

## Projekt III

# Überführung eines 3D- in ein 2D-Modell

Walid Al Otaibi, Matr.-Nr. 24215774

Borys Takunov, Matr.-Nr. 25203581

24. Juni 2010

Prüfer:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Friedel Hartmann



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Tragwerksmodell 3D</b>	<b>3</b>
2.1	Allgemeine Beschreibung . . . . .	3
2.2	Eingabe in SOFiSTiK . . . . .	7
<b>3</b>	<b>2D-System</b>	<b>15</b>
3.1	Tragsystem . . . . .	15
3.1.1	Das Fachwerk . . . . .	16
3.1.2	Der Vierendeelträger . . . . .	17
3.1.3	Das Wandsystem . . . . .	18
3.2	Vorgehensweise bei der Modellierung . . . . .	19
<b>4</b>	<b>Ergebnisse und Auswertung</b>	<b>25</b>
4.1	Fachwerk . . . . .	25
4.2	Vierendeelträger . . . . .	27
4.3	Decken . . . . .	32
4.3.1	Decke 1OG . . . . .	33
4.3.2	Decke 2OG . . . . .	40
4.3.3	Decke 3OG . . . . .	47
4.3.4	Decke 4OG . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>61</b>

Inhaltsverzeichnis

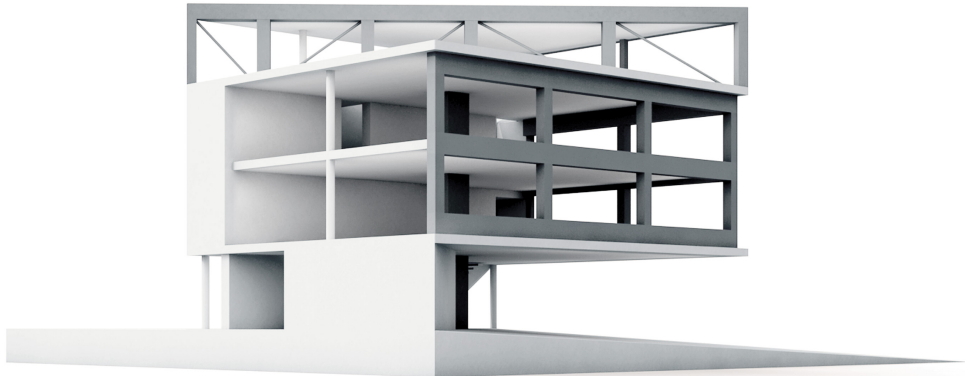
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>65</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>69</b>

# 1 Einleitung

Die Zielsetzung des Projektes ist die Gegenüberstellung von zwei unterschiedlichen Ansätzen zur Berechnung der anspruchsvollen Tragwerksmodelle. Zum einen ist das die klassische Berechnungsmethode, bei der das Tragwerk in Teilsysteme, wie z.B. Decken, Unterzug, Stütze, Wand, Fachwerk, Rahmen etc., zerlegt wird. Die zweite Methode ist die, erst seit wenigen Jahren eingesetzte, 3D-Berechnung des gesamten Modells. Die Wahl der Berechnungsart ist teilweise eine Glaubensfrage. Der große Vorteil der 3D-Analyse ist eine realitätsnahe Erfassung des Kraftflusses. Somit soll diese zur besseren Modellbildung, mit der daraus folgenden wirtschaftlicheren und sichereren Bemessung, führen. Andererseits ist die Überprüfung der Ergebnisse der 3D-Berechnung äußerst schwierig, da die üblichen Handformeln meistens keine Anwendung finden. Somit verlässt man sich auf die Richtigkeit des benutzten Programms.

Bei der Zerlegung des Tragwerks in Teilsysteme, sind die Ergebnisse überschaubarer und können leichter nachvollzogen und überprüft werden. Jedoch gerade die Findung angemessener statischer Systeme, Annahme realistischer Steifigkeiten und das Voraussetzen eines Kraftflusses im komplizierten Tragsystem bürden ein großes Risikopotenzial und erfordern einen hohen Ingenieurverstand und viel Erfahrung von Aufsteller.

Im Rahmen dieses Projektes wurde ein viergeschossiges Bürogebäude mit den beiden Berechnungsarten analysiert. Dieses Beispiel, obwohl klein und somit recht überschaubar, stellt jedoch recht hohe Ansprüche an den Tragwerksplaner. Das Ziel war zu untersuchen, ob eine realitätsnahe und auch bemessbare 2D-Berechnung des



**Abbildung 1.1:** System

Tragwerks erstellt werden kann, auch unter dem Gesichtspunkt des Zeitaufwandes, und somit der Wirtschaftlichkeit, und auch den Anforderung an den Statiker.

## 2 Tragwerksmodell 3D

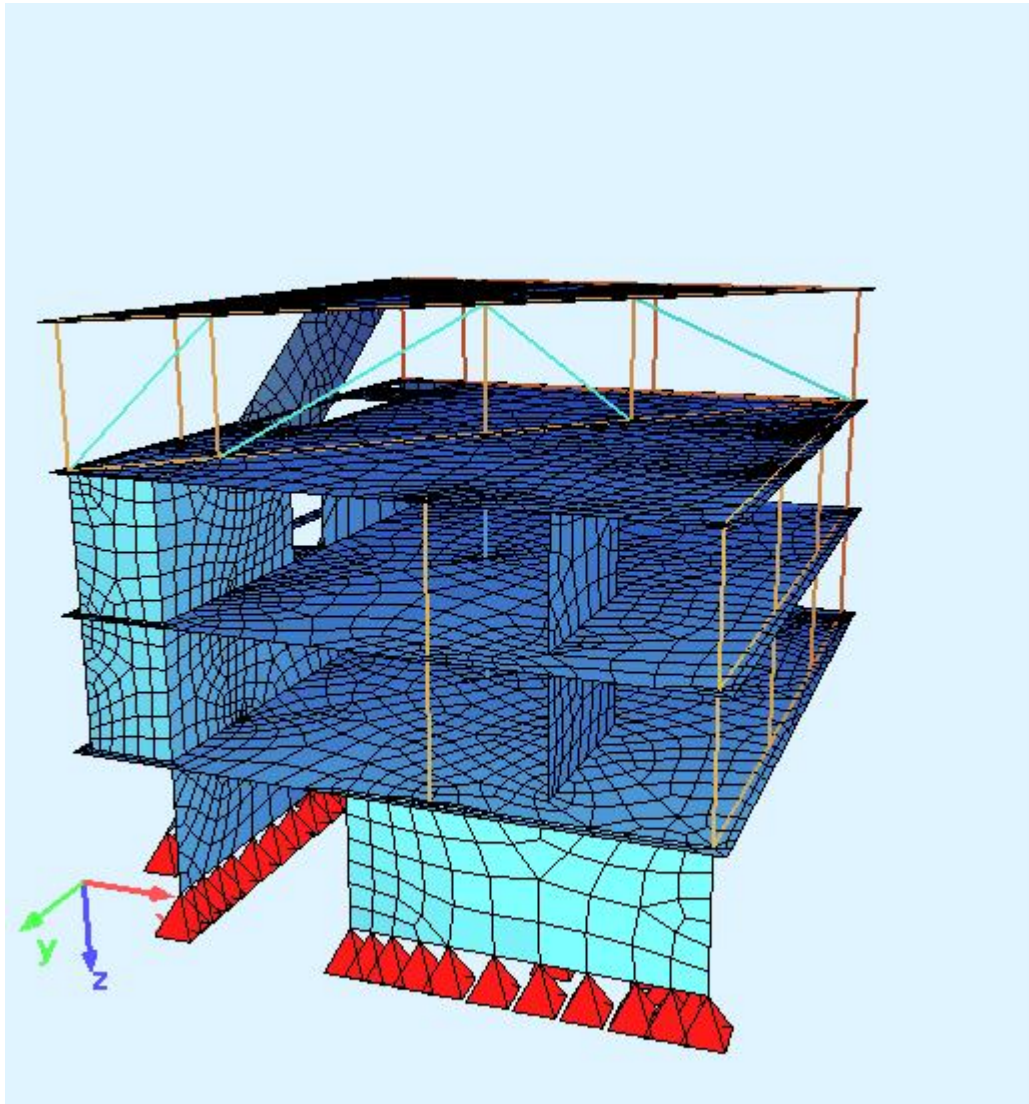
### 2.1 Allgemeine Beschreibung

Das betrachtete Modell ist ein viergeschossiges Bürogebäude aus Stahlbeton. Das Gebäude hat im Grundriss die Abmessungen von 16 x 14 m. Jedes Geschoss hat eine Höhe von 3 m, die Gesamthöhe beträgt somit 12 m. Der Grundriss des 1. und 2. OG ist rechteckig, die von EG und DG sind rechtwinklige Dreiecke, die den halben Flächeninhalt von den Regelgeschossen aufweisen. Das Besondere an diesem Gebäude ist, dass die oberen drei Geschosse zur Hälfte in der Luft schweben, d.h. sie gehen über das Erdgeschoss hinaus und werden nur indirekt gestützt.

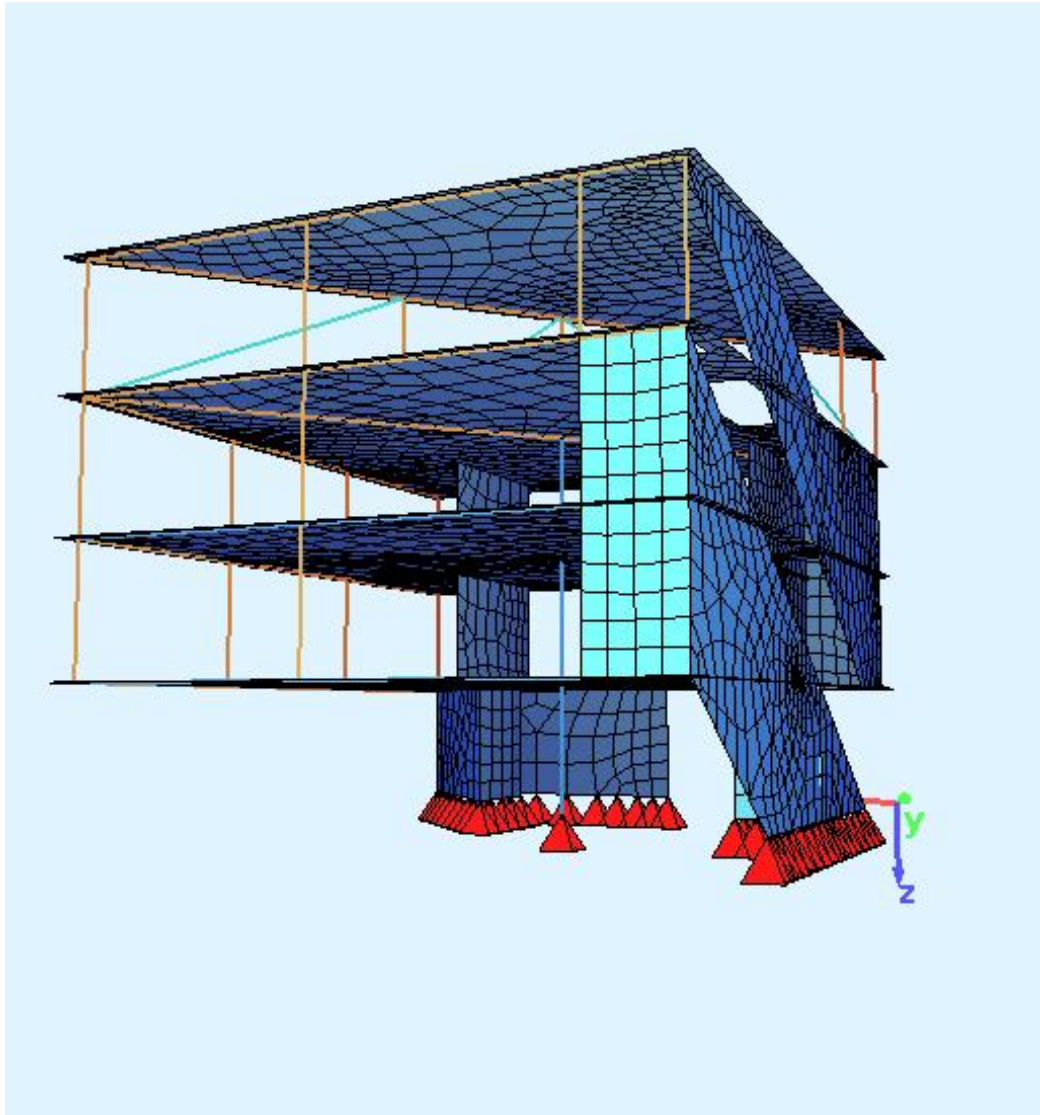
Die Decken sind in Stahlbeton C30/37 mit BSt500 Bewehrung ausgeführt. Die Dicke der Decken beträgt 30 cm. Die auskragende Teile der Decken im 1 und 2 OG werden als Cobiaxdecken ausgeführt, was zum Gewichtersparnis führt, wobei die Tragfähigkeit nicht maßgebend vermindert ist. Alle Stützen und die Unterzüge werden als Verbundquerschnitte aus C40/50 und S235 ausgeführt. Die Wände sind aus Beton C30/37 in der Dicke  $d = 30$  cm. Die Zugdiagonalen im DG sind als Seile ausgeführt. Die Hauptstütze hat den Querschnitt 100 x 100 cm.

Die wesentlichen Tragelemente sind die Decken, Wände, Unterzüge und (Pendel-) Stützen. Diese bilden in Verbindung miteinander verschiedene Tragsysteme.

Das Gebäude ist hauptsächlich durch innere und äußere Wände ausgesteift, die sich in den oberen Geschossen fast ausschließlich im Bereich des Treppenhauses befinden. Eine wesentliche Rolle spielt auch die Hauptstütze, die sich in der Mitte des Gebäudes befindet und durch alle Geschosse geht. Die Geschosse sind durch



**Abbildung 2.1:** Ansicht 1



**Abbildung 2.2:** Ansicht 2

zusätzliche Tragelemente ausgesteift.

Im 3. OG sind folgende Elemente zur Aussteifung angesetzt worden: Außenwand, Stützen, Unterzüge. Als wesentlich ist in diesem Geschoss das Fachwerk zu bezeichnen. Es besteht aus vertikalen Pendelstützen und den Zugdiagonalen, die als Seile ausgeführt sind. Dieses System ist von primärer Bedeutung für das Tragkonzept des Gebäudes. Vor allem sind die äußere Diagonale über dem abgehängten Teil und die Hauptstütze in der Mitte des Hauses sehr stark auf Normalkraft beansprucht. Dieses verhindert eine übermäßige Absenkung der Auskragung und leitet deren Last als Normalkraft in die Hauptstütze und die Wände. Im 1. und 2. OG ist besonders der Vierendeel-Rahmen zu erwähnen. Der Rahmen geht über zwei Geschosse und hat drei Felder. Sowohl Stützen als auch die Unterzüge sind rechteckige Verbundquerschnitte, die biegesteif aneinander angeschlossen sind. Der Vierendeel-Rahmen dient auch dem Abfangen des auskragenden Gebäudeteils. Im Gegensatz zu dem Fachwerk im obersten Geschoss, trägt der Rahmen die Belastung nicht durch die Normalkraft, sondern überwiegend durch die Biegung ab. Die größten Momente entstehen in den Stützen im Bereich der Anschlüsse.

Das Erdgeschoss wird durch Außenwände und die Hauptstütze ausgesteift.

## 2.2 Eingabe in SOFiSTiK

Hier folgt eine kurze Beschreibung der Eingabe des Modells des Bürogebäudes in SOFiSTiK. Es wird nur eine kurze Erklärung der wichtigsten Schritte und Funktionen gegeben. Die ausführliche Beschreibung findet man in den Tutorials und der Dokumentation zum Programm. Des Weiteren ist zu vermerken, dass es nur um eine beispielhafte Vorgehensweise handelt, und es gibt auch andere Wege um zu dem gewünschten Ergebnis zu kommen.

Die Modellierung des 3D-Modells erfolgte im Programm SOFiSTiK 23 mit dem SOFiPLUS 17.1 und AutoCAD 2008. Als Grundlage für die Eingabe dienten die Architektenpläne im AutoCAD-Format.

Die Eingabe beginnt in der Umgebung SOFiSTiK Structural Desktop (SSD). Nachdem man das Programm gestartet hat, muss man ein neues Projekt anlegen (*Datei* → *Neues Projekt*), dabei erscheint ein neues Fenster, siehe Bild 2.2, in dem man die Grundeinstellungen zum Projekt vornehmen kann. Diese sind: Name des Projektes, Datenpfad, Norm (anschließende Änderung nicht möglich), Art des Systems (hier: 3D-Flächentragwerk), Koordinatenachsen und Einheiten. Als nächstes erscheint dann im Programm SSD der Taskbaum auf der linken Seite des Fensters, Bild 2.2. Dort wird das Modell definieren. Man hat die Möglichkeit, die verwendeten Materialien und Querschnitte festzulegen. Beides kann man jedoch auch später, während der Eingabe, festlegen. Der nächste Schritt wird der Task *Grafische System- und Lasteingabe* mit einem Doppelklick geöffnet. Dann wird das Programm AutoCAD mit dem Aufsatz von SOFiSTiK SOFiPLUS gestartet. Da es in diesem Fall schon die Architektenpläne im .cad-Format in 2D schon gab, mussten diese nicht neu gezeichnet werden, ansonsten wäre dies der nächste Schritt der Eingabe.

Empfehlenswert ist es die Modellierung im Koordinatenursprung zu beginnen, um die Rechenleistung zu minimieren und die Genauigkeit zu steigern.

Mit der AutoCAD-Funktion *Kopieren mit Basispunkt* (bevorzugt ist ein Eckpunkt des Flächenelementes, der in allen Gebäudeebenen vorkommt) kopiert man ein Ge-

## 2 Tragwerksmodell 3D

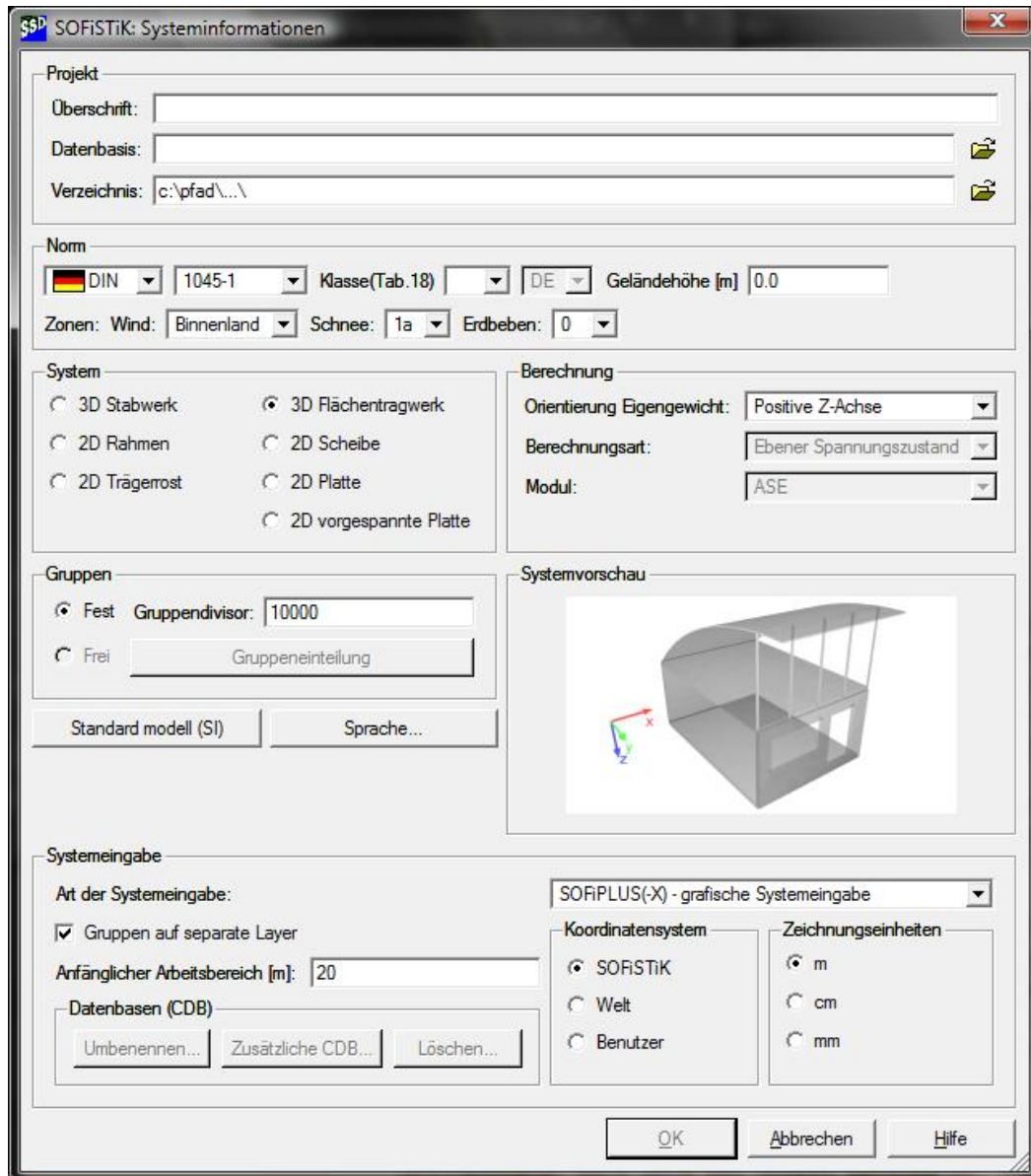


Abbildung 2.3: Neues Projekt anlegen

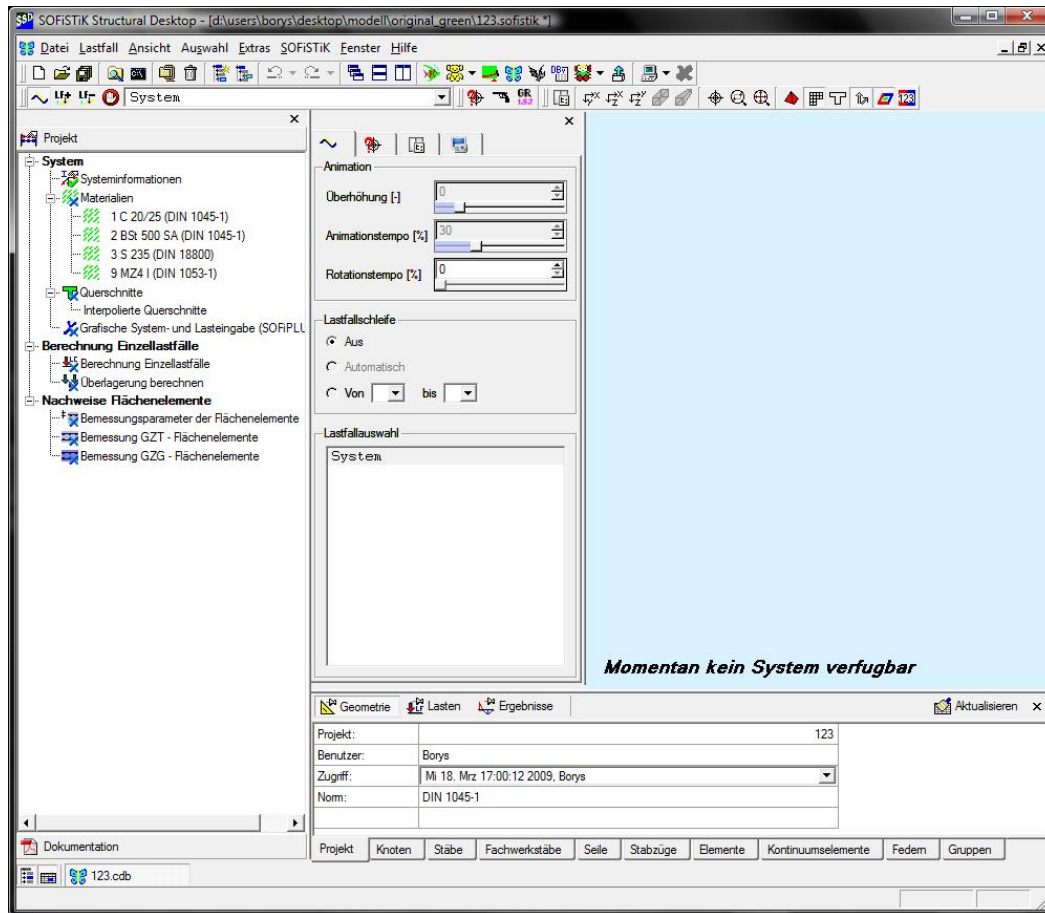
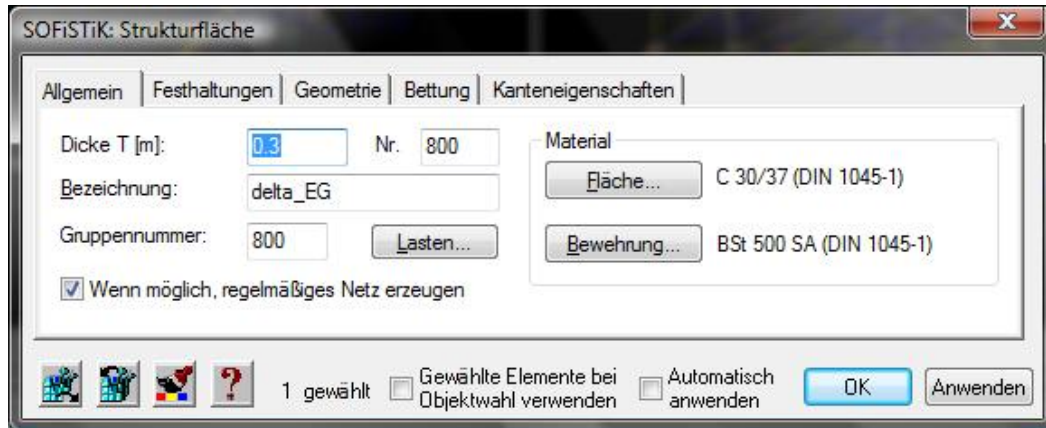


