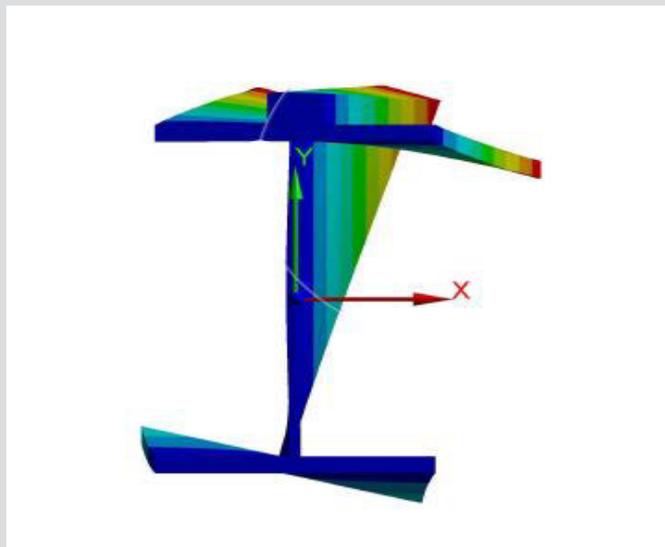


Biegedrillknicken von Kranbahnträgern: Vergleich baupraktischer Nachweisformen mit numerischen Berechnungen



D-5-88/2021

Mirza Basic
Institut für Stahlbau
Technische Universität Graz

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen / Hilfsmittel benutzt habe. Unter den angeführten Quellen habe ich die wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit ident.

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the sources used. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / date

Unterschrift / signature

Biegedrillknicken von Kranbahnträgern: Vergleich baupraktischer Nachweisformen mit numerischen Berechnungen

Masterarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.)

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Konstruktiver Ingenieurbau

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften – Institut für Stahlbau

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Unterweger

Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Kettler

Verfasser

Mirza Basic, BSc

Graz, 2021

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Masterarbeit sowie der gesamten Studienzeit unterstützt und motiviert haben.

Besonderer Dank gilt Herrn Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Kettler, der mich von Anfang an unterstützt hat auch wenn es nicht immer leicht war dran zu bleiben.

Abschließend möchte ich mich bei meinem Papa und meiner Schwester bedanken die stets da waren und mich immer weiter motiviert haben nicht aufzugeben.

Kurzfassung

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit Biegedrillknicken von Kranbahnträger, dabei werden mehrere Nachweisformen benutzt um zu sehen was die Kranbahnträger wirklich aushalten, so dass man später auch wirtschaftlich eine bessere Querschnittauswahl treffen kann. Zu den allen Nachweisformen die lt. Norm EN1993-6 berechnet werden folgt eine numerische Berechnung durch das EDV-Programm ANSYS 19. RELEASE das beim Institut für Stahlbau das erste Mal eingesetzt wird.

Inhaltverzeichnis

1. Einführung und Inhalte der Arbeit	1
1.1 Vorbemerkung	1
1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung	1
1.3 Geometrie und System der Kranbahnträger	2
1.4 Belastung und Lastfälle	4
1.5 Bauteilnachweise nach Norm	5
1.6 Numerische-Berechnung und Finite-Elemente-Modell.....	5
2. Querschnittswerte und Klassifizierung	6
2.1 Querschnitt QS 1 (HEA450).....	8
2.2 Querschnitt QS 2.....	9
2.3 Querschnitt QS 3.....	10
3. Schnittgrößen für Systeme SY1 bis SY4	13
3.1 System 1 (SY1).....	14
3.2 System 2 (SY2).....	15
3.3 System 3 (SY3).....	16
3.4 System 4 (SY4).....	17
4. Knickender Obergurt nach [1],6.3.2.3	18
4.1 Grundlagen für den BDK-Nachweis Knickender Obergurt	18
4.1.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2	23
4.1.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2	25
4.1.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2	27
4.1.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2	29
4.1.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2	32
4.1.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2	34
4.1.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2	36
4.1.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2	39
4.2 Ergebnisvergleich für „Knickender Obergurt“ nach [1].....	41
5. BDK-Nachweis nach [1], Anhang A	42
5.1 Grundlagen für den Vereinfachten BDK-Nachweis nach	42

[1], Anhang A aus [5].....	42
5.2 Methoden für die Berechnung von <i>My.cr</i>.....	45
5.2.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2.....	49
5.2.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2.....	53
5.2.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2.....	57
5.2.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2.....	61
5.2.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2.....	65
5.2.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2.....	69
5.2.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2.....	73
5.2.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2.....	77
5.3 Ergebnisvergleich BDK-Nachweis nach [1], Anhang A.....	81
6. Numerische-Berechnung.....	83
6.1 Finite-Elemente-Modell.....	84
7. GNIA-Berechnung	90
7.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2.....	90
7.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2.....	98
7.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2.....	102
7.3.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 7.1 und 7.3.....	106
7.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2.....	107
7.4.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 7.2 und 7.4.....	111
7.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2.....	112
7.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2.....	116
7.6.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 7.5 und 7.6.....	120
7.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2.....	121
7.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2.....	127
7.8.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 7.7 und 7.8.....	133
7.9 Ergebnisvergleich der GNIA-Berechnung	134
8. GMNIA-Berechnung.....	137
8.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2.....	137
8.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2.....	144
8.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2.....	148
8.3.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 8.1 und 8.3.....	152
8.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2.....	153
8.4.1 Kommentar zu den F– Δ Diagrammen aus Kapitel 8.2 und 8.4.....	157

8.5	Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2	158
8.6	Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2	162
8.6.1	Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.5 und 8.6.....	166
8.7	Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2	167
8.8	Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2	171
8.8.1	Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.7 und 8.8.....	175
8.9	Ergebnisvergleich der GMNIA-Berechnung	176
8.10	Parallele zwischen der GMNIA- und GNIA-Berechnung.....	178
9.	Vergleich baupraktischer Nachweisformen mit numerischen Berechnungen.....	179
10.	Zusammenfassung und Ausblick.....	181
10.1	Zusammenfassung	181
10.2	Ausblick.....	182
11.	Literaturverzeichnis	183

1

1. Einführung und Inhalte der Arbeit

1.1 Vorbemerkung

Industriehallen haben meistens Kranbahnen und Kräne die für Transport und Heben von schweren Materialien oder Maschinen genutzt werden. Der Kran bewegt sich dabei auf einer Kranschiene, die auf einem Kranbahnträger mittels unterschiedlichen Verbindungstechniken befestigt ist.

1.2 Aufgabenstellung und Zielsetzung

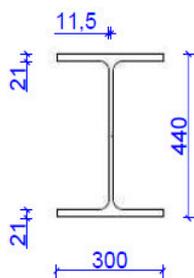
Das Ziel dieser Arbeit ist es Biegedrillknicken bei Kranbahnträger mit unterschiedlichen Geometrien und Lastfällen nach EN 1993-6 [1] zu untersuchen. Die Kranbahnträger haben eine übliche Form eines I-Trägers, genauer Walzprofile und Schweißprofile mit angeschweißter Kranschiene. Bei allen Nachweisformen wird die Auslastung in Hinsicht auf das Biegedrillknicken betrachtet um auch ein Bild zu schaffen wie genau und wie wirtschaftlich diese sind.

Da es sich um Kranbahnträger handelt, die in einer Industriehalle schon vorhanden und gleichzeitig im Betrieb sind, sind alle Abmessungen der Kranbahnträger bekannt. Es werden die Flachstahlschiene FSS 60x40 und die Profilschiene A45 gegenübergestellt.

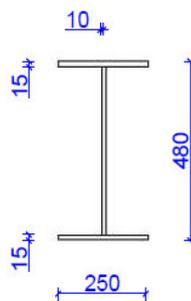
1.3 Geometrie und System der Kranbahnträger

Die Geometrie der Kranbahnträger wird in Abbildung 1.1 und Abbildung 1.2 dargestellt. Insgesamt werden drei verschiedene Querschnitte untersucht (QS1, QS2 und QS3). Der Querschnitt 1 (QS1) ist ein Walzprofil (HEA450) die Querschnitte QS1 und QS2 Schweisprofile, wobei die Schweißnähte nicht in dieser Arbeit berechnet werden.

QS1:HEA 450



QS2



QS3

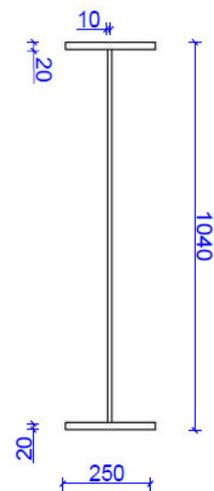


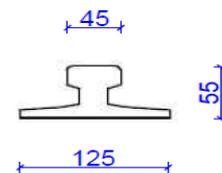
Abbildung 1.1: Querschnitte der untersuchten Kranbahnträger.

SCHIENE SC1



FSS 60X40

SCHIENE SC2



A 45

Abbildung 1.2: Untersuchte Schienen-Querschnitte.

Es werden die Flachstahlschiene FSS 60x40 und Kranschiene A45 benutzt (SC1 und SC2) (siehe Abbildung 1.2). Die Kranbahnträger werden in vier Systemen betrachtet und berechnet (SY1, SY2, SY3 und SY4), siehe Abbildung 1.3. Die Systeme (SY1, SY2, SY3, S4) stehen für folgendes:

1. System 1 (SY1) ist ein Einfeldträger mit einer Länge von 5m mit Lastfall (LF1) die Radlasten haben einen Abstand von $a=1,7\text{m}$;
2. System (SY2) ist ein Zweifeldträger mit Feldlänge von 5m (Insgesamt $L=10\text{m}$) mit Lastfall (LF1) die Radlasten haben einen Abstand von $a=1,7\text{m}$;
3. System 1 (SY3) ist ein Einfeldträger mit einer Länge von 5m mit Lastfall (LF2) die Radlasten haben einen Abstand von $a=3,4\text{m}$;
4. System (SY2) ist ein Zweifeldträger mit Feldlänge von 5m (Insgesamt $L=10\text{m}$) mit Lastfall (LF2) die Radlasten haben einen Abstand von $a=3,4\text{m}$ (siehe Abbildung 1.5).

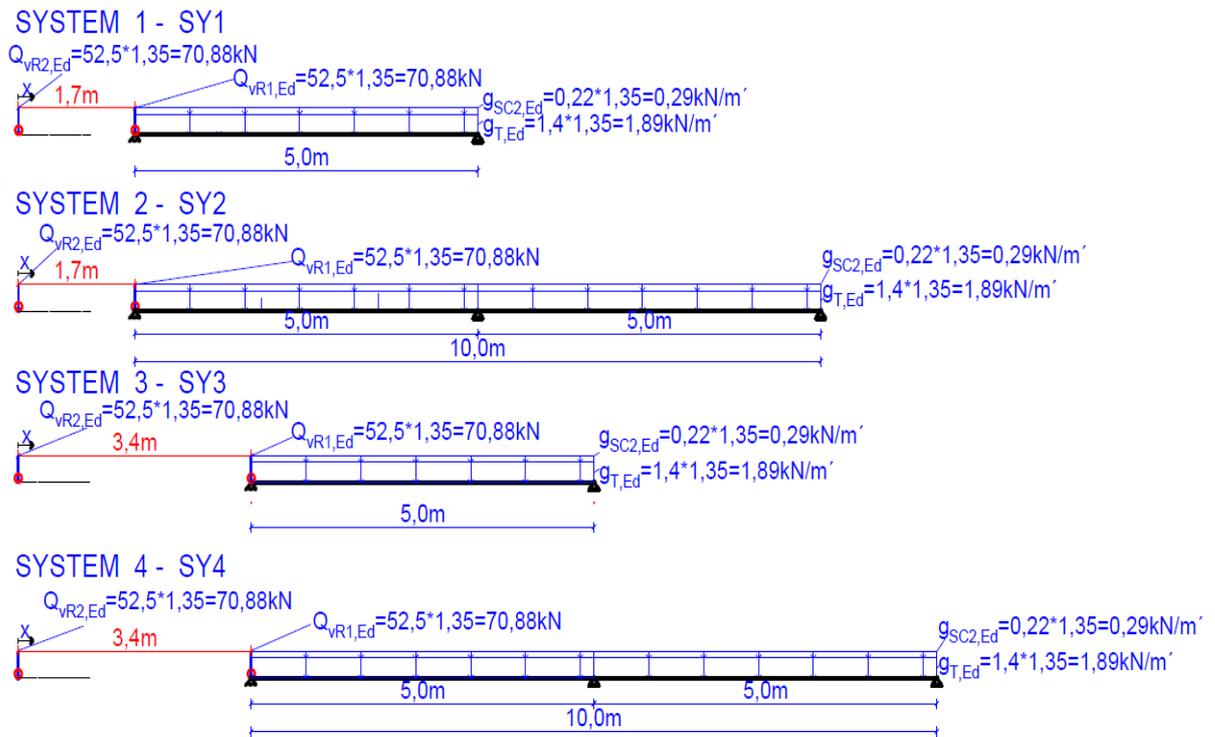


Abbildung 1.3: Berechnungssysteme der Kranbahnträger.

Alle Träger sind im Auflagerbereich gabelgelagert – somit sind Horizontalverformungen und Torsion gesperrt, die Verwölbung des Querschnitts ist nicht gesperrt.

1.4 Belastung und Lastfälle

Bei der Berechnung von Kranbahnen wo viele verschiedenen Einwirkungen auftreten unterscheiden wir zwischen: vertikalen und horizontalen Einwirkungen und außergewöhnlichen Einwirkungen nach EN 1991-3 [2]. In dieser Arbeit entstehen die Vertikallasten infolge des Eigengewichts des Krans und der Hublast, die Horizontallasten entstehen durch Spurführungskräfte oder Beschleunigungs- und Bremskräfte wie auch durch die Pufferendkraft die zu den außergewöhnlichen Einwirkungen zählt. Die Berechnungen habe ich mit ständigen Einwirkungen von Kranquerschnitt g_T und Kranschiene g_S in Form von einer Linienlast und mit veränderlichen Einwirkungen Q_V und Q_H (vertikale und horizontale Einzellasten), den Radlasten durchgeführt. Die Radlasten entstehen durch den Kranbetrieb in einer Industriehalle und sind von einem realen 5,0 Tonnen Kran übernommen worden. Alle Lasten werden mit einem Lastfaktor gerechnet, der für ständige und variable Lasten mit

$\gamma_G = \gamma_Q = 1,35$ angenommen ist.

-Lastenübersicht:

Ständige Einwirkungen -G:

1. Eigengewicht Kranbahnträger (QS1, QS2, QS3) - g_T
 - $g_{T1,Ed} = g_{T1} \cdot \gamma_G = 1,40 \cdot 1,35 = 1,89 \text{ kN/m}$
 - $g_{T2,Ed} = g_{T2} \cdot \gamma_G = 0,94 \cdot 1,35 = 1,27 \text{ kN/m}$
 - $g_{T3,Ed} = g_{T3} \cdot \gamma_G = 1,57 \cdot 1,35 = 2,12 \text{ kN/m}$
2. Eigengewicht Kranschiene (SC1, SC2) - g_S
 - $g_{S1,Ed} = g_{S1} \cdot \gamma_G = 0,19 \cdot 1,35 = 0,27 \text{ kN/m}$
 - $g_{S2,Ed} = g_{S2} \cdot \gamma_G = 0,22 \cdot 1,35 = 0,29 \text{ kN/m}$

Veränderliche Einwirkungen -Q:

1. Vertikale Radlasten - Q_{VR1} und Q_{VR2}
 - (LF1) $Q_{V1,Ed} = Q_{V1} \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN}$ und
 $Q_{V2,Ed} = Q_{V2} \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN}$ im Abstand $a=1,7\text{m}$
 - (LF2) $Q_{V1,Ed} = Q_{V1} \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN}$ und
 $Q_{V2,Ed} = Q_{V2} \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN}$ im Abstand $a=3,4\text{m}$
2. Horizontale Radlasten - Q_{HR1} und Q_{HR2}
 - (LF1) $Q_{H1,Ed} = Q_{H1} \cdot \gamma_Q = +8,9 \cdot 1,35 = +12,0 \text{ kN}$ und
 $Q_{H2,Ed} = Q_{H2} \cdot \gamma_Q = -8,9 \cdot 1,35 = -12,0 \text{ kN}$ im Abstand $a=1,7\text{m}$
 - (LF2) $Q_{H1,Ed} = Q_{H1} \cdot \gamma_Q = +8,9 \cdot 1,35 = +12,0 \text{ kN}$ und
 $Q_{H2,Ed} = Q_{H2} \cdot \gamma_Q = -8,9 \cdot 1,35 = -12,0 \text{ kN}$ im Abstand $a=3,4\text{m}$

Weil die ständigen Einwirkungen von Kranbahnträger mit Schiene allein bedingt sind, werden die Lastfälle die zu den maximalen Schnittgrößen führen durch die Position und den Abstand zwischen den Radlasten definiert. Deshalb unterscheiden wir zwei Lastfälle:

1. Lastfall 1 (LF1) - Abstand zwischen den Radlasten $a=1,7\text{m}$
2. Lastfall 2 (LF2) - Abstand zwischen den Radlasten $a=3,4\text{m}$.

Die Radlasten sind als Wanderlasten im Programm Ruck Zuck definiert, um eine Auslastung ähnlich der aus dem Betrieb zu generieren. Diese werden jedem System (SY1, SY2, SY3, SY4) einzeln aufgebracht, um die maximalen Momente zu bekommen, die wiederum für die Nachweise relevant ist.

1.5 Bauteilnachweise nach Norm

Es werden unterschiedliche Nachweisformen für Biegedrillknicken (BDK) von Kranbahnträger unter vordefinierten Radlasten nach Eurocode 3 durchgeführt:

1. „Knickender Obergurt“ nach [1], 6.3.2.3(1);
2. BDK-Nachweis nach [1], Anhang A.

1.6 Numerische-Berechnung und Finite-Elemente-Modell

In der Arbeit werden FEM-Berechnungen durchgeführt, um uns ein Bild zu schaffen, wie sich verschiedene Kranbahnträger mit zwei unterschiedlichen Schienen unter zwei verschiedenen Lastfällen bei Biegedrillknicken verhalten. Alle Numerische Berechnungen werden mit dem Programm ANSYS 19. Release [3] durchgeführt. Die FE-Modelle sind so entwickelt, dass die Geometrie des Kranbahnträgers realistisch dargestellt ist. So entsteht ein realistischer Ansatz für das Stabilitätsversagen von Kranbahnträgern.

Die Numerische Berechnung wird in dieser Arbeit nach zwei Arten durchgeführt:

1. GNIA - Geometrisch nichtlineare elastische Berechnungen mit Imperfektionen
2. GMNIA - Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen.

2. Querschnittswerte und Klassifizierung

- Für alle folgenden BDK-Nachweise werden in diesem Kapitel die wichtigsten Querschnittswerte der Kranbahnträger ermittelt und zugleich die Klassifizierung durchgeführt.
- In allen Nachweisen ist die Stahlsorte S235 angenommen und es wurde mit einer Streckgrenze ($f_{y,Ed} = 23,5 \text{ kN/cm}^2$) gerechnet.

Beidseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Klasse	auf Biegung beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
1	$clt \leq 72\varepsilon$	$clt \leq 33\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$clt \leq 83\varepsilon$	$clt \leq 38\varepsilon$	für $\alpha > 0,5$: $clt \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ für $\alpha \leq 0,5$: $clt \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)						
3	$clt \leq 124\varepsilon$	$clt \leq 42\varepsilon$	für $\psi > -1$: $clt \leq \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ für $\psi \leq -1^a$: $clt \leq 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$			
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

^a Es gilt $\psi \leq -1$ falls entweder die Druckspannungen $\sigma \leq f_y$ oder die Dehnungen infolge Zug $\varepsilon_y > \frac{f_y}{E}$ sind.

Abbildung 2.1: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile nach [2], Tab.5.2.

Einseitig gestützte Flansche							
Gewalzte Querschnitte			Geschweißte Querschnitte				
Klasse	auf Druck beanspruchte Querschnittsteile	auf Druck und Biegung beanspruchte Querschnittsteile					
		freier Rand im Druckbereich		freier Rand im Zugbereich			
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
1	$clt \leq 9\varepsilon$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	$clt \leq 10\varepsilon$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	$clt \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Spannungsverteilung über Querschnittsteile (Druck positiv)							
3	$clt \leq 14\varepsilon$	$clt \leq 21\varepsilon \sqrt{k_\sigma}$					
		Für k_σ siehe EN 1993-1-5					
$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$		f_y	235	275	355	420	460
		ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Abbildung 2.2: Maximales c/t-Verhältnis druckbeanspruchter Querschnittsteile nach [2], Tab.5.2(fortgesetzt).

2.1 Querschnitt QS 1 (HEA450)

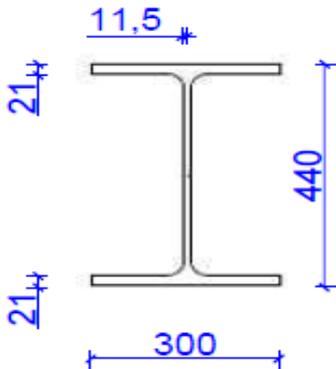
QS1:HEA 450

- QS1: $h = 44 \text{ cm}$ $b_f = 30 \text{ cm}$
 $t_w = 1,15 \text{ cm}$ $t_f = 2,1 \text{ cm}$
 $A = 178 \text{ cm}^2$ $I_z = 9465 \text{ cm}^4$
 $I_y = 63720 \text{ cm}^4$

- Die Widerstandsmomente für QS1:

$$W_{el,y} = 2896 \text{ cm}^3 \quad W_{el,z} = 631 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,y} = 3216 \text{ cm}^3 \quad W_{pl,z} = 966 \text{ cm}^3 .$$



- Mit $\epsilon=1$ wird wie folgt ermittelt.
- Die Klasse vom Steg, auf Biegung beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{44 - 2 \cdot (2,1 + 2,7)}{1,15} = 29,91 \leq 72 \Rightarrow \text{Klasse 1}$$

- Die Klasse vom Flansch auf Druck beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{44 - 1,15}{2} - 2,7}{2,1} = 5,58 \leq 9 \Rightarrow \text{Klasse 1}$$

Abbildung 2.3: Querschnitt QS1.

