

# Zusammenfassung

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

In den letzten Jahren sind wirtschaftliche Aspekte im Stahlhallenbau immer bedeutsamer geworden. Dabei kommt der Nutzung dünnwandiger Bauteile eine Schlüsselrolle zu. Ingenieure unternehmen immer mehr Anstrengungen, um das Verhalten dieser Bauteile zu verstehen und möglichst genaue Rechenmethoden zu entwickeln.

Bei einigen dieser Hallenkonstruktionen werden - anstelle von Verbänden zwischen den Rahmen - sog. Flanschstreben verwendet, um die Rahmen gegen vorzeitiges Biegedrillknicken zu sichern.

Das Anliegen dieser Studie ist die 3D-Modellierung der Rahmen mit Pfetten und Flanschstreben mit Finiten Elementen. Parameterstudien wurden durchgeführt, um mehr über das wirkliche Verhalten dieser Systeme zu lernen.

### 1.2 Ziel

Das Endziel ist die Analyse von geometrisch unterschiedlichen Rahmen in bezug auf das Biegedrillknicken. Dabei sollen die Auflager durch Flanschstreben und Pfetten detailliert betrachtet werden. Aus den Ergebnissen der Parameterstudie sollen Konstruktionsregeln entwickelt werden.

## 2 Analytierte Rahmen

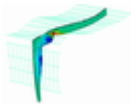
Die Details (z.B. Geometrie, Materialeigenschaften, Blechdicke) wurden ebenfalls durch die Firma angegeben. Es wurden Rahmen mit drei verschiedenen Spannweiten (18 m, 32,8 m 56 m), drei Rahmenabständen (9 m, 7,5 m und 6 m), drei Pfettenabständen (1,5 m 1,25 m, 1 m) und einer Dachneigung von 10% untersucht.

Die Stütze hat über die gesamte Länge einen veränderlichen Querschnitt. Die Riegel ist über zwei Drittel seiner Spannweite gevoutet. Die Blechdicke der Flansche und des Steges variieren ebenfalls über die Länge. Die Stege entsprechen Querschnittsklasse 4, die Gurte dagegen Klasse 3. Während der Modellierung wurden bestimmte Positionen nicht berücksichtigt oder auf einfache Art modelliert, z.B. wurden alle Verbindungen als im Material durchlaufende Verbindungen modelliert, und zwei Kopfplatten in einer Verbindung zu einer zusammengefasst. Dachpfetten, Hülle und Flanschstreben sind ebenfalls vereinfachend modelliert.

## 3 Numerisches Modell der Gesamtstruktur

### 3.1 Generelle Erwartungen an das Modell

Das numerische Modell soll Stabilität und Tragfähigkeit unterschiedlicher ebener Rahmen verifizieren. Die Gurt- oder Stegdicken können entlang der Bauteillänge variieren, so wie das für die Bemessung erforderlich ist. In Abhängigkeit von den jeweiligen Blechen (Steg oder Gurt) und ihrer Dicke haben sie unterschiedliche Fließgrenzen. Das Modell soll Verformungseffekte des Tragwerks sowohl in der Ebene als auch orthogonal zu ihr richtig abbilden (3D-Analyse). Weiterhin soll das numerische Modell in der Lage sein, das Versagen über einen Lastfaktor zu bestimmen, der von Lasten, Materialeigenschaften und Imperfektionen abhängt.



Der Einfluss von Verbindungen (normalerweise mit Kopfplatten und Schrauben) zwischen den Bauteilen (Stützen, Riegel, Pfetten usw.) auf das Tragverhalten der Rahmen wurde nicht untersucht.

### 3.2 Genereller Weg der Berechnungen

Eingangs wird eine lineare Berechnung mit den originalen Details ausgeführt. Folgende Ergebnisse werden gewonnen: Auflagerkräfte, Normalspannungen, Schubspannungen und die Momente entlang des Rahmens. Danach erfolgte die Stabilitätsanalyse mit dem kritischen Lastfaktor.

Für die Ermittlung der Eigenformen wurde ein Modell mit erhöhtem Elastizitätsmodul verwendet. Auf der Suche nach dem ungünstigsten Imperfektionsmodell werden mehr Eigenformen und strukturelle Imperfektionen kombiniert. Diese Imperfektionen sollten sich bei einer Überlagerung nicht gegenseitig auslöschen

Die verwendeten auf den Rahmen wirkenden Lasten, wurden von der herstellenden Firma berechnet.

