

Tragverhalten von Hallen mit Flanschstreben

T 3206

T 3206

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2009

ISBN 978-3-8167-7949-0

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

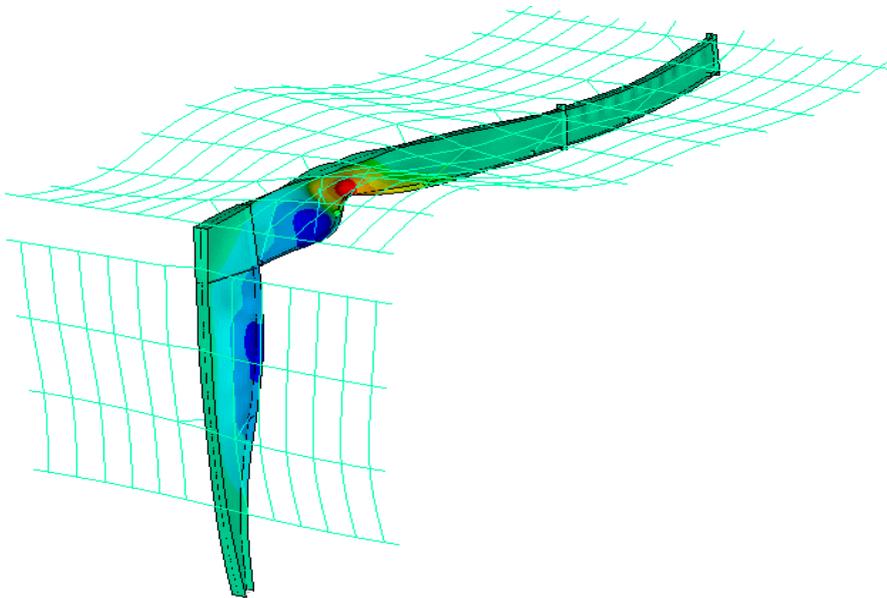
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Brandenburgische Technische Universität
Lehrstuhl f. Stahl- und Holzbau
Konrad-Wachsmann-Alle 2
03044 Cottbus



Tragverhalten von Hallen mit Flanschstreben

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstr. 30L
10829 Berlin

ZP 52-5- 16.129-1248/07



<i>1</i>	<i>Einleitung</i>	<i>1</i>
1.1	... Motivation	1
1.2	... Ziel	1
1.3	... Lösungsstrategie.....	1
<i>2</i>	<i>Analysierte Rahmen</i>	<i>3</i>
<i>3</i>	<i>Numerisches Modell der Gesamtstruktur</i>	<i>11</i>
3.1Generelle Erwartungen an das Modell	11
3.2Genereller Weg der Berechnungen.....	11
3.3	... Verwendete Finite Elemente	13
3.4Materialgesetz und -eigenschaften	14
3.5Lasten	14
3.6	... Auflager	16
3.6.1	Auflager der Stützen	16
3.6.2	Auflager der Riegel	17
3.6.3	Auflager der Pfetten	17
3.6.3.1	Vereinfachtes Federmodell (SSM).....	17
3.6.3.2	Modell mit Pfetten (MWP)	18
3.7	Modell der Verbindungen	21
3.7.1	Rahmenverbindungen	21
3.7.2	Verbindungen von Rahmen und Pfette sowie Rahmen und Flanschstrebe.....	21
3.8	Imperfektionen	23
3.8.1	Globale Imperfektion, Schrägstellung des Rahmens	23
3.8.2	Eigenform Imperfektionen, Knickform des Riegels	23
3.8.3	Eigenform Imperfektionen, Beulform der Riegels.....	24
3.8.4	Imperfektionen in der Rahmenebene	25
3.8.5	Imperfektionen normal zur Rahmenebene	25
3.8.6	Kombination der Imperfektionen	26
3.8.6.1	Imperfektionen SSM	26
3.8.6.2	Imperfektionen MWP	31
3.9	Zusammenfassung	35
<i>4</i>	<i>Ergebnisse</i>	<i>36</i>
4.1	Steifigkeit der verschiedenen Bauelemente	36
4.1.1	Einfluss der Federsteifigkeit	36
4.1.2	Einfluss der Steifigkeit der Flanschstreben.....	38
4.1.3	Auflagerbedingungen.....	40
4.1.4	Modellierung der Pfetten	42
4.1.5	Modellierung der Hülle	46
4.2	Untersuchung von geometrischen Veränderungen an den Rahmen	48
4.2.1	Rahmenabstand	48
4.2.2	Allgemeine geometrische Untersuchung	50
4.3	Ungleichförmige Lasten	58
4.4	Zusammenfassung	65
<i>5</i>	<i>Schluss</i>	<i>66</i>
	<i>Literatur</i>	<i>67</i>



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.

Für den Außenflansch der Stützen und den Obergurt der Riegel werden Wandriegel und Dachpfetten normalerweise als starre Auflager betrachtet. Der Innenflansch bzw. der Untergurt ist durch Flanschstreben stabilisiert, die an den Wandriegeln bzw. Dachpfetten befestigt sind. Diese Flanschstreben können als elastisches Auflager betrachtet werden.

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 inbezug auf das Biegedrillknicken. Dabei sollen die Auflager durch Flanschstreben und Pfetten detailliert betrachtet werden. Aus den Ergebnissen der Parameterstudie sollen Konstruktionsregeln entwickelt werden.

1.3 *Lösungsstrategie*

Zwei Arten von Rahmen werden modelliert:

- ein einfaches Federmodell (Simplified Spring Model, SSM),
- ein Modell mit Pfetten (Model With Purlins, MWP), Bild 1.1.

Bei Typ SSM werden die horizontalen Auflager des Rahmens bzw. der Stütze durch starre Auflager am Obergurt bzw. äußerer Flansch modelliert, während sie am Untergurt bzw. inneren Flansch durch eine Feder (an der Stelle der Flanschstreben) modelliert werden.

Bei Typ MWP ist die Sekundärstruktur (Flanschstreben, Pfetten, Hülle) ebenfalls modelliert.



Die untersuchten Rahmen wurden von einer ausgewählten Firma bemessen und hergestellt. Für diese Studie werden die originalen geometrischen Abmessungen verwendet. Die Materialeigenschaften unterscheiden sich teilweise von den originalen Eigenschaften.

Bei der Parameterstudie wurde in zweierlei Hinsicht durchgeführt:

- zum einen basierend auf der Steifigkeit der verschiedenen Bauteile,
- zum anderen basierend auf verschiedenen Geometrien der Rahmen (Spannweite, Position der Pfetten sowie der Flanschstreben).

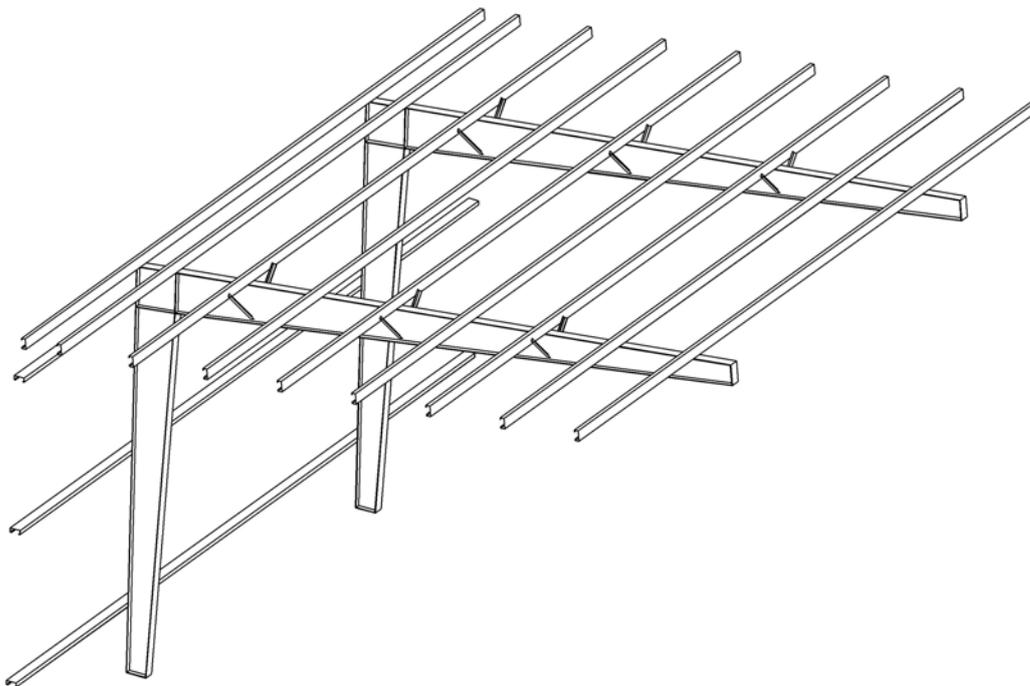


Bild 1.1 Modell mit Pfetten und Flanschstreben



2 Analyisierte Rahmen

Die Details (z.B. Geometrie, Materialeigenschaften, Blechdicke) wurden ebenfalls durch die Firma angegeben:

- Rahmenspannweite 18 m, 32,8 m und 56 m
- Rahmenabstand 9 m (8,5 m), 7,5 m und 6 m
- Pfettenabstand 1,5 m 1,25 m, 1 m
- Dachneigung 10%
- 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
- Die Rahmen einschließlich Flanschstreben sind auf den Bildern 2.1 bis 2.7 dargestellt.

Aus der obigen Zusammenstellung wird ersichtlich, dass es sich um typische Hallenrahmen handelt.

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.

Das Koordinatensystem lautet wie folgt: vertikale Z-Achse, entlang des Rahmens (in seiner Ebene) X-Achse, normal zu der Rahmenebene Y-Achse.

Tabelle 2.1, 2.2 sowie 2.3 zeigen die Einzelheiten der Bezeichnung der Rahmen.

Frame 18 Notation		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	3a	3b
Distance between the Rafters [m]	6	F18_R6_P1_S3	F18_R6_P1,25_S2,5	F18_R6_P1,5_S3a	F18_R6_P1,5_S3b
	7,5	F18_R7,5_P1_S3	F18_R7,5_P1,25_S2,5	F18_R7,5_P1,5_S3a	F18_R7,5_P1,5_S3b
	9	F18_R9_P1_S3	F18_R9_P1,25_S2,5	F18_R9_P1,5_S3a	F18_R9_P1,5_S3b

Tabelle 2.1 Rahmen mit der Spannweite von 18 m



Frame 32 Notation		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	1,5	3
Distance between the Rafters [m]	6	F32_R6_P1_S3	F32_R6_P1,25_S2,5	F32_R6_P1,5_S1,5	F32_R6_P1,5_S3
	7,5	F32_R7,5_P1_S3	F32_R7,5_P1,25_S2,5	F32_R7,5_P1,5_S1,5	F32_R7,5_P1,5_S3
	8,5	F32_R8,5_P1_S3	F32_R8,5_P1,25_S2,5	F32_R8,5_P1,5_S1,5	F32_R8,5_P1,5_S3

Tabelle 2.2 Rahmen mit der Spannweite von 32,8 m

Frame 56 Notation		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	3a	3b
Distance between the Rafters [m]	6	F56_R6_P1_S3	F56_R6_P1,25_S2,5	F56_R6_P1,5_S3a	F56_R6_P1,5_S3b
	7,5	F56_R7,5_P1_S3	F56_R7,5_P1,25_S2,5	F56_R7,5_P1,5_S3a	F56_R7,5_P1,5_S3b
	9	F56_R9_P1_S3	F56_R9_P1,25_S2,5	F56_R9_P1,5_S3a	F56_R9_P1,5_S3b

Tabelle 2.3 Rahmen mit der Spannweite von 56 m

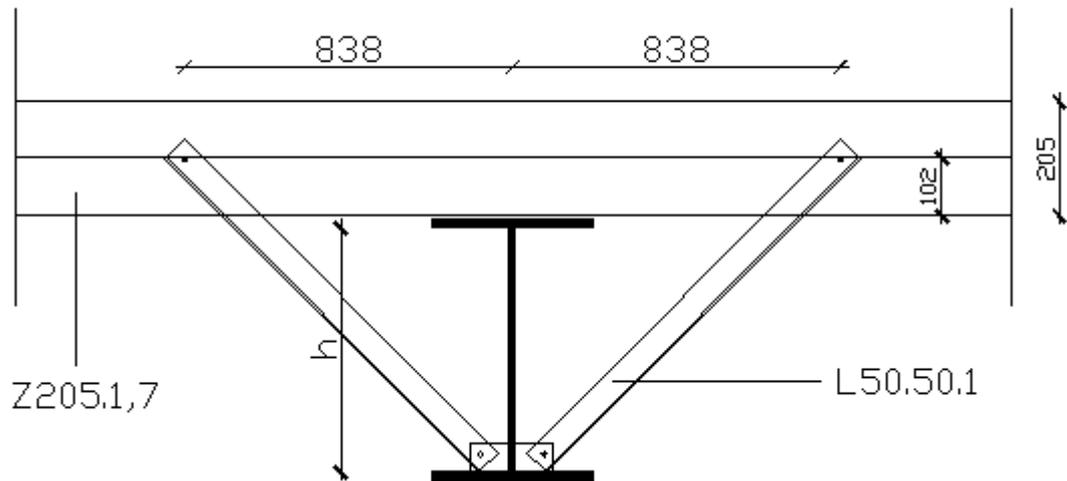


Bild 2.1 Flanschstreben

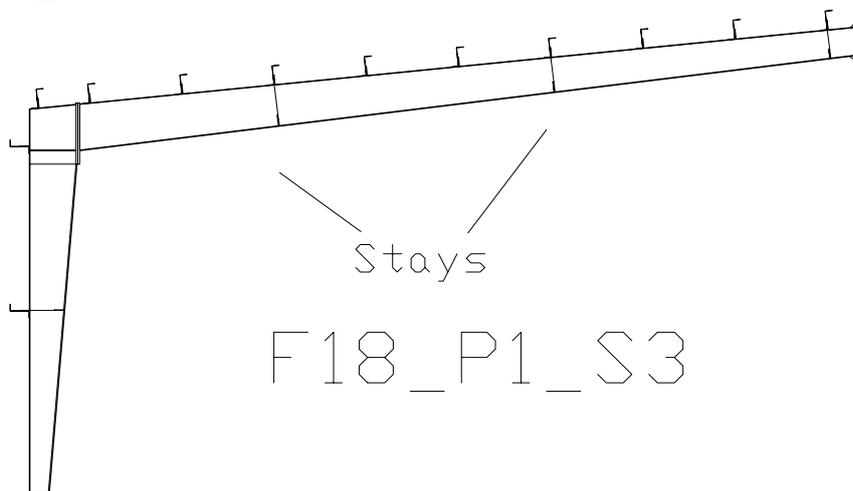
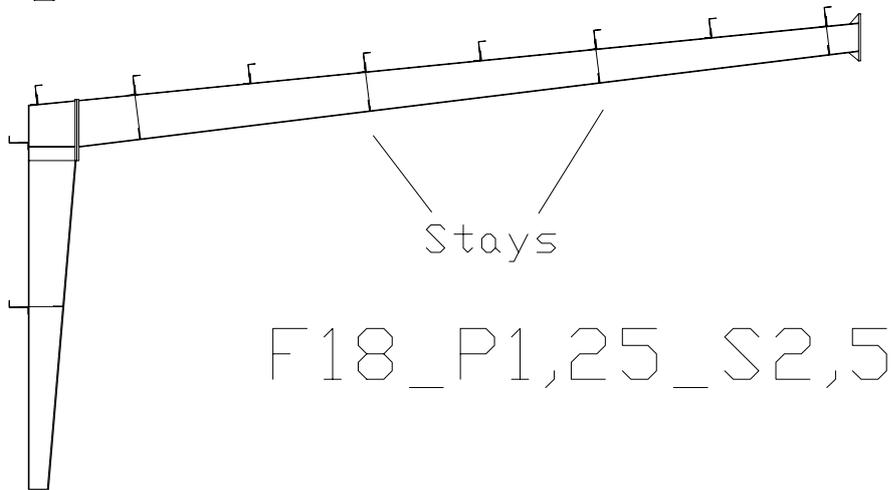
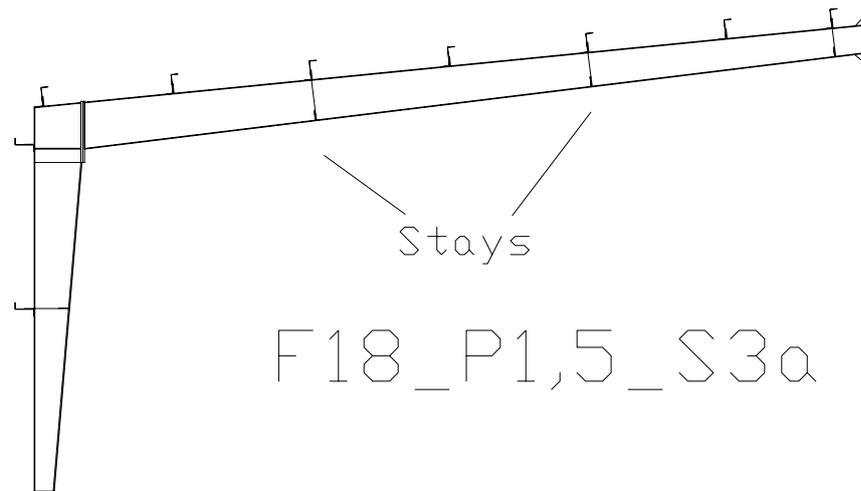


Bild 2.3 Rahmen mit der Spannweite von 18 m, Position der Flanschstreben

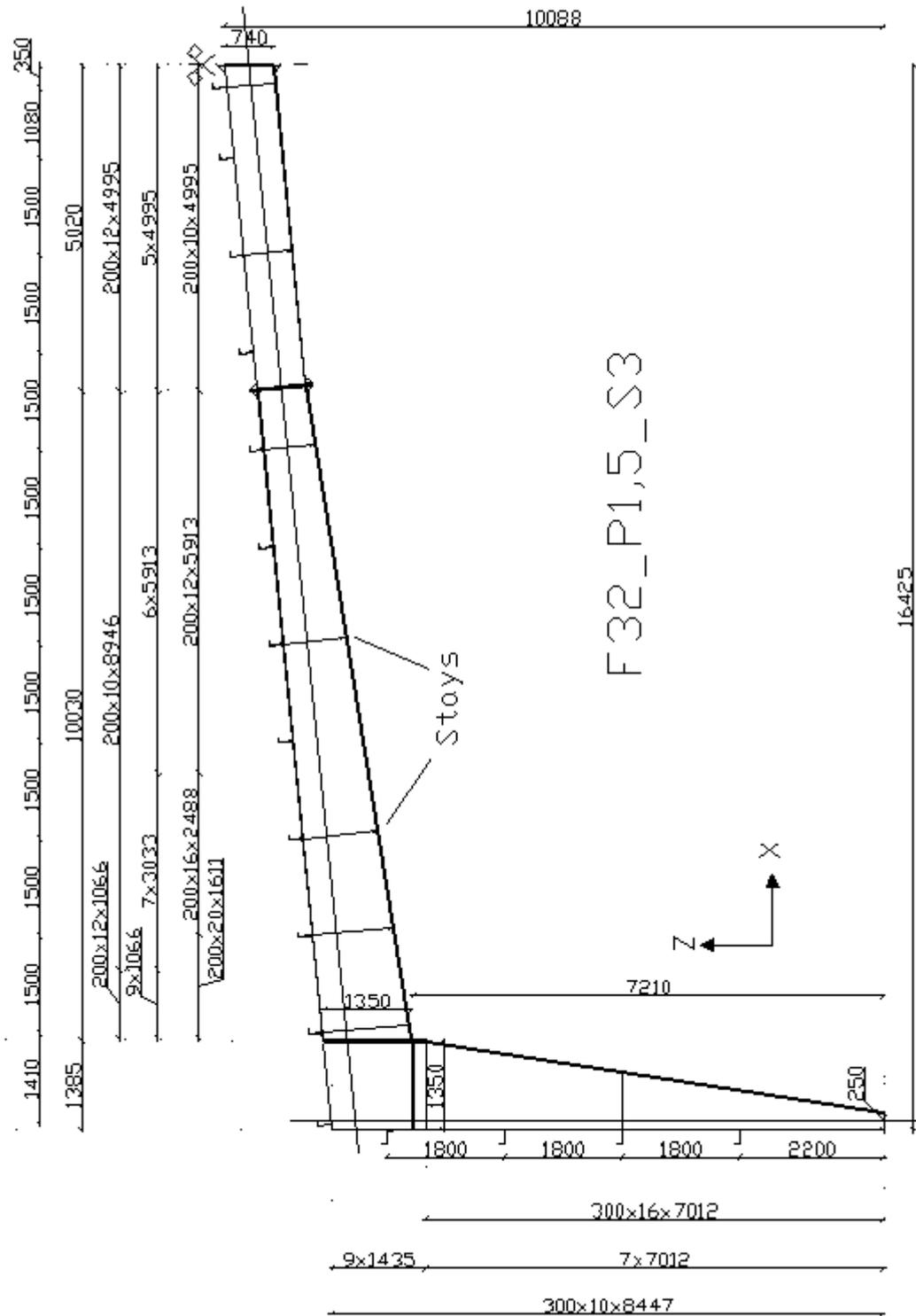


Bild 2.4 Rahmen mit der Spannweite von 32 m

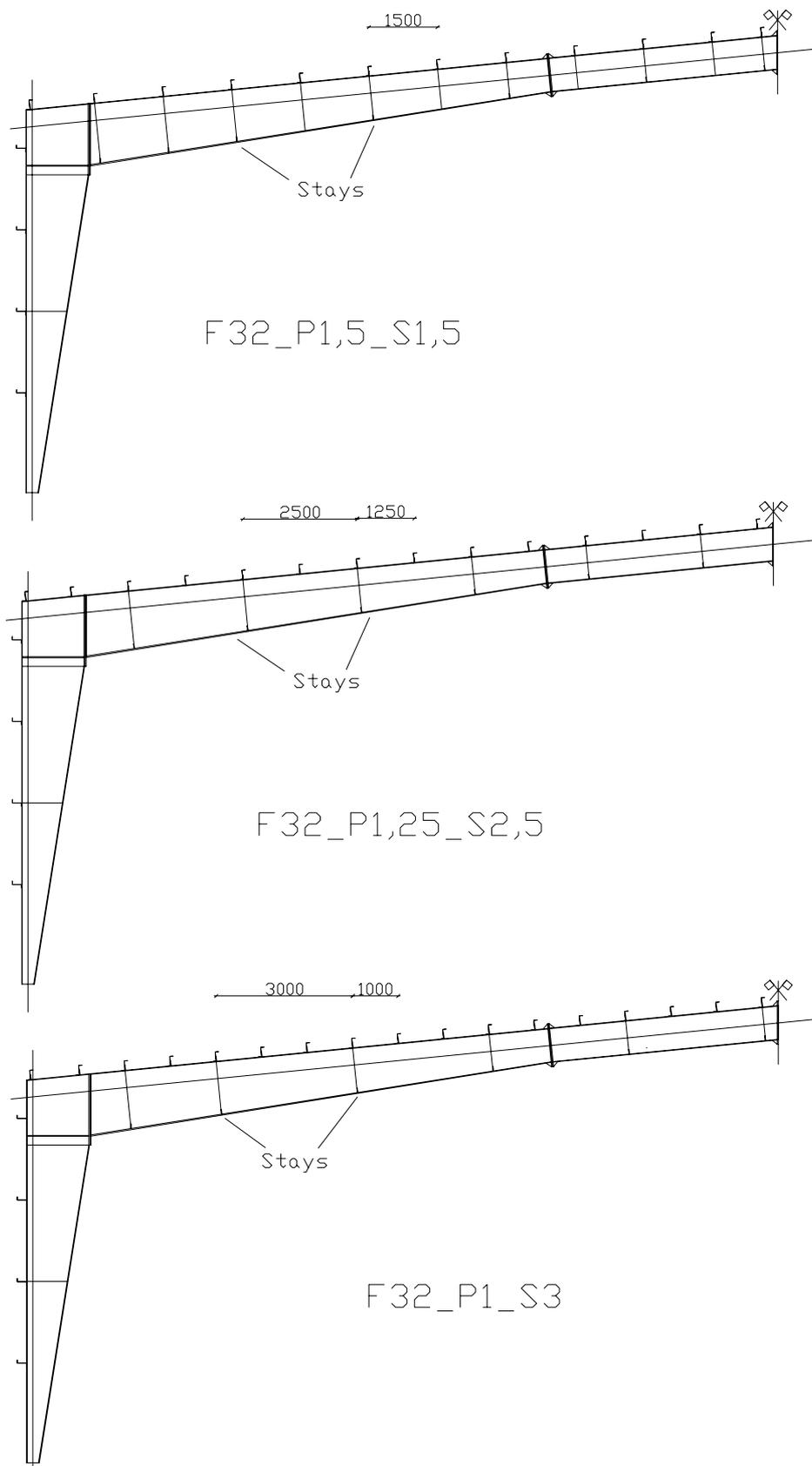


Bild 2.5 Rahmen mit der Spannweite von 32 m, Position der Flanschstreben

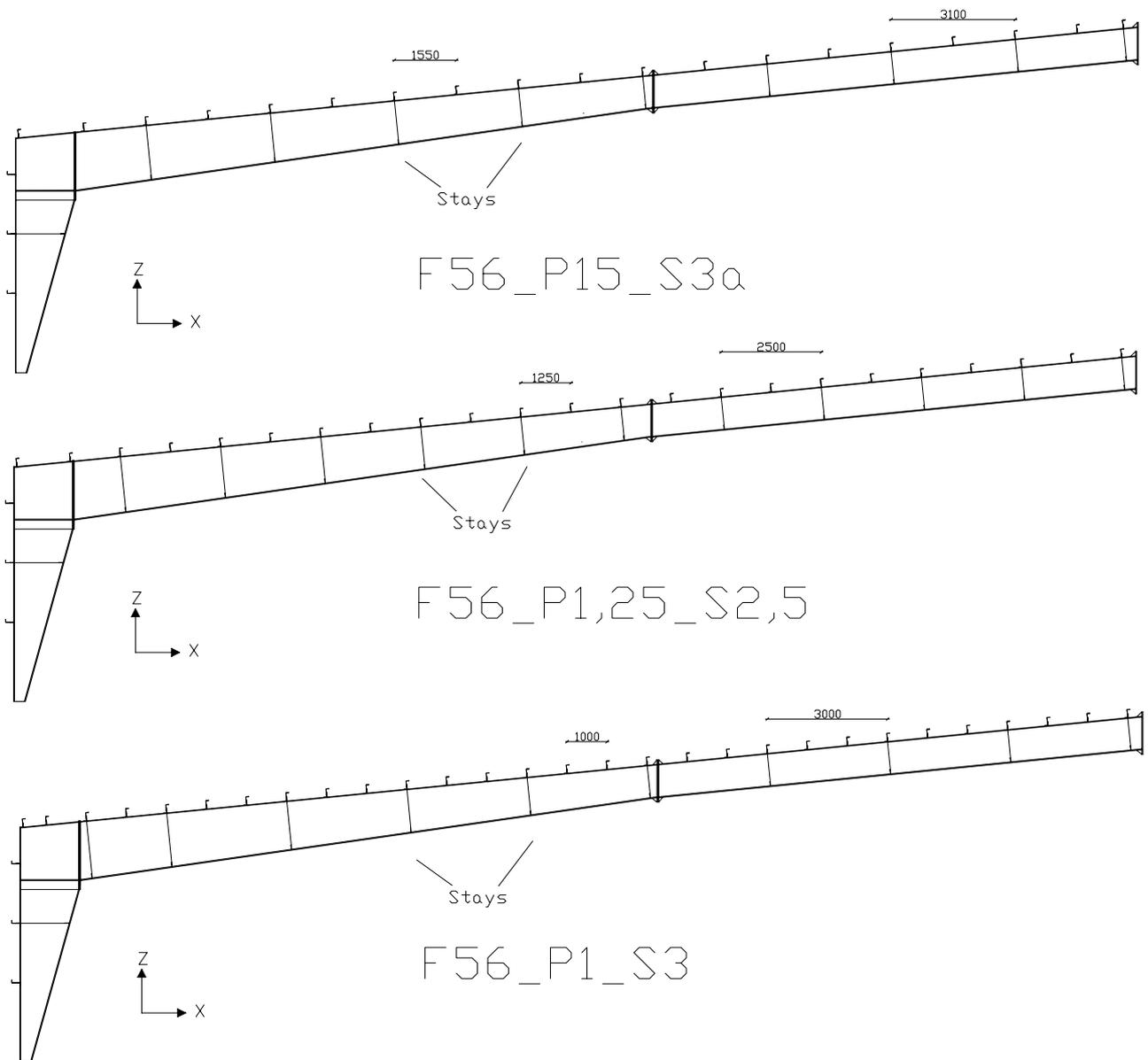


Bild 2.7 Rahmen mit der Spannweite von 56 m, Position der Flanschstreben



3 Numerisches Modell der Gesamtstruktur

Bei der Modellbildung und der Lösungsprozedur kam das FE-Programm Ansys 11.1 software zur Anwendung. Bei den Eingabedateien wurde die sog. Verknüpfung mit syn_editor benutzt.