- Der Querschnitt (QS1) ist in die Querschnittsklasse **QK 1** eingeordnet.

2.2 Querschnitt QS 2

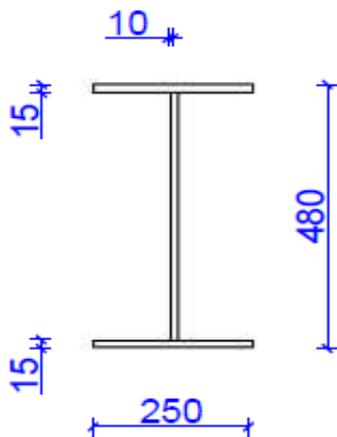
QS2

- QS2: $h = 48 \text{ cm}$ $t_f = 1,5 \text{ cm}$
- $t_w = 1,0 \text{ cm}$ $b_f = 25 \text{ cm}$
- $A = 120 \text{ cm}^2$ $I_y = 48150 \text{ cm}^4$
- $I_z = 3910 \text{ cm}^4$

- Die Widerstandsmomente für QS2:

$$W_{el,y} = 2006.3 \text{ cm}^3 \quad W_{el,z} = 312.8 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,y} = 2250 \text{ cm}^3 \quad W_{pl,z} = 480 \text{ cm}^3 .$$



- Mit $\varepsilon=1$ wird wie folgt ermittelt.

- Die Klasse vom Steg, auf Biegung beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{45 - 2 \cdot 0,4}{1,0} = 44,2 \leq 72 \Rightarrow \text{Klasse 1}$$

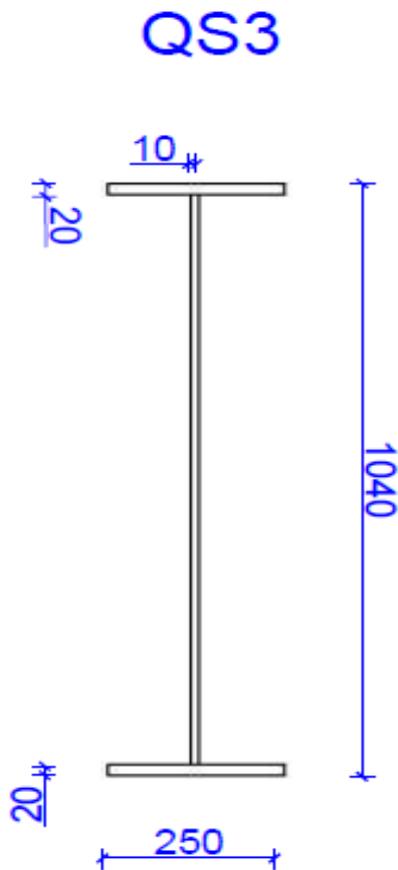
- Die Klasse vom Flansch auf Druck beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{25}{2} - \frac{1,5}{2} - 0,4}{1,5} = 7,57 \leq 9 \Rightarrow \text{Klasse 1}$$

Abbildung 2.4: Querschnitt QS2

- Der Querschnitt (QS2) ist in die Querschnittsklasse **QK 1** eingeordnet.

2.3 Querschnitt QS 3



- QS3: $h = 104 \text{ cm}$ $t_f = 2,0 \text{ cm}$
 $t_w = 1,0 \text{ cm}$ $b_f = 25 \text{ cm}$
 $A = 200 \text{ cm}^2$ $I_y = 343467 \text{ cm}^4$
 $I_z = 5217 \text{ cm}^4$

- Die Widerstandsmomente für QS3:

$$W_{el,y} = 6605 \text{ cm}^3 \quad W_{el,z} = 417 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,y} = 7600 \text{ cm}^3 \quad W_{pl,z} = 645 \text{ cm}^3 .$$

- Mit $\epsilon=1$ wird wie folgt ermittelt.

- Die Klasse vom Steg, auf Biegung beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{104-2 \cdot 2}{1,0} = 100 \leq 124 \Rightarrow \text{Klasse 3}$$

- Die Klasse vom Flansch auf Druck beansprucht:

$$\frac{c}{t} = \frac{\frac{25}{2} - \frac{1}{2}}{2,0} = 6 \leq 9 \Rightarrow \text{Klasse 1}$$

Abbildung 2.5: Querschnitt QS3

Der Querschnitt (QS3) ist in die Querschnittsklasse **QK 2** eingeordnet, weil laut [[2]/ 6.2.2.4] können wirksame Querschnittswerte bei Querschnitten mit Klasse-3-Stegen und Klasse-1-oder Klasse-2-Gurten bei Momenten Beanspruchung M_y als Klasse-2 Querschnitte eingestuft werden. Es muss aber die gedrückte Fläche des Steges entsprechend Abbildung 2.6 in einen Anteil mit wirksamer Breite $20\epsilon t_w$ am Druckgurt und einen weiteren Anteil mit wirksamer Breite $20\epsilon t_w$ an der neutralen Achse der plastischen Spannungsverteilung des Querschnitts aufgeteilt sein. [2]

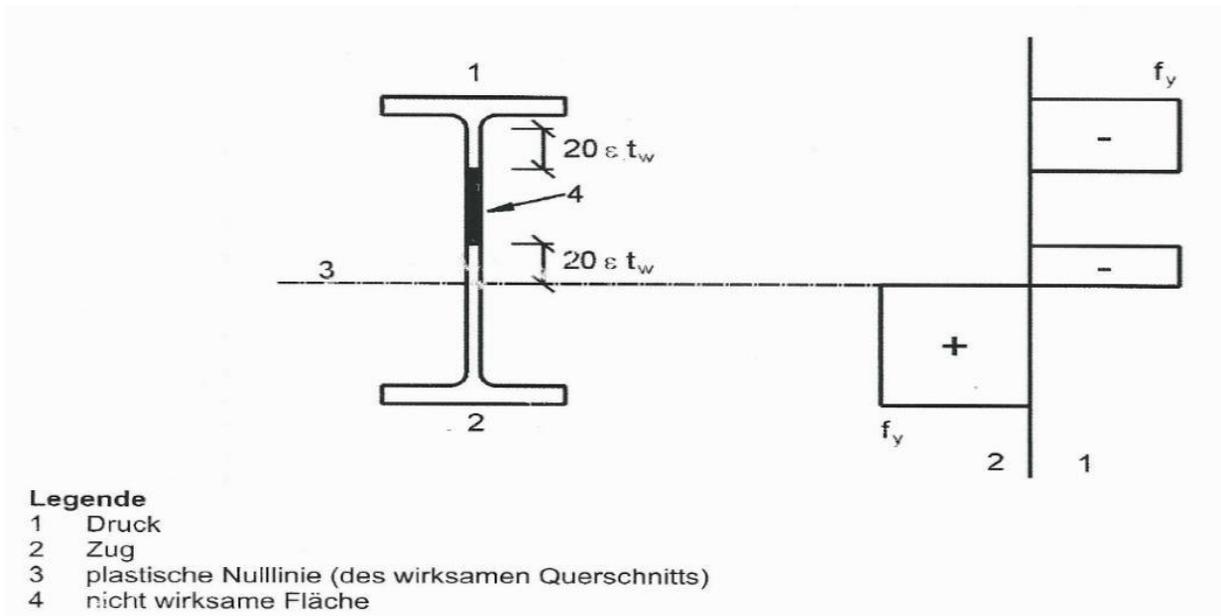


Abbildung 2.6: Wirksame Stegfläche für Klasse-2-Querschnitte lt. [2].

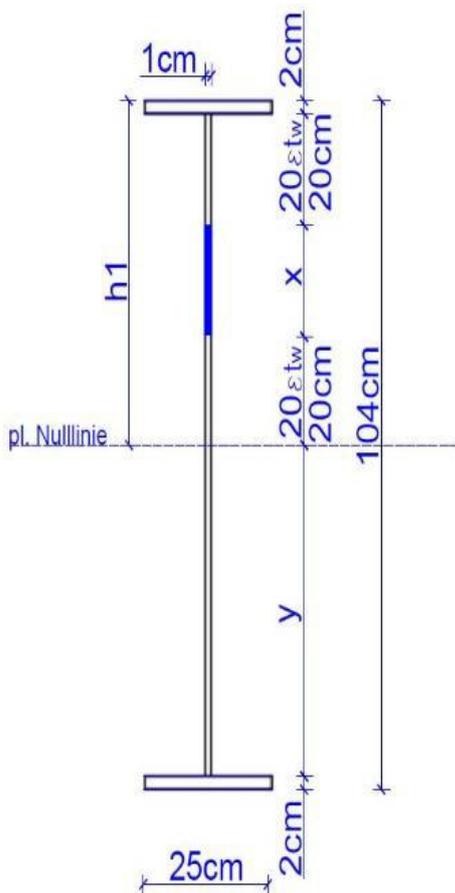


Abbildung 2.7: Ermitteln der plastischen Nulllinie

- Zuerst wird die Position der plastischen Nulllinie ermittelt.

$$y = 100 - h_1 \Rightarrow y = 100 - 60 = 40 \text{ cm}$$

$$x = h_1 - 40 \Rightarrow x = 60 - 40 = 20 \text{ cm}$$

$$F_{D,1} + F_{D,2} + F_{D,3} = F_{Z,1} + F_{Z,2}$$

$$A_1 \cdot f_{y,d} + A_2 \cdot f_{y,d} + A_3 \cdot f_{y,d} = A_4 \cdot f_{y,d} + A_2 \cdot f_{y,d}$$

$$25,0 \cdot 2 \cdot 23,5 + 20,0 \cdot 1,0 \cdot 23,5 + 20,0 \cdot 1,0 \cdot 23,5$$

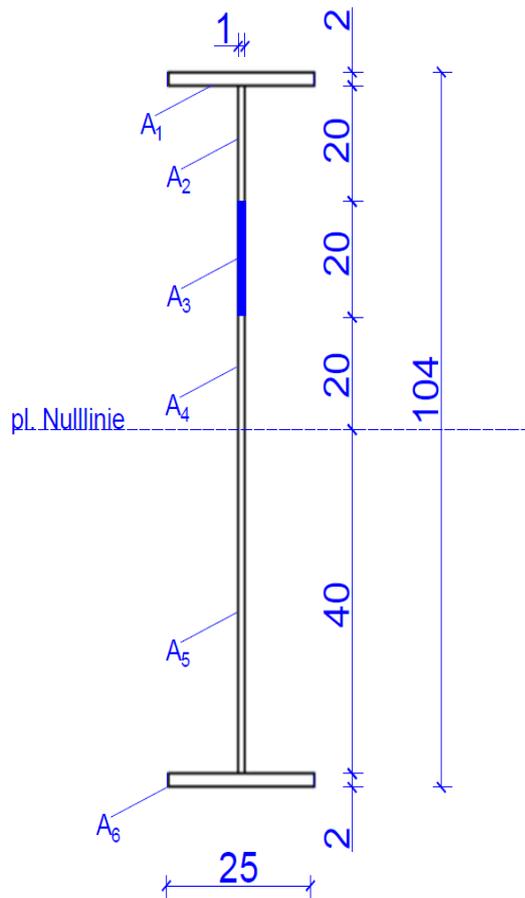
$$= 25,0 \cdot 2 \cdot 23,5 + (100 - h_1) \cdot 1,0 \cdot 23,5$$

$$50,0 \cdot 23,5 + 20,0 \cdot 23,5 + 20,0 \cdot 23,5$$

$$= 50,0 \cdot 23,5 + (100 - h_1) \cdot 23,5 \quad | \div (23,5)$$

$$50,0 + 20,0 + 20,0 = 50,0 + 100 - h_1$$

$$h_1 = 60 \text{ cm}$$



-Danach folgen die Plastischen Widerstandsmomente und die Wirksame Fläche.

$$W_{pl,y} = 25,0 \cdot 2 \cdot (60 + 1) + 20,0 \cdot 1,0 \cdot (60 - 10) + 20,0 \cdot 1,0 \cdot 10,0 + 40 \cdot 1,0 \cdot 20,0 + 25,0 \cdot 2,0 \cdot (40 + 1) = 7100 \text{ cm}^3$$

$$W_{pl,z} = (12,5 \cdot 2,0) \cdot 6,25 \cdot 4 + (40,0 \cdot 0,5) \cdot 0,25 \cdot 2 + (20,0 \cdot 0,5) \cdot 0,25 \cdot 4 = 645 \text{ cm}^3$$

$$A_{\text{Wirksame Fläche}} = b_f \cdot t_f + (h - 2 \cdot t_f) \cdot t_w - t_w \cdot x$$

$$= 25,0 \cdot 2,0 + (104 - 2 \cdot 2) \cdot 1,0 - 1,0 \cdot 20$$

$$= 130 \text{ cm}^2$$

Abbildung 2.8: Ermitteln der Wirksamen Fläche.

3. Schnittgrößen für Systeme SY1 bis SY4

Für die folgenden BDK-Nachweise wurden die Schnittgrößen mit Hilfe des Programmes Ruck-Zuck [4] ermittelt. Alle berechneten Kranträger wurden mit einer Gabellagerung vorgesehen und deswegen ist das Stützmoment nicht maßgebend. Am Mittelaufleger wo das Stützmoment auftritt, sind die Verschiebungen durch die Art der Lagerung gesperrt, so dass es nur schwer zum Biegedrillknicken kommen kann.

Auf den Abbildungen 3.1 bis 3.4 werden nur die Kritischen Lastfälle für jedes System (SY1-SY4) einzeln angezeigt.

3.1 System 1 (SY1)

Beim System 1 haben wir einen Einfeldträger mit einer Länge von ($L=5,0\text{m}$) der mit Radlasten mit einem Abstand ($a=1,7\text{m}$) belastet ist.

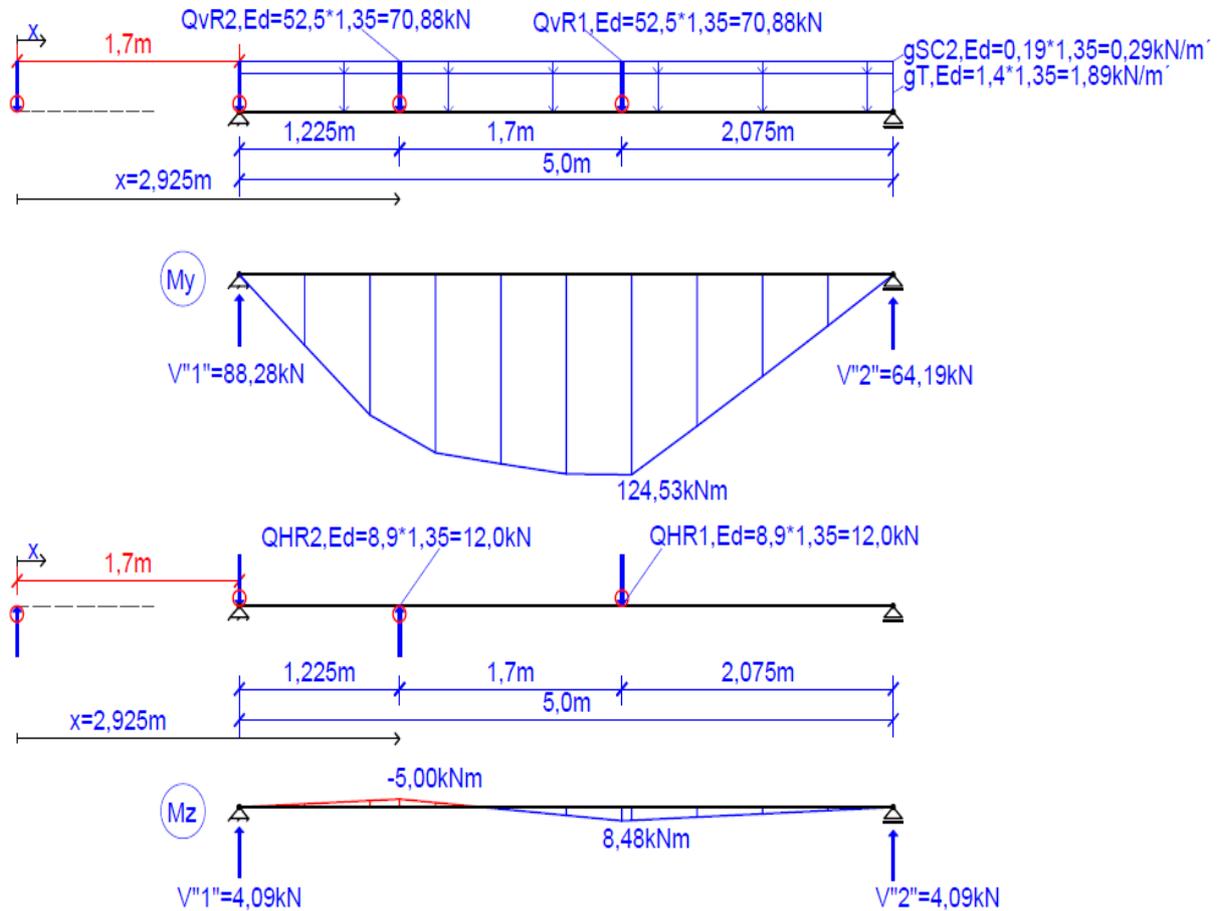


Abbildung3.1: Charakteristische Schnittgrößen System 1 (SY1)

3.2 System 2 (SY2)

Beim System 2 haben wir einen Zweifeldträger mit einer Länge von $(L=10,0\text{m})$ der mit Radlasten mit einem Abstand $(a=1,7\text{m})$ belastet ist.

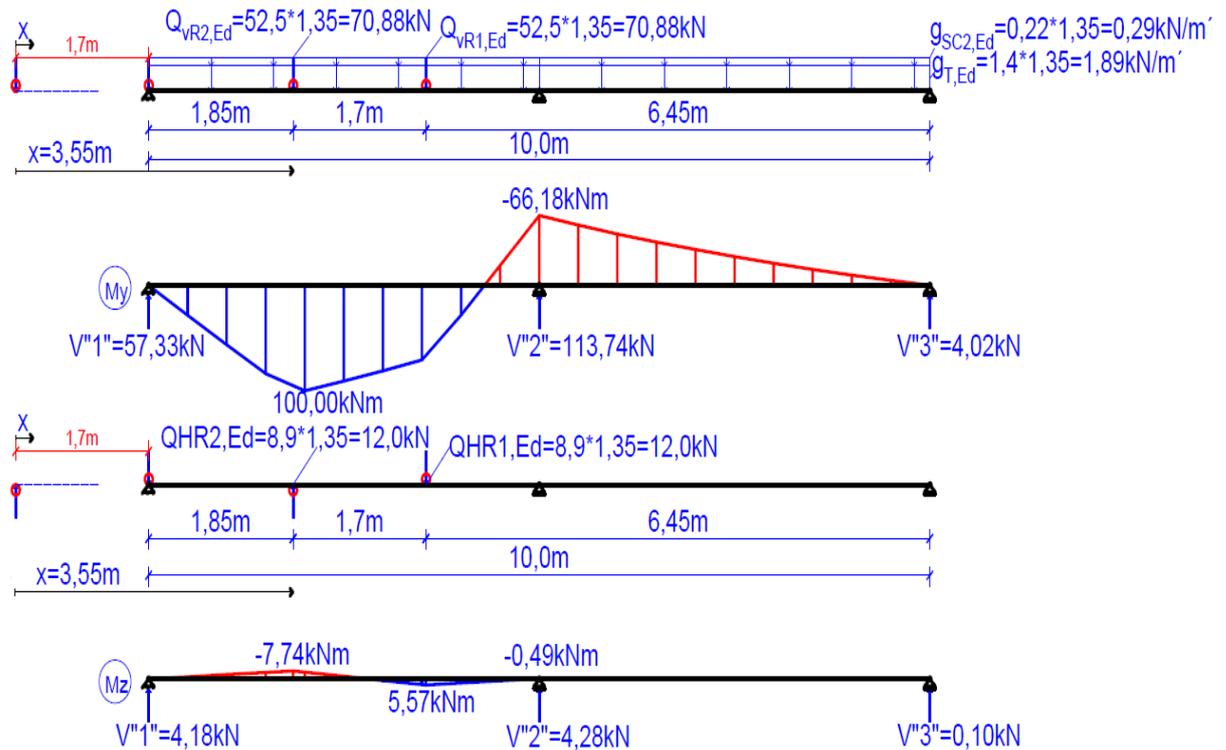


Abbildung 3.2: Charakteristische Schnittgrößen System 2 (SY2)

3.3 System 3 (SY3)

Beim System 3 haben wir wieder einen Einfeldträger mit einer Länge von ($L=5,0\text{m}$) diesmal mit Radlasten mit einem Abstand von ($a=3,4\text{m}$).

