trägers an die Stütze, Anschluss der Platte an den Träger und die Berücksichtigung einer Außermittigkeit. Die Auflistung der Interpretationsregeln, welche gemäß den Bauteilen zusammengefasst wurden, finden sich in Kapitel 4.4.

Im dritten Schritt wurden drei Teststudien mithilfe der bisher definierten Interpretationsregeln selbst modelliert. Am Anfang jeder Teststudie wurde der Entwurf des Architekten und die Beschreibung des Statik-Konzepts als Basis vorgestellt. Es wurde zu jeder Teststudie eine Tabelle mit Interpretationen der einzelnen Bauteile dargestellt. In diesen drei Tabellen wurde zusammengefasst, wie einzelne Bauteile im architektonischen Modell gezeichnet sind, und wie diese der Tragwerksplaner interpretiert (vgl. Tab. 5-2 auf Seite 44). Aus den einzelnen Teststudien dieser Arbeit ist die Konstruktion des Tragwerksmodells ersichtlich, wobei der Fokus auf den Detailanbindungen liegt. In diesem Zusammenhang lässt sich festhalten, dass die Interpretationsregeln aus den Schritten eins und zwei gut anwendbar in Bezug auf die drei Teststudien sind.

Im vierten Schritt wurden die selbst konstruierten Modelle mit Praxismodellen aus Tragwerkplanungsbüros verglichen. Die Validierung vorhandener Tragwerkelemente aus den drei Teststudien war teilweise erfolgreich. Hervorheben möchte ich, dass die Validierung der dritten Teststudie gelungen ist. Bei den ersten beiden Teststudien konnten die Flächenelemente nicht validiert werden, da die entsprechenden Daten aus den Praxismodellen fehlten. Geometrische Unstimmigkeiten waren an gewissen Stellen geringfügig vorhanden. So wurden bei der ersten Teststudie kleine Unterschiede vermerkt. Exemplarisch sei hier der Anschluss des Hauptträgers an die Mittelstütze (Tabelle 6-3) erwähnt, wobei im selbsterstellten Modell der Träger direkt an die Stütze angeschlossen ist. Im Praxismodell hingegen ist der Anschluss mithilfe des Kopplungsstabes gewährleistet. Einschränkend muss erwähnt werden, dass die vorhandenen Interpretationsregeln um komplexere Geometrien, vor allem von den 2D-Flächenelementen, erweitert werden sollten.

## 8 Conclusio

Ziel dieser Arbeit war einerseits die Analyse und Dokumentation der intuitiven Modellierungsschritte in der Tragwerks-Modellerstellung anhand der gegebenen Architekturplanung in der Entwurfsphase (LPH 3 lt. HOAI). Zudem stand das Herausarbeiten von universalen Interpretationsregeln für die Tragwerksmodellbildung und der damit verbundene Erkenntnisgewinn im Mittelpunkt der Arbeit.

Diese Interpretationsregeln sollten vor allem zur Automatisierung der Modellübertragung und zum fehlerfreien Datenaustausch zwischen dem Architekturprogramm und dem Statik-Programm dienen. Dabei ist das Ziel, den Aufwand der Nachbearbeitung des zu übertragenden Architekturmodells in das Statik-Programm zu minimieren. Vorteilhaft wäre eine universale Schnittstelle, die die Interpretationsregeln in einem Datenaustauschprozess zwischen dem Architekturprogramm und dem Statik-Programm einbindet. Dadurch sollte eine fehlerfreie Übertragung zwischen den beiden erwähnten Programmen ermöglicht werden und die Kommunikation zwischen diesen einfacher stattfinden. Die in dieser Arbeit vorgestellten Interpretationsregeln haben ein sehr großes Potenzial bei der Automatisierung der modellbasierten Kommunikation. Da sich diese Arbeit vor allem auf die Produktionshallen fokussiert hat, haben diese Regeln den größten Anwendungsbereich im Gebiet der Industriebauten. An dieser Stelle ist zu bemerken, dass der Einsatz von künstlicher Intelligenz große Chancen bieten kann, wobei die erforschten Interpretationsregeln Teil der Wissensbasis darstellen werden.