Abbildung 2.4: SSD-Oberfläche



**Abbildung 2.5:** Eigenschaften eines Flächenelementes

schoß in den Koordinatenursprung bzw. zeichnet sie dort ein.

Danach definiert man die Zeichnung der Decke als ein Flächenelement, indem man auf *SOFiPLUS* → *Modell erstellen* → *Strukturfläche* geht. Dann erscheint ein neues Fenster, Bild 2.2, in dem man die Fläche beschreiben kann. Mit den Schaltflächen *Material* und *Bewehrung* definiert man die entsprechenden Eigenschaften. Desweiteren muss man die Dicke des Bauteils festlegen, die Bezeichnung und auch die Gruppen- und Elementnummern. Eine sinnvolle Einteilung der Bauteile in Gruppen und die Nummerierung ist von großer Bedeutung. Man sollte sich schon im Vorfeld überlegt haben, welche Elemente zusammenwirken und in eine Gruppe gehören. Im späteren Verlauf, z.B. bei der Bemessung, lassen sich die Gruppen ausschalten, und somit kann man die Bauteile aus der Berechnung ausschließen. Das ist sinnvoll, wenn man eine optionale Wand hat, und nicht sicher ist, ob diese für das Tragwerk erforderlich ist. Außerdem lässt sich die Ausgabe über Gruppennummern steuern. Somit kann man z.B. die Schnittkräfte in gewissen Gruppen ausgeben lassen. Daher ist es von sehr großer Bedeutung, das Tragsystem sinnvoll und nachvollziehbar in Gruppen einzuteilen, das erleichtert die spätere Arbeit am Projekt immens.

Sobald man alle nötigen Daten zum Flächenelement eingefügt hat, klickt man mit der rechten Maustaste auf das aktive AutoCAD-Fenster und es erscheint ein Dropdown-Menü, wie man die Eingabe weiterführen möchte. Man wählt eine Art

der Eingabe aus, und definiert entsprechend die geometrischen Grenzen des Trageelementes. Die Eingabe wird mit dem zweifachen Drücken der ENTER-Taste beendet. Das Element erscheint in anderer Farbe, und mit gegebener Bezeichnung auf dem Bildschirm.

Es empfiehlt sich möglichst regelmäßig die Eingabe auf Fehler zu überprüfen. Das kann man machen, indem man die Daten aus AutoCAD und SOFiPLUS in die SSD-Umgebung exportiert. Man geht auf *SOFiPLUS* → *Statikdatenbank CDB* → *Eport (.dwg->.cdb)*.... Dann erscheint ein neues Dialog-Fenster, in dem man den Exportumfang bestimmen kann, dabei wählt man die entsprechenden Elemente, und bestätigt die Eingabe mit der OK-Taste. Anschließend geht man wieder zum Fenster SSD und im rechten Teil des Fensters wird das generierte Modell dargestellt. Dort kann man optisch überprüfen, ob die Eingabe korrekt war, und auch alle Elemente als solche korrekt erkannt und generiert wurden. Die Darstellung erfolgt mit dem Modul Animator.

Als nächstes werden die Strukturpunkte und -linien definiert und mit der folgenden Funktion erstellt: *SOFiPLUS* → *Modell erstellen* → *Stütze/Strukturpunkt* bzw. *Strukturlinie*. Es erscheint ein neues Fenster, indem man nichts ändert, sondern gleich auf die Zeichenfläche in AutoCAD geht und die entsprechenden Punkt und Linien auswählt. Dieser Schritt ist für die spätere Definition der Stützen und Wände notwendig.

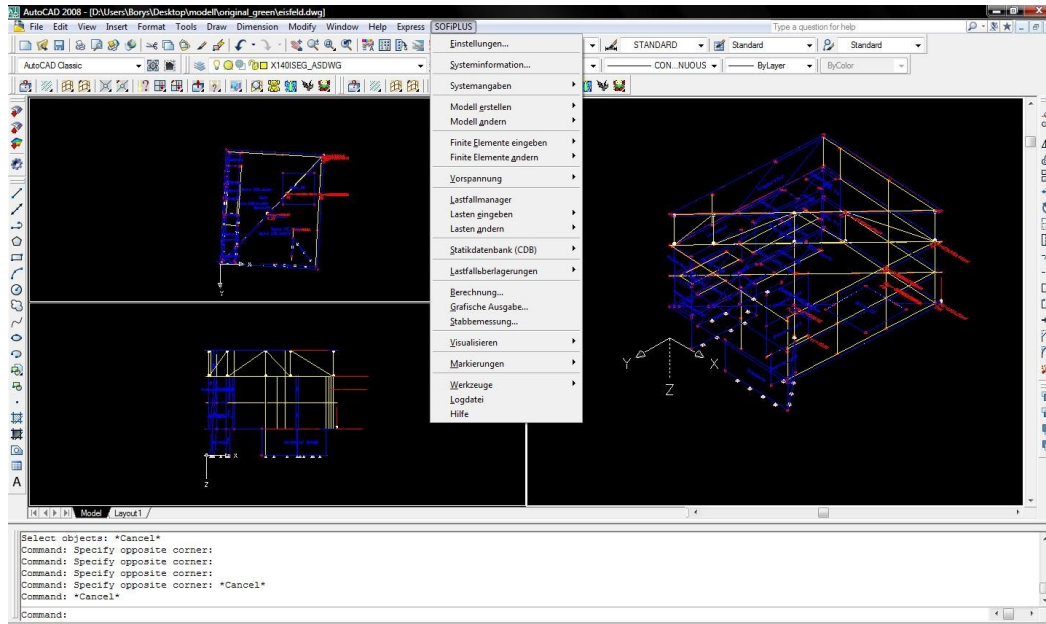
Für den Fall, dass man mit den Architektenplänen als Vorlage arbeitet, ist es empfehlenswert, einen Punkt aus den Plänen heraus zu kopieren, und ihn dann in eine weitere Ebenen zu verschieben. Es ist gelegentlich der Fall, dass die Zeichnungen nicht ganz genau sind und Abweichungen in den Koordinaten, wenn auch kleine, auftreten. Dadurch kann es dazu kommen, dass die Stützen nicht mehr vertikal sind, und die Wände eine Krümmung aufweisen. Die nachträgliche Korrektur erweist sich immer als sehr aufwendig, vor allem, wenn man schon in dem 3D-Modus arbeitet. Danach wird die Decke des nächsten Geschosses an die richtige Stelle kopiert. Dann muss man in den 3D-Modus wechseln, da die Eingabe sonst nicht mehr möglich ist. Es ist jedoch stets empfehlenswert, so lange wie möglich im 2D-Modus zu bleiben,

und möglichst viele Schritte dort zu erledigen. Eine Aufteilung des Fensters in drei Bereiche mit den Ansichten von der Seite, von oben und eine Isometrie ist hilfreich. Nachdem man die Flächenelmente erstellt hat, werden die Aussparungen mit *SOFiPLUS* → *Modell erstellen* → *Aussparung* erzeugt. Hierbei muss man beachten, dass die Eingabe nur über die Begrenzungslinien funktioniert. Die Wände werden genauso erstellt, wie die Decken. Bei den Stützen funktioniert das folgendermaßen: Man geht auf *SOFiPLUS* → *Modell erstellen* → *Strukturlinie* und dann erscheint ein Fenster, in dem man die Bezeichnung, Gruppennummer, Elementnummer eingeben kann. Unter den weiteren Tabs kann man den Querschnitt, Materialien, Anfangs- und Endgelenke festlegen. Die Erzeugung von Seilen funktioniert genauso, jedoch bei der Definition des Querschnitts muss man bedenken, dass man die Seile als ein Element vernetzen muss, denn sonst ist die grafische Darstellung fehlerhaft und es erscheinen Fehlermeldungen. Die Eingabe der Unterzüge erfolgt durch das Erstellen einer Strukturlinie mit einem entsprechenden Querschnitt.

Diese Schritte wiederholt man für alle Geschosse und erstellt somit das komplette 3D-Modell des Gebäudes.

Sobald die Eingabe der Geometrie beendet ist, und deren Richtigkeit überprüft wurde, kann man mit der Lasteingabe beginnen. Dazu geht man zunächst auf *SOFiPLUS* → *Lastfallmanager*. Dann öffnet sich ein Fenster, in dem die Lastfälle definiert werden können. Man geht zunächst auf den Tab *Einwirkungen* und drückt auf den Knopf NEU. Dort wird die Art der Einwirkung ausgewählt, und zur Liste hinzugefügt. Dann wechselt man wieder zu dem Tab *Lastfälle* und fügt den entsprechenden Lastfall hinzu. Wenn dies erledigt ist, kann man die Lasten eingeben. Das macht man, indem man auf *SOFiPLUS* → *Last eingeben* → ... geht, und die entsprechende Lastart auswählt, ob Einzellast, Flächenlast etc. Dann erscheint ein neues Fenster, in dem man die Größe und Wirkungsrichtung der Last eingeben kann, und auch bestimmen, zu welchem der vordefinierten Lastfälle diese gehört.

Nachdem die Geometrie und die Lasten eingegeben wurden, exportiert man die Daten in das Programm SSD, wie das schon oben beschrieben wurde. Dort kann man die zur Bemessung erforderlichen Tasks hinzufügen und bearbeiten. Sobald alle



**Abbildung 2.6:** Eingabe in AutoCAD und SOFiPLUS

Einstellungen vorgenommen wurden, startet man die Berechnung mit *SOFiSTiK* → *Alles berechnen*. Das berechnete Modell wird in dem rechten Fenster, Bild 2.2, angezeigt, und durch das Anklicken der Elemente kann man ansehen, welche Schnittkräfte diese aufweisen. Unter 'Lastauswahl' kann man den Lastfall bzw. die Lastfallkombination auswählen, deren Ergebnisse im Animator-Fenster eingezeigt werden. Wenn man die komplette Auswertung der Berechnungen anzeigen haben möchte, so benutzt man das Programm Ursula: *SOFiSTiK* → *Ergebnisse* → *Alle Ergebnisse*. Des weiteren gibt es die Möglichkeit sich die Schnittgrößen in tabellarischer Form anzeigen zu lassen. Das geht mit dem Datenbank View, dass man unter *SOFiSTiK* → *Datenbank View* findet. Dort wählt man die Art der Elemente, Gruppen, Lastfälle und die Schnittgrößen, die einen interessieren, und diese werden dann in tabellarischer Form dargestellt.

## 2 Tragwerksmodell 3D

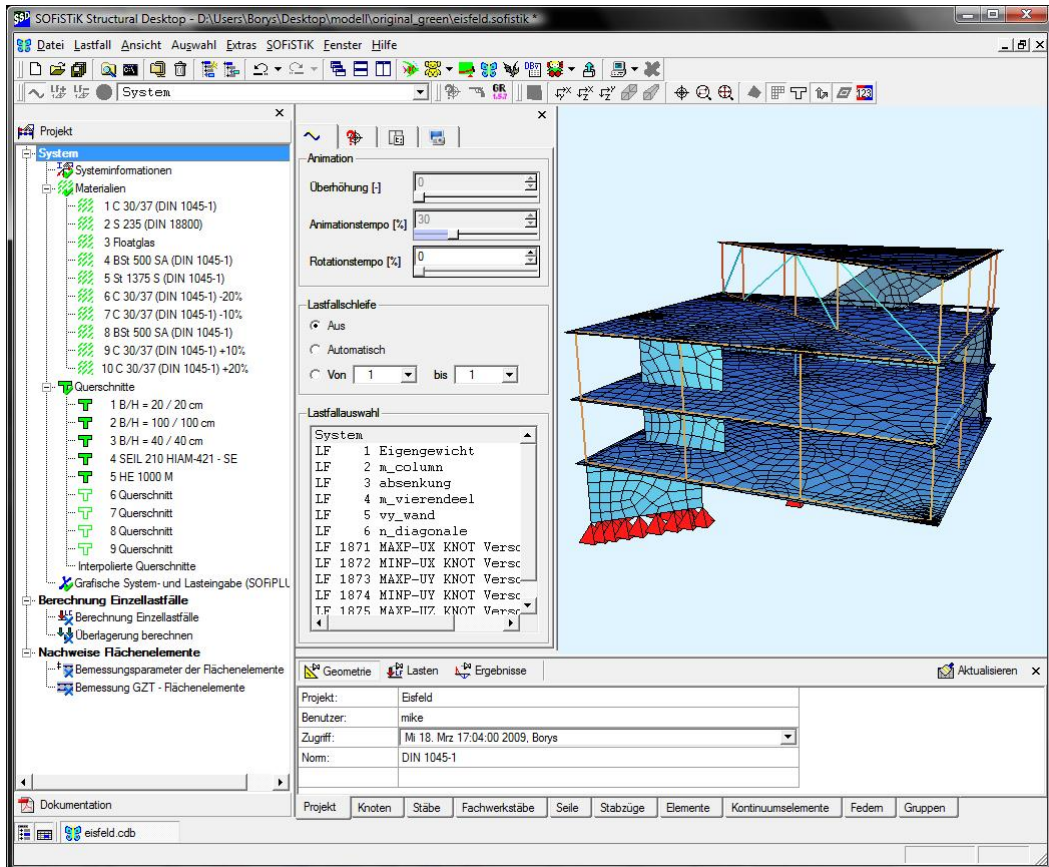


Abbildung 2.7: Berechnetes System

## 3 2D-System

Die 2D-Berechnung von Tragsystemen ist die klassische Methode der Berechnung, ein System wird in kleinere 2D-Teile zerlegt. Diese Teile sind beispielweise Seile, Balken, Stützen und Scheiben. Die Systemberechnung erfolgt im optimalen Fall von oben nach unten. Die resultierenden Auflagerkräfte von einem Teilsystem können eventuell als Belastung für das untere Teilsystem aufgebracht werden. Aus diesen Gründen ist die 2D-Berechnung sehr arbeitsaufwendig, und der Statiker bzw. der Tragwerkplaner muss den Lastfluss bestimmen können, um auf die richtigen Ergebnisse zu kommen. Die 2D-Berechnung in diesem Beispiel ist in 3 wesentlichen Schritten ausgeführt, zuerst wurden die Tragelemente als feste Auflager modelliert, d.h. unendliche Steifigkeiten angenommen. Danach wurden die Tragelemente als Federn mit jeweils einer bestimmten Steifigkeit ( $K$ ) gerechnet, und am Ende wurden diese Federsteifigkeiten geändert, um eine Optimierung zu erzielen. Die verschiedenen Werte werden mit den Werten aus der 3D-Berechnung im nächsten Kapitel verglichen. Als nächstes wird das gesamte Tragsystem in verschiedene kleinere 2D-Systemen aufgeteilt, die die Lasten von dem Dach bis zu den den Fundamenten leiten.

### 3.1 Tragsystem

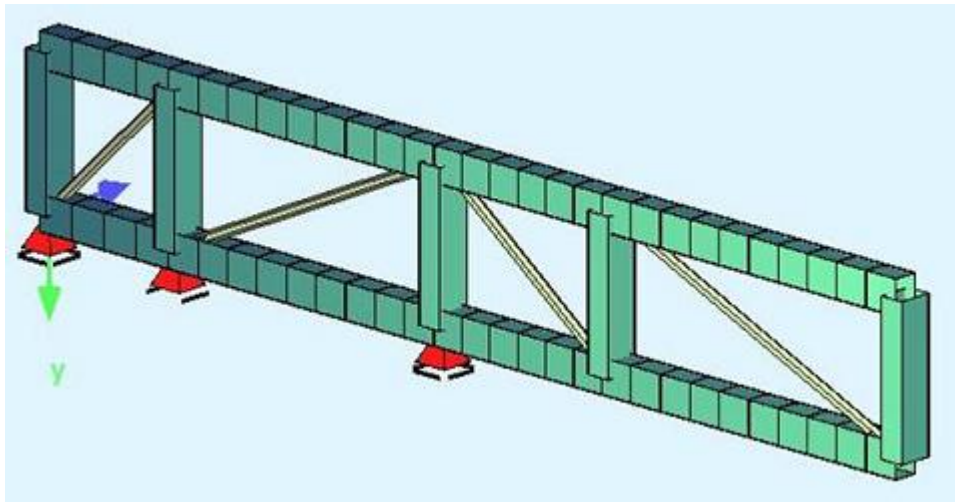
Das Tragsystem ist in diese kleineren Systeme unterteilt:

- Decken ( insgesamt 4 Decken)

- Fachwerk
- Vierendeelträger
- Wandsystem
- Hauptstütze

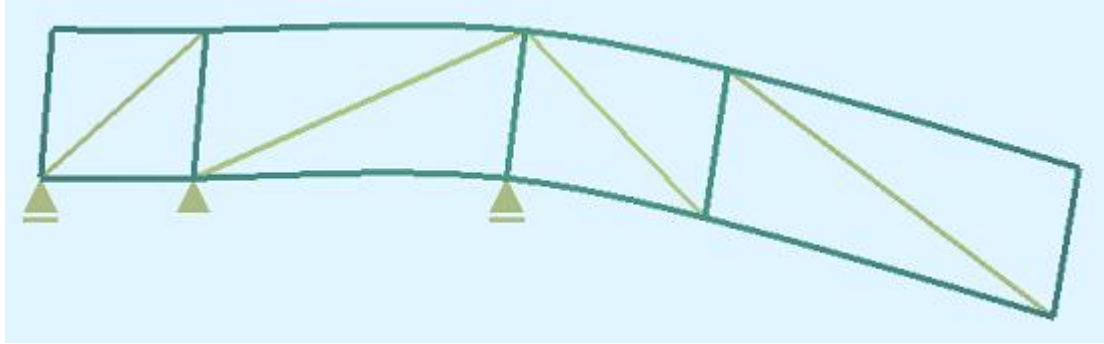
### 3.1.1 Das Fachwerk

Das Fachwerk wirkt als erstes bedeutungsvolles Tragsystem in diesem Gebäude. Die ständigen Lasten, die auf das Fachwerk gesetzt werden, summieren sich aus dem Eigengewichtslasten des Daches und Fachwerks. Das Fachwerk wird so modelliert, dass es durch drei Auflagern gestützt ist, die in einer Reihe liegen. Das innere Auflager liegt auf der Hauptstütze des Gebäudes. Das freie Ende des Fachwerks hält den unterliegenden Vierendeelträger hoch, was eine Rückrechnung für das Modellieren bedeutet. Diese Rückrechnung wird im folgenden Abschnitt behandelt.



**Abbildung 3.1:** Das Fachwerk.

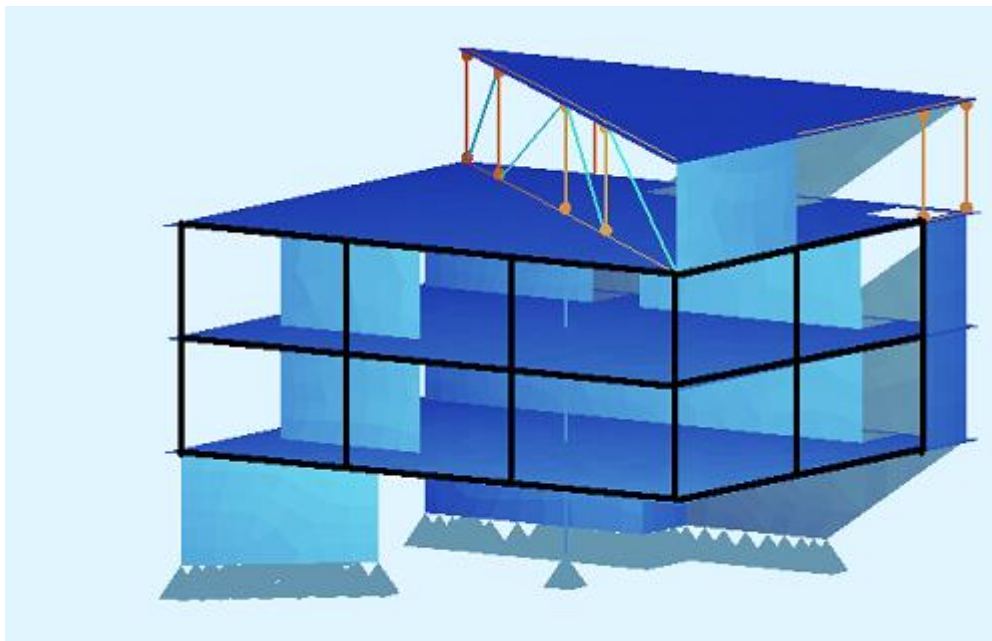
Die ersten und zweiten Auflagerkräfte werden auf das Wandsystem aufgebracht, die dritte Auflagerkraft wird auf die Hauptstütze und danach auf die Fundamente aufgebracht.