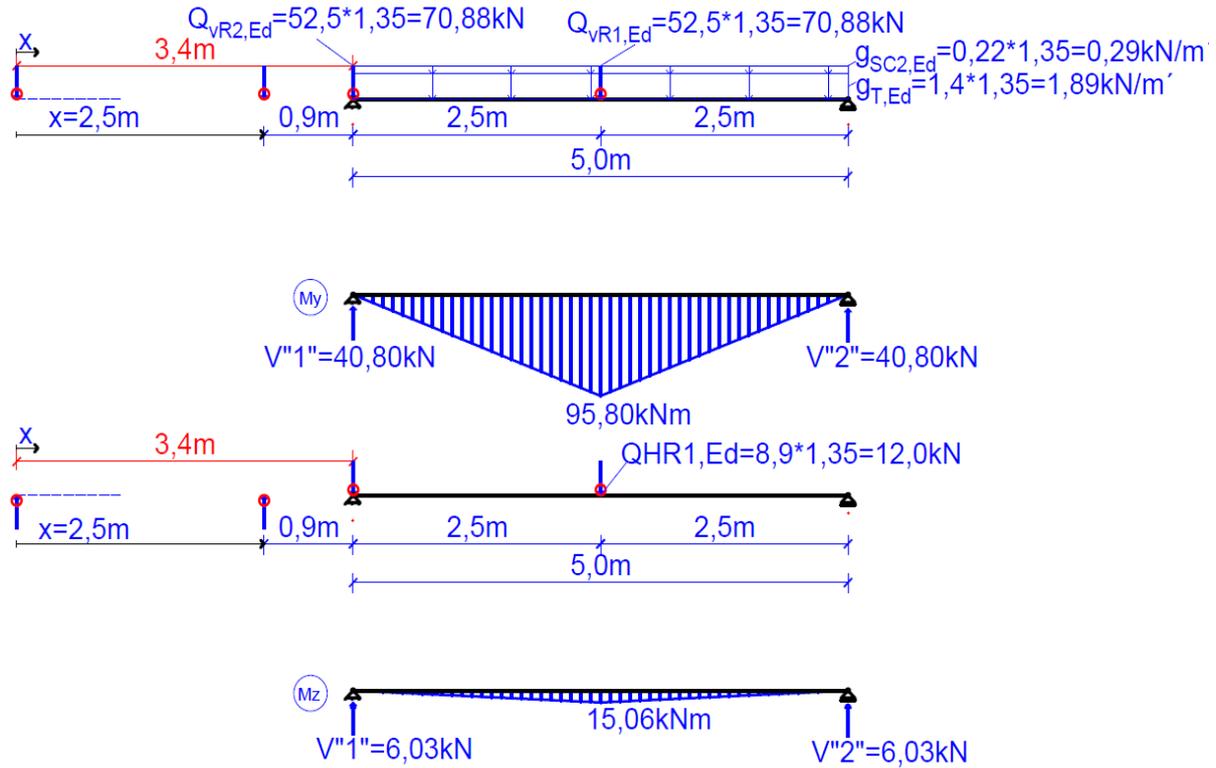


Abbildung 3.3: Charakteristische Schnittgrößen System 3 (SY3)

3.4 System 4 (SY4)

Beim System 4 haben wir wieder einen Zweifeldträger mit einer Länge von ($L=10,0\text{m}$) der diesmal mit Radlasten mit einem Abstand von ($a=3,4\text{m}$) belastet ist.

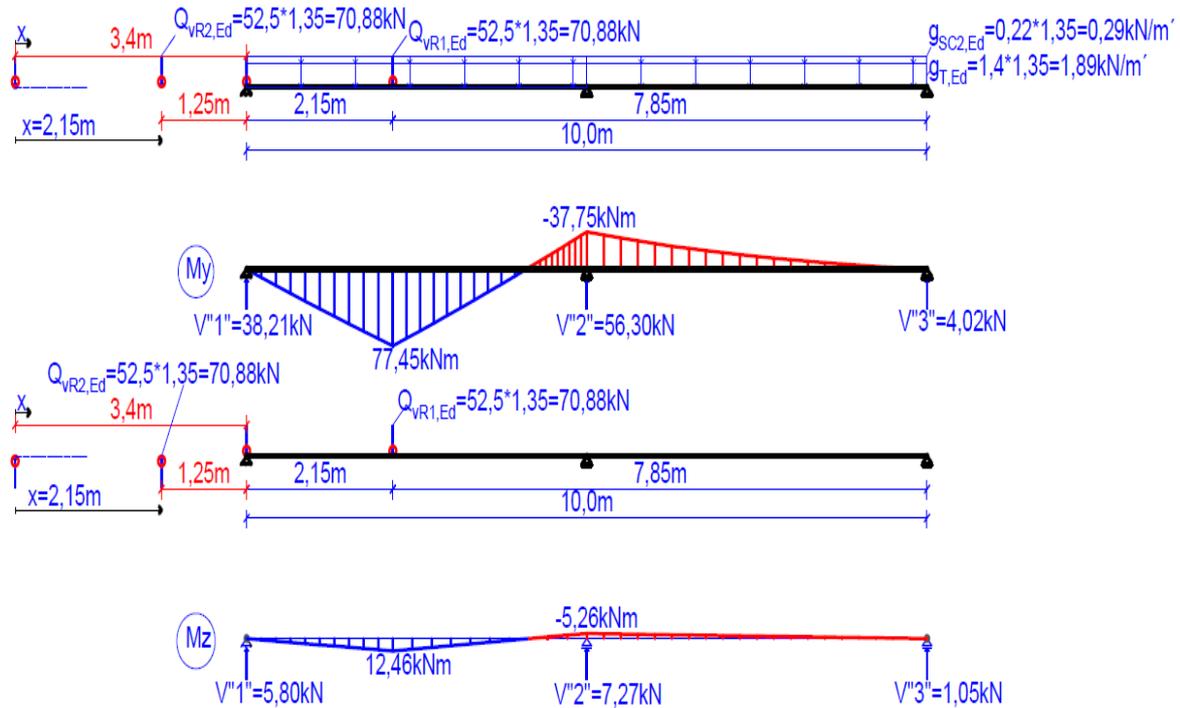


Abbildung 3.4: Charakteristische Schnittgrößen System 4 (SY4)

Der Unterschied im eigengewicht der zwei Schienen ist sehr gering deshalb wurden alle Berechnungen mit der Schiene SC2 durchgeführt.

In der Tabelle 3-1 sind noch mahl die Maßgebenden Biegemomente für alle vier Systeme zusammengefasst, die für die BDK-Nachweise die Folgen angenommen sind.

System (SY)	$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]
SY1	124,53	8,48
SY2	100,00	7,74
SY3	95,80	15,06
SY4	77,45	12,46

Tabelle 3-2: Charakteristische Schnittgrößen für Systeme (SY1-SY4).

4. Knickender Obergurt nach [1],6.3.2.3

4.1 Grundlagen für den BDK-Nachweis Knickender Obergurt

Nach [1] und [5], wird das Verfahren so geführt, dass der herausgeschnittene Druckgurt als Knickstab gegen Biegeknicken nachzuweisen ist.

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1 \quad (1) \quad [5]$$

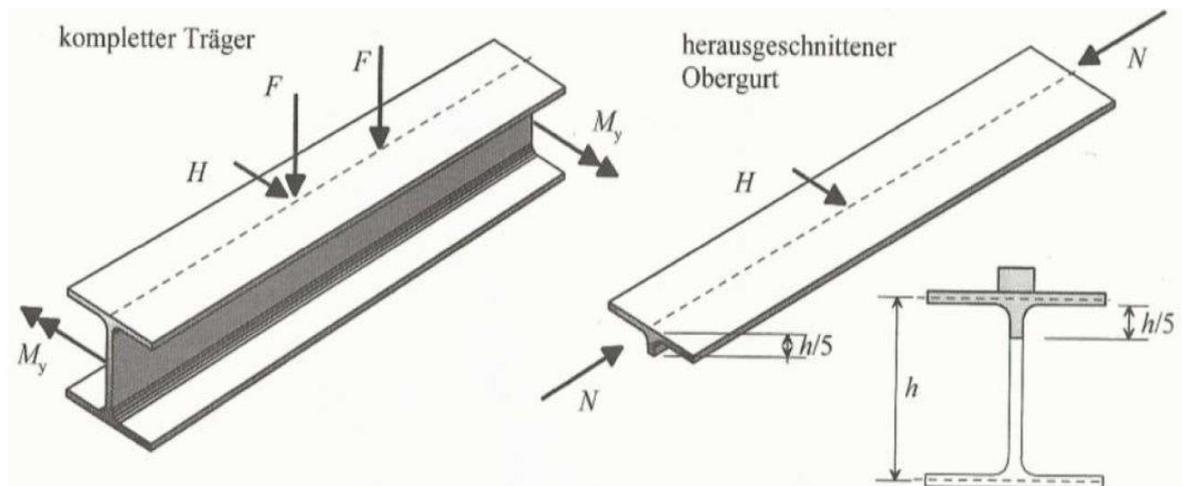


Abbildung 4.1 BDK-Nachweis als Knicknachweis des Druckgurts [5].

Dabei ist

- $N_{Og,Ed}$ Gurtdruckkraft umgerechnet unter Berücksichtigung des Gurtabstandes;
- $M_{z,Ed}$ Nachzuweisende Bemessungsschnittgröße des Kranbahnträgers;
- A_{Og} Querschnittsfläche des Obergurts (Druckflansch + 1/5 Steg);
- $W_{Og,z}$ der plastische Widerstandsmoment des Obergurts (KL 1 und KL 2);
- k_{zz} der Interaktionsbeiwert für die Interaktionsformel nach [2] in 6.3.3(4);

Zur Berechnung der Gurtdruckkraft wird die folgende Formel verwendet:

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h-t_f} \quad (2)$$

Dabei ist

- $M_{y,Ed}$ Nachzuweisende Bemessungsschnittgröße des Kranbahnträgers;
- h Querschnittshöhe;
- t_f Flanschdicke.

Der Abminderungsfaktor χ_z nach (3-1), wird es mit Folgender Gleichung gerechnet:

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} \quad (3);$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] \quad (4).$$

Dabei ist

- $\bar{\lambda}_z$ Bezugsschlankeitsgrad;
- α Imperfektionsbeiwert.

Den Bezugsschlankeitsgrad $\bar{\lambda}_z$ berechnen:

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \cdot \lambda_1} \quad (5)$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (6)$$

Dabei ist

- E Elastizitätsmodul;
- f_y Streckgrenze;
- $i_{z,Og}$ der Trägheitsradius des Obergurts um die Stegachse.

In der Arbeit wird es mit folgendem λ_1 gerechnet:

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{21000}{23,5}} = 93,9$$

Knicklänge des Ersatz-Druckstabes:

$$L_{cr} = \beta \cdot l \quad (7)$$

- l Länge vom Feld des Kranbahnträgers;
- β Knicklängenbeiwert.

Knickender Obergurt nach [1],6.3.2.3

Bei diesem Nachweis werden nur die folgenden Knicklängenbeiwerte benutzt:

$\beta = 1,0$ für den Kranbahnträger SY1 und SY3;

$\beta = 0,85$ für den Kranbahnträger SY2 und SY4.

Der Imperfektionsbeiwert wird aus der Norm [2],Tab.6.2 (siehe Tabelle 4-1) entnommen nach der Zuordnung der Kranbahnträger zu den Knicklinien gemäß [2],Tab.6.1 (siehe Tabelle 4-2), mit einem Ausweichen senkrecht zur z-Achse.

Querschnitt	Begrenzungen	Ausweichen rechtwinklig zur Achse	Knicklinie		
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460	
gewalzte I-Querschnitte 	$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	a b	a ₀ a ₀
		$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	y-y z-z	b c	a a
	$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	a a
		$t_f > 100 \text{ mm}$	y-y z-z	d d	c c
Geschweißte I-Querschnitte 	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c	
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d	
Hohlquerschnitte 	warmgefertigte	jede	a	a ₀	
	kaltgefertigte	jede	c	c	
Geschweißte Kastenquerschnitte 	allgemein (außer den Fällen der nächsten Zeile)	jede	b	b	
	dicke Schweißnähte: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	jede	c	c	
U-, T- und Vollquerschnitte 		jede	c	c	
L-Querschnitte 		jede	b	b	

Tabelle 4-1:Knicklinienauswahl aus [2],Tab.6.2.

Knicklinie	a ₀	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 4-2:Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien aus [2],Tab.6.1.

Knickender Obergurt nach [1],6.3.2.3

Zuletzt wird der Interaktionsbeiwert k_{zz} für die Interaktionformel in 6.3.3(4) nach [2],Anhang B,Tab. B.1 (siehe Tabelle 4-3) berechnet und mit folgenden Gleichungen verglichen:

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right) \quad (8)$$

$$k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right) \quad (9).$$

Bemessungsannahmen			
Interaktionsbeiwerte	Art des Querschnitts	elastische Querschnittswerte der Klasse 3, Klasse 4	plastische Querschnittswerte der Klasse 1, Klasse 2
k_{yy}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{my} \left(1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{my} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
k_{yz}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	k_{zz}	$0,6 k_{zz}$
k_{zy}	I-Querschnitte rechteckige Hohlquerschnitte	$0,8 k_{yy}$	$0,6 k_{yy}$
k_{zz}	I-Querschnitte	$C_{mz} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,6 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$	$C_{mz} \left(1 + (2 \bar{\lambda}_z - 0,6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 1,4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
	rechteckige Hohlquerschnitte		$C_{mz} \left(1 + (\bar{\lambda}_z - 0,2) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$ $\leq C_{mz} \left(1 + 0,8 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$
Für I- und H-Querschnitte und rechteckige Hohlquerschnitte, die auf Druck und einachsige Biegung $M_{y,Ed}$ belastet sind, darf der Beiwert $k_{zy} = 0$ angenommen werden.			

Tabelle 4-3:Bemessungsannahmen aus [2],Tabelle B.1.

Knickender Obergurt nach [1],6.3.2.3

Dabei ist:

- C_{mz} das äquivalente Momentenbeiwert nach [2], Tab. B.3 (siehe Tabelle 4-4).

Für diesen Nachweis wird in der Masterarbeit $C_{mz} = 0,9$ angenommen für Bauteile mit Knicken in Form von seitlichem Ausweichen.

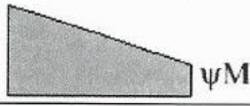
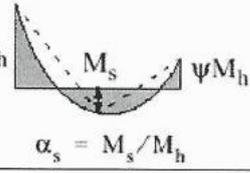
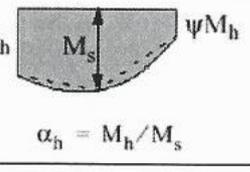
Momentenverlauf	Bereich		C_{my} und C_{mz} und C_{mLT}	
			Gleichlast	Einzellast
 M	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 M_h $\alpha_s = M_s/M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$
 M_h $\alpha_h = M_h/M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$	$\sqrt{AC} 0,90 + 0,10\alpha_h(1 + 2\psi)\sqrt{AC}$
Für Bauteile mit Knicken in Form seitlichen Ausweichens sollte der äquivalente Momentenbeiwert als $C_{my} = 0,9$ bzw. $C_{mz} = 0,9$ angenommen werden.				
C_{my} , C_{mz} und C_{mLT} sind in der Regel unter Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den maßgebenden seitlich gehaltenen Punkten wie folgt zu ermitteln:				
Momentenbeiwert	Biegeachse	In der Ebene gehalten		
C_{my}	$y-y$	$z-z$		
C_{mz}	$z-z$	$y-y$		
C_{mLT}	$y-y$	$y-y$		

Tabelle 4-4: Äquivalente Momentenbeiwerte aus [2], Tabelle B.3.

4.1.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2

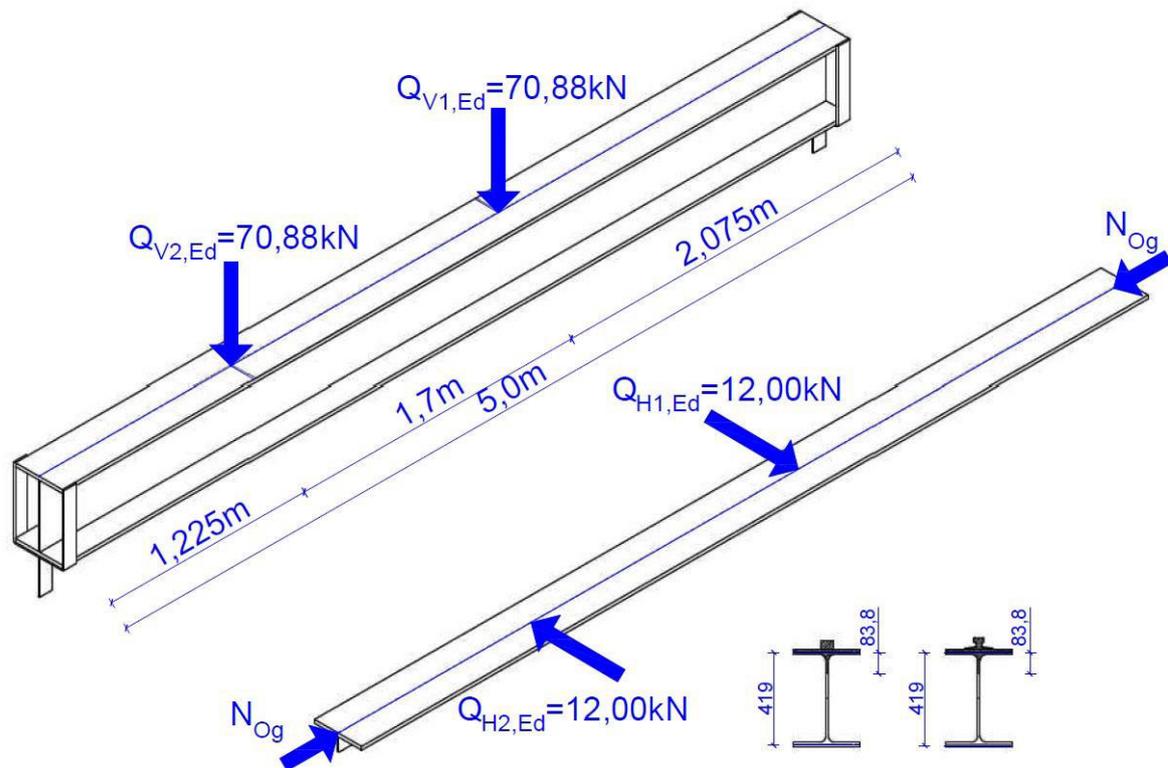


Abbildung 4.2: Knicknachweis des Druckgurts für QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS1) erläutert (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.1) zu sehen.
- Die Berechnung der Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) schauen wie folgt aus:

$$A_{Og} = b_f \cdot t_f + \frac{h - t_f}{5} \cdot t_w = 30 \cdot 2,1 + \frac{44 - 2,1}{5} \cdot 1,15 = 72,64 \text{ cm}^2$$

$$I_{z,Og} = \frac{I_z}{2} = \frac{9465}{2} = 4733 \text{ cm}^4$$

$$i_{z,Og} = \sqrt{\frac{I_{z,Og}}{A_{Og}}} = \sqrt{\frac{4733}{72,64}} = 8,07 \text{ cm}$$

$$W_{Og,el} = \frac{W_{el,z}}{2} = \frac{631}{2} = 316 \text{ cm}^3 \quad W_{Og,pl} = \frac{W_{pl,z}}{2} = \frac{966}{2} = 483 \text{ cm}^3$$

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 124,53 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 8,48 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{124,53}{0,44 - 0,021} = 297,2 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 1,0$
 $L_{cr} = 1,0 \cdot 500 \text{ cm} = 500 \text{ cm}.$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{500}{8,07 \cdot 93,9} = 0,66$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49.$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,66 - 0,2) + 0,66^2 \right] =$$

$$\phi = 0,83$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,66^2}}$$

$$\chi_z = 0,75$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,66 - 0,6) \cdot \frac{297,2 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} = 1,07$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{297,2 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,22$$

$$1,07 \leq 1,22$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 1,07$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$

$$\frac{297,2 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} + \frac{1,07 \cdot 8,48 \cdot 1,1}{483 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,25 ≤ 1 Auslastung:25,0%.

4.1.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2

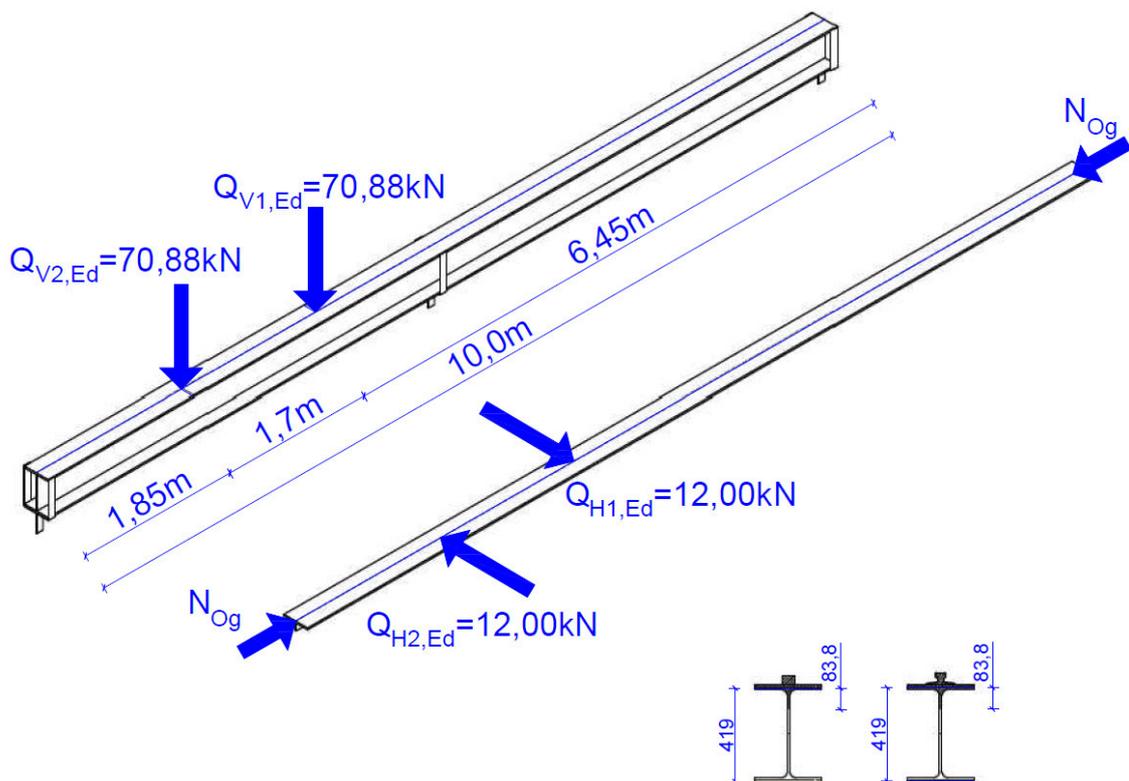


Abbildung 4.3: Knicknachweis des Druckgurts für QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2

- Die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS1) gleich wie bei (Abschnitt 2.1).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.
- Die Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) gleich wie bei Abschnitt 4.1.1.
- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 100,0 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 7,74 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{100,0}{0,44 - 0,021} = 238,7 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500\text{cm} = 425\text{cm}.$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{8,07 \cdot 93,9} = 0,56$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,56 - 0,2) + 0,56^2] =$$

$$\phi = 0,75$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,56^2}}$$

$$\chi_z = 0,8$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,56 - 0,6) \cdot \frac{238,7 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} = 0,99$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{238,7 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,14$$

$$0,99 \leq 1,09$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 0,99$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$

$$\frac{238,7 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} + \frac{0,99 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{483 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,193 ≤ 1 Auslastung:19,3%.