3.1 Generelle Erwartungen an das Modell

Das numerische Modell soll Stabilität und Tragfähigkeit unterschiedlicher ebener Rahmen verifizieren, die aus gevouteten, geschweißten Blechen unterschiedlicher Dicke hergestellt wurden. Diese 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.

Die Verbindungen wurden als „starr“ betrachtet und als im Material durchlaufende Verbindungen nach EN1993-1-1 [2] modelliert. Kopfplatten und andere Elemente (z.B. Steifen) fließen in die FE-Diskretisation ein, um die Simulation so wirklichkeitsnah wie möglich werden zu lassen.

Bei der Modellierung ist es wichtig, ein Modell zu schaffen, das möglichst einfach handhabbar ist, aber gleichzeitig erlaubt, Veränderungen vorzunehmen. Um Rechenzeit zu sparen, wurden Element- und Knotenanzahl auf das Notwendige reduziert.

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.

Dann erfolgt die Stabilitätsanalyse mit dem kritischen Lastfaktor.

Das Ergebnis ist akzeptabel (z.B. Bild 4.41), aber es ist unmöglich, mit diesem Modell die Untersuchung fortzusetzen, da keine globale Beuleigenform existiert (zum Ansatz der Imperfektionen erforderlich). Bei der Simulation tritt nur lokales Beulen auf.



Um dieses Problem zu eliminieren, wird der Elastizitätsmodul auf $2.100.000 \text{ N/mm}^2$ (anstelle 210.000 N/mm^2) gesetzt, um die Eigenformen für den globalen Stabilitätsverlust zu bekommen. Bei dem MWP Modell wird die Steifigkeit der Pfetten auch erhöht. Mit diesem Modell werden die linearen und Stabilitätsberechnungen noch einmal wiederholt. Die ersten 100 Eigenwerte und Eigenformen werden überprüft und die richtigen angenommen für die Imperfektionen.

Auf der Suche nach dem schlechtesten Imperfektionsmodell werden mehr Eigenformen und strukturelle Imperfektionen kombiniert. Diese Imperfektionen sollten sich bei einer Überlagerung nicht gegenseitig auslöschen

Zur nichtlinearen Analyse wird der Elastizitätsmodul des Rahmens und der Pfette wieder auf den Ausgangswert zurückgeführt. Nach dem Aufbringen der Imperfektionen wird ein bilineares Materialgesetz definiert. Jetzt werden die nichtlinearen Berechnungen durchgeführt.

Eine Lasterhöhungsmethode wird verwendet, bei dem die von der Norm vorgeschriebenen Lasten (Siehe Abschnitt 3.5) in mindestens 100 Schritten auf den Rahmen aufgebracht werden. Der größte angenommene Lastschritt ist 0,01 (1%), das kleinste beträgt 0,001 (0,1%). Der Lastfaktor wird stetig gesteigert bis das Versagen auftritt. Am Ende erhält man die maximale Tragfähigkeit und die Maximalverformung. Wenn der Rahmen beim Erreichen des Lastfaktors 1 versagt, versagt es genau bei der von der Norm vorgeschriebenen Belastung. Wenn das Versagen bei einem Lastfaktor von 1,05 auftritt, kann der Rahmen 105% der von der Norm vorgeschriebenen Belastung tragen.

Nach jeder Simulation wird ein Bild mit den UY-Verformungen automatisch gespeichert.

Die Lasten die in den Abschnitten 3.8, 3.9 und 4.1 verwendet werden, wurden von der herstellenden Firma berechnet.



3.3 Verwendete finite Elemente

Bild 3.1 zeigt eine Hälfte eines Rahmens und die dazugehörigen Elementtypen.

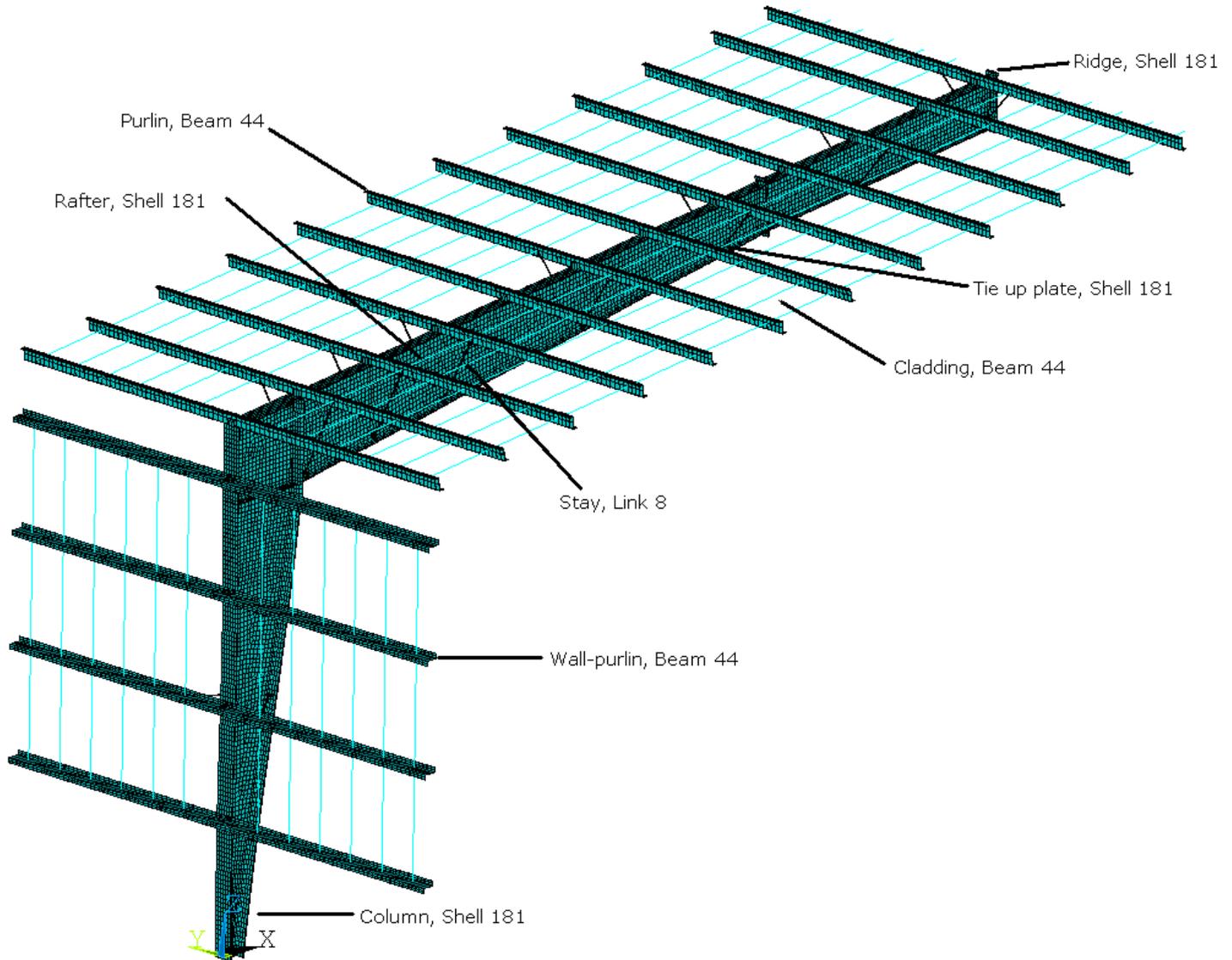


Bild 3.1 Die Verwendeten Elemente



3.4 Materialgesetz und- eigenschaften

Das Materialverhalten des Stahls wurde für die nicht-linearen Berechnungen als „elastisch-plastisch“ (bilinear) angenommen.

Der Elastizitätsmodul ist 210.000 N/mm², Poissonzahl 0,3. 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 N/mm² für alle Bauteile. In einigen Berechnungen (im Abschnitt 3 und auch in Abschnitt 4.1) wurden Materialeigenschaften benutzt, wie sie von der Firma, die diese Rahmen herstellt, gemessen wurden. Die Materialeigenschaften sind wie folgt:

- alle Stege: 390 N/mm²,
- Flansche der Dicke 8-10-12 mm: 285 N/mm²,
- Flansche unter 8 mm (5, 6, 7 mm): 370 N/mm²,
- Flansche über 12 mm: 355 N/mm².

Bei der numerischen Simulation wird der Bemessungswert f_{yd} der Streckgrenze benutzt: $f_{yd} = f_{yk} / \gamma_{M0}$ ($\gamma_{M0} = 1,1$). Die Stahldichte ist 78,5 kN/m³.

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.

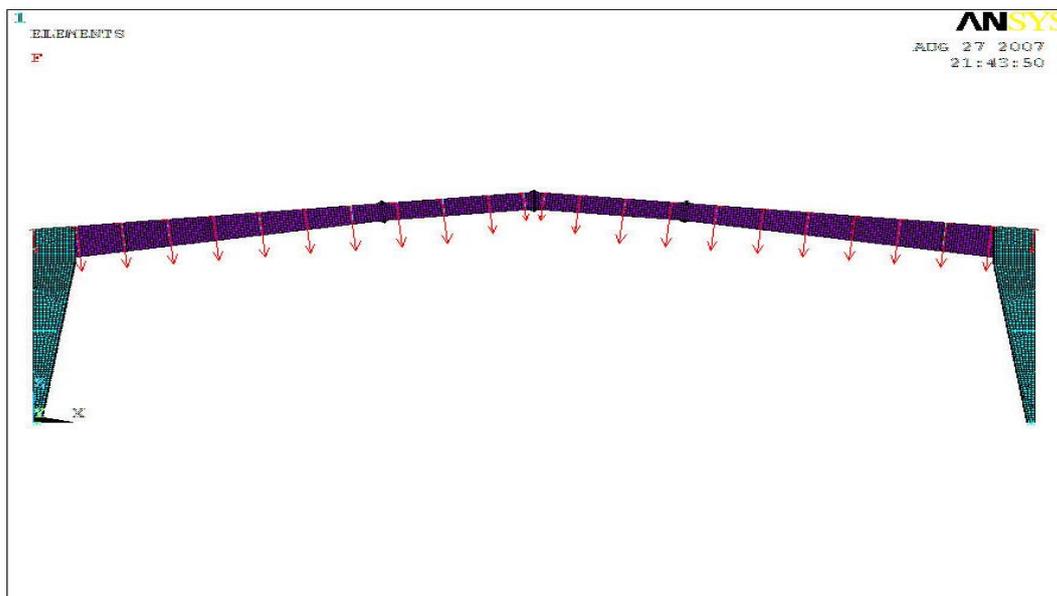


Bild 3.2 Lasten



Wegen der Auflagerbedingungen der Dachpfetten sind die Knoten, in welchen die Punktlasten angreifen, verdreht (Bild 3.2). Um die vertikale Kraft zu erhalten, wird die angreifende Last in zwei Komponenten in Richtung X und Z im Koordinatensystem des Knotens aufgespalten.



3.6 Auflager

Die Kopfplattenstöße und die Fußplatten wurden so realistisch wie möglich modelliert. 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.

3.6.1 Auflagerung der Stützen

Die Stützenauflagerung in beiden Fällen als ein Gelenk betrachtet. Sie kann frei um die Achsen X und Y rotieren, Torsion ist aber nicht erlaubt [6]. (Verdrehung in der Z Richtung gehindert).

Beim Modellieren (Bild 3.3) wurde der CERIG –Befehl angewendet. Er definiert einen steifen Querschnitt am unteren Ende der Stütze, indem er die im Endquerschnitt liegenden Knoten (slave nodes) mit einem Knoten (master node) im Schwerpunkt des Querschnitts verbindet. Dieses “master node” hat vorgeschriebene Freiheitsgrade in die Richtungen UX, UY, und UZ und gegen die Verdrehung ROTZ.

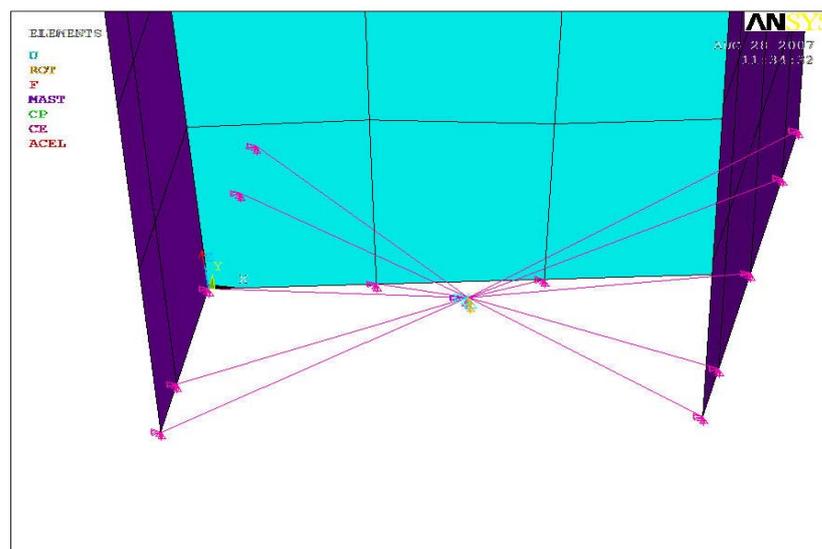


Bild 3.3 Auflagerung der Stütze



3.6.2 Auflagerung der Riegel

Bei der Analyse wurde nur eine Rahmehälfte mit Finiten Elementen modelliert (Bild 3.4), um Rechenzeit und Speicherplatz zu sparen.

Die Möglichkeiten der Symmetrie (Geometrie, Verformungen, Spannungen) wurden genutzt, so konnte die Zahl der verwendeten Knoten klein gehalten werden. Die Auflager, die die andere (hier rechte) Seite des Rahmens ersetzen, sind in Bild 3.4 dargestellt. Alle Knoten des Firstes werden nur in UX-Richtung gehalten. Diese Lagerung verleitet den Rahmen zum Schwingen, was für unsere Untersuchungen aber kein Problem darstellt. Die Analyse fokussiert sich auf das Tragverhalten des Rahmens, das Schwingverhalten hat keinen Einfluss auf sein Tragverhalten. In Abschnitt 3.8.6.2 wird gezeigt, dass die aus den vertikalen Imperfektionen stammenden Beanspruchungen die Tragfähigkeit des Rahmens nicht beeinflussen.

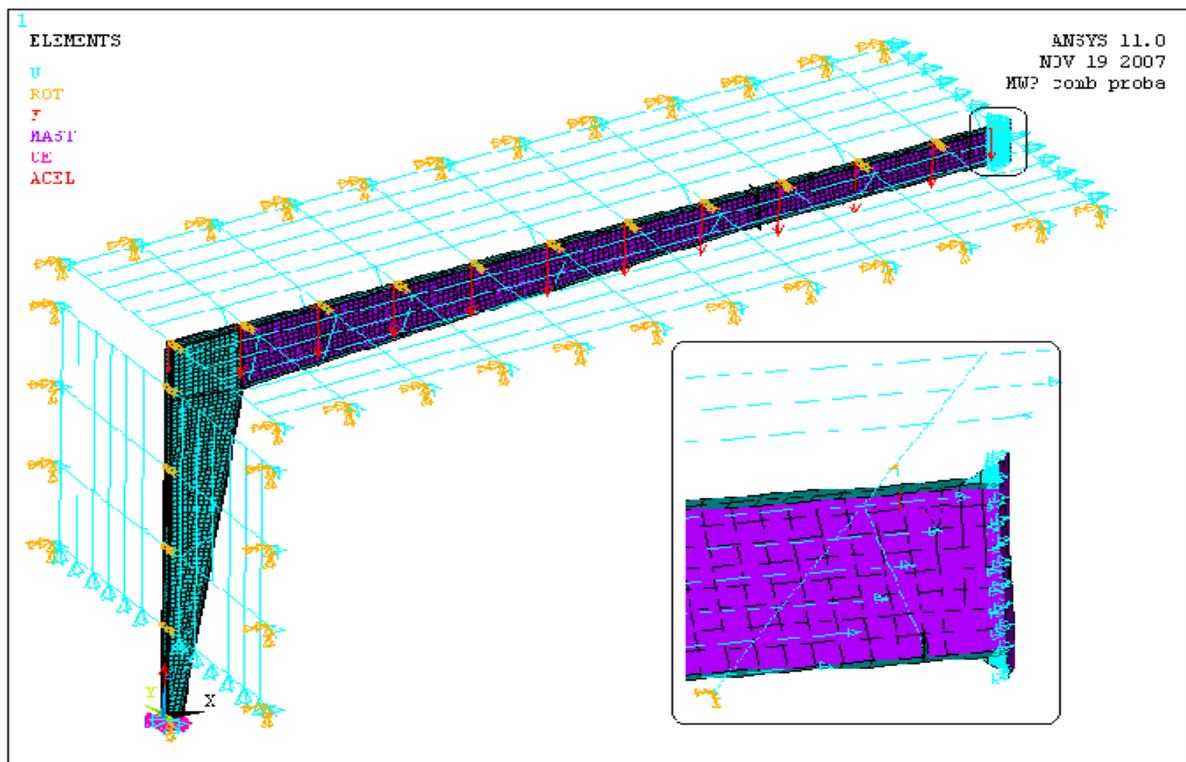


Bild 3.4 Rahmehälfte, First

3.6.3 Auflagerung der Pfetten

3.6.3.1 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.



Der Obergurt bzw. der Außengurt ist also in Y-Richtung festgehalten (Bild 3.5). Die Flanschstrebe wurde als elastischer Auflager für den inneren Gurt betrachtet; deshalb werden Federn benutzt (Combin 14). Diese Elemente brauchen zwei Knoten – der zweite Knoten ist an der Position, wo der Innengurt aufgelagert ist. Diese neun Knoten werden in Y-Richtung festgehalten.

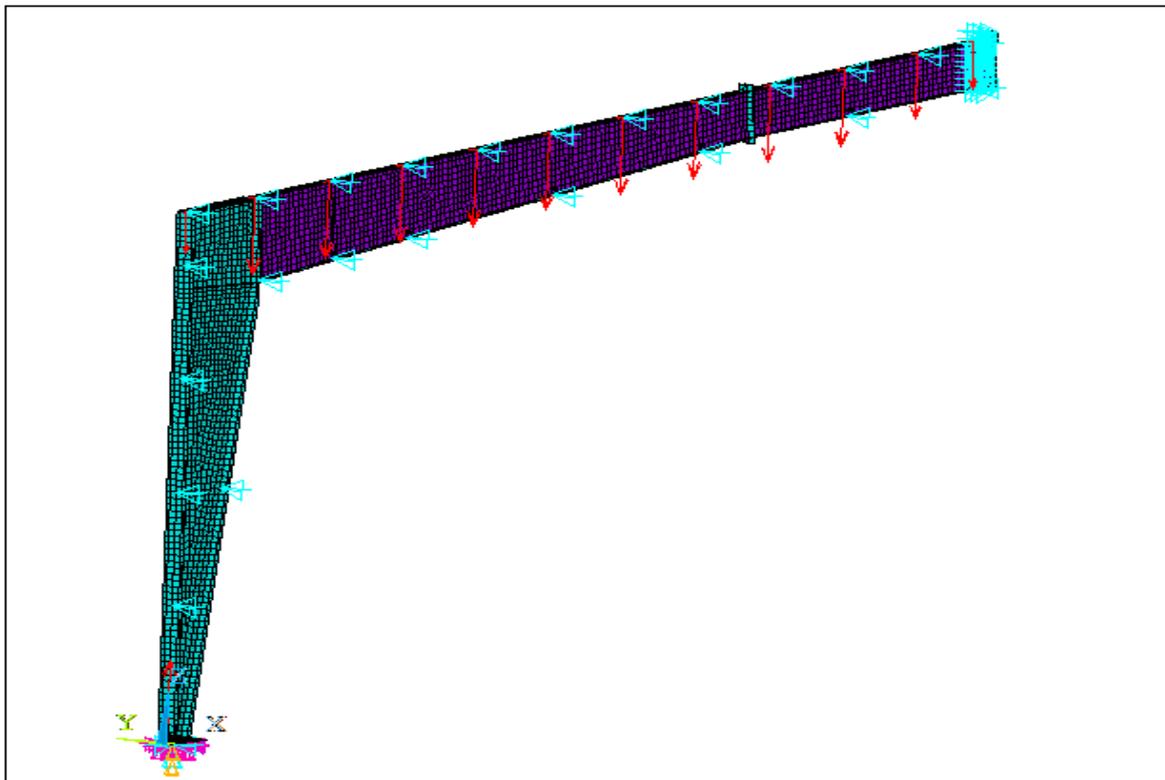


Bild 3.5 Auflagerung beim vereinfachten Federmodell

3.6.3.2 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 [5], Bild 3.6. Im folgenden wird demonstriert, wie es möglich ist, diese Art von Verschiebungen zu modellieren. In beiden Fällen wurde angenommen, dass die Pfette an der Verbindung von Riegel und Pfette keinerlei Torsionsmoment aufnehmen können. In Abschnitt 4.2.3 werden die verschiedenen Auflagerbedingungen geprüft. Auf den Verformungsbildern lassen sich symmetrische und asymmetrische Formen gut erkennen.

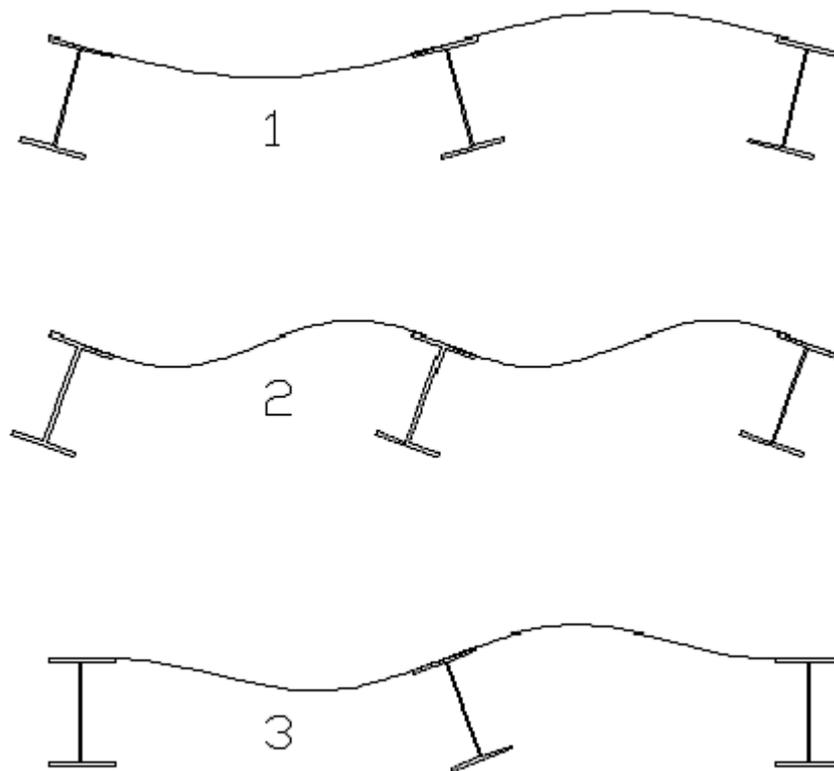


Bild 3.6 Durchbiegungsformen, verursacht durch Verschiebungen des Riegeluntergurts, 1. zeigt eine symmetrische, 2. und 3. zeigen asymmetrische Formen

Symmetrische Form

Die Freiheitsgrade der Knotenpunkte in den Mittelpunkten der Pfetten (Auf dem halben Weg zwischen den Rahmen) werden vorgeschrieben. Diese Knoten wurden so gedreht, dass ihre Achsen und die Achsen der Auflager parallel mit dem Koordinatensystem und dem Riegel stehen.

Die Knoten der Dachpfetten sind in Y-Richtung gehalten und können sich um die X und Z Achsen nicht verdrehen. Das heißt, dass die Querschnitte der Dachpfette in der X-Z Ebene bleiben, sich dort aber verdrehen können (um die Y Achse).

Die Knoten der Wandpfetten sind in Y-Richtung gehalten und können sich um die X und Z Achsen nicht verdrehen. Der Grund ist der gleiche was schon bei Bild 3.4 zu sehen war.

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. (Bild 3.7).



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. (Bild 3.7).

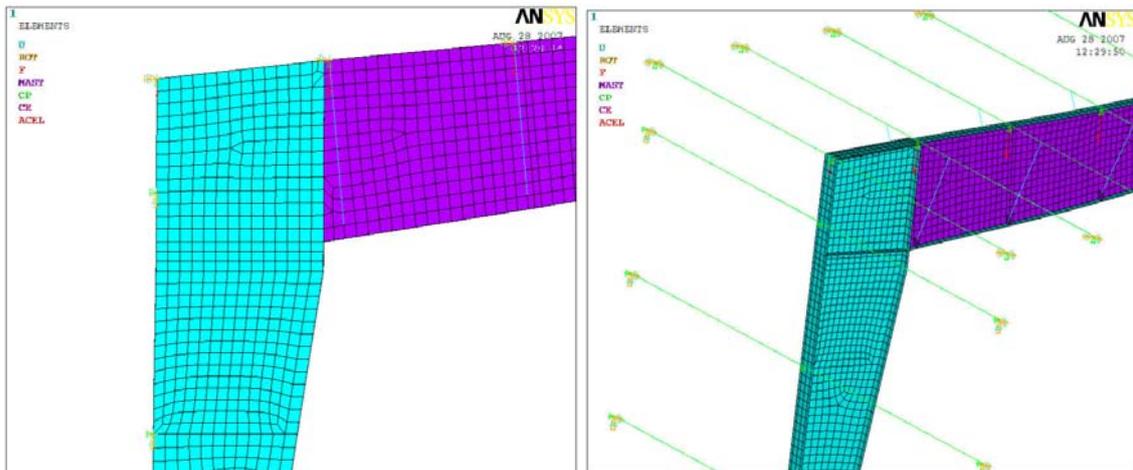


Figure 3.7. Anti-symmetrische Auflagerung

Auflagerung der Dach- und Wandhülle

Beim Modell mit Pfetten (MWP) wurden Dach- und Wandhülle durch Elemente des Typs Beam 44 modelliert. Um dem symmetrischen Zustand gerecht zu werden, werden die letzten Knoten (wie bei den Auflagern der Riegel) in der Pfettenmitte in X-Richtung eingespannt (Bild 3.4). Die Träger der Wandhülle sind in Z-Richtung eingespannt.



3.7 Modell der Verbindungen

3.7.1 Rahmenverbindungen

Alle wichtigen Verbindungen gehören in dieses Kapitel (Stützen-Riegel-Verbindung, Firststoß und Riegel Bild 3.8). Wie in Abschnitt 3.1 erwähnt, sind die Verbindungen 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. Das bedeutet, der erste Knoten des Riegels ist ebenfalls ein Knoten für die Stütze und ebenso für die Stirnplatte.

