

Technische Universität Hamburg



Bau- und Umweltingenieurwesen

Institut für Metall- und Verbundbau

Bachelorarbeit

# Entwurf und Bemessung einer Flugzeughalle mit Bogentragwerk

von

Ditmar Toci

Matr.-Nr.: 21866146

Betreuer:

Prof. Dr.-Ing. habil. Marcus Rutner

Dr.-Ing. Nikolay Lalkovski

# Aufgabenstellung

Die Redwings GmbH, ein dynamisches und schnell wachsendes Luftfahrtunternehmen, konnte im Jahr 2022 beeindruckende Umsätze verzeichnen und setzt seinen Expansionskurs fort. Diese Expansion umfasst nicht nur finanzielles Wachstum, sondern auch die geografische Ausweitung unserer Geschäftstätigkeiten. Ein bedeutender Schritt in dieser Hinsicht ist die geplante Errichtung eines neuen Flugzeughangars am Hamburger Flughafen. Für die Realisierung dieses Vorhabens hat Redwings GmbH unser Team ins Boot geholt.

Im Zuge mehrerer konstruktiver Gespräche und Abstimmungsrunden haben wir ein gemeinsames Verständnis für das Design des Flugzeughangars entwickelt. Inspiriert durch die in Abbildung 1 vorgestellten Entwürfe, soll der Hangar nach den spezifischen Vorgaben der Redwings GmbH realisiert werden. Die Feinabstimmung der Maße erfolgt in der Entwurfsphase, insbesondere bei der Gestaltung des Bogenträgers und weiteren Optimierungsprozessen.

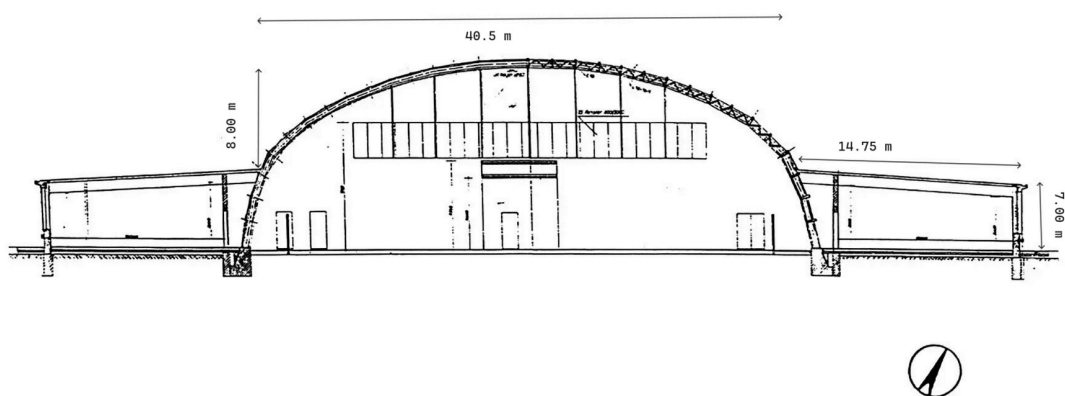


Abbildung 1: Referenzbild Flugzeughangar [2]

## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Ditmar Toci, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Hamburg, den

---

Datum

---

Unterschrift

# Kurzfassung

## Kurzfassung

In dieser Arbeit werden die wesentlichen Schritte für den Entwurf und die Auswahl geeigneter Bauteile für einen Flugzeughangar erläutert. Ein Teil der Abmessungen des Flugzeughangars ist bereits vorgegeben, weitere werden im Zuge der Entwurfsplanung ermittelt.

Mit Hilfe der graphischen Statik und des Computerprogramms Dlubal Rfem wird die geeignete Form gefunden und iterativ verbessert. Weiterhin werden die Schnittgrößen programmgestützt berechnet. Mit diesen Schnittgrößen und den Lagerungsbedingungen werden die maßgebenden Nachweise geführt. Diese dienen zum Nachweis der Tragsicherheit des Hangars. Bei diesem Entwurf sind die tragenden Elemente überwiegend gelenkig miteinander verbunden. Für diese Lagerungsbedingungen ist der Standsicherheitsnachweis maßgebend.

Für den Wandverband und Bogen wurde die Standsicherheit mit der Theorie II. Ordnung und der maßgebenden Knickfigur nachgewiesen. Die Berechnungen beziehen sich im Wesentlichen auf die Stabstatik. Die Anschlussstatik, die Gründung und andere Punkte, die zur Vervollständigung des Projektes notwendig sind, sind nicht Bestandteil dieser Arbeit.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Aufgabenstellung</b>	<b>I</b>
<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>II</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VIII</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1 Formfindung . . . . .	3
2.1.1 Die grafische Statik . . . . .	5
2.2 Entwurfsfindung . . . . .	7
<b>3 Entwurf und Lastermittlung</b>	<b>10</b>
3.1 Entwurfsvervollständigung . . . . .	10
3.1.1 Iterative Methode der Bogenträgeroptimierung . . . . .	11
3.2 Lastermittlung . . . . .	14
3.2.1 Windlasten . . . . .	14
3.2.2 Schneelasten . . . . .	17
3.2.3 Eigenlasten . . . . .	18
3.2.4 Lastkombinationen . . . . .	19
<b>4 Bemessung</b>	<b>22</b>
4.1 Bemessung . . . . .	22
4.1.1 Bemessung der Bogenträger . . . . .	22
4.1.2 Bemessung der Pfetten und Koppelstäbe . . . . .	29
4.1.3 Bemessung des Dachverbandes . . . . .	36
4.1.4 Bemessung des Wandverbandes . . . . .	39
4.1.5 Bemessung der seitlichen Bauteile . . . . .	40

<b>5</b>	<b>Exkurs</b>	<b>47</b>
5.1	Das Fundament . . . . .	47
5.2	Anschlüsse . . . . .	48
5.3	Brandschutz . . . . .	49
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>Ausblick</b>	<b>53</b>
7.1	Zwischenbogen . . . . .	53
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>59</b>

# Abbildungsverzeichnis

1	Referenzbild Flugzeughangar [2] . . . . .	I
2.1	Darstellung der Kettenlinie am Beispiel einer freihängenden Kette . . . . .	3
2.2	Darstellung $e^x$ . . . . .	4
2.3	Darstellung $e^{-x}$ . . . . .	4
2.4	Darstellung $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$ . . . . .	5
2.5	Kraft Polygon . . . . .	6
2.6	Kraft Polygon [1] . . . . .	6
2.7	Getreter Bogen . . . . .	7
2.8	Modifizierter Kraftpolygon . . . . .	7
2.9	Beispiel eines statischen Systems eines Bogenträgers . . . . .	8
2.10	Projiziertes Beispielsystem . . . . .	8
2.11	Bogenträgerfreischnitt . . . . .	9
2.12	Erster Kraftpolygon . . . . .	9
3.1	Erster entworfener Bogen . . . . .	10
3.2	Beschriftungshilfe nach [1] . . . . .	11
3.3	Erste Iteration Kraftpolygon . . . . .	12
3.4	Erste Iteration Bogen . . . . .	12
3.5	Endgültiger Bogen . . . . .	13
3.6	Model RFEM Flugzeughalle . . . . .	13
3.7	Windzonenkarte mit zug. Basisgeschwindigkeiten $v_{b,0}$ und Basisgeschwindigkeits- drücken $q_{b,0}$ und Geländerkategorien [7] . . . . .	14
3.8	Windeinwirkung auf den gekrümmten Teil des Daches . . . . .	15
3.9	Landkarte und Lastanordnung von Schneelasten bei Tonnendächern . . . . .	17
3.10	Schneelasten bei Höhenversprung [10] . . . . .	17
3.11	Schnitt Dachdeckung . . . . .	19
4.1	Skizze des statischen Systems . . . . .	22
4.2	Knickfigur Bogen [9] . . . . .	23
4.3	$M_y$ ; $N$ ; $V_z$ Schnittgrößen vom Bogenträger . . . . .	24
4.4	Maßgebende Knickfigur Nr.9 Bogenträger bei LK.18 . . . . .	25
4.5	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ , $V_z$ vom Stab 261 bei LK.16 . . . . .	26

4.6	Knicklängen nach Randbedingungen [3] . . . . .	27
4.7	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 234 bei LK.18 . . . . .	28
4.8	Positionen und Schnitt . . . . .	29
4.9	Schnittgrößen $M_y$ , $M_z$ , $N$ vom Stab 401 bei LK.18 . . . . .	29
4.10	Schnittgrößen $M_y$ , $M_z$ , $N$ vom Stab 347 bei LK.5 . . . . .	30
4.11	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 482 bei LK.18 . . . . .	32
4.12	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 483 bei LK.20 . . . . .	32
4.13	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 474 bei LK.18 . . . . .	34
4.14	RFEM Modell modifizierter Dachverband . . . . .	36
4.15	Normalkraft $N$ vom Stab 575 bei LK.18 . . . . .	37
4.16	Normalkraft $N$ vom Stab 605 und 606 bei LK.2 . . . . .	38
4.17	Schnittgrößen $N$ vom Stab 569 bei LK.6 . . . . .	39
4.18	Verschiebung der Anbindungspunkt vom Seitlichen Bauteil zum Bogen. (Links) mit Einbau der Stütze; (Rechts) Ohne Einbau der Stütze. . . . .	40
4.19	Schnittgrößen $N$ vom Stab 250 bei LK.5 . . . . .	41
4.20	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 214 bei LK.2 . . . . .	41
4.21	Schnittgrößen $N$ vom Stab 404 bei LK.6 . . . . .	43
4.22	Schnittgrößen $M_y$ vom Stab 384 und 378 bei LK.18 . . . . .	43
4.23	Schnittgrößen $M_y$ , $N$ vom Stab 415 bei LK.18 . . . . .	44
4.24	Schnittgrößen $N$ vom Stab 505 bei LK.7 . . . . .	46
5.1	Streifenfundament das in Richtung des Bogens geneigt ist. [1] . . . . .	47
5.2	Das Fundament mit dem Zugglied [1] . . . . .	48
5.3	Beispielanschluss [4] . . . . .	48
5.4	Anschluss Fundament . . . . .	49
5.5	Anschluss der Koppelstäbe an die Pfette . . . . .	49
7.1	Trägeranschluss mit Langlöchern . . . . .	53
7.2	Trägeranschluss mittels Pendelstab . . . . .	54
7.3	Normalkraft bei den Zwischenbogenträgern vor dem Einbau der Normalkraftgelenke	54
7.4	Normalkraft bei den Zwischenbogenträgern nach dem Einbau der Normalkraftgelenke	54
7.5	Halle mit geändertem Dachverbandbau . . . . .	57
7.6	Schnittgrößen $N_{Ed}$ , $M_{y,Ed}$ der Pfetten bei unterschiedlichen Dachverbandanordnungen	57

## Tabellenverzeichnis

3.1	Windlasten inkl. Flachdach . . . . .	16
3.2	Windlasten gekrümmtes Dach . . . . .	16
3.3	Dachdeckung Eigengewicht . . . . .	19
3.4	Lastfälle . . . . .	21
4.1	Vorkrümmung $\frac{e_0}{L_B}$ [8] . . . . .	23
4.2	Angaben zum Querschnitt <b>RHS 500x300x16</b> . . . . .	25
4.3	Angaben zum Querschnitt <b>HEA 280</b> . . . . .	30
4.4	Angaben zum Querschnitt <b>HEA 200</b> . . . . .	34
4.5	Angaben zum Querschnitt <b>CHS 219.1x16</b> . . . . .	37
4.6	Angaben zum Querschnitt <b>HEA 260</b> . . . . .	40
4.7	Angaben zum Querschnitt <b>IPE 600</b> . . . . .	42
4.8	Angaben zum Querschnitt <b>HEA 240</b> . . . . .	46

## Formelzeichen

$A$	Fläche
$A_{i,j}$	Fläche vom i-Objekt mit j-Attribute
$A_v$	wirksame Schubfläche
$b$	Breite
$c$	Drehradius eines Querschnitts
$C_{i,j}$	Momentenbeiwert $_{my, mz}$ oder $_{mLT}$
$d$	Höhe des geraden Stegteils
$E$	Elastizitätsmodul
$f_y$	Charakteristische Stahzugfestigkeit
$g_k$	Eigenlast (Streckenlast) charakteristisch
$h$	Höhe
$I$	Flächenträgheit
$I_w$	Wölbfächenmoment
$I_t$	Venansche Torsionssteifigkeit
$k_{ij}$	Interaktionsbeiwert $_{yy, yz, zy}$ oder $_{zz}$
$l_{i,j}$	Länge vom i-Objekt mit j-Attribute
$l_0$	Knicklänge
$M_{cr}$	Biegedrillknickmoment
$M_{b,Rd}$	Momententragfähigkeit unter Berücksichtigung des Biegedrillknickens
$M_{y,oder,z}$	Moment um die y- oder z-Achse
$m_y$	Ausnutzung vom Moment beim Biegedrillknicknachweis

---

$n$	Anzahl
$n_{z,oder,y}$	Ausnutzung vom Normalkraft beim Stabilitätsnachweis
$N$	Normalkraft
$N_{cr}$	ideale Verzweigungslast für den maßgebenden Knickfall
$N_{b,Rd}$	Normalkrafttragfähigkeit unter Berücksichtigung des maßgebenden Knickfalls
$q_{i,j}$	Nutzlast (Streckenlast) vom i-Objekt mit j-Attribute
$S$	statisches Moment
$s_k$	charakteristische Schneelast
$t$	Dicke
$s_{Ad}$	außergewöhnliche Schneelast
$V_{Ed}$	bemessungs Querkraft
$V_{Rd}$	Querkraftwiderstand
$W$	Widerstandmoment
$z_p$	Abstand des Angriffpunktes der Belastung vom Schwerpunkt
$\alpha$	Winkel in Grad
$\beta$	Winkel in Grad
$\gamma_i$	Wichte vom i-te Material
$\gamma_j$	Teilsicherheitsbeiwert (j= G,A oder Q)
$\sigma_i$	Spannung vom i-te Objekt
$\sigma_v$	Vergleichsspannung
$\tau$	Schubspannung
$\zeta$	Momentenbeiwert
$\bar{\lambda}$	Schankheitsgrad
$\bar{\lambda}_{LT}$	Schankheitsgrad für Biegedrillknicken
$\chi$	Abminderungsbeiwert nach der maßgebenden Knicklinie
$\Psi$	Kombinationsbeiwert
$\rho_i$	Dichte vom i-te Material

---

# 1 Einleitung

In der pulsierenden Weltmetropole Hamburg, die als "Tor zur Welt" gilt und vor allem für ihren beeindruckenden Hafen bekannt ist, spielt auch der Luftverkehr eine immer größere Rolle. Obwohl der Flughafen nur einen Bruchteil der Größe des Hamburger Hafens ausmacht, verzeichnet Hamburg Jahr für Jahr einen Anstieg im Luftverkehrsaufkommen. Dies hat das Interesse der Redwings GmbH geweckt, einem etablierten Luftfahrtunternehmen mit bereits bestehenden Standorten in München und Frankfurt. Um ihre Präsenz in Deutschland zu vervollständigen und nun auch den Norden zu erschließen, plant die Redwings GmbH den Bau eines innovativen Flugzeughangars am Hamburger Flughafen. Dieser soll durch ein elegantes Bogentragwerk gekennzeichnet sein und durch zwei seitliche Anbauten ergänzt werden, was die langjährige Erfahrung und spezifischen Anforderungen des Unternehmens widerspiegelt.

In einem Zeitalter, in dem die Anforderungen an Funktionalität, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit im Bauwesen stetig steigen, stellt die Entwicklung effizienter Tragwerkslösungen für Großbauten eine signifikante ingenieurtechnische Herausforderung dar. Die vorliegende Bachelorarbeit widmet sich dem Entwurf und der Bemessung der von der Redwings GmbH beauftragten Flugzeughalle. Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit ist die Anwendung der grafischen Statik. Diese Methode ist nicht nur für das grundlegende Verständnis der Kräfteverteilung innerhalb des Tragwerks entscheidend, sondern auch für die Optimierung der Struktur hinsichtlich Materialaufwand und -effizienz. Durch eine multidisziplinäre Herangehensweise, die theoretische Grundlagen mit anwendungsbezogenen Kriterien vereint, bietet diese Arbeit eine umfassende Analyse und Bewertung des Bogentragwerks für den spezifischen Einsatz in Flugzeughallen.

Für den Entwurf und die Bemessung der Flugzeughalle mit Bogentragwerk wird das Computerprogramm Dlubal RFEM 6.05 verwendet. Dlubal RFEM ist eine Software für die Berechnung und Bemessung von Tragwerken im Bauingenieurwesen. Mit RFEM können Anwender Strukturen, Materialien und Lasten für eine breite Palette von Baukonstruktionen wie Gebäude, Brücken, Dächer und vieles mehr modellieren. Die Software unterstützt eine Vielzahl von Materialien, einschließlich Beton, Stahl, Holz, Glas und Aluminium. RFEM bietet eine intuitive Benutzeroberfläche und ermöglicht Ingenieuren die Analyse komplexer Strukturen mittels finiter Elemente. Dadurch können detaillierte Einblicke in Spannungen, Verformungen und andere wichtige technische Größen gewonnen werden. Hierfür werden der graphische Teil für den Entwurf des Bogens und die weiteren Verfeinerungsschritte verwendet. In RFEM wird der geplante Flugzeughangar in 3D modelliert und



in der gewünschten Weise mit Linienlasten belastet.

Ein Großteil der erforderlichen Daten wurde bereits durch den Bauherrn bereitgestellt, einschließlich der Baugenehmigungen und der Lage des Baugeländes am Flughafen Hamburg. Die Bogenhöhe über den seitlichen Bauteilen beträgt  $8m$ , während die Gesamthöhe über der Geländeoberkante  $15m$  beträgt. Die Breite des Bogens ist in Abbildung 1 mit  $40,5m$  gegeben, während die Entfernung der unteren Stützen zueinander in späteren Schritten errechnet wird. Die seitlichen Bauteile sind jeweils  $14,75m$  breit und  $7m$  hoch. Aus den geographischen Angaben wurde eine Höhe von  $16m$  über dem Meeresspiegel ermittelt.

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich ausschließlich auf den Entwurf und die Bemessung der tragenden Elemente. Themen wie Verbindungen, Fundamentberechnungen und Brandschutz werden zwar kurz angesprochen und allgemeine Lösungsansätze aufgezeigt, jedoch nicht detailliert behandelt.

Die Darstellung der Berechnungs- und Entwurfsschritte erfolgt mit dem Ziel, diese so verständlich und einfach wie möglich zu halten, wobei eine Genauigkeit von bis zu drei Nachkommastellen angestrebt und bei der Lastermittlung stets auf der sicheren Seite gerundet wird.

Die herangezogenen Quellen und Referenzen sind im Text kenntlich gemacht und tragen zur fundierten Basis dieser Arbeit bei.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Formfindung

Die Gestaltung von Bogenträgern ist entscheidend für die Belastbarkeit des Konstrukts. Ziel ist es, eine Bogenform zu ermitteln, die das System unter Vertikallasten ausschließlich durch axiale Druckkräfte belastet. Die Symmetrie des Systems erleichtert dabei die Suche nach der optimalen Bogenform erheblich.

Ähnlich wie beeindruckende Bauwerke, zum Beispiel der Petersdom im Vatikan, ein Meisterwerk von Giacomo della Porta [14], halten sich auch Konstruktionen an die Gesetzmäßigkeiten der Natur. Diese Bauformen optimieren die Verteilung potenzieller Energie, um ein Minimum zu erreichen. Ein prägnantes Beispiel dafür ist ein hängendes Seil oder, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, eine hängende Kette. Durch das Anhalten beider gelb markierter Endpunkte der Kette auf der gleichen Höhe wird deren Form deutlicher ersichtlich. Obwohl diese Form einer Parabel ähnelt, entspricht sie keiner. Die Form der Kette lässt sich mathematisch durch die Funktion  $\cosh(x)$  beschreiben. Die Erläuterung dieser Funktion ist von Bedeutung, da sie ein zentraler Bestandteil der Theorie der Kettenlinien ist, wobei eine detaillierte Ableitung der Kettenlinienfunktion für das Verständnis nachfolgender Abschnitte nicht unbedingt erforderlich ist.