4.1.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2

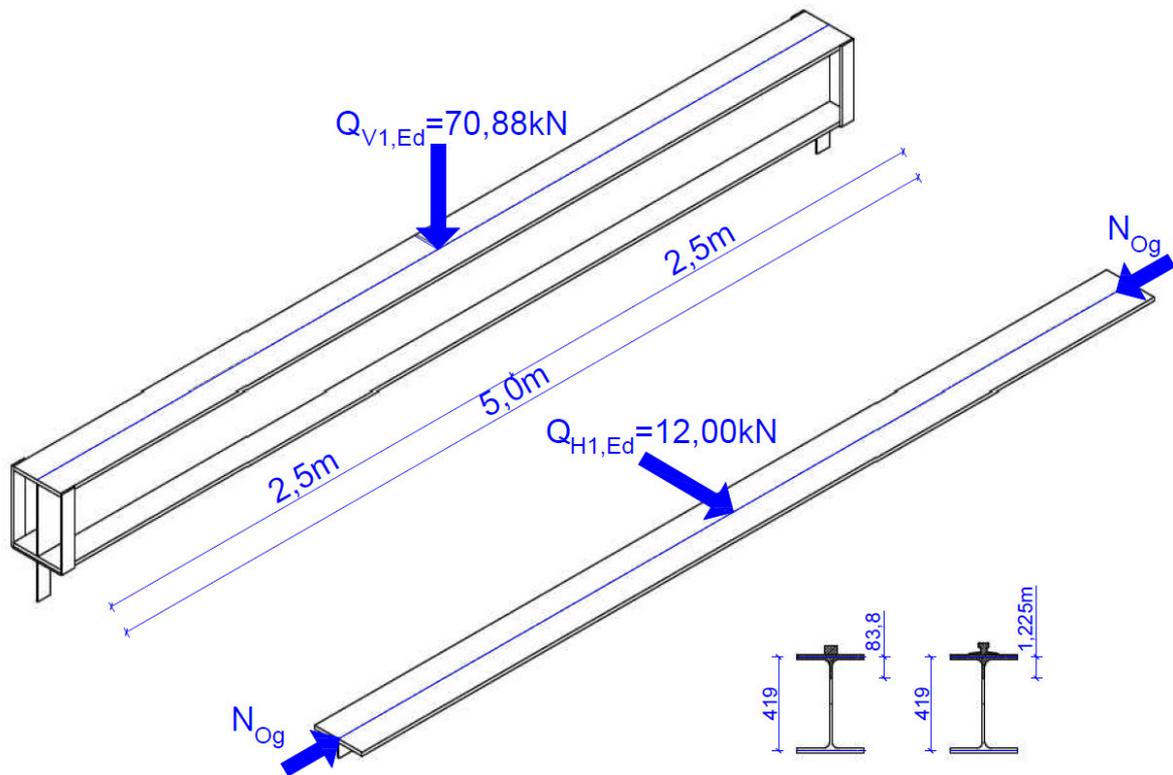


Abbildung 4.4: Knicknachweis des Druckgurts für QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS1) erläutert (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.3) zu sehen.
- Die Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) gleich wie bei Abschnitt 4.1.1.
- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 95,8 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 15,02 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{95,8 \text{ kNm}}{0,44 - 0,021 \text{ cm}} = 228,64 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge des Ersatz-Druckstabes wie bei Abschnitt 4.1.1:

$$L_{cr} = 1,00 \cdot 500\text{cm} = 500\text{cm}$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{500}{8,07 \cdot 93,9} = 0,66$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,66 - 0,2) + 0,66^2] =$$

$$\phi = 0,83$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,83 + \sqrt{0,83^2 - 0,66^2}}$$

$$\chi_z = 0,75$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,66 - 0,6) \cdot \frac{228,64 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right) =$$

$$k_{zz} = 1,03$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{228,64 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,15$$

$$1,03 \leq 1,09$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 1,03$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$
$$\frac{228,64 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 72,64 \cdot 23,5} + \frac{1,03 \cdot 15,02 \cdot 1,1}{483 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,198 ≤ 1 Auslastung:19,8%.

4.1.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2

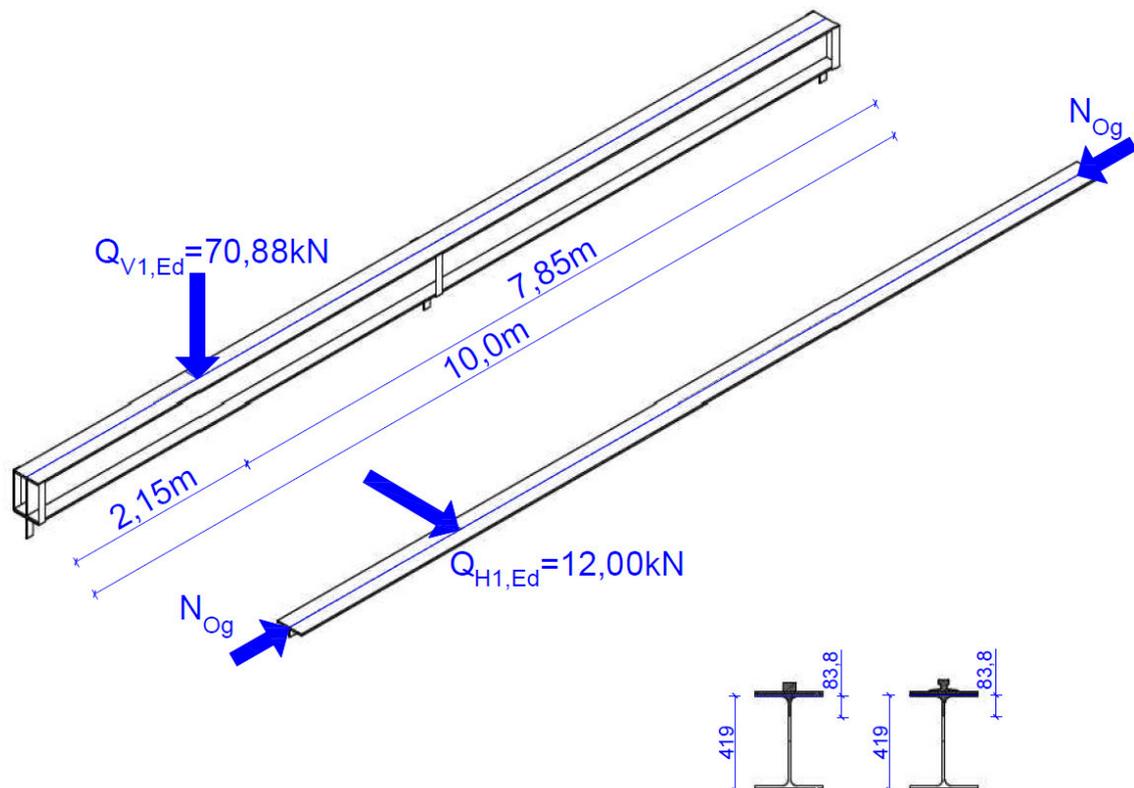


Abbildung 4.5: Knicknachweis des Druckgurts für QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS1) erläutert (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.4) zu sehen.
- Die Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) gleich wie bei
- Abschnitt 4.1.1.

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 77,45 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 12,46 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{77,45 \text{ kNm}}{0,44 - 0,021 \text{ cm}} = 184,84 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500 \text{ cm} = 425 \text{ cm}.$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{8,07 \cdot 93,9} = 0,56$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,56 - 0,2) + 0,56^2] =$$

$$\phi = 0,75$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,56^2}}$$

$$\chi_z = 0,8$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,56 - 0,6) \cdot \frac{184,84 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

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

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{184,84 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,08$$

$$0,97 \leq 1,08$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 0,97$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$
$$\frac{184,84 \cdot 1,1}{0,8 \cdot 72,64 \cdot 23,5} + \frac{0,97 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{483 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,15 ≤ 1 Auslastung:15,0%.

4.1.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2

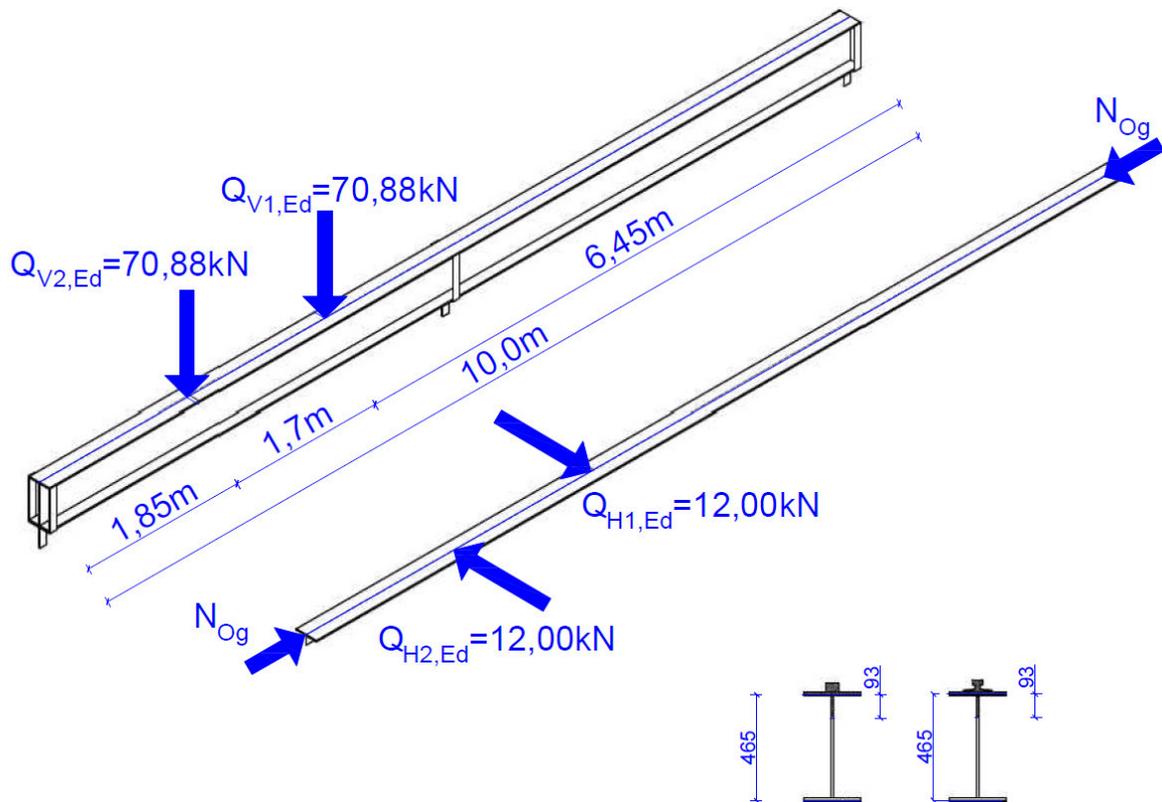


Abbildung 4.6: Knicknachweis des Druckgurts für QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 2 (QS2) erläutert (siehe Abschnitt 2.2).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.
- Die Berechnung der Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) schauen demnächst so aus:

$$A_{Og} = b_f \cdot t_f + \frac{h - t_f}{5} \cdot t_w = 25 \cdot 1,5 + \frac{48 - 1,5}{5} \cdot 1,0 = 46,8 \text{ cm}^2$$

$$I_{z,Og} = \frac{I_z}{2} = \frac{3910}{2} = 1955 \text{ cm}^4$$

$$i_{z,Og} = \sqrt{\frac{I_{z,Og}}{A_{Og}}} = \sqrt{\frac{1955}{46,8}} = 6,5 \text{ cm}$$

$$W_{Og,el} = \frac{W_{el,z}}{2} = \frac{312,8}{2} = 156,4 \text{ cm}^3 \quad W_{Og,pl} = \frac{W_{pl,z}}{2} = \frac{480}{2} = 240 \text{ cm}^3$$

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 100,0 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 7,74 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{100,0}{0,48 - 0,015} = 215,1 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500 \text{ cm} = 425 \text{ cm.}$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{6,5 \cdot 93,9} = 0,69$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,69 - 0,2) + 0,69^2] =$$

$$\phi = 0,86$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,86 + \sqrt{0,86^2 - 0,69^2}}$$

$$\chi_z = 0,73$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,69 - 0,6) \cdot \frac{215,1 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} = 1,11$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{215,1 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,27$$

$$1,11 \leq 1,27$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 1,11$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$

$$\frac{215,1 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} + \frac{1,11 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{240 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,296 ≤ 1 Auslastung: 29,6%.

4.1.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2

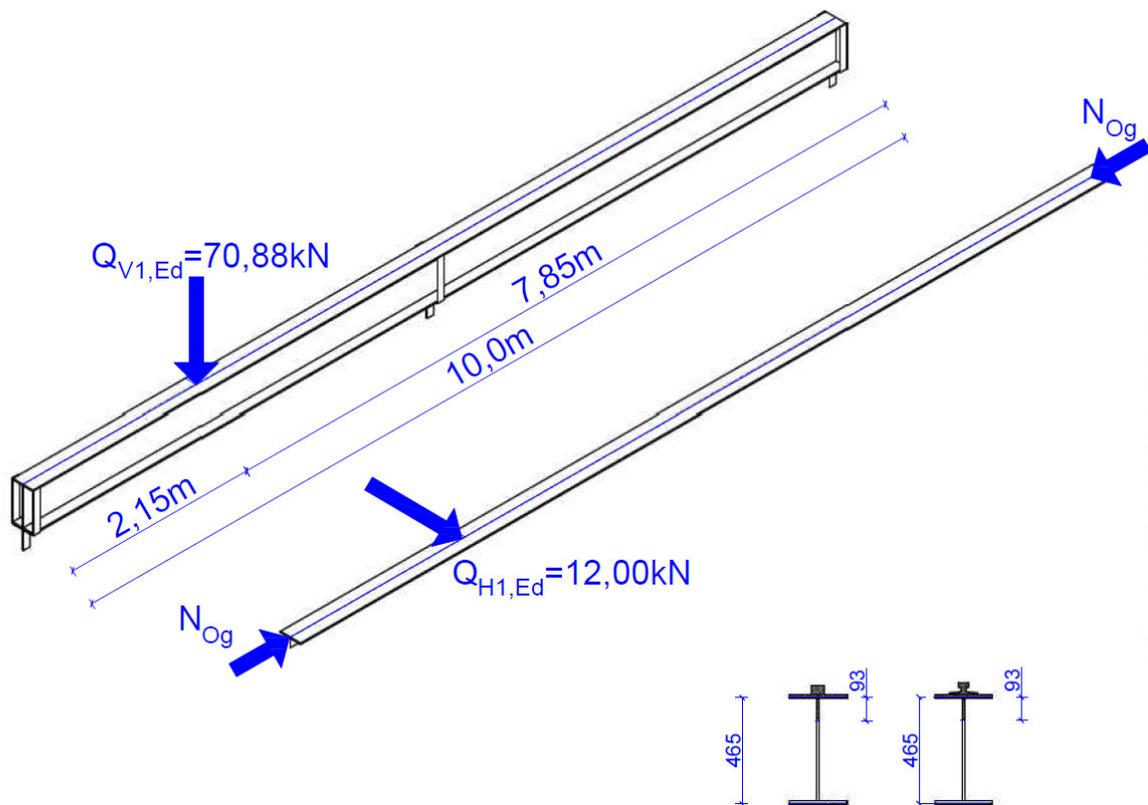


Abbildung 4.7: Knicknachweis des Druckgurts für QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 2 (QS2) erläutert (siehe Abschnitt 2.2).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.4) zu sehen.
- Die Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) gleich wie bei Abschnitt 4.1.5.
- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 77,45 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 12,46 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{77,45 \text{ kNm}}{0,48 - 0,015} = 166,6 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500\text{cm} = 425\text{cm}.$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{6,5 \cdot 93,9} = 0,69$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,69 - 0,2) + 0,69^2 \right] =$$

$$\phi = 0,86$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,86 + \sqrt{0,86^2 - 0,69^2}}$$

$$\chi_z = 0,73$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,69 - 0,6) \cdot \frac{166,6 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} = 1,06$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{166,6 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,19$$

$$1,06 \leq 1,19$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 1,06$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$
$$\frac{166,6 \cdot 1,1}{0,73 \cdot 46,8 \cdot 23,5} + \frac{1,06 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{240 \cdot 23,5} \leq 1$$

0,231 \leq 1 Auslastung:23,1%.

4.1.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2

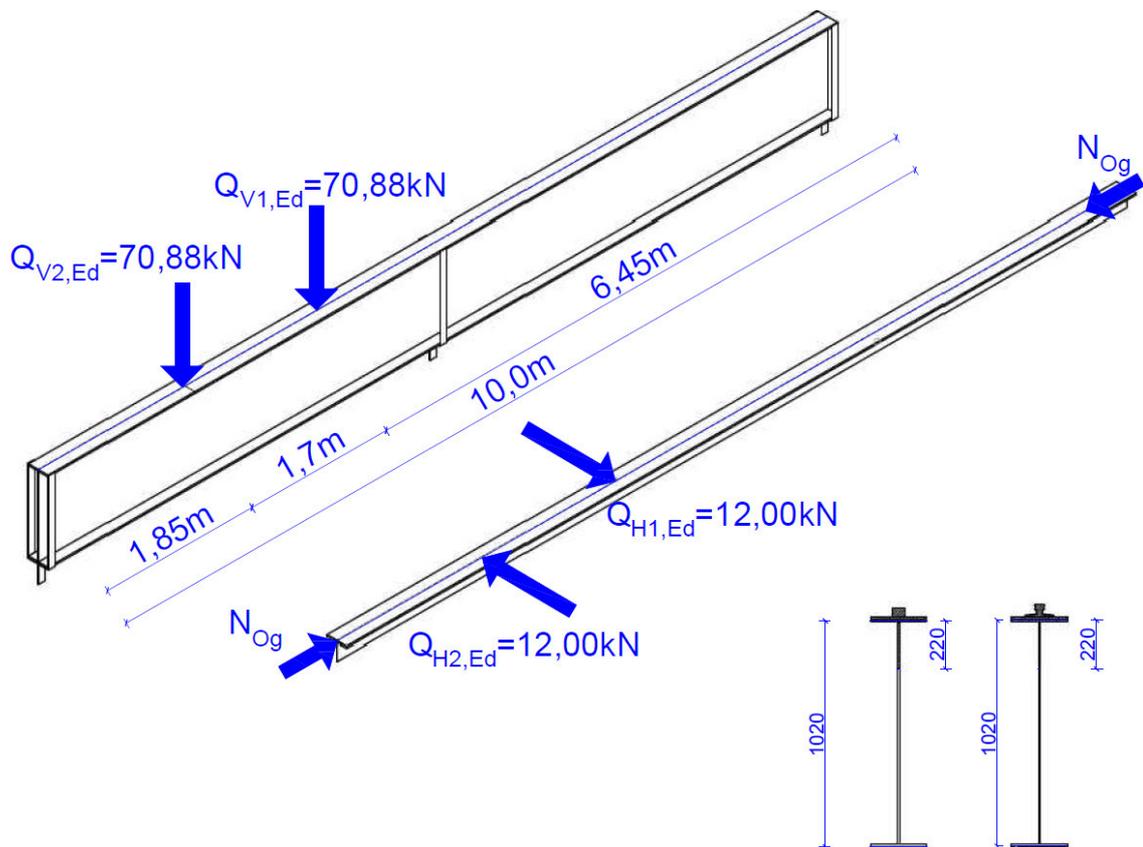
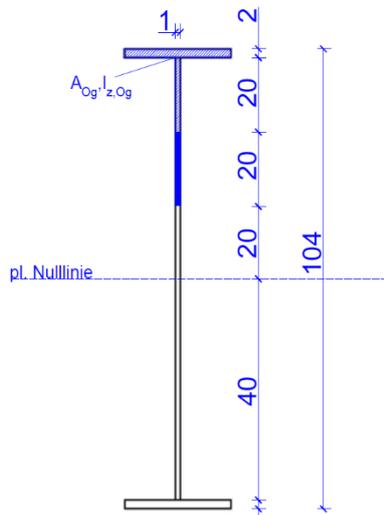


Abbildung 4.8: Knicknachweis des Druckgurts für QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für
- Querschnitt 1 (QS3) erläutert (siehe Abschnitt 2.3).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach Händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.

- Die Berechnung der Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) schauen demnächst so aus:



$$A_{Og} = b_f \cdot t_f + 20 \cdot \varepsilon \cdot t_w$$

$$= 25 \cdot 2,0 + 20 \cdot 1,0 \cdot 1,0 = 70,0 \text{ cm}^2$$

$$I_{z,Og} = \frac{5217}{2} = 2609 \text{ cm}^4$$

$$i_{z,Og} = \sqrt{\frac{I_{z,Og}}{A_{Og}}} = \sqrt{\frac{2609}{70,0}} = 6,1 \text{ cm}$$

$$W_{z,Og,pl} = \frac{W_{pl,z}}{2} = \frac{645}{2} = 323 \text{ cm}^3$$

Abbildung 4.9: Querschnittsfläche des Obergurts für QS3.

- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 100,0 \text{ kNm} \quad \text{Max } M_{z,Ed} = 7,74 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{100,0}{1,04 - 0,02} = 98,04 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500 \text{ cm} = 425 \text{ cm}.$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,Og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{6,1 \cdot 93,9} = 0,74$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,74 - 0,2) + 0,74^2] =$$

$$\phi = 0,91$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,91 + \sqrt{0,91^2 - 0,74^2}}$$

$$\chi_z = 0,69$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,69 - 0,6) \cdot \frac{98,04 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} \right)$$

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

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{98,04 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 1,02$$

$$0,97 \leq 1,02$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 0,94$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$
$$\frac{98,04 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} + \frac{0,97 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{323 \cdot 23,5} \leq 1$$

$$0,096 \leq 1 \text{ Auslastung: } 9,6\%$$

4.1.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2

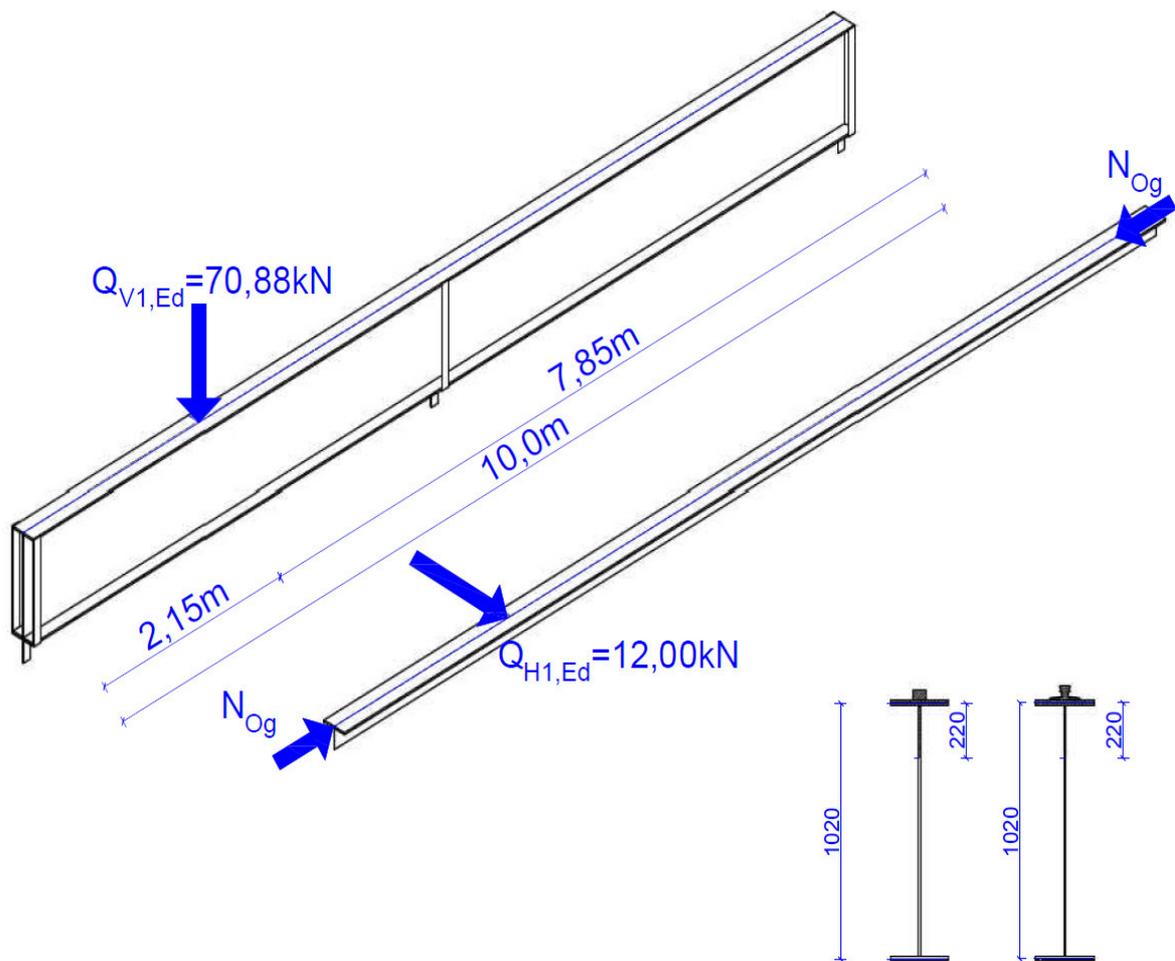


Abbildung 4.10: Knicknachweis des Druckgurts für QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für
- Querschnitt 1 (QS3) erläutert (siehe Abschnitt 2.3).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.4) zu sehen.
- Die Berechnung der Querschnittswerte des Obergurts (Oberflansch + 1/5 Steg) gleich wie bei Abschnitt 4.1.7.
- Schnittgrößen des Ersatz-Druckstabes $M_{z,Ed}$ und $N_{Og,Ed}$:

$$\text{Max } M_{y,Ed} = 77,45 \text{ kNm} \qquad \text{Max } M_{z,Ed} = 12,46 \text{ kNm}$$

$$N_{Og,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{h - t_f} = \frac{77,45}{1,04 - 0,02} = 75,93 \text{ kN}$$

- Die Knicklänge: $L_{cr} = \beta \cdot l$ mit $\beta = 0,85$

$$L_{cr} = 0,85 \cdot 500\text{cm} = 425\text{cm}.$$

- Berechnung der Schlankheit $\bar{\lambda}_z$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{L_{cr}}{i_{z,og} \cdot \lambda_1} = \frac{425}{6,1 \cdot 93,9} = 0,74$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha = 0,49$.

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] =$$

$$\phi = 0,5 \cdot \left[1 + 0,49 \cdot (0,74 - 0,2) + 0,74^2 \right] =$$

$$\phi = 0,91$$

- Der Abminderungsfaktor χ_z

$$\chi_z = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,91 + \sqrt{0,91^2 - 0,74^2}}$$

$$\chi_z = 0,69$$

- Interaktionsbeiwert k_{zz}

$$k_{zz} = C_{mz} \cdot \left(1 + (2 \cdot \bar{\lambda}_z - 0,6) \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right); C_{mz} = 0,9$$

$$k_{zz} = 0,9 \cdot \left(1 + (2 \cdot 0,69 - 0,6) \cdot \frac{75,93 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} = 0,95$$

Wobei $k_{zz} \leq C_{mz} \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} \right)$ erfüllt sein muss.

$$k_{zz} \leq 0,9 \cdot \left(1 + 1,4 \cdot \frac{75,93 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} \right)$$

$$k_{zz} \leq 0,99$$

$$0,95 \leq 0,99$$

- Weil die Bedingung erfüllt ist folgt der Nachweis: (mit $k_{zz} = 0,97$).

$$\frac{N_{Og,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_z \cdot A_{Og} \cdot f_y} + \frac{k_{zz} \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{W_{Og,z} \cdot f_y} \leq 1$$

$$\frac{75,93 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 70,0 \cdot 23,5} + \frac{0,95 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{323 \cdot 23,5} \leq 1$$

$$0,075 \leq 1 \quad \text{Auslastung: 7,5\%}$$

4.2 Ergebnisvergleich für „Knickender Obergurt“ nach [1]

Aus den durchgeführten Berechnungen sehen wir, dass die Kranschiene keinen Einfluss auf die Ergebnisse dieses Nachweises hat, sodass dieser Nachweis allein von der Geometrie des Querschnitts abhängig ist. Die Querschnittsfläche des Obergurts (Druckflansch + 1/5 Steg) A_{Og} und das Widerstandsmoment des Obergurts $W_{Og,z}$ zusammen mit der Gurtdruckkraft $N_{Og,Ed}$ ergeben den Unterschied bei diesem Nachweis. Querschnitte mit kleineren Flächen A_{Og} und Widerstandsmoment $W_{Og,z}$ haben eine größere Ausnutzung.

Der Kranbahnträger mit QS3 zeigt ein anderes Verhalten, weil von allen Querschnitten bei ihm die Gurtdruckkraft und der Abminderungsfaktor χ_z die kleinsten sind (siehe Tabelle 4-5). Es folgt draus auch die kleinste Auslastung von allen.

Die Kranbahnträger mit QS2 haben die kleinsten Werte für A_{Og} und $W_{Og,z}$ und damit treten das Biegedrillknicken zuerst auf bei diesen Trägern (siehe Tabelle 4-5).

BDK-Nachweis "Knickender OG"			$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]	A_{Og} [cm ²]	$W_{Og,z}$ [cm ³]	$N_{Og,Ed}$ [kN]	λ_z	χ_z	k_{zz}	Auslastung [%]
QS1	SY1	SC1/SC2	124.53	8.48	72.64	483	297.20	0.66	0.75	1.07	25.0
QS1	SY3	SC1/SC2	95.8	15.02	72.64	483	288.64	0.66	0.75	1.03	19.8
QS1	SY2	SC1/SC2	100	7.74	72.64	483	238.70	0.56	0.80	0.99	19.3
QS1	SY4	SC1/SC2	77.45	12.46	72.64	483	184.84	0.56	0.80	0.97	15.0
QS2	SY2	SC1/SC2	100	7.74	46.8	240	215.10	0.69	0.73	1.11	29.6
QS2	SY4	SC1/SC2	77.45	12.46	46.8	240	166.60	0.69	0.73	1.06	23.1
QS3	SY2	SC1/SC2	100	7.74	70	323	98.04	0.74	0.69	0.97	9.6
QS3	SY4	SC1/SC2	77.45	12.46	70	323	75.93	0.74	0.69	0.95	7.5

Tabelle 4-5: Vergleich von allen Nachweisen „Knickender Obergurt“

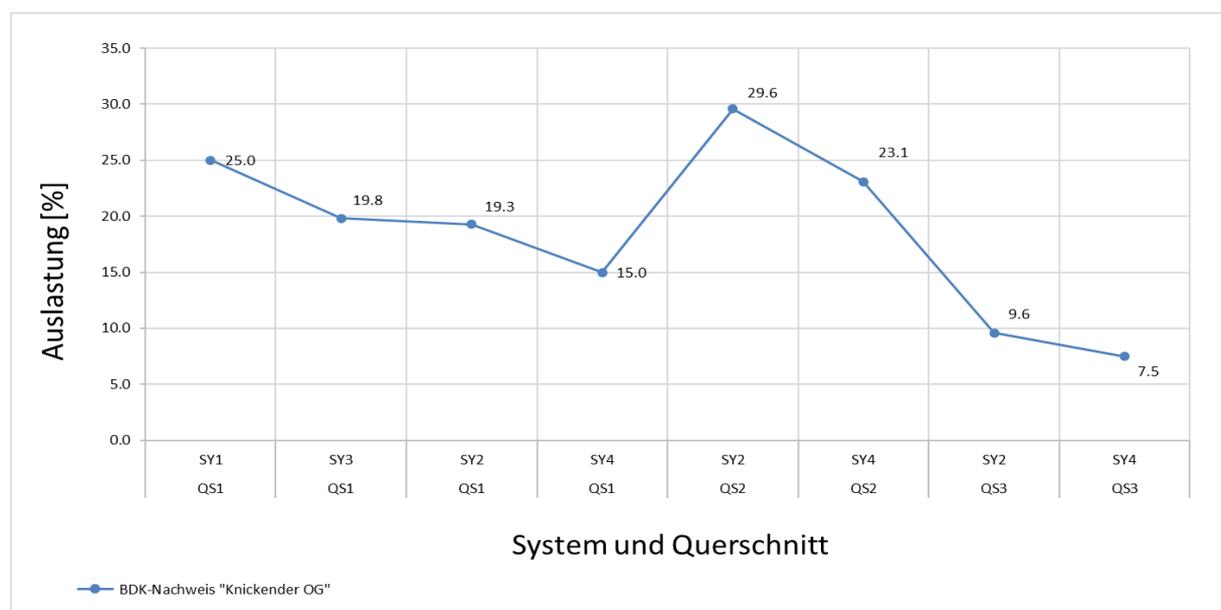


Abbildung 4.11: Auslastung für BDK-Nachweis „Knickender Obergurt“.

5. BDK-Nachweis nach [1], Anhang A

5.1 Grundlagen für den Vereinfachten BDK-Nachweis nach [1], Anhang A aus [5]

„Aus der Methode des Tragwirkungssplittings nach [5] (Abschnitt 5.1) folgt, dass auf die separate Berücksichtigung des Torsionsmoments verzichtet werden kann, wenn die Horizontallast mit dem Moment $M_{z,Ed}$ alleine dem Obergurt zugewiesen wird .D.h.: dem halben Querschnitt wird $M_{z,Ed}$ zugewiesen. Die Spannungen bleiben gleich, wenn stattdessen $(2 \cdot M_{z,Ed})$ dem Träger zugewiesen wird.“ ([5],S.186)

Die in dieser Arbeit verwendete Gleichung wird somit vereinfacht zu:

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1 \quad (10) \quad [5]$$

Dabei ist

- C_{mz} der äquivalente Momentenbeiwert für Biegung um die Achse z-z, nach [2],Tab.B.3;
- $M_{y,Ed}$ und $M_{z,Ed}$ der Bemessungswert der Maximalmomente bezüglich der Achsen y-y und z-z;
- $M_{y,Rk}$ und $M_{z,Rk}$ der charakteristische Wert der Momentenbeanspruchbarkeit des Querschnitts bezüglich der Achsen y-y und z-z, nach [2],Tab. 6.7;
- $M_{y,cr}$ das ideale Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken um die Achse y-y
- χ_{LT} der Abminderungsfaktor für Biegedrillknicken nach [2],6.3.2.

Der Abminderungsfaktor χ_{LT} für Biegedrillknicken wird mit folgender Gleichung berechnet:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad (11)$$

Dazu wird die Bezogene Schlankheit $\overline{\lambda}_{Lt}$ berechnet mit folgender Gleichung:

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} \quad (12)$$

Dabei ist:

- W_y ist das zur Querschnittsklasse gehörige Widerstandsmoment um die Achse y-y;
- f_y Streckgrenze;
- $M_{y,cr}$ das ideale Verzweigungsmoment bei Biegedrillknicken um die Achse y-y wird im nächsten Abschnitt erläutert.

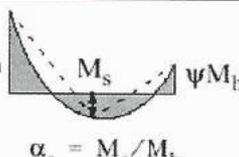
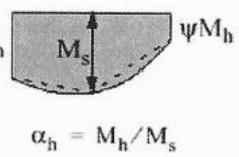
Momentenverlauf	Bereich		C_{my} und C_{mz} und C_{mLT}	
			Gleichlast	Einzellast
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0,6 + 0,4\psi \geq 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \geq 0,4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$-0,8\alpha_s \geq 0,4$
$-1 \leq \psi < 0$		$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \geq 0,4$	
 $\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$0 \leq \psi \leq 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$-1 \leq \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1 + 2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1 + 2\psi)$ <small>AC</small>
Für Bauteile mit Knicken in Form seitlichen Ausweichens sollte der äquivalente Momentenbeiwert als $C_{my} = 0,9$ bzw. $C_{mz} = 0,9$ angenommen werden.				
C_{my} , C_{mz} und C_{mLT} sind in der Regel unter Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den maßgebenden seitlich gehaltenen Punkten wie folgt zu ermitteln:				
Momentenbeiwert	Biegeachse	In der Ebene gehalten		
C_{my}	y-y	z-z		
C_{mz}	z-z	y-y		
C_{mLT}	y-y	y-y		

Tabelle 5-1: Äquivalente Momentenbeiwerte C_m zu Tabelle B.1 und Tabelle B.2. aus [2], Tab B.3.

- Es folgt die Zuordnung des Querschnitts zu den Knicklinien für BDK gemäß [2], Tab.6.5 dabei ist $h/b \leq 2$ für ein geschweißtes I-Profil wegen der angeschweißten Schiene anzunehmen.

Querschnitt	Grenzen	Knicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	a
	$h/b > 2$	b
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d
andere Querschnitte	—	d

Tabelle 5-2: Empfohlene Knicklinien für Biegedrillknicken aus [2], Tab.6.4

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 5-3: Empfohlene Imperfektionsbeiwert der Knicklinien für Biegedrillknicken aus [2], Tab.6.3

- In der Masterarbeit sind die Kranbahnen mit Querschnitt QS1 und QS2 der Knicklinie c zugeordnet mit einem Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$, und die Kranbahnen mit Querschnitt QS3 der Knicklinie d mit einem Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,76$. Die nachfolgende Berechnung wird mit diesen Werten durchgeführt.
- Der Hilfswert ϕ_{LT} wird so berechnet:

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2) \quad (13)$$

- Dabei sind Hilfswerte $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$ und $\beta = 0,75$.

5.2 Methoden für die Berechnung von $M_{y.cr}$

Für die folgenden BDK-Nachweise nach EC3-6, Anhang A wird das ideale Biegedrillknickmoment $M_{y.cr}$ benötigt. Zur Ermittlung wurden die folgenden vier Methoden verwendet und verglichen.

1. Kritisches BDK-Moment nach DIN 18 800-2, GL.20 [5].

“Für doppeltsymmetrische I-Profile bis 60cm Höhe durfte nach der mittlerweile zurückgezogenen DIN 18 800-2, Gl.20 der Wert $M_{y.cr}$ folgendermaßen abgeschätzt werden“ ([5],S.186).

Mit dieser Methode kann das ideale Biegedrillknickmoment $M_{y.cr}$ für den Querschnitt QS3 nicht berechnet werden.

$$M_{y.cr} = 1,32 \cdot b_f \cdot t_f \cdot \frac{E \cdot I_y}{l \cdot h^2} \quad (14)$$

Dar nur wenige Eingangsgrößen wie E – Modul, Flächenträgheitsmoment I_y und die Spannweite l des Kranbahnträgers in diese Gleichung eingehen, liefert diese Methode das schlechteste Ergebnis.

2. Kritisches BDK-Moment nach DIN 18 800 Teil 2 [6] mit passenden Beiwerten C_1 ; C_2 .

$$M_{y.cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_Z}{L^2} \cdot \left(\sqrt{\frac{I_\omega}{I_Z} + \frac{L^2 \cdot GI_T}{\pi^2 \cdot EI_Z} + (C_2 \cdot z_p)^2} + C_2 \cdot z_p \right) \quad (15)$$

Diese Gleichung wird häufig in der Praxis benutzt, wenn es die Möglichkeit einer numerischen Berechnung nicht gibt. Die Torsion wird berücksichtigt, was durch das Einbeziehen der Querschnittswerte Torsionsträgheitsmoment I_T , Wölbwiderstand I_ω und das Schubmodul G erkennbar ist.

3. Kritisches BDk-Moment Numerisch ermittelt mit LTBeam [7]

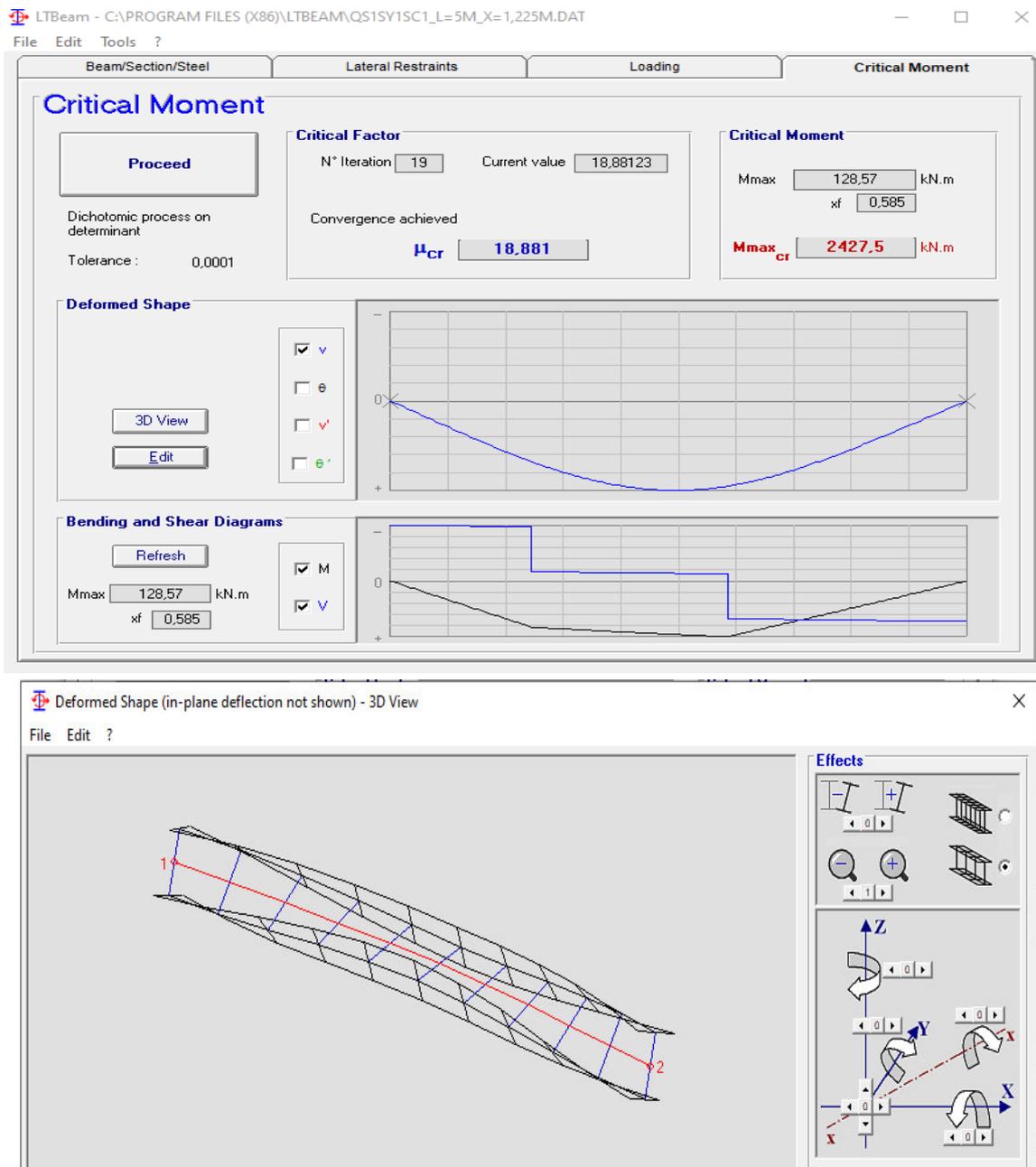


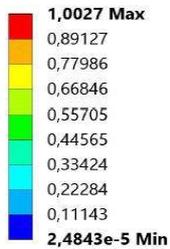
Abbildung 5.1: Mit LTBeam [7] berechnetes $M_{y,cr}$.

Dies stellt eine einfache und schnelle Methode zur Ermittlung von $M_{y,cr}$ da. Das Programm immer mit exakt 200 Finiten Elementen.

4. Kritisches BDK-Moment numerisch ermittelt [3]

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 10,595
 Einheit: mm
 20.02.2021 12:55



Lastmultiplikator=10,595
 $M_{Cr,y} = 1405,09 \text{ kNm}$

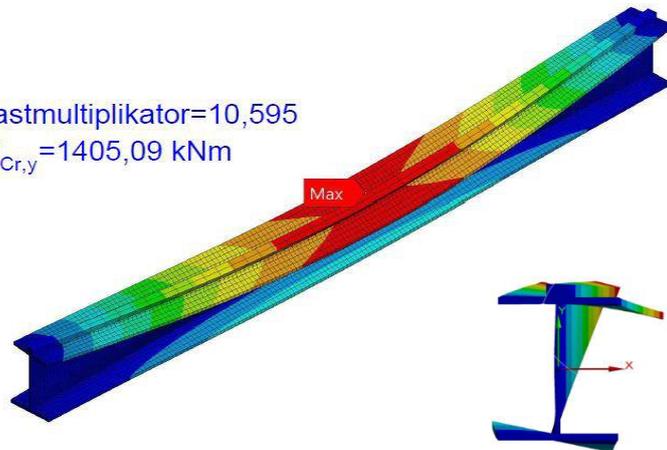


Abbildung 5.2: Mit Ansys 19. [3] berechneter Lastmultiplikator für QS1SY1SC1.