### 3.3 Verwendete finite Elemente

Für den Rahmen wurden Shell 181, für die Pfetten Beam 44, für die Streben Link 8 und für die Hülle Beam 44 Elemente in der FE-Software Ansys verwendet.

### 3.4 Materialgesetz und- eigenschaften

Das Materialverhalten des Stahls wurde für die nichtlinearen Berechnungen als „elastisch-plastisch“ (bilinear) angenommen. Während der Ermittlung der Schnittgrößen nach Theorie I. Ordnung, und der Stabilitätsberechnung wurde das linear-elastische Materialgesetz benutzt.

Der charakteristische Wert der Fließgrenze  $f_{yk}$  beträgt in der Regel  $355 \text{ N/mm}^2$  für alle Bauteile. In einigen Berechnungen wurden Materialeigenschaften benutzt, wie sie von der Firma, die diese Rahmen herstellt, gemessen wurden:

Festigkeit aller Stege:  $390 \text{ N/mm}^2$ ,

Flansche der Dicke 8-10-12 mm:  $285 \text{ N/mm}^2$ ,

Flansche unter 8 mm ( 5, 6, 7 mm ):  $370 \text{ N/mm}^2$ ,

Flansche über 12 mm:  $355 \text{ N/mm}^2$ .

### 3.5 Lasten

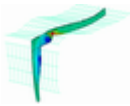
Die äußeren Lasten (Dacheigenlast, Schnee, Wind usw.) werden als vertikale Punktlasten an den Positionen der Dachpfetten und Wandriegel aufgebracht. Diese Kräfte greifen an den Knoten der Schalenelemente in der Stegebene an.

Nur eine Lastkombination wurde als Standardkombination angenommen.

### 3.6 Auflager

Für die Analyse wurden zwei unterschiedliche Typen von Modellen verwendet. Unterschiede gibt es auch in den Auflagerbedingungen.

Das vereinfachte Federmodell (Simplified Spring Model, SSM) ist ein Rahmen mit Federn (aber ohne Pfetten usw.). Er ist aufgelagert am Fusspunkt der Stütze und entlang des Ober- bzw. Aussengurts sowie des Unter- bzw. Innengurts. Bei dem Modell mit Pfetten (Model With Purlins , MWP) muss die Rahmenauflagerung durch die Pfetten sorgfältig durchdacht werden. Die Fragestellung lautet: Wie verformen sich die Pfetten? Bei den verschiedenen Verformungsfällen müssen verschiedene Auflager (andere Freiheitsgrade) in der Pfettenmitte zwischen den Rahmen, wo die Pfette „durchgeschnitten“ wird, angenommen werden.



### *Auflagerung der Stützen:*

Die Stützenauflagerung in beiden Fällen als ein Gelenk betrachtet.

### *Auflagerung der Riegel:*

Bei der Analyse wurde nur eine Rahmenhälfte mit Finiten Elementen modelliert, um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen. Alle Knoten des Firstes werden nur in UX-Richtung gehalten.

### *Auflagerung der Pfetten:*

#### Vereinfachtes Federmodell (Simplified Spring Model, SSM)

In diesem Fall ist der Rahmen aus seiner Ebene horizontal stabilisiert. Der Ober- bzw. Außengurt ist durch Dachpfetten bzw. Wandriegel diskret (also an bestimmten Stellen) gehalten.

#### Modell mit Pfetten (Model With Purlins, MWP)

Die Pfetten haben zwei typische Formen (symmetrisch und asymmetrisch) der Durchbiegung, die durch die Verschiebung des Untergurts des Riegels verursacht sind. In beiden Fällen wurde angenommen, dass die Pfette an der Verbindung von Riegel und Pfette keinerlei Torsionsmoment aufnehmen können.

#### *a, Symmetrische Form:*

Die Freiheitsgrade der Knotenpunkte in den Mittelpunkten der Pfetten (auf dem halben Weg zwischen den Rahmen) werden vorgeschrieben. Die Knoten der Dachpfetten sind in Y-Richtung gehalten und können sich um die X und Z Achsen nicht verdrehen. Die Knoten der Wandpfetten sind in Y-Richtung gehalten und können sich um die X und Z Achsen nicht verdrehen.