**Abbildung 3.2:** Die Verformungsfigur des Fachwerks.

### 3.1.2 Der Vierendeelträger

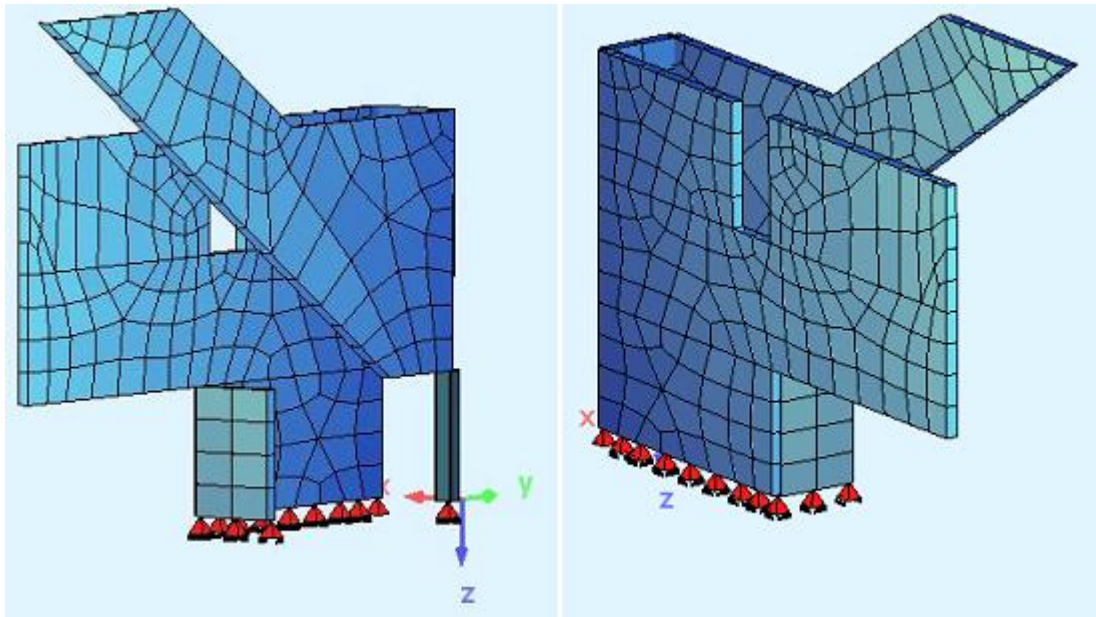
Der Vierendeelträger befindet sich zwischen der ersten und dritten Decke. Auf dem Bild 3.3 ist der Vierendeelträger gezeigt. Für die 2D-Modellierung wird der Vierendeelträger abgewickelt. Das Fachwerk über dem Vierendeelträger stützt den Träger und lagert seinen Gewicht auf die Fachwerkaufleger (siehe 3.1.1). Der Vierendeelträger ist auf dem Wandsystem gelagert.



**Abbildung 3.3:** Das Gebäude und der Vierendeelträger.

### 3.1.3 Das Wandsystem

Die oben genannten Tragelemente und die Deckensysteme dienen hauptsächlich der vertikalen Stützung des Gebäudes. Das Wandsystem dient sowohl für die horizontale Stützung des Gebäudes als auch für die vertikale. Das System dient auch als Aussteifungssystem für das gesamte Gebäude.



**Abbildung 3.4:** Das Wandsystem.

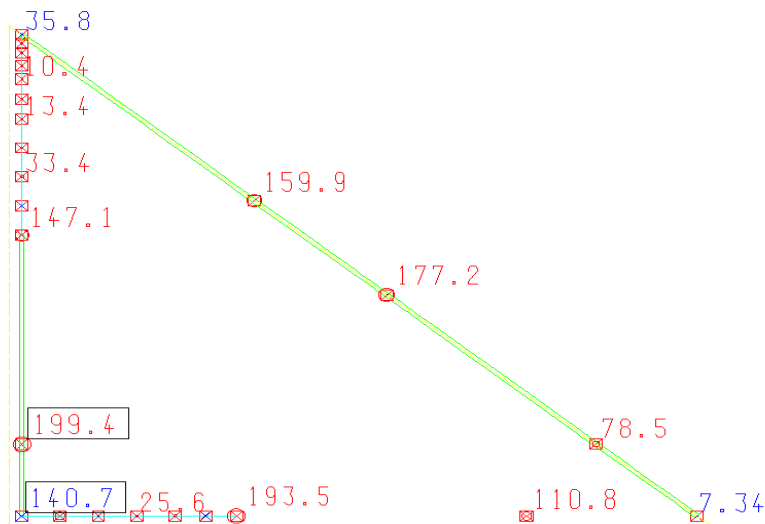
Im Bild 3.4 kann man sehen, dass ein großer Teil des Wandsystems auskragt. Ein sehr großer Anteil des Eigengewichts des Wandsystems lagert sich auf die Stütze in der Ecke auf. Das Wandsystem soll das Treppenhaus umhüllen. Neben diesem Wandsystem befinden sich im Gebäude mehrere Wände, die eine tragende Funktion besitzen. Diese Wände sind in der 2D-Modellierung als Linienauflager bzw. -lasten eingesetzt. Das Wandsystem hat eigentlich nur in 3D richtig erfasst werden. Es wird in der 2D-Berechnung nur eingeschränkt benutzt. Mit Hilfe des 3D-Wandsystems wurden die Federsteifigkeiten der Auflager berechnet, und dann in den Deckensystemen der 2D-Berechnung eingesetzt.

Im nächsten Abschnitt wird die Vorgehensweise bei der 2D-Rechnung des Systems erklärt.

### 3.2 Vorgehensweise bei der Modellierung

Das gesamte Tragsystem soll in mehreren kleineren Teiltragsystemen modelliert werden. Diese Teiltragsysteme werden als 2D-Systeme modelliert, und eins nach dem anderen berechnet. In der 3D-Berechnung wird das Gesamtsystem als eine Einheit modelliert. Dies kann unterschiedliche Ergebnisse liefern, besonders da der Lastfluss zwischen 2D- und 3D-Systeme anders verlaufen kann. In diesem Abschnitt werden die Methoden und Annahmen erklärt, die für die 2D-Berechnung verwendet wurden.

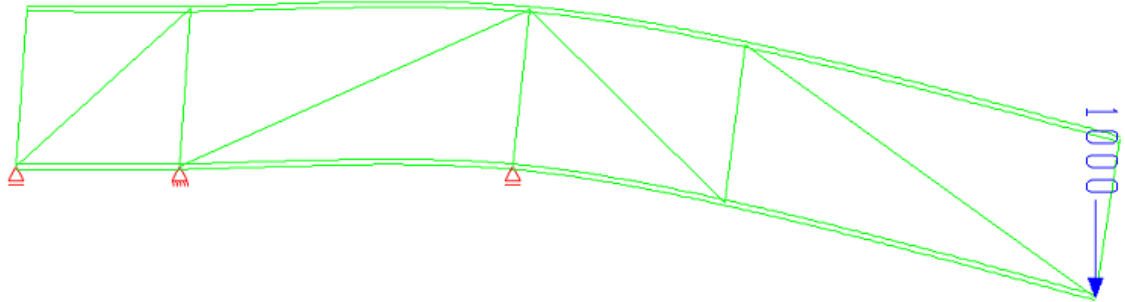
Das Dach wird nun mit seinem Eigengewicht berechnet. Der Dach ist auf 2 Wänden, 2 Stützen und dem Fachwerk gelagert (siehe Bild 3.5). Die Auflagerkräfte auf die Diagonale sind die Kräfte, die auf das Fachwerk gesetzt werden. Die Wandauflagerkräfte an der rechten Seite werden auf die unterliegende Decke gesetzt. Und die andere Wandauflagerkräfte werden auf die Wandsysteme geleitet.



**Abbildung 3.5:** Die Auflagerkräfte des Dachs.

Danach wird das Fachwerk modelliert, es kann aber nicht zu diesem Zeitpunkt berechnet werden, weil das Fachwerk von dem unterliegenden Vierendeelträger hält (siehe 3.1.1) belastet wird. Das freie Ende des Fachwerks muss als Feder in dem

Vierendeelträger-Modell eingesetzt werden, um die Last aus dem Vierendeelträger im Fachwerk einsetzen zu können. Die Federsteifigkeit wird bestimmt, indem man eine Einzellast auf das Fachwerk stellt, seinen zurückgelegten Weg abliest, und dann mit dem Federgesetz die Federsteifigkeit berechnet.



**Abbildung 3.6:** Das Fachwerk: Berechnung der Federsteifigkeit.

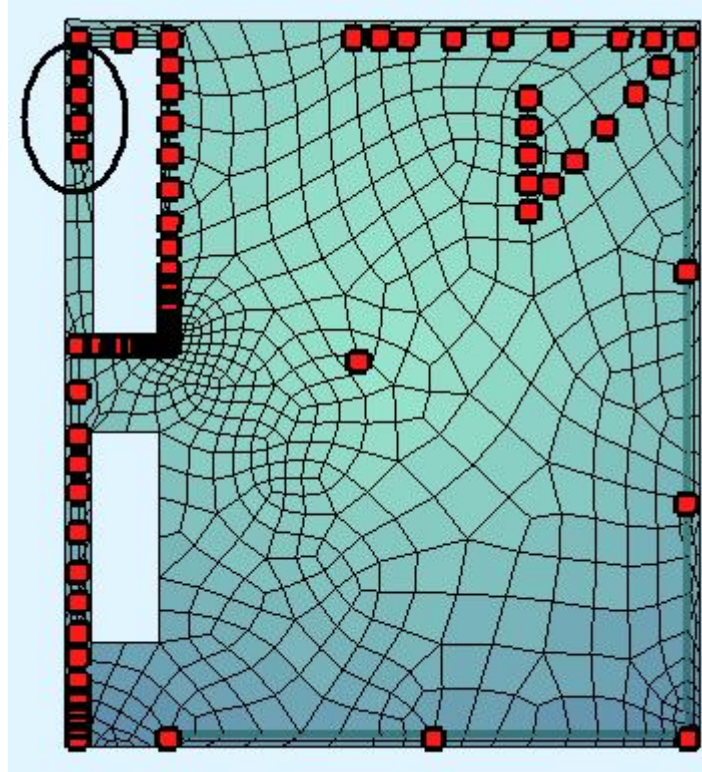
$$k = \frac{F}{x} \quad (3.1)$$

Die drei Deckensysteme werden u.A. auf dem Vierendeelträger gelagert, d.h. um den Vierendeelträger zu rechnen, müssen die drei Deckensysteme vorher gerechnet werden. In diesem Abschnitt wird nur die erste Decke behandelt. Ergebnisse aus den anderen Decken werden im nächsten Kapitel behandelt. Die 1. Decke wird von mehreren Teilsystemen gehalten. Diese Tragelemente sind:

- Verschiedene Linienstrukturen (unterliegende Wände)
- Die Hauptstütze
- Das Vierendeelträger
- Das Hauptwandssystem (siehe 3.1.3).

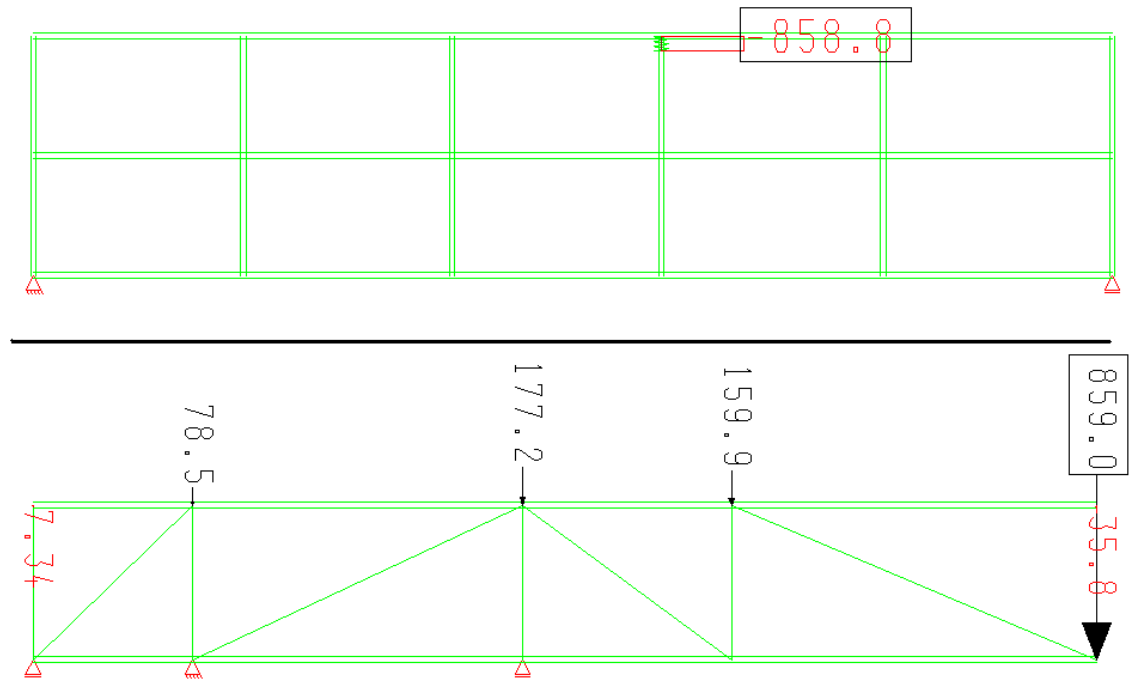
Obwohl das Wandsystem auf der Platte liegt, wird es in der 2D-Modellierung als fester Auflager angenommen (Bild 3.7, weil das Wandsystem eine sehr hohe Steifigkeit besitzt und die Durchbiegung der Platte verhindert. Wichtig zu erwähnen ist, dass in

der Modellierung mehrere Schritte durchgeführt wurden. Im ersten Schritt wird das komplette System als starr angenommen. Danach wurden die Auflagersteifigkeiten angepasst, und die Ergebnisse werden somit verbessert.



**Abbildung 3.7:** die 1. Decke: Untersicht, im Kreis ist der Bereich mit dem Wandsystem auf der Platte.

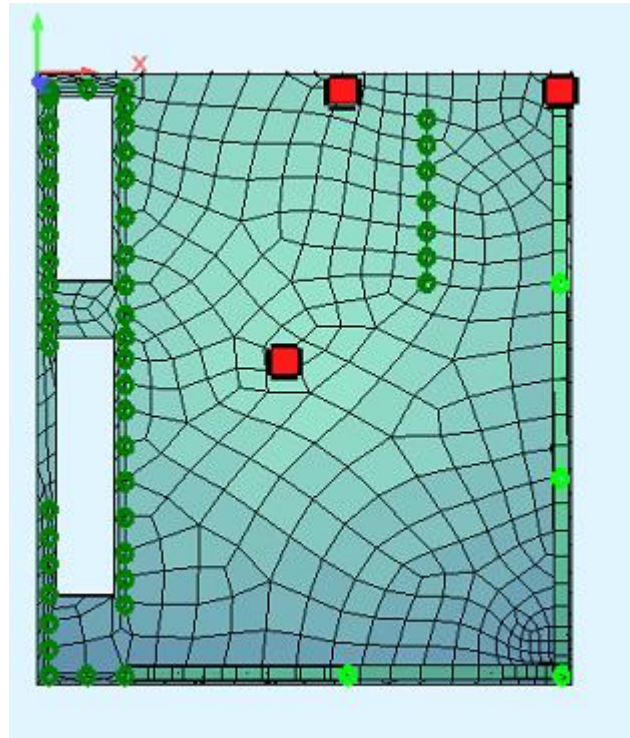
Mit den Lasten aus den drei Decken, kann der Vierendeelträger berechnet werden, anschließend wird das Fachwerk berechnet. (Bild 3.8).



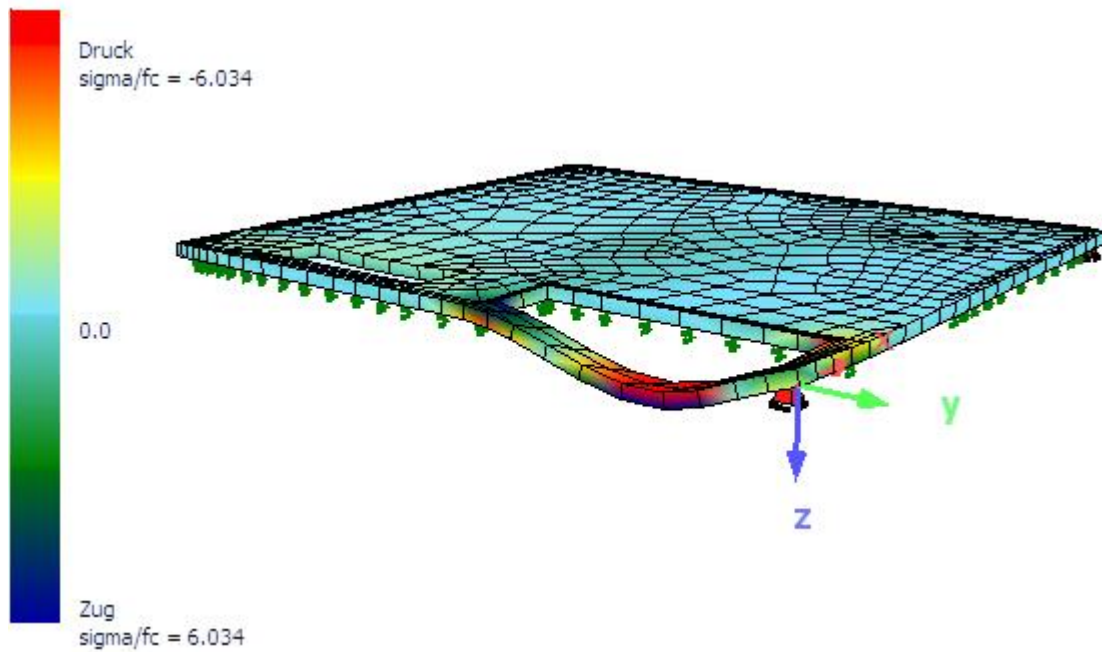
**Abbildung 3.8:** Die Federkraft im Vierendeelträger wird als Einzellast auf das Fachwerk eingesetzt.

Wie schon erwähnt, wurde das gesamte Tragwerk bis zu diesem Zeitpunkt komplett mit starren Auflagern modelliert. Um die Ergebnisse zu verbessern, werden die Auflager nun entsprechend ihren Steifigkeiten modelliert. Diese Modellierung gibt dem Tragwerk eine Verformungsfigur, die ähnlich dem 3D-Modell ist. Im ersten Rechenschritt wird das Wandsystem (3.1.3) überall als starre Auflager behandelt. Jetzt wird es modelliert, und die darauf gestützten Decken werden entsprechend seiner Steifigkeit auf Federn gelagert (Bild 3.9).

Mit diesem Modellkonzept gab es ein Problem bei der 1. Decke. Im Bild 3.7 ist es zu sehen, dass die Lagerung auf der aufgehenden Wand als starre Auflager angenommen wurde. Aber wenn man das Wandsystem nicht mehr als starr modelliert, ergibt sich eine enorme Durchbiegung und Spannungen an der Stelle (Bild 3.10).

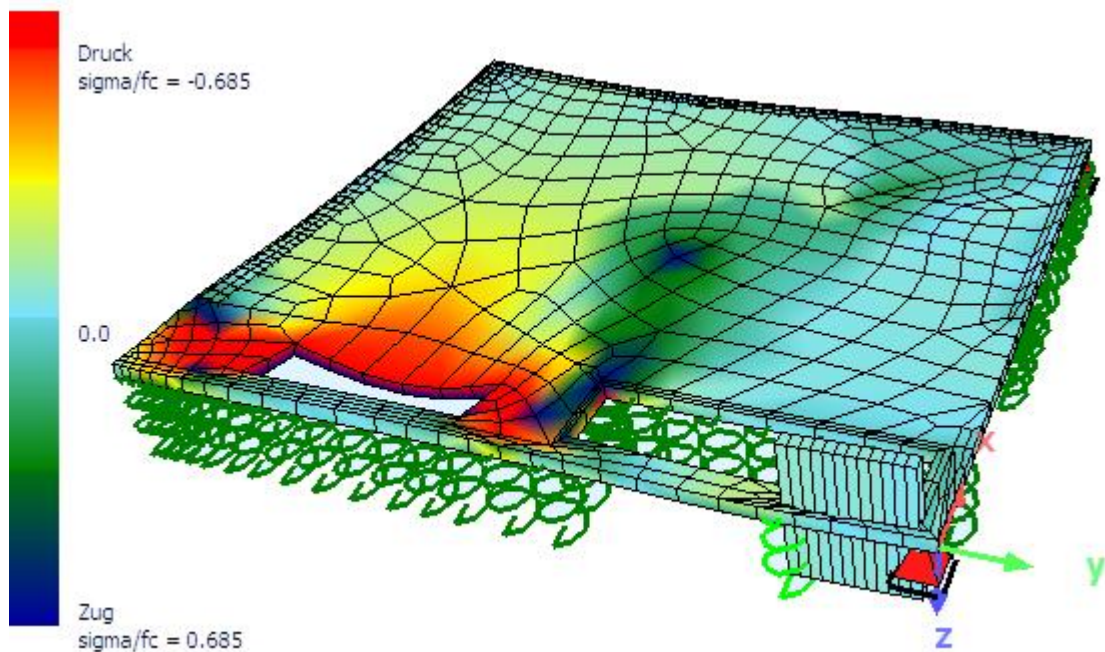


**Abbildung 3.9:** die 2. Decke: Untersicht, Federn entsprechen den Steifigkeit der Auflager.



**Abbildung 3.10:** die 1. Decke: hohe Durchbiegung an der Wandstelle.

Die Durchbiegung wird aber von der hohen Steifigkeit der aufgehenden Wand behindert. Diese ist aber hier nicht in Rechnung gesetzt worden, deshalb muss die Platte (1. Decke) anders modelliert werden. Das verbesserte Modell beinhaltet eine vergrößerte Steifigkeit in diesem Bereich der Platte und eine einzige Feder. Dieses Modell gibt diesem Bereich der Platte neben der Öffnung die Steifigkeit des Wandsystems. Das verbesserte Modell zeigt eine Verformungsfigur, die die Verformung aus dem 3D-System entspricht (Bild 3.11).