Abbildung 2.1: Darstellung der Kettenlinie am Beispiel einer freihängenden Kette

Zur Herleitung der Kettenlinie wird die die Exponentialfunktion  $e^x$  herangezogen. Die Taylor Entwicklung der Exponentialfunktion  $e^x$  sieht wie folgt in 2.1 aus:

$$e^x \approx 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} + \dots + \frac{x^n}{n!} \approx \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} \quad (2.1)$$

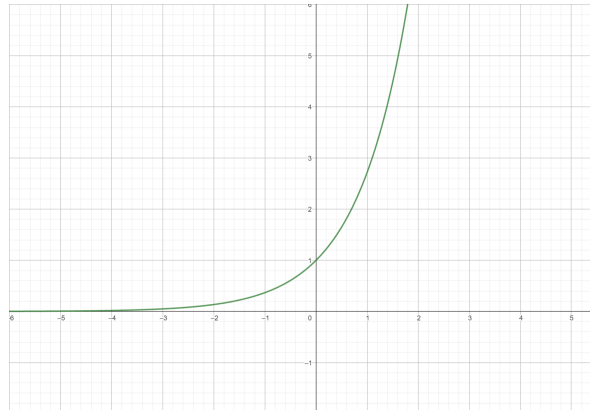


Abbildung 2.2: Darstellung  $e^x$

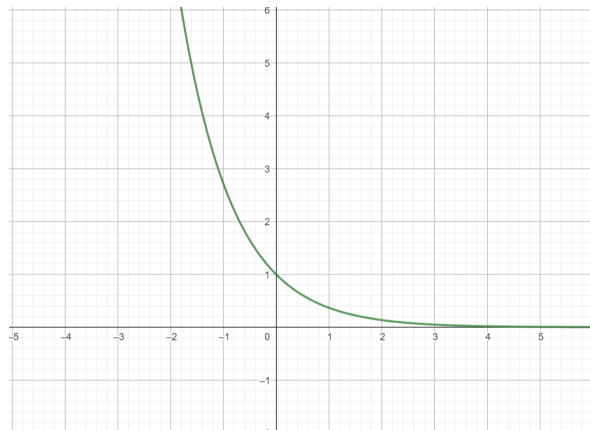


Abbildung 2.3: Darstellung  $e^{-x}$

Die symmetrische Darstellung der Exponentialfunktion auf der Y-Achse ist unten in 2.2 abgebildet.

$$e^{-x} \approx 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^4}{4!} - \dots + \frac{(-x)^n}{n!} \approx \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n!} \quad (2.2)$$

Um  $\cosh(x)$  zu erhalten, genügt es, die geraden Terme der Taylorentwicklung der Exponentialfunktion zu berücksichtigen. Dazu werden die Funktionen  $e^x$  und  $e^{-x}$ , die auf der Y-Achse symmetrisch sind, addiert und das Ergebnis durch zwei geteilt. Die mathematischen Schritte sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

$$\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (2.3)$$

Obwohl mit der Kettenformel sehr genaue und passende Formen gefunden werden können, ist der

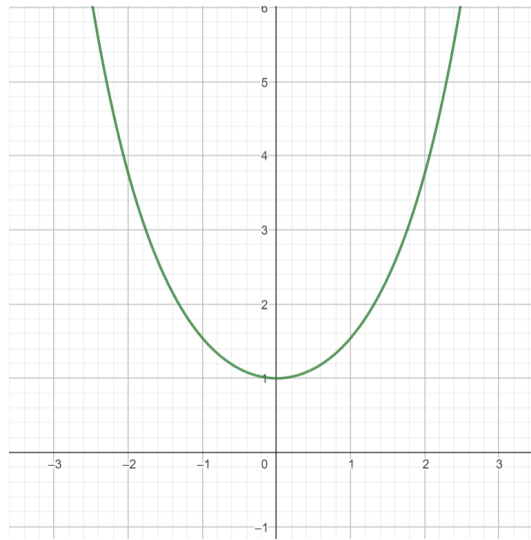


Abbildung 2.4: Darstellung  $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

damit verbundene Aufwand einfach zu hoch und zeitintensiv. Im Folgenden werden weitere Lösungsansätze zur Findung einer geeigneten Form präsentiert.

### 2.1.1 Die grafische Statik

Die statische Analyse, ein entscheidender Schritt im Entwurfsprozess, kann entweder durch numerische Berechnungen oder grafische Methoden erfolgen. Insbesondere für den Entwurf von Bogenträgern erweist sich die grafische Statik als wertvolles Instrument. Diese Methode zeichnet sich durch ihre Vielseitigkeit und Präzision aus und ermöglicht es, einen umfassenden Überblick zu behalten, ohne sich in komplexen Details zu verlieren. Um die geeignete Bogenform zu ermitteln und neue Konzepte zu erfassen, sind fundierte Kenntnisse über Vektoren und deren Eigenschaften unerlässlich.

Das Ziel besteht darin, Reaktionskräfte für bekannte Einzellasten zu bestimmen, die an festgelegten, äquidistanten Punkten wirken und die vorgegebene Form ergänzen. Die Dimensionen der Form, wie Tiefe oder Höhe, sowie die Position der Endpunkte, die den Abschluss der Form bilden, lassen sich aus dem Kraftpolygon ableiten. Die wirkenden Kräfte werden vektoriell dargestellt und in die Kraftlinie integriert, wobei die Länge des Kraftvektors die Intensität der Kraft symbolisiert.

Um ein tieferes Verständnis für den Entwurf von Bögen und die damit verbundenen Schritte zu fördern, ist es essenziell, sich mit einigen grundlegenden Definitionen vertraut zu machen, wie dem Kraftpolygon, der Kraftlinie, Strahlen und dem Pol. Diese Elemente sind entscheidend für die Analyse und Gestaltung von tragenden Strukturen.

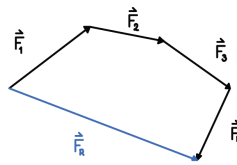


Abbildung 2.5: Kraft Polygon

**Das Kraftpolygon** wird in den Abbildungen 2.5 und 2.6 dargestellt und verdeutlicht Richtung sowie Größe der Kräfte in einem Stabsystem, das einer spezifischen Belastung und einer festgelegten Anzahl von Stützpunkten ausgesetzt ist. Es bietet eine visuelle Repräsentation der Kräfteverhältnisse.

**Die Kraftlinie** spiegelt die Gesamtbelastung wider, die auf das System einwirkt. Im Kontext des Bogendesigns ist die Kraftlinie vertikal ausgerichtet, entsprechend der Auslegung des Systems für vertikale Lasten. Diese Linie hilft bei der Visualisierung der Belastungsverteilung und ist fundamental für das Verständnis der Kraftflüsse innerhalb der Struktur.

**Der Strahl** definiert die notwendige Reaktionskraft in Bezug auf Länge/Betrag und Richtung, die erforderlich ist, um den vertikalen Lasten entgegenzuwirken. Er veranschaulicht, wie die Konstruktion gestaltet sein muss, um effektiv Kräfte aufzunehmen und an die Fundamente weiterzuleiten.

**Der Pol** markiert den Schnittpunkt der Strahlen und hat eine ausschlaggebende Bedeutung für die Form des Bogens. Die horizontale Entfernung des Pols von der Kraftlinie bestimmt, wie flach oder gewölbt der Bogen ausfällt. Die vertikale Position des Pols in Relation zur Kraftlinie gibt Aufschluss über die Bodenhebung auf einer Seite. Ein zentral positionierter Pol signalisiert eine ausgewogene Bodenhebung, was zu einem symmetrischen Bogen führt.

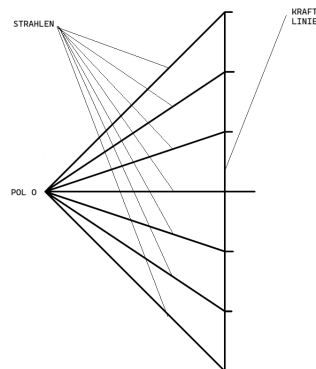


Abbildung 2.6: Kraft Polygon [1]

Durch das Verständnis dieser Konzepte kann der Entwurfsprozess für Bögen effizienter und zielgerichteter gestaltet werden, indem sie eine klare Orientierung für die Ausrichtung und Dimensionierung der tragenden Elemente bieten.

## 2.2 Entwurfsfindung

Im vorliegenden Fall wird der obere Bogen separat betrachtet, um das Problem zu vereinfachen. Es ist bekannt, dass der Bogen eine Höhe von  $8,00\text{m}$  und eine Spannweite von  $40,50\text{m}$  aufweisen soll. Die Vertikallasten, wie Eigengewicht und Schneelast werden über die Pfetten abgetragen und als Ein-

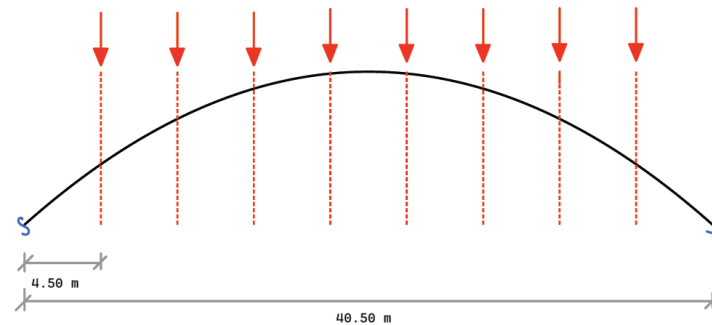


Abbildung 2.7: Getrennter Bogen

zellasten in den Bogen eingeleitet. Der horizontale Abstand der Pfetten beträgt  $4,50\text{m}$ , was einem Neuntel der gesamten Bogenbreite und der Spannweite einiger Trapezprofile entspricht. Der Bogen-träger wird in neun Teile unterteilt und mit  $9 - 1 = 8$  Einzellasten belastet. Jede Einzellast beträgt 1. Die Verwendung von Einheitslasten bietet den Vorteil, dass alle Lasten auf das System aufgebracht werden können, ohne sie vorher berechnen zu müssen. Zunächst wird die Symmetrie ausgenutzt und die Aufmerksamkeit erstmal nur auf die linke Seite des Bogens gebracht. Das heißt, dass der untere Teil des Kraftpolygons [1] wie in Abbildung 2.8 aufgebaut ist.

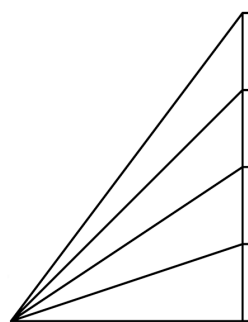


Abbildung 2.8: Modifizierter Kraftpolygon

Die Strahlen des Kraftpolygons entsprechen der Neigung, indem die einzelnen Bogenstäbe zusammengeführt werden müssen, damit der Bogenträger auf die vertikalen Lasten ausschließlich als Drucknormalkräfte reagiert.

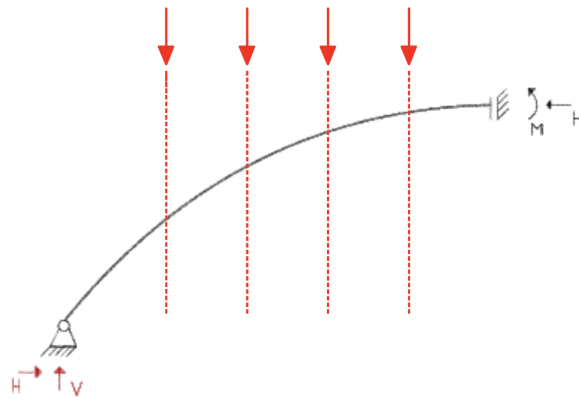


Abbildung 2.9: Beispiel eines statischen Systems eines Bogenträgers

Diese Bedingung führt dazu, dass mit dem Freischneiden begonnen werden kann. In Abbildung 2.9 ist dieser Vorgang dargestellt. Dabei sind die Reaktionskräfte eingetragen und somit der erste Schritt geschafft. Darauf folgt die Vereinfachung des Systems. Zusammen mit den vertikalen Lasten und dem System des Bogens werden sie auf die horizontale Ebene projiziert. Die Darstellung folgt in Abbildung 2.10. Dadurch wird der Bogenträger zu einem Einfeldträger vereinfacht. Das wird für das Polfinden nötig sein.

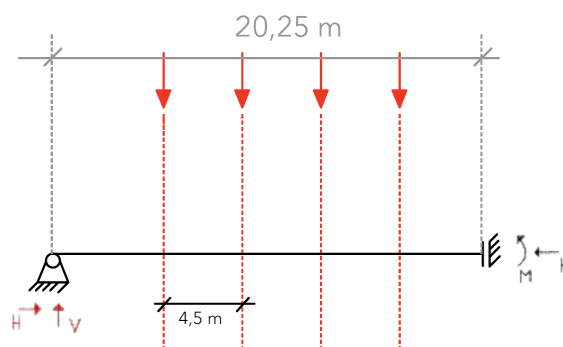


Abbildung 2.10: Projiziertes Beispielsystem

Es folgt mit dem in Abbildung 2.10 dargestellten System ein Momentengleichgewicht  $M_{Schnitt}$ .

$$M_{Schnitt} = 1 \cdot 4,5m + 1 \cdot 9,0m + 1 \cdot 13,5m + 1 \cdot 18,0m = 45m \quad (2.4)$$

Der sich ergebende Momentenbetrag wird für die Ermittlung der horizontalen Kraft in dem in Abbildung 2.9 dargestellten System genutzt. Obwohl sich in dem System durch die Symmetriebedingungen der Schnitt nur durch ein vertikal verschiebbares Festlager abbilden lässt, sagt jedoch eine zusätzliche Bedingung, dass der Bogen von symmetrischen vertikalen Lasten nur axial in Form von Druck beansprucht wird. Somit ist  $M_{Schnitt} = 0$  und das System sieht wie in Abbildung 2.11 aus.

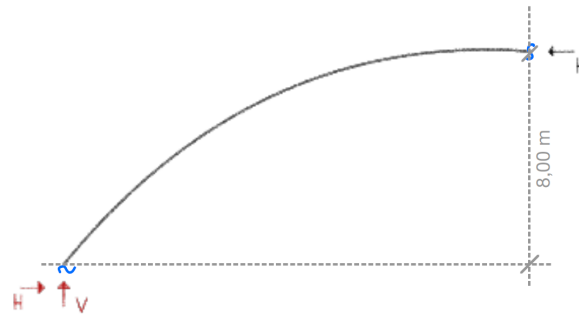


Abbildung 2.11: Bogenträgerfreischnitt

Im nächsten Schritt wird erneut ein Momentengleichgewicht durchgeführt, um die horizontale Last zu ermitteln. Diese ergibt sich durch die Division des Moments in 2.4 mit der Höhe von 8m.

$$H = \frac{45m}{8m} = 5,625 \quad (2.5)$$

Der Betrag in 2.5 entspricht der Länge des horizontalen Strahls in dem Kraftpolygon und somit auch dem Pol Ort, wo sich die Strahlen schneiden.

Werden die eben gefundene Angaben in RFEM eingezeichnet, ergibt sich das in Abbildung 2.12 dargestellte Kraftpolygon. Die Kraft mit dem Betrag 2,140 in der Kraftlinie lässt sich durch folgende

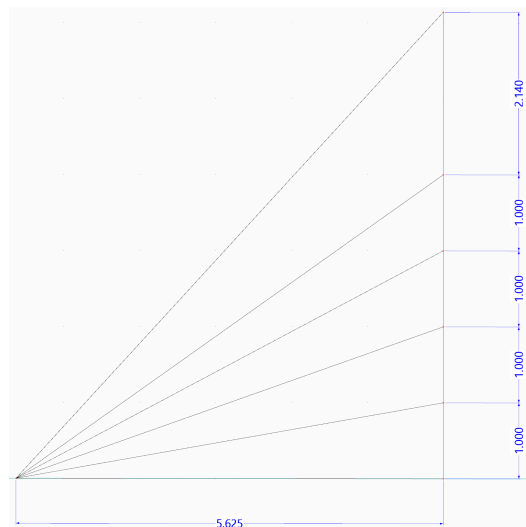


Abbildung 2.12: Erster Kraftpolygon

Begründung erklären. Da der obere Teil des Bogens mit den Pfetten in gleichen horizontalen Abständen betrachtet wurde, wurde eine Einheitskraft von 1 gewählt. Diese Verhältnisse ändern sich, sobald der Bogen auf das seitliche Bauteil trifft. In diesem Fall wird eine Hälfte der vertikalen Lasten von der Außenstütze des seitlichen Bauteils und die andere Hälfte vom Bogen aufgenommen. Das Verhältnis ergibt sich zu  $F_{neu} = \frac{\frac{14,75m}{2} + \frac{4,5m}{2}}{4,5m} \cdot 1 \approx 2,140$ , was in einer größeren Kraft resultiert.



## 3 Entwurf und Lastermittlung

### 3.1 Entwurfsvervollständigung

Nach der Fertigstellung des Entwurfs des Kraftpolygons sind mehrere entscheidende Schritte notwendig, um den Bogen präzise zu konstruieren. Die Konstruktion wird primär in der XZ-Ebene durchgeführt. In einem initialen Schritt wird innerhalb des RFEM-Programms eine vertikale Linie gezeichnet, die eine Länge von  $8m$  aufweist und sich in einem Abstand von  $\frac{4,5}{2}m$  vom Ursprung in X-Richtung befindet. Darauf folgend werden vier zusätzliche, parallele Linien in einem Intervall von  $4,5m$  eingefügt. Es ist dabei zu beachten, dass der untere Verbindungspunkt dieser Linien eine Höhe von  $7m$  aufweisen soll, was der Z-Koordinate gleichkommt.

Im abschließenden Schritt ist es von Bedeutung, dass die Strahlen des Kraftpolygons präzise entlang der vertikalen Linien ausgerichtet werden. An den Kreuzungspunkten dieser Strahlen mit den Linien wird jeweils der darauf folgende Strahl positioniert. Der letzte Strahl schneidet die Grundebene, an dem Punkt, an dem die Z-Koordinate den Wert Null annimmt.

Zum Abschluss wird das entworfene Konstrukt an der YZ-Ebene gespiegelt, um die vollständige Darstellung des Bogens zu realisieren. Da das Eigengewicht entlang der Bogenlänge wirkt, haben die

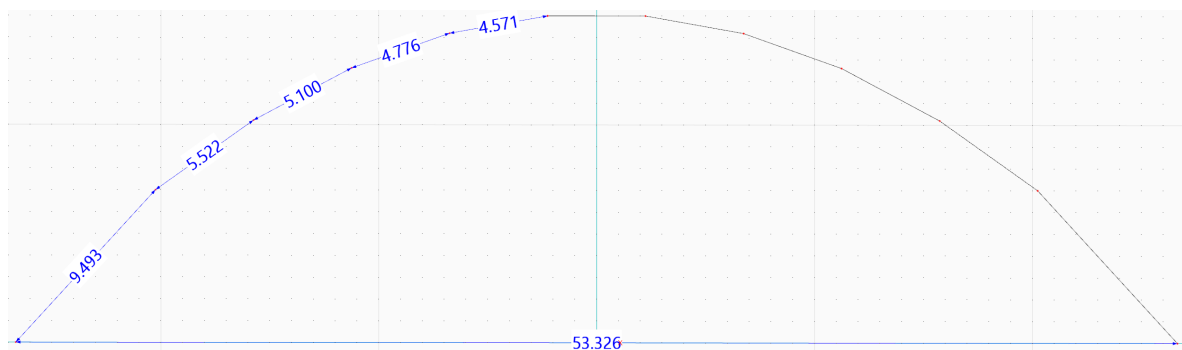


Abbildung 3.1: Erster entwerfener Bogen

Pfetten unterschiedliche Einwirkungsbreiten. Aus diesem Grund werden weitere Verbesserungsschritte für den Bogen durchgeführt. Es folgt ein iteratives Vorgehen zur Optimierung des Bogenträgers, siehe Kapitel 3.1.1.