Bei dieser Methode wird der Lastmultiplikator mit Ansys 19. [3] ausgerechnet. Der Lastmultiplikator wird mit der Anfangslast multipliziert, und mit Hilfe des Programms Ruck-Zuck [4] werden die maximalen Momente zum $M_{y.cr}$. Das so ermittelte ideale Biegedrillknickmoment $M_{y.cr}$ wurde für die weiteren Biegedrillknicknachweise nach E-C 3, Anhang A verwendet. Diese Methode berücksichtigt sowohl die herkömmliche Torsion als auch Wölbkrafttorsion und liefert somit die exaktesten Ergebnisse.

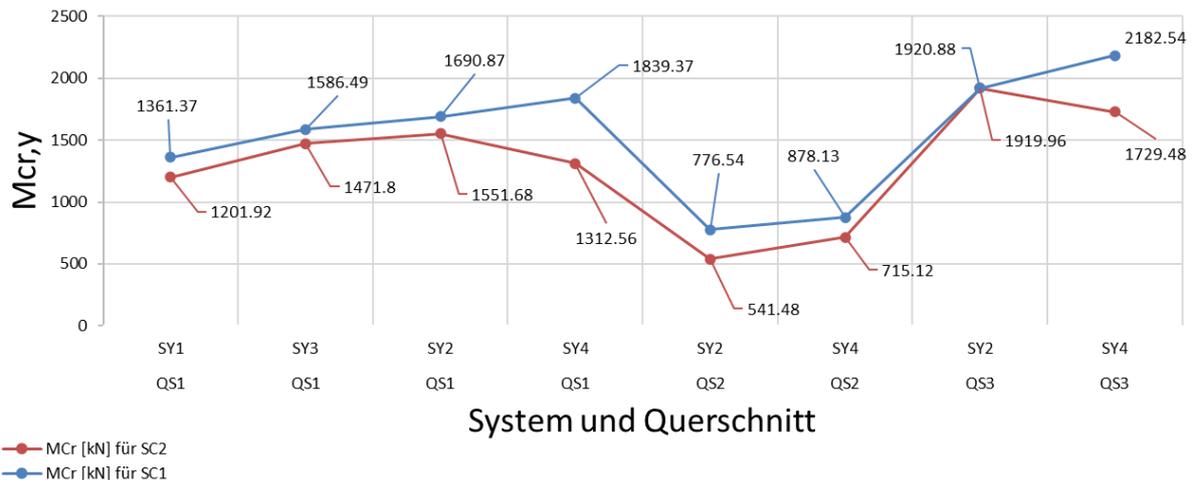


Abbildung 5.3: $M_{y.cr}$ berechnet mit Ansys 19.(ansys) [3].

Von den vier untersuchten Möglichkeiten (siehe Tabelle 5-4 und Abbildung 5.4 und 5.5) zum Ermitteln von $M_{y.cr}$ zeigt somit die numerische Methode jene Ergebnisse, die am ehesten der Realität entsprechen. Grund dafür ist die unbeschränkte Anzahl an Finiten Elementen, die bei der Berechnung selbst gewählt werden können und die Berücksichtigung der horizontalen Lasten, was bei den drei vorangegangenen Methoden nicht möglich war.

Kranbahnträger			My,cr [kNm] DIN 18 800-2, GL.20	My,cr [kNm] DIN EN 1993-1-1 Abs. 6.3.2.3	My,cr [kNm] LTBeam	My,cr [kNm] ANSYS 19.
QS1	SY1	SC1	1149.60	1458.43	2427.50	1361.37
QS1	SY3	SC1	1149.60	1651.56	2778.40	1586.49
QS1	SY2	SC1	1149.60	1521.64	3431.80	1690.87
QS1	SY4	SC1	1149.60	1793.59	3777.60	1839.37
QS2	SY2	SC1	434.48	627.47	1465.20	776.54
QS2	SY4	SC1	434.48	735.47	1616.50	878.13
QS3	SY2	SC1	880.26	1640.79	4000.80	1920.88
QS3	SY4	SC1	880.26	1910.78	4396.30	2182.54
QS1	SY1	SC2	1149.60	1458.43	2427.20	1201.92
QS1	SY3	SC2	1149.60	1651.56	2777.60	1471.80
QS1	SY2	SC2	1149.60	1521.64	3429.50	1551.68
QS1	SY4	SC2	1149.60	1793.59	3776.30	1793.59
QS2	SY2	SC2	434.48	627.47	1465.10	541.48
QS2	SY4	SC2	434.48	735.47	1616.10	715.12
QS3	SY2	SC2	880.26	1640.79	4000.60	1919.96
QS3	SY4	SC2	880.26	1910.78	4395.60	1729.48

Tabelle 5-4: $M_{y,cr}$ ausgerechnet mit allen vier Methoden.

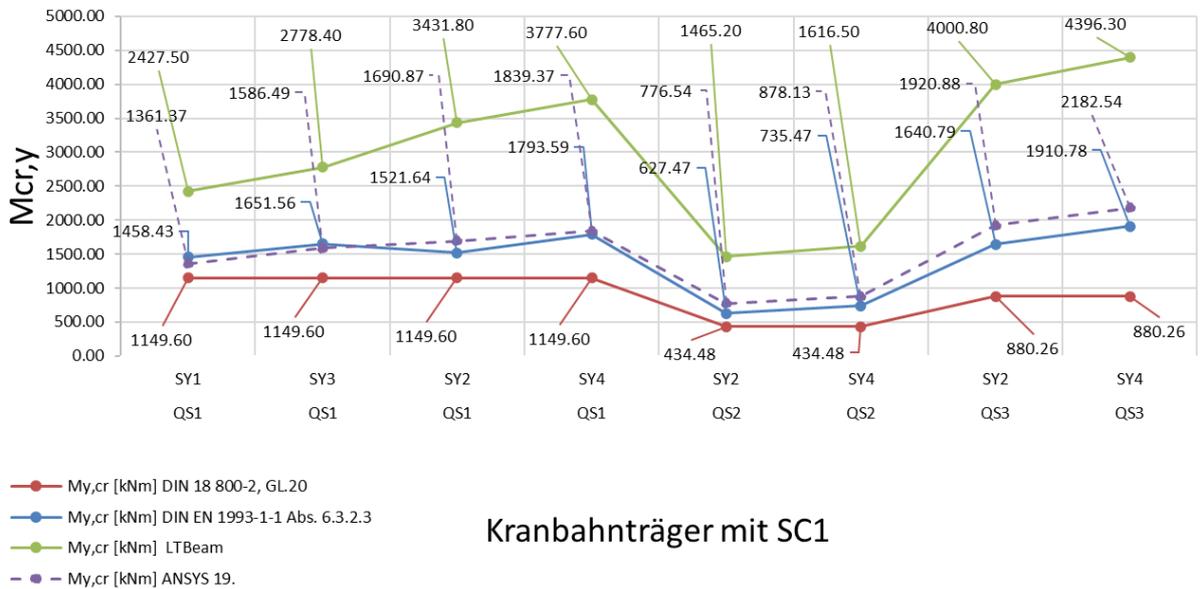


Abbildung 5.4: $M_{y,cr}$ ausgerechnet mit allen vier Methoden für Kranbahnträger mit SC1.

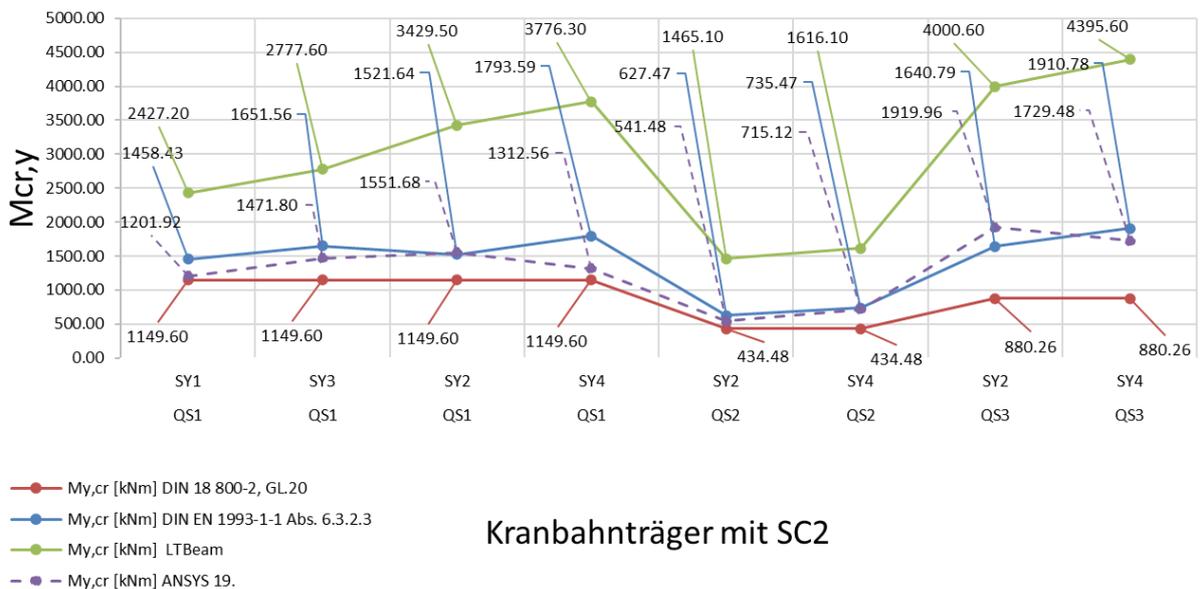


Abbildung 5.5: $M_{y,cr}$ ausgerechnet mit allen vier Methoden für Kranbahnträger mit SC2.

5.2.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS1) erläutert (siehe Abschnitt 2.1).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach Händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.1) zu sehen.
- Vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1

$$M_{y,Rk} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3216 \cdot 23,5}{1,0} = 755,76 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{965,50 \cdot 23,5}{1,0} = 226,9 \text{ kNm}$$

- Nachweis für QS1SY1SC1:

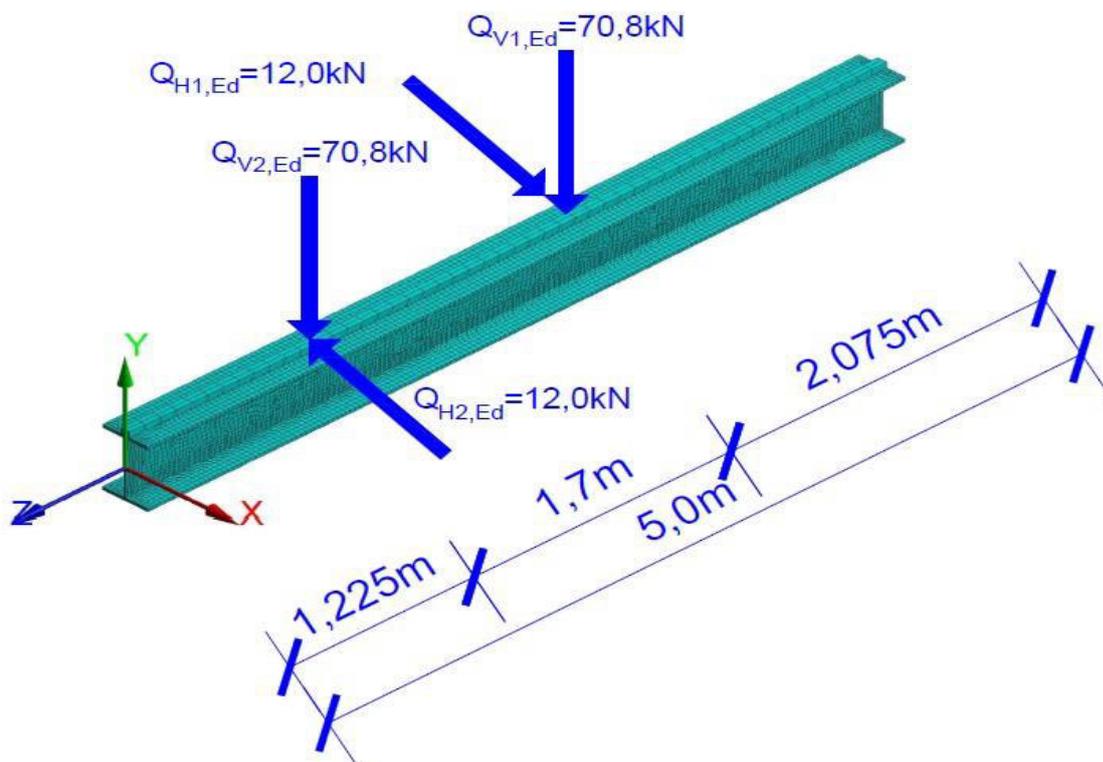


Abbildung 5.6: Lastaufstellung für QS1 SY1 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 10,595
 Einheit: mm
 20.02.2021 12:55

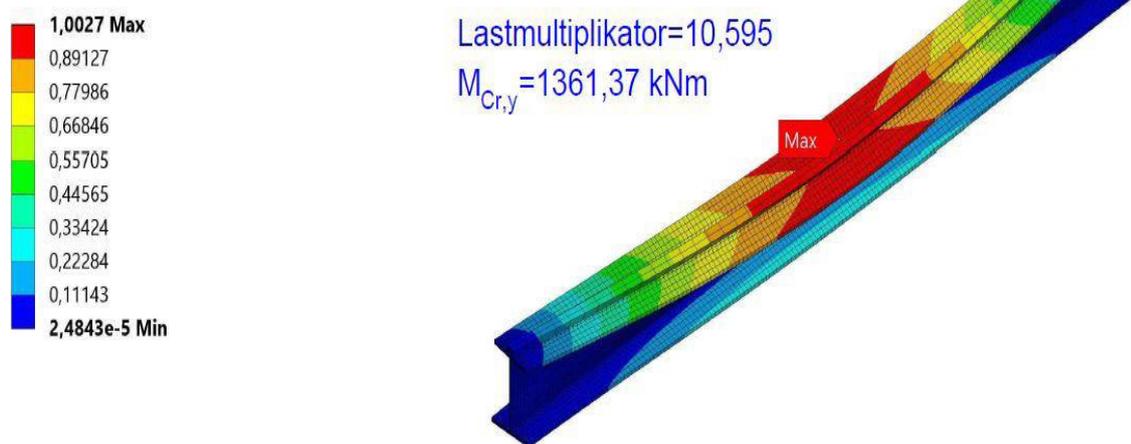


Abbildung5.7: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY1SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{136137}} = 0,75$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,75 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,75^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,8$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,8 + \sqrt{0,8^2 - 0,75 \cdot 0,75^2}} \quad \chi_{LT} = 0,79$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{124,53 \cdot 1,1}{0,79 \cdot 755,76} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 8,48 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,303 \leq 1 Auslastung : 30,3%.

- Nachweis für QS1SY1SC2:

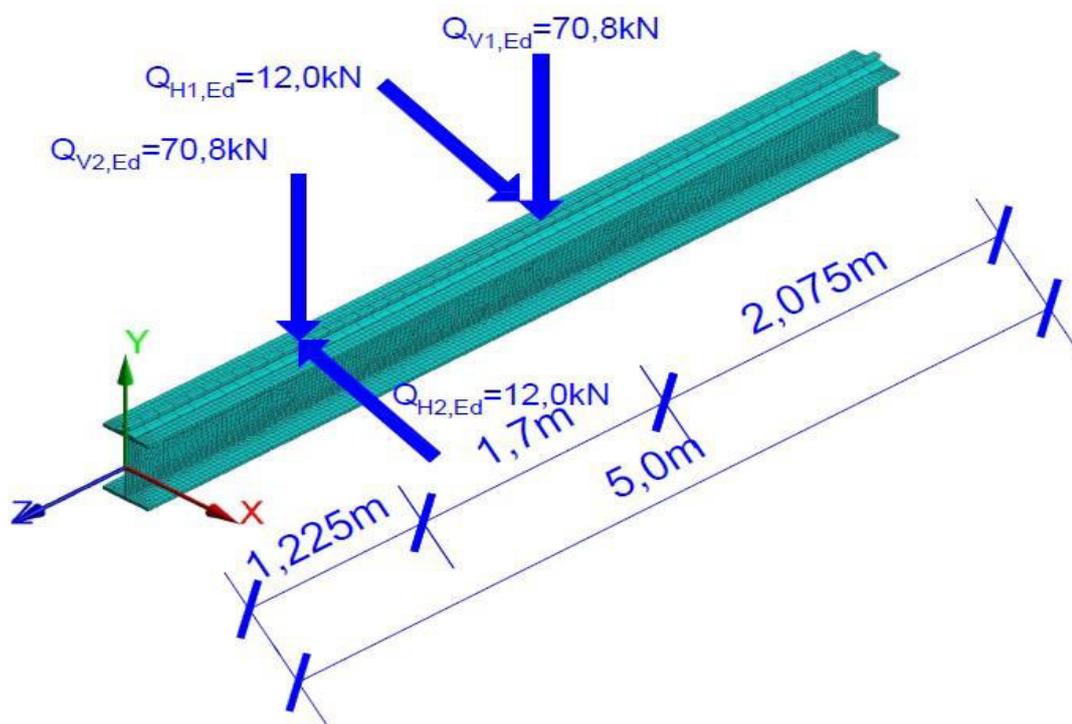


Abbildung 5.8: Lastaufstellung für QS1 SY1 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

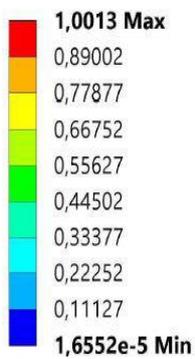
Gesamtverformung

Typ: Gesamtverformung

Lastmultiplikator (Nonlinear): 9,3499

Einheit: mm

21.02.2021 16:49



Lastmultiplikator=9,3499

$M_{Cr,y} = 1201,92 \text{ kNm}$

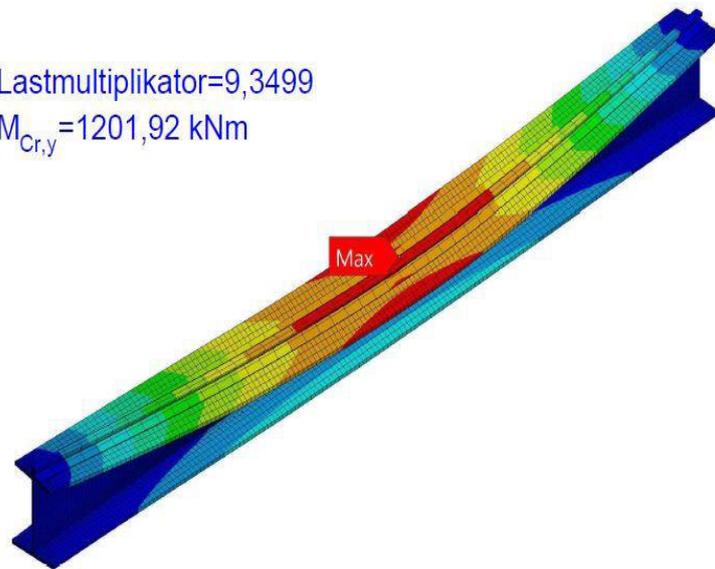


Abbildung 5.9: : $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY1SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1201,92}} = 0,8$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,8 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,8^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,84$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,84 + \sqrt{0,84^2 - 0,75 \cdot 0,8^2}} \quad \chi_{LT} = 0,76$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{124,53 \cdot 1,1}{0,76 \cdot 755,76} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 8,48 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,313 \leq 1 Auslastung :31,3%.

5.2.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2

- Die Querschnittswerte, Widerstandsmomente und vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1 gleich wie bei Abschnitt 5.2.1.
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.