Derzeit ist es fast unmöglich alle Interpretationsregeln zu erfassen und sie standardisieren zu können. Es wird sehr viel Quellen- und Expertenwissen benötigen, um alle zu sammeln, zu dokumentieren und zu standardisieren. Der Umgang mit komplexen Details, freien Geometrien und Diskontinuitätsbereichen wie z. T. im Kapitel 3.2. beschrieben, benötigt immer die Einschätzung und Beurteilung durch den Expert. Bei der Modellbildung solcher komplexen Statik-Modellen spielen Tragwerksplaner mit ihrer Erfahrung und ihrem Wissen eine entscheidende Rolle. Auch wenn die Architekturmodelle in die Statik-Modelle automatisiert übertragen werden, muss der erfahrene Tragwerksplaner das Modell auf Vollständigkeit und Richtigkeit prüfen und einschätzen, ob es die richtigen Ergebnisse liefert. Automatisierung der Modelübertragung mithilfe der Interpretationsregeln erspart vor allem die Routinearbeit der Modellbildung und unterstützt den Tragwerksplaner bei der Ausübung seiner Tätigkeit. Weiters hofft der Autor, dass diese Arbeit zur intensiveren Auseinandersetzung mit weiteren Interpretationsregeln und Expertenwissen anregt.

## 9 Referenzen

Albert, Andrej (Hg.) (2016): *Schneider - Bautabellen für Ingenieure. Mit Berechnungshinweisen und Beispielen.* Bundesanzeiger Verlag GmbH. 22. Auflage: Werner Verlag.

Azhar, Salman; Hein, Michael; Blake, Sketo (2008): *Building Information Modeling (BIM): Benefits, Risks and Challenges.* Online verfügbar unter [https://www.academia.edu/1216737/Building\\_information\\_modeling\\_BIM\\_Benefits\\_risks\\_and\\_challenges](https://www.academia.edu/1216737/Building_information_modeling_BIM_Benefits_risks_and_challenges), zuletzt geprüft am 05.07.2021.

Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob (2015): *Building Information Modeling.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Dlupal Software (o. J.): *RFEM 5 Online Handbuch.* Online verfügbar unter <https://www.dlupal.com/de/downloads-und-infos/dokumente/online-handbuecher/rfem-5/01/01>, zuletzt geprüft am 21.10.2021.

Dlupal Software (2016): *RF-/FUND Pro. Bemessung von Einzelfundamenten nach EN 1992-1-1 und EN 1997-1.* Online verfügbar unter <https://www.dlupal.com/-/media/Files/website/documents/manuals/rfem-and-rstab-add-on-modules/reinforced-concrete-structures/foundation-pro/rf-fund-pro-handbuch-de.pdf>, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Fingerloos, Frank; Meyer, Lars (2011): *Beispiele zur Bemessung nach Eurocode 2. Band 1 ; Hochbau. 1.korrigierter Nachdruck.* Berlin: Ernst Sohn. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=1977787>.

Gasteiger, Adriane (2015): *BIM in der Bauausführung. Automatisierte Baufortschrittsdokumentation mit BIM, deren Mehrwert und die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Phase der Bauausführung.* Zugl.: Innsbruck, Univ., Masterarbeit, 2014. 1. Aufl. Innsbruck: Innsbruck Univ. Press (Series Bauwirtschaft und Projektmanagement, Bd. 27).

Grimm, Friedrich; Kocker, Ronald (2011): *Hallen aus Stahl Planungsleitfaden.* Düsseldorf: bauforumstahl e.V.

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang (2011): *Technische Mechanik 1.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Schröder, Jörg; Wall, Wolfgang A. (2012): *Technische Mechanik 2. Elastostatik.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (Springer-Lehrbuch).