#### *b, Asymmetrische Form:*

In diesem Fall sind die Knoten der Dachpfetten in Y-Richtung gehalten, und ihre Verschiebung in Z-Richtung ist auch beschränkt: sie müssen so groß sein wie die Verschiebungen des Riegels in Z-Richtung an den Anschlussstellen der Dachpfetten an den Obergurt. Die Knoten der Wandhülle sind in Y-Richtung gehalten und haben in X-Richtung die selbe Verschiebung wie die in gleicher Höhe befindlichen Punkte der Stütze.

### *Auflagerung der Dach- und Wandhülle:*

Um dem symmetrischen Zustand gerecht zu werden, werden die letzten Knoten (wie bei den Auflagern der Riegel) in der Pfettenmitte in X-Richtung eingespannt. Die Träger der Wandhülle sind in Z-Richtung eingespannt.

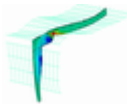
## Modell der Verbindungen

### *Rahmenverbindungen:*

Alle wichtigen Verbindungen gehören in dieses Kapitel (Stützen-Riegel-Verbindung, Firststoß und Riegel). Die Verbindungen werden als steif und im Material durchlaufend angenommen. An jeder Stelle wurden die Platten mit ihrer tatsächlichen Dicke modelliert. Mit Steifen, Knotenblechen und Stirnplatten wird gleichermaßen verfahren.

### *Verbindungen von Rahmen und Pfette sowie Rahmen und Flanschstrebe:*

Die Verbindung zwischen Rahmen und Pfetten wurde durch Balkenelemente hergestellt. Diese Elemente haben einen Rechteck-Querschnitt, und sind steif genug, um nicht zu große Verformungen zu erleiden und beeinflussen so das Gesamtsystem nicht.



Die Rahmen-Streben und Streben-Pfetten Verbindungen sollten Verdrehungen in der vertikalen Ebene der Streben zulassen.

### Imperfektionen

Die Imperfektionen wurden soweit wie möglich nach den Regeln des Eurocode EN 1993-1-1 und des Eurocode EN 1993-1-5 ausgewählt. Man unterscheidet fünf Typen:

- Globale Imperfektion, Schrägstellung des Rahmens,
- Eigenform Imperfektionen, Knickform des Riegels,
- Eigenform Imperfektionen, Beulform des Riegels,
- Deformation des Riegels in der Ebene des Rahmens (Wölbung),
- Deformation des Riegels in Querrichtung zu der Ebene des Rahmens (Wölbung)

Die ersten beiden sind geometrische Imperfektionen, die auf den kritischen Beulformen des Bauteils basieren. Die letzten drei sind strukturelle Imperfektionen und berücksichtigen Eigenspannungen aufgrund des Herstellungsprozesses. Für die Modellierung wurden sie in äquivalente geometrische Imperfektionen umgewandelt.

Die sekundäre Tragstruktur (Pfetten, Flanschstreben) wurden als imperfektionsfrei angenommen.

#### *Globale Imperfektion, Schrägstellung des Rahmens:*

Eine Schrägstellung des Rahmens mit dem Wert  $e = H/200$  wurde angenommen.

#### *Eigenform Imperfektionen, Knickform des Riegels:*

Nach dem Beenden der Stabilitätsberechnung wurden die Eigenformen gewählt (gewöhnlich die Erste oder Zweite), die eine reine Knickfigur des Rahmens zeigen. Die maximale Imperfektion beträgt  $h/200$ , wobei die Steghöhe an der Stelle des Beulens ist.

#### *Eigenform Imperfektionen, Beulform des Riegels:*

Nach dem Beenden der Stabilitätsberechnung wurden verschiedene Eigenformen ausgesucht, die lokales Beulen des Steges und der Flansche zeigen. Wegen der unterschiedlichen Querschnittstypen (Stütze, linearer Teil und gevouteter Riegelabschnitt) sind mehr Eigenformen notwendig. Die maximale Imperfektion beträgt  $h/200$ , wobei 'h' die Steghöhe bei maximalen lokalem Beulen angibt.