**Abbildung 3.11:** die 1. Decke: Verbessertes Modell und seine Durchbiegung.

Die Berechnung wurde mehrmals wiederholt, um die Auswirkung der Steifigkeitsverbesserung auf die Vierendeelträgerlasten zu betrachten. Diese wiederholte Berechnung aktualisiert die Auflagerkräfte und Lasten bis zum Fachwerk. Der Ergebnisse der Verbesserten Berechnung sind im nächsten Kapitel mit den Ergebnissen des 3D-Modells gezeigt.

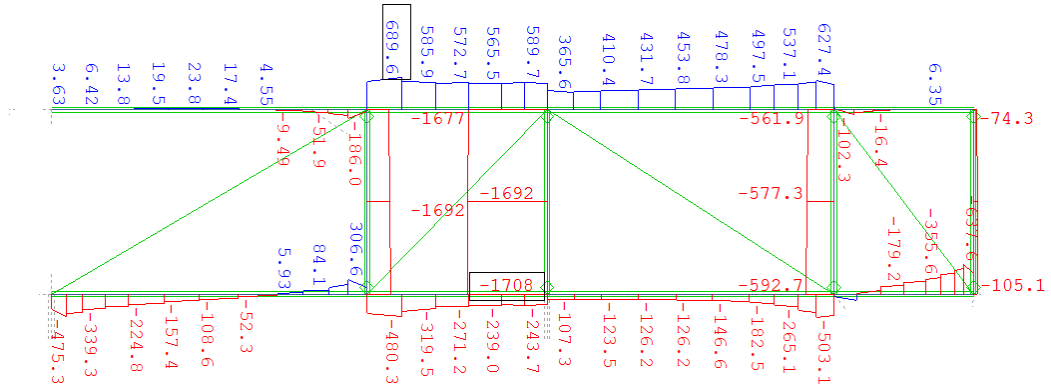
## 4 Ergebnisse und Auswertung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den 2D- und 3D-Berechnungen vorgestellt und miteinander verglichen. Diese werden als Grafiken dargestellt und die maximalen Werte der Schnittgrößen werden anhand von Tabellen gegenübergestellt. Alle Ergebnisse wurden für den Lastfall Eigengewicht und ständige Lasten bestimmt.

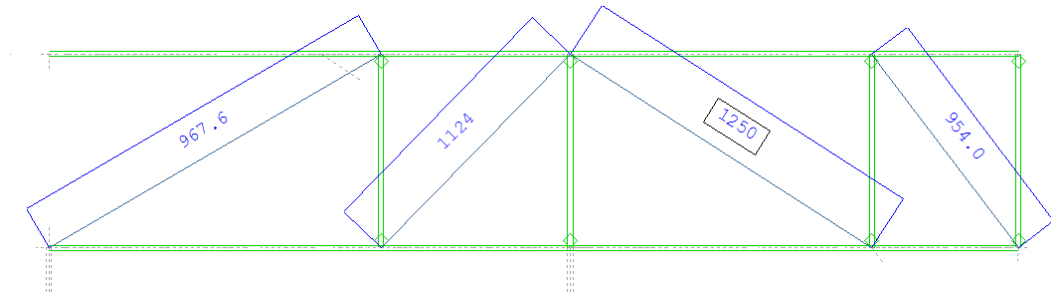
### 4.1 Fachwerk

Bei dem Fachwerk wurden die Normalkräfte und die Durchbiegung an der Kragarm zum Vergleich herangezogen. Die Durchbiegung stimmt bei beiden Modellen gut überein. Die Normalkräfte weisen jedoch erhebliche Abweichungen auf. Dies liegt in erster Linie daran, dass die Belastung aus der darüberliegenden Decke nur an die Stützen als Punktlager aufgebracht wurde. Vereinfachend wurde bei der Modellierung der Decke des 4. OG nur eine Punktlagerung im Bereich der Stützen gewählt.

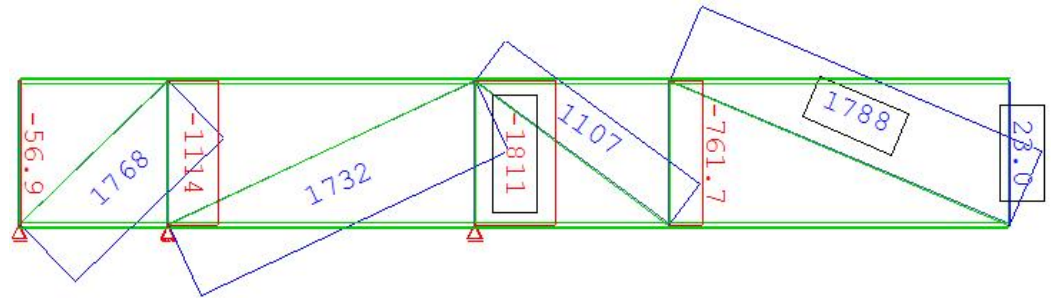
#### 4 Ergebnisse und Auswertung



**Abbildung 4.1:** 3D: Normalkraft im Fachwerk (Stabelemente)



**Abbildung 4.2:** 3D: Normalkraft im Fachwerk (Seile)



**Abbildung 4.3:** 2D: Normalkraft im Fachwerk

**Tabelle 4.1:** Vergleich der Ergebnisse: Normalkraft im Fachwerk

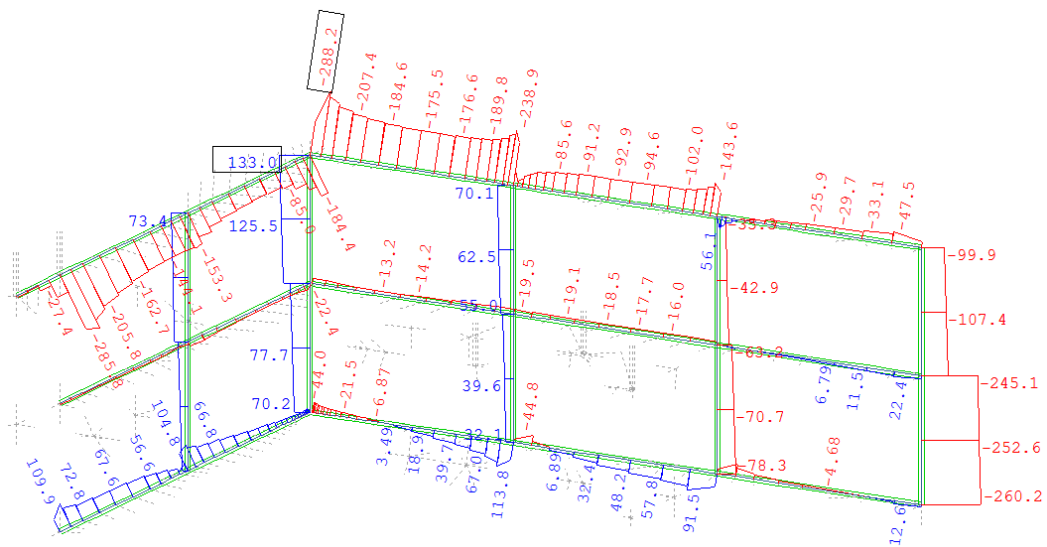
Bauteil	3D $N[kN]$	2D $N[kN]$	Differenz $[kN]$
Seil 1	967,6	1788	-820,4
Seil 2	1124	1107	17
Seil 3	1250	1732	-482
Seil 4	954	1768	-814
Stütze 2	-500,9	-761,7	260,8
Stütze 3	-1708	-1811	103
Stütze 4	-592,7	-1114	521,3
Stütze 5	-105,1	-56,9	-48,2
Riegel oben	689,6	1797	-1107,4
Riegel unten	-503,1	-2425	1921,9

## 4.2 Vierendeelträger

Bei dem Vierendeelträger zeigt der Vergleich der Werte von 3D- und 2D-Systemen ebenso eine deutliche Abweichung voneinander. Die Ursachen dafür liegen ebenso wie auch bei dem Fachwerk in der Modellierung der Belastung. Auch hier wurden nur Punktlasten über den Stützen gesetzt. Ein weiterer Grund für die großen Differenzen ist auch das komplexe 3D-Tragverhalten des Tragwerks.

**Tabelle 4.2:** Vergleich der Ergebnisse: Maximale und minimale Schnittkräfte im Vierendeelträger

Schnittkraft	3D Wert	2D Wert	Differenz
$M_y^{max} [kNm]$	272.3	665,8	-393,5
$M_y^{min} [kNm]$	-264.1	-700	435,9
$M_z^{max} [kNm]$	297.1	---	---
$M_z^{min} [kNm]$	-247.9	---	---
$V_y^{max} [kN]$	50.3	---	---
$V_y^{min} [kN]$	-179.4	---	---
$V_z^{max} [kN]$	204.4	285,2	-80,8
$V_z^{min} [kN]$	-196.7	-323,6	126,9
$N^{max} [kN]$	133	615	-482
$N^{min} [kN]$	-288.2	-650	361,8



**Abbildung 4.4:** 3D: Normalkraft  $N$  im Vierendeelträger

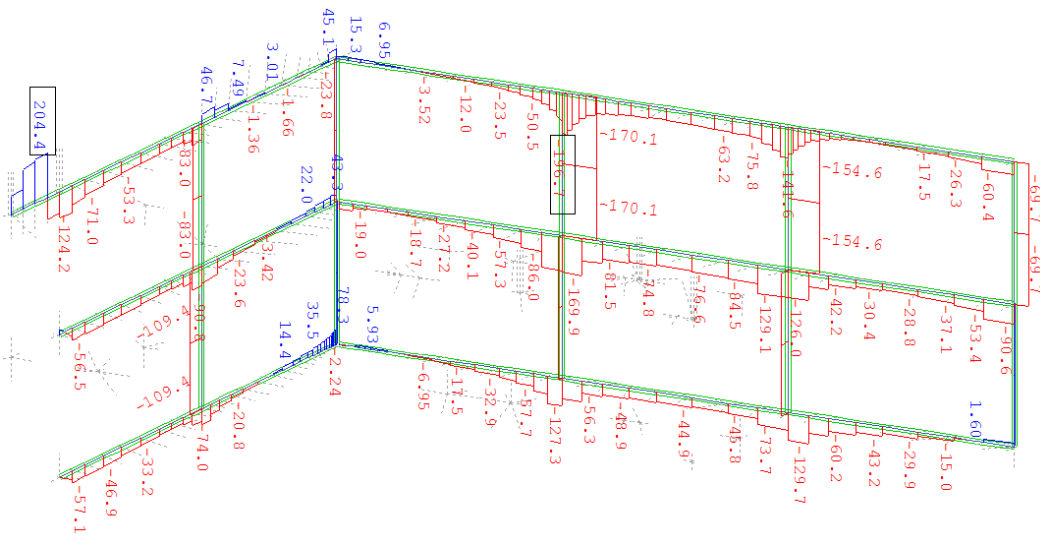


Abbildung 4.5: 3D: Querkraft  $V_z$  im Vierendeelträger

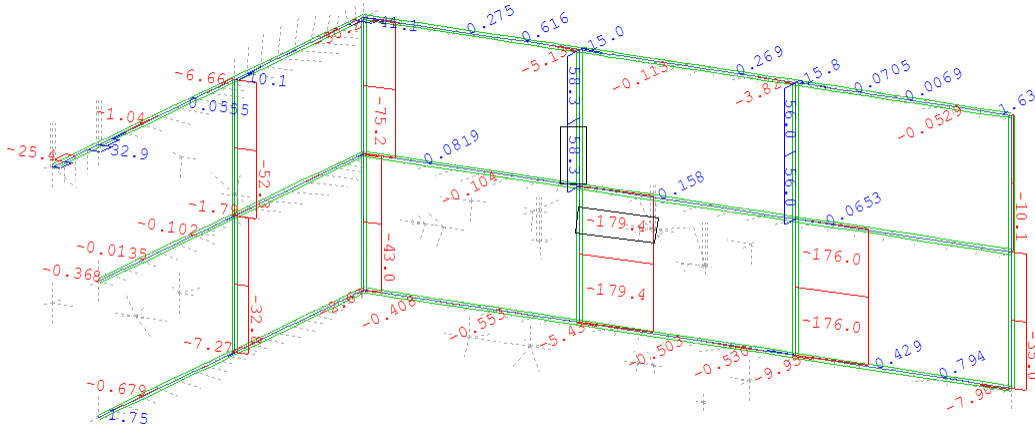


Abbildung 4.6: 3D: Querkraft  $V_y$  im Vierendeelträger

#### 4 Ergebnisse und Auswertung

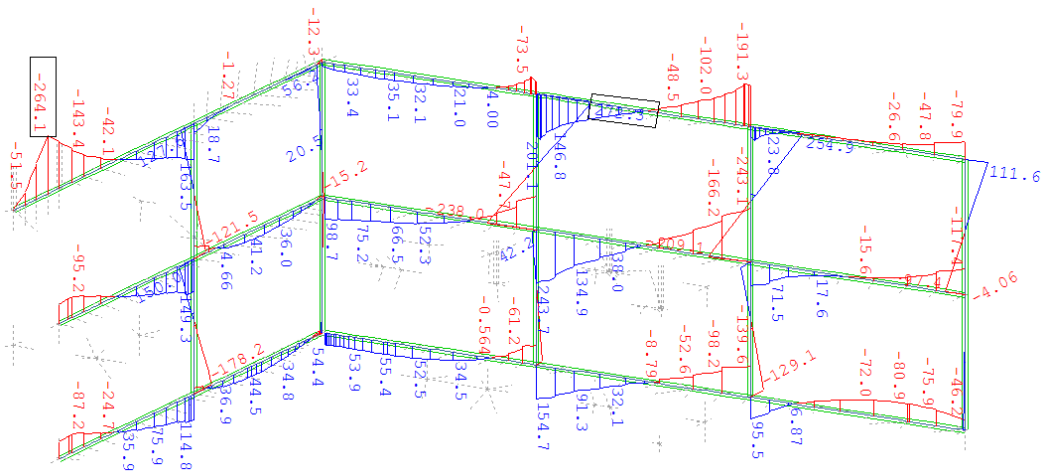


Abbildung 4.7: 3D: Moment  $M_y$  im Vierendeelträger

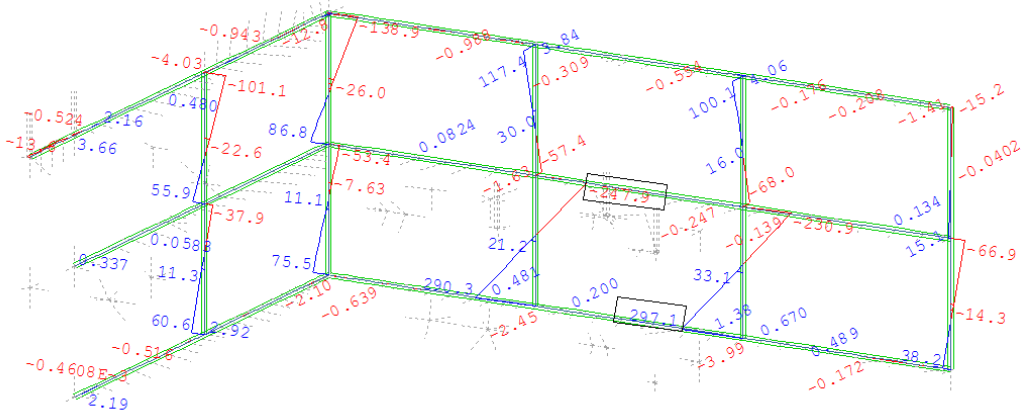


Abbildung 4.8: 3D: Moment  $M_z$  im Vierendeelträger

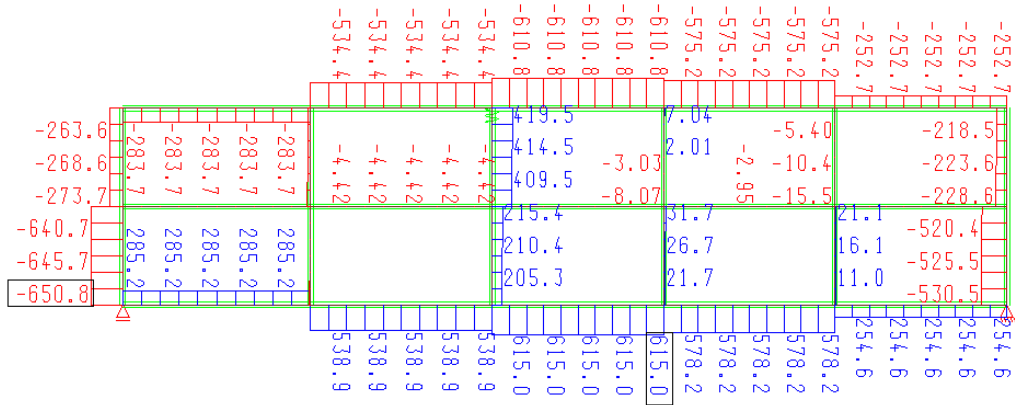


Abbildung 4.9: 2D: Normalkraft  $N$  im Vierendeelträger

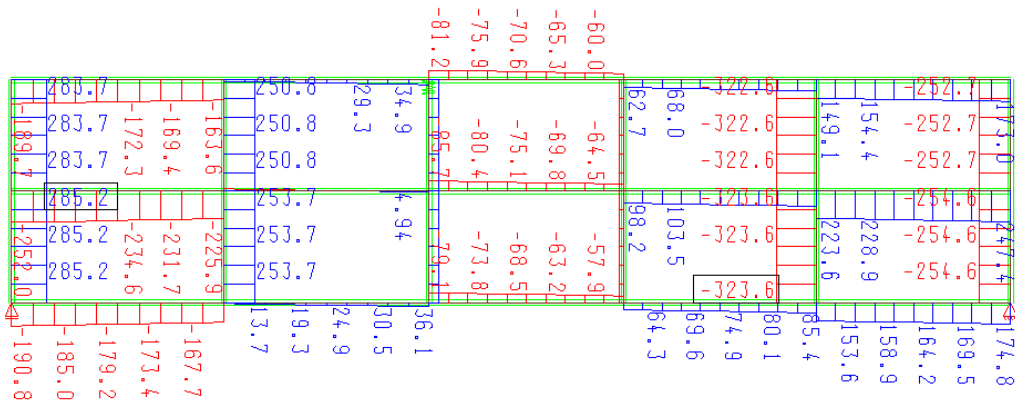


Abbildung 4.10: 2D: Querkraft  $V_z$  im Vierendeelträger

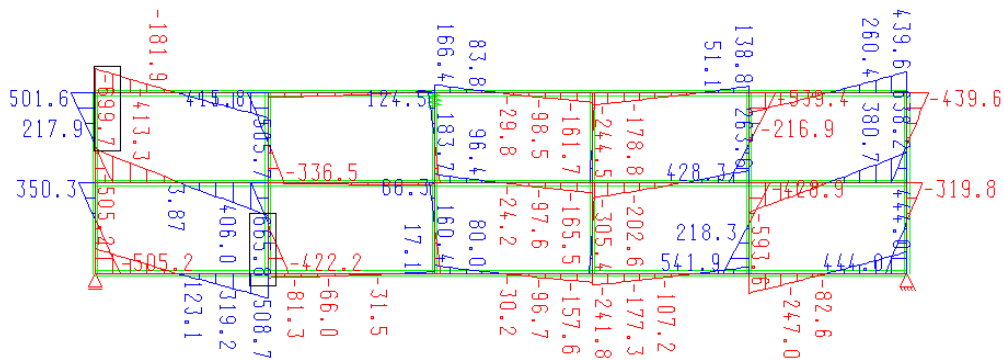


Abbildung 4.11: 2D: Moment  $M_y$  im Vierendeelträger

### 4.3 Decken

Bei dem Vergleich der Decken stellt man fest, dass einige Schnittgrößen bei beiden Modellierungsarten gut übereinstimmen, andere wiederum weisen deutliche Abweichungen auf. Die Abweichungen werden größer, je weiter man sich vom Erdgeschoß entfernt. Das liegt in erster Linie daran, dass das 3D-Tragverhalten des Gebäudes in den oberen Geschoßen stärker ausgeprägt ist.

Betrachtet man die Durchbiegungen, so erkennt man, dass die Werte bei allen Decken stark unterschiedlich sind. Hierbei kommt der folgende Effekt zum Tragen: Die Durchbiegungen des 3D-Modells sind alle fast gleich, da die Decken untereinander verbunden sind und sich summieren. Bei den 2D-Modellen handelt es sich um die Werte einzelner Decken, die voneinander entkoppelt sind und somit keine Summenwerte darstellen.