### 3.1.1 Iterative Methode der Bogenträgeroptimierung

Wie beim Bogen in Abbildung 3.1 wird das Verfahren erneut wiederholt. In Abbildung 3.2 sind Notationshilfen dargestellt, um die Iterationsschritte nachvollziehbar zu machen.

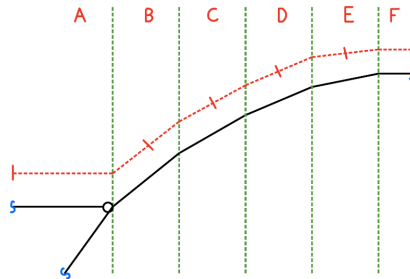


Abbildung 3.2: Beschriftungshilfe nach [1]

Zunächst werden die neuen Einwirkungsbreiten berechnet und ins Verhältnis zu den alten gesetzt. Das Ergebnis wird mit der alten Einheitslast multipliziert, um die neuen Einheitslasten zu erhalten.

$$l_{FE} = \frac{\frac{4,5+4,571}{2}}{4,5} \approx 1,008 \quad (3.1)$$

$$l_{ED} = \frac{\frac{4,571+4,776}{2}}{4,5} \approx 1,039 \quad (3.2)$$

$$l_{DC} = \frac{\frac{4,776+5,10}{2}}{4,5} \approx 1,097 \quad (3.3)$$

$$l_{BA} = \frac{\frac{5,522+14,75}{2}}{4,5} \approx 2,252 \quad (3.4)$$

Die Längen können Abbildung 3.1 entnommen werden. Um die Länge BA zu bestimmen, wird die Länge des seitlichen Bauteils in die Verhältnisgleichung eingesetzt, da dort die Einwirkungen aus Schnee und Eigengewicht auftreten.

Anschließend wird mit Hilfe des Momentengleichgewichts die Länge des horizontalen Balkens und damit der Polabstand berechnet, wie in Gleichung 2.4 beschrieben.

$$M_{Schnitt} = 1,008 \cdot 4,5m + 1,036 \cdot 9,0m + 1,097 \cdot 13,5m + 1,180 \cdot 18,0m \approx 47,34m \quad (3.5)$$

Folglich ergibt sich ein approximativer Wert für  $H$  von etwa 5,920, und das neu gestaltete Kraftpolygon präsentiert sich wie folgt.

Durch die Anwendung des aktualisierten Kraftpolygons ist es möglich, eine verfeinerte Darstellung des Bogens zu entwerfen. Ein zusätzlicher Iterationsschritt wird durchgeführt, wobei die Präzision der Berechnungen auf drei Dezimalstellen begrenzt bleibt. Diese Begrenzung reflektiert die realistischen

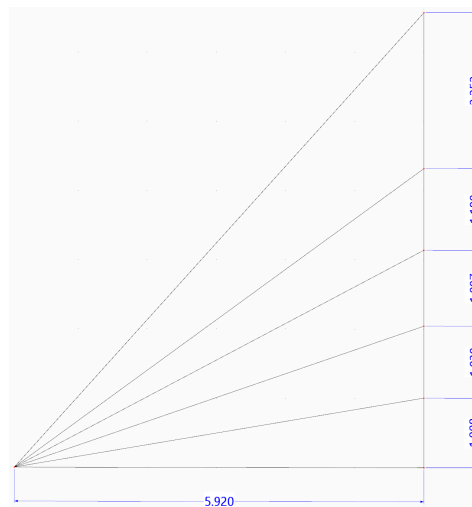


Abbildung 3.3: Erste Iteration Kraftpolygon

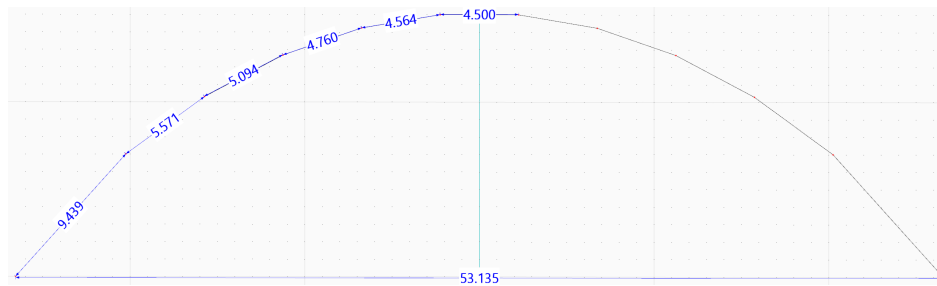


Abbildung 3.4: Erste Iteration Bogen

Anforderungen an Genauigkeit in der praktischen Umsetzung.

Wie in den vorherigen Ausführungen werden im Folgenden die Berechnungen der Einwirkungslängen sowie die Visualisierung des finalen Kraftpolygons und des daraus resultierenden Bogens dargelegt.

$$l_{FE} = \frac{\frac{4,5+4,565}{2}}{4,5} \approx 1,007 \quad (3.6)$$

$$l_{ED} = \frac{\frac{4,565+4,761}{2}}{4,5} \approx 1,036 \quad (3.7)$$

$$l_{DC} = \frac{\frac{4,761+5,095}{2}}{4,5} \approx 1,095 \quad (3.8)$$

$$l_{CB} = \frac{\frac{5,095+5,575}{2}}{4,5} \approx 1,185 \quad (3.9)$$

$$l_{BA} = \frac{\frac{5,575+14,75}{2}}{4,5} \approx 2,258 \quad (3.10)$$

Mit  $M_{Schnitt} \approx 47,3$  und dadurch  $H \approx 5,192$  erhalten wir den endgültigen Bogen.

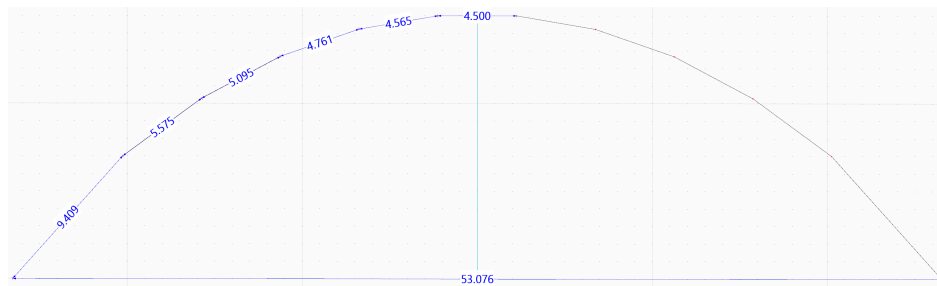


Abbildung 3.5: Endgültiger Bogen

Abbildung 3.6 zeigt das Modell des Hangars samt seiner Dimensionen. Der gleichmäßige Abstand von  $10m$  zwischen den einzelnen Bögen wird durch den Einsatz einer Pfettenkonstruktion überbrückt, welche die Spannweite effektiv von  $10m$  auf  $5m$  reduziert. Diese konstruktive Anpassung ermöglicht die Installation der Deckenverkleidung.

Nachdem der Entwurf des Bogens finalisiert ist, wird im nächsten Schritt mit der Lastermittlung begonnen, um die weiteren Bauteile dimensionieren zu können.

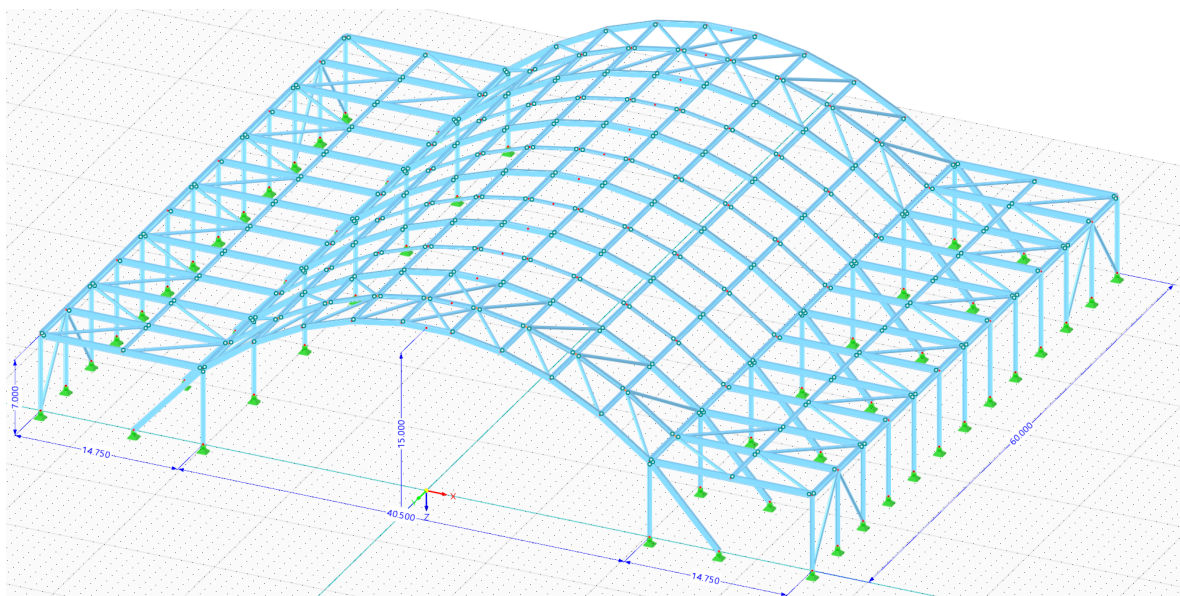


Abbildung 3.6: Model RFEM Flugzeughalle

## 3.2 Lastermittlung

Das Ziel einer Bemessung ist es, die Sicherheit eines Bauwerks für den vorgesehenen Nutzungszweck und die Wirtschaftlichkeit für eine vorgesehene Dauer zu gewährleisten. Das Bemessungskonzept beruht auf dem Nachweis, dass Grenzzustände und Tragfähigkeiten nicht überschritten werden.

Die Lastermittlung erfolgt gemäß [5]. Das System wird durch das Eigengewicht, den Wind und den Schnee belastet. Obwohl die Hangarkonstruktion Tore beinhaltet, ist zu beachten, dass diese überwiegend geöffnet bleiben, um den Hangar zu nutzen. Unter Berücksichtigung dieser Parameter kann davon ausgegangen werden, dass es einen vernachlässigbaren Temperaturunterschied zwischen Innen und Außen gibt. Daher ist keine Berechnung einer Temperaturlast erforderlich. Die oben genannten Einwirkungen werden berechnet, kombiniert und auf das System angewendet.

### 3.2.1 Windlasten

Aus den Örtlichkeitsangaben lässt sich die Windzone II und die Geländekategorie II ableiten. Es werden zwei Fälle von Windlasten untersucht: der Fall des Windes in Hallenrichtung und der Fall des Windes in Hallenquerrichtung. Aufgrund des gemischten Baus des Flugzeughangars, der aus zwei seitlichen Bauteilen mit Flachdach und den mittleren mit Tonnendach besteht, ergeben sich einige Komplikationen. Diese können durch das Treffen einiger Annahmen behoben werden, die zwar ungünstig auf das Gesamtsystem wirken, aber den Sicherheitsgrad erhöhen.

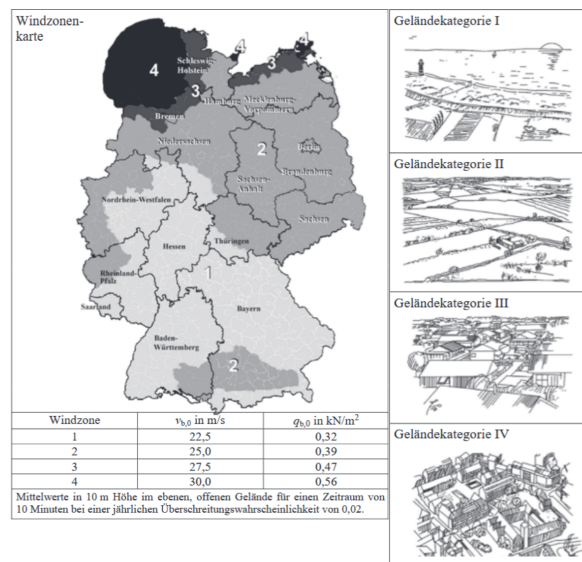


Abbildung 3.7: Windzonenkarte mit zug. Basisgeschwindigkeiten  $v_{b,0}$  und Basisgeschwindigkeitsdicken  $q_{b,0}$  und Geländekategorien [7]

Angaben zum System:

- $h_{max} = 15m$
- $b_{ges} = 75m$
- $d_{ges} = 60m$

Die Höhe des Flugzeughangars beträgt  $15m$ . Daher kann das vereinfachte Verfahren zur Berechnung des Böengeschwindigkeitsdrucks verwendet werden.

Der Böengeschwindigkeitsdruck mit  $q_{b,0} = 0,39 \frac{kN}{m^2}$  berechnet sich wie folgt:

$$q_p = 2,1 \cdot q_b \cdot \left( \frac{z}{10} \right)^{0,24} = 0,903 \frac{kN}{m^2} \quad (3.11)$$

Der mittlere Teil mit einem gekrümmten Dach wird als rechtwinkliges Bauteil angenommen. Die Windlasten auf dem Dach werden separat betrachtet. Für den Winddruck und den Windsog auf den Bauteilwänden wird ein gemeinsames rechtwinkliges Bauteil angenommen. Die daraus resultierenden seitlichen Windsog-Kräfte werden nur für die Wände der seitlichen Bauteile berechnet.

Für den Lastfall Wind in Hallenquerrichtung wird eine separate Ermittlung der Beiwerte für das gekrümmte Dach durchgeführt, wie in Abbildung 3.8 dargestellt.

Innerhalb beider Windlastfällen lassen sich einige Unterfälle unterscheiden.

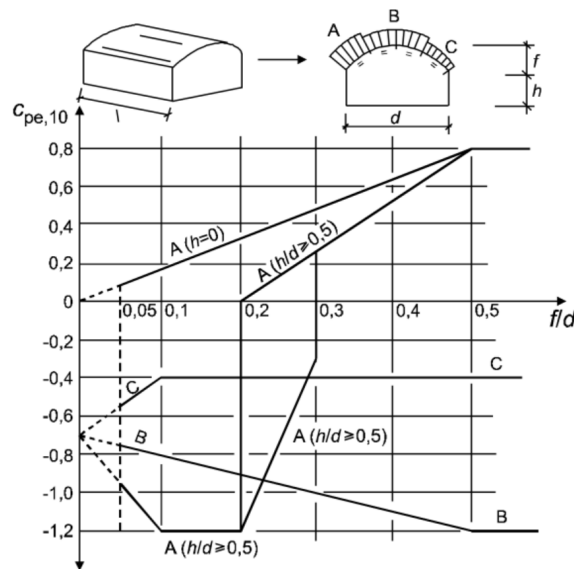


Abbildung 3.8: Windeinwirkung auf den gekrümmten Teil des Daches

- **Fall 1:** Wind in Hallenquerrichtung  $\frac{h}{d} = \frac{7m}{70m} = 0,10 \leq 0,25$ . Gekrümmtes Dach wird ignoriert.
- **Fall 2:** Wind in Hallenrichtung  $\frac{h}{d} = \frac{7m}{60m} = 0,11 \leq 0,25$ . Gekrümmtes Dach wird ignoriert.

- **Fall 3:** Wind in Hallenrichtung  $\frac{h}{d} = \frac{15m}{60m} = 0,25 \leq 0,25$ . Gesamtbau wird als Rechteck angenommen.
- **Fall 4:** Wind in Hallenrichtung  $\frac{h}{d} = \frac{15m}{40,5m} = 0,37 > 0,25$ . Mittlerer Bau wird als Rechteck angenommen.

Im Fall 4 lassen sich höhere  $c_{pe,10}$  in den Bereichen D und E erkennen. Diese führen zu höheren Druck- und Sogwindlasten und stellen somit eine konservativere Annahme dar.

Tabelle 3.1: Windlasten inkl. Flachdach

Windlasten			
Bereich	Fall	$c_{pe,10}$	$w_k \frac{kN}{m^2}$
A	1-4	-1,2	-1,100
B	1-4	-0,8	-0,730
C	1-4	-0,5	-0,460
D	4	0,8	0,730
E	4	-0,5	-0,460
H	1-4	-0,7	-0,640
I	1-4	-0,6	-0,542
	1-4	0,2	0,200

In Tabelle 3.1 sind die charakteristischen Windlasten für die 4 Fälle berechnet. Anschließend werden die Windlasten für das gekrümmte Dach tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 3.2: Windlasten gekrümmtes Dach

Windlasten gekrümmtes Dach		
Bereich	$c_{pe,10}$	$w_k \frac{kN}{m^2}$
A	0,4	0,36
	-1,2	-1,10
B	0,0	0,00
	-0,9	-0,81
C	0,0	0,00
	-0,4	-0,36

Die Berechnung der Windlasten ist damit abgeschlossen.

### 3.2.2 Schneelasten

Wie bei der Windlastberechnung werden auch bei der Schneelastberechnung die Standortdaten verwendet [6]. Hamburg liegt laut Abbildung 3.9 in der Schneezone 2, die zum Norddeutschen Tiefland gehört. Das Bauwerk liegt laut Angaben in einer Höhe von  $h = 16m \Rightarrow H \leq 1000m$  über NN.

Daraus ergibt sich eine charakteristische Schneelast von  $s_k = 0,85 \frac{kN}{m^2}$ , zusätzlich ist für das Norddeutsche Tiefland eine außergewöhnliche Schneelast von  $s_{Ad} = 1,955 \frac{kN}{m^2}$  zu berücksichtigen.

Bestehend aus zwei Flachdächern und einem Tonnendach ist es notwendig, eine Lastverteilung für

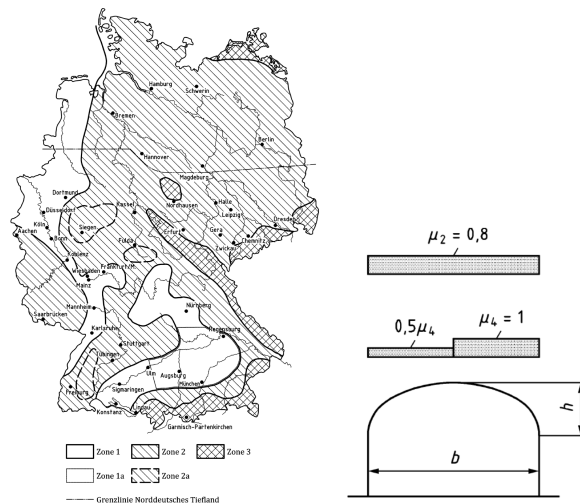


Abbildung 3.9: Landkarte und Lastanordnung von Schneelasten bei Tonnendächern

verwehte und unverwehte Bedingungen vorzunehmen.

Aufgrund des fließenden Übergangs zwischen Tonnen- und Flachdach gilt es eine zuverlässige Lastannahme zur Sicherstellung der Tragfähigkeit zu finden.