#### *Imperfektionen in der Rahmenebene:*

Diese Imperfektionen haben eine sinusförmige Bogenform mit einer vollen Welle entlang der Stütze und drei Wellen entlang des Riegels. Die Amplitude beträgt  $L/200$ ; L ist die Wellenlänge (ca. 5.000 mm).

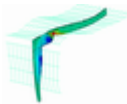
#### *Imperfektionen normal zur Rahmenebene:*

Diese Imperfektion hat eine sinusförmige Bogenform normal zur Rahmenebene mit einer vollen Welle entlang der Stütze und neun Wellen entlang des Riegels. Die Amplitude beträgt nach EC3  $L/150$  (Wellenlänge L wie bei Imperfektionen in der Rahmenebene).

#### *Kombination der Imperfektionen:*

Bei der Kombiantion von Imperfektionen wird eine Führungsimperfektion gewählt, die bis zu 70% ausmacht. Jeder Typ von Imperfektionen kann „führend“ sein, daneben gibt es begleitende Imperfektionen. In jedem Fall sucht man die schlechteste Kombination. Der Weg, wie man die richtigen Imperfektionen aufbringt, ist für das Vereinfachte Federmodell (SSM) und das Modell mit Pfetten (MWP) in den nächsten zwei Abschnitten gezeigt. In einigen Fällen wurde die Sensivität der Imperfektionen beim Rahmen untersucht.

### SSM Imperfektionen



*a, Eigenform Imperfektionen, Knick- und Beulform des Riegels:*

Die Kombinationen der Eigenformen und die dazugehörigen Traglasten wurden erstellt und die ungünstigsten ausgewählt.

*b, Imperfektionen in und aus der Rahmenebene, sowie aus dem Lot:*

Mit SSM wurden auch die Imperfektionen in und aus der Rahmenebene, sowie aus dem Lot untersucht. Es kam dabei heraus, dass sie generell keinen großen Einfluss auf das Tragverhalten des Rahmens haben.

Der Einfluss der Wellenzahl normal zur Rahmenebene auf die Traglast ist signifikant. Der Effekt der Wellenzahl auf einen Abschnitt der Länge  $L=5000$  mm wurde untersucht. Auch eine Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Amplituden der Imperfektionen wurde durchgeführt.

### MWP Imperfektionen

*a, Imperfektionen in und aus der Rahmenebene, sowie aus dem Lot:*

Mit MWP wurden auch die Imperfektionen in und aus der Rahmenebene, sowie aus dem Lot untersucht. Es kam dabei heraus, dass sie generell keinen großen Einfluss auf das Tragverhalten des Rahmens haben. Allerdings ist der Einfluss der Wellen normal zur Rahmenebene signifikant. Der Effekt der unterschiedlichen Wellenzahl auf einen Abschnitt der Länge  $L=5000$  mm wurde untersucht. Auch die Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Amplituden der Imperfektionen wurde durchgeführt.

### Zusammenfassung der Imperfektionanalyse:

In Abschnitt wurden zwei komplette Imperfektionsanalysen (mit Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Imperfektionen) durchgeführt. Diese Analysen wurden an allen 12 Rahmen mit verschiedenen Geometrien durchgeführt. Abweichungen der Rahmenstützen vom Lot und Imperfektionen in der Rahmenebene haben zweitrangigen Einfluss auf die Tragfähigkeit des Rahmens. Die anderen Imperfektionen sind bedeutungsvoller.

Die Konvergenzstudie weist aus, dass die Elementgröße folgende Abmessungen nicht überschreiten sollten: 100 mm für den 56 m-Rahmen, 75 mm für den 32 m-Rahmen sowie 50 mm für den 18 m-Rahmen. Wegen des ansonsten zu großen Rechenaufwand wurden bei allen Rahmen die Berechnungen mit Elementgrößen von 100 mm durchgeführt. Bei dem Auswerten der Ergebnisse hat sich gezeigt, dass diese Elementgröße eine ausreichende Genauigkeit lieferte.

## **4 Ergebnisse**

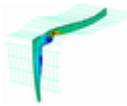
### Steifigkeit der verschiedenen Bauelemente

Bei der Analyse nach dem vereinfachten Federmodell (SSM) wird die zuvor als maßgebend eingestufte Kombination der Imperfektionen verwendet, wenn das Modell mit Pfetten (MWP) zur Anwendung kommt, wird die selbe Kombination der Imperfektionen genutzt. In beiden Fällen ist die Elementgröße 100 mm. Mit dieser Größe sind die Ergebnisse nicht so genau; die Tendenz jedoch lässt sich erfassen.