**Tabelle 4.3:** Vergleich der Ergebnisse: Maximale und minimale Schnittkräfte in den Decken

Bauteil	Schnittkraft	3D Wert min/max	2D Wert min/max	Differenz
Deck 1OG	$HM1[kNm]$	-131.6/91.5	-173,7/231,2	42,1/ - 139,7
Deck 1OG	$HM2[kNm]$	-259.3/27.7	-255/26,3	-4,3/1,4
Deck 1OG	$u_z[mm]$	0.749/24.8	-1,29/16,4	1,365/8,4
Deck 2OG	$HM1[kNm]$	-176.8/107.7	-96/50,4	-80,8/57,3
Deck 2OG	$HM2[kNm]$	-375.7/30.5	-120,4/24,3	-255,3/6,2
Deck 2OG	$u_z[mm]$	1.2/24.7	-0,401/6,92	1.601/17,78
Deck 3OG	$HM1[kNm]$	-163.4/178.9	-69,9/88,2	-93,5/90,7
Deck 3OG	$HM2[kNm]$	-191.6/45.1	-126,8/26,6	-64,8/18,5
Deck 3OG	$u_z[mm]$	1.55/25	-0,667/8,48	2,217/16,52
Deck 4OG	$HM1[kNm]$	-69.5/264	-21,9/38,5	-47,6/225,5
Deck 4OG	$HM2[kNm]$	-86.3/109.0	-51,6/18,2	-34,7/90,8
Deck 4OG	$u_z[mm]$	1.5/25.2	-0,356/2.93	1,856/22,27