- Nachweis für QS1SY2SC1:

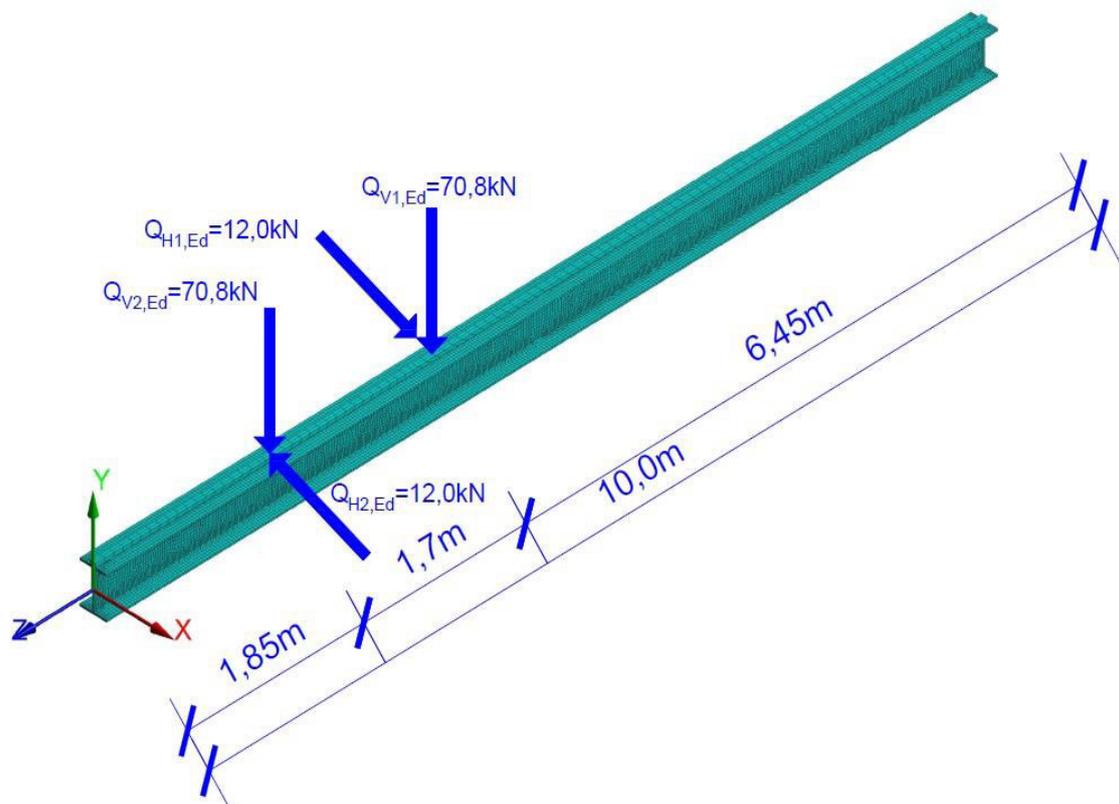
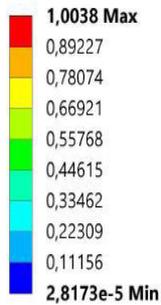


Abbildung 5.10: Lastaufstellung für QS1 SY2 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 16,548
 Einheit: mm
 20.02.2021 13:08



Lastmultiplikator=16,548
 $M_{Cr,y} = 1690,87 \text{ kNm}$

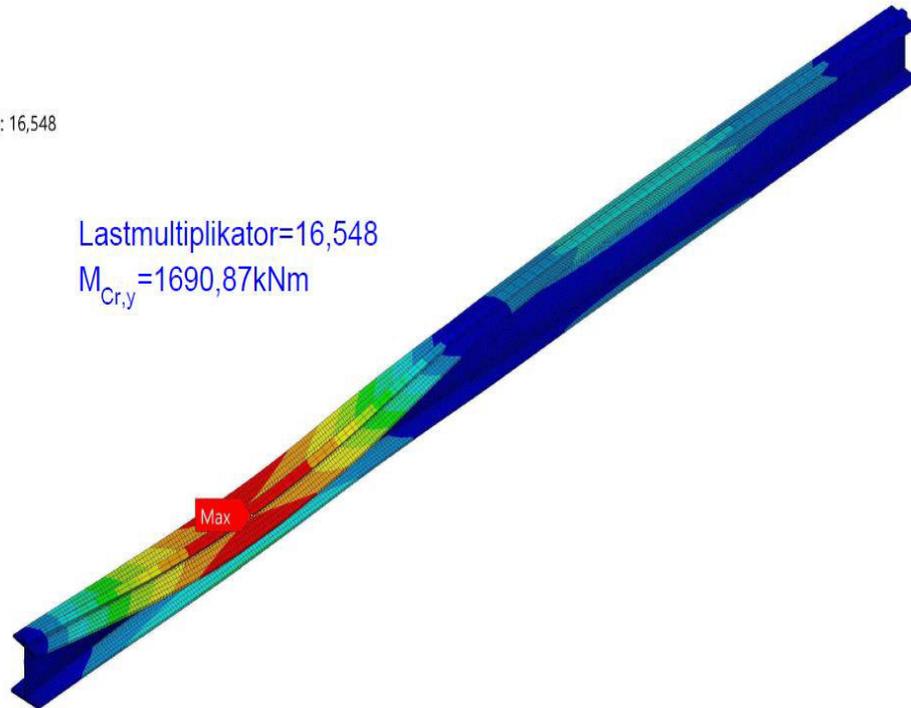


Abbildung 5.11: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY2SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1690,87}} = 0,67$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,67 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,67^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,73$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,73 + \sqrt{0,73^2 - 0,75 \cdot 0,67^2}} \quad \chi_{LT} = 0,85$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,85 \cdot 755,76} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,238 ≤ 1 Auslastung: 23,8%.

- Nachweis für QS1SY2SC2:

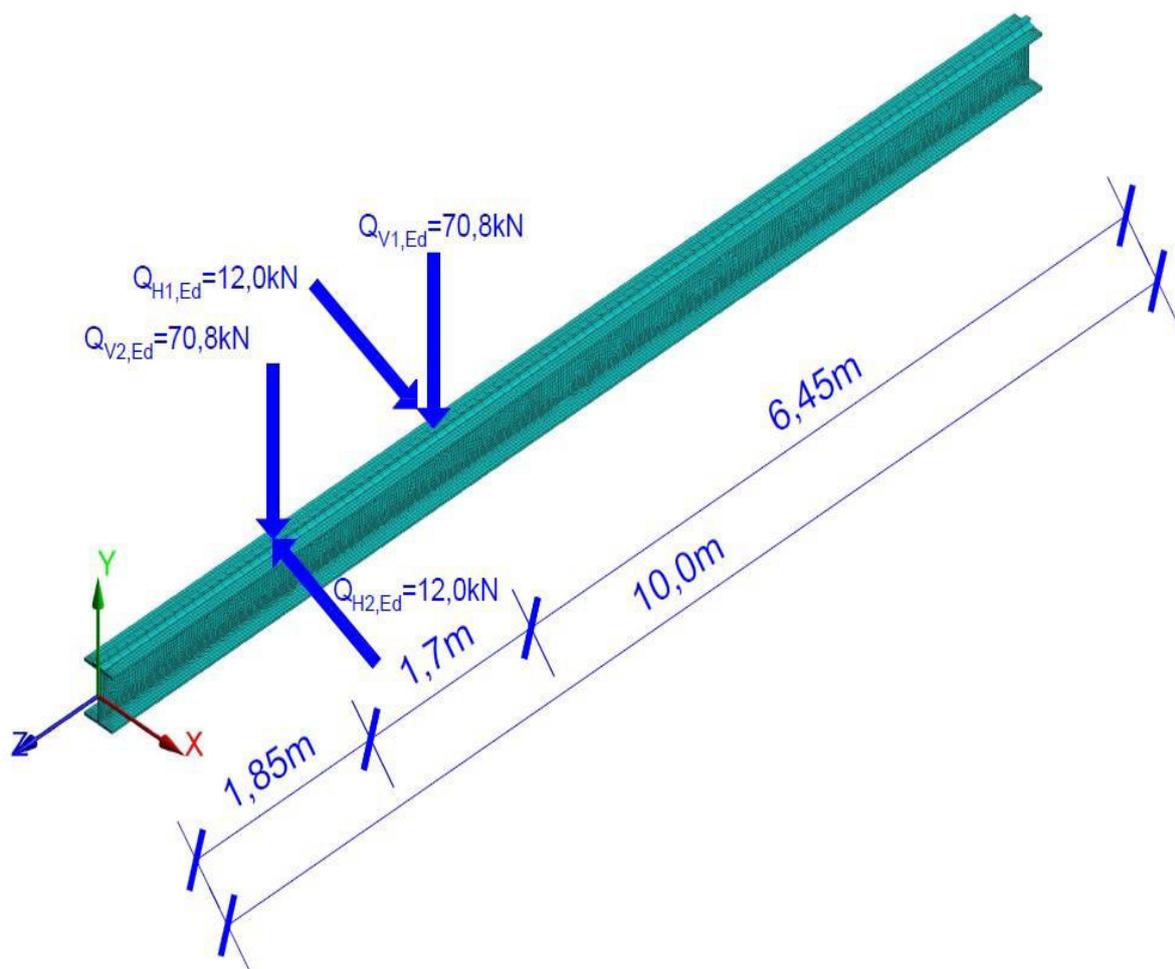
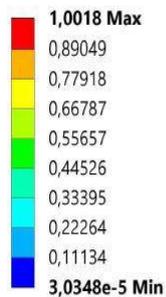


Abbildung 5.12: Lastaufstellung für QS1 SY2 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 15,161
 Einheit: mm
 20.02.2021 13:15



Lastmultiplikator=15,161
 $M_{Cr,y} = 1551,68 \text{ kNm}$

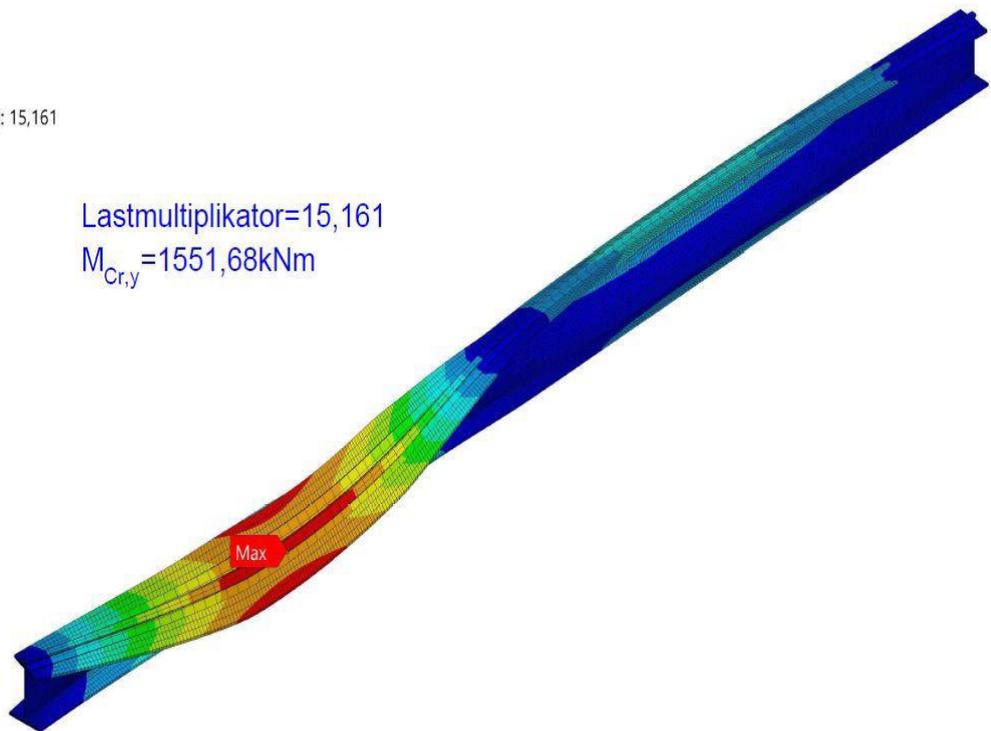


Abbildung 5.13: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY2SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1551,68}} = 0,69$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,69 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,69^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,75$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,75 + \sqrt{0,75^2 - 0,75 \cdot 0,69^2}} \quad \chi_{LT} = 0,83$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,83 \cdot 755,76} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,243 ≤ 1 Auslastung: 24,3%.

5.2.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2

- Die Querschnittswerte, Widerstandsmomente und vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1 gleich wie bei Abschnitt 5.2.1.
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.3) zu sehen.
- Nachweis für QS1SY3SC1:

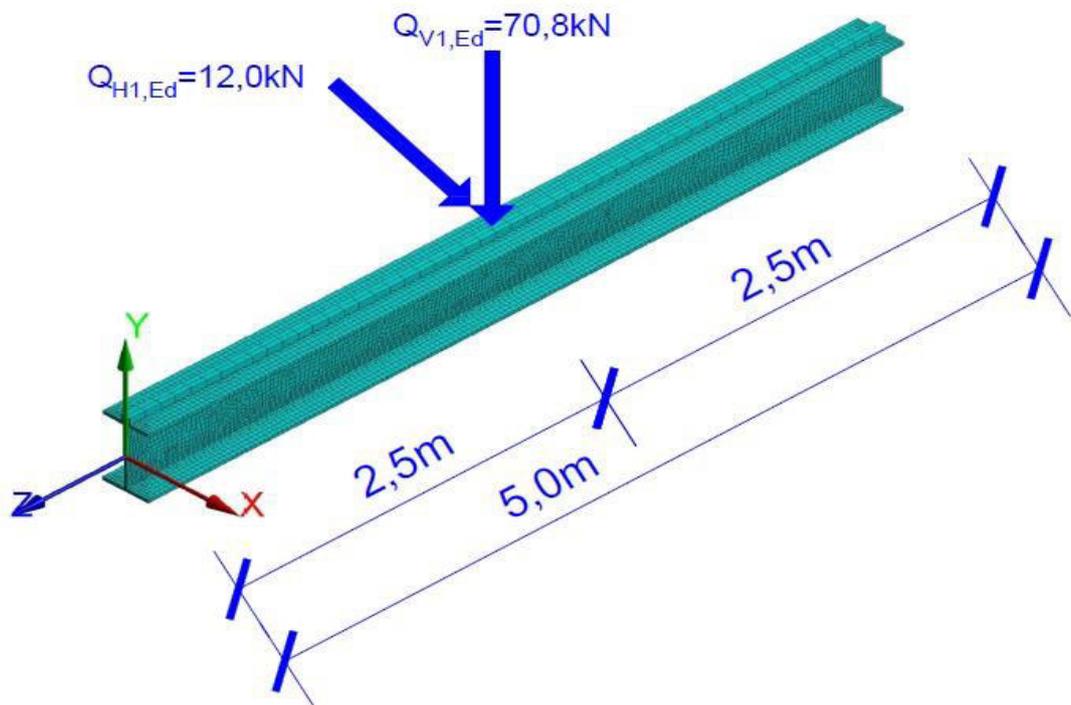


Abbildung 5.14: Lastaufstellung für QS1 SY3 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung

Typ: Gesamtverformung

Lastmultiplikator (Nonlinear): 16,656

Einheit: mm

20.02.2021 13:27

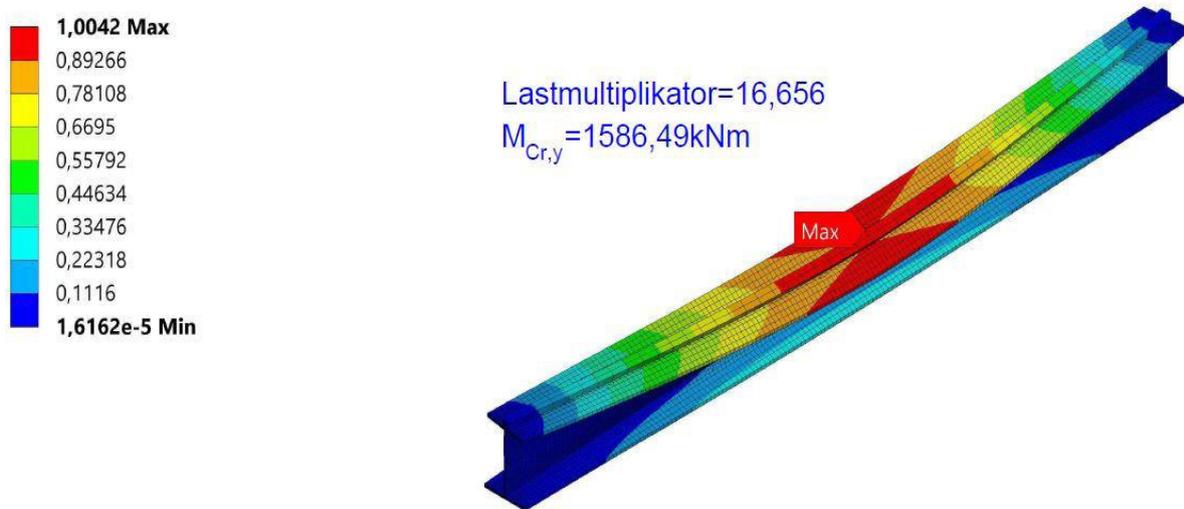


Abbildung 5.15: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY3SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1586,49}} = 0,7$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,7 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,7^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,76$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,76 + \sqrt{0,76^2 - 0,75 \cdot 0,7^2}} \quad \chi_{LT} = 0,82$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$
$$\frac{95,8 \cdot 1,1}{0,82 \cdot 755,76} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 15,02 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,301 \leq 1 Auslastung: 30,1%.

- Nachweis für QS1SY3SC2:

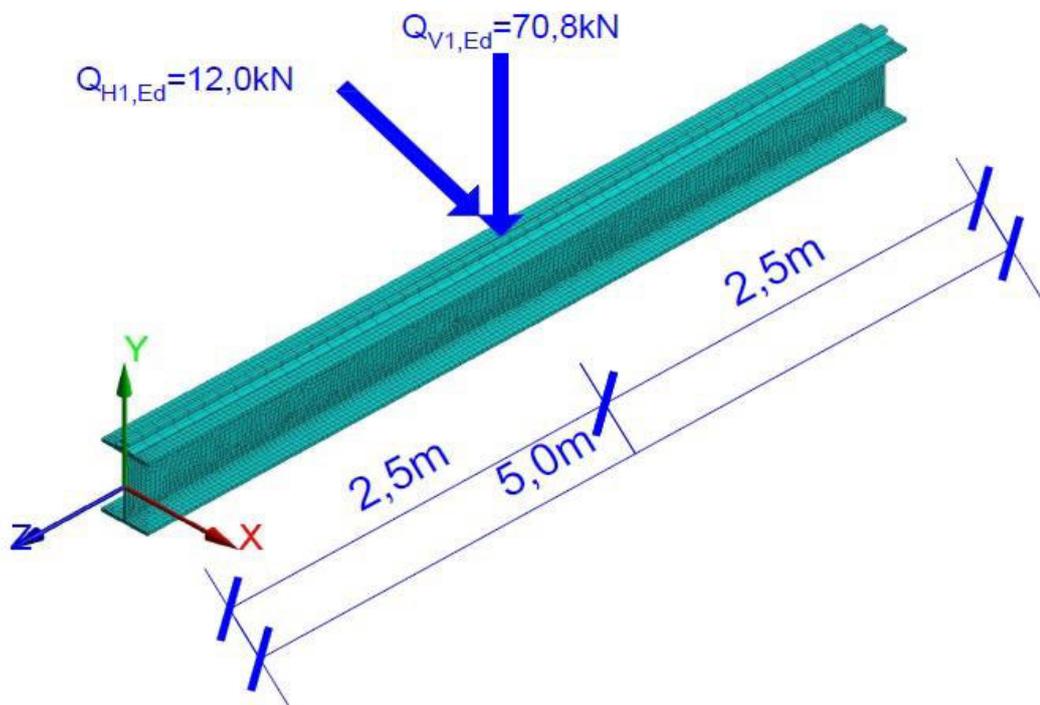


Abbildung 5.16: Lastaufstellung für QS1 SY3 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

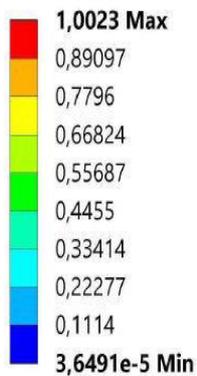
Gesamtverformung

Typ: Gesamtverformung

Lastmultiplikator (Nonlinear): 15,442

Einheit: mm

20.02.2021 13:32



Lastmultiplikator=15,442

$M_{Cr,y} = 1471,8 \text{ kNm}$

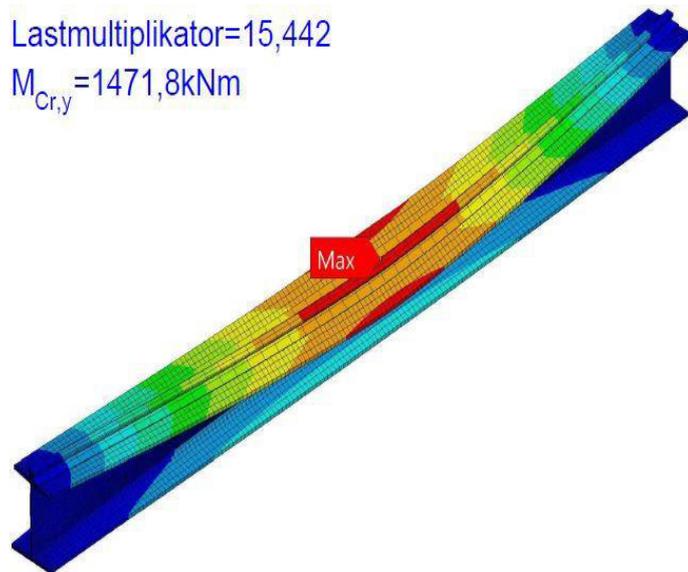


Abbildung 5.17: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY3SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1471,8}} = 0,72$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,72 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,72^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,77$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,77 + \sqrt{0,77^2 - 0,75 \cdot 0,72^2}} \quad \chi_{LT} = 0,81$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{95,8 \cdot 1,1}{0,81 \cdot 755,72} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 15,02 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,303 ≤ 1 Auslastung :30,3%.

5.2.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2

- Die Querschnittswerte, Widerstandsmomente und vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1 gleich wie bei Abschnitt 5.2.1.
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.4) zu sehen.