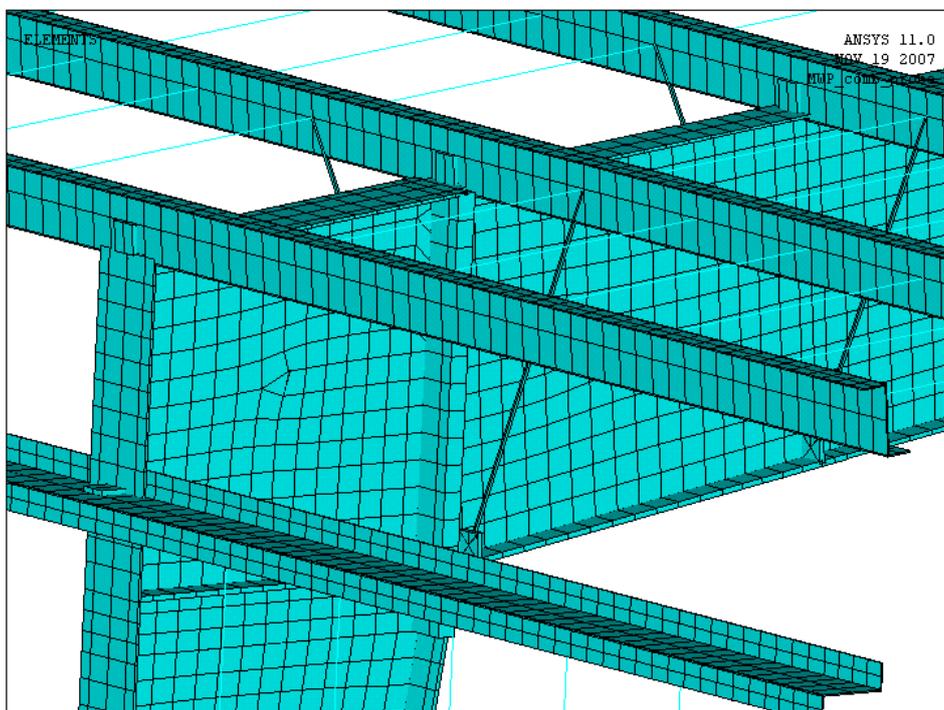


Bild 3.8 Verbindungen

3.7.2 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. Der erste Knoten dieses Elements ist mit dem Obergurt des Riegels verbunden. Das Ende dieses Elements liegt auf der Mittellinie der Pfetten (Bild 3.9).

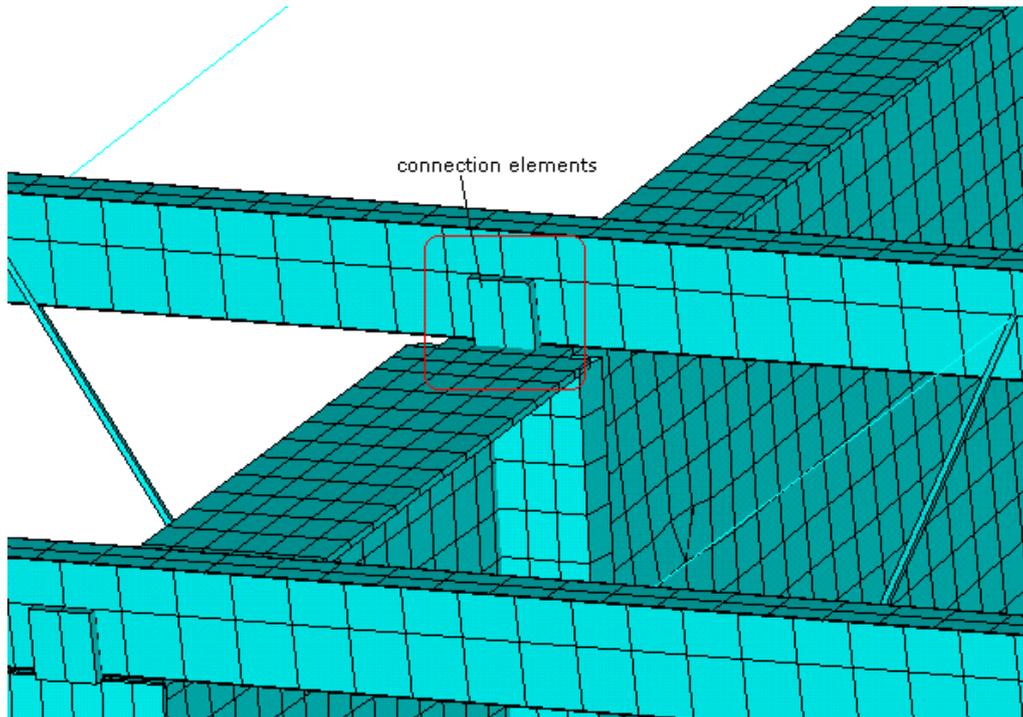


Bild 3.9 *Modellierte Verbindung von Pfette und Riegel*



Bild 3.10 *Verbindung von Pfette und Flanschstrebe in der Realität*

Die Rahmen-Streben und Streben-Pfetten Verbindungen sollten Verdrehungen in der vertikalen Ebene der Streben zulassen, wie man in Bild 3.10 erkennen kann. Elemente des Typs Link 8 wurden zur Modellierung der Flanschstreben verwendet. Die Verwendung dieses Elementtyps ist korrekt, da nur Zug und Druck übertragen werden können (s. Abschnitt 3.3.3). Den Effekt ist der gleiche, als wenn man ein Gelenk zwischen Pfetten und Flanschstreben nach [4] anordnet.



3.8 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.

3.8.1 Globale Imperfektion, Schrägstellung des Rahmens

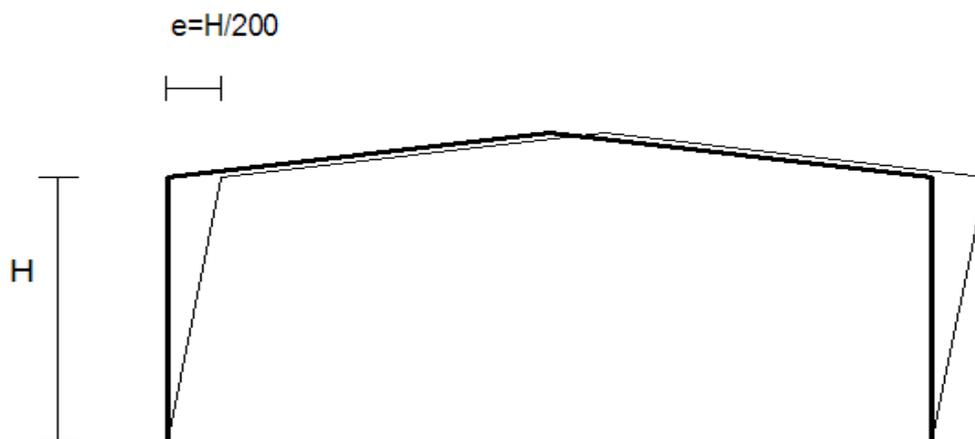


Bild 3.11 Schrägstellung des Rahmens

3.8.2 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 (Bild 3.12). Um diese Formen zu erhalten, muss man den Elastizitätsmodul des Steges und die Steifigkeit der Pfetten heraufsetzen. Die maximale Imperfektion beträgt $h/200$, wobei h die Steghöhe an der Stelle des Beulens ist. In Ansys wird der Befehl "UPGEOM" genutzt. Dieser Befehl addiert Verformungen von der vorangegangenen Analyse und aktualisiert die Geometrie des Finiten Element Modells zu der verformten Konfiguration.

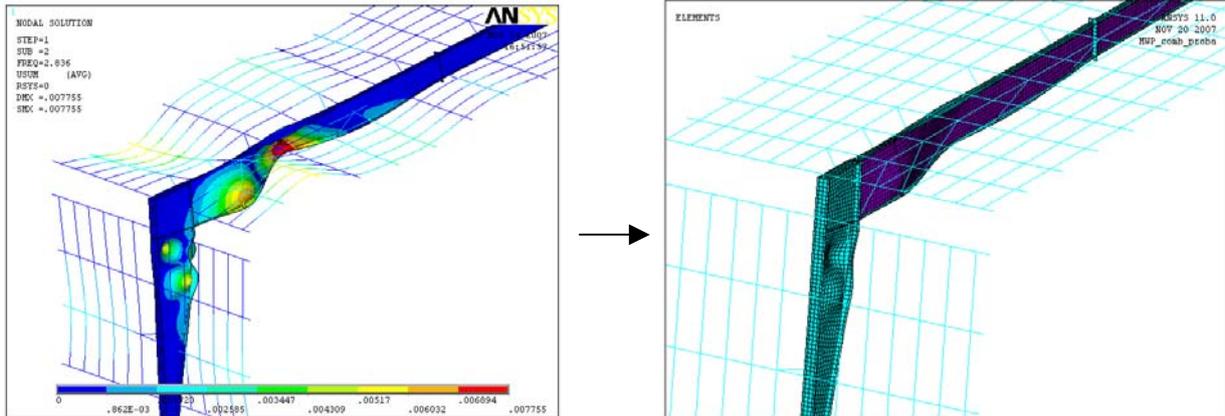


Bild 3.12 Eigenform Imperfektionen, Knickform des Riegels, upgeom

3.8.3 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 (Bild 3.13). Die maximale Imperfektion beträgt $h/200$, wobei 'h' die Steghöhe bei maximalen lokalem Beulen angibt. Der Befehl UPGEOM wird wiederum angewandt.

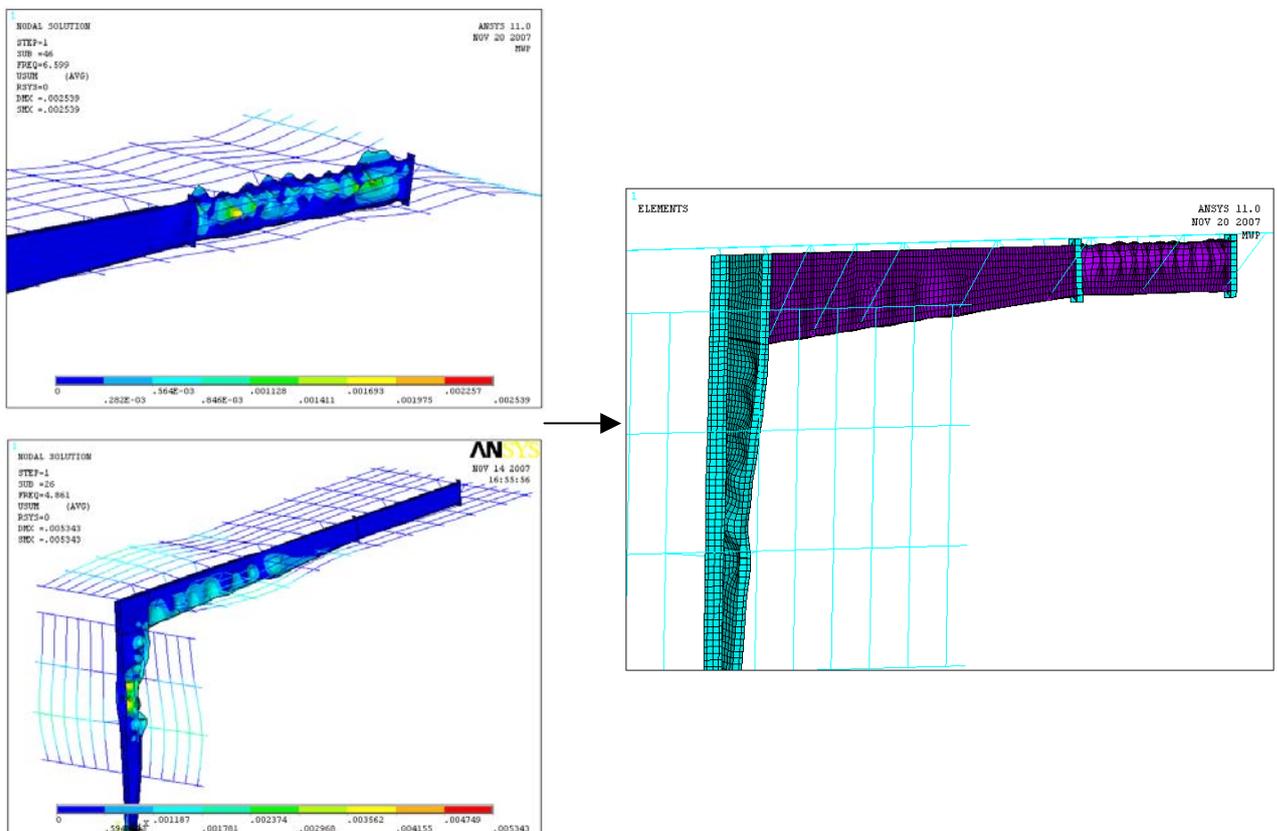


Bild 3.13 Eigenform Imperfektionen, Beulform des Riegels, upgeom



3.8.4 Imperfektionen in der Rahmenebene

Diese Imperfektionen haben eine sinusförmige Bogenform (Bild 3.14) 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).

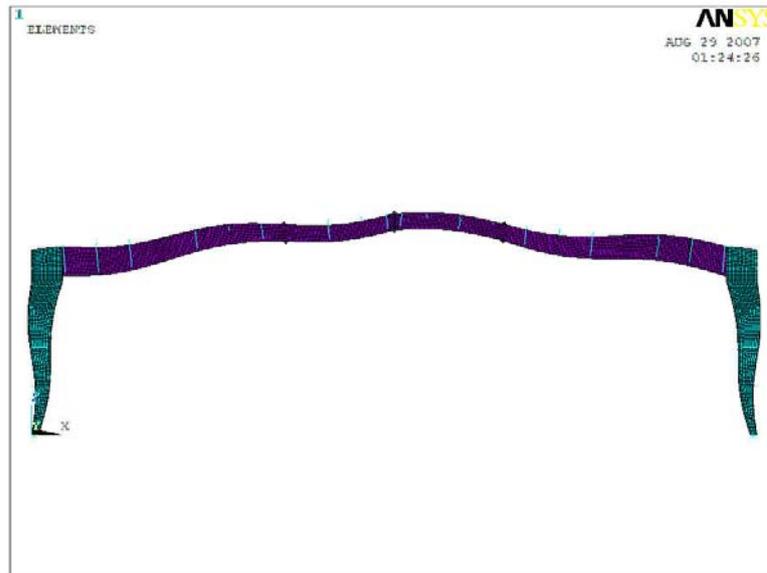


Bild 3.14 Imperfektionen in der Rahmenebene

3.8.5 Imperfektionen normal zur Rahmenebene

Diese Imperfektion hat eine sinusförmige Bogenform normal zur Rahmenebene (Bild 3.15) mit einer vollen Welle entlang der Stütze und neun Wellen entlang des Riegels. Die Amplitude beträgt nach EC3 $L/150$ (Wellenlänge L wie in Abschnitt 3.8.4). Der Effekt von mehr Wellen oder größeren Amplituden wird in den nächsten Abschnitten untersucht.

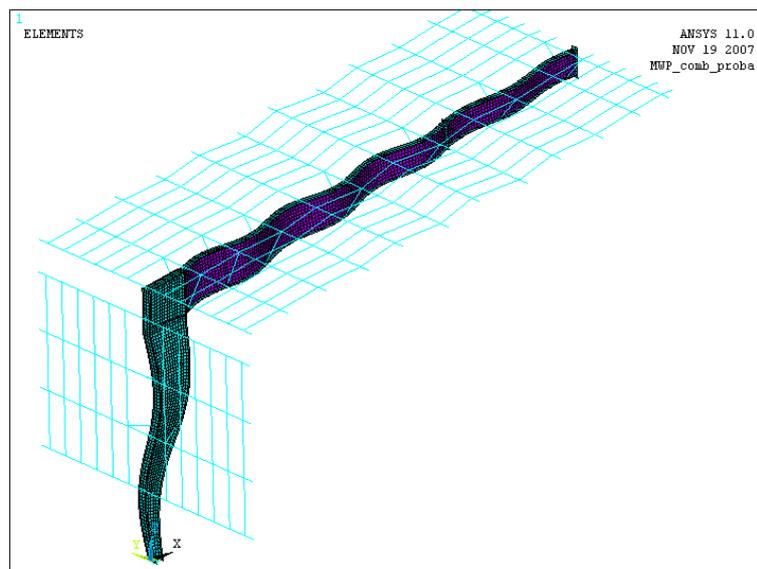


Bild 3.15 Imperfektionen normal zur Rahmenebene



3.8.6 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.

3.8.6.1 SSM Imperfektionen

Eigenform Imperfektionen, Knick- und Beulform des Riegels

Die untersuchten Kombinationen der Eigenformen und die dazugehörigen Traglasten (Rahmenversagen) ist in Tabelle 3.1 und in Bild 3.16 gezeigt. In Tabelle 3.1 (und in ähnlichen Tabellen später) zeigt die erste Spalte die Kombinationsnummer, die 2. bis 6. Spalte die ausgewählte Nummer (z.B.17) der Eigenformen für verschiedene Bauteile. In der letzten Spalte ist die dazugehörige Traglast des Rahmens angegeben.

Comb num	The applied eigenshape					Load capacity
	Global buckling		Local buckling			
	Column	Rafter	Column	Rafter		
			Tap. part	Lin part		
1	17	7	17		33	1,180
2		7	98		28	1,175
3		7	61	61	83	1,189
4		7	62	62	62	1,191
5		59	59	59	28	1,252
6		69	69	69	28	1,256
7	1		72	72	72	1,150
8	25		89	89	89	1,263
9	25			35	28	1,245
10		7	8		33	1,162
11	1		63	63	63	1,149

Tabelle 3.1 Kombination der Eigenformen für SSM

Bilder von den angewendeten Eigenformen sind auf CD in SSM enthalten, ebenso die Verformungen des Rahmen in UY-Richtung.



Die Sensitivitätsanalyse der 7. Eigenformkombination ist in Bild 3.16 enthalten. Auf Bild 3.17 ist die Tragfähigkeit über den Verschiebungen U_y der Knoten 3294 und 3383 (diese Knoten haben die größte Verschiebung in positive und negative Richtung) gezeigt.

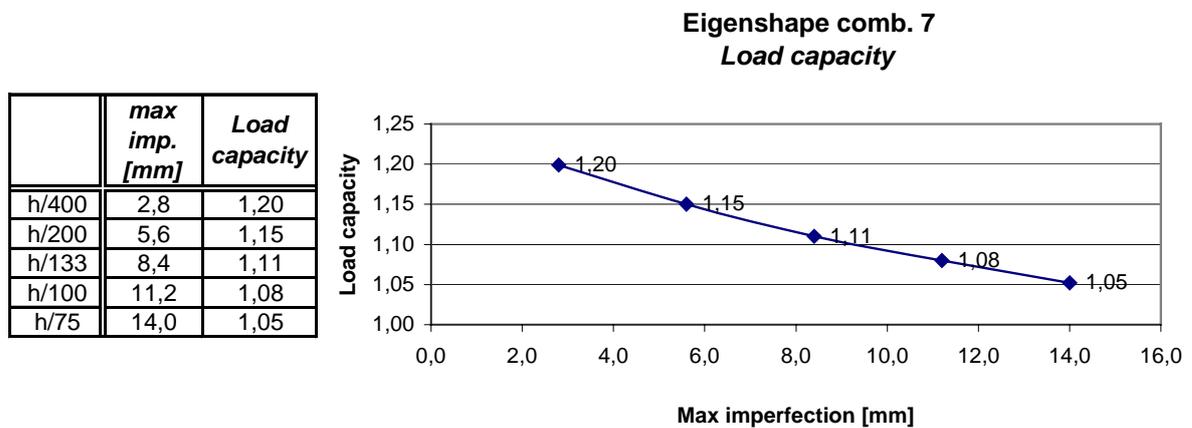


Bild 3.16 Sensivität der 7. Eigenformkombination

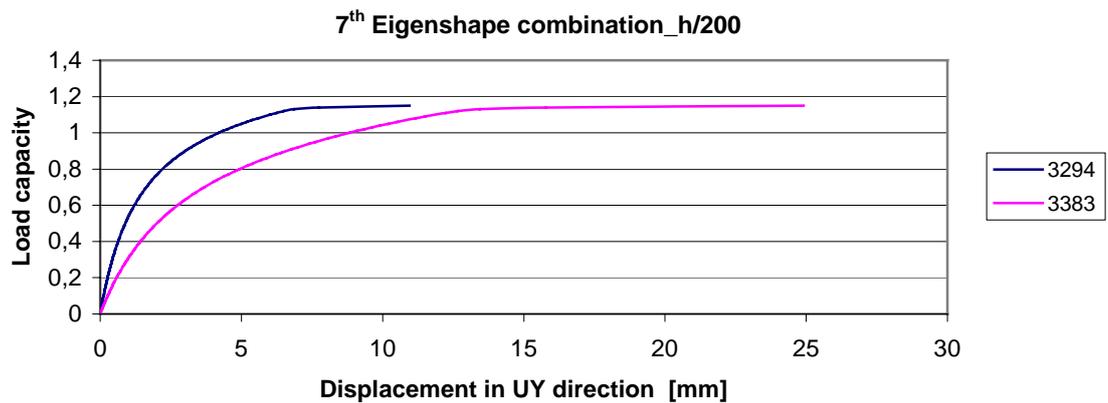


Bild 3.17. Verschiebungen

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

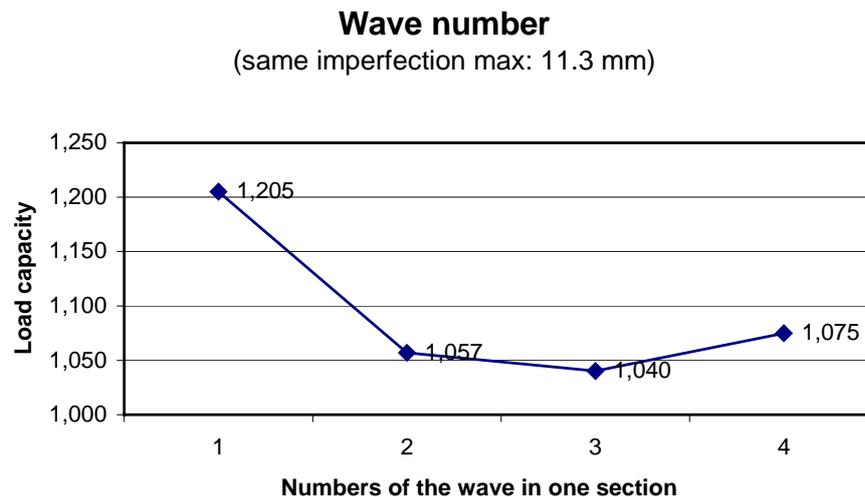
Mit SSM wurden auch die Imperfektionen in und aus der Rahmenebene, sowie aus dem Lot untersucht. Es kam dabei heraus, dass sie generell keinen großen Einfluss auf das Tragverhalten des Rahmens haben.

Der Einfluss der Wellenzahl normal zur Rahmenebene (Bild 3.15) auf die Traglast ist signifikant.

Der Effekt der Wellenzahl (1, 2, 3, 4) auf einen Abschnitt der Länge $L=5000$ mm wird auf Bild 3.18 untersucht. Auch die Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Amplituden der Imperfektionen wurde durchgeführt (Tabelle 3.2 und Bild 3.19).

Tabelle 3.2 Wellen

Wave number	L/x	max amplitudo [mm]	Load capacity
1	450	11,3	1,205
2	150	8,5	0,990
2	225	11,3	1,057
2	300	17,1	1,090
3	100	8,5	0,943
3	150	11,3	1,040
3	200	17,1	1,069
4	110	11,3	1,075

**Bild 3.18 Wellenzahl**

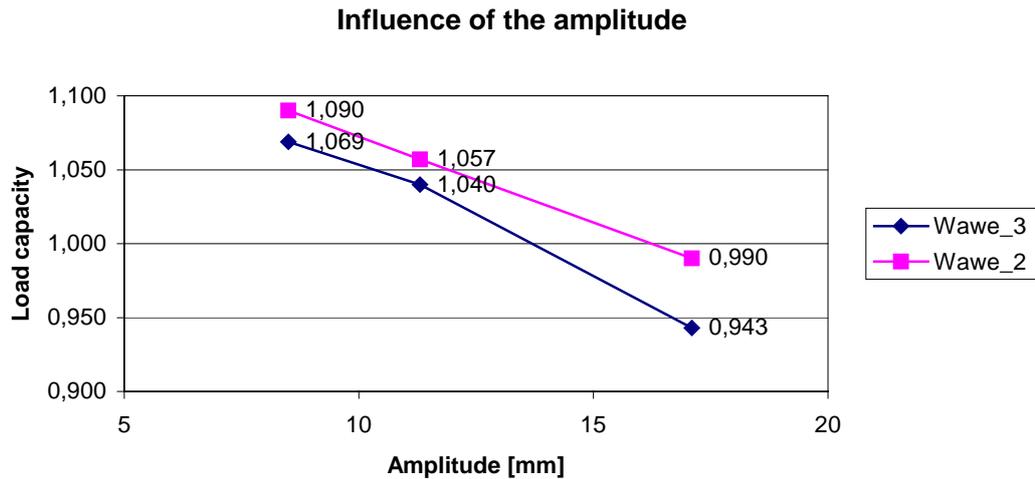


Bild 3.19 Tragfähigkeit in Abhängigkeit von der Wellenanzahl und Amplitude

Kombination der Imperfektionen

In Tabelle 3.3 werden die untersuchten Kombinationen und ihre Resultate zusammengefaßt. Die 2. bis 5. Spalte gibt den Typ der Imperfektionen und ihren Multiplikator an.

Tabelle 3.3 Kombination der Imperfektionen

Type of the imperfection Comb num	Eigen shape	Bow in normal	Bow in plane	Global oof	min imperfection in y [mm]	max imperfection in y [mm]	Load capacity	Max Uz disp. [mm]
1	7 x 0,7	1	xxx	xxx	-23,35	24,84	1,005	174,3
2	10 x 0,7	1	xxx	xxx	-23,37	25,00	1,045	182,8
3	10 x 1,0	0,7	xxx	xxx	-16,36	18,74	1,037	175,1
4	11 x 0,7	1	xxx	xxx	-23,37	25,45	1,002	172,6
5	11 x 1,0	0,7	xxx	xxx	-16,37	19,39	1,039	174,2
6	11 x 0,7	1	0,7	xxx	-23,37	25,45	1,009	174,2
7	11 x 0,7	1	0,7	xxx	-23,37	25,45	1,002	173,9
8	11 x 0,7	1	0,7	0,7	-23,37	25,45	1,007	175,3

Die Kombination 4 weist die niedrigste Traglast aus; deshalb ist sie als der ungünstigste Fall angenommen. Bild 3.20 zeigt die Verformungen in UY-Richtung bis zum Versagen des Rahmens. Die Tragfähigkeit über der Durchbiegung (may UZ-Wert) ist auf Bild 3.21 aufgetragen.

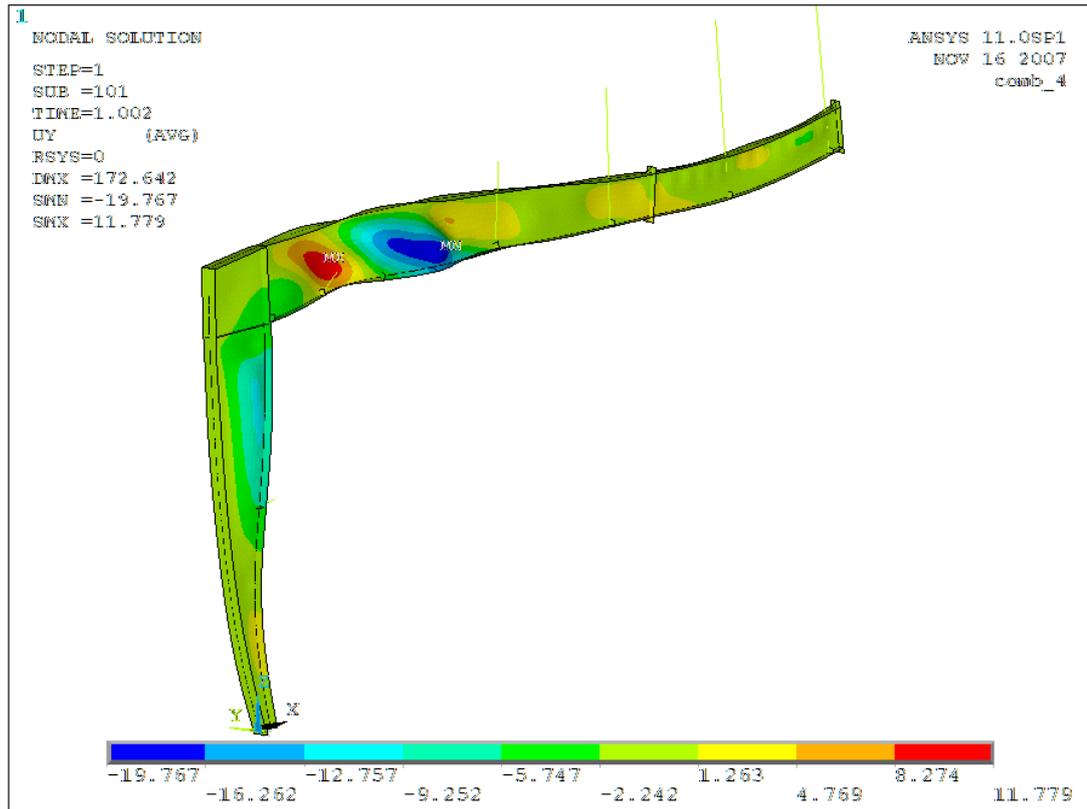


Bild 3.20 UY-Verschiebungen, 4. Kombination, [mm]

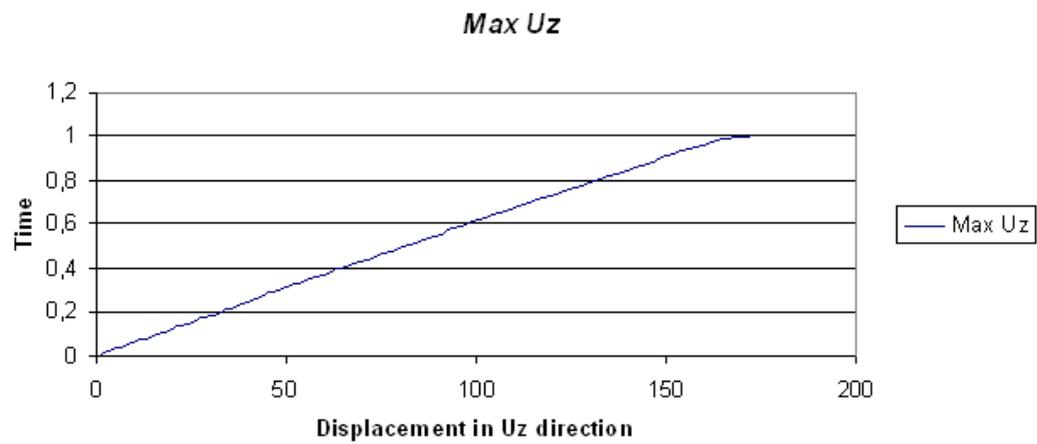


Bild 3.21 Tragfähigkeit über Durchbiegung



3.8.6.2 MWP Imperfektionen

Die untersuchten Eigeformkombinationen und die dazugehörigen Traglasten (Rahmenversagen) sind in Tabelle 3.4 und auf Bild 3.22 dargestellt. Die Sensivitätsanalyse der 9. Eigenformkombination enthält Bild 3.22.