### *Einfluss der Federsteifigkeit*

Um im Modell SSM den Einfluss der Federsteifigkeit auf die Rahmentragfähigkeit zu analysieren, wird diese variiert. Als Resultat erhält man den kritischen Lastfaktor und die Tragfähigkeit. Es wurde festgestellt, dass die Federkonstante die Tragfähigkeit des Rahmens maßvoll beeinflusst.

Wenn die Federkonstante höher liegt als die Original-Federkonstante, verändert sich die Versagensform nicht. Es kommt zum Biegedrillknicken zwischen zwei horizontalen Federn. Wenn die Federkonstante von 25 % auf 0% fällt, ist die Veränderung der Tragfähigkeit



offensichtlich. Die Tragfähigkeit fällt sehr schnell ab. Wenn die Federsteifigkeit Null ist, hat der Untergurt keine horizontalen Auflager. Bei 10% der Original-Federsteifigkeit tritt Versagen des druckbeanspruchten Untergurts auf.

#### *Einfluss der Steifigkeit der Flanschstreben*

Im Modell mit Pfetten sind die Flanschstreben mit „link“-Elementen modelliert. Diese Elemente können nur Normalspannungen aufnehmen. Die Steifigkeit der Flanschstreben kann durch eine Änderung des Querschnitts variiert werden. Im Originalzustand beträgt die vorhandene Fläche  $100 \text{ mm}^2$ . Es wurden die untersuchten Querschnitte und die dazugehörigen Traglasten bestimmt.

Die gleichen Tendenzen können bei der Untersuchung der Steifigkeit der Flanschstreben und der Federkonstanten beobachtet werden. Ein kleiner Unterschied tritt auf, wenn die Steifigkeit der Flanschstrebe auf fast Null absinkt. Bei dem Modell mit Pfetten (MWP) ist die Rahmentragfähigkeit etwas höher.

#### *Auflagerbedingungen*

Bis jetzt wurde nur die symmetrische Auflagerung verwendet. Jetzt wird der Unterschied zwischen den beiden Auflagerarten herausgestellt. Während der Modellierung kamen die Fragen auf, ob die Pfetten sich im Riegel-Pfetten Knotenpunkt um die Y-Achse verdrehen können, und ob die Hülle in Längsrichtung gehalten ist.

Zusammen wurden 8 Fälle mit der gleichen Imperfektion und der gleichen Element-Abmessung untersucht.

Ob die Pfette sich im Riegel-Pfetten Knotenpunkt verdrehen kann oder nicht (ROTY), hat einen sehr kleinen Einfluss auf die Tragfähigkeit (0,2-0,3%). Die Veränderung der UX-UZ Lagerungsbedingungen hat einen etwas größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit (ca. 1%). In den nachfolgenden Untersuchungen wurden die ROTY Verdrehungsfreiheit und UX-UZ Lagerungsbedingungen verwendet, denn sie machen das Modell wirklichkeitsnaher. Der Unterschied zwischen der Rahmentragfähigkeit zwischen dem symmetrischen und asymmetrischen Modell ist ca. 2,5-3%. Beim asymmetrischen Fall sind die Pfetten steifer, d.h. sie geben kräftigere seitliche Auflager der Gurte. In allen weiteren Simulationen wird symmetrische Auflagerung angesetzt, da die Rahmentraglast dann kleiner ist.

#### *Modellierung der Pfetten*

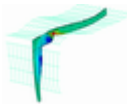
Die Untersuchung der Pfetten ist wichtig für das Modell mit Pfetten. Wie aus zuvor festgestellt, hat die Steifigkeit (EI) der Pfetten einen großen Einfluss auf die Federkonstante und letztlich auch auf das Biegedrillknickverhalten des Riegels. Anstelle des tatsächlichen Pfettenquerschnitts wird ein einfacher Ersatzquerschnitt modelliert. Um das vereinfachte Modell zu überprüfen und um den Einfluss der Pfettensteifigkeit auf die Rahmentragfähigkeit zu überprüfen, werden die Pfetten in dreierlei Hinsicht untersucht: unterschiedliche Dicke der Pfetten, unterschiedliches Trägheitsmoment um die schwache Achse ( $I_z$ ), unterschiedliches Trägheitsmoment um die starke Achse ( $I_y$ ).