Gross, Dietmar; Hauger, Werner; Wriggers, Peter (2014): *Technische Mechanik 4.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

HOAI 2013-Textausgabe/HOAI 2013-Text Edition (2013): *Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013/Official Scale of Fees for Services by Architects and Engineers dated July 10, 2013.* 6. Aufl. 2019: Springer Fachmedien Wiesbaden.

Hu, Zhen-Zhong; Zhang, Xiao-Yang; Wang, Heng-Wei; Kassem, Mohamad (2015): *Improving interoperability between architectural and structural design models: An industry foundation classes-based approach with web-based tools.* In: *Automation in Construction* (66), S. 29–42.

Jäger, Wolfram; Pflücke, Torsten; Waurig, Ralph; Figge, Dieter; Meyer, Udo (2002): *Bemessung von Ziegelmauerwerk. Ziegelmauerwerk nach DIN 1053-1.* Unter Mitarbeit von Heinrich Metzemacher und Wolf-Rüdiger Metje. Bonn, zuletzt geprüft am 2021.

## 9 Referenzen

- Kadlčák, Jaroslav; Kytýr, Jiří (2010): Statika I. Stavebních Konstrukcí. Základy stavební mechaniky, Staticky určité prutové konstrukce. 3. Aufl. Brno: VUTIUM.
- Kepplin, Ragna; Schnellenbach-Held, Martina; Held, Markus (2017): Building Information Modeling – Umsetzung in der Tragwerksplanung. In: *Bautechnik* 94 (4), S. 220–226.
- König, Gert; Tue, Nguyen Viet (1998): Diskontinuitätsbereiche. In: Gert König und Nguyen Viet Tue (Hg.): Grundlagen des Stahlbetonbaus. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, S. 316–354.
- Kovacic, Iva; Honic, Meliha; Rechberger, Helmut; Oberwinter, Lars; Lengauer, Klaus; Hagenauer, Alfred et al. (2019): Prozess-Design für den „Building Information Modeling“ (BIM) basierten, materiellen Gebäudepass. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Online verfügbar unter <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/publikationen/schriftenreihe-2019-08-bimmaterial-prozess.php>, zuletzt geprüft am 11.07.2020.
- Kovacic, Iva; Oberwinter, Lars; Suppin, Rüdiger; Müller, Christoph; Achammer, Christoph (2014): BIM Roadmap für integrale Planung. [diese Roadmap entstand im Rahmen des vom FFG geförderten Forschungsprojektes BIM\_sustain]. Wien: Inst. für interdisziplinäres Bauprozessmanagement Fachbereich Industriebau und interdisziplinäre Bauplanung TU Wien.
- Lechner, Hans (2014a): LM. Leistungsmodell Geotechnik [LM.GT ]. Graz: Verlag d. Technischen Universität Graz ([LM.GT 2014], 2014), zuletzt geprüft am 20.06.2020.
- Lechner, Hans (2014b): LM. Leistungsmodell VM. Vergütungsmodell Tragwerksplanung [LM.TW]. Stand 10.04.2014. Graz: Verlag d. Technischen Universität Graz ([LM. VM. 2014]).
- Lechner, Hans (2014c): LM.Leistungsmodell VM.Vergütungsmodell Objektplanung Architektur [LM.OA]. Stand: 10.04.2014. Graz: Verl. der Techn. Univ Graz ([LM.VM.2014], ein Vorschlag für Leistungsmodelle + Vergütungsmodelle für Planerleistungen / Hrsg. Hans Lechner. Institut für Baubetrieb + Bauwirtschaft, Projektentwicklung + Projektmanagement, TU Graz).
- Lechner, Hans (2017): LM.Leistungsmodell VM.Vergütungsmodell Objektplanung Architektur [OA.BIM] Ergänzungsheft für Building Information Modeling. Stand: 10.04.2014, 01.12.2017: Verl. der Techn. Univ Graz ([LM.VM 2014]).
- Niederdrenk, Ralph; Seemann, Ralph (2018): Baubranche aktuell Wachstum 2020 - Digitalisierung und BIM. Online verfügbar unter [https://arge-baurecht.com/fileadmin/user\\_upload/PWC\\_baubranche-aktuell-wachstum-2020-maerz-2018.pdf](https://arge-baurecht.com/fileadmin/user_upload/PWC_baubranche-aktuell-wachstum-2020-maerz-2018.pdf).
- Nöldgen, Markus; Zilleßen, Kurt; Müllers, Ingo; Hehle, Thomas (2014): Einsatz von BIM im Hochbau - Effekte auf die Tragwerksplanung. In: *Bautechnik* 91 (4), S. 251–256.
- ÖNORM EN 1990 (2013): Eurocode - Grundlagen der Tragwerksplanung: Austrian Standard Institute/österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN 1992-1-1 (2015): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung). Wien: Austrian Standard Institute/österreichisches Normungsinstitut (91.080.40; 91.010.30).
- Pech, Anton; Kolbitsch, Andreas (2005): Wände. Unter Mitarbeit von Alfred Pauser, Gerhard Koch, Christian Pöhn, Walter Potucek und Karlheinz Hollinsky. Wien: Springer (Baukonstruktionen).