Tabelle 3.4 Verwendete Eigenwertkombinationen

Comb num	The applied eigen shape					Load capacity
	Global buckling		Local buckling			
	Column	Rafter	Column	Rafter		
Tap. part				Lin part		
1	1	1	1	24	43	1,120
2	1	1	65	65	46	1,105
3	1	1	1	33	46	1,136
4		1	84	84	25	1,180
5		2	93	93	46	1,020
6		2	65	65	46	1,018
7		2		33	46	1,015
8		2	84	84	25	1,017
9		2	26	26	43	1,015

	max imp. [mm]	Load capacity
h/400	6,0	1,12
h/200	12,0	1,02
h/133	18,1	0,95
h/100	24,1	0,91

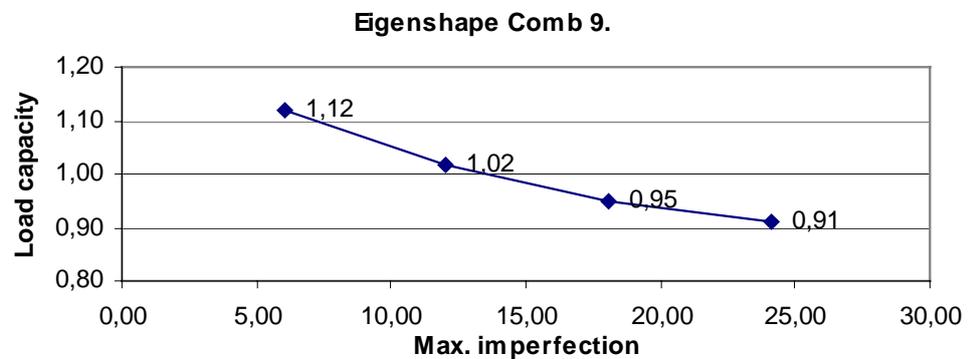
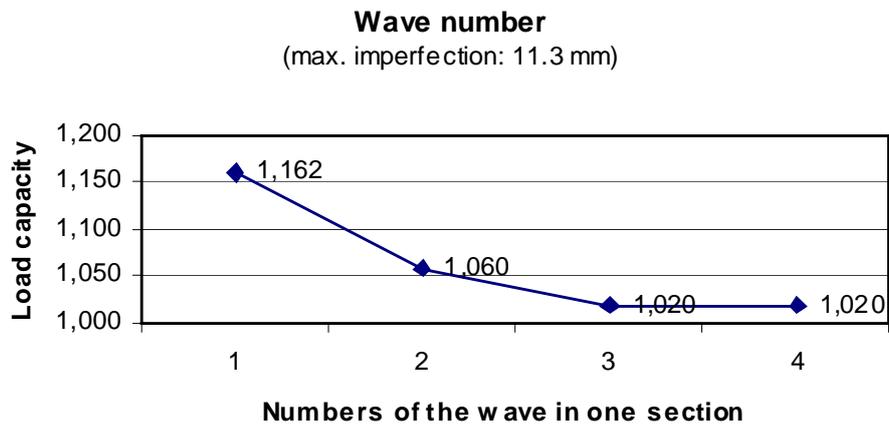


Bild 3.22 Sensivität der 9. Eigenformkombination

*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 (Bild 3.15) signifikant. Der Effekt der unterschiedlichen Wellenzahl (1, 2, 3, 4) auf einen Abschnitt der Länge $L=5000$ mm wurde auf Bild 3.23 untersucht. Auch die Sensitivitätsanalyse mit verschiedenen Amplituden der Imperfektionen wurde durchgeführt (Tabelle 3.5 und Bild 3.24).

Wave number	L/x	max dislocation [mm]	Load capacity
1	450	11,3	1,162
2	150	8,5	0,995
2	225	11,3	1,060
2	300	17,1	1,100
3	100	8,5	0,946
3	150	11,3	1,020
3	200	17,1	1,070
4	110	11,3	1,020

Tabelle 3.5 Wellenzahl**Bild 3.23 Wellenzahl**

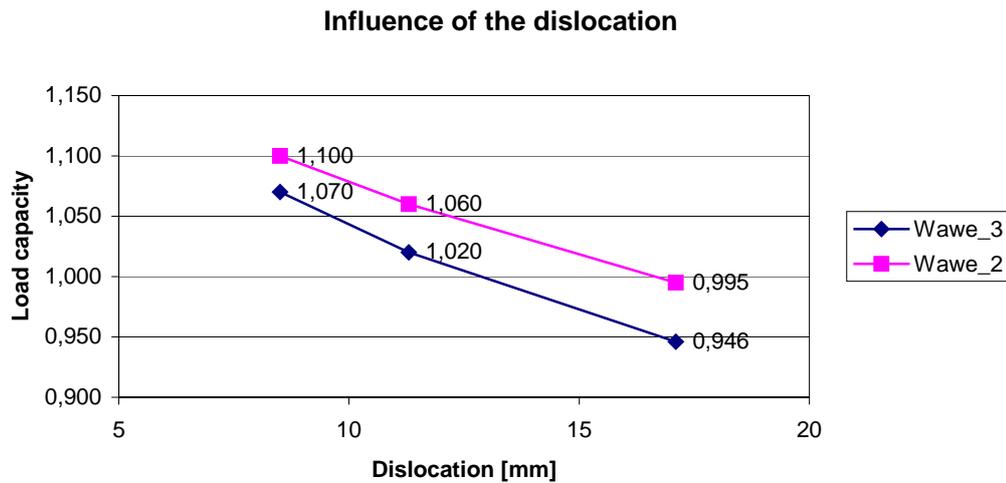


Bild 3.24 Wellenzahl, Amplitude

Kombination der Imperfektionen

In Tabelle 3.6 sind die untersuchten Kombinationen und ihre Resultate zusammengefasst. In der 2. bis 5. Spalte wurden die verschiedenen Typen der Imperfektionen zusammen mit Multiplikatoren dargestellt.

Type of the imperfection	Eigen shape	Bow in normal	Bow in plane	Global oov	max imperfection in y [mm]	min imperfection in y [mm]	Load capacity	Max Uz displ. [mm]
comb num								
1	9 x 1,0	0,7	xxx	xxx	18,8	-22,1	0,935	178,3
2	9 x 0,7	1	xxx	xxx	23,3	-26,7	0,935	176,8
3	7 x 1,0	0,7	xxx	xxx	20,7	-23,4	0,935	174,5
4	7 x 0,7	1	xxx	xxx	23,5	-27,5	0,935	178,2
5	8 x 0,7	1	xxx	xxx	23,25	-28,75	0,935	173,7
6	9 x 0,7	1	0,7	xxx	23,3	-26,7	0,935	174,2
7	9 x 0,7	1	xxx	0,7	23,3	-26,7	0,935	175,9
8	9 x 0,7	1	0,7	0,7	23,3	-26,7	0,935	178,7

Tabelle 3.6 Kombination der Imperfektionen

Von den Kombinationen zeigt die Nummer 4 die niedrigste Tragfähigkeit. Deshalb wurde diese Imperfektion als der schlechteste Fall behandelt. Bild 3.25 zeigt die Verformungen in UY-Richtung des Rahmens vor seinem Versagen. Die Tragfähigkeit über der Durchbiegung ist auf Bild 3.26 dargestellt.

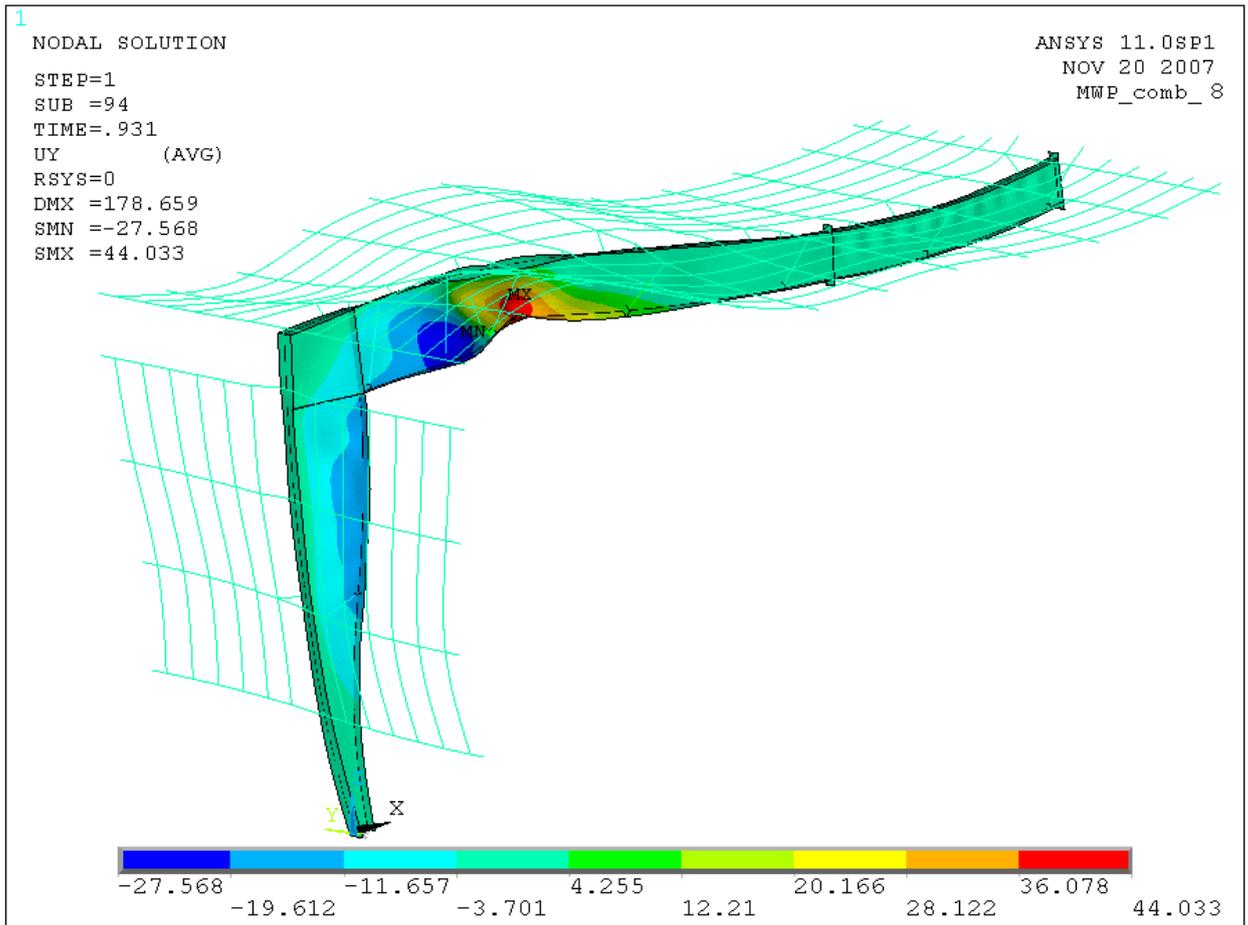


Bild 3.25 UY-Verschiebungen, 8. Kombination [mm]

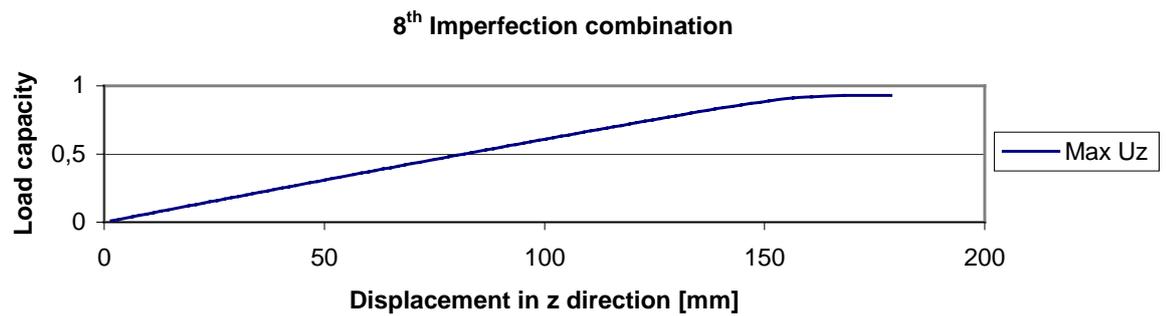


Bild 3.26 Traglast über Durchbiegung



3.9 Zusammenfassung

In Abschnitt 3 werden die Grundzüge des numerischen Modells geschildert: die verwendeten Finiten Elemente, das Materialgesetz, Last- und Auflagermodellierung sowie die Modellierung von Verbindungen und angesetzter Imperfektionen. Es wurde eine 3000 Zeilen lange, parametrische Eingabedatei geschrieben, die den Aufbau neuer Rahmen in kurzer Zeit erlaubt.

In Abschnitt 3.8.6 werden zwei komplette Imperfektionsanalysen (mit Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Imperfektionen) gezeigt. 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.

Bei der Modellierung kamen einige Fragen (einige infolge der Vereinfachungen) bezüglich der Steifigkeit der verwendeten Bauteile auf. Im nächsten Abschnitt 4.1 werden folgende Fragen beantwortet:

- Einfluss der Federsteifigkeit,
 - Einfluss der Steifigkeit der Flanschstreben,
 - Auflagerbedingungen,
 - Modellierung der Pfetten,
 - Modellierung der Hülle,
- auf die Traglast des Rahmens.



4 Ergebnisse

4.1 Steifigkeit der verschiedenen Bauelemente

Im folgenden wird eine Studie präsentiert, die von verschiedenen Steifigkeiten unterschiedlicher Bauteile ausgeht.

Bei der Analyse nach dem vereinfachten Federmodell (SSM) wird die 4. Kombination der Imperfektionen verwendet (siehe Abschnitt 3.8.6.1), wenn das Modell mit Pfetten (MWP) zur Anwendung kommt, wird ebenfalls die 4. Kombination der Imperfektionen genutzt (siehe Abschnitt 3.8.6.2). In beiden Fällen ist die Elementgröße 100 mm. Mit dieser Größe sind die Ergebnisse nicht so genau; die Tendenz jedoch lässt sich erfassen. Im nächsten Schritt wird die Federsteifigkeit im Vereinfachten Federmodell (SSM) sowie die Steifigkeit der Flanschstreben, der Pfetten, der Hülle und unterschiedlicher Auflagerbedingungen im Modell mit Pfetten (MWP) erkundet.

4.1.1 Einfluss der Federsteifigkeit

Um im Modell SSM den Einfluss der Federsteifigkeit auf die Rahmentragfähigkeit zu analysieren, wird diese variiert. Mit 100% in Tabelle 5.1 ist die Original-Federsteifigkeit gemeint. Die anderen Federsteifigkeiten werden in Prozentzahlen der Original-Federsteifigkeit ausgedrückt.

Als Resultat erhält man den kritischen Lastfaktor (Freq, nach der Stabilitätsberechnung) und die Tragfähigkeit. In Bild 4.1 werden die Ergebnisse über den Prozentzahlen der Originalsteifigkeit aufgetragen. Bild 4.2 und Bild 4.3 geben zwei typische Versagensbilder mit UY-Verschiebungen an.

%	Freq	Load capacity
0	0,477	0,526
1	0,610	0,572
5	0,880	0,717
10	1,012	0,821
25	1,046	0,944
50	1,049	0,988
100	1,051	1,007
150	1,052	1,005
200	1,052	1,006
400	1,053	1,014

Tabelle 4.1 Federsteifigkeit, Ergebnisse

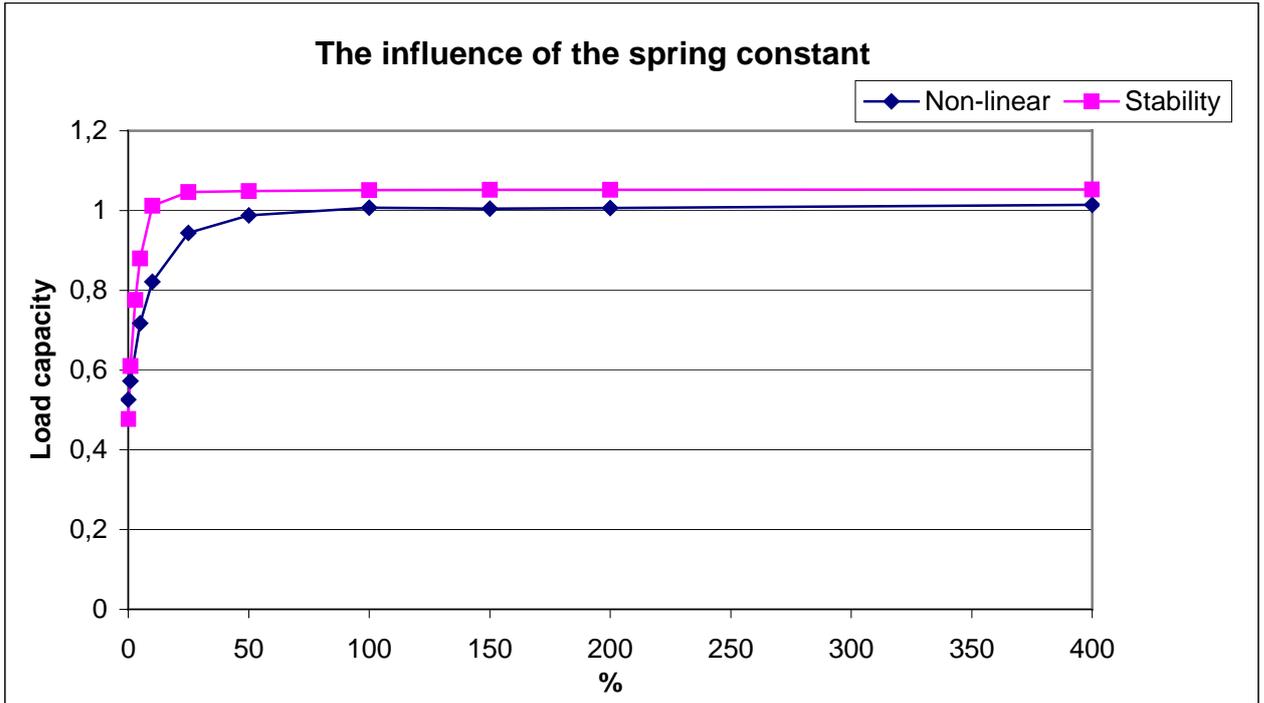


Bild 4.1 Tragfähigkeit des Rahmens über den Prozentzahlen der Originalsteifigkeit

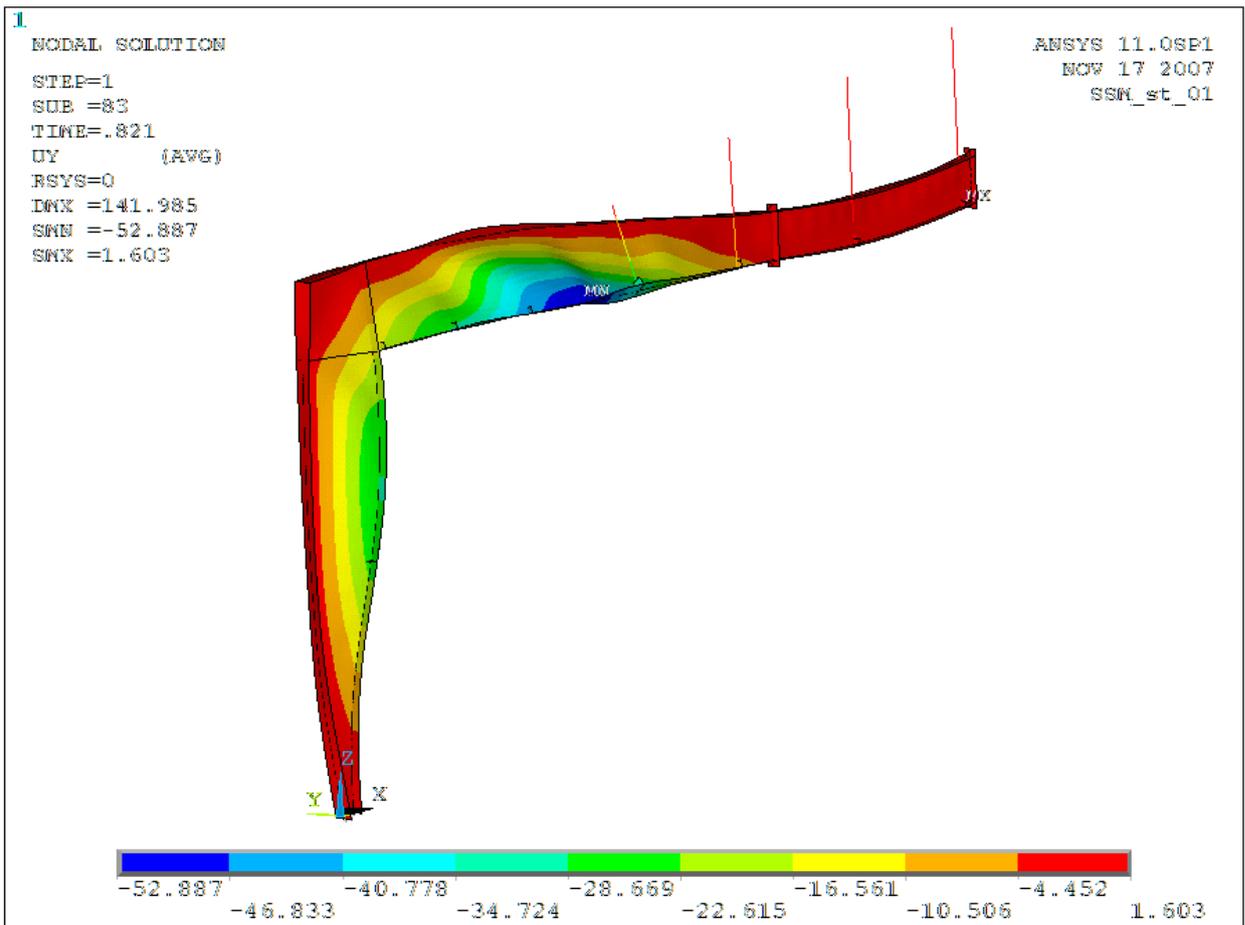


Bild 4.2 UY-Verformung, die Federkonstante ist 10%

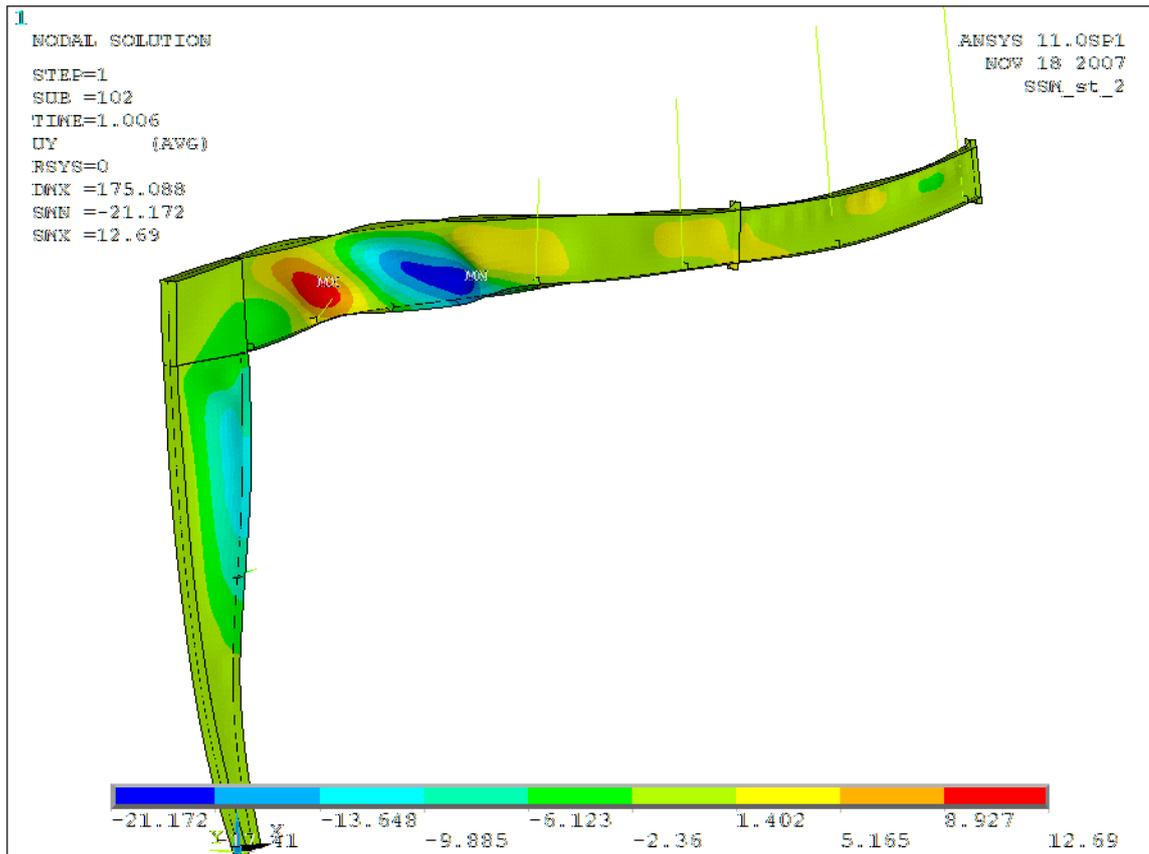


Bild 4.3 UY-Verformung, die Federkonstante ist 200%

Aus Bild 4.1 folgt, 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 (Bild 4.3). 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 (Bild 4.2).

4.1.2 Einfluss der Steifigkeit der Flanschstreben

Im Modell mit Pfetten sind die Flanschstreben mit „link“-Elementen modelliert (Verbindungselement). 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 mm^2 . In Tabelle 4.2 werden die untersuchten Querschnitte und die dazugehörigen Traglasten analysiert. In Bild 4.4 ist die Traglast über Querschnittsfläche aufgetragen; in Bild 4.5 und 4.6 werden zwei typische Versagensformen (UY-Richtung) gezeigt.