Die Dicke der Pfette und die Breite des Flansches der Pfette haben keinen nennenswerten Einfluss auf die Knickwiderstand des Riegels.  $I_y$  hat einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit, aber nicht bei den üblich verwendeten Querschnittsgrößen.

#### *Modellierung der Hülle*

Die Modellierung der Hülle ist notwendig, weil sie den Pfetten eine zusätzliche Steifigkeit verleiht. Die nachfolgende Untersuchung zeigte wie die Hülle die Steifigkeit der Pfetten und die Tragfähigkeit des ganzen Systems beeinflusst. Der Bereich der Hülle hat sich verändert, somit hat sich auch das zweite Moment geändert.

Der Effekt des Dachtrapezblechs ist ebenfalls vernachlässigbar. Die Dicke des Trapezblechs war in allen untersuchten Fällen 0,75 mm.



## Untersuchung von geometrischen Veränderungen an den Rahmen

### *Rahmenabstand:*

In diesem Abschnitt wird eine Untersuchung hinsichtlich des Einflusses des Rahmenabstandes in einer Konstruktion vorgestellt. Das verwendete Modell ist präziser als das vorher benutzte, es wird eine Elementgröße von 75 mm verwendet. Wegen der veränderten Elementgröße werden neu berechnete Imperfektionen verwendet (die Eigenform hat sich verändert).

### *Allgemeine geometrische Untersuchung*

Bis jetzt wurde nur ein Rahmentragwerk in der Studie untersucht. Für die allgemeine geometrische Untersuchung werden folgende Änderungen angewendet:

- die Fließspannung ist  $355 \text{ N/mm}^2$  für alle Werkstoffe,
- nicht die von der Firma gerechneten Lasten werden verwendet,
- die Position der Flanschstreben ist verändert.

Während der geometrischen Untersuchung wurde der Pfettenabstand, der Abstand der Flanschstreben und der Rahmenabstand verändert.

## Ungleichförmige Lasten

Im Folgenden wird der Fall untersucht, dass die Schneelast nicht symmetrisch auf den Rahmen wirkt. Zwischen zwei benachbarten Rahmen (z.B. Achsen 2 und 3) ist mehr Last, während auf das benachbarte Feld (Achse 3- 4) weniger Last entfällt. Für den Riegel bedeutet dies ein zusätzliches Torsionsmoment, welches die Gefahr des Biegedrillknickes erhöht. Die Torsionsmoment kann vereinfachend als Kräftepaar, das im Ober- und Untergurt angreift, modelliert werden. Diese Moment greift nur in solchen Querschnitten an, in denen auch die Flanschstreben positioniert sind. Das verwendete statische System ist nur ein sehr vereinfachtes, d.h. es können nur Schätzwerte für das Torsionsmoment angegeben werden. Das Moment ist abhängig von der Differenz der Belastung auf beiden Seiten des Rahmens.

Nachfolgend wurde ein Rahmen mit diesen Lasten auf dreierlei Art modelliert:

- Ohne Imperfektionen
- Kombination der Eigenform Imperfektionen
- Kombination der Imperfektionen (Eigenform, Wellenform normal zur Rahmenebene)

### *Ohne Imperfektionen (PNL):*

Alle Imperfektionen wurden vernachlässigt, nur die übliche Last und die Torsionsmomente wurden aufgebracht, die Versagensform ist eher ein globales Versagen.

### *Kombination der Eigenform Imperfektionen:*

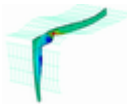
Die Ergebnisse zeigen, dass 1 kNm Torsionsmoment 1% weniger Traglast des Rahmens bedeutet. Für das angenommene Intervall ungleichmäßiger Belastung von 2-6 kNm heißt dies einen Lastabfall von 2-6%.

### *Kombination der Imperfektionen (Eigenform, Wellenform normal zur Rahmenebene):*

In dem angenommenen Intervall der ungleichmäßigen Belastung 2-6 kNm sinkt die Tragfähigkeit der Rahmen um 3-4 %. Das heißt, dass ungleichmäßige Belastung einen Effekt auf die Tragfähigkeit hat, der aber nicht so groß ist, wie der Effekt der Imperfektionen normal zur Rahmenebene.