## 9 Referenzen

Pech, Anton; Kolbitsch, Andreas; Pauser, Alfred (2005): Treppen/Stiegen. 1. Aufl. Vienna: Springer-Verlag/Wien (Baukonstruktionen, 10). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/b138757>.

Pech, Anton; Kolbitsch, Andreas; Pauser, Alfred; Zach, Franz (2018): Tragwerke. 2nd edition. Boston MA: Birkhauser Verlag (Baukonstruktionen, 1614-1288).

Ramaji, Issa J.; Memari, Ali M. (2016): Interpreted Information Exchange: Systematic Approach for BIM to Engineering Analysis Information Transformations. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* (30), S. 1–17.

Ramaji, Issa J.; Memari, Ali M. (2018): Interpretation of structural analytical models from the coordination view in building information models. In: *Automation in Construction* (90), S. 117–133.

Rustler, Walter (2017): Building Information Modeling und Statiksoftware: Szenarien und Erfolgsfaktoren beim Datenaustausch. Online verfügbar unter <https://www.dlubal.com/de/support-und-schulungen/support/knowledge-base/001432>, zuletzt geprüft am 11.07.2020.

Selke, Peter (Hg.) (2018): Statik. Berlin, Boston: De Gruyter.

Schinler, Dan; Nelson, Erik (2008): BIM and the Structural Engineering Community. In: *Structure magazine*, S. 10–12.

Schlaich, Mike; Bleicher, Achim; Bartsch, Diana (2010): Vorlesungsskript - Konstruktiver Ingenieurbau I. Hg. v. Technische Universität Berlin. Online verfügbar unter [http://www.ek-massivbau.tu-berlin.de/fileadmin/fg119/downloads/skripte-lehrunterlagen/ki/ki1/KI-I\\_07-10\\_Auflage7.pdf](http://www.ek-massivbau.tu-berlin.de/fileadmin/fg119/downloads/skripte-lehrunterlagen/ki/ki1/KI-I_07-10_Auflage7.pdf), zuletzt geprüft am 12.07.2020.

Spaett Architekten Gmbh (2017): Was ist ein Statiker? Unter Mitarbeit von Josef Widmann und Andreas Spaet. Hg. v. Spaett Architekten Gmbh. Online verfügbar unter <https://www.youtube.com/watch?v=G9gpCumo3FI>, zuletzt geprüft am 20.06.2020.

Talebitari, Burkhard (Hg.): BIM - Building Information Modeling. Digitalisierung: ... im Diskurs, ... im Ausland, ... in Bildung und Ausbildung, ... in der Software, ... in Recht und Versicherung, ... in Ingenieurbau und Projektplanung, ... im Infrastrukturbau, ... in Bauunternehmen, ... in der Schalung (Ernst & Sohn Special, November 2017).

Zilch, Konrad; Zehetmaier, Gerhard (2006): Bemessung im konstruktiven Betonbau. Nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/3-540-30953-5>.