Der Bogen setzt sich aus einzelnen geraden Stäben zusammen. Wodurch der Höhenunterschied in Abbildung 3.10 dargestellt durch die Höhe des Stabes bestimmt wird, der über das angrenzende Bauteil hinausragt. Die resultierenden Lasten und Lastanordnungen basieren auf den spezifischen lokalen und konstruktiven und Randbedingungen

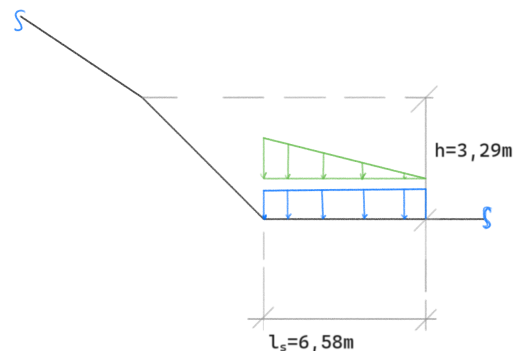


Abbildung 3.10: Schneelasten bei Höhenversprung [10]



- Für die unverwehte Lastanordnung mit  $\mu_1(\alpha) = \mu_2(\alpha) = 0,8$  ergibt sich folgende Last:

–

$$s_k = 0,8 \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 0,68 \frac{kN}{m^2} \quad (3.12)$$

- Für die verwehte Lastanordnung mit  $\mu_4(\alpha) = 1,0$  ergeben sich folgende Lasten:

–

$$s_{k,re} = 1,0 \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 0,85 \frac{kN}{m^2} \quad (3.13)$$

–

$$s_{k,li} = 1,0 \cdot 0,5 \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 0,425 \frac{kN}{m^2} \quad (3.14)$$

- Die Außergewöhnliche Schneelast mit  $C_{esl} = 2,3$  ergibt:

–

$$s_{Ad} = 2,3 \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 1,955 \frac{kN}{m^2} \quad (3.15)$$

- Für den Höhenversprung Lastanordnung mit  $h = 3,290m$  wurde aus dem [10] entnommen und ein Formfaktor  $\mu_2 = 2,4$  angenommen. Es wird nur die Dreieckslast berechnet:

–

$$s_{\Delta,k} = (\mu_2 - \mu_1) \cdot s_k = (2,4 - 0,8) \cdot 0,85 \frac{kN}{m^2} = 1,36 \frac{kN}{m^2} \quad (3.16)$$

–

$$s_{\Delta,Ad} = (\mu_2 - \mu_1) \cdot s_{Ad} = (2,4 - 0,8) \cdot 1,955 \frac{kN}{m^2} = 3,13 \frac{kN}{m^2} \quad (3.17)$$

Die Ermittlung der Schneelast ist somit beschlossen.

### 3.2.3 Eigenlasten

Die Verwendung von EDV-Programmen wie RFEM ermöglicht die automatische Berechnung der Eigengewichte der ausgewählten Profile. Das Gewicht der nicht begehbaren Dachdeckung muss jedoch manuell ermittelt werden. Hierbei wird von einer einfachen Dachdeckung ausgegangen, deren Aufbau in Abbildung 3.11 visualisiert und deren Gesamtgewicht in Tabelle 3.3 zusammengefasst ist.

Entsprechend [5] erfolgt die Berechnung der Gewichte der Komponenten durch die Notation der spezifischen Gewichte und deren Multiplikation mit den jeweiligen Dicken. Das Stahltrapezprofil, als tragendes Element im Dachaufbau, wurde gemäß [13] unter Berücksichtigung relevanter Lastkombinationen und der Systemspannweite ausgewählt, um die erforderliche Tragfähigkeit der Dachdeckung sicherzustellen.

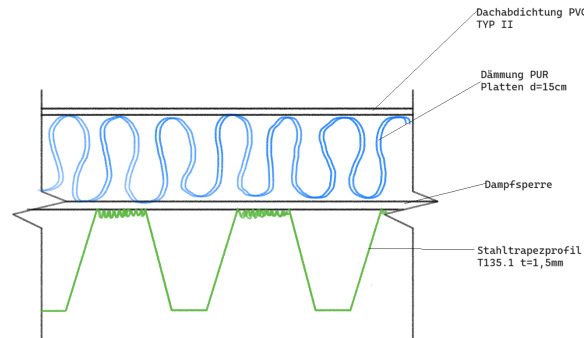


Abbildung 3.11: Schnitt Dachdeckung

Tabelle 3.3: Dachdeckung Eigengewicht

Bezeichnung	Flächenlast
Dachabdichtung PVC Typ II	$0,0085 \frac{kN}{m^2}$
Dämmung PUR Platten	$0,075 \frac{kN}{m^2}$
Dampfsperre	$0,01 \frac{kN}{m^2}$
Stahltrapezprofil T135.1	$0,195 \frac{kN}{m^2}$
<b>Gesamt</b>	$0,3 \frac{kN}{m^2}$

### 3.2.4 Lastkombinationen

Für die Berechnung des Flugzeughangars sind insgesamt zehn Lastfälle zu berücksichtigen. Diese sind in der Tabelle 3.4 aufgeführt. Die Kombinationen erfolgen unter Berücksichtigung von Tragwerks- oder Querschnittsversagen (STR-Structural).

- Grundkombination

$$E_d = E \left[ \sum_{j \geq 1} \gamma_{Gj} \cdot G_{k,j}, + \gamma_P \cdot P, + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}, + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (3.18)$$

- Außergewöhnliche Situation

$$E_{Ad} = E \left[ G_{k,j} + P + A_d + \left( \frac{\psi_{1,1}}{\psi_{2,1}} \right) \cdot Q_{k,1} + \sum_{i>1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i} \right] \quad (3.19)$$

Die Kombination der Lastfälle basierend auf Tabelle 3.4 kann mithilfe von Formel 3.18 und Formel 3.19 durchgeführt werden.

- Lastkombinationen (Wind Leitend + Schnee Voll)

1.  $LK_1 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_4 + 0,75 \cdot LF_6$
2.  $LK_2 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_2 + 0,75 \cdot LF_6$
3.  $LK_3 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_3 + 0,75 \cdot LF_6$
4.  $LK_4 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_5 + 0,75 \cdot LF_6$

- Lastkombinationen (Wind Leitend + Schnee Teil)

1.  $LK_5 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_4 + 0,75 \cdot LF_7$
2.  $LK_6 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_2 + 0,75 \cdot LF_7$
3.  $LK_7 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_3 + 0,75 \cdot LF_7$
4.  $LK_8 = 1,35 \cdot LF_1 + 1,5 \cdot LF_5 + 0,75 \cdot LF_7$

- Lastkombinationen (Schnee Voll Leitend + Wind)

1.  $LK_9 = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_4 + 1,5 \cdot LF_6$
2.  $LK_{10} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_2 + 1,5 \cdot LF_6$
3.  $LK_{11} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_3 + 1,5 \cdot LF_6$
4.  $LK_{12} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_5 + 1,5 \cdot LF_6$

- Lastkombinationen (Schnee TW Leitend + Wind)

1.  $LK_{13} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_4 + 1,5 \cdot LF_7$
2.  $LK_{14} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_2 + 1,5 \cdot LF_7$
3.  $LK_{15} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_3 + 1,5 \cdot LF_7$
4.  $LK_{16} = 1,35 \cdot LF_1 + 0,9 \cdot LF_5 + 1,5 \cdot LF_7$

- Außergewöhnliche Lastkombinationen

1.  $LK_{17} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_4 + LF_8$
2.  $LK_{18} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_2 + LF_8$
3.  $LK_{19} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_3 + LF_8$

$$4. \quad LK_{20} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_5 + LF_8$$

$$5. \quad LK_{21} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_4 + LF_9$$

$$6. \quad LK_{22} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_2 + LF_9$$

$$7. \quad LK_{23} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_3 + LF_9$$

$$8. \quad LK_{24} = LF_1 + 0,2 \cdot LF_5 + LF_9$$

- Kombination zur Bemessung der Wandverbände Laut TH.II. O.

$$1. \quad LF_{10}$$

Tabelle 3.4: Lastfälle

Lastfall	Bezeichnung
LF 1	Eigengewicht
LF 2	Windlast in Hallenrichtung ( positiver Y-Richtung ) mit I Druck
LF 3	Windlast in Hallenrichtung ( positiver Y-Richtung ) mit I Sog
LF 4	Windlasten in Hallenquerrichtung (negativer X-Richtung) mit I Druck
LF 5	Windlasten in Hallenquerrichtung (negativer X-Richtung) mit I Sog
LF 6	Schnee Voll
LF 7	Schnee TW
LF 8	Schnee Außergewöhnlich Voll
LF 9	Schnee Außergewöhnlich TW
LF 10	Windlast in Hallenrichtung nur D und E Bereiche

## 4 Bemessung

### 4.1 Bemessung

Nachdem alle Lasten und Einwirkungskombinationen bekannt sind, kann das System berechnet und die maßgebenden Schnittgrößen für die jeweiligen Bauteilkategorien untersucht werden. Die Wahl der maßgebenden Lastkombination und die Berechnung der Schnittgrößen werden mit dem Programm RFEM durchgeführt. Anhand der von RFEM berechneten Schnittgrößen werden die notwendigen Nachweise geführt. Für den Hangar sind die Stabilitätsnachweise maßgebend, da das System außer dem Bogen nur aus gelenkigen Verbindungen besteht. Es gibt keine Stellen, an denen ein Querschnittsversagen vor dem Stabilitätsversagen auftreten kann.

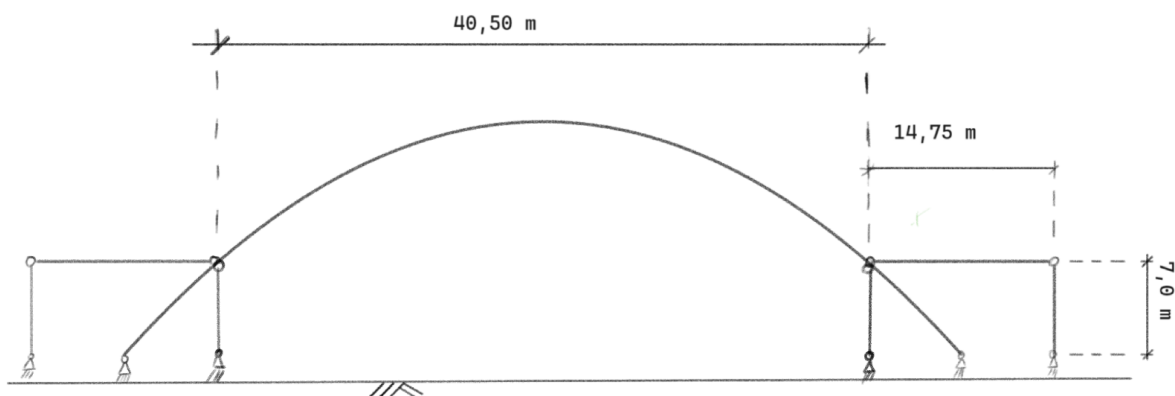


Abbildung 4.1: Skizze des statischen Systems

In der Regel werden die Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung ermittelt und die Stabilitätsnachweise nach dem Ersatzstabverfahren geführt. Untersuchungen, bei denen Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung erforderlich sind, werden mit dem Ersatzimperfektionsverfahren nach [8] und [9] durchgeführt.

#### 4.1.1 Bemessung der Bogenträger

Die Bogenträgerbemessung erfolgt durch das Ersatzimperfektionsverfahren nach [11]. Die kleinste Eigenform und somit die mögliche Knickfigur ist in Abbildung 4.2 angedeutet. In den Stichen der Knickfigur wird eine eingeprägte Vorkrümmung „ $\frac{e_0}{L_B}$ “ eingeführt. Als Querschnitt für den Bogenbau wurde

Celsius 355 RHS 500x300x16 gewählt. Dies ist ein warmgefertigtes, rechteckiges Hohlprofil.

Obwohl für warmgefertigte Hohlprofile mit S235 die Knicklinie **a** vorgeschrieben ist, wurde hier

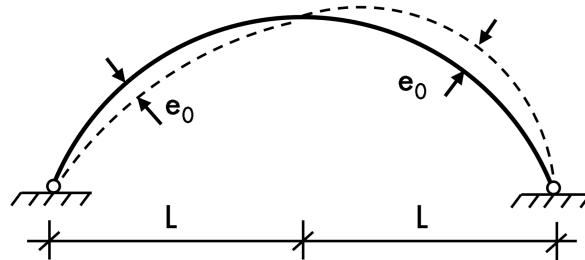


Abbildung 4.2: Knickfigur Bogen [9]

die Knicklinie **c** gewählt. Dies führt zu einer ungünstigen Annahme aufgrund des größeren Stichts bei gleicher Bogenlänge. Es wird ein elastischer Querschnittsnachweis durchgeführt. Hier wurden nur die

Tabelle 4.1: Vorkrümmung  $\frac{e_0}{L_B}$  [8]

Knicklinie nach DIN EN 1993-1-1:2010-12, Tabelle 6.2	Querschnittsnachweis	
	Elastisch $e_{0,d}/L$	Plastisch $e_{0,d}/L$
$a_0$	1/600	Wie bei elastisch, jedoch $M_{pl}/M_{el}$ -fach
<b>a</b>	1/550	
b	1/350	
c	1/250	
d	1/150	

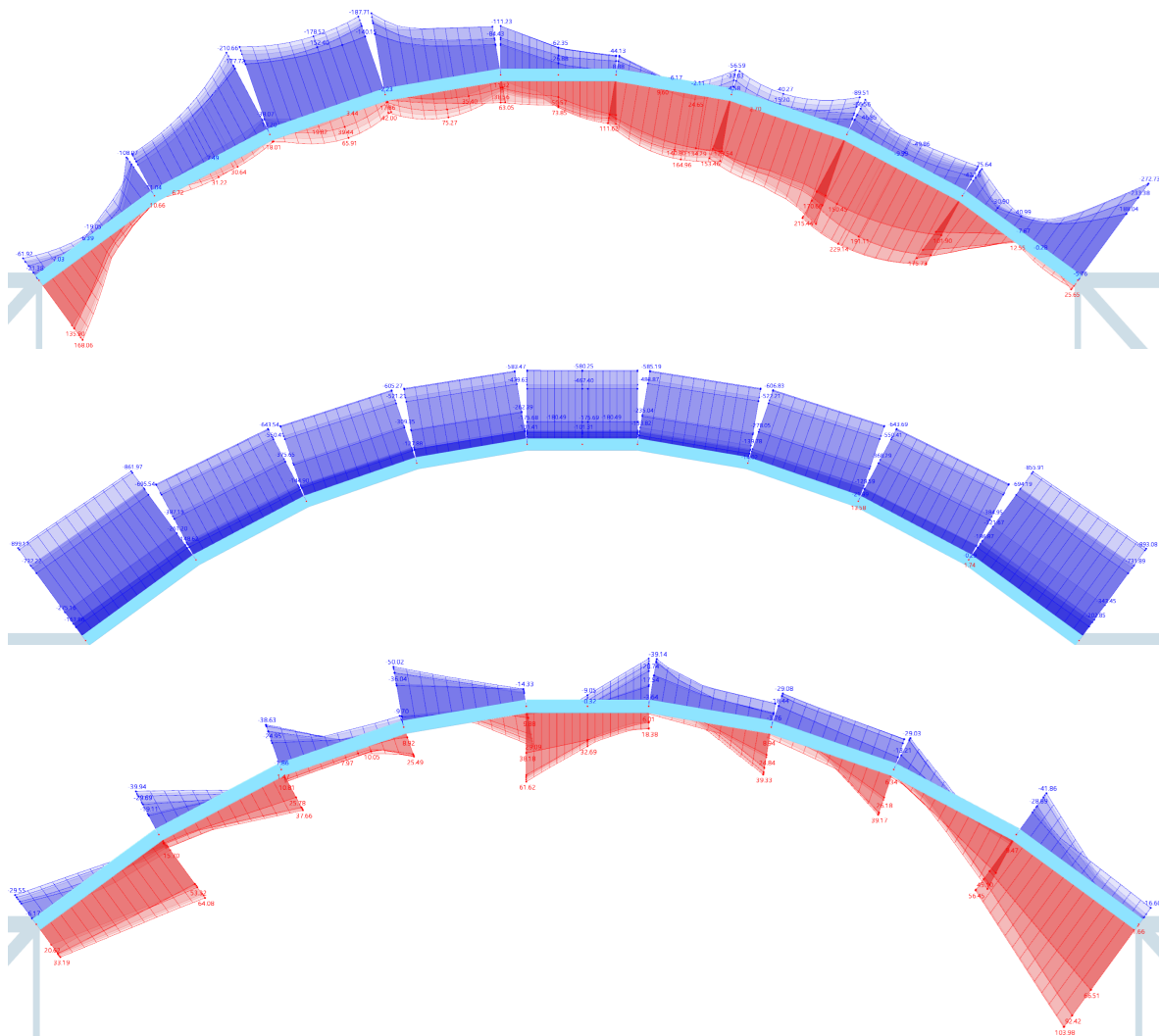
Abmessungen des Bogenteils berücksichtigt, das über den seitlichen Bauteilen steht.

- $L_{B,ges} = 44,492m$
- $L_B = 22,246m$
- $b = 40,5m$

Damit ergibt sich  $e_0 = \frac{L_B}{250} = \frac{22,246m}{250} \approx 0,09m$ .

Nach Festslegung der Randbedingungen und Vorkrümmung werden die Schrittgrößen ermittelt. Dabei wird die maßgebende Lastkombination für das Bogentragwerk gesucht. Diese Lastkombination ist die Nummer 18. Um die Verzweigungslast für die Strukturstabilität zu berechnen, wählt man in der Menüleiste die LK.18 aus und aktiviert das Add-On 'Strukturstabilität'. Das Add-On wird für eine lineare Eigenwertmethode mit mindestens 30 Eigenwerten bearbeitet. Anschließend wird die LK.18 erneut berechnet und nach der Eigenform gesucht, die der Abbildung 4.2 ähnlich ist.

Nachdem dies gefunden wurde, wird die Nummer der Eigenfigur notiert und für die Erzeugung eines Imperfektionsfalls genutzt.

Abbildung 4.3:  $M_y$ ;  $N$ ;  $V_z$  Schnittgrößen vom Bogenträger

Bei der Erzeugung des Imperfektionsfalls wird als Quelltyp die Lastkombination gewählt. Zunächst wird LK. 18 gewählt und die Knickfigur Nr. 9 eingegeben. Dies ist in Abbildung 4.4 abgebildet. Als Referenzstelle wird die Stelle mit der größten Verschiebung verwendet und eine räumliche Skalierungsrichtung wird angegeben. Anschließend wird das errechnete Imperfektionsmaß eingetragen.

Um Loops bei den Berechnungen zu vermeiden, wird LK.18 dupliziert, da sie als Referenzlastkombination gilt. Danach werden alle anderen Lastkombinationen bearbeitet, um die Imperfektion zu berücksichtigen. Zusätzlich muss die Statikanalyse nach Theorie II. Ordnung ( $P - \Delta$ ) erfolgen.

Wenn die Schritte strikt befolgt wurden, wird alles berechnet und nach den maßgebenden Schnittgrößen für den Bogenträger gesucht. Am Ende erfolgt nur noch ein Querschnittsnachweis.

Bei der Untersuchung nach diesen Prinzipien zeigt sich, dass Stab Nr. 226 bei LK.13 die höchste Auslastung aufweist.