Area [mm ²]	0,01	0,1	0,5	1	5	10	25	50	100	150	200	400
Load capacity	0,783	0,794	0,826	0,850	0,891	0,906	0,922	0,930	0,935	0,940	0,940	0,940

Tabelle 4.2 Steifigkeit der Flanschstreben

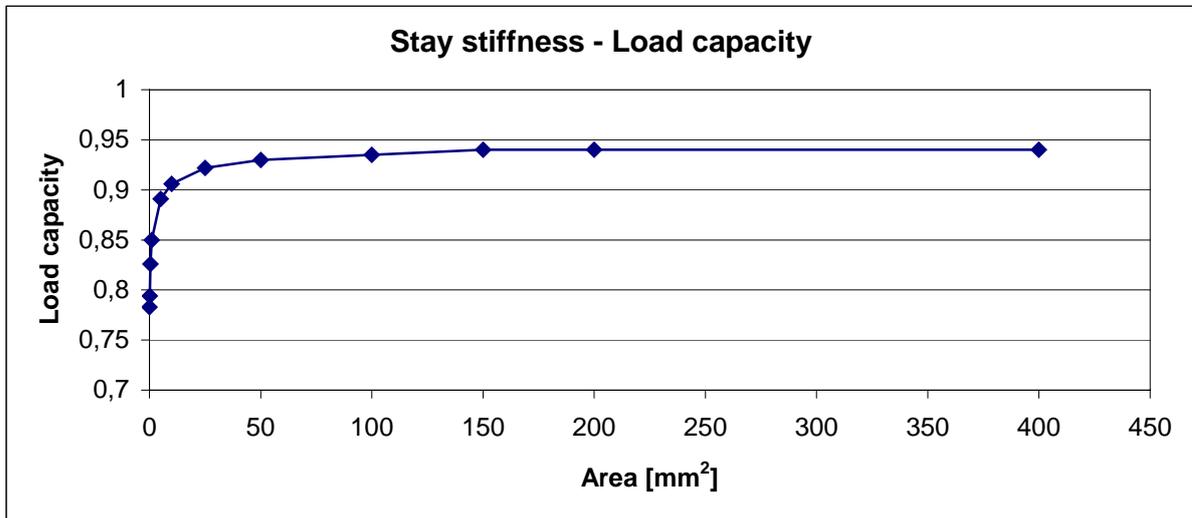


Bild 4.4 Tragfähigkeit über Querschnittsfläche

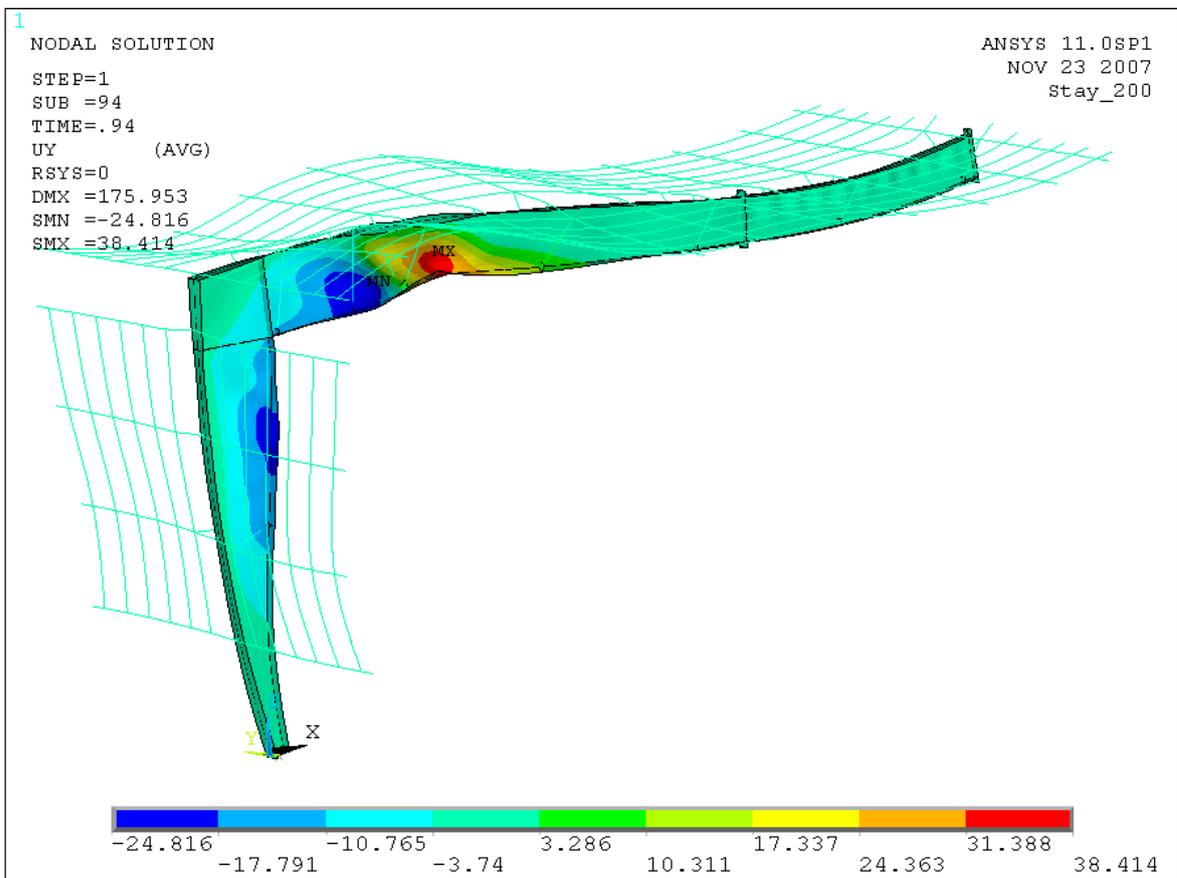


Bild 4.5 UY-Verformung, Fläche der Flanschstrebe 200mm²

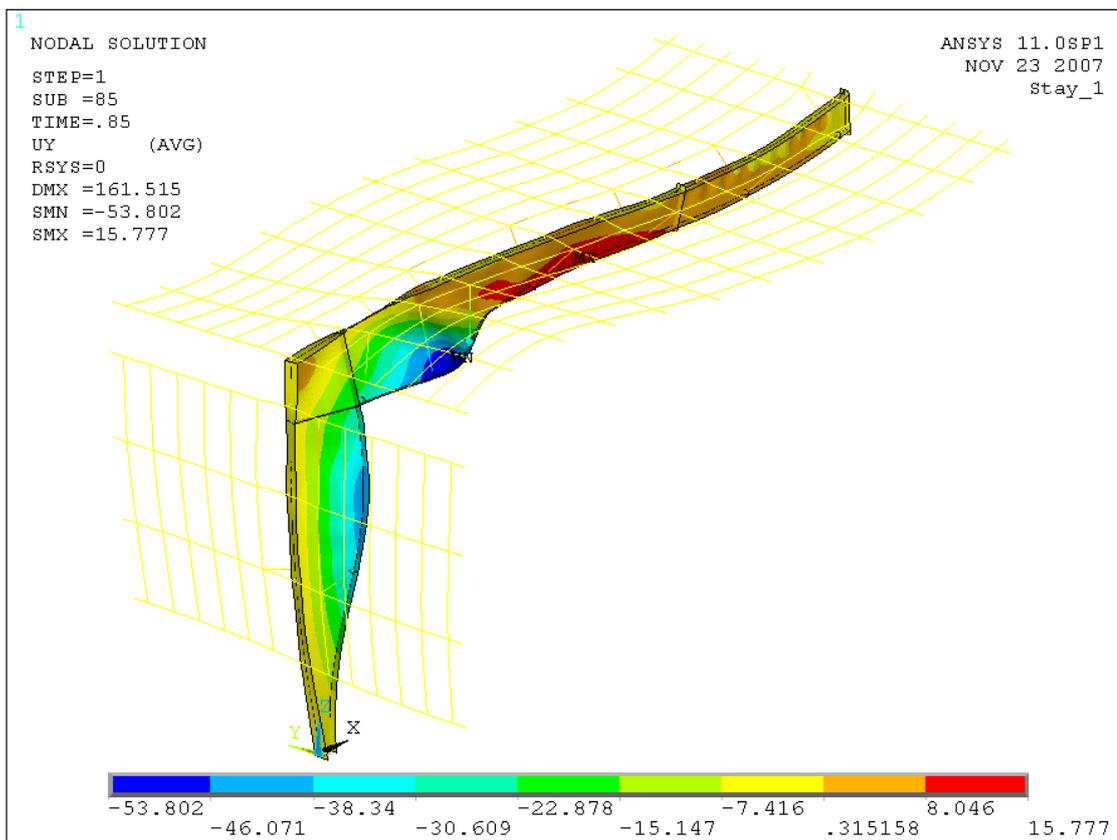


Bild 4.6 UY-Verformung, Fläche der Flanschstrebe 1mm^2

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 Modell mit Pfetten (MWP) ist die Rahmentragfähigkeit ein bisschen höher. Bereits aus Abschnitt 3.3 wurde herausgestellt, dass die Fläche eines „link“-Elements nicht Null sein darf. Der Untergurt ist immer seitlich gelagert, auch wenn nicht kräftig genug.

4.1.3 Auflagerbedingungen

In Abschnitt 3.6.2 werden zwei Arten von Auflagermöglichkeiten gezeigt: symmetrische und asymmetrische. Bis jetzt (und in der weiteren Analyse) wird nur die symmetrische Auflagerung verwendet. Jetzt wird der Unterschied zwischen den beiden Auflagerarten herausgestellt. Während der Modellierung kamen zwei weitere Fragen auf: ob die Pfetten sich im Riegel-Pfetten Knotenpunkt um die Y-Achse verdrehen können (ROTY yes-no), und ob die Hülle in Längsrichtung gehalten (X-Richtung für die Dachhülle und Z-Richtung für die Wände, UX-UZ yes-no, beschrieben in Abschnitt 3.62, 3.63).



Zusammen wurden 8 Fälle (Tabelle 4.3) mit der gleichen Imperfektion und der gleichen Element-Abmessung. Das typische Bild bei symmetrischen Auflagerbedingungen gibt Bild 4.7, während Bild 4.8 für die antisymmetrische Auflagerbedingungen gilt.

Die Durchbiegung der Pfetten zeigt für beide Fälle eine rein symmetrische oder antisymmetrische Form.

node: 3638

	UX-UZ	ROTY	Load Capacity	Uz [mm]
Symmetrical	yes	yes	0,935	171,2
		no	0,932	172
	no	yes	0,922	168,8
		no	0,920	171
Antisymmetrical	yes	yes	0,962	179,3
		no	0,960	170,8
	no	yes	0,950	170,8
		no	0,942	173,4

Tabelle 4.3 Auflagerbedingungen

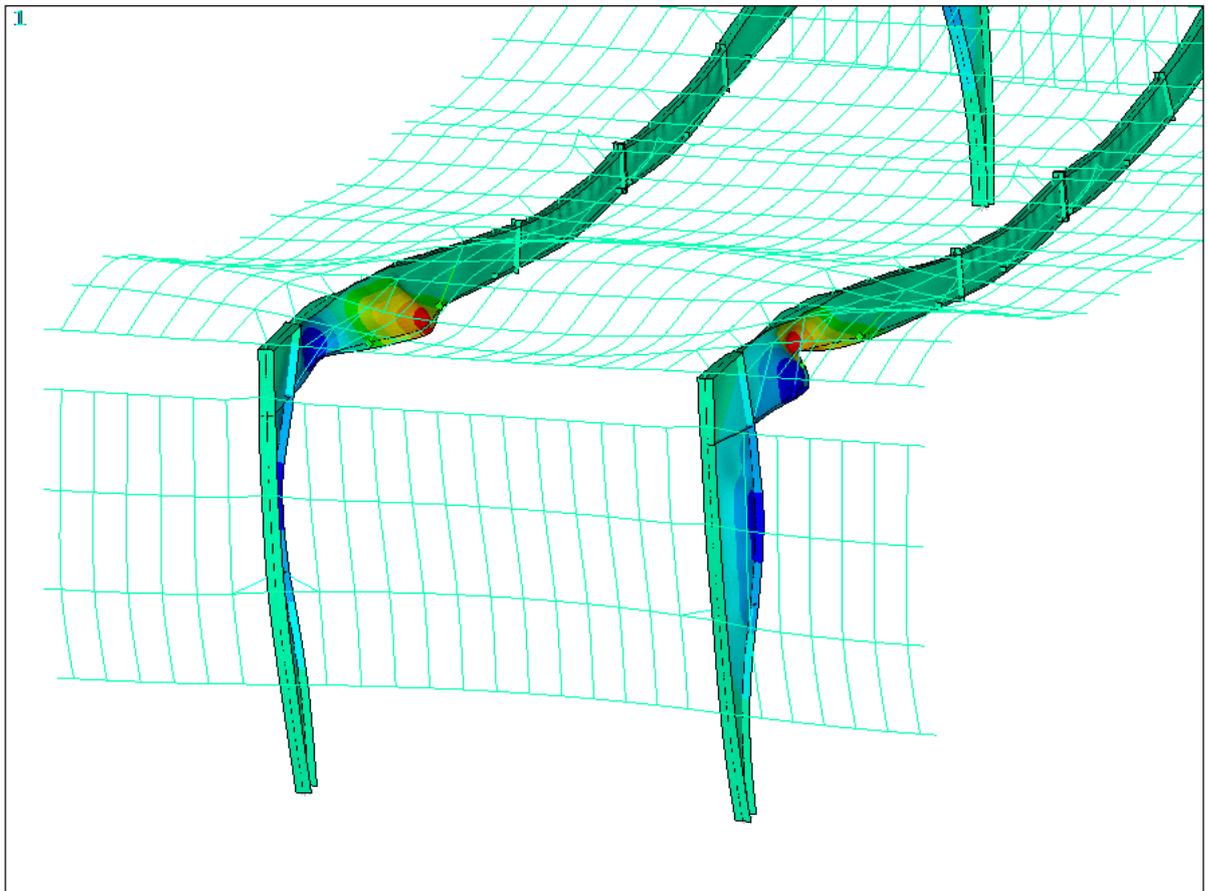


Bild 4.7 Symmetrische Verformungen

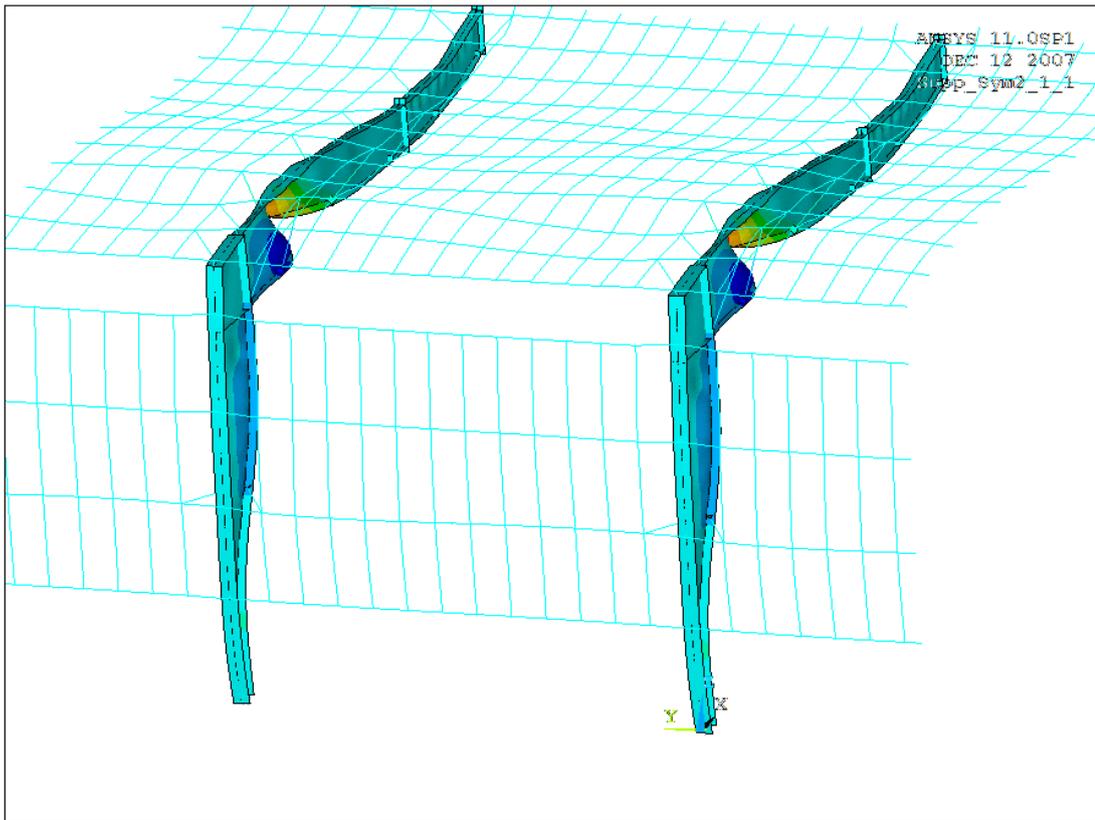


Bild 4.8. Asymmetrische Verformungen

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 folgenden Untersuchungen (Abschnitt 4.3) werden die ROTY Verdrehungsfreiheit und UX-UZ Lagerungsbedingungen verwendet, denn sie machen das Modell wirklichkeitsnaher. Der Unterschied zwischen der Rahmentragfähigkeit zwischen dem symmetrischen und asymmetrischem 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.

4.1.4 Modellierung der Pfetten

Die Untersuchung der Pfetten ist wichtig für das Modell mit Pfetten. Wie aus Abschnitt 3.4 folgt 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 (Bild 4.9). 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 Pfette, s. Bild 4.10,



- unterschiedliches Trägheitsmoment um die schwache Achse (I_z), s. Bild 4.11,
- unterschiedliches Trägheitsmoment um die starke Achse (I_y), s. Bild 4.12.

Alle Details sind Tabelle 4.4 angegeben. Die Tragfähigkeiten sind auf den Bildern 4.10-4.12 verglichen. Bild 4.13 zeigt die typische Durchbiegung, wenn eine schwache Pfette verwendet wird.

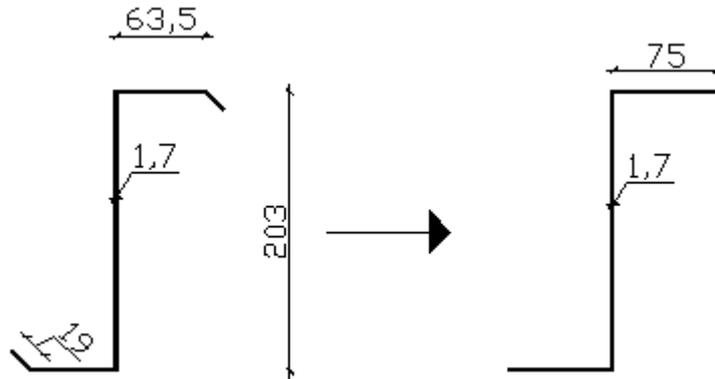


Bild 4.9. Original- und Ersatzquerschnitt der Pfette

h [mm]	b [mm]	t [mm]	Area [mm ²]	I_y [cm ⁴]	I_z [cm ⁴]	Load capacity
205	75	1,7	597	380	46,2	0,935
205	75	1,91	670	425	51,7	0,940
205	75	1,52	534	340	41,5	0,930
205	70	1,7	580	362	37,5	0,931
205	80	1,7	614	397	56,2	0,940
205	90	1,7	648	432	80,3	0,942
200	75	1,7	589	358	46,2	0,932
210	75	1,7	606	402	46,2	0,940
220	75	1,7	623	448	46,2	0,940
250	75	1,7	674	605	46,2	0,951
300	75	1,7	759	937	46,2	0,965
400	75	1,7	929	1900	46,2	0,985
190	75	1,7	572	318	46,2	0,930
150	75	1,7	504	185	46,2	0,910
100	75	1,7	419	74,4	46,2	0,880
50	75	1,7	334	16,3	46,2	0,821

Tabelle 4.4 Pfettendetails, Ergebnisse

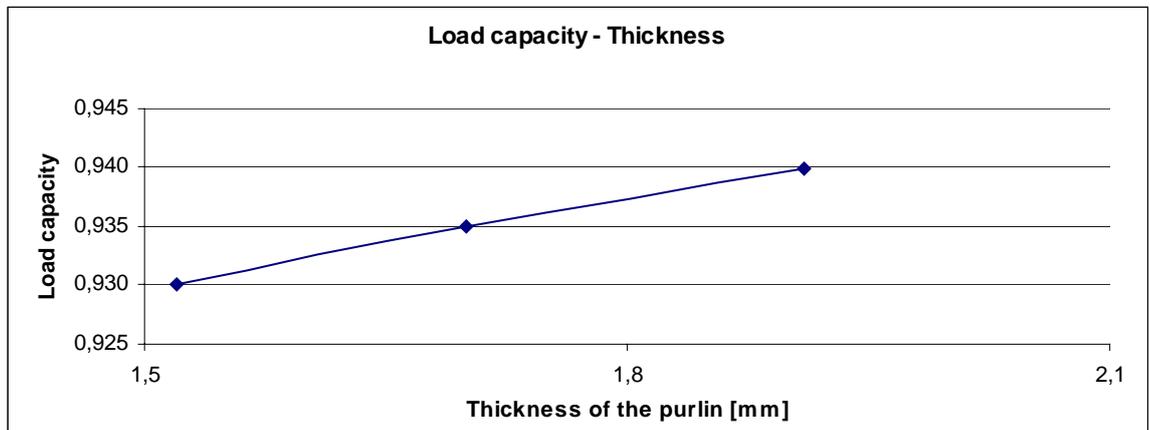


Bild 4.10 Einfluss der Dicke der Pfetten auf die Rahmentragfähigkeit

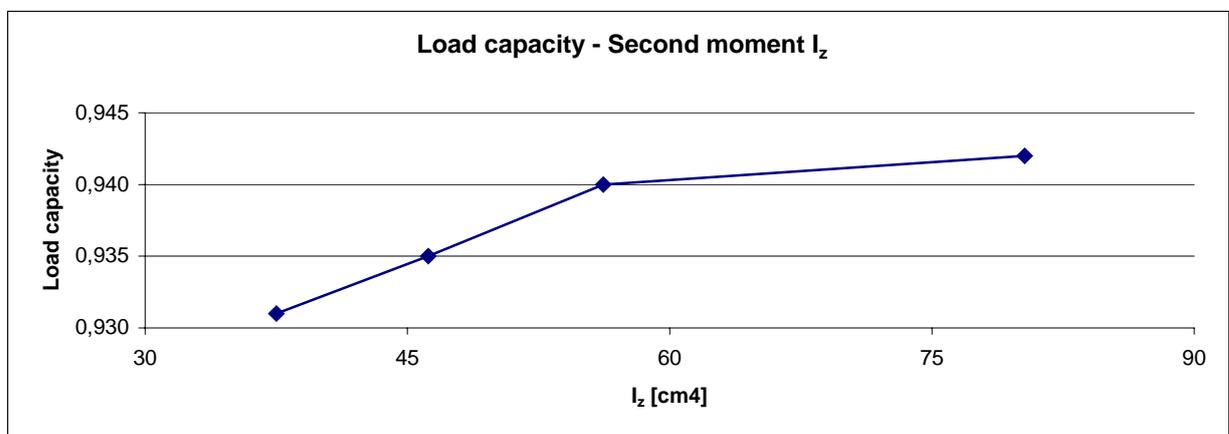


Bild 4.11 Trägheitsmoment der Pfetten über die schwache Achse

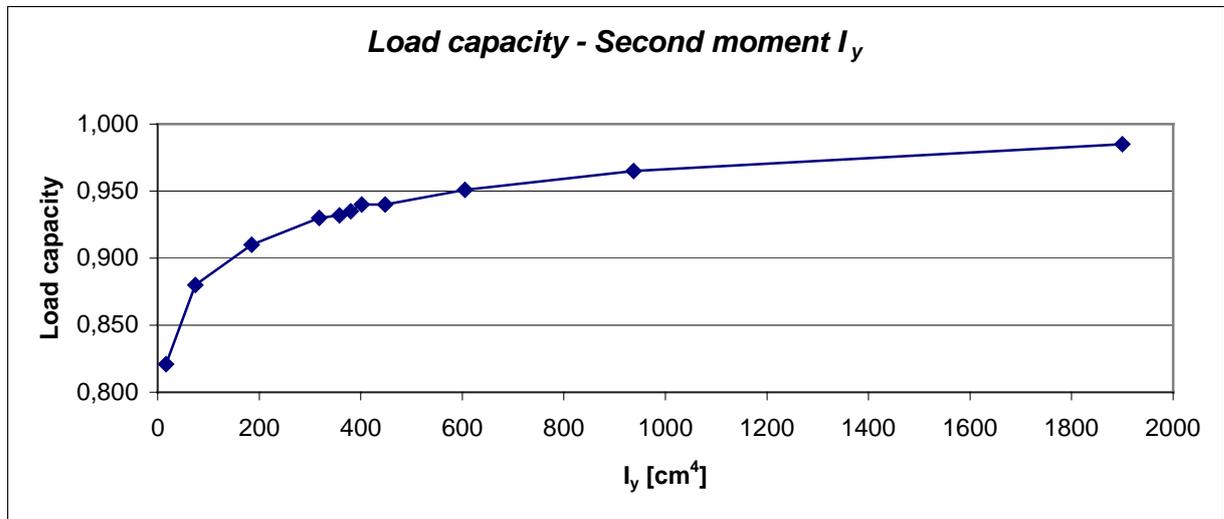


Bild 4.12 Trägheitsmoment der Pfetten um die starke Achse

Die Dicke der Pfette und die Breite des Flansches der Pfette haben keinen nennenswerten Einfluss auf den Knickwiderstand des Riegels. Die Tragfähigkeit des Riegels ändert sich nur um 1 % während einer ungefähr 100%-igen Veränderung des Pfettenquerschnitts. I_y hat einen größeren Einfluss auf die Tragfähigkeit, aber nicht bei den üblich verwendeten Querschnittsgrößen. In Bild 4.13 ist die Verformung der Pfette ziemlich groß. In diesem Fall beträgt die Elementgröße nur 100 mm.