## Zusammenfassung

Der Rahmenabstand hat keinen Einfluss auf die Traglast, die Häufigkeit der Flanschstreben ist wichtiger. Mit der richtigen Positionierung der Flanschstreben kann man die Traglast deutlich



anheben. Ungleichförmige Lasten haben einen gewissen, aber nicht starken Einfluss auf die Traglast des Rahmens.

## **5 Schluss**

In der Studie werden drei Modelle von Stahlrahmen mit unterschiedlicher Spannweite (18-56 m) entwickelt, um das Biegedrillknicken bei Flanschstreben zu simulieren. Die Modelle umfassen Imperfektionen sowie geometrische und physikalische Nichtlinearität. Der Weg der Modellierung machte Änderung der Rahmendetails möglich, so dass mehr Parameter untersucht werden konnten.

Einige Schlussfolgerungen aus Abschnitt 4 seien hier noch einmal zusammengefasst:

- Der Effekt der Schiefstellungen des Rahmens sowie von Verformungen in seiner Ebene auf die Traglast des Rahmens lässt sich vernachlässigen.
- Die Imperfektionen aus Knick- und Beulform des Riegels haben einen signifikanten Einfluss auf die Traglast des Rahmens. Die Verformung des Rahmens aus seiner Ebene hat den größten Einfluss auf die Traglast.
- Die Steifigkeit der Federn (= Flanschstreben) hat Einfluss auf die Traglast des Rahmens.
- Bei den verwendeten Querschnitten der Pfetten ist der Einfluss auf die Tragfähigkeit der Rahmen vernachlässigbar. Das trifft nicht zu, wenn das Trägheitsmoment der Pfetten um die starke Achse deutlich reduziert wurde.
- Pfetten: Die normalerweise genutzten Querschnitte haben genügend Biegesteifigkeit, um den Flanschstreben Auflagerpunkte zu geben und somit das seitliche Ausweichen der Rahmen zu behindern.
- Die angesetzte Verformung der Pfetten ist ebenfalls wichtig.
- Der Einfluss der Steifigkeit der Hülle ist vernachlässigbar, aber es ist notwendig, die Hülle zu modellieren, da sie horizontale Verformungen der Pfetten behindert.
- Flanschstreben: Wenn die Anschlüsse (an den Rahmen bzw. an die Pfette) gelenkig ausgebildet werden, hat der Querschnitt genügend Tragreserven. Die Querschnittsfläche der Flanschstreben hat nicht viel Einfluss auf die Tragfähigkeit des Rahmens.
- Die Positionierung der Flanschstreben ist mitentscheidend für die Rahmentragfähigkeit. Dies gilt vor allem dann, wenn es zu globalem Stabilitätsversagen kommt. Bei der Anordnung der Pfetten ist festzuhalten, dass die erste und zweite Flanschstrebe (von der Stütze aus gesehen) die Tragfähigkeit wesentlich beeinflussen.
- Abstand zwischen den Pfetten, Positionierung der Flanschstreben: Der Abstand der Pfetten ist nicht entscheidend, allerdings die Positionierung der Flanschstreben. Sie ist im ersten Drittel des Riegels (von der Stütze aus gesehen) am wichtigsten.
- Ungleichförmige Lasten haben einen gewissen Einfluss auf die Rahmentragfähigkeit.

Die Berechnungen an Rahmen der Spannweite 18 m bis 56 m zeigen, dass Flanschstreben in der Lage sind, Hallenrahmen auch bei ungünstigen Imperfektionen gegen seitliches Ausweichen zu sichern. Die Tragreserven sind allerdings teilweise außerordentlich gering. Konstruktive Änderung sind an den Flanschstreben bzw. deren Befestigung nicht erforderlich.

Bei der Fertigung der Rahmen sollte durch Eigen- oder Fremdüberwachung sichergestellt werden, dass die in dieser Studie angesetzten Imperfektionen nicht überschritten werden.

Das Fehlen einer Flanschstrebe kann das Versagen eines Hallenrahmens (und der gesamten Halle) herbeiführen. Bei der Bauüberwachung sollte man die Anzahl der Flanschstreben auf Vollständigkeit prüfen.