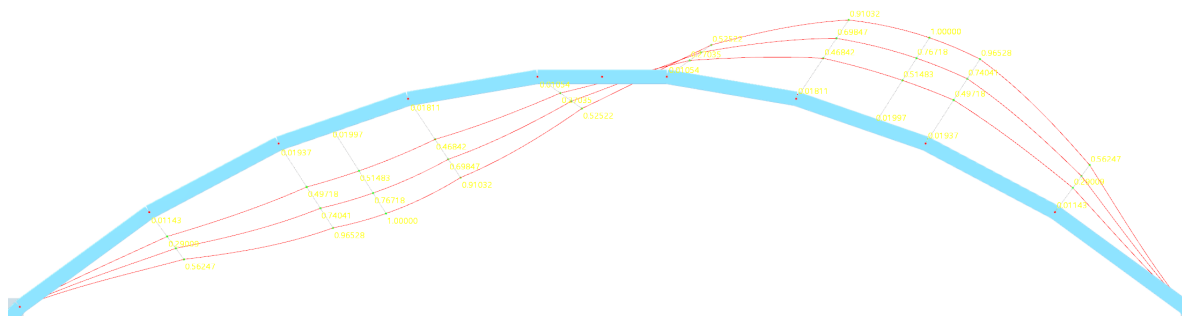


Abbildung 4.4: Maßgebende Knickfigur Nr.9 Bogenträger bei LK.18

Die Schnittgrößen für Stab 226 betragen:

- $M_{Ed} = 248,73 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 410,42 \text{ kN}$  (Druck)
- $V_{z,Ed} = 89,98 \text{ kN}$

Tabelle 4.2: Angaben zum Querschnitt **RHS 500x300x16**

$A = 243.00 \text{ cm}^2$	$I_y = 81783.00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,y} = 4005.00 \text{ cm}^3$
$h = 500 \text{ mm}$	$I_z = 36768.00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,z} = 2804.00 \text{ cm}^3$
$b = 300 \text{ mm}$	$I_t = 80329.00 \text{ cm}^4$	$W_{el,z} = 2451.00 \text{ cm}^3$
$S_y = 1001.17 \text{ cm}^3$	$I_w = 663901.60 \text{ cm}^6$	$W_{el,y} = 3271.00 \text{ cm}^3$
$N_{pl,Rd} = 5710.42 \text{ kN}$	$M_{y,pl,Rd} = 941.10 \text{ kNm}$	$V_{z,pl,Rd} = 2101.37 \text{ kN}$

Nachweis nach [8]:

- $V_{z,Ed} < 0,5 \cdot V_{z,pl,Rd} \Rightarrow 89,98 \text{ kN} < 2101,37 \text{ kN} \checkmark$
- $N_{Ed} > \min = \begin{cases} 0,25 \cdot N_{pl,Rd} \\ 0,5 \cdot h_w \cdot t_w \cdot f_y / \gamma_{M0} \end{cases} \Rightarrow 410,42 \text{ kN} < \min = \begin{cases} 1427,61 \text{ kN} \\ 819,68 \text{ kN} \end{cases} \checkmark$   
 $\Rightarrow n = 0 \quad a_w = 0$
- $M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \Rightarrow 248,73 \text{ kNm} < 941,10 \text{ kNm} \checkmark$

Spannungsnachweis mit Vergleichsspannung nach Mises:

$$\bullet \sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + 3 \cdot \tau_{x,y}^2} \quad \text{-mit} \quad \sigma_y = 0 \Rightarrow \sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau_{x,y}^2}$$



- $\sigma_x = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{Ed}}{W_{el}} = \frac{410,42kN}{243,00cm^2} + \frac{24873kNcm}{3271,00cm^3} = 9,3 \frac{kN}{cm^2}$
- $\tau = \frac{V_{z,Ed} \cdot S_y}{I_y \cdot t} \quad \text{-mit} \quad S_y = 1001,17cm^3 \Rightarrow \tau = \frac{89,98kN \cdot 1001,17cm^3}{81783,00cm^4 \cdot 1,6cm} = 0,69 \frac{kN}{cm^2}$
- $\sigma_V = \sqrt{\sigma_x^2 + 3 \cdot \tau^2} = 9,38 \frac{kN}{cm^2} \quad \eta = \frac{\sigma_V}{f_y} = \frac{9,38 \frac{kN}{cm^2}}{23,5 \frac{kN}{cm^2}} = 0,40 \checkmark$

Der Nachweis der Stabilität des oberen Bogenteils ist erfüllt. Allerdings erfordert der untere Teil des Bogens, der in dem seitlichen Bauteil integriert ist, zusätzliche Aufmerksamkeit. Die Berechnungen werden mit den nach Theorie I. Ordnung berechneten Schnittgrößen für Stab Nr. 261 durchgeführt. Bei LK.16 weist dieser die höchste Beanspruchung auf und wird daher auf Stabilität überprüft.

Mit den Schnittgrößen und Stablänge wie in Abbildung 4.5:

- $M_{Ed} = 248,49kNm$
- $N_{Ed} = 429,75kN \quad (\text{Druck})$
- $V_{z,Ed} = 34,51kN$
- $l = 9,409m$

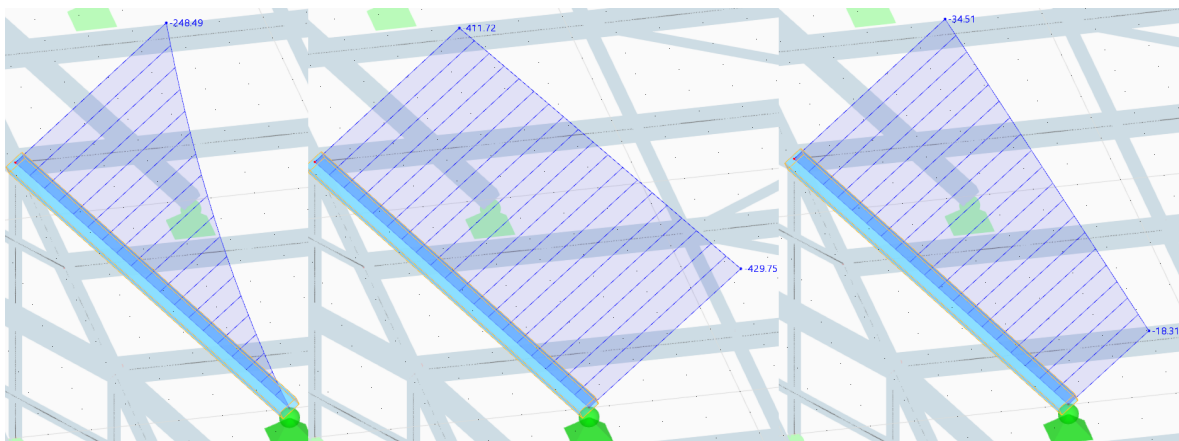


Abbildung 4.5: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$ ,  $V_z$  vom Stab 261 bei LK.16

Da die Randbedingungen für beide Biegerichtungen gleich sind, ist es sinnvoller, die Biegung um die schwache Achse zu überprüfen. Der Euler-Fall ist, wie in Abbildung 4.6 mit  $\beta_{cr} = 0,7$  erkennbar. Dabei erhält man eine Knicklänge von  $l_0 = 0,7 \cdot l = 0,7 \cdot 9,409m = 6,59m$ . Bei geschlossenen Hohlprofilen ist das Biegedrillknicken nicht maßgebend, da sie eine sehr große Verdrehsteifigkeit haben und somit immer  $\chi = 1$  liefern. Um dieses Phänomen dennoch zu zeigen, wird ein Biegedrillknicknachweis durchgeführt.

Jetzt, da alle Daten und Randbedingungen vorliegen, kann mit dem Stabilitätsnachweis nach [15] begonnen werden.

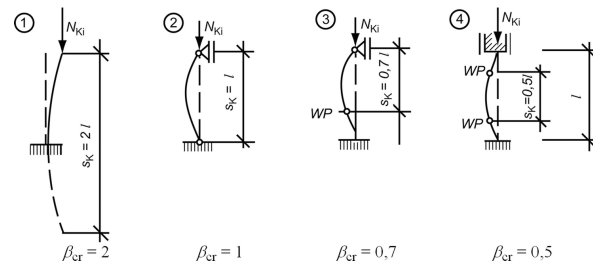


Abbildung 4.6: Knicklängen nach Randbedingungen [3]

### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 36768.00 cm^4}{(659 cm)^2} = 17547,62 kN \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{243 cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{17547,62 kN}} = 0,57 \quad \text{QK 1} \quad \text{Biegelinie a}$$

$$\Phi = 0,7 \quad \chi = 0,904$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,904 \cdot 243 cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 4692,99 kN \quad n_z = \frac{429,75 kN}{4692,99 kN} = 0,09 \checkmark$$

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken

$$N_{cr,z} = 17547,62 kN \quad M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 59760,8 kNm$$

$$\zeta = 1,77 \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,125 < 0,4$$

$$c^2 = 37021,13 cm^2 \quad z_p = 0 cm$$

$$\chi = 1 \quad m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{pl,Rd}} = \frac{248,49 kNm}{941,10 kNm} = 0,26 \checkmark$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y \leq 1,0$$

$$C_{my}, C_{mz} \text{ und } C_{mL} = 0,6$$

$$k_{yy} = C_{my} \cdot \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \cdot n_z\right) \leq C_{my} \cdot (1 + 0,8 \cdot n_z) \leq 1,8 \quad k_{zy} = 0,6 \cdot k_{yy} = 0,372$$

$$0,09 + 0,372 \cdot 0,26 = 0,19 < 1 \quad \checkmark$$

Zusätzlich wird in Stab 234 bei LK.18 in Abbildung 4.7 die Stabilität untersucht. Obwohl enorme Druckkräfte vorhanden sind, sind die Momente sehr klein, wodurch ein Biegedrillknicknachweis nicht von Nöten ist. Es wird lediglich ein Nachweis gegen Knicken geführt.

Die Schnittgrößen vom Stab Nr. 234 bei LK.18 sind:

- $M_{Ed} = 22,24 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 1026,06 \text{ N}$  (Druck)
- $l = 9,409 \text{ m}; \quad l_0 = 6,59 \text{ m}$

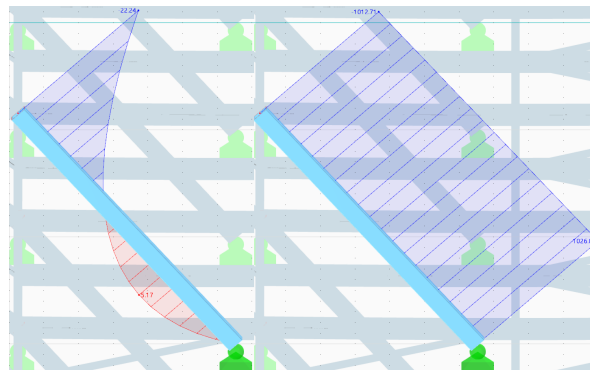


Abbildung 4.7: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 234 bei LK.18

Unter Berücksichtigung der gleichen Rahmenbedingungen wie bei Stab 234 wird lediglich die Normalkraft  $N_{Ed} = 1026,06 \text{ kN}$  im Verhältnis zum bereits berechneten  $N_{b,z,Rd} = 4692,99 \text{ kN}$  betrachtet. Es stellt sich ein Ausnutzungsgrad von  $n_z = \frac{1026,06 \text{ kN}}{4692,99 \text{ kN}} = 0,22 \checkmark$  ein.

Die Bogenstäbe werden durch H- und HV-Nähte miteinander verbunden. Diese Schweißarten gelten als Querschnittsteile und benötigen keine zusätzlichen Nachweise, solange die Querschnittsnachweise erfüllt sind. Somit sind alle Nachweise der Bogenträger erfüllt und es kann mit den weiteren Bauteilen fortgefahren werden.

### 4.1.2 Bemessung der Pfetten und Koppelstäbe

Die Bemessung der Pfetten erfolgt mit Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung. Zunächst werden den Pfetten Positionsnummern zugewiesen, um den Verlauf der Nachweise klar verfolgen zu können.

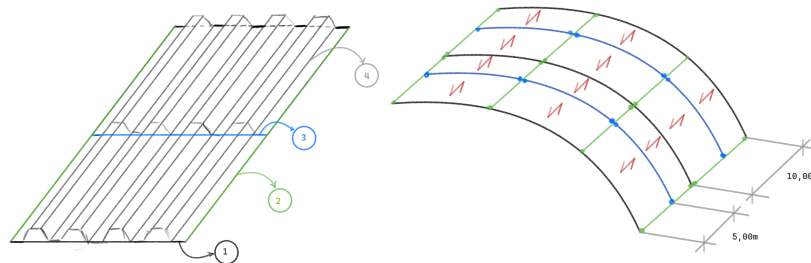


Abbildung 4.8: Positionen und Schnitt

In der rechten Abbildung 4.8 ist eine Skizze des Bogenschnitts dargestellt. Die Pfetten (grün, Pos.2 in der linken Skizze) sind gelenkig mit dem Bogenträger verbunden und haben eine Spannweite von 10m mit einem Querschnitt von HEA 280. Die Koppelstäbe (blau, Pos.3) halbieren die 10m Spannweite, um die Dachdeckung tragfähig zu machen. Sie sind ebenfalls gelenkig an den Pfetten befestigt. Es gibt zwei Arten von Koppelstäben: solche mit kleinerem Querschnitt und solche mit größerem Querschnitt, die aufgrund höherer Druckkräfte durch den Dachverband benötigt werden. Daher wird Pos.3 in zwei Positionen geteilt. Pos. 3.1 repräsentiert die Koppelstäbe am Dachverband mit dem Querschnitt HEA280 und Pos. 3.2 repräsentiert den Rest mit dem Querschnitt HEA200. Pos.1 wurde im obigen Paragraph schon nachgewiesen und für Pos.4 werden keine Nachweise durchgeführt.

#### Stabilitätsnachweis Pos.2

Stab Nr.401 in Abbildung 4.9 liefert bei LK.18 die folgenden Schnittgrößen, die untersucht werden müssen:

- $M_{Ed,y} = 42,67kNm$
- $M_{Ed,z} = 7,26kNm$
- $N_{Ed} = 254,95kN$  (Druck)

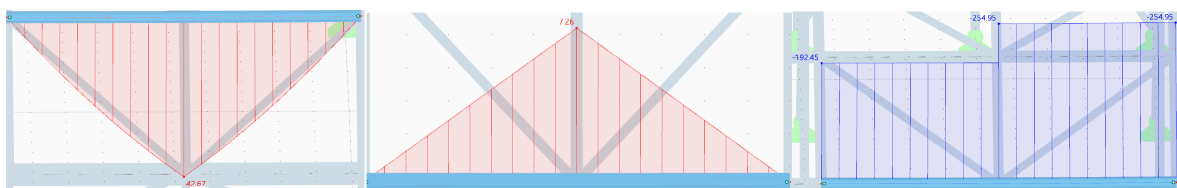


Abbildung 4.9: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $N$  vom Stab 401 bei LK.18

Stab Nr. 347 in Abbildung 4.10 liefert bei LK.5 Momente, die für den Biegedrillknicknachweis maßgeblich sein können:

- $M_{Ed,y} = 111,52 \text{ kNm}$
- $M_{Ed,z} = 20,00 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 5,68 \text{ kN}$  (Zug)

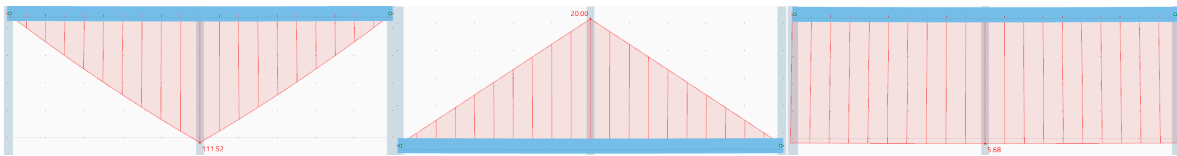


Abbildung 4.10: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $N$  vom Stab 347 bei LK.5

Um die Interaktion bei Stab 347 zu ermöglichen, wurde Normalzugkraft als eine Druckkraft angenommen. Diese Annahme ist jedoch ungünstig und liegt somit auf der sicheren Seite.

Tabelle 4.3: Angaben zum Querschnitt **HEA 280**

$A = 97,30 \text{ cm}^2$	$I_y = 13670,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,y} = 1112,00 \text{ cm}^3$
$h = 270 \text{ mm}$	$I_z = 4760,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,z} = 518,10 \text{ cm}^3$
$b = 280 \text{ mm}$	$I_t = 62,10 \text{ cm}^4$	KL $\perp$ yy*) b
QK N und $M_y$ $M_z$ 1	$I_w = 785400 \text{ cm}^6$	KL $\perp$ zz*) c
$N_{pl,Rd} = 2287,00 \text{ kN}$	$M_{y,pl,Rd} = 261,30 \text{ kNm}$	$l_0 = 5,00 \text{ m}$

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Pos.2

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 4760,00 \text{ cm}^4}{(500 \text{ cm})^2} = 3946,26 \text{ kN}$$

$$E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{97,3 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{3946,26 \text{ kN}}} = 0,76$$

QK 1 Biegelinie c

$$N_{b,z,Rd} = 0,69 \cdot 97,3 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 1434,29 \text{ kN}$$

$$\chi = 0,69$$

Stab 401 mit  $N_{Ed} = 254,95 \text{ kN}$

$$n_z = \frac{254,95 \text{ kN}}{1434,29 \text{ kN}} = 0,18 \checkmark$$

Stab 347 mit  $N_{Ed} = 5,08 \text{ kN}$

$$n_z = \frac{5,08 \text{ kN}}{1434,29 \text{ kN}} = 0,003 \checkmark$$

Am Ende zeigt sich, dass Stab Nr. 347 bei LK.5 die maßgebenden Schnittgrößen aufweist.

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Pos.2

$$N_{cr,z} = 3946,26 \text{ kN} \quad M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 1193,98 \text{ kNm}$$

$$\zeta = 1,77 \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,47$$

$$c^2 = 292,2 \text{ cm}^2 \quad z_p = 0 \text{ cm}$$

$$\chi = 0,975 \quad M_{b,y,Rd} = 231,62 \text{ kNm}$$

$$\text{Stab 401} \quad m_z = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} = 0,00007 \quad m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,18 \checkmark$$

$$\text{Stab 347} \quad m_z = \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,pl,Rd}} = 0,18 \quad m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,48 \checkmark$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z \leq 1,0 \quad C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,6$$

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left[ 1 + (2 \cdot \overline{\lambda}_z - 0,6) \cdot n_z \right] \leq C_{mz} \cdot \left[ 1 + 1,4 \cdot n_z \right]$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,1 \cdot \overline{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right]$$

$$\text{Stab 401:} \quad k_{zz} = 0,700 \quad k_{zy} = 0,98 \quad 0,18 + 0,98 \cdot 0,18 + 0,7 \cdot 0,0007 = 0,357 < 1 \checkmark$$

$$\text{Stab 347:} \quad k_{zz} = 0,601 \quad k_{zy} = 0,99 \quad 0,003 + 0,99 \cdot 0,48 + 0,601 \cdot 0,18 = 0,586 < 1 \checkmark$$

### Stabilitätsnachweis Pos.3.1

Die Koppelstäbe erhalten durch den Dachverband zusätzliche Druckkräfte, die zu einem größeren Profil führen. Die Knicklänge der Koppelstäbe ist entlang beider Achsen gleich, obwohl sie entlang des Bogens unterschiedlich lang sind. Der Knicknachweis wird entlang der schwächeren Achse durchgeführt. Die Profilangaben können Tabelle 4.3 entnommen werden. Nach der Suche des maßgeblich beanspruchten Stabs ergab sich Folgendes:

Stab Nr. 482 LK.18 in Abbildung 4.11:

- $M_{Ed} = 31,88 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 374,38 \text{ kN}$  (Druck)
- $l_0 = 5,095 \text{ m}$

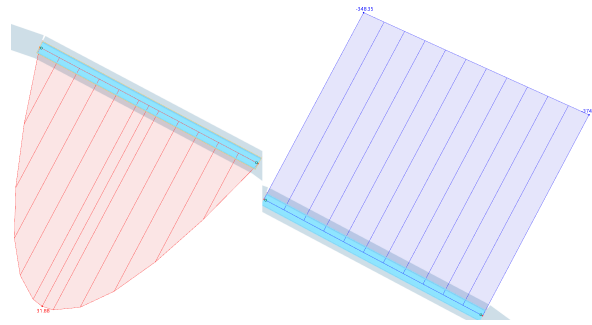


Abbildung 4.11: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 482 bei LK.18

Stab Nr. 483 LK.20 in Abbildung 4.12:

- $M_{Ed} = 33,25 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 316,48 \text{ kN}$  (Druck)
- $l_0 = 5,575 \text{ m}$

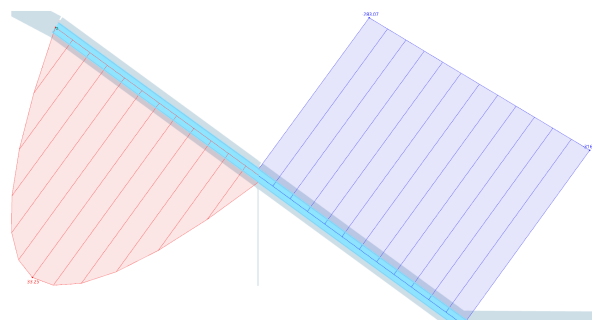


Abbildung 4.12: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 483 bei LK.20

### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Pos.3.1

$$N_{cr,z,482} = 3800,47 \text{ kN}$$

$$N_{cr,z,483} = 3174,21 \text{ kN}$$

$$\overline{\lambda}_{z,482} = 0,775$$

$$\overline{\lambda}_{z,483} = 0,85$$

$$\chi_{482} = 0,68$$

$$\chi_{483} = 0,635$$

$$N_{b,z,Rd,482} = 1413,5 \text{ kN}$$

$$N_{b,z,Rd,483} = 1319,96 \text{ kN}$$

$$\text{Stab 482 mit } N_{Ed} = 367,77 \text{ kN}$$

$$n_z = \frac{367,77 \text{ kN}}{1413,5 \text{ kN}} = 0,26 \checkmark$$

$$\text{Stab 483 mit } N_{Ed} = 321,37 \text{ kN}$$

$$n_z = \frac{321,37 \text{ kN}}{1319,96 \text{ kN}} = 0,24 \checkmark$$

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Pos.3.1

$N_{cr,z,482} = 3800,47kN$	$N_{cr,z,483} = 3174,21kN$
$M_{cr,482} = 272,867kNm$	$M_{cr,483} = 265,751kNm$
$z_p = 0cm$	$z_p = 0cm$
$c^2 = 297,08cm^2$	$c^2 = 323,14cm^2$
$\zeta = 1,12$	$\zeta = 1,12$
$\overline{\lambda}_{LT,482} = 0,98$	$\overline{\lambda}_{LT,483} = 0,99$
$\chi_{482} = 0,715$	$\chi_{483} = 0,71$
$M_{b,y,Rd,482} = 169,86kNm$	$M_{b,y,Rd,48} = 168,67kNm$
Stab 482 mit $M_{Ed} = 31,88kNm$ : $m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,188 \checkmark$	
Stab 483 mit $M_{Ed} = 33,25kNm$ : $m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,197 \checkmark$	

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y \leq 1,0 \quad C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,95$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,1 \cdot \overline{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT}-0,25)} \cdot n_z \right]$$

**Stab 482:**  $k_{zy} = 0,971 \quad 0,26 + 0,971 \cdot 0,188 = 0,44 < 1 \checkmark$

**Stab 483:**  $k_{zy} = 0,971 \quad 0,24 + 0,971 \cdot 0,197 = 0,43 < 1 \checkmark$

Obwohl der Unterschied sehr klein ist, wird Stab Nr. 482 trotz seiner geringeren Länge mehr als Stab 483 ausgenutzt.