#### 4.3.1 Decke 1OG

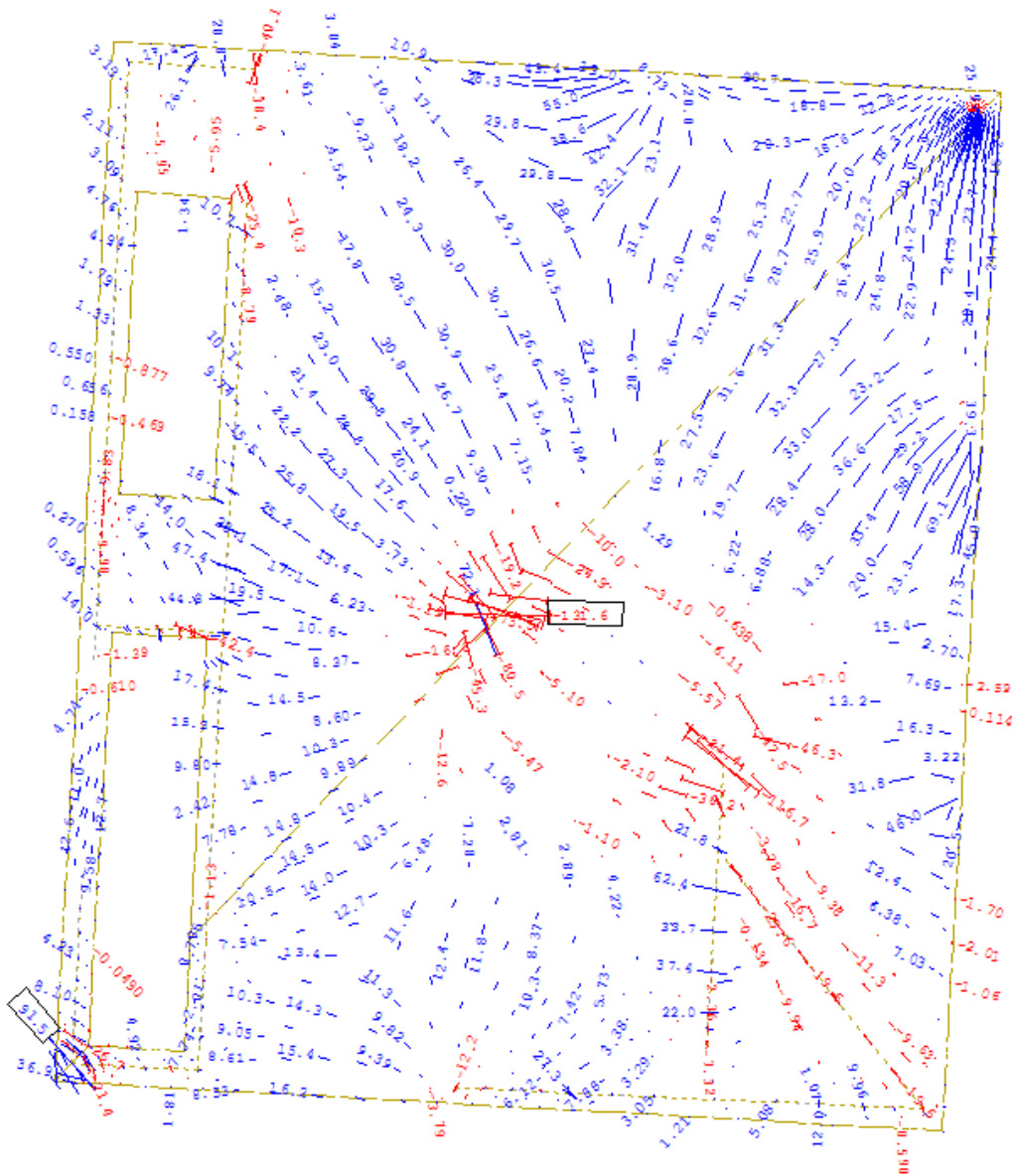


Abbildung 4.12: 3D: Hauptmomente I in der Decke 10G

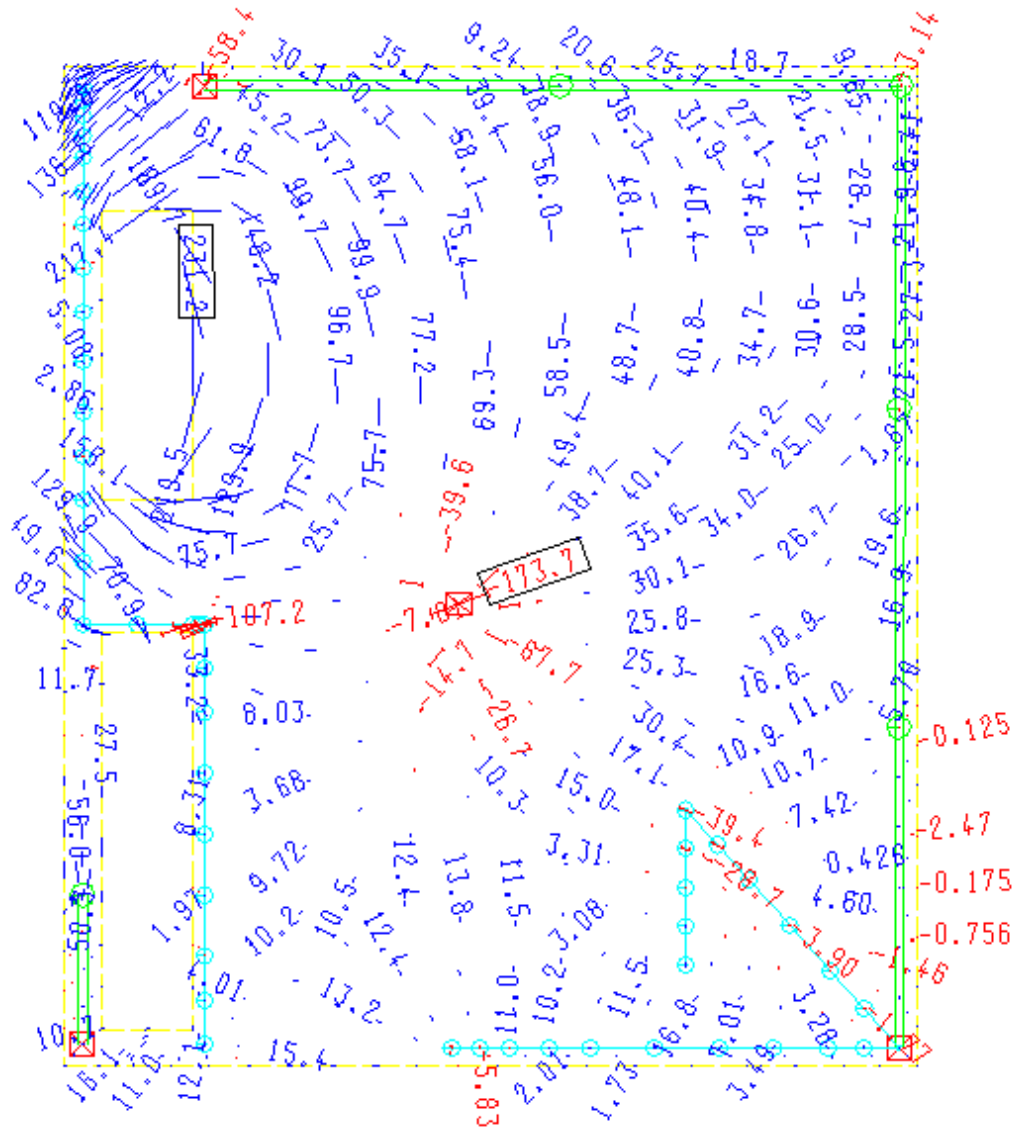


Abbildung 4.13: 2D: Hauptmomente I in der Decke 10G

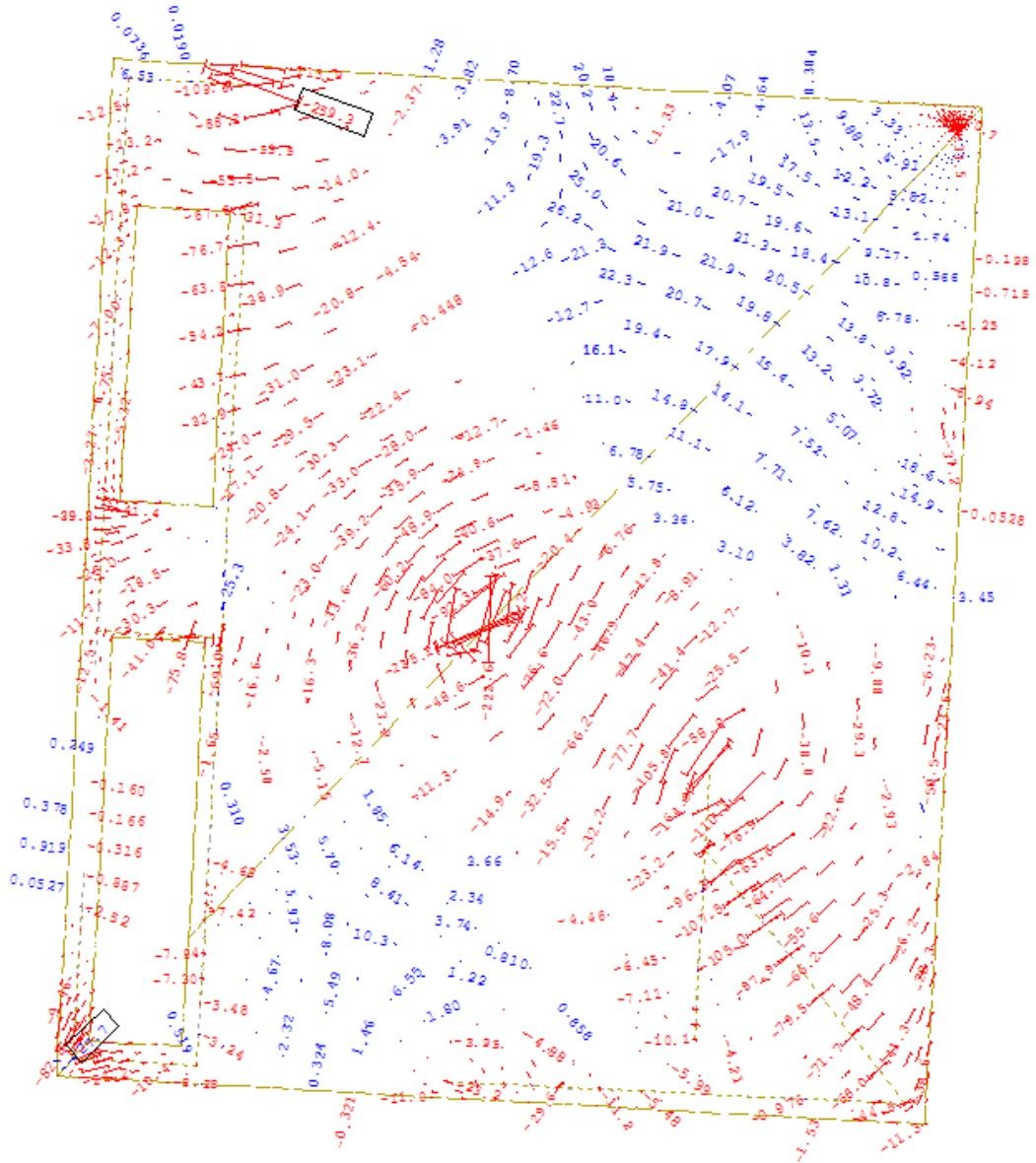


Abbildung 4.14: 3D: Hauptmomente II in der Decke 10G

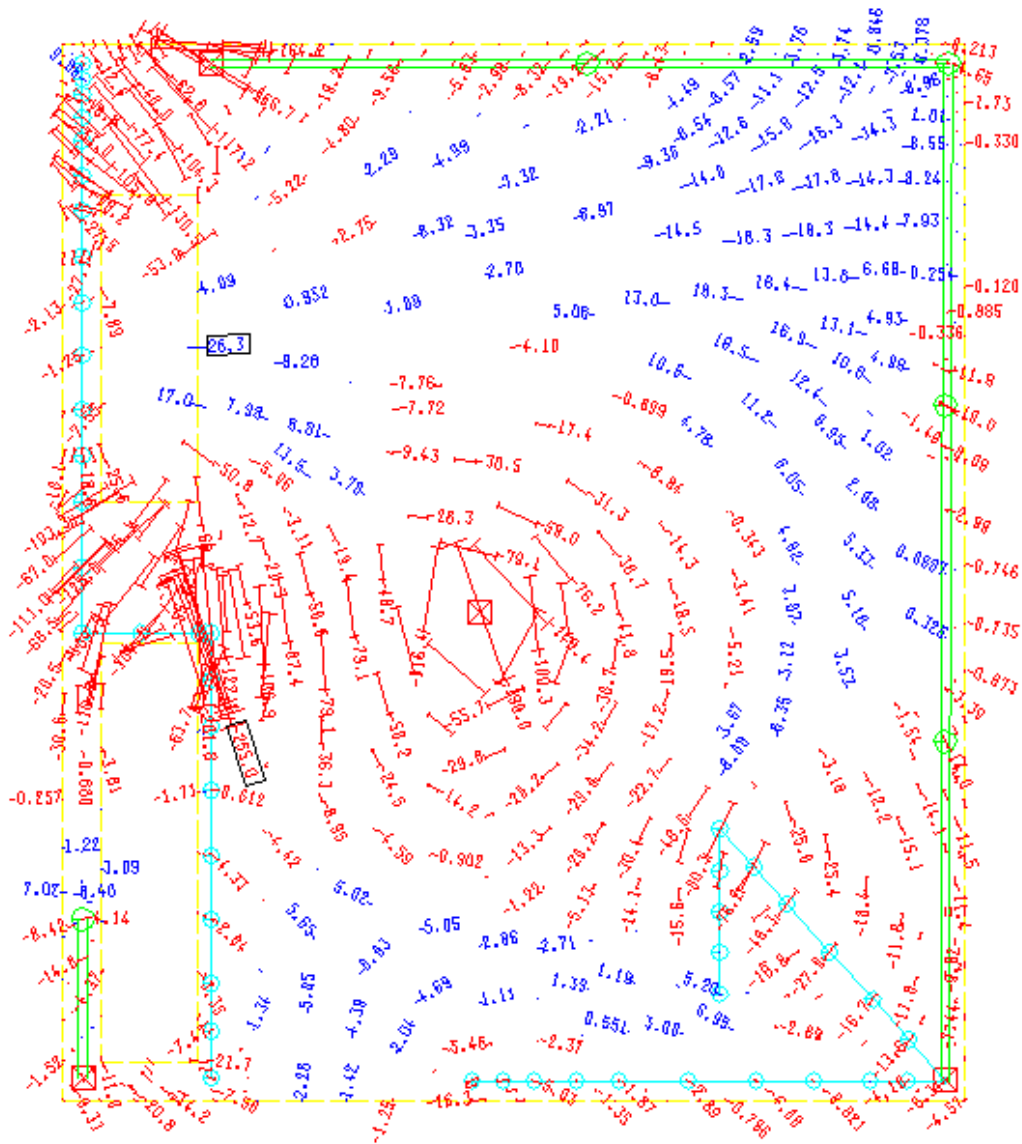


Abbildung 4.15: 2D: Hauptmomente II in der Decke 10G



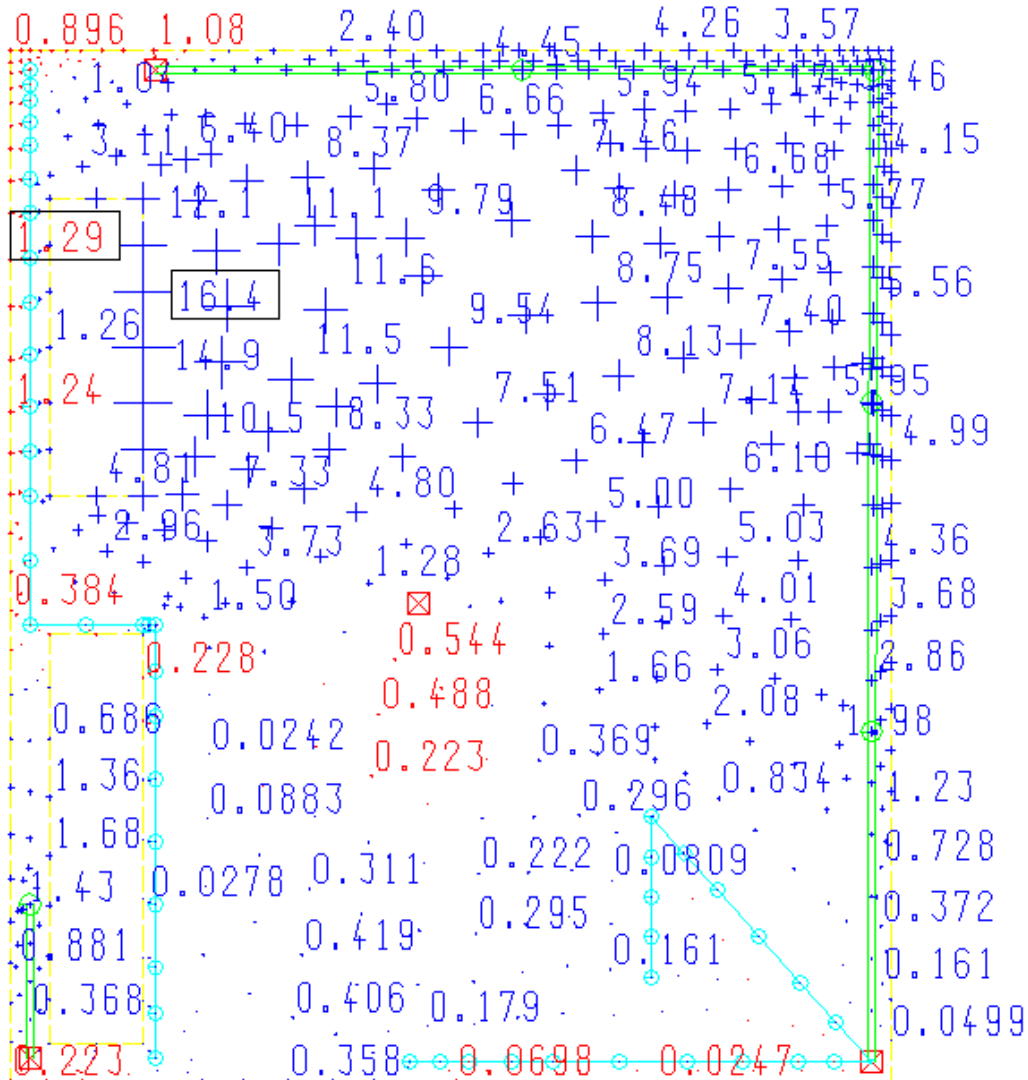


Abbildung 4.17: 2D: Durchbiegung der Decke 1OG

## 4 Ergebnisse und Auswertung

### 4.3.2 Decke 2OG

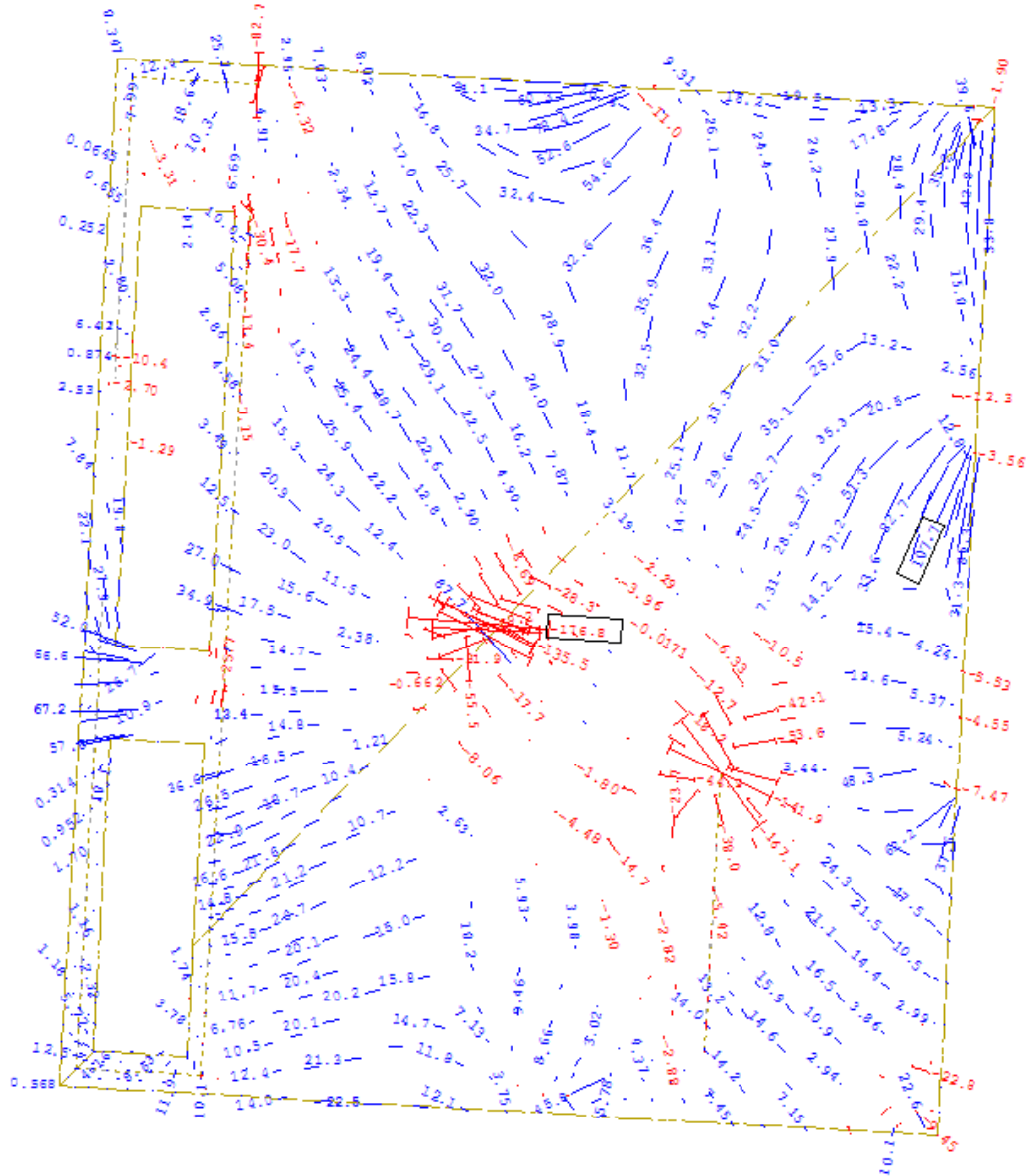


Abbildung 4.18: 3D: Hauptmomente  $I$  in der Decke 2OG

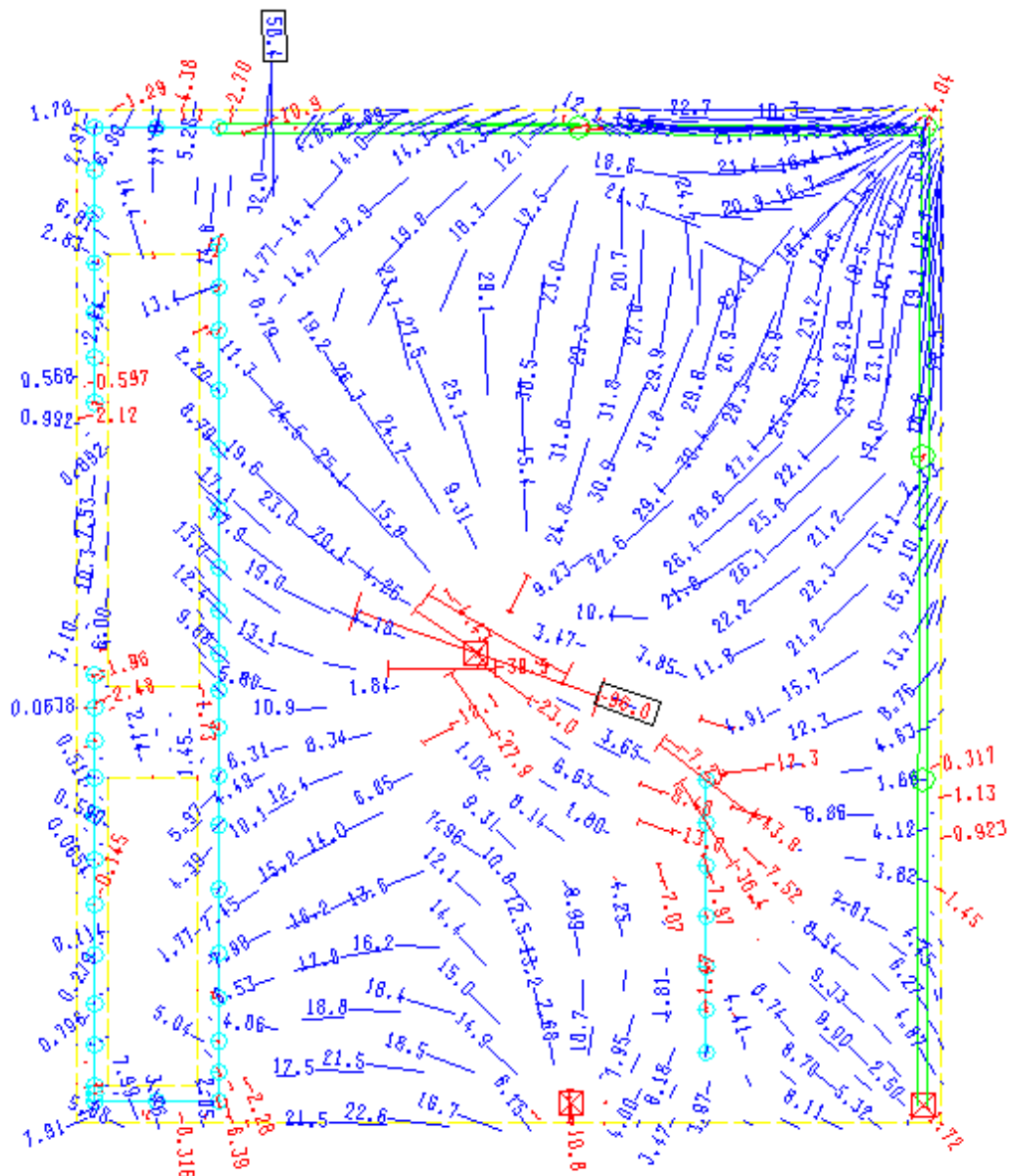


Abbildung 4.19: 2D: Hauptmomente I in der Decke 2OG

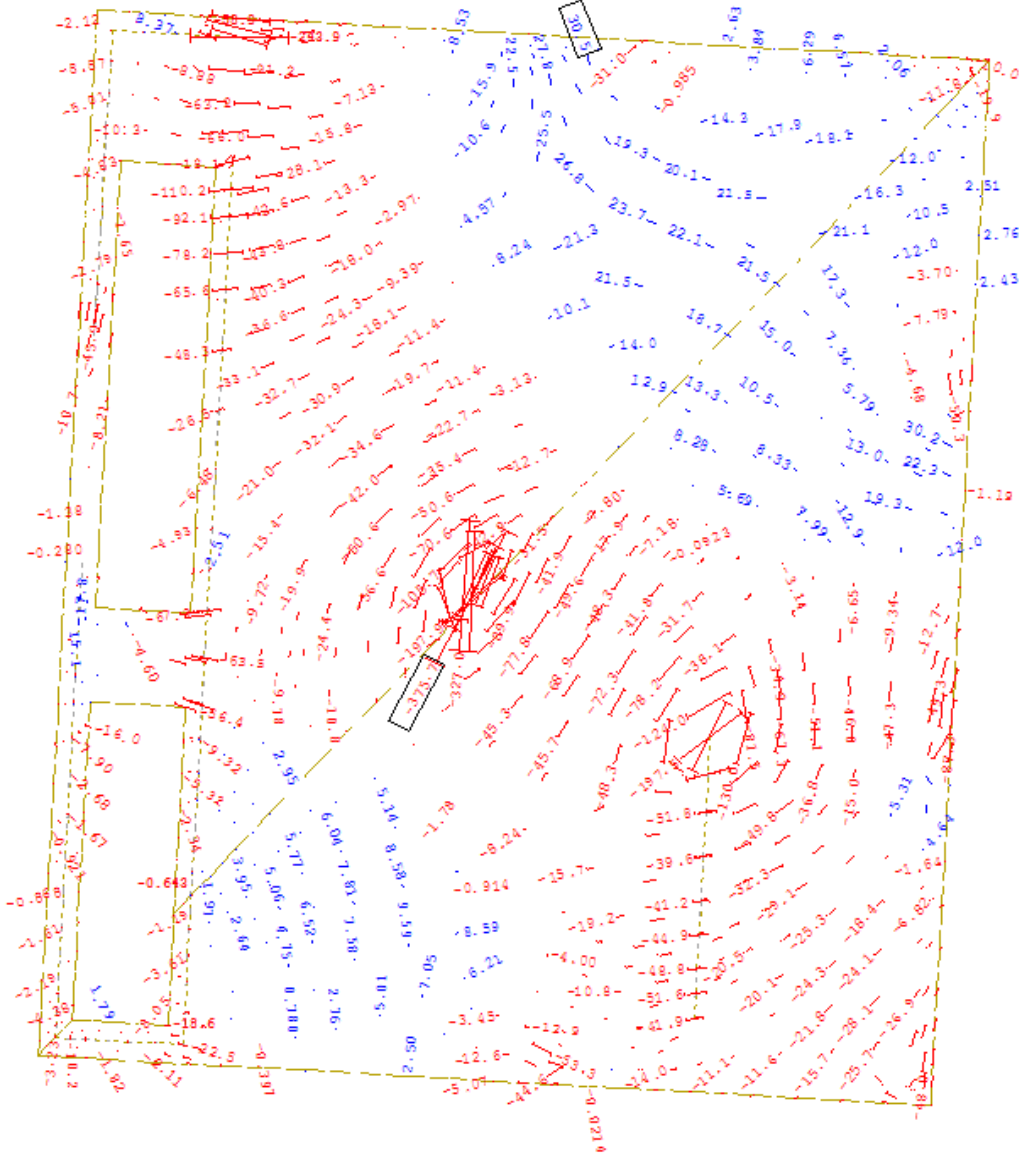


Abbildung 4.20: 3D: Hauptmomente II in der Decke 2OG

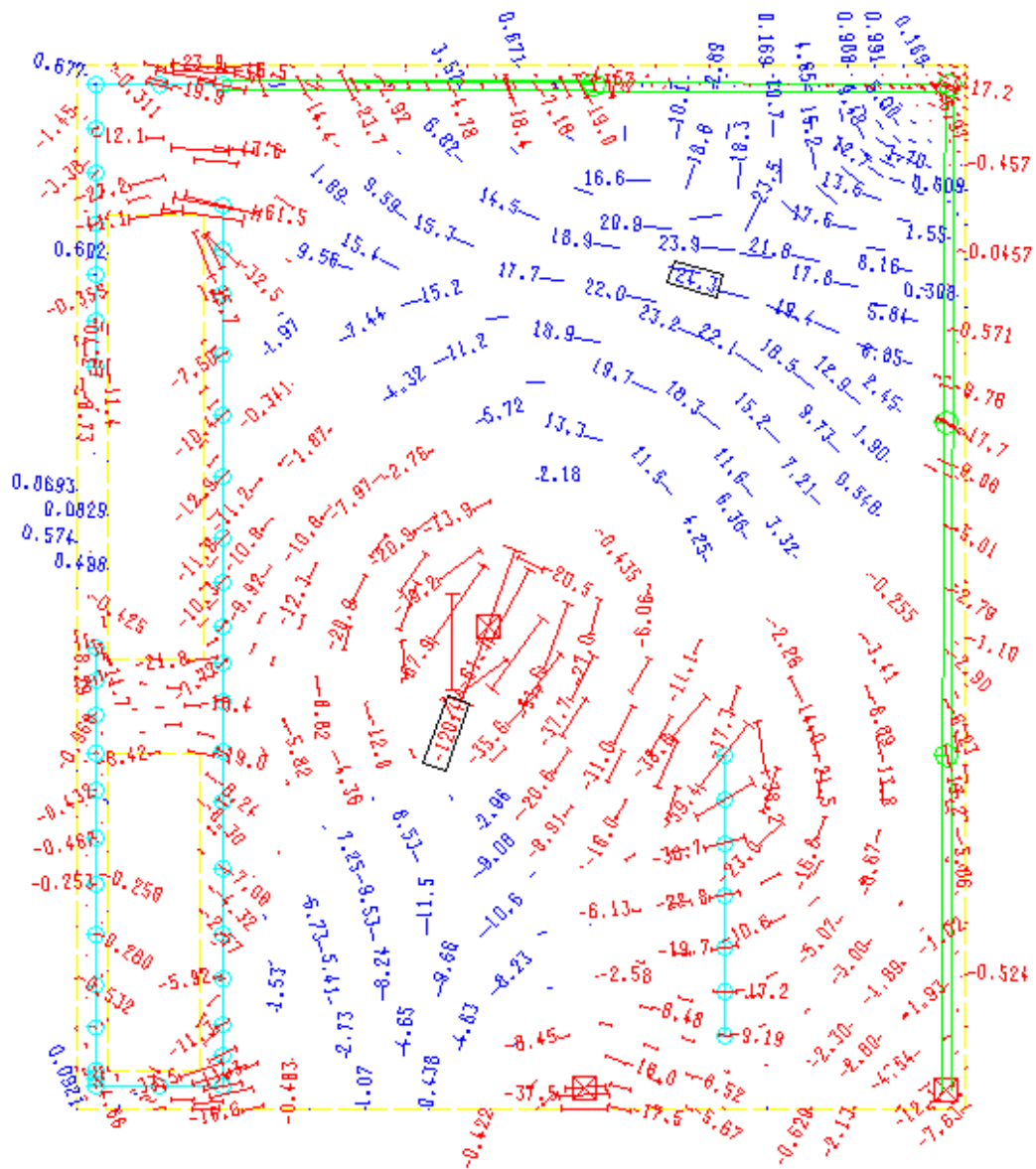


Abbildung 4.21: 2D: Hauptmomente II in der Decke 2OG

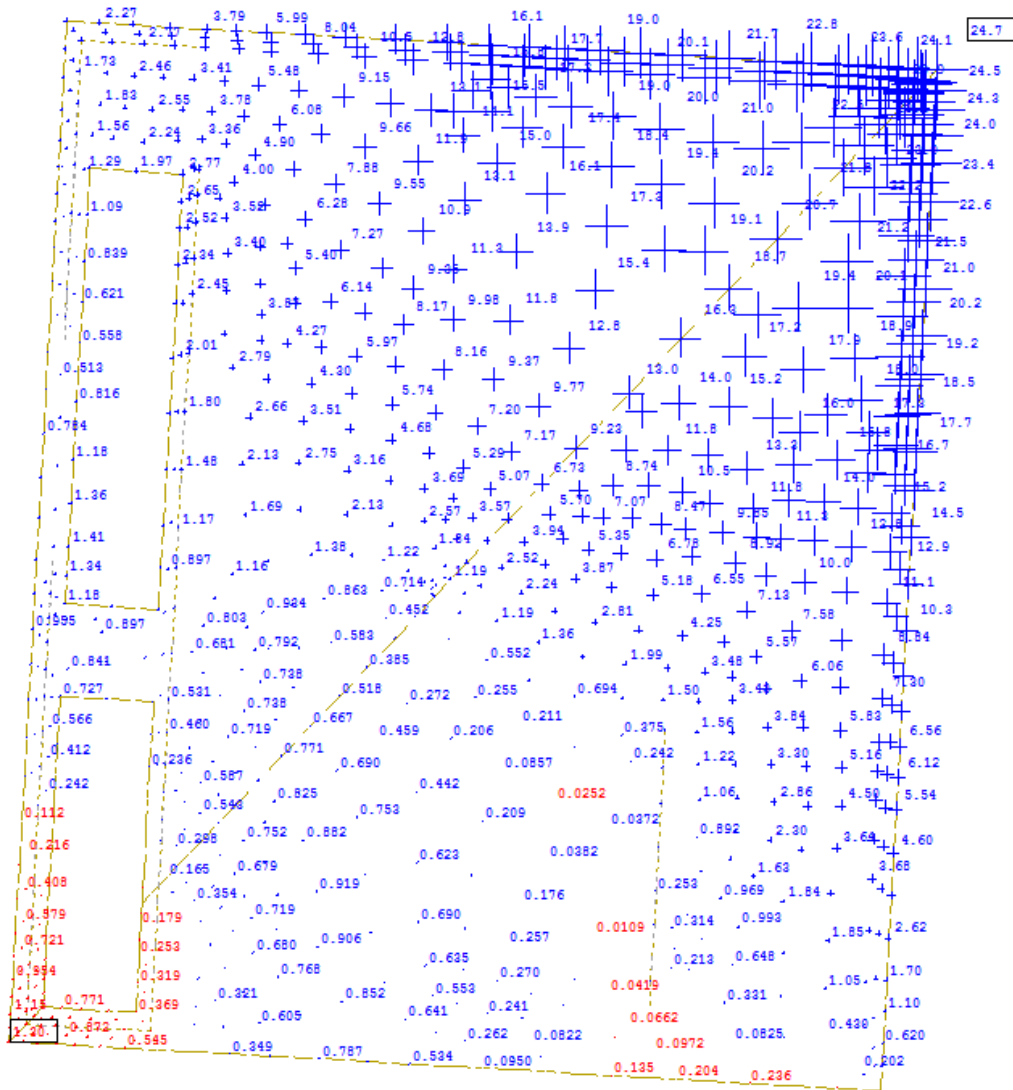


Abbildung 4.22: 3D: Durchbiegung der Decke 2OG

#### 4 Ergebnisse und Auswertung

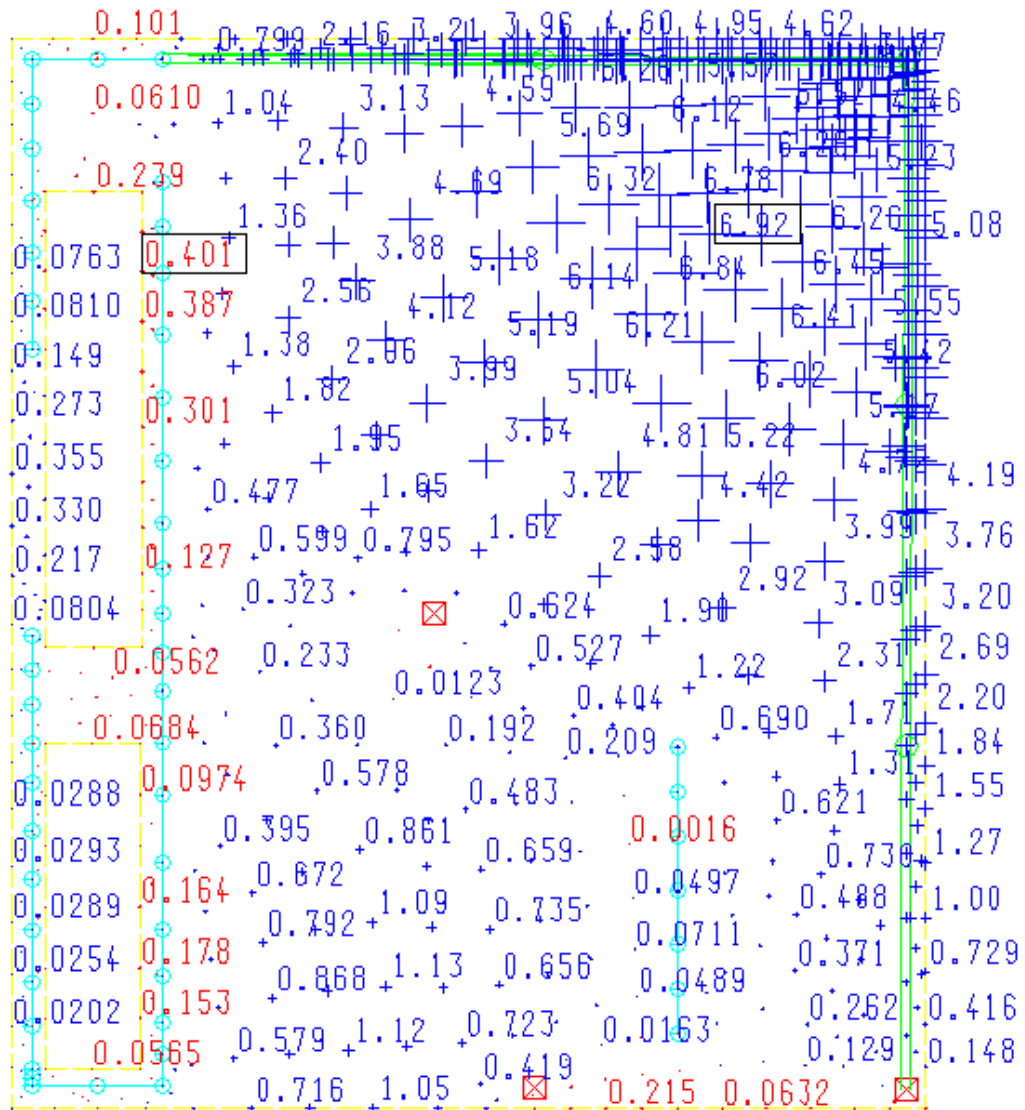


Abbildung 4.23: 2D: Durchbiegung der Decke 2OG

### 4.3.3 Decke 3OG

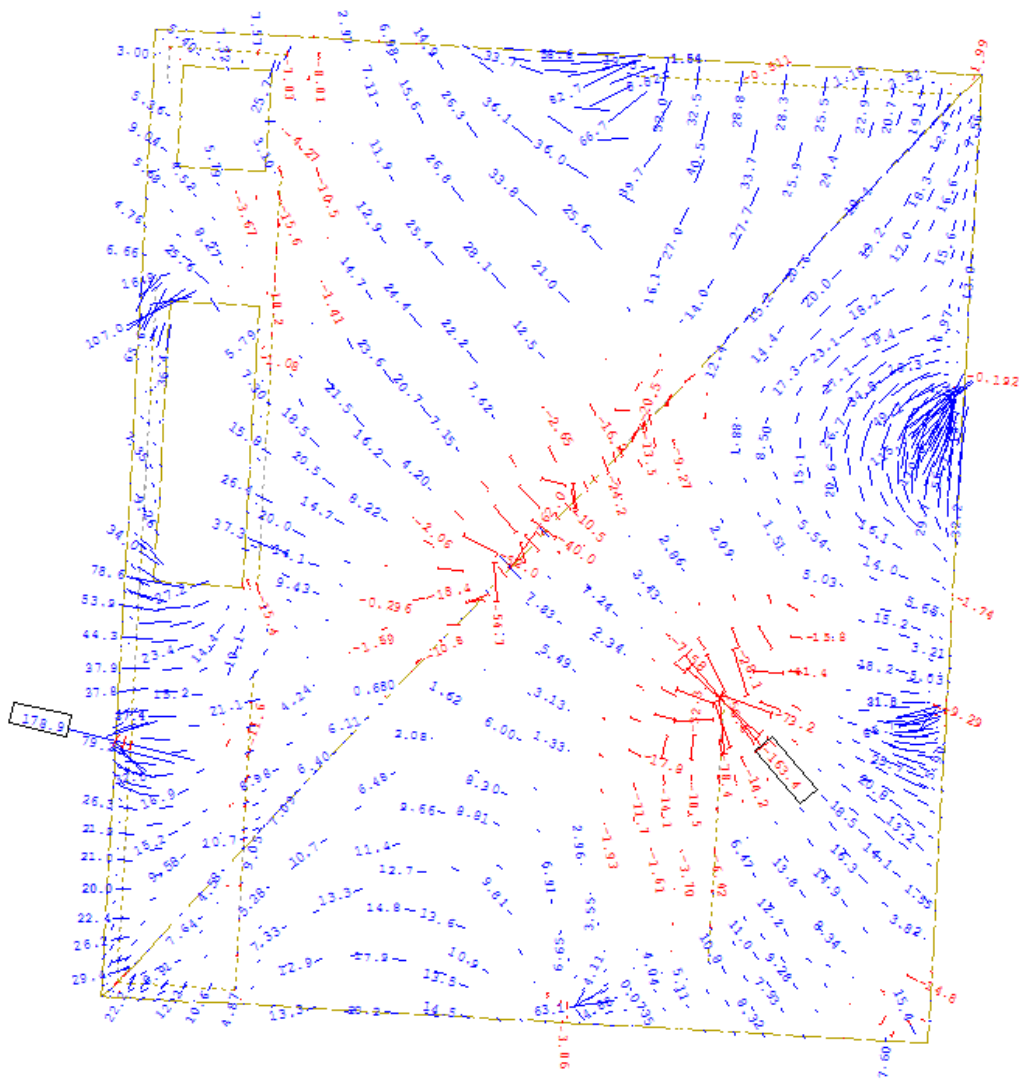


Abbildung 4.24: 3D: Hauptmomente I in der Decke 3OG



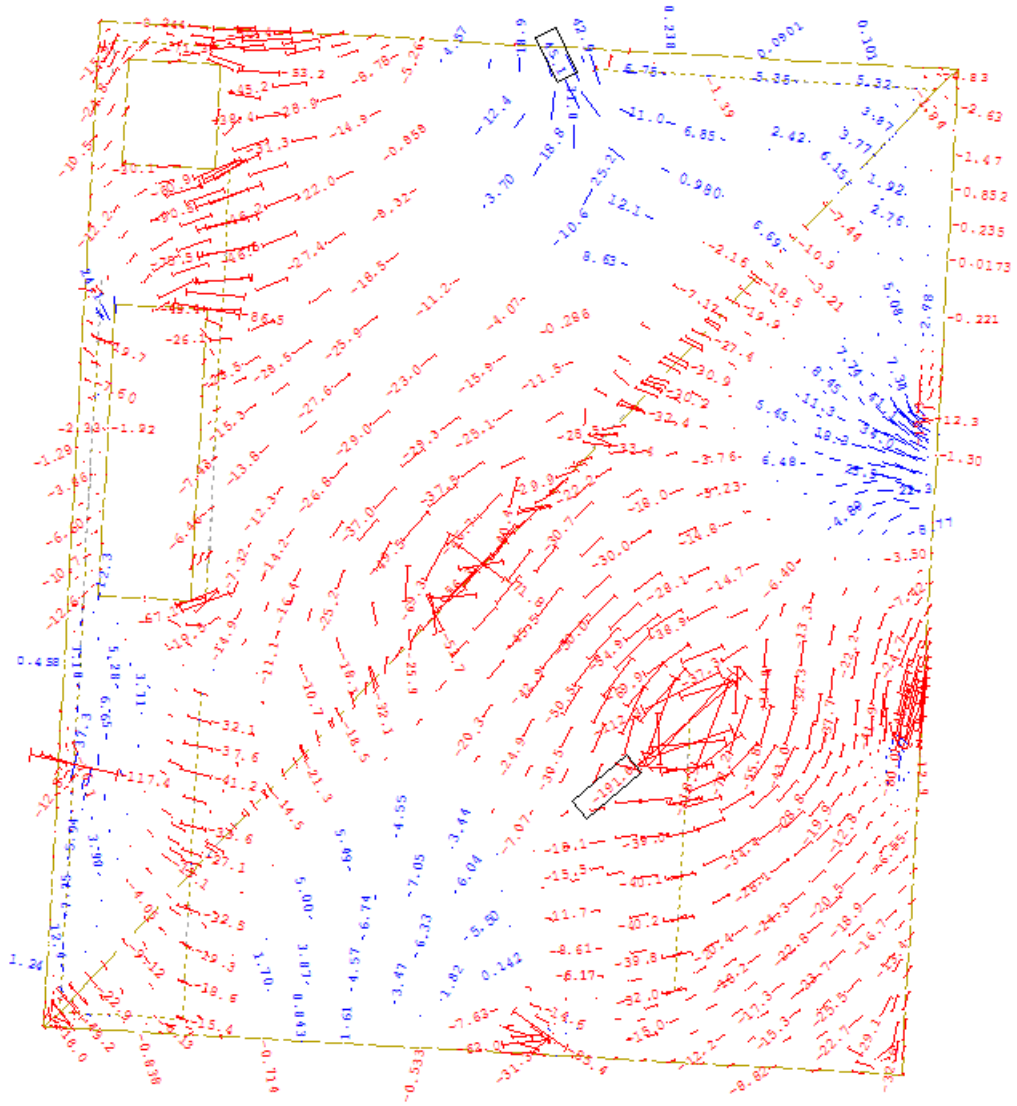


Abbildung 4.26: 3D: Hauptmomente II in der Decke 3OG

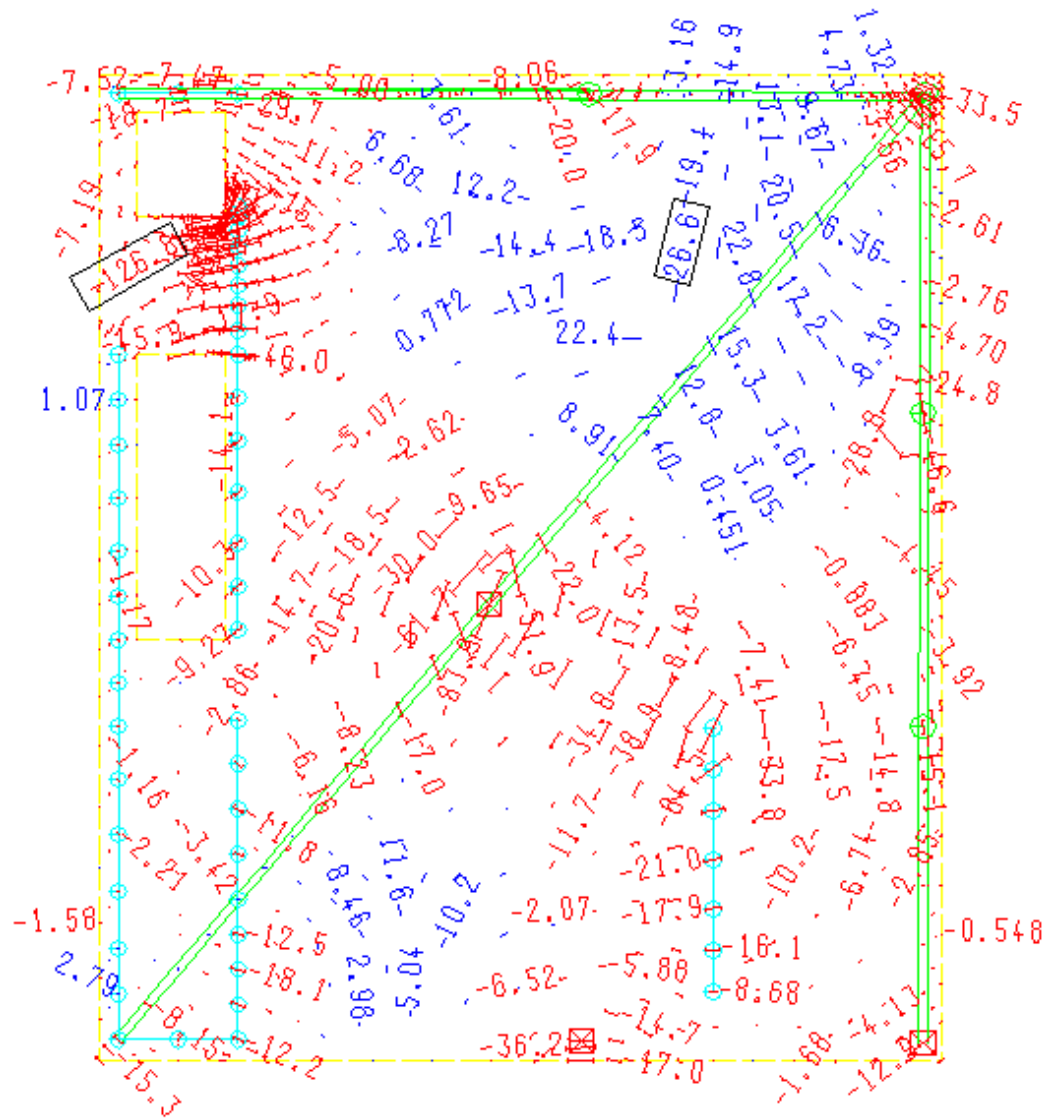


Abbildung 4.27: 2D: Hauptmomente II in der Decke 30G

#### 4 Ergebnisse und Auswertung

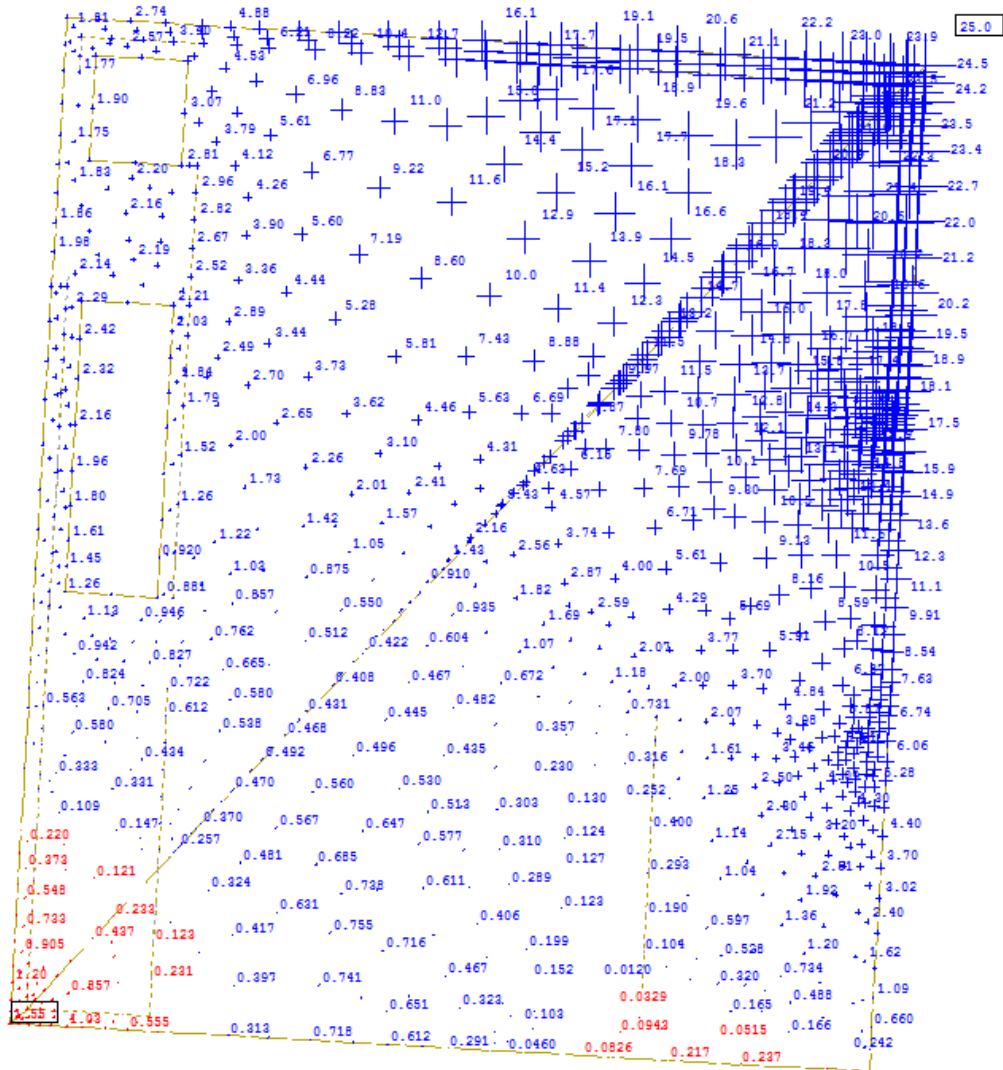


Abbildung 4.28: 3D: Durchbiegung der Decke 3OG

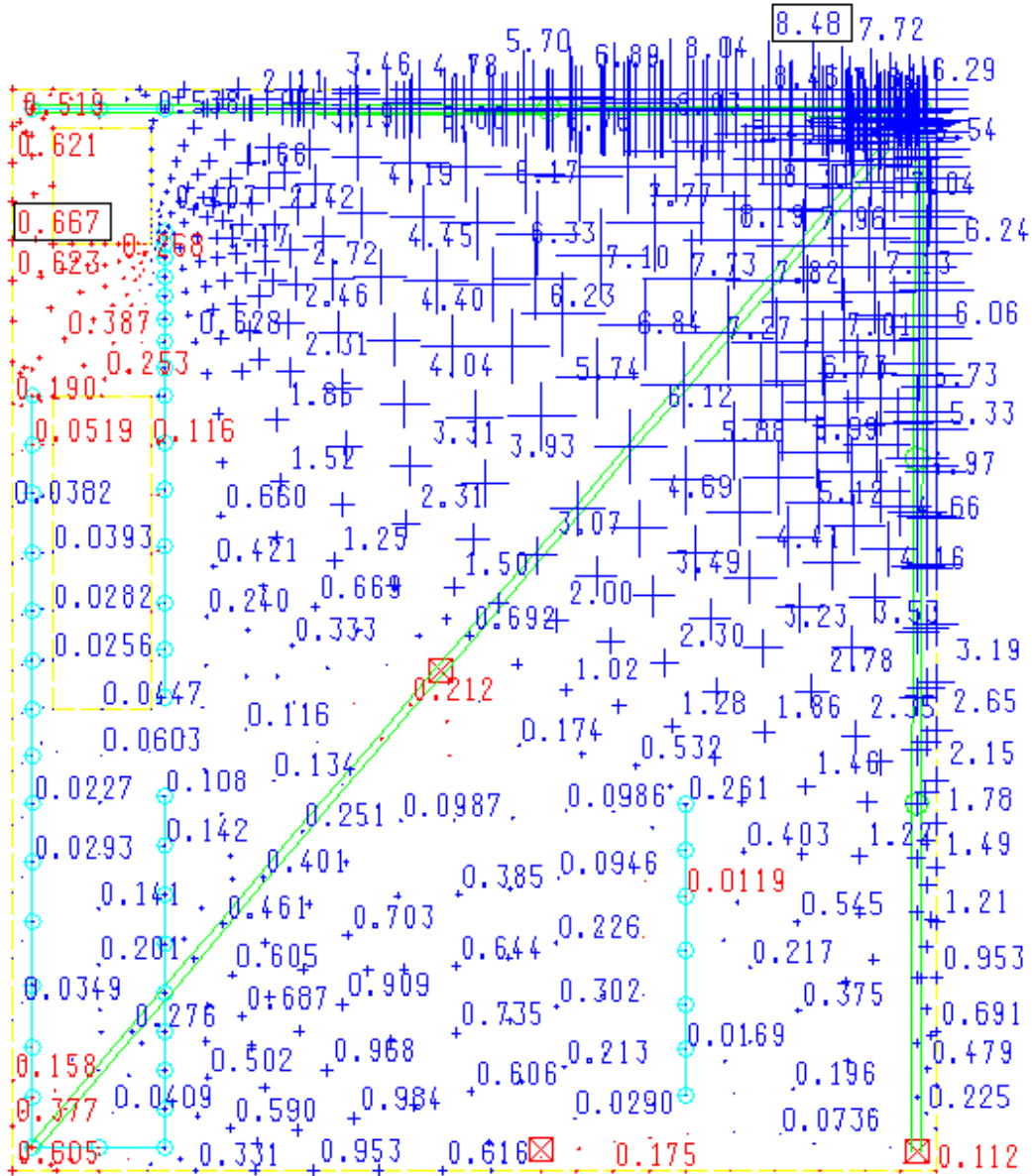


Abbildung 4.29: 2D: Durchbiegung der Decke 3OG

## 4 Ergebnisse und Auswertung

### 4.3.4 Decke 4OG

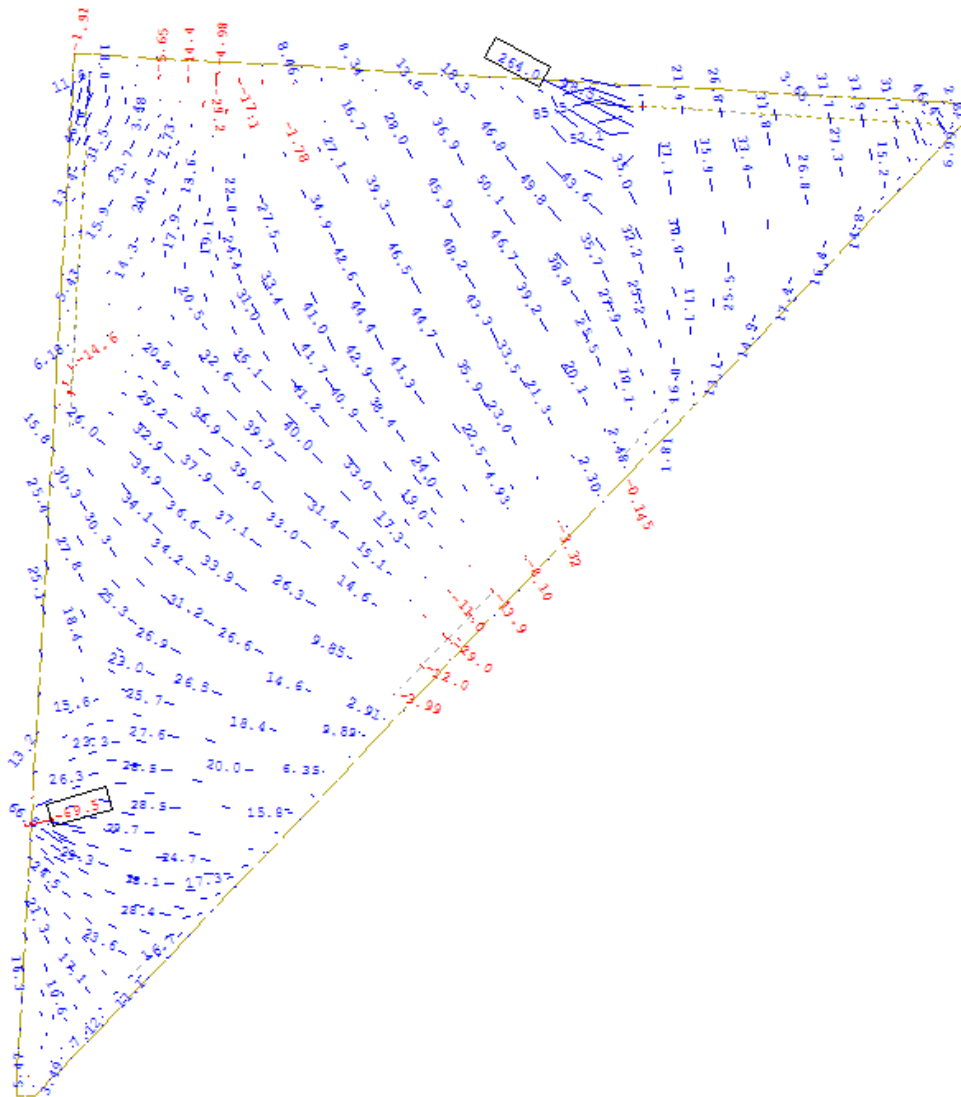


Abbildung 4.30: 3D: Hauptmomente I in der Decke 4OG

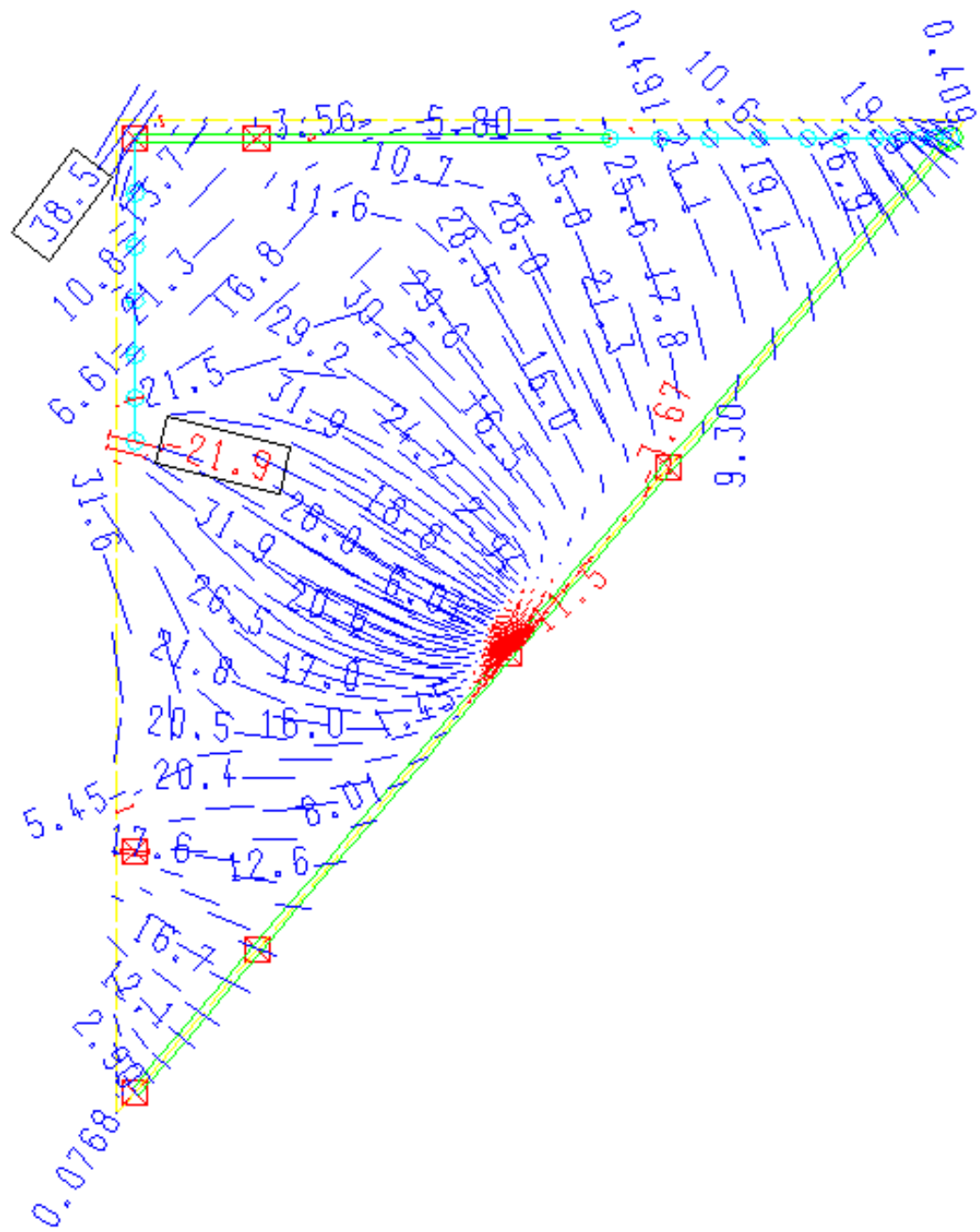


Abbildung 4.31: 2D: Hauptmomente  $I$  in der Decke 4OG

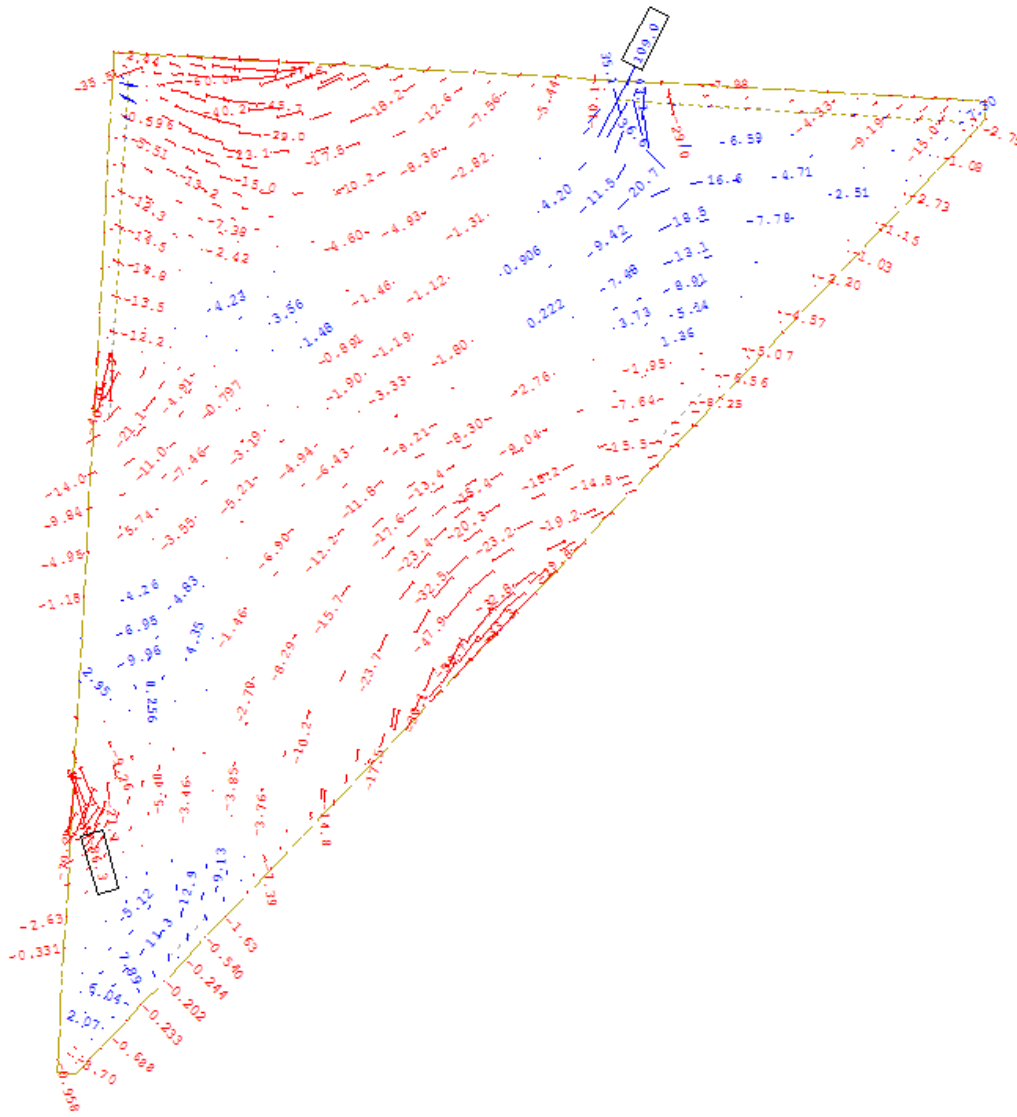


Abbildung 4.32: 3D: Hauptmomente II in der Decke 40G

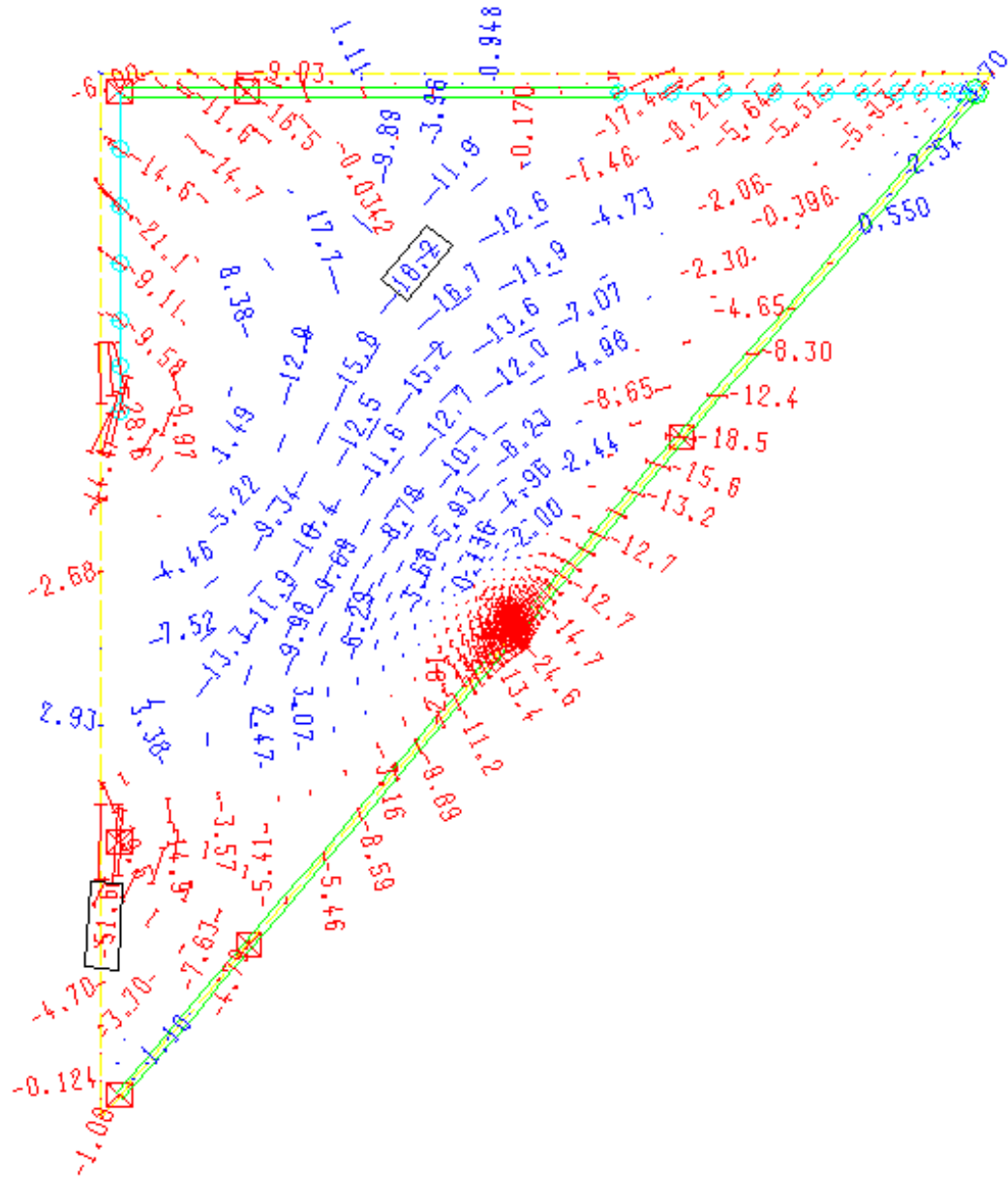


Abbildung 4.33: 2D: Hauptmomente II in der Decke 4OG

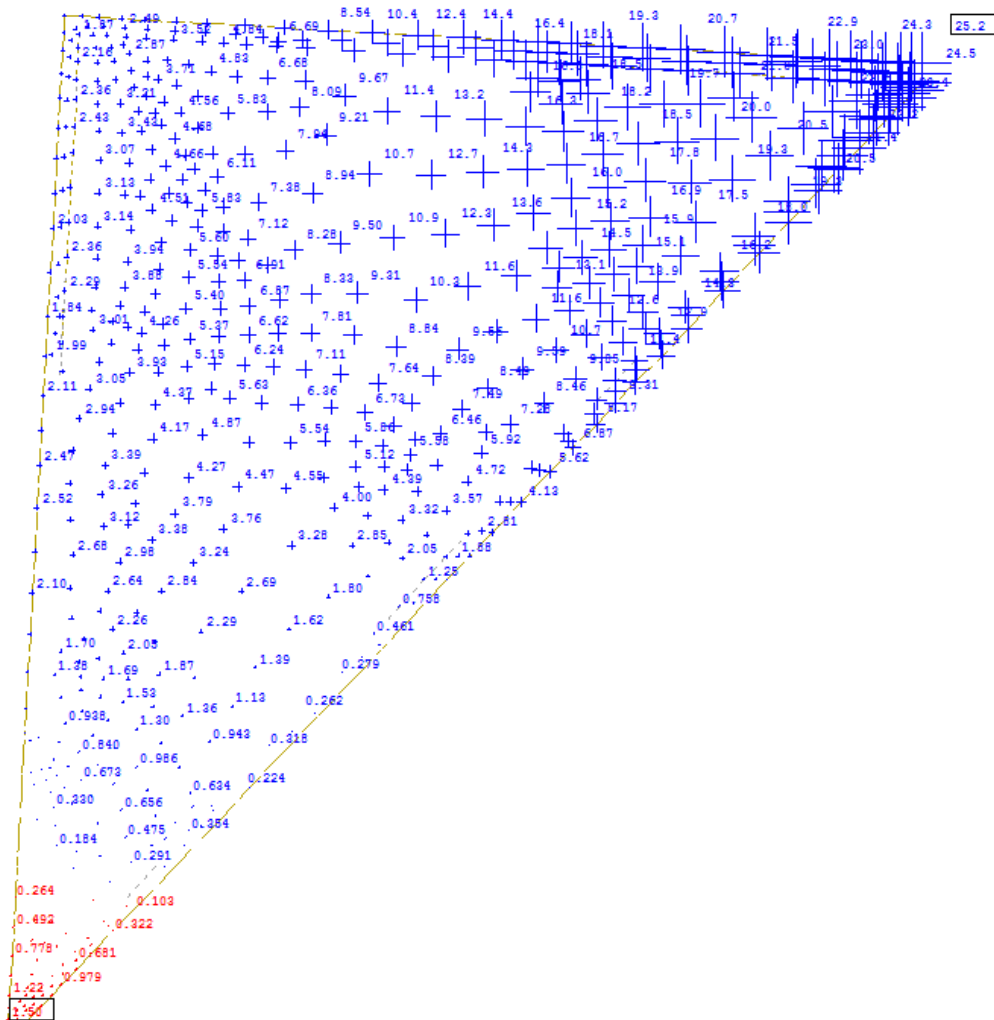


Abbildung 4.34: 3D: Durchbiegung der Decke 4OG

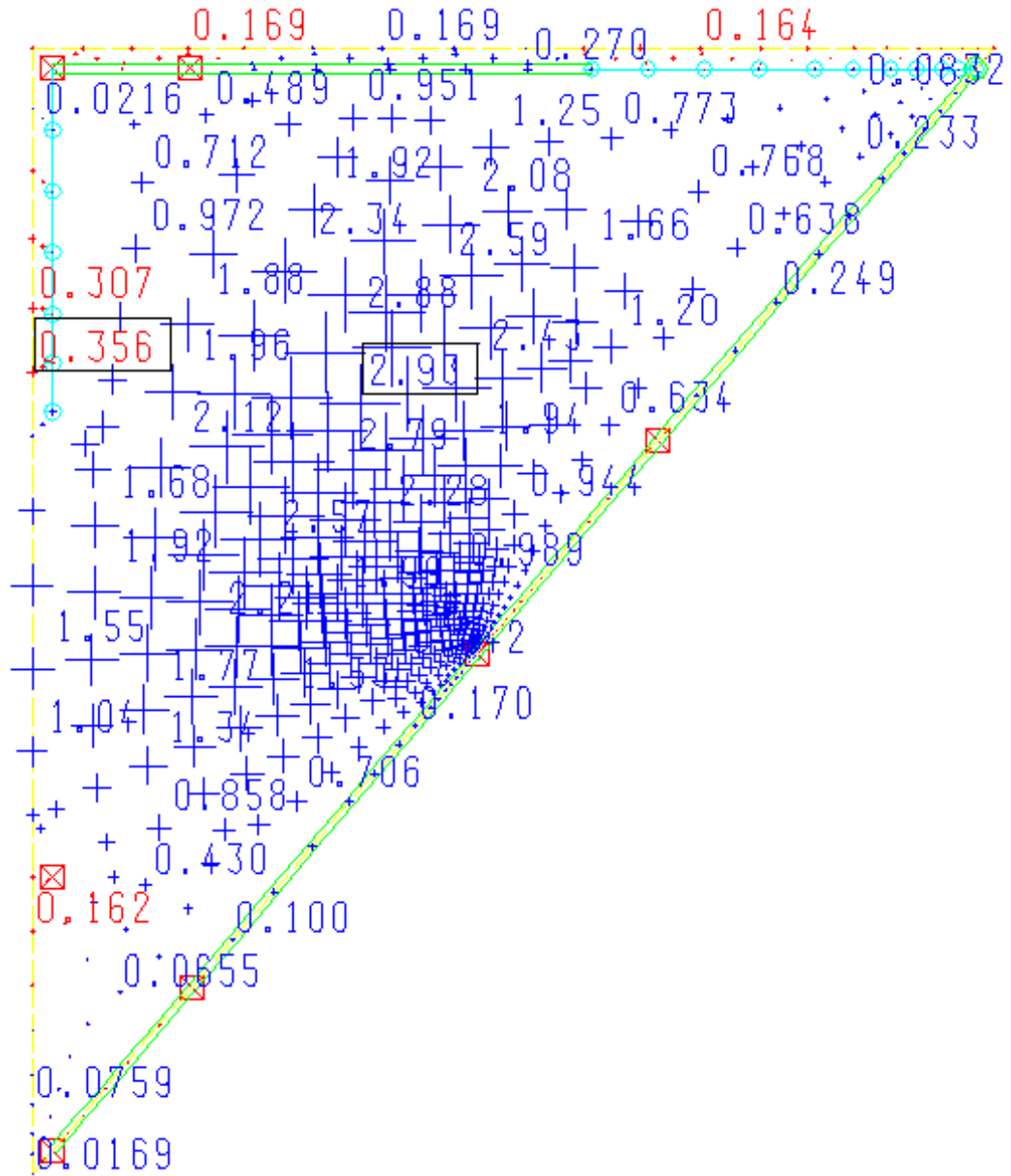


Abbildung 4.35: 2D: Durchbiegung der Decke 4OG

## 5 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde versucht, ein 3D-Modell in ein gleichwertiges 2D-Modell zu überführen. Zunächst wurden die naiven Annahmen einer starren Lagerung angenommen. Diese wichen beim Vergleich mit den 3D-Ergebnissen, die hier als Referenzwerte gelten, zum Teil stark ab. Aus diesem Grund wurden die Lagersteifigkeiten an mehr realistische Werte angepasst. Diese Anpassung musste teilweise iterativ gemacht werden, da das komplexe 3D-Tragverhalten mit vielen gegenseitigen Abhängigkeiten keine sofortige Bestimmung der Steifigkeiten erlaubt hatte.

Wie man an Hand der Ergebnisse feststellen kann, sind obwohl die Steifigkeiten der 2D-Teilsysteme realistisch und dem 3D-Modell entsprechend gewählt wurden, die Abweichungen teilweise immer noch groß.

Es bleibt festzustellen, dass es drei wichtige Punkte bei der Überführung eines 3D-Modells in ein 2D-Modell gibt. Diese sind:

- Steifigkeiten
- Belastung
- Gesamttragverhalten

Bei so einem komplexen System scheint es kaum möglich zu sein, eine komplette Übereinstimmung der Schnittgrößen zu erzielen. Auch nach mehrmaliger Anpassung der Steifigkeiten der Auflager sind die Abweichungen immer noch erheblich. Teilweise weisen die 2D-Systeme nicht nur betragsmäßig andere Werte der Schnittgrößen auf, sondern auch einen etwas abweichenden Lastabtrag. Dies liegt in erster Linie

daran, dass unabhängig von der Steifigkeitswahl immer noch kein 3D-Tragverhalten der Struktur erzeugt werden kann. Zum Beispiel kann zwar die Steifigkeit des Vierendeelträgers abgebildet werden, aber dadurch wird nicht eine schon vorhandene Absenkung von diesem aus anderen Decken mitberücksichtigt.

Eine weitere Ursache für die Ungenauigkeiten an dem 2D-Modell ist die Weiterleitung der Lasten auf die darunterliegende Bauteile. Das ist z.B. bei dem Vierendeelträger und dem Fachwerk der Fall. Hier wurden die Auflager, die aus den besagten Stabwerken gebildet werden, als Punktlager im Bereich der Stützen definiert. Dies ist jedoch nicht ganz korrekt, da auch die Riegel als Auflager dienen. Dadurch wurde das Ergebnis bei der Berechnung der genannten Stabwerke verfälscht, obwohl die Summen der belastenden und resultierenden Kräfte mit dem 3D-Modell übereinstimmen. Andererseits wäre der Aufwand für die Übertragung der Kräfte von einem Teilsystem zum anderen überaus aufwendig. Außerdem gestaltet sich auch die Modellierung der Linienlager der Wandsysteme als sehr aufwendig.

Abschließend kann man feststellen, dass in vielen Fällen das Erzielen gleicher Ergebnisse bei der Zerlegung des Tragwerks in Teilsysteme nicht möglich ist, bzw. nur mit einem unverhältnismäßig großem Aufwand mit vielen iterativen Anpassungen und einem gelegentlichen Abgleich zum 3D-Modell gelingt.

Handelt es sich um ein recht einfaches Tragsystem, so ist die Zerlegung in Teilsysteme durchaus legitim und kann ohne große Genauigkeitsverluste angewendet werden. Dies gilt vor Allem für diejenigen Tragwerke, bei denen der Lastabtrag einzelner Geschoße hinreichend voneinander getrennt ist und eine eindeutige Tragrichtung aufweist, z.B. klassisch nach unten. Bei den Tragwerken, wie sie in dieser Arbeit untersucht wurden, wenn mehrere Geschoße durch einen derartigen Vierendeelträger ausgesteift werden, ist es äußerst schwierig ein entsprechendes Teilsystem zu bilden. Man kann feststellen, dass nur die Tragwerke mit folgenden Eigenschaften sich zur einer Berechnung in Teilsystemen eignen:

- Hinreichende Trennung einzelner Geschoße bzw. derer statischer Systeme voneinander

- Klarer hierarchischer Lastabtrag in eine Richtung (Eigengewichtsrichtung)
- Möglichkeit der sinnvollen Wahl von Steifigkeiten und statischen Systemen



# Abbildungsverzeichnis

1.1	System . . . . .	2
2.1	Ansicht 1 . . . . .	4
2.2	Ansicht 2 . . . . .	5
2.3	Neues Projekt anlegen . . . . .	8
2.4	SSD-Oberfläche . . . . .	9
2.5	Eigenschaften eines Flächenelementes . . . . .	10
2.6	Eingabe in AutoCAD und SOFiPLUS . . . . .	13
2.7	Berechnetes System . . . . .	14
3.1	Das Fachwerk. . . . .	16
3.2	Die Verformungsfigur des Fachwerks. . . . .	17
3.3	Das Gebäude und der Vierendeelträger. . . . .	17