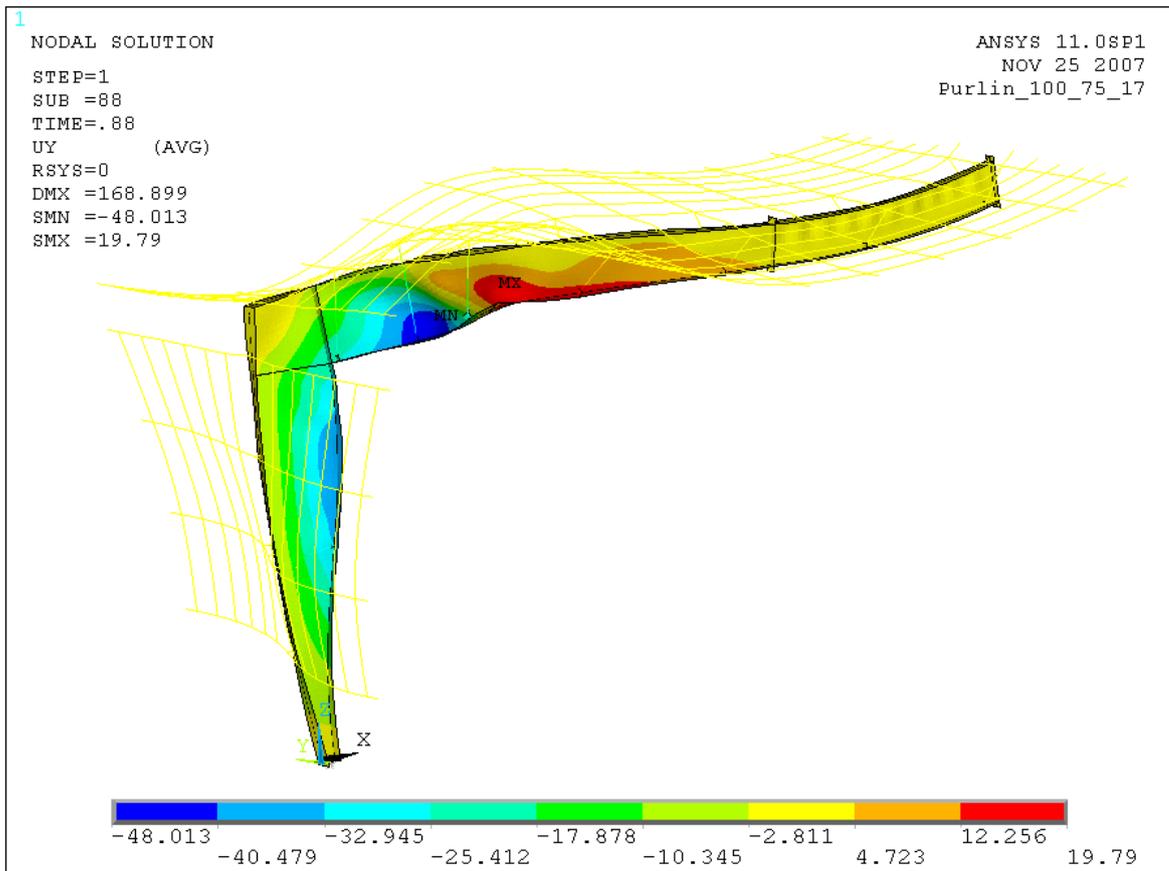


Bild 4.13 UY Verformung, Pfettenhöhe 100mm

4.1.5 Die Modellierung der Hülle

Die Modellierung der Hülle ist notwendig, weil sie den Pfetten eine zusätzliche Steifigkeit verleiht. Die folgende Untersuchung zeigt 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. Tabelle 4.5 fasst die Hüllendicken und die Ergebnisse zusammen. Bild 4.14 zeigt die Tragfähigkeit des Rahmens über I_y (der Hülle).

t [mm]	Area [mm ²]	I_y [cm ⁴ /m]	Load capacity
0,75	797	11,8	0,934
0,88	943	14,3	0,94
1	1078	16,3	0,94
1,25	1358	20,6	0,945

Tabelle 4.5. Cladding details

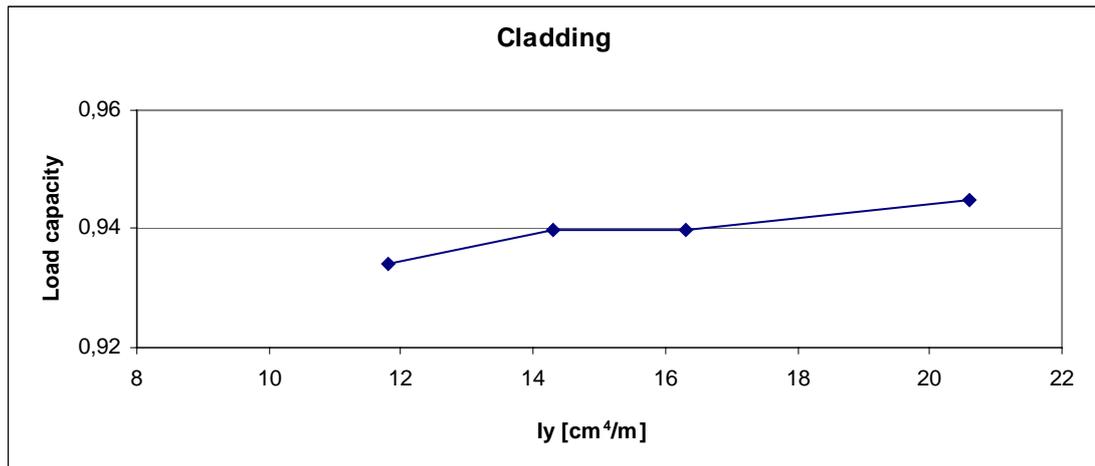


Bild 4.14 Dachtrapezblech -Traglast

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



4.2 Untersuchung von geometrischen Veränderungen an den Rahmen

4.2.1. Rahmenabstand

In diesem Abschnitt wird eine Untersuchung hinsichtlich des Einflusses des Rahmenabstandes (R) in einer Konstruktion vorgestellt. Das verwendete Modell ist präziser als das vorher benutzte, aus den Ergebnissen der Konvergenzstudie geht hervor, dass eine Elementgröße von 75 mm verwendet werden soll. Wegen der veränderten Elementgröße werden neu berechnete Imperfektionen verwendet (die Eigenform hat sich verändert). Die Tabellen 4.6 und 4.7 zeigen die Ergebnisse dieser Untersuchung. Die vierte Kombination der Imperfektionen ist die Kombination nach Norm, Bild 4.16 (der Rahmenabstand ist: R=8,5 m)

Comb num	The applied eigenshapes					Load capacity
	Global buckling		Local buckling			
	Column	Rafter	Column	Rafter		
			Tap. part	Lin part		
1	x	6	35	35	26	1,165
2	x	6	30	30	26	1,171
3	x	7	30	30	26	1,222
4	x	3	42	42	26	1,085

4.6. Kombination der Eigenform-Imperfektionen

Type of the imperfection	Eigen shape	3 bow in normal	Bow in plane	Global oov	max imperfection in y [mm]	min imperfection in y [mm]	Load capacity	Max Uz displ. [mm]
Comb Num								
1	4 x 1	xxx	xxx	xxx	9,326	-14,58	1,085	189,0
2	xxx	1	xxx	xxx	11,33	-11,33	1,095	199,4
3	1 x 0,7	1	xxx	xxx	20,4	-15,5	1,053	191,2
4	4 x 0,7	1	xxx	xxx	12,5	-20,3	1,050	182,7
5	1 x 0,7	1	0,7	0,7	20,45	-15,4	1,054	191,9
6	4 x 0,7	1	0,7	0,7	12,6	-19,9	1,054	184,1

4.7. Kombination der Imperfektionen

Es wurden Rahmenabstände zwischen 8,5 m und 6,0 m untersucht. Die Ergebnisse stehen in Tabelle 4.8. In der Tabelle stehen die Traglasten in zwei Spalten. In der Spalte "Same loads" stehen die Traglasten wenn alle Rahmen die gleiche Belastung haben. In der Spalte "Scaled loads" stehen die Traglasten wenn die Belastung der Rahmen in Abhängigkeit von der Länge der Pfetten modifiziert wird (oder von der Größe der belasteten Fläche). In Bild 4.15 kann man die Veränderung der Traglast als Funktion des Rahmenabstands R sehen.



Distance R [m]	Load capacity	
	Same loads	Scaled loads
8,5	1,044	1,044
8	1,054	1,118
7,5	1,050	1,189
7	1,054	1,275
6,5	1,050	1,368
6	1,053	1,480

Tabelle 4.8 Rahmenabstand und Ergebnisse

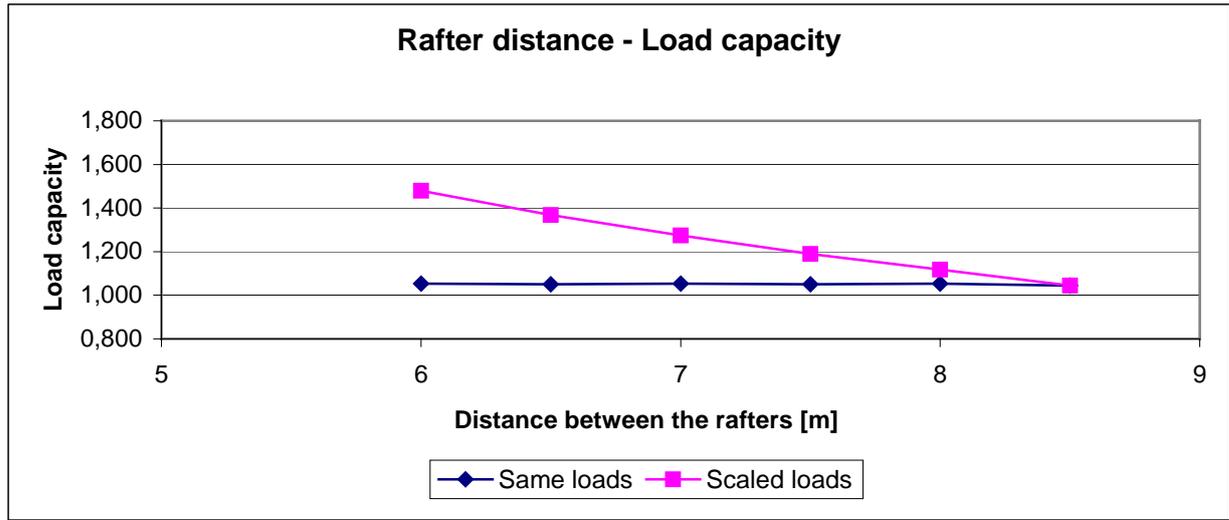


Bild 4.15 Rahmenabstand - Traglast

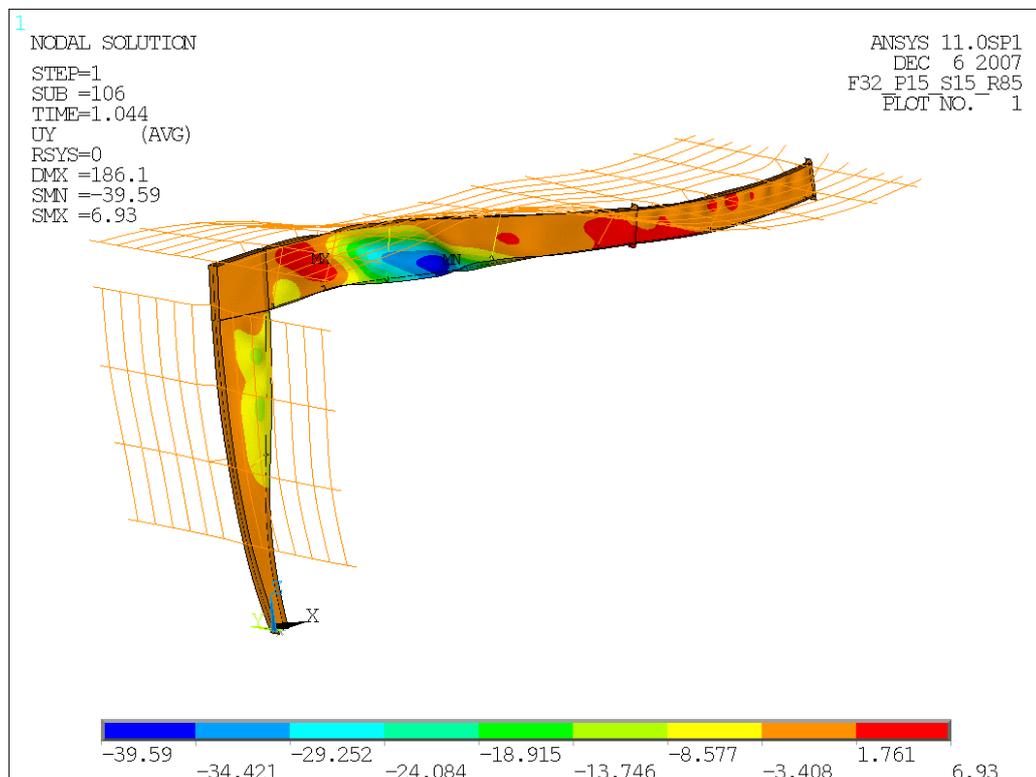


Bild 4.16 UY Verformungen, R=8,5m



Das Diagramm in Bild 4.15 zeigt eine annähernd konstante Linie wo gleiche Lasten angesetzt wurden, und eine linear fallende Linie, wo skalierte Lasten angesetzt wurden. Das bedeutet, dass sich die Steifigkeit der Pfetten nicht bedeutend verändert, wenn sich ihre Länge ändert. In Abschnitt 4.3.2 werden die skalierten Lasten verwendet.

4.2.2. 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 N/mm² für alle Werkstoffe,
- nicht die von der Firma gerechneten Lasten werden verwendet,
- die Position der Flanschstreben ist verändert, siehe in Abschnitt 2.

Während der geometrischen Untersuchung wurde der Pfettenabstand (P), der Abstand der Flanschstreben (S) und der Rahmenabstand (R), wie in Abschnitt 2 beschrieben, verändert. Wegen der veränderten Geometrie der Rahmen musste die Analyse der Imperfektionen für fast alle geometrischen Varianten neu durchgeführt werden. Bei gleichen Systemen mit verschiedenen Rahmenabständen wurde nur der größte Rahmenabstand hinsichtlich der Imperfektionen geprüft. Für die anderen Fälle wurden die so ermittelten Imperfektionen verwendet, da die Länge der Pfetten die Imperfektionen nicht beeinflusst (nicht wie die Position der Flanschstreben).

Die Ergebnisse (die minimalen Traglasten) sind in Tabelle 4.9, Tabelle 4.10, und Tabelle 4.11 dargestellt. Die Bilder 4.17-4.28 zeigen die wichtigsten Ergebnisse, die typische charakteristische UY Verformung der verschiedenen Rahmenarten.

Frame 18 Load capacity		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	3a	3b
Distance between the Rafters [m]	6	1,455	1,498	1,475	1,403
	7,5	1,169	1,202	1,188	1,128
	9	0,977	1,006	0,991	0,943

Tabelle 4.9. Rahmen 18, Traglast



Frame 32 Load capacity		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	1,5	3
Distance between the Rafters [m]	6	1,397	1,409	1,48	1,398
	7,5	1,12	1,12	1,18	1,12
	8,5	0,989	0,984	1,041	0,988

Tabelle 4.10 Rahmen 32, Traglast

Frame 56 Load capacity		Distance of the Purlins [m]			
		1	1,25	1,5	
		Distance of the Stays [m]			
		3	2,5	3a	3b
Distance between the Rafters [m]	6	1,358	1,341	1,28	1,319
	7,5	1,087	1,07	1,027	1,053
	9	0,906	0,891	0,856	0,876