### Stabilitätsnachweis Pos.3.2

Im Fall von Pos. 3.2 ist der maßgebende Stab leichter zu erkennen. Wie bei Pos. 3.1 wird der Stabilitätsnachweis gegen das Knicken um die schwächere Achse geführt. Hierbei handelt es sich um Stab Nr. 474 in Abbildung 4.13 mit einer Länge von  $L = 5,575 \text{ m}$  und Schnittgrößen von LK.18.

- $M_{Ed} = 31,55 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 148,82 \text{ kN}$  (Druck)
- $l_0 = 5,575 \text{ m}$

Tabelle 4.4: Angaben zum Querschnitt **HEA 200**

$A = 53,80 \text{ cm}^2$	$I_y = 3690,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,y} = 429,50 \text{ cm}^3$
$h = 190 \text{ mm}$	$I_z = 1340,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,z} = 203,80 \text{ cm}^3$
$b = 200 \text{ mm}$	$I_t = 21,00 \text{ cm}^4$	KL $\perp yy^*$ ) b
QK N und $M_y M_z$ 1	$I_w = 108000 \text{ cm}^6$	KL $\perp zz^*$ ) c
$N_{pl,Rd} = 1264,00 \text{ kN}$	$M_{y,pl,Rd} = 100,9 \text{ kNm}$	

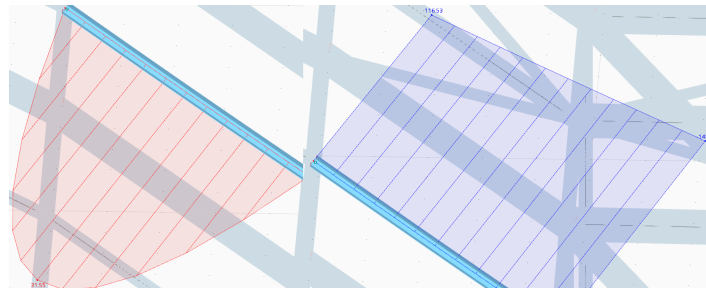


Abbildung 4.13: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 474 bei LK.18

### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Pos.3.2

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 1340,00 \text{ cm}^4}{(557,5 \text{ cm})^2} = 893,58 \text{ kN}$$

$$f_y = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}; \quad E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{53,80 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{893,58 \text{ kN}}} = 1,19$$

$$\chi = 0,44$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,44 \cdot 53,80 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 505,72 \text{ kN}$$

$$n_z = \frac{148,82 \text{ kN}}{505,72 \text{ kN}} = 0,29 \checkmark$$

QK 1 Biegelinie c

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Pos.3.2

$$N_{cr,z} = 893,58 \text{ kN}$$

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 164,62 \text{ kNm}$$

$$\zeta = 1,12$$

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,78$$

$$c^2 = 270,56 \text{ cm}^2$$

$$z_p = 0 \text{ cm}$$

$$\chi = 0,83$$

$$M_{b,y,Rd} = 76,16 \text{ kNm}$$

$$\text{Stab 474 mit } M_{Ed} = 31,55 \text{ kNm} \quad m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,414 \checkmark$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z \leq 1,0$$

$$C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,95$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,1 \cdot \overline{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \quad k_{zy} = 0,96$$

$$\text{Stab 482:} \quad 0,29 + 0,96 \cdot 0,414 = 0,687 < 1 \checkmark$$

Der Nachweis der Koppelstäbe ist somit abgeschlossen. Dabei wurde eine maximale Ausnutzung des Stabs 474 mit dem HEA200 Profil von  $\eta = 0,69$  erreicht.

### 4.1.3 Bemessung des Dachverbandes

Der Dachverband spielt eine zentrale Rolle bei der Sicherstellung der Stabilität seitlicher Bauelemente sowie des Bogenträgers, indem er diese gegen die in Hallenrichtung wirkenden Lasten abstützt. Die Dimensionierung des Dachverbandes basiert auf dem Verfahren des Ersatzstabes, wobei ein spezieller Nachweis zur Vermeidung von Biegedrillknicken nicht notwendig ist. Dies liegt daran, dass die Stabilisierung des Daches ausschließlich durch die Verwendung von Fachwerkstäben erfolgt, wobei das einzige Moment der Stäbe durch ihr Eigengewicht entsteht und somit als minimal betrachtet werden kann.

Für die strukturelle Verstärkung des Daches kommt ein K-Verband zum Einsatz. Interessant bei der Implementierung des K-Verbandes ist die Frage, ob die Verstärkung primär durch Druck- oder Zugkräfte erfolgt. In einer bestimmten Konfiguration, analog zu Abbildung 3.6, wird die Verstärkung vorwiegend durch Druckkräfte erreicht.

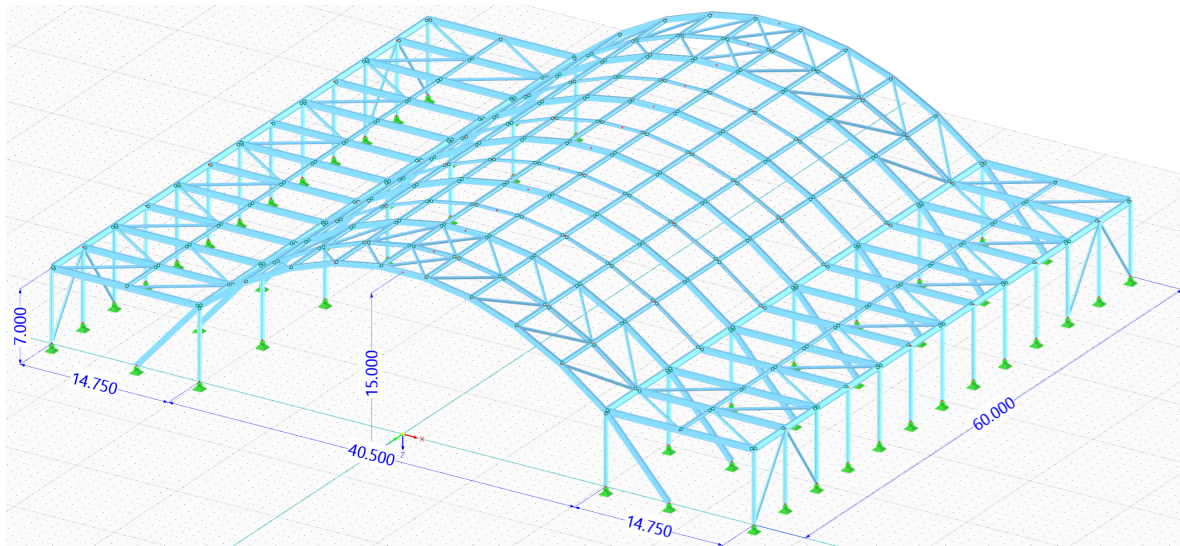


Abbildung 4.14: RFEM Modell modifizierter Dachverband

Im Gegensatz dazu führt eine umgekehrte Anordnung, wie in Abbildung 4.14 dargestellt, zu einer vorrangigen Aussteifung durch Zugkräfte. Für beide Szenarien werden Stabilitätsprüfungen durchgeführt, wobei die zweite Variante bevorzugt wird. Dies liegt daran, dass die Tragfähigkeit der Stäbe bei der Stabilitätsüberprüfung durch ihre Schlankheit reduziert wird. Die gewählte Konfiguration begünstigt kürzere und damit weniger schlanke Stäbe, die unter Druck stehen. Als Materialprofil wurde ein warmgefertigter Celsius 355 CHS 219.1x16 ausgewählt.

Im Kontext des Dachverbandes, der in der Konstruktion des Bogenträgers integriert ist, wird der Stab Nr. 575 unter der Lastkombination LK.18 mit der Konfiguration wie in Abbildung 3.6 am stärksten belastet. Die Schnittgrößen sind in Abbildung 4.15 dargestellt.

Die Angaben vom Stab Nr. 575 für LK18 sind:

- $N_{Ed} = 402,81kN$  (Druck)
- $l_0 = 7,488m$

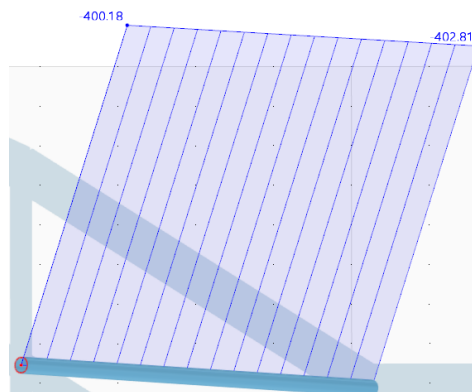


Abbildung 4.15: Normalkraft  $N$  vom Stab 575 bei LK.18

Tabelle 4.5: Angaben zum Querschnitt **CHS 219.1x16**

$A = 102,00cm^2$	$I_{y,z} = 5297,00cm^4$	$W_{pl} = 661,00cm^3$
$d = 219,10mm$	$I_t = 10593,00cm^4$	KL $\perp$ zz*) a
$t = 16,00mm$	QK N und $M_y$ $M_z$ 1	KL $\perp$ yy*) a
$N_{pl,Rd} = 2398,229kN$	$M_{pl,Rd} = 155,25kNm$	

### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren

#### vom Dachverband im Bogenträger mit Anordnung nach 3.6

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 5297,00cm^4}{(748,8cm)^2} = 1958,00kN$$

$$f_y = 23,5 \frac{kN}{cm^2}; \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\phi = 1,207$$

$$\overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{102,00cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1958,00kN}} = 1,106$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,592 \cdot 102,00cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 1289,37kN$$

$$n_z = \frac{402,81kN}{1289,37kN} = 0,312 \checkmark$$

$$QK 1 \quad \text{Biegelinie a}$$

$$\chi = 0,592$$

Wenn die Anbauweise gemäß Abbildung 4.14 durchgeführt wird, sind weitere Stabilitätsnachweise nicht erforderlich.

In den seitlichen Bauteilen wird derselbe Querschnitt zur Aussteifung des Daches genutzt. Diese Bauteile sind länger und müssen hinsichtlich ihrer Standsicherheit untersucht werden. Dabei sind Stäbe Nr. 605 und 606 bei LK.2, wie in Abbildung 4.16 zu untersuchen mit:

- $N_{Ed} = 147,14 \text{ kN}$  (Druck)
- $l_0 = 8,91 \text{ m}$

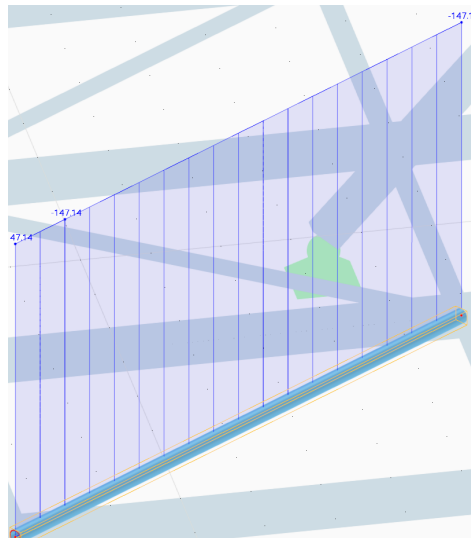


Abbildung 4.16: Normalkraft  $N$  vom Stab 605 und 606 bei LK.2

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Dachverband (seitliche Bauteil)

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 5297,00 \text{ cm}^4}{(891,00 \text{ cm})^2} = 1382,91 \text{ kN} \quad f_y = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}; \quad E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

QK 1 Biegelinie a

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{102,00 \text{ cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1382,91 \text{ kN}}} = 1,32$$

$$\chi = 0,46$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,46 \cdot 102,00 \text{ cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 1002,38 \text{ kN} \quad n_z = \frac{125,06 \text{ kN}}{1002,38 \text{ kN}} = 0,15 \checkmark$$

Der Dachverband wird entlang des seitlichen Bauteils außenseitig verbaut. Die Entscheidung dafür wird in Abschnitt 4.1.5 bei Nachweis der Pfetten genauer erläutert.

#### 4.1.4 Bemessung des Wandverbandes

Der Wandverband wird auf Stabilität geprüft, indem das Ersatzimperfectionsverfahren angewendet wird. Hierbei wird LF.10 genutzt, um eine Imperfektion zu erzeugen. Dabei wird eine statische Verformung in Form einer globalen Anfangsschiefstellung gewählt.

Zur Erzeugung dieser Imperfektion und zur Berücksichtigung in der Rechnung werden ähnliche Schritte wie bei der Berechnung des Bogenträgers durchgeführt. Bei einer Anfangsschiefstellung mit einem Ausgangswinkel von  $\phi_0 = \frac{1}{200}$  ergibt sich eine Imperfektionsstimaßzahl von  $\delta = \frac{15m}{200} = 0,075m$ . Nach Berücksichtigung der Imperfektion und Durchführung der Berechnungen nach Theorie II. Ordnung wird für den maßgebenden Stab ein Querschnittsnachweis durchgeführt.

Stab Nr. 569 bei LK.6 dargestellt in Abbildung 4.17 ist maßgebend mit einer Druckkraft von:

- $N = 192,09kN$  (Druck)

Die Wandverbände sind als Fachwerkstäbe angeschlossen, wodurch die Normalkraft die einzige maßgebende Belastung ist.

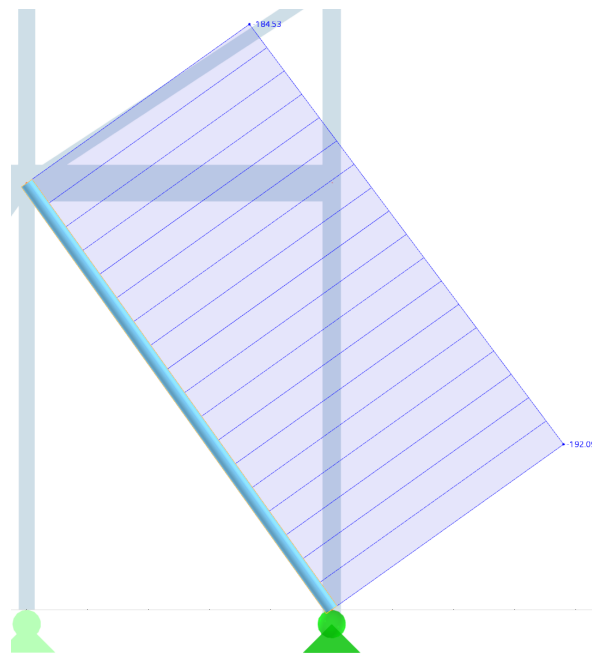


Abbildung 4.17: Schnittgrößen  $N$  vom Stab 569 bei LK.6

$$N_{Ed} = 192,09kN \quad N_{pl,Rd} = 102,00 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 2264,54kN$$

$$\eta = 0,08 \checkmark$$

Der Stabilitätsnachweis für den Wandverband ist somit erfüllt.

#### 4.1.5 Bemessung der seitlichen Bauteile

Die Dach- und Wandverbände der seitlichen Bauteile sind bereits nachgewiesen. Die seitlichen Pfetten, mittleren Koppelstäbe, Stützen und Träger müssen noch hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit überprüft werden. Die Nachweise werden mithilfe des Ersatzstabverfahrens durchgeführt.

##### Nachweis Stützen

Die seitlichen Bauteile wurden ursprünglich so entworfen, dass die vertikalen Lasten von der außenstehenden Stütze und dem Bogen aufgenommen werden können. Aufgrund der Windsogkräfte, die am Anbindungspunkt der seitlichen Bauteile mit dem Bogen wirken, wird eine Verschiebung nach oben des Anbindungspunktes erwartet. Die Simulation in RFEM bestätigt diese Erwartung, weshalb eine Innenstütze eingebaut wurde, um diese Wirkung zu beseitigen. Die Ergebnisse der Lösung sind in der Abbildung 4.18 zu sehen. Zunächst werden die Stützen nach ihrer Tragfähigkeit überprüft.

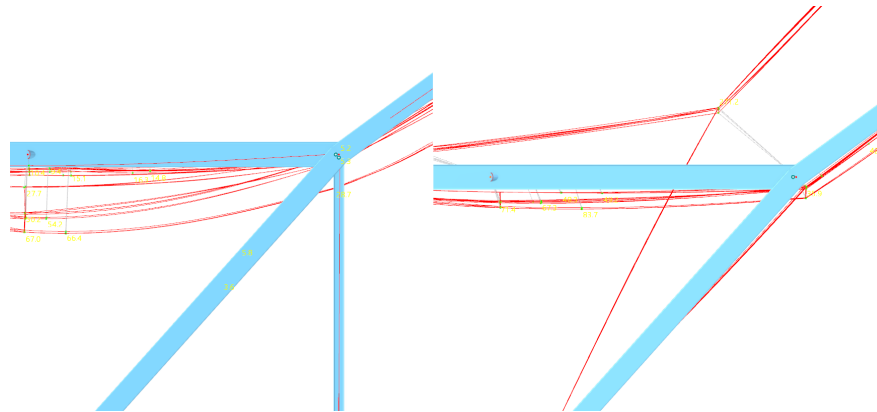


Abbildung 4.18: Verschiebung der Anbindungspunkt vom Seitlichen Bauteil zum Bogen. (Links) mit Einbau der Stütze; (Rechts) Ohne Einbau der Stütze.