3.4	Das Wandsystem. . . . .	18
3.5	Die Auflagerkräfte des Dachs. . . . .	19
3.6	Das Fachwerk: Berechnung der Federsteifigkeit. . . . .	20
3.7	die 1. Decke: Untersicht, im Kreis ist der Bereich mit dem Wandsystem auf der Platte. . . . .	21
3.8	Die Federkraft im Vierendeelträger wird als Einzellast auf das Fachwerk eingesetzt. . . . .	22
3.9	die 2. Decke: Untersicht, Federn entsprechen den Steifigkeit der Auflager. . . . .	23

3.10	die 1. Decke: hohe Durchbiegung an der Wandstelle. . . . .	23
3.11	die 1. Decke: Verbessertes Modell und seine Durchbiegung. . . . .	24
4.1	3D: Normalkraft im Fachwerk (Stabelemente) . . . . .	26
4.2	3D: Normalkraft im Fachwerk (Seile) . . . . .	26
4.3	2D: Normalkraft im Fachwerk . . . . .	26
4.4	3D: Normalkraft $N$ im Vierendeelträger . . . . .	28
4.5	3D: Querkraft $V_z$ im Vierendeelträger . . . . .	29
4.6	3D: Querkraft $V_y$ im Vierendeelträger . . . . .	29
4.7	3D: Moment $M_y$ im Vierendeelträger . . . . .	30
4.8	3D: Moment $M_z$ im Vierendeelträger . . . . .	30
4.9	2D: Normalkraft $N$ im Vierendeelträger . . . . .	31
4.10	2D: Querkraft $V_z$ im Vierendeelträger . . . . .	31
4.11	2D: Moment $M_y$ im Vierendeelträger . . . . .	31
4.12	3D: Hauptmomente I in der Decke 1OG . . . . .	34
4.13	2D: Hauptmomente I in der Decke 1OG . . . . .	35
4.14	3D: Hauptmomente II in der Decke 1OG . . . . .	36
4.15	2D: Hauptmomente II in der Decke 1OG . . . . .	37
4.16	3D: Durchbiegung der Decke 1OG . . . . .	38
4.17	2D: Durchbiegung der Decke 1OG . . . . .	39
4.18	3D: Hauptmomente I in der Decke 2OG . . . . .	41
4.19	2D: Hauptmomente I in der Decke 2OG . . . . .	42
4.20	3D: Hauptmomente II in der Decke 2OG . . . . .	43
4.21	2D: Hauptmomente II in der Decke 2OG . . . . .	44
4.22	3D: Durchbiegung der Decke 2OG . . . . .	45
4.23	2D: Durchbiegung der Decke 2OG . . . . .	46
4.24	3D: Hauptmomente I in der Decke 3OG . . . . .	48
4.25	2D: Hauptmomente I in der Decke 3OG . . . . .	49
4.26	3D: Hauptmomente II in der Decke 3OG . . . . .	50
4.27	2D: Hauptmomente II in der Decke 3OG . . . . .	51

4.28	3D: Durchbiegung der Decke 3OG . . . . .	52
4.29	2D: Durchbiegung der Decke 3OG . . . . .	53
4.30	3D: Hauptmomente I in der Decke 4OG . . . . .	55
4.31	2D: Hauptmomente I in der Decke 4OG . . . . .	56
4.32	3D: Hauptmomente II in der Decke 4OG . . . . .	57
4.33	2D: Hauptmomente II in der Decke 4OG . . . . .	58
4.34	3D: Durchbiegung der Decke 4OG . . . . .	59
4.35	2D: Durchbiegung der Decke 4OG . . . . .	60



# Literaturverzeichnis

- [1] Hartmann, F., Katz, C. (2007): *Structural Anylysis with Finite Elements*, Springer-Verlag, 2nd Edition
- [2] Schneider, K.-J. (2006): *Bautabellen für Ingenieure*, Werner Verlag, 17. Auflage
- [3] Mitschriften der Vorlesung *Statik III*, WS 2007/2008, Prof. Dr.-Ing. F. Hartmann, Universität Kassel, Fachbereich 14, Fachgebiet Baustatik
- [4] Mitschriften der Vorlesung *Mathematischen Grundlagen der Statik*, SS 2008, Prof. Dr.-Ing. F. Hartmann, Universität Kassel, Fachbereich 14, Fachgebiet Baustatik
- [5] Mitschriften der Vorlesung *Flächentragwerke I*, SS 2008, Prof. Dr.-Ing. F. Hartmann, Universität Kassel, Fachbereich 14, Fachgebiet Baustatik
- [6] Franke, W., Kunow, T. (2007): *Kleines Einmaleins der Baustatik*, Kassel University Press