Tabelle 4.11 Rahmen 56, Traglast

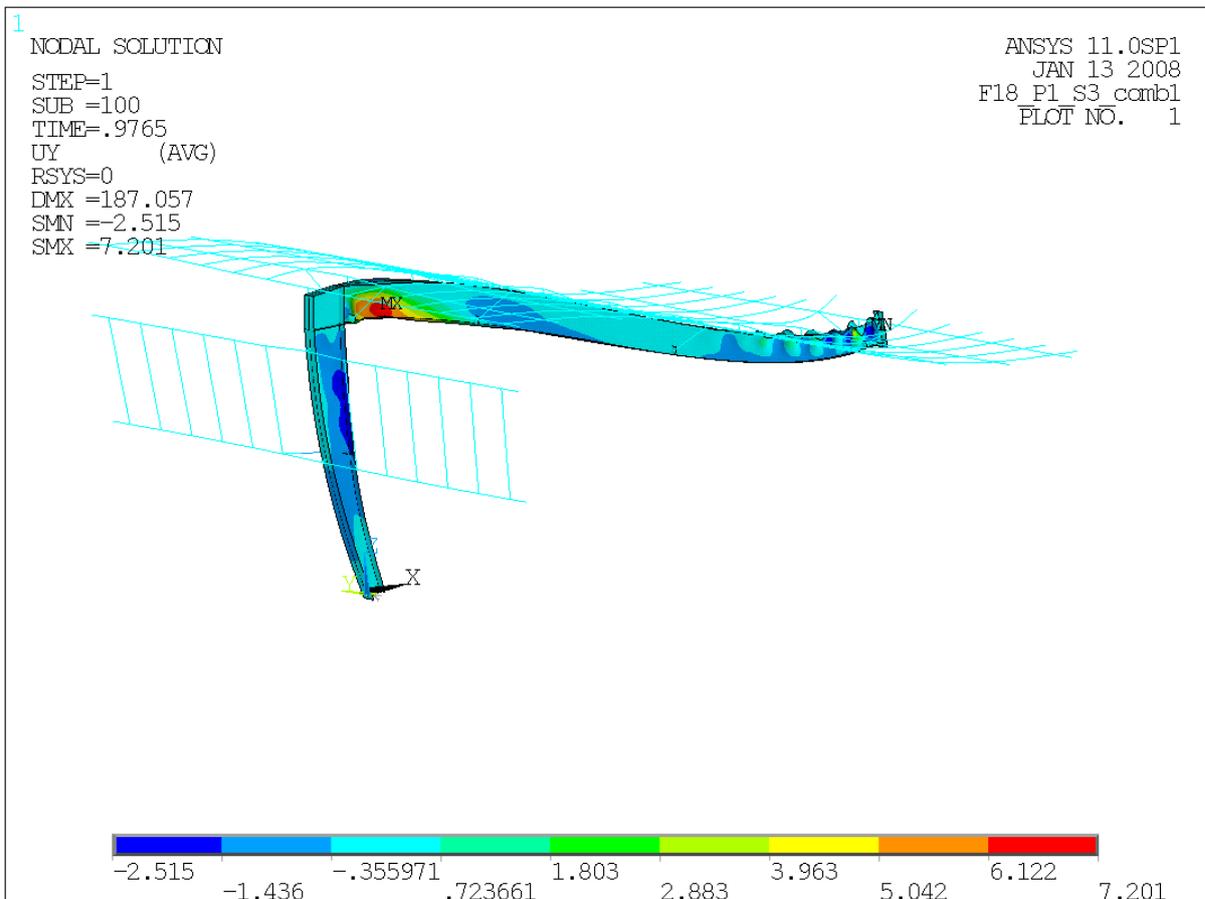


Bild 4.17. UY Verformung des Rahmens, F18_P1_S3_R9

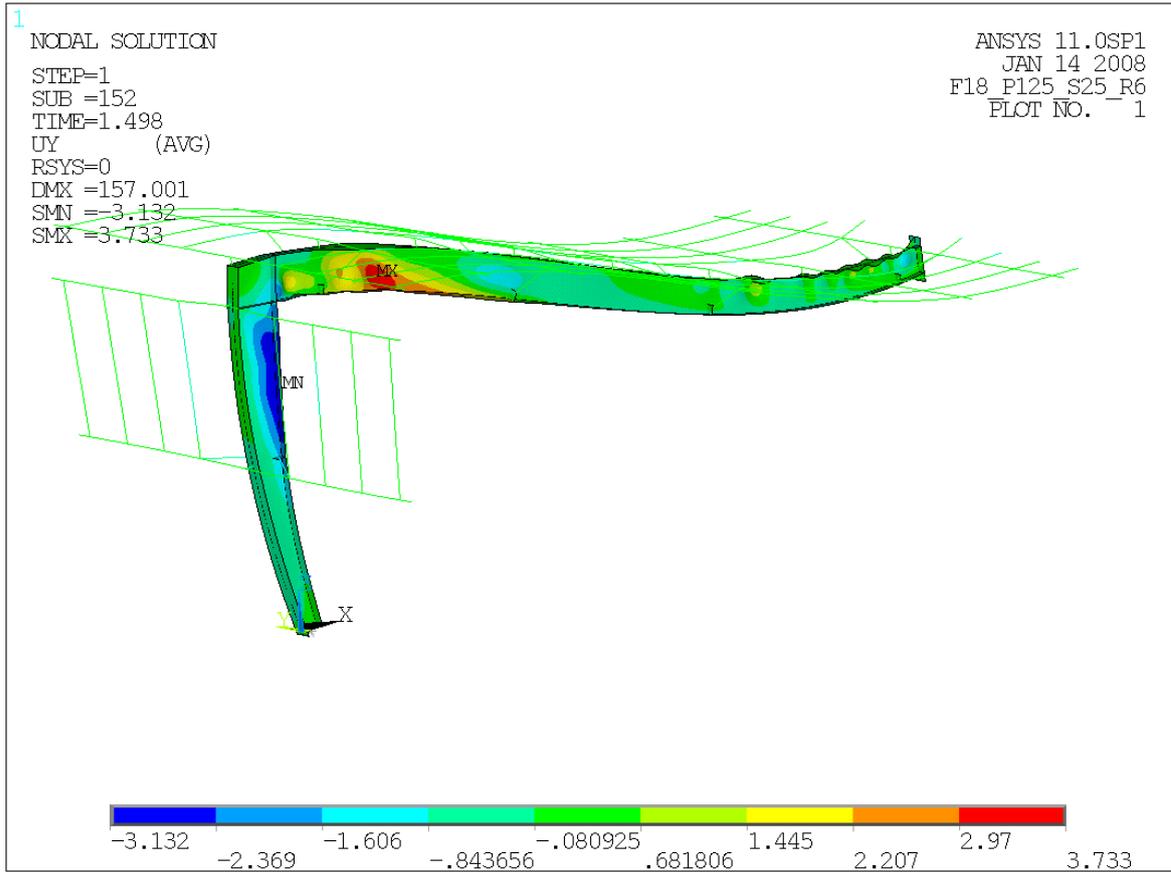


Bild 4.18 UY Verformungen des Rahmens F18_P125_S25_R6

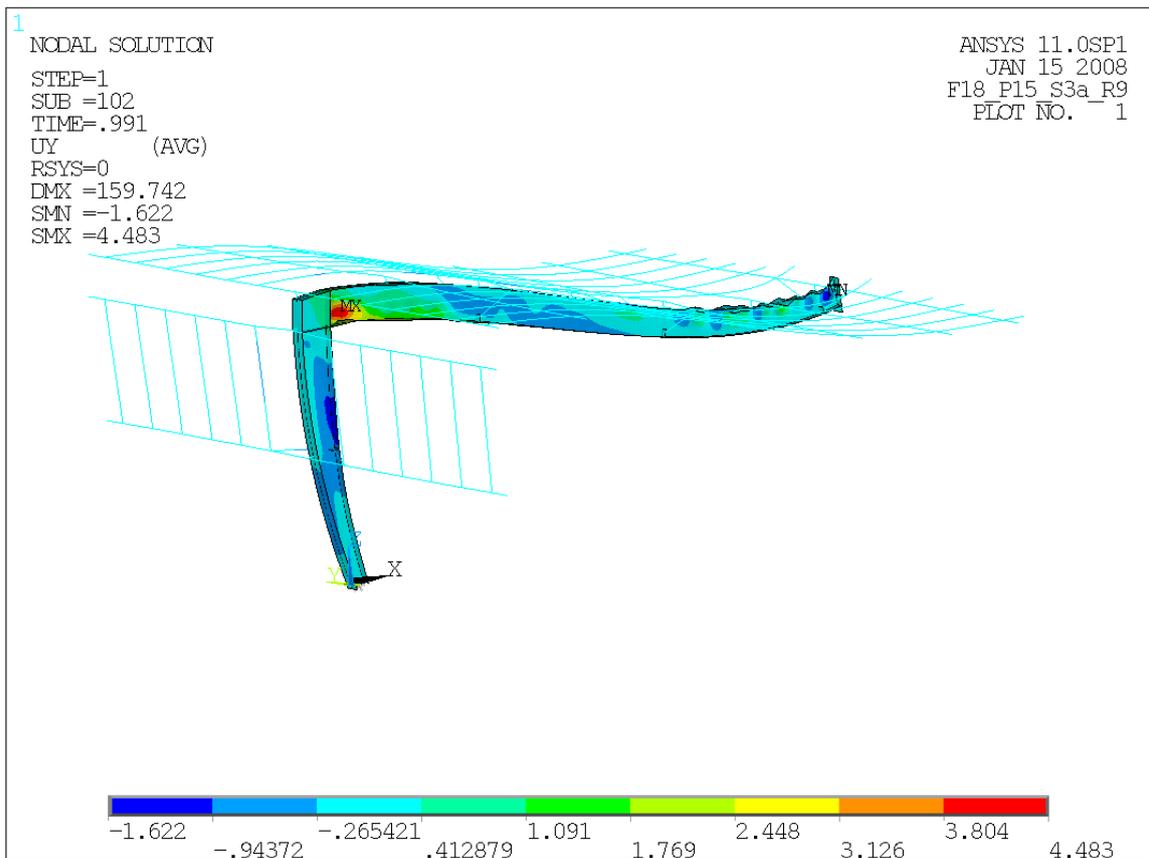


Bild 4.19 UY Verformungen des Rahmens F18_P15_S3a_R9

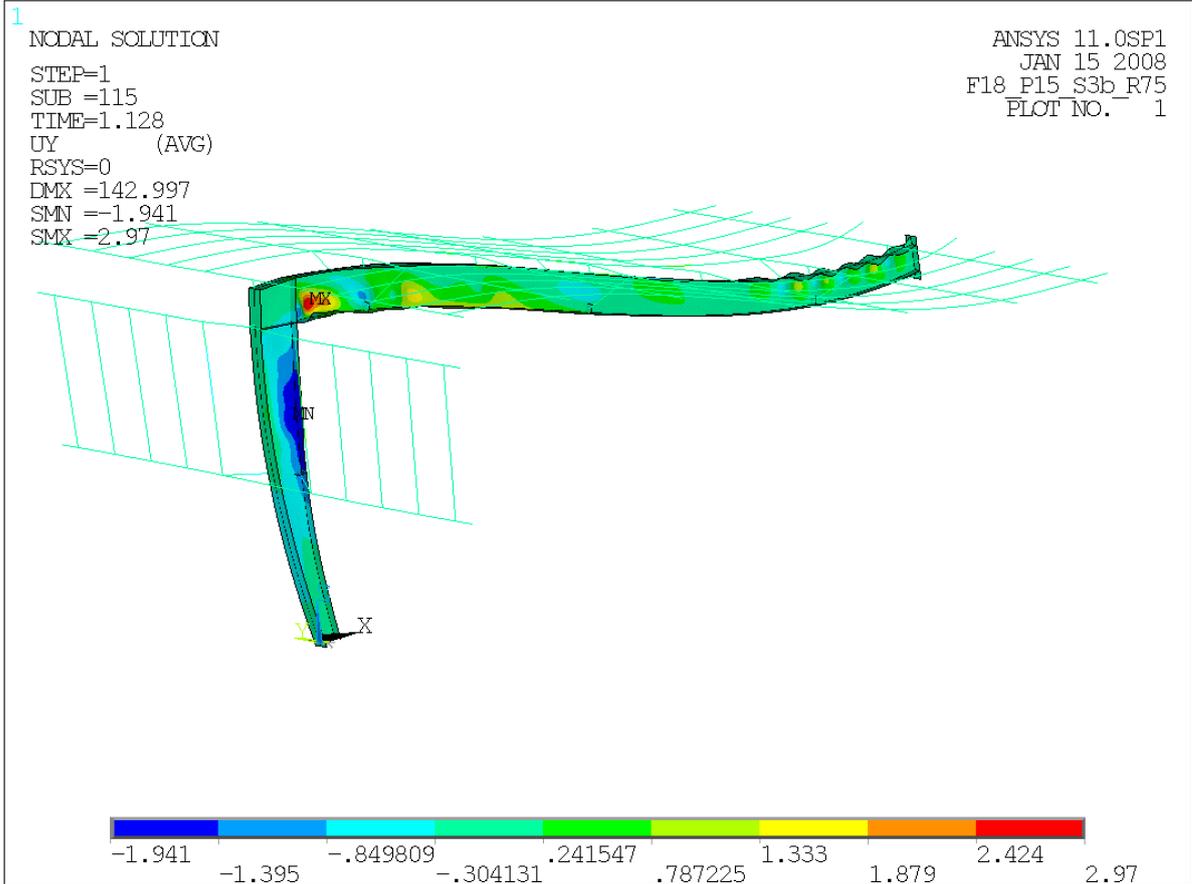


Bild 4.20 UY Verformungen des Rahmens F18_P15_S3a_R975

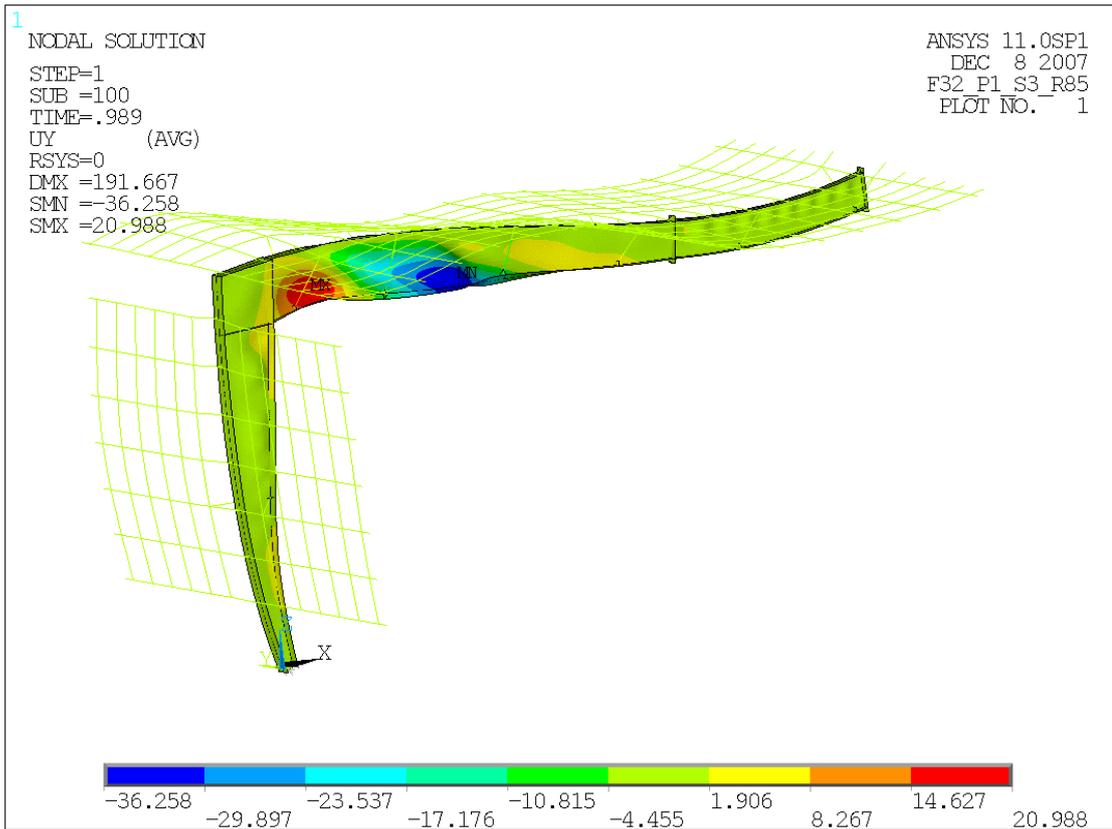


Bild 4.21 UY Verformungen des Rahmens F32_P1_S3_R8,5

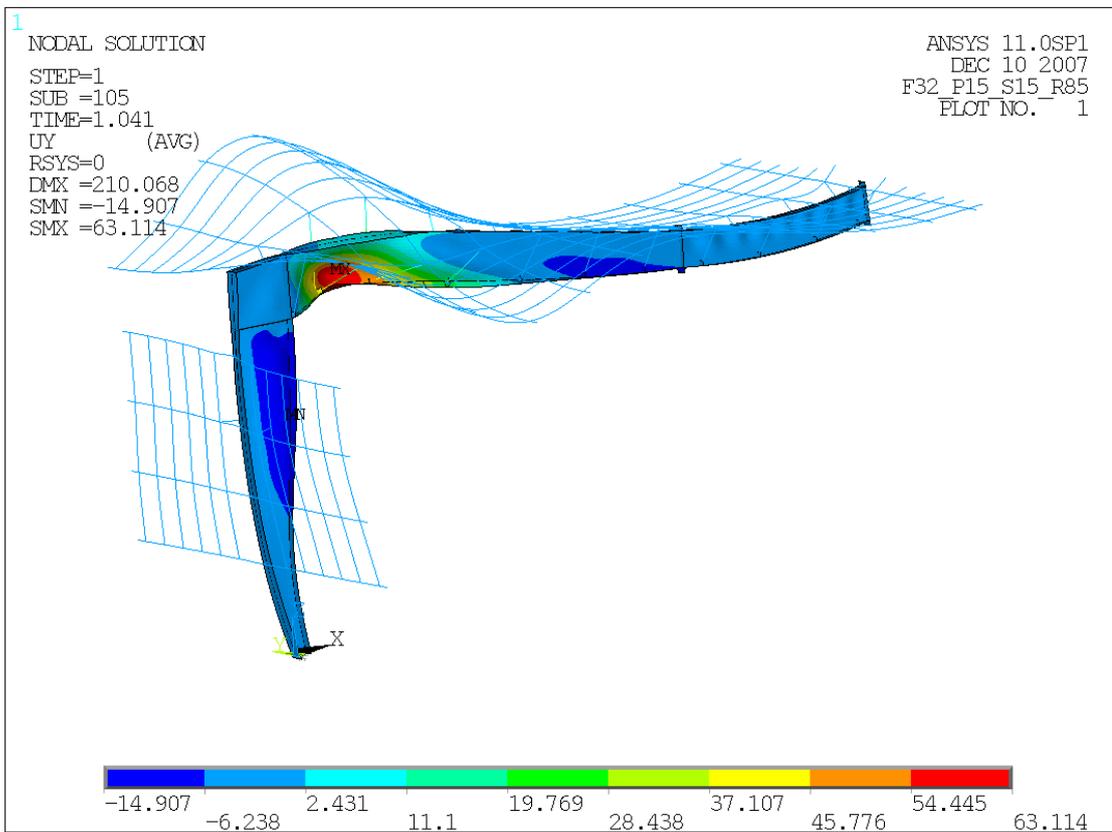


Bild 4.22 UY Verformungen des Rahmens F32_P1,5_S1,5_R8,5

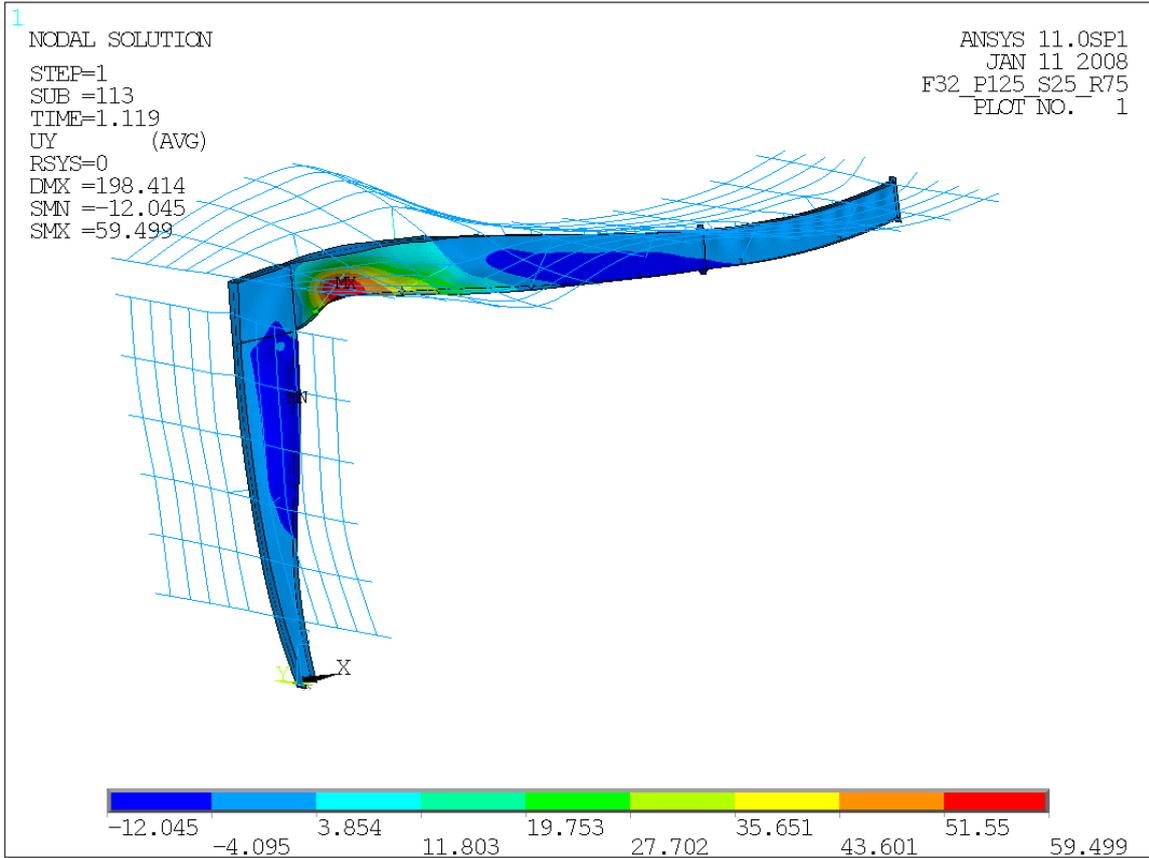


Figure 4.23. UY Verformungen des Rahmens F32_P125_S25_R75

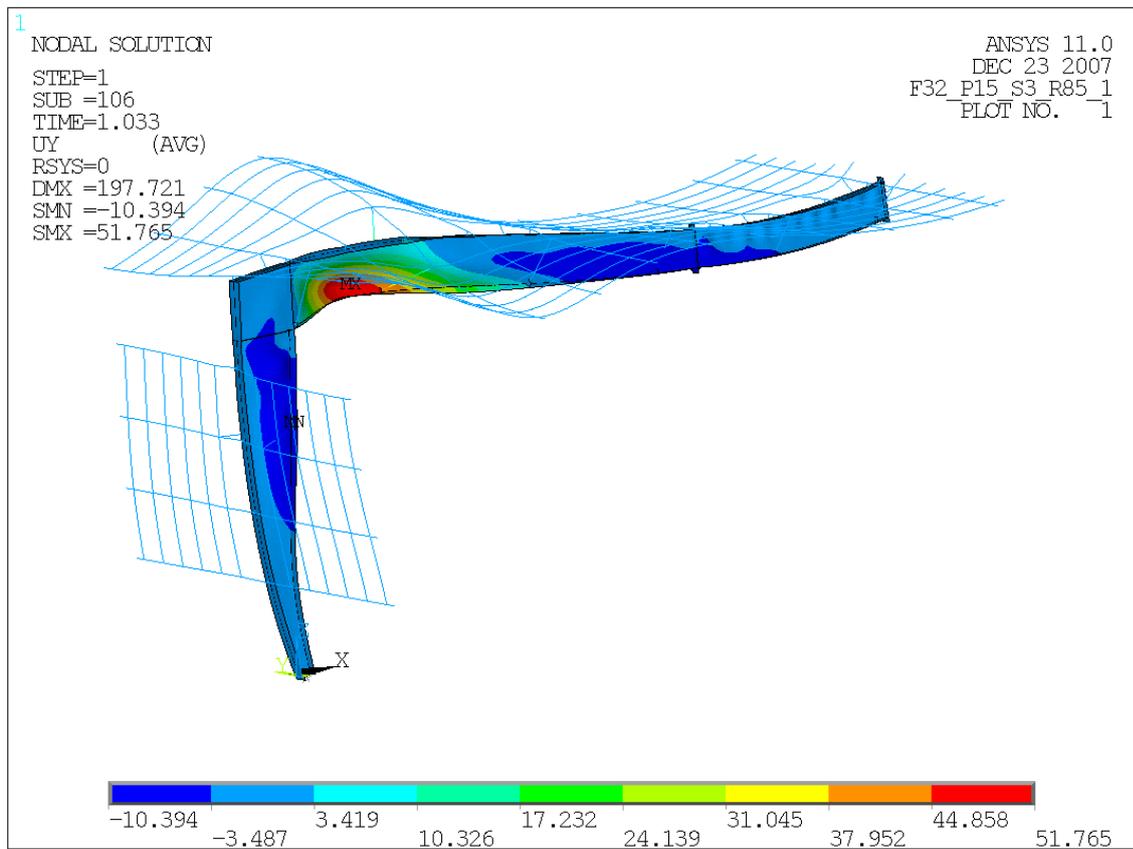


Bild 4.24 UY Verformungen des Rahmens F32_P15_S3_R85,5

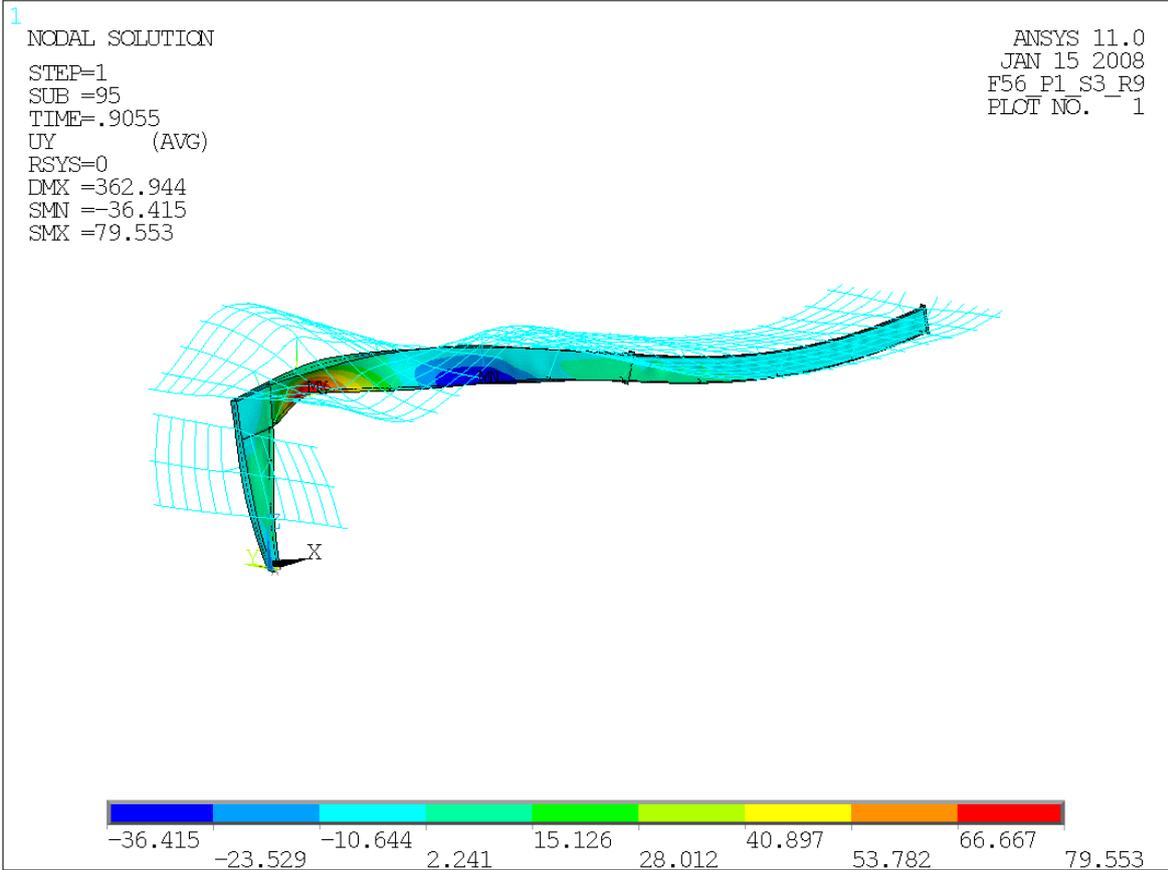


Bild 4.25 UY Verformungen des Rahmens F56_P1_S3_R9

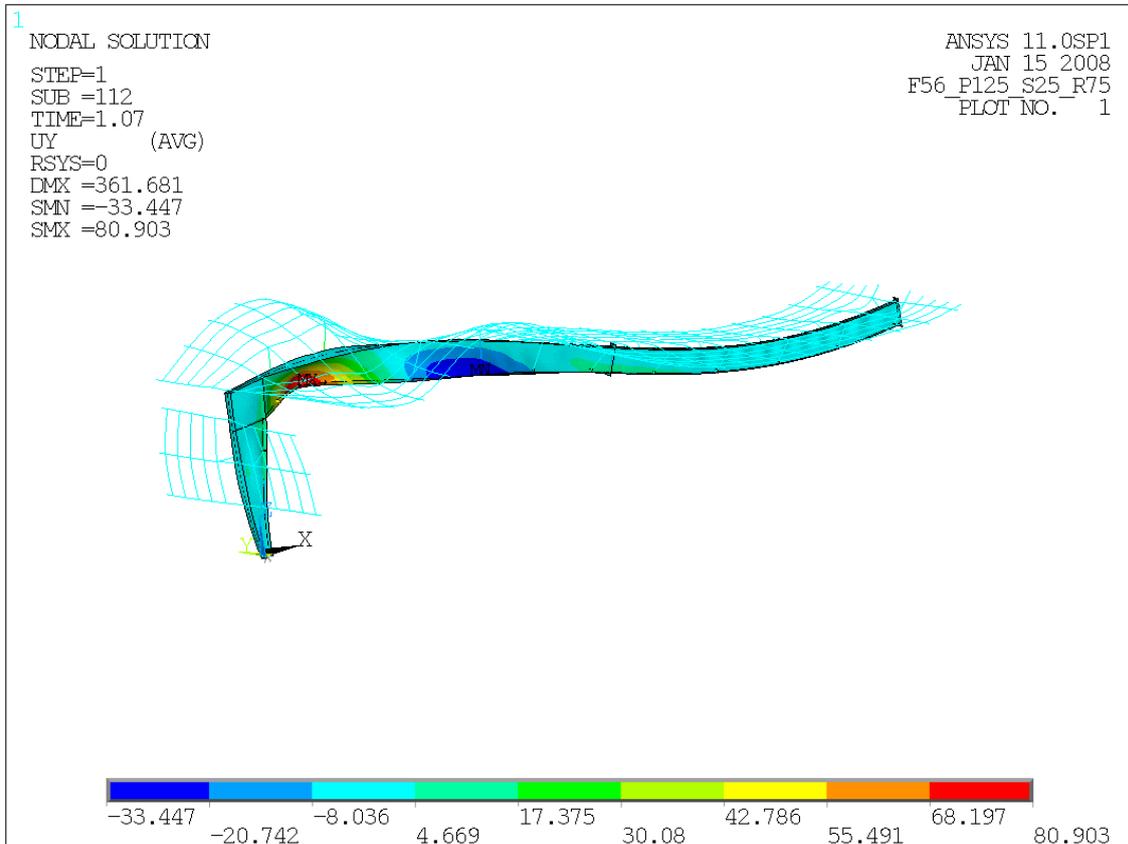


Bild 4.26 UY Verformungen des Rahmens F56_P125_S25_R75

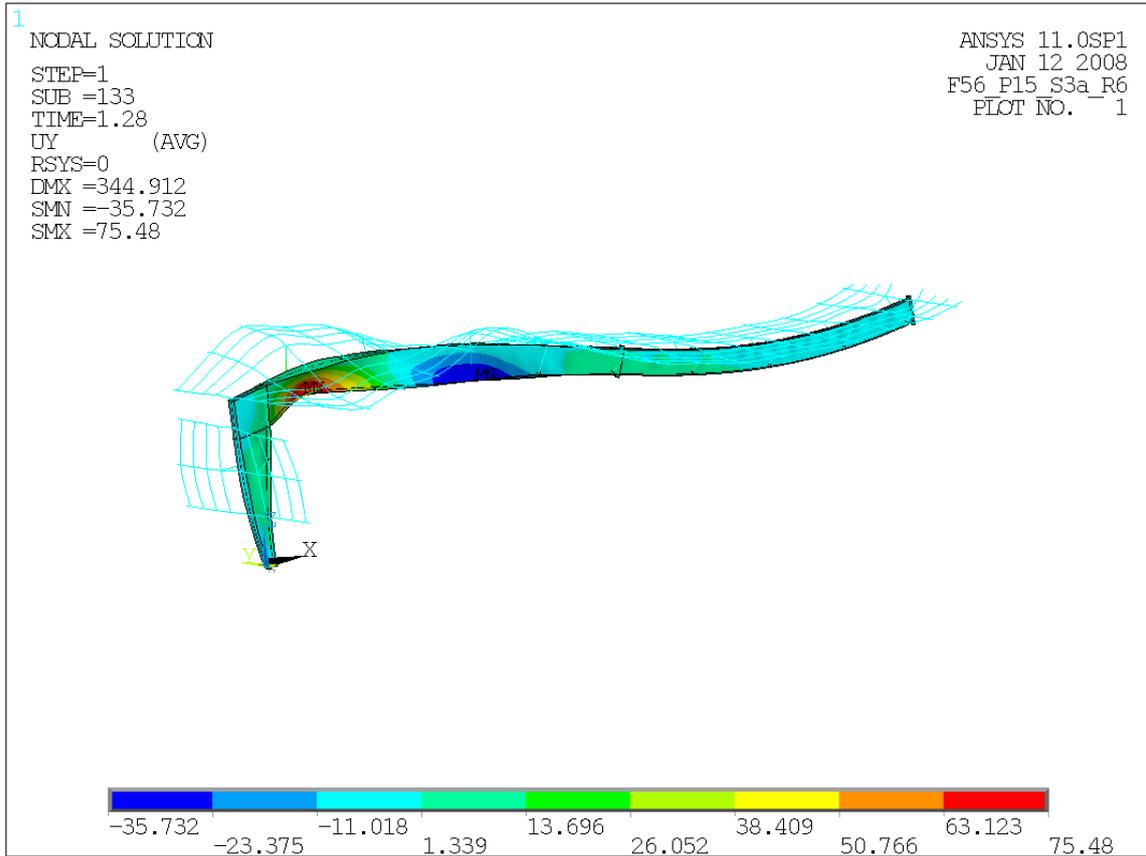


Bild 4.27 UY Verformungen des Rahmens F56_P15_S3a_R6

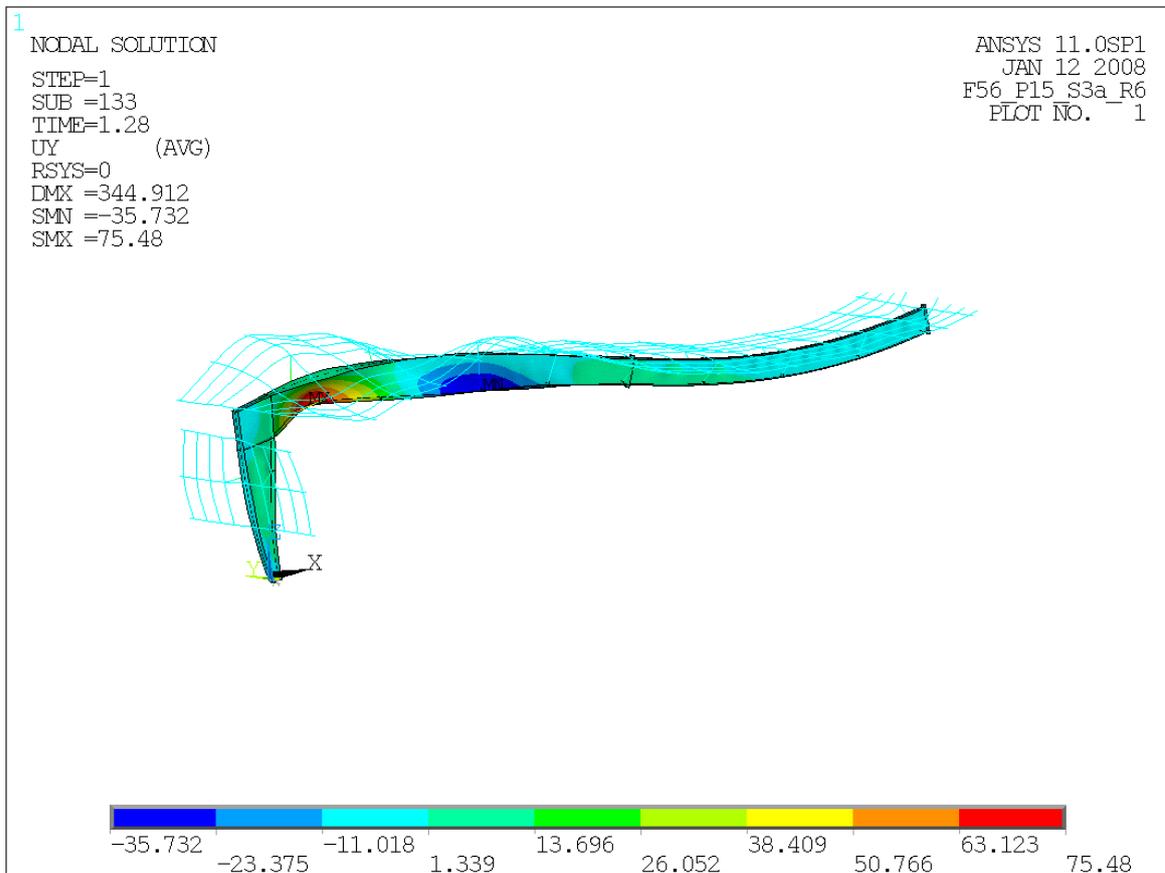


Bild 4.28 UY Verformungen des Rahmens F56_P15_S3a_R6



4.3 Ungleichförmige Lasten

Bis jetzt wurde nur eine Lastkombination in dieser Studie untersucht. Im folgenden wird die Schneelast als nicht symmetrisch unterstellt. Auf der einen Seite des Rahmens liegt mehr Schnee als auf der anderen Seite des Rahmens. Für den Rahmen bedeutet dies Biegetorsion bzw. Biegedrillknicken. Die Biegetorsion ist modelliert als Kräftepaar, das auf den Ober- und Untergurt des Riegels wirkt (Bild 4.28).

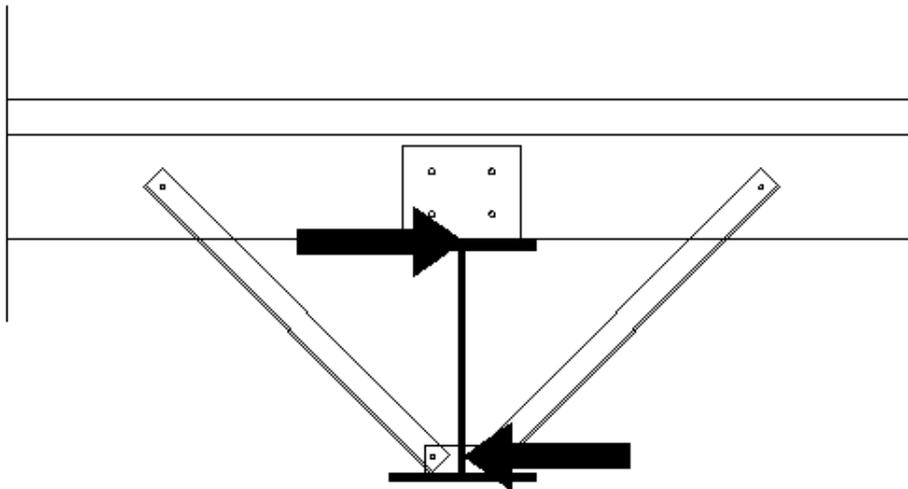


Bild 4.28 Kräftepaar am Riegel

Dieses Moment tritt nur dort auf, wo die Flanschstreben positioniert sind. Die Berechnung eines Ersatz-Torsionsmoment ist kein einfacher Prozess, man kann ihn aber an einem vereinfachten System berechnen (Bild 4.29). Die Federkonstante wird aus

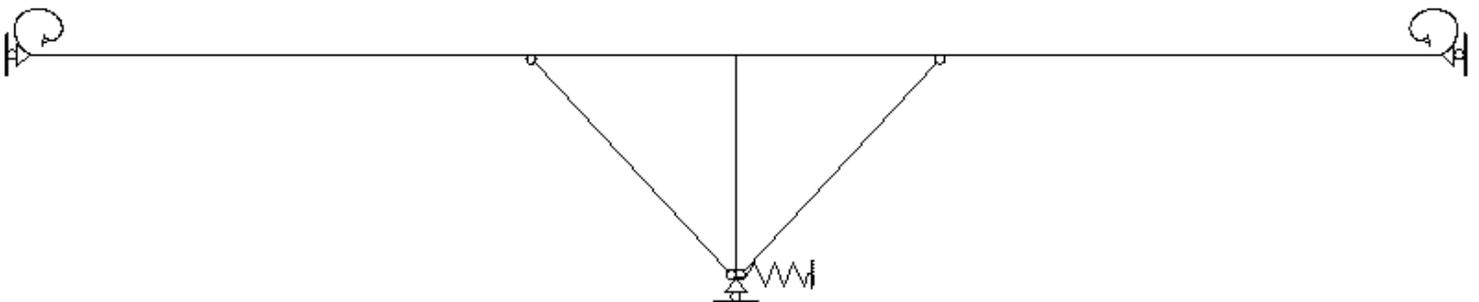


Bild 4.29 Vereinfachtes statisches System

dem globalen Modell berechnet: 1 kN Punktlast (F) wirkt auf den Untergurt des Riegels an der Position der Flanschstreben. Nach einer nichtlinearen Berechnung wird die Verschiebung (e) des Untergurts kontrolliert. Die Federkonstante (D) ist:



$$D = F / e$$

und beträgt nach Berechnung 140 kN/m. Die aufgebrachte Last zeigt Bild 4.30.

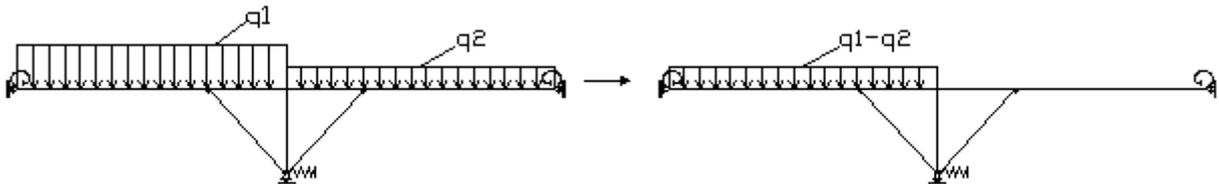


Bild 4.30 Aufgebrachte Last

Jetzt kann man eine Reaktionskraft in der Feder und ein – wegen des sehr einfachen Modells nur geschätztes - Torsionsmoment bestimmen. Das Torsionsmoment (Tab.4.12) hängt von der Lastdifferenz q_1 und q_2 ab (Bild 4.30).