Tabelle 4.6: Angaben zum Querschnitt **HEA 260**

$A = 86,80m^2$	$I_y = 10450,00cm^4$	$W_{pl,y} = 919,80cm^3$
$h = 250mm$	$I_z = 3670,00cm^4$	$W_{pl,z} = 430,20cm^3$
$b = 260mm$	$I_t = 52,40cm^4$	KL $\perp yy^*)$ b
QK N und $M_y M_z$ 1	$I_w = 516400cm^6$	KL $\perp zz^*)$ c
	$M_{y,pl,Rd} = 216,20kNm$	$N_{pl,Rd} = 2040,00kN$

Die maßgebende Innenstütze darstellt in Abbildung 4.19 ist Stab Nr. 250 bei LK. 5 mit:

- $N_{Ed} = 372,22kN$  (Druck)
- $l_0 = 7,00m$

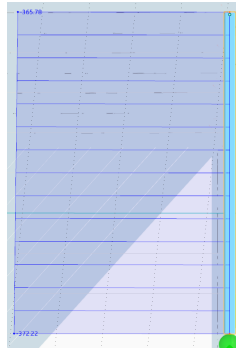


Abbildung 4.19: Schnittgrößen  $N$  vom Stab 250 bei LK.5

Die maßgebende Außenstütze dargestellt in Abbildung 4.20 ist Stab Nr. 214 bei LK. 2 mit:

- $M_{Ed} = 50,01$
- $N_{Ed} = 39,19kN$  (Druck)
- $l_0 = 7,00m$

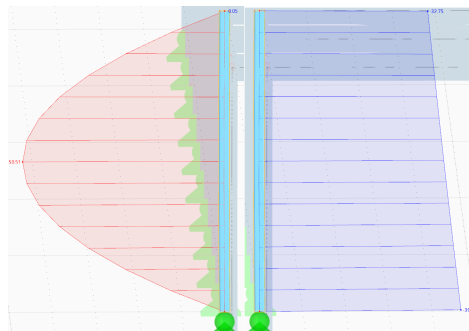


Abbildung 4.20: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 214 bei LK.2

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Stütze HEA 260

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 3670,00 cm^4}{(700,0 cm)^2} = 1552,35 kN$$

$$f_y = 23,5 \frac{kN}{cm^2}; \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

QK 1 Biegelinie c

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{86,80 cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1552,35 kN}} = 1,15$$

$$\chi = 0,46$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,46 \cdot 86,80 cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 908,64 kN$$

$$n_{z,214} = \frac{39,19 kN}{908,64 kN} = 0,04 \checkmark$$

$$n_{z,250} = \frac{372,22 kN}{908,64 kN} = 0,41 \checkmark$$



### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Stütze

$$\begin{aligned}
 N_{cr,z} &= 1552,35 \text{ kN} & M_{cr} &= \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 353,54 \text{ kNm} \\
 \zeta &= 1,12 & \overline{\lambda}_{LT} &= \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,78 \\
 c^2 &= 413,56 \text{ cm}^2 & z_p &= 0 \text{ cm} \\
 \chi &= 0,83 & M_{b,y,Rd} &= 163,10 \text{ kNm} \\
 m_{y,214} &= \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,00 \checkmark & m_{y,250} &= \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,31 \checkmark
 \end{aligned}$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z \leq 1,0 \quad C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,95$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,01 \cdot \overline{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right]$$

$$\text{Stab 250} \quad k_{zy} = 0,94 \quad 0,41 + 0,94 \cdot 0 = 0,41 \checkmark$$

$$\text{Stab 214} \quad k_{zy} = 0,99 \quad 0,04 + 0,99 \cdot 0,31 = 0,35 \checkmark$$

### Nachweis Pfetten

In diesem Abschnitt wird der Nachweis der Pfetten erbracht. Es wird zwischen äußeren und inneren Pfetten unterschieden. Durch den außenseitigen Bau des Dachverbandes entlang des seitlichen Bauteils wird eine horizontale Auflagerung der Pfetten erreicht und somit die Knicklänge auf  $l_0 = 5m$  verkürzt. Durch die Stützung jedes Belastungspunktes bei den Außenpfetten entstehen keine maßge-

Tabelle 4.7: Angaben zum Querschnitt **IPE 600**

$A = 156,00 \text{ m}^2$	$I_y = 92080,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,y} = 3512,00 \text{ cm}^3$
$h = 600 \text{ mm}$	$I_z = 3390,00 \text{ cm}^4$	$W_{pl,z} = 485,60 \text{ cm}^3$
$b = 220 \text{ mm}$	$I_t = 165,00 \text{ cm}^4$	KL $\perp$ yy*) a
QK $M_y$ $M_z$ 1	$I_w = 2846000 \text{ cm}^6$	KL $\perp$ zz*) b
QK N 4	$M_{y,pl,Rd} = 825,3 \text{ kNm}$	$N_{pl,Rd} = 3666,00 \text{ kN}$

benden Momente. In diesem Fall ist lediglich der Nachweis gegen Knicken relevant. Als maßgebende Außenpfette gilt der Stab Nr. 404 bei LK.6 dargestellt in Abbildung 4.21 mit:

- $N_{Ed} = 173,04kN$  (Druck)
- $l_0 = 5,00m$

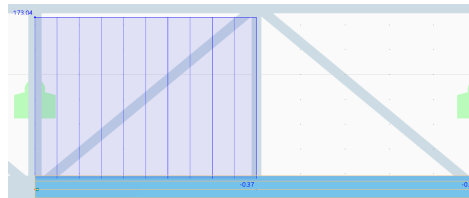


Abbildung 4.21: Schnittgrößen  $N$  vom Stab 404 bei LK.6

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Außenpfette IPE 600

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 3390,00 cm^4}{(500,0 cm)^2} = 2810,47 kN \quad f_y = 23,5 \frac{kN}{cm^2}; \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{eff} = 152,30 cm^2 \quad QK 4 \quad \text{Biegelinie b}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{152,30 cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{2810,47 kN}} = 1,13 \quad \chi = 0,58$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,58 \cdot 152,30 cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 1887,13 kN \quad n_z = \frac{173,04 kN}{1887,13 kN} = 0,1 \checkmark$$

Bei der Innenpfette tritt ein weiteres Phänomen auf, bei dem die Normalkraft vernachlässigbar klein ist und nur das Moment als maßgebende Last wirkt. Daher muss die Innenpfette nur gegen Biegedrillknicken nachgewiesen werden.

Die Stäbe Nr. 384 und 378 bei LK.18 haben dieselben Momentbeanspruchungen dargestellt in Abbildung 4.22 mit:

- $M_{Ed} = 636,96 kNm$
- $l_0 = 5,00m$

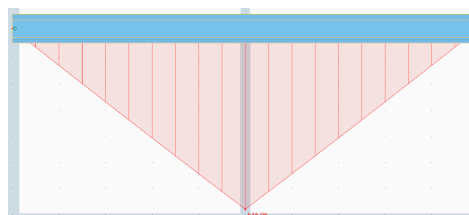


Abbildung 4.22: Schnittgrößen  $M_y$  vom Stab 384 und 378 bei LK.18

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Innenpfette

$$N_{cr,z} = 2810,47 \text{ kN} \quad M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 1803,29 \text{ kNm}$$

$$\zeta = 1,77 \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,68$$

$$c^2 = 1314,09 \text{ cm}^2 \quad z_p = 0 \text{ cm}$$

$$\chi = 0,92 \quad M_{b,y,Rd} = 690,27 \text{ kNm}$$

$$m_y = \frac{M_{y,Ed}}{M_{b,y,pl,Rd}} = 0,924 \checkmark$$

### Trägerbemessung

Durch die Koppelstäbe verkürzt sich die Knicklänge des Trägers auf  $l_0 = 7,375 \text{ m}$ . Die Querschnittsangaben werden aus Tabelle 4.7 entnommen. Bei der Bemessung der Träger ist Stab Nr.415 bei LK.18 von Interesse:

- Stab Nr. 415 bei LK.18 dargestellt in Abbildung 4.23:
  - $M_{Ed} = 439,24 \text{ kNm}$
  - $N_{Ed} = 106,51 \text{ kN}$  (Druck)
  - $l_0 = 7,375 \text{ m}$

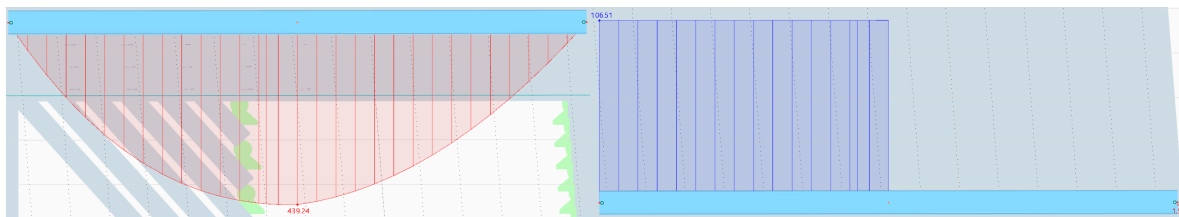


Abbildung 4.23: Schnittgrößen  $M_y$ ,  $N$  vom Stab 415 bei LK.18

### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Träger IPE 600

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 3390,00 cm^4}{(737,5 cm)^2} = 1291,80 kN \quad f_y = 23,5 \frac{kN}{cm^2}; \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$A_{eff} = 152,30 cm^2$$

QK 4 Biegelinie b

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{152,30 cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1291,80 kN}} = 1,66$$

$$\chi = 0,29$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,29 \cdot 152,30 cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 943,57 kN$$

**Stab 415**

$$n_{z,415} = \frac{106,51 kN}{943,57 kN} = 0,113 \checkmark$$

### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken Träger

$$N_{cr,z} = 1291,80 kN \quad M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 989,28 kNm$$

$$\zeta = 1,77 \quad \bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,91$$

$$c^2 = 11871,99 cm^2 \quad z_p = 0 cm$$

$$\chi = 0,92 \quad M_{b,y,Rd} = 618,99 kNm$$

$$\text{Stab 415} \quad m_{y,415} = \frac{439,24 kNm}{618,99 kNm} = 0,71 \checkmark$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y + k_{zz} \cdot m_z \leq 1,0 \quad C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,95$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,05 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,05}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right]$$

$$\text{Stab 415} \quad k_{zy} = 0,992 \quad 0,113 + 0,992 \cdot 0,71 = 0,82 \checkmark$$

### Bemessung Koppelstäbe

Die Koppelstäbe dienen zur Verbindung der Pfetten miteinander und zur Weiterleitung der Lasten in Hallenrichtung an die Dach- und Wandverbände.

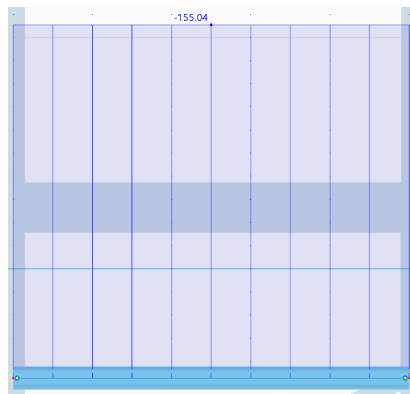
Sie sind hauptsächlich durch Normalkraft beansprucht. Es erfolgt lediglich eine Untersuchung der Koppelstäbe gegen das Knicken.

Tabelle 4.8: Angaben zum Querschnitt **HEA 240**

$A = 76,80\text{cm}^2$	$I_y = 7760,00\text{cm}^4$	$W_{pl,y} = 744,6\text{cm}^3$
$h = 230\text{mm}$	$I_z = 2770,00\text{cm}^4$	$W_{pl,z} = 351,70\text{cm}^3$
$b = 240\text{mm}$	$I_t = 41,60\text{cm}^4$	KL $\perp$ yy*) b
QK $M_y$ $M_z$ 1	$I_w = 328500\text{cm}^6$	KL $\perp$ zz*) c
QK $N$ 4	$M_{y,pl,Rd} = 175,00\text{kNm}$	$N_{pl,Rd} = 1805,00\text{kN}$

Der Stab Nr.505 bei LK.7 dargestellt in Abbildung 4.24 hat folgende Schnittgrößen:

- $N_{Ed} = 155,04\text{kN}$  (Druck)
- $l_0 = 5,00\text{m}$

Abbildung 4.24: Schnittgrößen  $N$  vom Stab 505 bei LK.7

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren Koppelstab HEA 240

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 2770,00\text{cm}^4}{(500,0\text{cm})^2} = 2296,46\text{kN} \quad f_y = 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}; \quad E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$\bar{\lambda}_z = \sqrt{\frac{76,80\text{cm}^2 \cdot 23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{2296,46\text{kN}}} = 0,89 \quad \chi = 0,61$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,61 \cdot 76,80\text{cm}^2 \cdot \frac{23,5 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}}{1,1} = 1000,84\text{kN}$$

**Stab 505**

$$n_z = \frac{155,04\text{kN}}{1000,84\text{kN}} = 0,155 \checkmark$$

Die Bemessung der Koppelstäbe und der tragenden Elemente der Halle ist abgeschlossen. Alle Nachweise wurden erfüllt und die Tragfähigkeit ist gewährleistet.

## 5 Exkurs

Nach Entwurf und Bemessung des Flugzeughangars müssen noch weitere Schritte durchgeführt werden, um das Projekt abzuschließen. Es werden ausschließlich Vorgänge behandelt, die sich auf die Statik beziehen. Im Folgenden werden diese Vorgänge kurz erläutert und einige mögliche Lösungen empfohlen.

### 5.1 Das Fundament

Zunächst wird mit dem Fundament begonnen. Es wird angenommen, dass der Bauherr einen Bodengutachter beauftragt hat, um ein Gutachten über den Boden zu erhalten. Dies ist notwendig, um nicht nur die Tragfähigkeit des Bodens zu bestimmen, sondern auch seine Kontamination.

Es gibt zwei Ausführungsprinzipien für das Fundament des bogenförmigen Flugzeughangers:

1. Das erste ist ein massives Fundament, das der Bogenrichtung folgt und in Abbildung 5.1 dargestellt ist. Das Problem bei einem solchen Fundament besteht darin, dass die horizontalen Lasten nur durch den Boden gesichert werden können. Ohne genauere Angaben zu den Bodeneigenschaften ist der Einbau dieser Art von Fundament aufwendig und kostenintensiv, weshalb davon abgeraten wird.

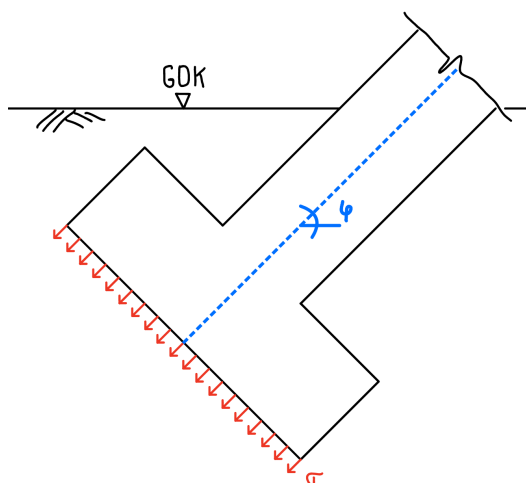


Abbildung 5.1: Streifenfundament das in Richtung des Bogens geneigt ist. [1]



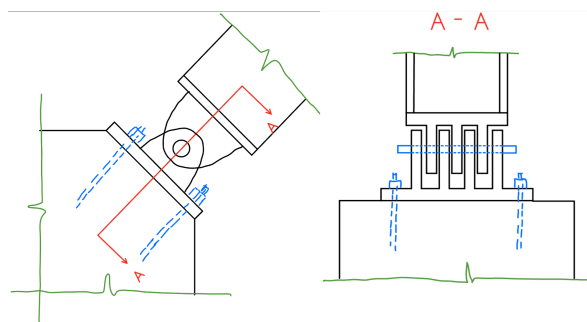


Abbildung 5.4: Anschluss Fundament

ckung niveaugleich darauf gelegt werden kann. In Abbildung 5.5 wird auch der gelenkige Anschluss der Koppelstäbe an die Pfette dargestellt. Zu bemerken ist, dass die Koppelstäbe an der Pfette oberkantig verbunden sind, damit die Dachdeckung niveaugleich darauf gelegt werden kann.

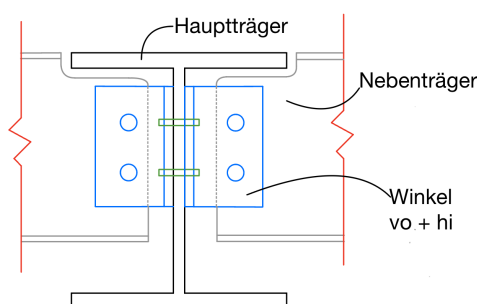


Abbildung 5.5: Anschluss der Koppelstäbe an die Pfette

### 5.3 Brandschutz

Die Bedeutung des Brandschutzes [16] spielt bei der Gewährleistung der Tragsicherheit im Stahlbau eine zentrale Rolle. Um die Tragsicherheit zu gewährleisten, müssen geeignete Brandschutzmaßnahmen getroffen werden. Im Folgenden werden einige Lösungsansätze aufgezeigt, die beim Bau des Hangars Berücksichtigung finden sollten:

1. Brandschutzbeschichtungen: Auftragen von Brandschutzfarben oder -beschichtungen auf Stahlträger und -stützen. Diese Beschichtungen schäumen im Brandfall auf und bilden eine isolierende Schicht, die den Hitzeeintrag verlangsamt.
2. Feuerbeständige Verkleidungen: Ummantelung von Stahlkonstruktionen mit feuerbeständigen Materialien wie Gipskartonplatten, Beton oder speziellen Brandschutzplatten. Diese Verkleidungen schützen den Stahl vor direkter Hitzeeinwirkung.
3. Sprinkleranlagen: Installation von automatischen Sprinkleranlagen, die im Brandfall aktiviert werden, um das Feuer einzudämmen und die Ausbreitung von Flammen zu verhindern.



4. Bauliche Trennungen: Einrichtung von Brandabschnitten durch feuerbeständige Wände und Türen, um die Ausbreitung von Feuer und Rauch zu begrenzen.
5. Auslegung für Feuerwiderstand: Konstruktion der Stahlhalle unter Berücksichtigung der erforderlichen Feuerwiderstandsklassen, was bedeutet, dass die Struktur so ausgelegt ist, dass sie einem Feuer für eine bestimmte Zeit ohne Zusammenbruch standhalten kann.
6. Verwendung von Verbundmaterialien: Einsatz von Verbunddecken und -stützen, die Stahl mit Beton kombinieren, um die Feuerbeständigkeit zu erhöhen.

All diese Ansätze tragen dazu bei, die Tragsicherheit von Stahlkonstruktionen im Brandfall zu gewährleisten und somit das Risiko von Personen- und Sachschäden zu minimieren. Es ist wichtig, dass schon in der Planungsphase eines Bauvorhabens umfassende Brandschutzkonzepte entwickelt und umgesetzt werden, um die Sicherheit und Langlebigkeit der Struktur zu garantieren.

## 6 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde der Entwurf und die Bemessung einer Flugzeughalle mit Bogentragwerk am Hamburger Flughafen für die Redwings GmbH erarbeitet. Der Fokus richtete sich darauf, eine Konstruktion zu entwickeln, die sowohl hohe funktionale als auch ästhetische Ansprüche erfüllt, während sie gleichzeitig auf Nachhaltigkeit und Effizienz ausgerichtet ist. Durch die Anwendung der grafischen Statik und fortgeschrittener Berechnungsmethoden in der Software RFEM ist eine Annäherung an eine optimale Form des Bogentragwerks erreicht worden. Diese ermöglicht eine effiziente Lastabtragung unter Berücksichtigung verschiedener Belastungsszenarien wie Wind- und Schneelasten.

Die Verwendung von Simulationen und Flächenlasten wurde der Verwendung von Linienlasten vorgezogen, da sie ein besseres Verständnis der einzelnen Schritte, wie Lasten auf ein System einwirken, und der separat zu betrachtenden Punkte ermöglichen. Die Vereinfachung von 3D-Systemen zu 2D-Systemen unter Berücksichtigung von Steifigkeiten und Lagerungsbedingungen ist erforderlich, um sicherzustellen, dass keine Lastinformationen verloren gehen und die berechneten Beanspruchungen korrekt sind. Diese Annahmen sind ebenfalls notwendig, um gewünschte Rückrechnungen durchführen zu können, wodurch die Herkunft einiger Beanspruchungen nachvollziehbar wird. Ein Beispiel hierfür wird im Kapitel 7.1 erläutert.

Die Arbeit hat gezeigt, dass die sorgfältige Formfindung und iterative Optimierung des Bogenträgers entscheidend für die Effizienz des gesamten Tragwerks sind. Die Entwicklung des Kraftpolygons und dessen Anpassung in mehreren Iterationsschritten waren ausschlaggebend, um eine Form zu finden, die die auftretenden Lasten primär durch axiale Druckkräfte abträgt, was die Wahl geschickter Querschnitte ermöglicht. Obwohl eine genauere Lösung durch mathematische Näherungsverfahren möglich wäre, ist die Genauigkeit für die praktische Anwendung leider nicht erreichbar.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit war die detaillierte Analyse der auf den Hangar einwirkenden Lasten. Obwohl der Bogenträger für vertikalsymmetrische Lasten, hauptsächlich das Eigengewicht, entworfen wurde, wirken Wind und Schnee antisymmetrisch und asymmetrisch. Dadurch sind Momente im Bogenträger unvermeidbar. Um den Bogenträger hinsichtlich seiner Tragfähigkeit zu bemessen und nachzuweisen, war ein gesonderter Ansatz erforderlich. Mit Hilfe der Theorie II. Ordnung und einer maßgeblichen Eigenform konnten die maßgebenden Schnittgrößen ermittelt und die Tragfähigkeit entsprechend nachgewiesen werden. Die Eigenform dient dazu, eine Imperfektion

im System zu deuten. Auf dieser Basis können die Beanspruchungserhöhungen mit Hilfe der Theorie II. Ordnung bis zu dem Punkt berechnet werden, an dem die Zunahme der Beanspruchung nicht mehr erkennbar ist.

Die Theorie II. Ordnung wurde auch für den Nachweis der Wandscheiben verwendet. Für die Ermittlung der Imperfektion wurden die Windlasten in Hallenrichtung angesetzt. Alle anderen Bauteile wurden mit Verfahren nachgewiesen, die die Tragfähigkeit der jeweiligen Tragelemente reduzieren, ohne eine Erhöhung der Schnittgrößen nach Theorie II. Ordnung zu verlangen.

Die Bemessung der einzelnen Bauteile wie Bogenträger und Pfetten wurde detailliert dargestellt. Dies umfasste die Auswahl geeigneter Materialien und Querschnitte sowie die Berechnung der notwendigen Verstärkungen, um die Langlebigkeit und Funktionalität der Halle zu gewährleisten. Zudem wurde auf die Aspekte des Brandschutzes und der Wartungsfreundlichkeit eingegangen, die für die Sicherheit des Bauwerks von entscheidender Bedeutung sind.

Abschließend bietet diese Bachelorarbeit eine fundierte Basis für die Konstruktion ähnlicher Strukturen und leistet einen wichtigen Beitrag zur Forschung im Bereich der Bogenstrukturen im Bauingenieurwesen. Die Nutzung von alten Methoden die es seit Jahrzehnten gibt und Grund für atemraubende Strukturen sind, war ein wichtiger Bestandteil für den Entwurf der Hauptstruktur. Die Ergebnisse dieser Arbeit könnten als Referenz für zukünftige Projekte dienen, die ähnliche Herausforderungen und Anforderungen aufweisen.

## 7 Ausblick

Bei fast allen Bauprojekten sehen die ersten Entwurfspläne ganz anders aus als die Pläne, die später gebaut werden. Dies zeigt, dass während des Planungs- oder Bauprozesses aus Gründen der Umwelt, der Kosten und der Optimierung vieles geändert, optimiert oder weggelassen wird. Auch dieses Projekt bildet hier keine Ausnahme. Eine Lösung und mögliche Optimierung wird im nächsten Abschnitt vorgestellt.

### 7.1 Zwischenbogen

Eine Stelle, die optimiert werden kann, ist der Zwischenbogen des Dachverbandes. Der Dachverband belastet auch den Zwischenbogen, was zu einem unerwünschten Kraftfluss führt. Aus diesem Grund wurden die beiden Zwischenbögen mit einem druckfesteren Profil ausgeführt, wodurch das Problem gelöst werden konnte. Die Zwischenbögen dienen dazu, die Spannweite von Bogen zu Bogen zu verringern, um das Stahltrapezprofil einbauen zu können. Es gibt verschiedene Lösungen, um den unerwünschten Druck zu beseitigen und die Kräfte in die Bögen einzuleiten. Eine Möglichkeit besteht

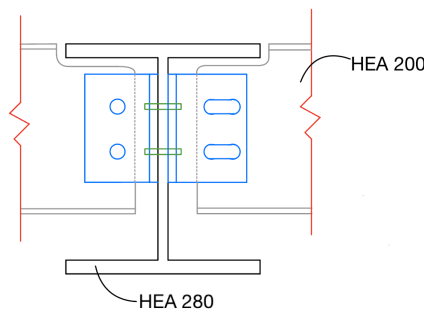


Abbildung 7.1: Trägeranschluss mit Langlöchern

darin, einseitig ein Normalkraftgelenk bei der Anbindung der Koppelstäbe an die Pfetten zu verwenden. Dies kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Zum einen kann dies durch die Verwendung ovaler Löcher, wie in Abbildung 7.1 dargestellt, oder durch einen aufwändigeren Aufbau mithilfe eines Pendelstabes erfolgen. Dies ermöglicht eine bessere Annäherung eines Normalkraftgelenks, wie in Abbildung 7.2 abgebildet ist.

Auf diese Weise wird der Kraftfluss nicht mehr von den Zwischenbögen, sondern den Bogenträgern aufgenommen. Die Ergebnisse der folgenden Lösung lassen sich in RFEM darstellen. Abbildung 7.3

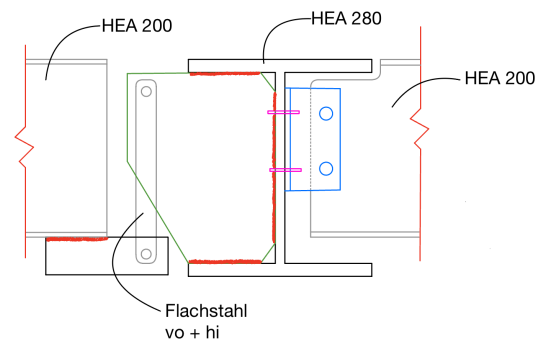


Abbildung 7.2: Trägeranschluss mittels Pendelstab

zeigt die Darstellung der Normalkräfte in den Zwischenbögen vor dem Einbau des Normalkraftgelenks.

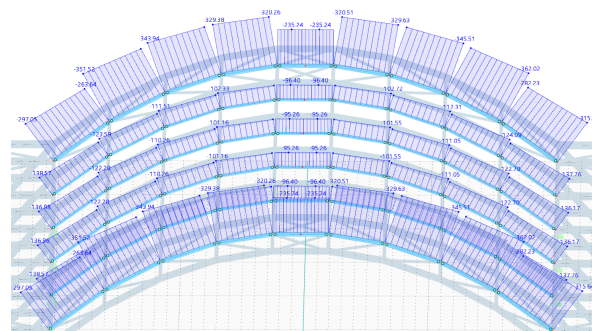


Abbildung 7.3: Normalkraft bei den Zwischenbogenträgern vor dem Einbau der Normalkraftgelenke

Nach dem Einbau der Normalkraftgelenke werden die Zwischenbögen entlastet, wie in Abbildung 6.4 dargestellt. Diese Lösung ändert den Kraftfluss in gewünschter Weise. Allerdings sind Nebenwirkungen für die benachbarten tragenden Elemente zu erwarten, da die Pfetten, die die Bögen verbinden, stärker belastet werden.

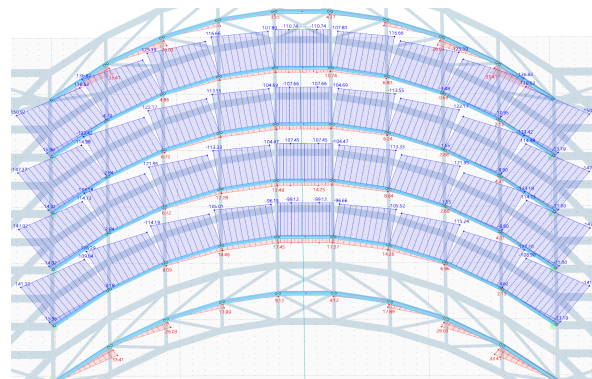


Abbildung 7.4: Normalkraft bei den Zwischenbogenträgern nach dem Einbau der Normalkraftgelenke

Durch das Einfügen des Normalkraftgelenks an den Koppelstäben verlieren die Pfetten ihre horizontale

Sicherung. Dadurch ergibt sich ein neuer Abstand der Gabellagerung von  $l_0 = 10m$  statt  $5m$ . Bei einem Gabellagerungsabstand von  $5m$  ist der Belastungsanstieg nicht von großer Bedeutung. Es ist jedoch erforderlich, die Stabilität der Pfetten aufgrund der neuen Lagerungsbedingungen erneut zu überprüfen. Durch Verwendung der neuen Schnittgrößen kann Stab Nr. 395 bei LK.18 als maßgebend identifiziert werden.

- $M_{Ed} = 158,19kNm$
- $N_{Ed} = 133,92kN$  (Druck)

Basierend auf den Querschnittswerten in Tabelle 4.3 werden die Pfetten erneut auf ihre Stabilität untersucht.

#### Stabilitätsnachweis nach Ersatzstabverfahren

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 4760,00cm^4}{(1000cm)^2} = 986,56kN \quad E = 21000 \frac{kN}{cm^2}$$

$$\overline{\lambda}_z = \sqrt{\frac{97,3cm^2 \cdot 23,5 \frac{kN}{cm^2}}{986,56kN}} = 1,52 \quad \text{QK 1 Biegelinie c}$$

$$N_{b,z,Rd} = 0,31 \cdot 97,3cm^2 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} = 644,4kN \quad \chi = 0,31$$

$$\text{Stab 395 mit } N_{Ed} = 133,92kN \quad n_z = \frac{133,92kN}{644,4kN} = 0,21 \checkmark$$

#### Stabilitätsnachweis gegen Biegedrillknicken

$$N_{cr,z} = 986,56kN \quad M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr,z} \cdot \left[ \sqrt{(c^2 + 0,25 \cdot z_p^2)} + 0,5 \cdot z_p \right] = 345,72kNm$$

$$\zeta = 1,35 \quad \overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{M_{cr}}} = 0,47$$

$$c^2 = 673,80cm^2 \quad z_p = 0cm$$

$$\chi = 0,78 \quad M_{b,y,Rd} = 185,30kNm$$

$$\text{Stab 395} \quad m_y = \frac{158,19kNm}{185,3kNm} = 0,85 \checkmark$$

### Interaktion

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y \leq 1,0$$

$$C_{my}, C_{mz} \quad \text{und} \quad C_{mL} = 0,95$$

$$k_{zy} = \left[ 1 - \frac{0,1 \cdot \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right] \geq \left[ 1 - \frac{0,1}{(C_{mLT} - 0,25)} \cdot n_z \right]$$

**Stab 395:**  $k_{zy} = 0,97 \quad 0,21 + 0,97 \cdot 0,85 = 1,03 > 1 \quad \nabla$

Es ist eine Überlastung von 3 Prozent der Tragfähigkeit des Querschnitts zu erkennen. Bei dem gewählten HEA 280 Querschnitt darf gemäß [12] eine weitere querschnittsbedingte Abminderung berücksichtigt werden.

### Interaktion nach Abminderung

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \leq 1,0 \quad f = 1 - 0,5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2,0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$$

$$f = 0,93 \quad k_c = 0,86 \quad m_y = \frac{158,19 kNm}{199,55 kNm} = 0,793$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0,78}{0,93} = 0,84 \quad M_{b,Rd} = 0,84 \cdot 1112 cm^3 \cdot \frac{23,5 \frac{kN}{cm^2}}{1,1} \cdot \frac{1}{100} = 199,55 kNm$$

**Stab 395:**  $k_{zy} = 0,97 \quad 0,21 + 0,97 \cdot 0,793 = 0,98 \leq 1 \quad \checkmark$

Mit Hilfe der Abminderung ist der Nachweis der Stabilität erfüllt, obwohl die Tragfähigkeit der Pfette fast vollständig ausgenutzt ist.

Eine alternative Lösung wäre die Änderung der Anordnung des Dachverbands, wie in Abbildung 7.5 dargestellt. Die Dachverbände leiten die Kräfte hauptsächlich in Hallenrichtung, im Wandverband oder im Bogen und somit in den Boden weiter. Durch ihre geneigte Bauweise, die die Bogenform hervorruft, werden auch Teile des Dachverbands durch Lasten in anderen Richtungen beansprucht. Bei Änderungen in der Anordnung wird eine Veränderung des Kraftflusses angenommen. Wenn diese Änderungen im Programm eingegeben werden, ergibt sich eine tatsächliche Veränderung des Kraftflusses. Diese Änderungen sind in Abbildung 7.6 dargestellt. Das obere Bild zeigt die Schnittgrößen der ursprünglichen Bauweise des Dachverbandes, während das untere Bild die geänderte Bauweise zeigt.

Auf den ersten Blick fällt die unsymmetrische Verteilung der Normalkraft bei der neuen Bauweise des Dachverbandes auf, sowie eine Änderung der Schnittgrößen.

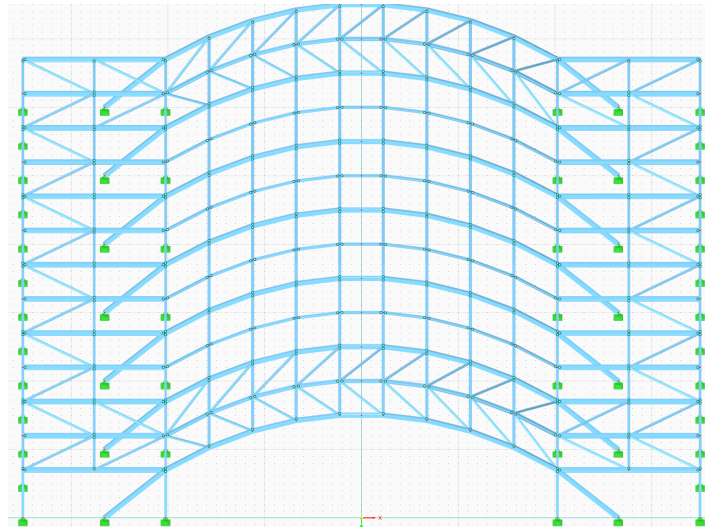
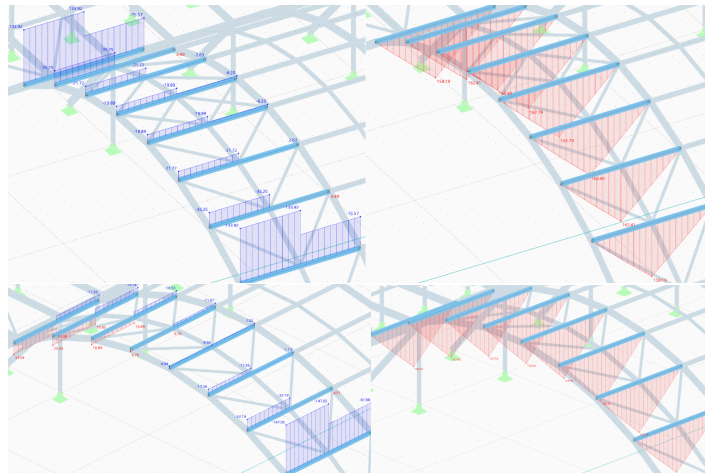


Abbildung 7.5: Halle mit geändertem Dachverbandbau

Abbildung 7.6: Schnittgrößen  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  der Pfetten bei unterschiedlichen Dachverbandanordnungen

Der maßgebende Stab 395 bei LK.18 hat folgende Schnittgrößen:

- $M_{Ed} = 145,88 \text{ kNm}$
- $N_{Ed} = 147,05 \text{ kN}$  (Druck)

Mit Hilfe der bereits berechneten Stabilitätsfaktoren kann die Stabilität erneut überprüft werden. Somit sind die Nachweise auch ohne die Nutzung der querschnittsbedingten Abminderung erfüllt. Nun kann eine objektive Aussage über die Koppeistäbe getroffen werden und ihr Querschnitt kann entsprechend angepasst werden.



### Nachweis Pfette

$$n_z = \frac{147,05 kN}{644,4 kN} = 0,23$$

$$m_y = \frac{145,88 kNm}{185,3 kNm} = 0,79$$

$$k_{zy} = 0,97$$

$$n_z + k_{zy} \cdot m_y \leq 1,0$$

$$0,23 + 0,97 \cdot 0,79 = 0,996 \leq 1 \checkmark$$

## 8 Literaturverzeichnis

- [1] Edward Allen and Wacław Zalewski. *Form and forces: designing efficient, expressive structures*. John Wiley & Sons, 2009.
- [2] Hans-Peter Arlt. Der heeresflugplatz cottbus und dessen umnutzung. *Btu*, 2002.
- [3] Stefan Baar. *Knickbeanspruchung*, pages 233–276. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2022.
- [4] Louvre Abu Dhabi and Ateliers Jean Nouvel. Archdaily website. 2017.
- [5] EN DIN. 1-1: 2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf tragwerke—teil 1-1: Allgemeine einwirkungen auf tragwerke—wichten, eigengewicht und nutzlaster im hochbau; deutsche fassung en 1991-1-1: 2002+ ac: 2009; ausgabe dezember 2010. *Nationaler Anhang—National festgelegte Parameter—Eurocode*, 1:1–1, 1991.
- [6] EN DIN. 1-4: 2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf tragwerke—teil 1-4: Allgemeine einwirkungen schneelaster ., *Nationaler Anhang—National festgelegte Parameter—Eurocode*, 1, 1991.
- [7] EN DIN. 1-4: 2010-12: Eurocode 1: Einwirkungen auf tragwerke—teil 1-4: Allgemeine einwirkungen windlaster ., *Nationaler Anhang—National festgelegte Parameter—Eurocode*, 1, 1991.
- [8] EN DIN. Eurocode 3: Bemessung und konstruktion von stahlbauten - teil 1-1: Allgemeine bemessungsregeln und regeln für den hochbau; en 1993-1-1. *Nationaler Anhang—National festgelegte Parameter—Eurocode*, 1, 2010-12.
- [9] EN DIN. Nationaler anhang - national festgelegte parameter - eurocode 3: Bemessung und konstruktion von stahlbauten - teil 1-1: Allgemeine bemessungsregeln und regeln für den hochbau,. *Nationaler Anhang—National festgelegte Parameter—Eurocode*, 1, 2015-08.
- [10] Dr.-Ing. Martin Heller. Der höhensprung. *pcae-GmbH*, NA.
- [11] Rolf Kindmann. *Stahlbau: Teil 2-Stabilität und Theorie II. Ordnung*. John Wiley & Sons, 2008.
- [12] Rolf Kindmann and Ulrich Krüger. *Stahlbau: Teil 1: Grundlagen*. John Wiley & Sons, 2013.
- [13] Manuel Krahwinkel and Rolf Kindmann. *Stahl-und Verbundkonstruktionen*. Springer-Verlag, 2016.

- [14] Stan Moore. St. peter's basilica. 1969.
- [15] Johannes Naumes, Isabel Strohmann, Dieter Ungermann, and Gerhard Sedlacek. Die neuen stabilitätsnachweise im stahlbau nach eurocode 3. *Stahlbau*, 77(10):748–761, 2008.
- [16] Bernhard Weller and Sylvia Heilmann. Brandschutz. *Wendehorst Bautechnische Zahlentafeln*, pages 249–283, 2015.