Tabelle 4.12 Berechnung der Torsionsmomente

Loading scale	q_1-q_2 [kNm]	Reaction force in the spring [kN]	Torsion moment [kNm]
1,15 / 0,85	1,15	2,3	2,6
1,20 / 0,8	1,53	3,0	3,5
1,25 / 0,75	1,91	3,8	4,4
0,65 / 1,35	2,67	5,3	6,1
0,5 / 1,50	3,82	7,6	8,8

Die folgende Analyse des Rahmens F32_P15_S3_R85 ist mit diesen Lastannahmen und unter Berücksichtigung von drei Imperfektionsansätzen modelliert worden.

- Ohne jegliche Imperfektionen
- Kombination der Eigenform-Imperfektion
- Combination of imperfection (Eigenshape, wave in normal)



Ohne Imperfektionen (PNL)

Alle Imperfektionen wurden vernachlässigt, nur die übliche Last und die Torsionsmomente wurden aufgebracht. Tab. 4.13 zeigt die Torsionsmomente und den Traglast.

Torsion moment on the frame [kNm]	Load capacity
0	1,39
1	1,329
3	1,323
5	1,302
6	1,291
9	1,263
12	1,245
13	1,236
15	1,222
16	1,213
18	1,183
20	1,151
22	1,116

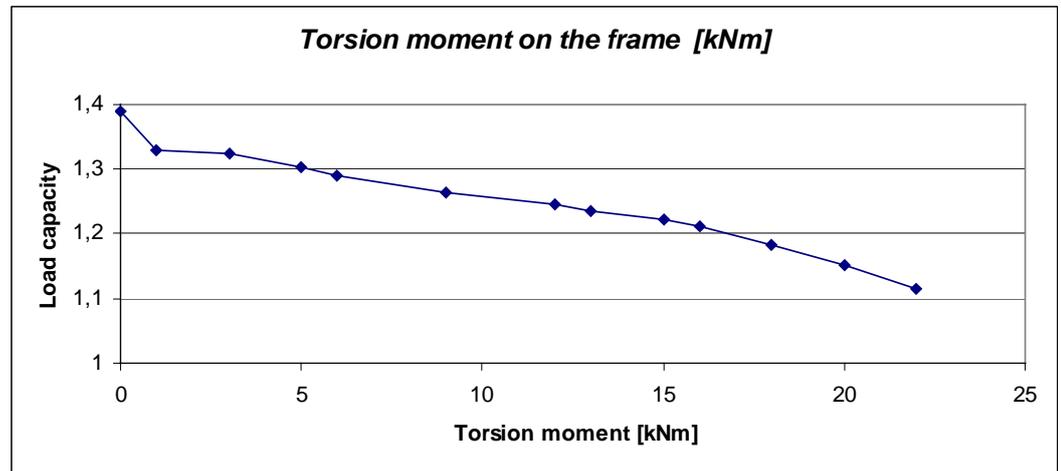


Tabelle 4.13 Traglast-Torsionsmoment, ohne Imperfektionen

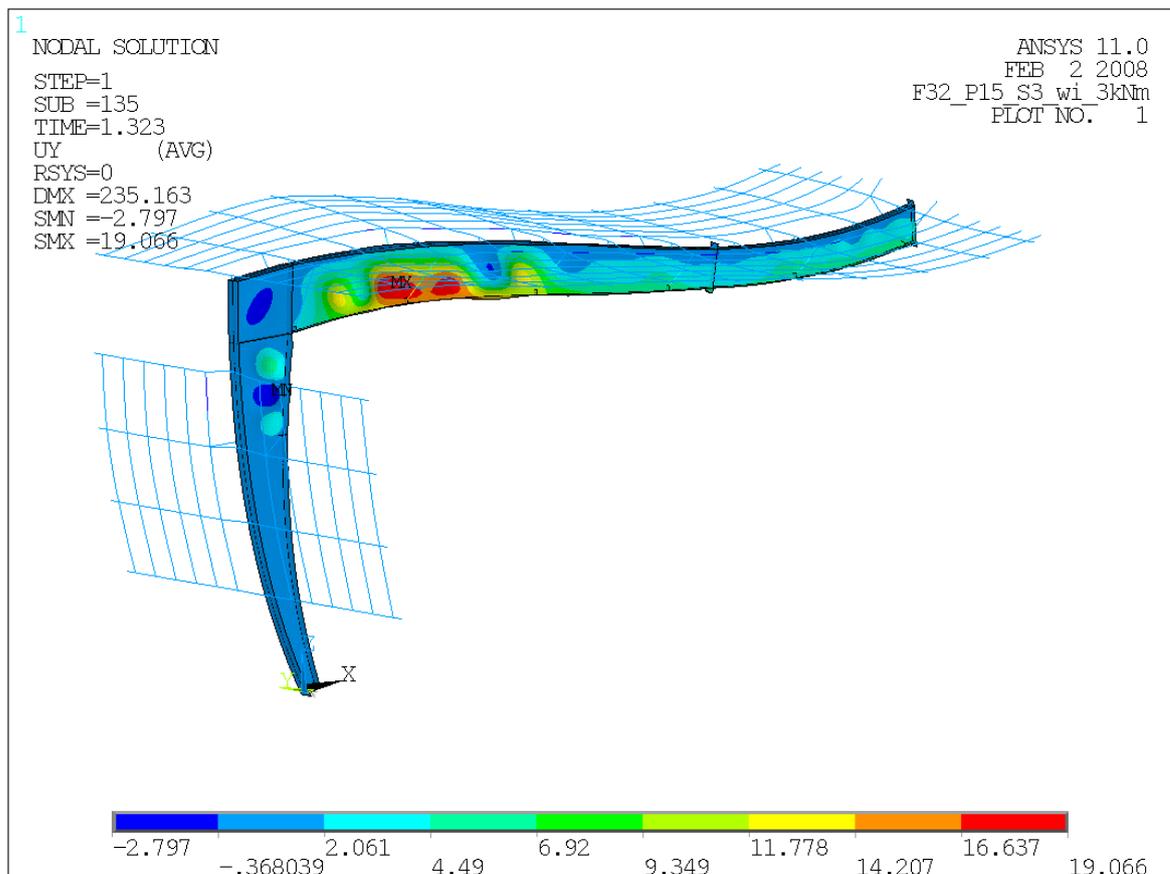


Bild 4.31 Deformationen UY [mm], F32_P1,5_S3_R8,5, 3kNm, ohne Imperfektionen

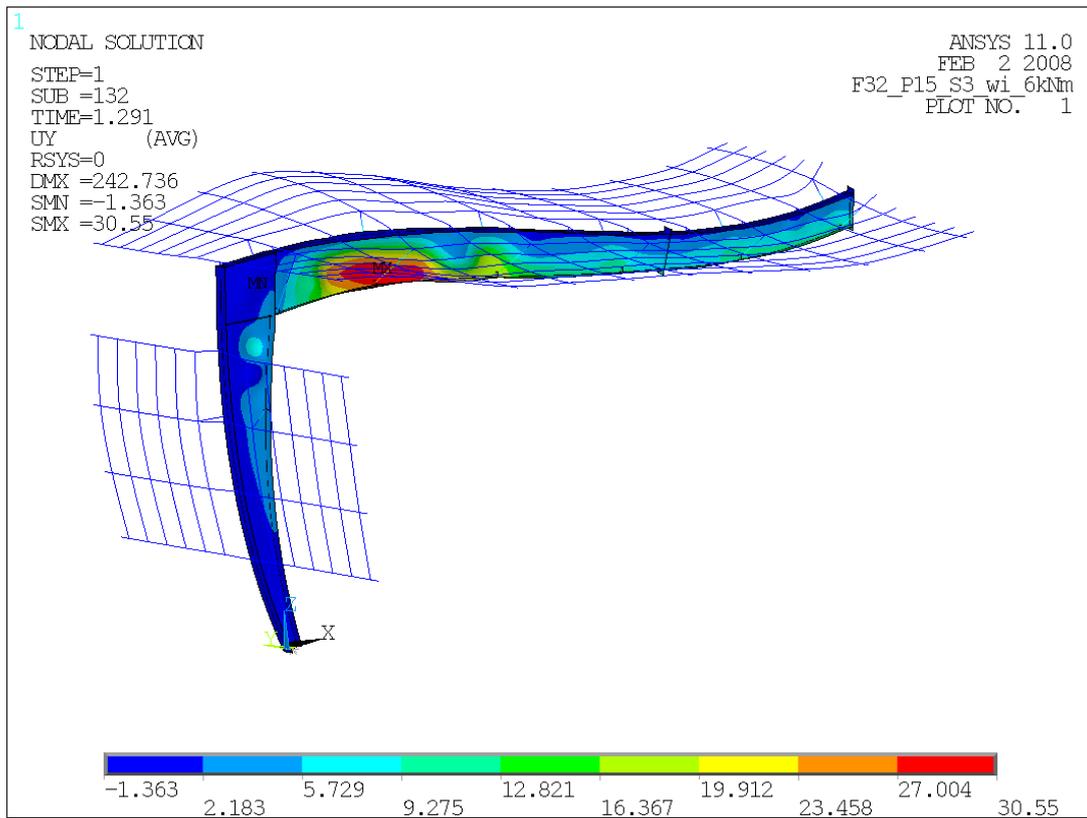


Bild 4.32 DeformationUY [mm], F32_P1,5_S3_R8,5, 6kNm, ohne Imperfektionen

Das Diagramm in Tab. 4.13 zeigt einen nahezu linearen Zusammenhang: wenn das Torsionsmoment wächst, dann fällt die Traglast. Aus Bild 4.31 (Torsionsmoment: 3 kNm) versagt durch lokales Beulen, während im Bild 4.32 (Torsionsmoment: 6 kNm) die Versagensform eher eine globale ist.

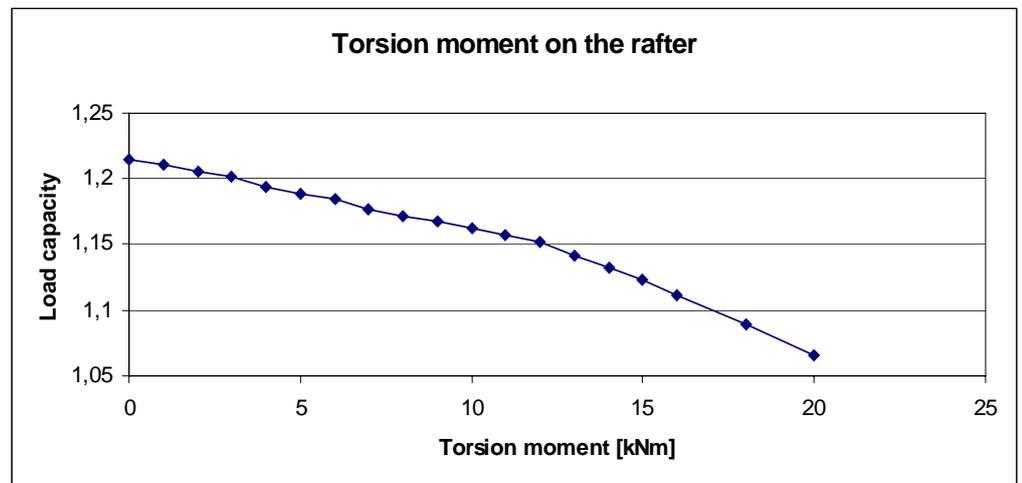


Kombination der Eigenform-Imperfektion

In Tab. 4.14 sind die angreifenden Torsionsmomente und die daraus folgenden Traglasten berechnet.

Die Momente variieren zwischen 0 und 20 kNm. Als Imperfektionen wurde nur eine Eigenformkombination mit globalen und lokalen Versagensformen aufgebracht (Nr. der Eigenformen: 2, 42, 26). Bild 4.33 und 4.34 geben die Deformationen UY des Rahmens

Torsion moment on the frame [kNm]	Load capacity
0	1,215
1	1,211
2	1,206
3	1,201
4	1,194
5	1,189
6	1,184
7	1,177
8	1,172
9	1,167
10	1,162
11	1,157
12	1,152
13	1,142
14	1,133
15	1,123
16	1,112
18	1,089
20	1,066



vor seinem Versagen wieder: das Moment beträgt 3 kNm, im zweiten und 20 kNm.

Tabelle 4.14 Traglast-Torsionsmoment, Eigenform-Imperfektion

Das Ergebnisse für den untersuchten Rahmen lassen sich wie folgt zusammenfassen: ein Torsionsmoment von 1 kNm bewirkt 1% weniger Traglast. Da für Rahmen mit einem Moment von 2 bis 6 kNm zu rechnen ist, bedeutet das eine um 2-6% geringere Traglast des Rahmens.

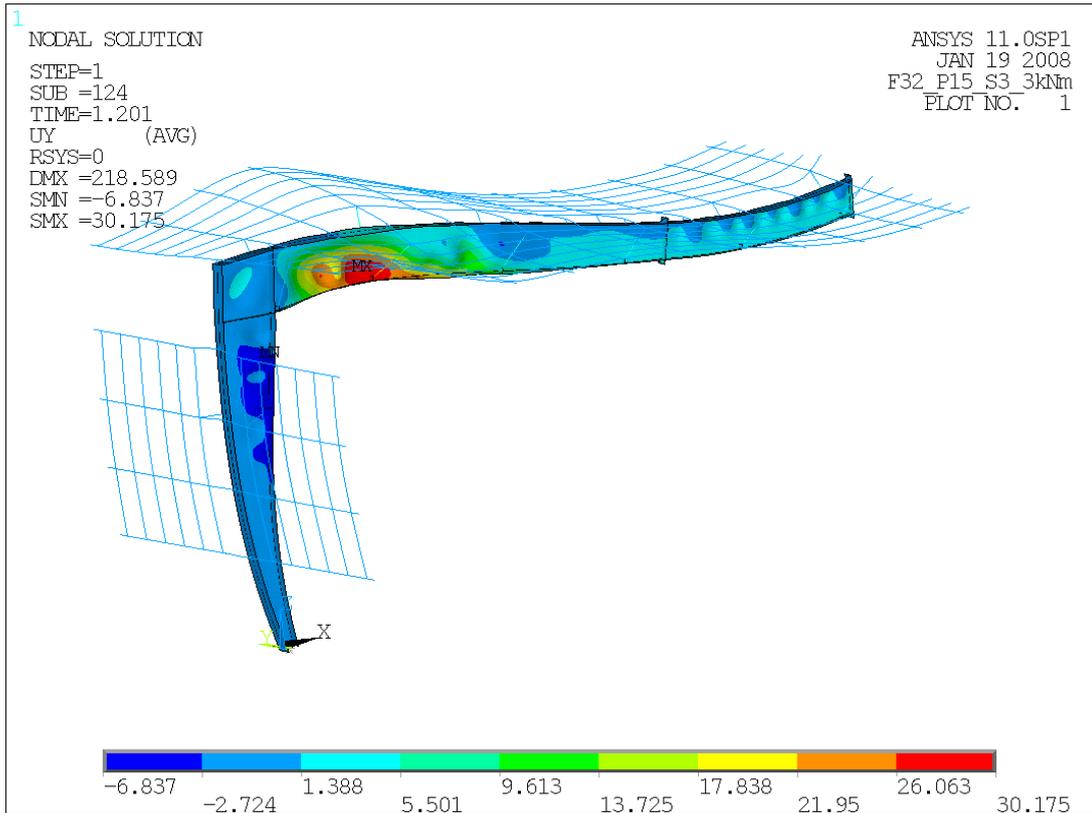


Bild 4.33 Deformationen UY des Rahmens [mm], F32_P1,5_S3_R8,5, 3kNm

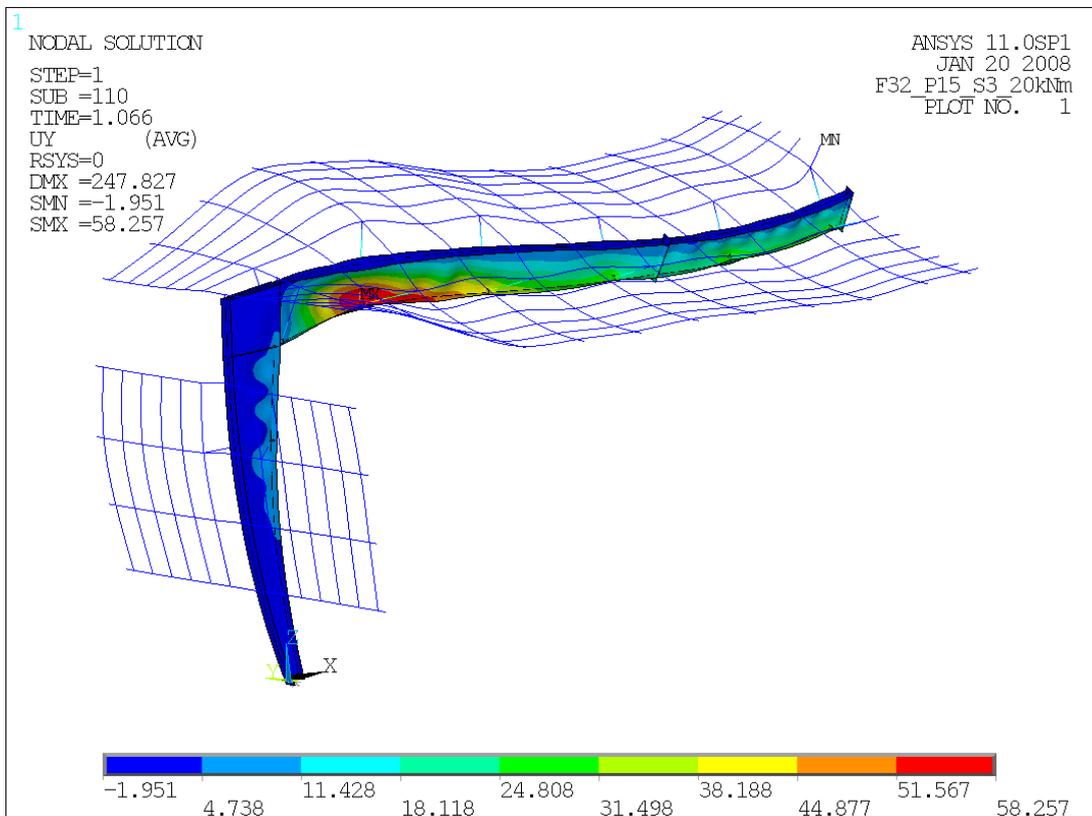


Bild 4.34 Deformationen UY des Rahmens [mm], F32_P1,5_S3_R8,5, 20 kNm

*Kombination der Imperfektionen (Eigenform, wave in normal)*

In Tabelle 4.15 zeigt die aufgebrachten Torsionsmomente und die berechnete Traglast. Die Momente variieren zwischen 0 und 12 kNm. As imperfection an eigenshape combination is taken., with global and local buckling forms and one wave in the normal of the frame. Diese Kombination verursacht ein Minimum an Traglast des untersuchten Rahmens. Wieder sind zwei Fälle unmittelbar vor dem Versagen des Rahmens untersucht worden: 3 kNm (Bild 4.35) und 20 kNm (Bild 4.36).

Torsion moment on the frame [kNm]	Load capacity
0	0,995
1	0,989
3	0,979
6	0,963
9	0,948
12	0,937

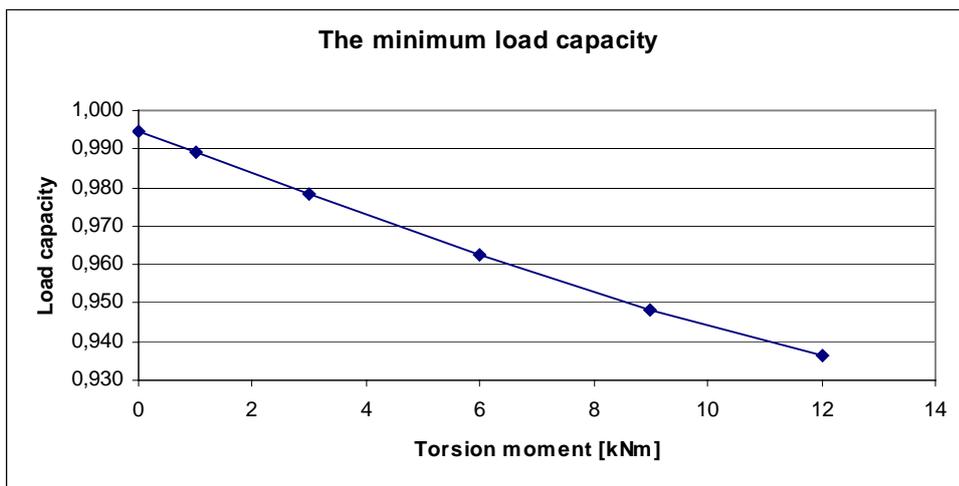


Table 4.15 *Traglast -Torsionsmoment, Kombination der Imperfektionen*

Im unterstellten Bereich für die ungleichförmige Belastung (Torsionsmoment 2-6 kNm) kommt es zu einem Abfall der Traglasten des Rahmens um 3-4 %. Das bedeutet, dass ungleichmäßige Belastung einen gewissen Einfluss auf die Traglast hat.

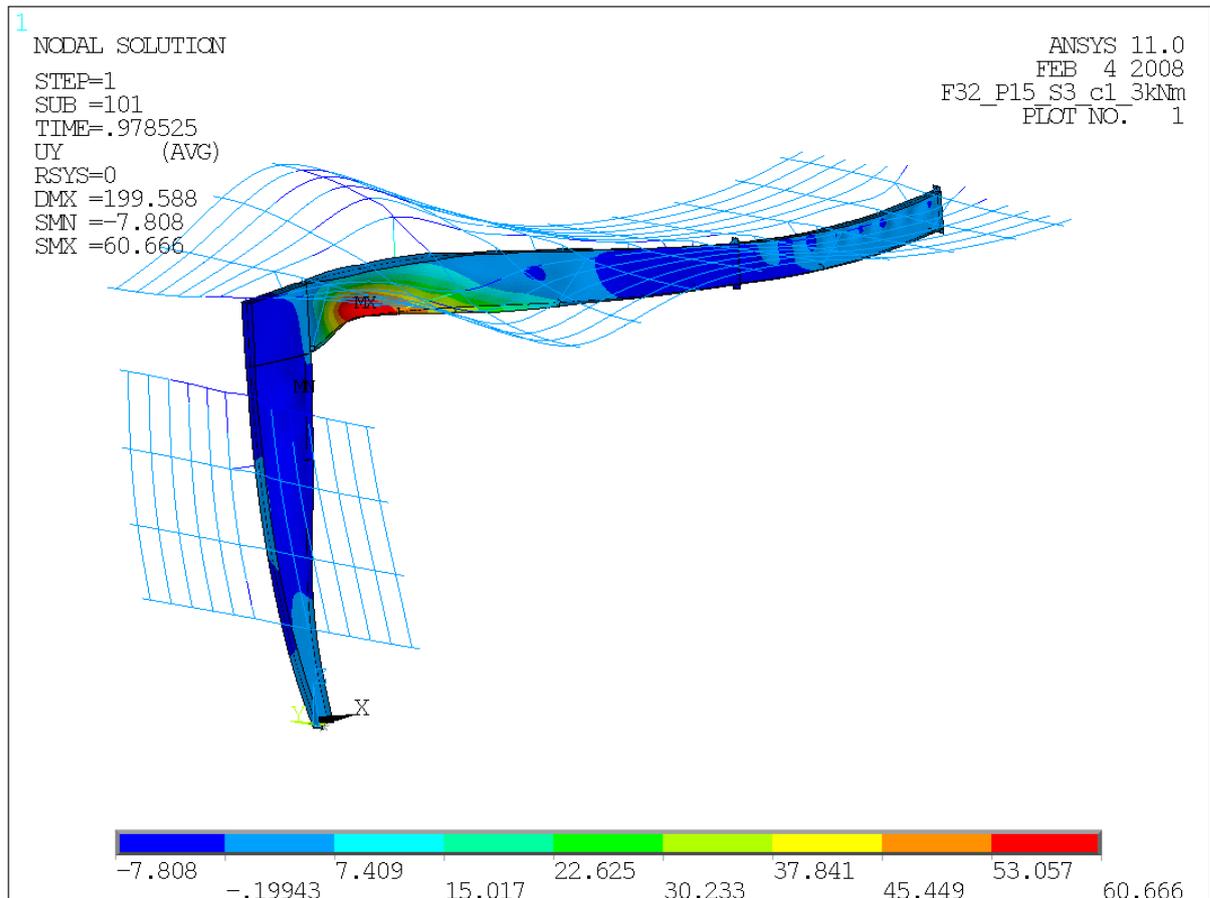


Bild 4.35 DeformationUY des Rahmens [mm], F32_P1,5_S3_R8,5, 3 kNm

Conclusion of the unequal loads

It can be established that the unequal loading have some influence on the frame's load capacities, but these effects are no so significant. The assumed value of the torsional moment is between 2-6 kNm, but in the load capacities it causes only 2-3 % differences in the worst cases.



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.

In Abschnitt 3 wird das numerische Modell der Struktur vorgestellt. Dazu werden zwei unterschiedliche Modelle analysiert: ein vereinfachtes Federmodell und ein Modell mit Pfetten. Es stellte sich heraus, dass manche Imperfektionen vernachlässigbar waren, während andere als entscheidend. Um akkurate Ergebnisse zu erhalten, wurde die Elementgröße (FE-Modellierung) variiert.

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 Rahmen sind sowohl für die Wellenform und -anzahl als auch für deren Amplitude sensitiv.
- Die Steifigkeit der Federn (= Flanschstreben) hat Einfluss auf die Traglast des Rahmens. Wenn man diese Steifigkeit auf 25% der Originalsteifigkeit verringert, dann ist dieser Wert ausreichend, um globalen Stabilitätsversagen zwischen beiden Federn zu erzielen. Für die Pfetten gilt der gleiche Effekt. Wenn die Pfetten zu wenig Biegesteifigkeit haben, können sie den Rahmen kaum aussteifen. Demzufolge kommt es zum Stabilitätsverlust.
- 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 Länge der Pfetten hat im untersuchten Bereich (6-9 m) keine Auswirkungen auf das globale System.
- Die angesetzte Verformung der Pfetten ist ebenfalls wichtig. Die Berechnungen ergeben, dass sich eine symmetrische Form eher als eine asymmetrische Form einstellen kann. Die Differenz in der Traglast ist etwa 4-5%.
- 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. Wenn die Flanschstreben alle 2 m angeordnet sind, erhält man Tragfähigkeit, die um etwa 3-4% größer ist, als bei Anordnung alle 3 m.
- Ungleichförmige Lasten haben einen gewissen Einfluss auf die Rahmentragfähigkeit. Ein unterstelltes Torsionsmoment von bis zu 6 kNm ergibt Einbußen der Traglast von bis zu 4%.

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 (Bild 2.1 bzw. 3.10) nicht erforderlich.

Der Versagensmechanismus nach [4] hat sich durch eine feinere FE-Modellierung nicht bestätigt.

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.

Hallenrahmen mit Vorschädigungen wurden nicht betrachtet.

Literatur

- [1] Ansys Release 11.1, Rainbow Technologies, Inc., „Ansys 11.1 Online Documentation“, 2007.
- [2] prEN 1993-1-1 Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-1: General rules and rules for buildings.



- [3] Rules for Member Stability in EN 1993-1-1, Background documentation and design guidelines, Sixth draft, 2006.
- [4] Goczek J., Juchniewicz J.: The influence of the rafter flange bracing on the behaviour of a plane frame. Progress in Steel, Composite and Aluminium Structures, Proceedings of the ICMS-2006, Rzeszow/Poland, Taylor & Francis Group, London 2006, pp.244.
- [5] Pasternak H., Hannebauer D.: Wie wirkungsvoll sind Flanschstreben bei der Stabilisierung von Riegeln? Bauingenieur 76 (2001) 444-447.
- [6] Pasternak H., Müller L.: Zur FE-Modellierung leichter Hallenrahmen, Stahlbau 70(2001) 53-58.

Prof. Dr. -Ing. habil. H. Pasternak
Lehrstuhlleiter

Dipl. -Ing. A. Marosi
Projektbearbeiter