- Nachweis für QS1SY4SC1:

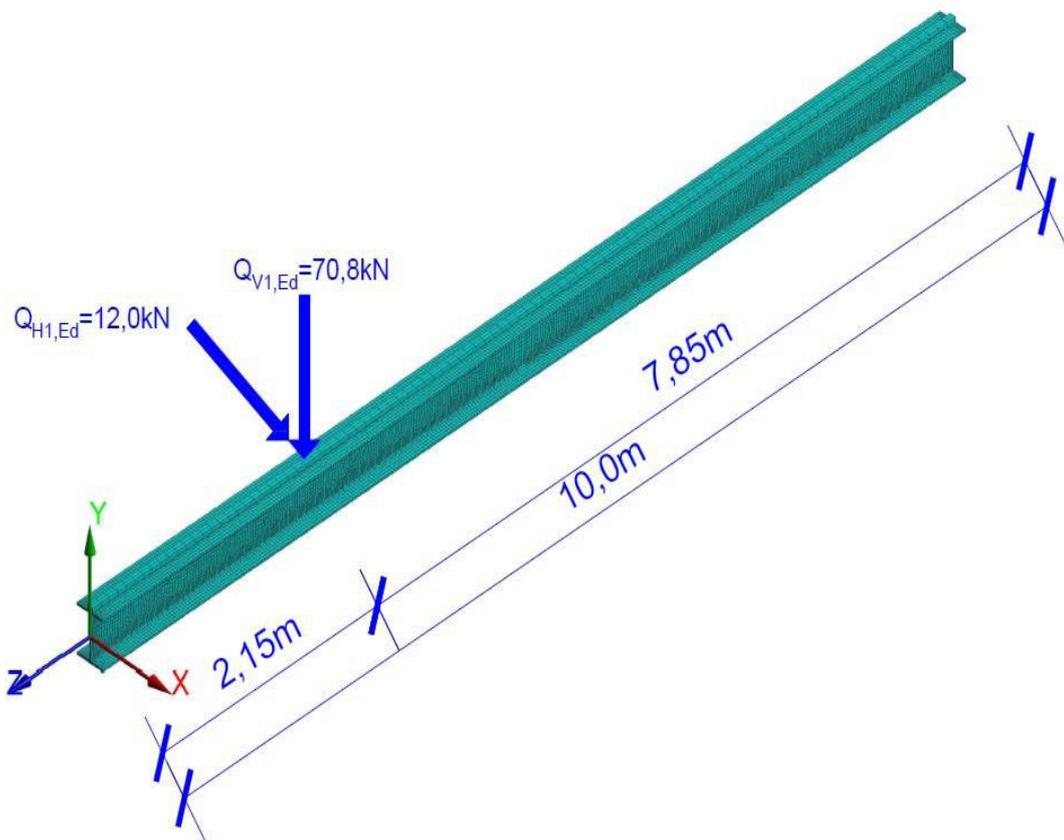


Abbildung 5.18: Lastaufstellung für QS1 SY4 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 23,833
 Einheit: mm
 20.02.2021 13:37

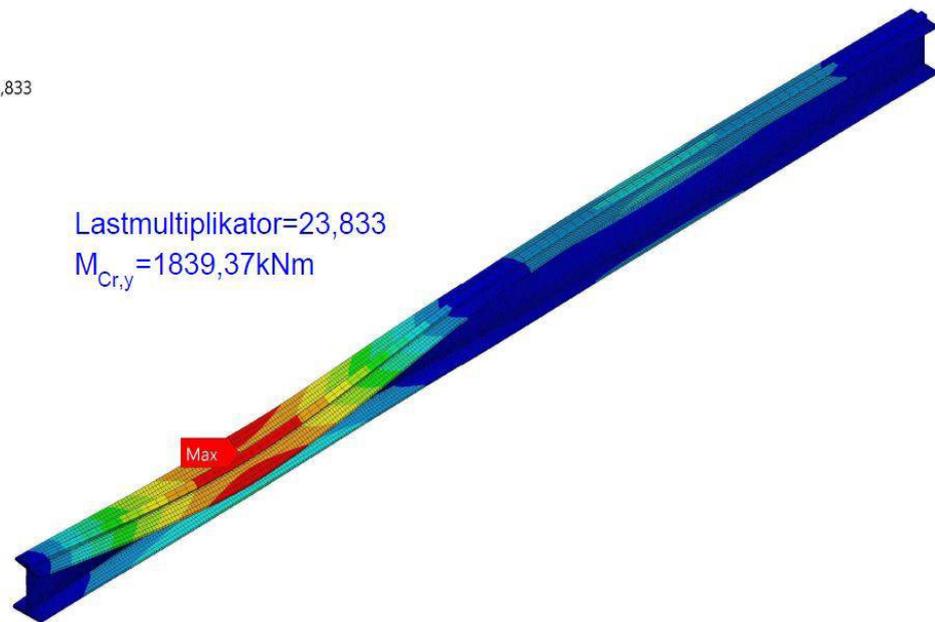
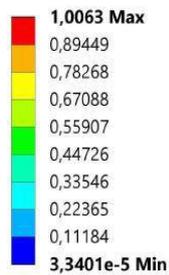


Abbildung 5.19: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY4SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1839,37}} = 0,64$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,64 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,64^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,71$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,71 + \sqrt{0,71^2 - 0,75 \cdot 0,64^2}} \quad \chi_{LT} = 0,87$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$
$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,87 \cdot 755,72} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,238 ≤ 1 Auslastung :23,8%.

- Nachweis für QS1SY4SC2:

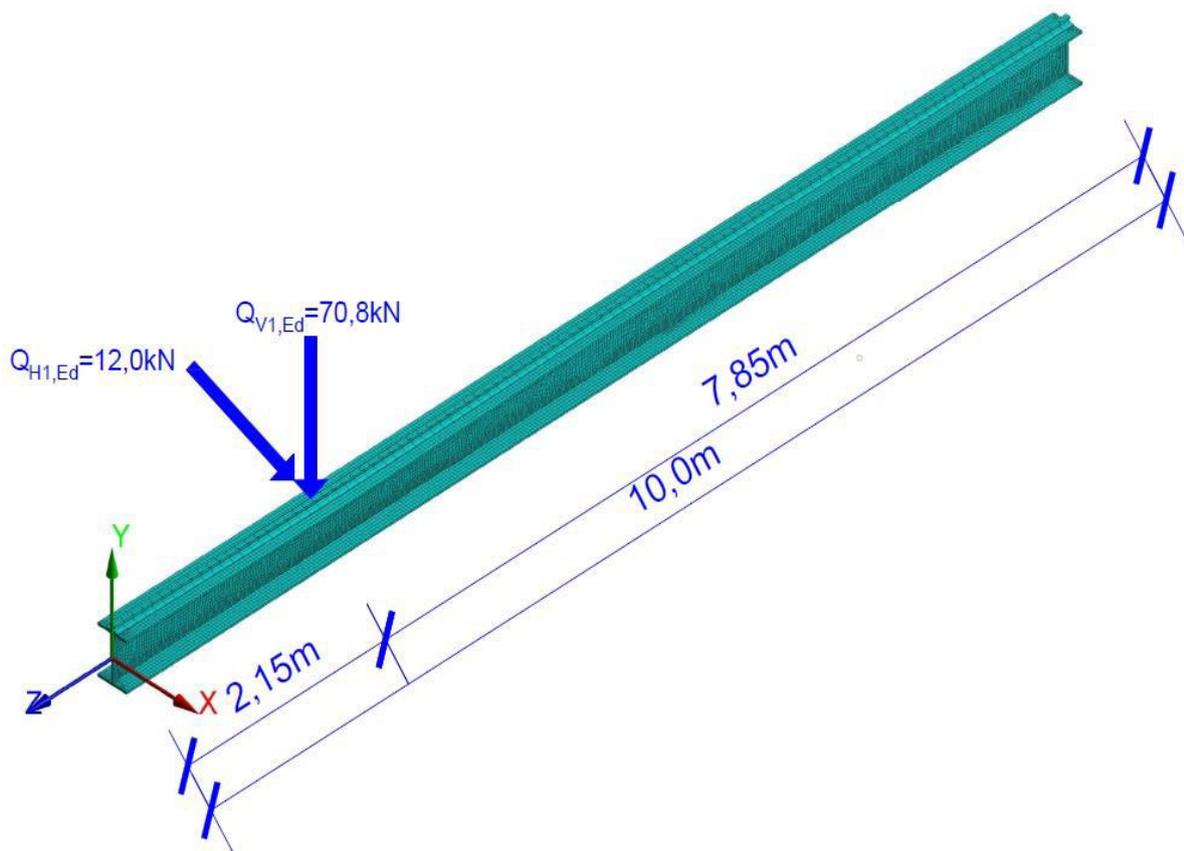


Abbildung 5.20: Lastaufstellung für QS1 SY4 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 17,007
 Einheit: mm
 20.02.2021 14:08

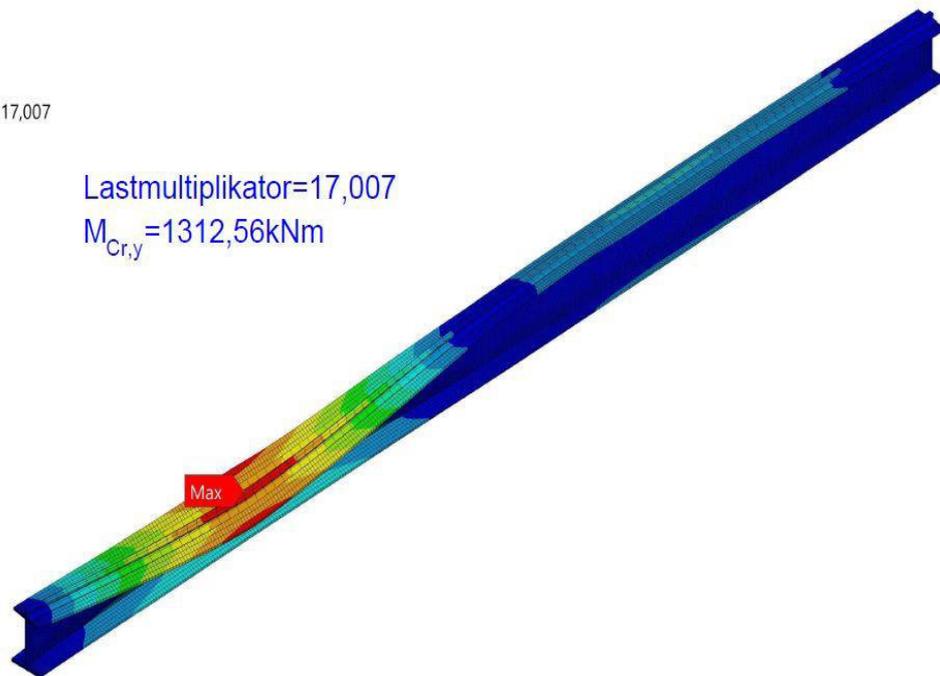
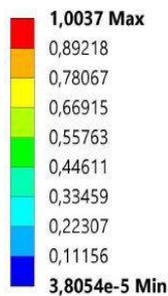


Abbildung 5.21: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS1SY4SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{3216 \cdot 23,5}{1312,56}} = 0,76$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,76 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,76^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,8$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,8 + \sqrt{0,8^2 - 0,75 \cdot 0,76^2}} \quad \chi_{LT} = 0,79$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,79 \cdot 755,72} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{226,9} \leq 1$$

0,251 ≤ 1 Auslastung: 25,1%.

5.2.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für Querschnitt 1 (QS2) erläutert (siehe Abschnitt 2.2).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach Händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.
- Die vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) :

$$M_{y,Rk} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2250 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 528,8 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{480 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 112,8 \text{ kNm}$$

- Nachweis für QS2SY2SC1:

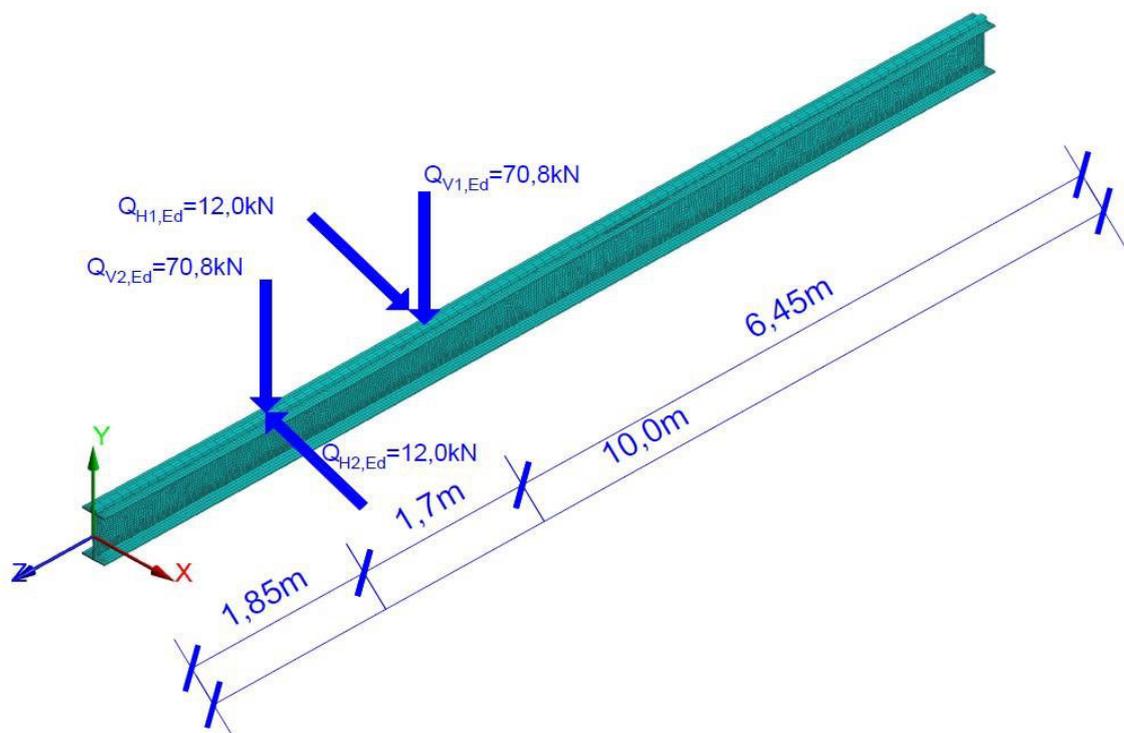
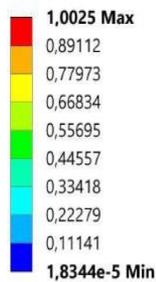


Abbildung 5.22: Lastaufstellung für QS2 SY2 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 7,6717
 Einheit: mm
 20.02.2021 14:13



Lastmultiplikator=7,6717
 $M_{Cr,y} = 776,54 \text{ kNm}$

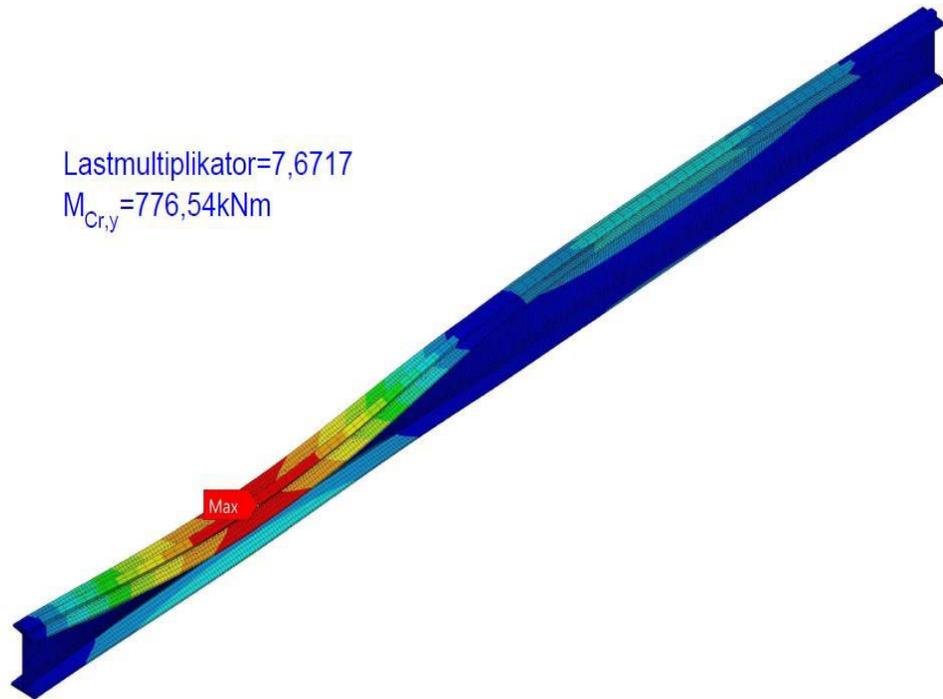


Abbildung 5.23: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS2SY2SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{2250 \cdot 23,5}{776,54}} = 0,83$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,83 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,83^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,86$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,86 + \sqrt{0,86^2 - 0,75 \cdot 0,83^2}} \quad \chi_{LT} = 0,75$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,75 \cdot 528,8} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{112,8} \leq 1$$

$0,413 \leq 1$ Auslastung :41,3%.

- Nachweis für QS2SY2SC2:

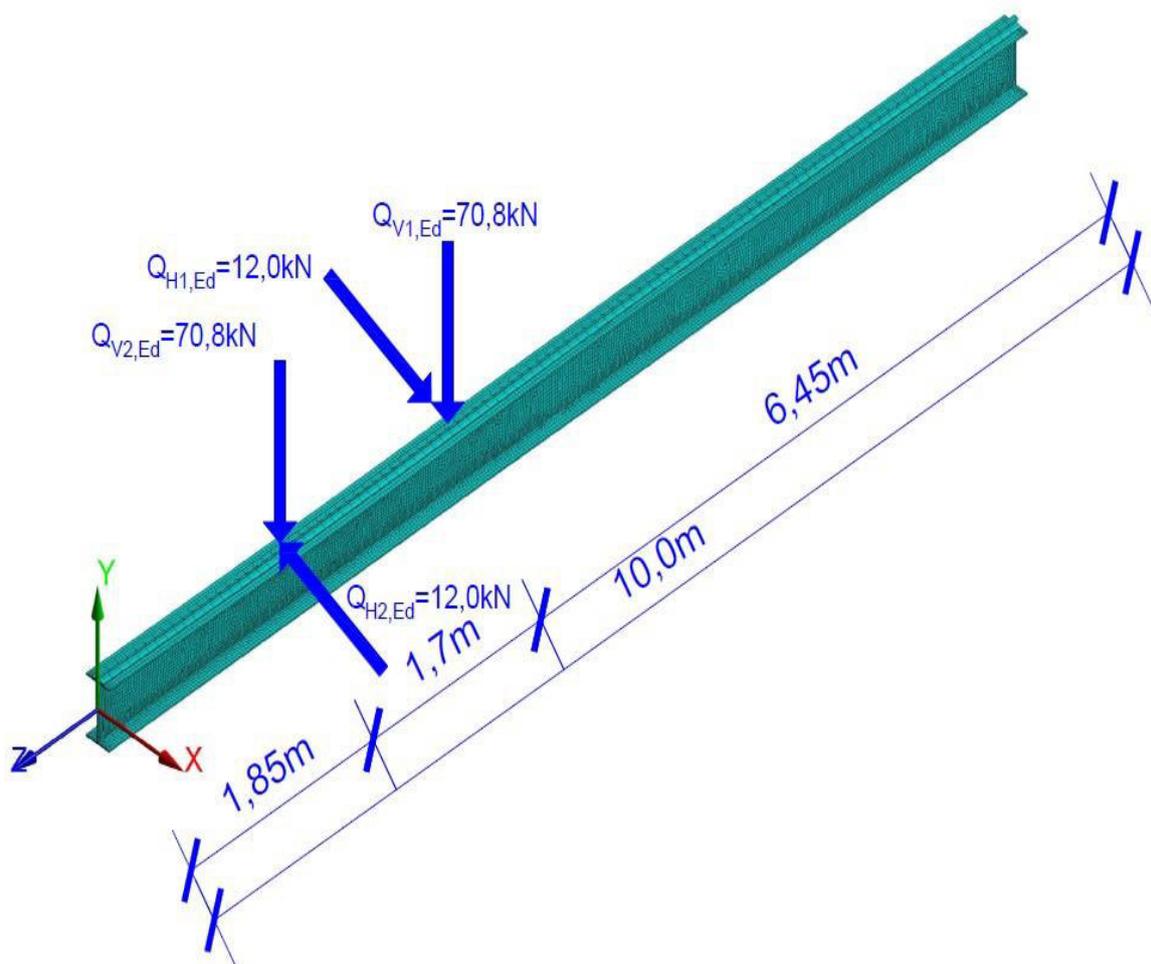
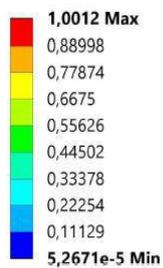


Abbildung 5.24: Lastaufstellung für QS2 SY2 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 5,3476
 Einheit: mm
 20.02.2021 14:20



Lastmultiplikator=5,3476
 $M_{Cr,y} = 541,48 \text{ kNm}$

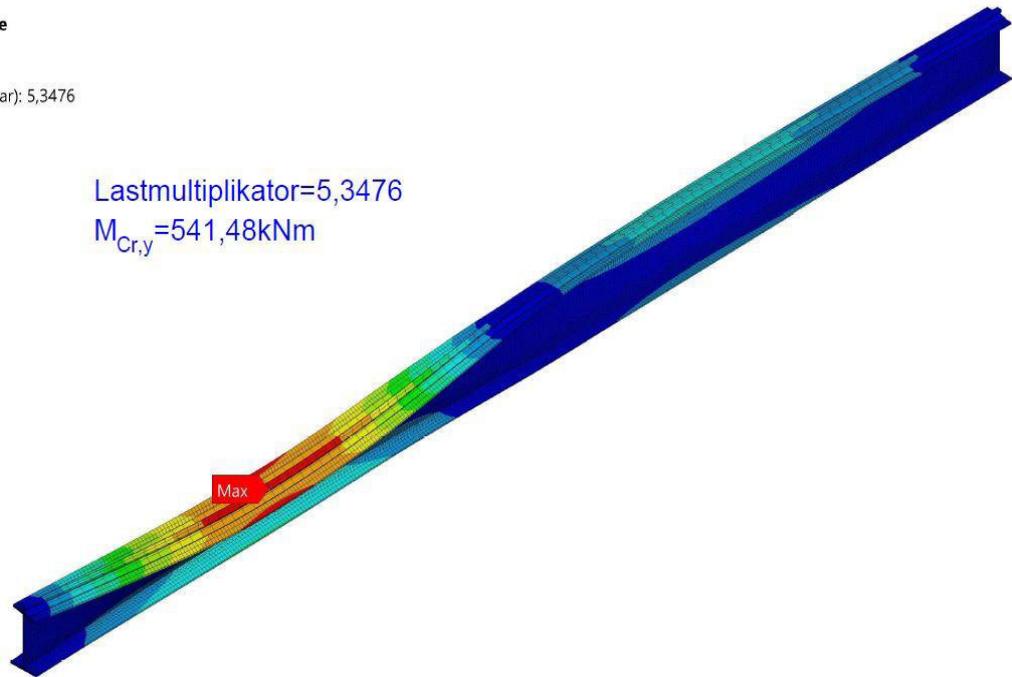


Abbildung 5.25: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS2SY2SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{2250 \cdot 23,5}{541,48}} = 0,99$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,99 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,99^2)$$

$$\phi_{LT} = 1,01$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,01 + \sqrt{1,01^2 - 0,75 \cdot 0,99^2}} \quad \chi_{LT} = 0,65$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,65 \cdot 528,8} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{112,8} \leq 1$$

0,456 ≤ 1 Auslastung : 45,6%.

5.2.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2

- Die Querschnittswerte, Widerstandsmomente und vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1 gleich wie bei Abschnitt 5.2.5.
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck [4] berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.4) zu sehen.

- Nachweis für QS2SY4SC1:

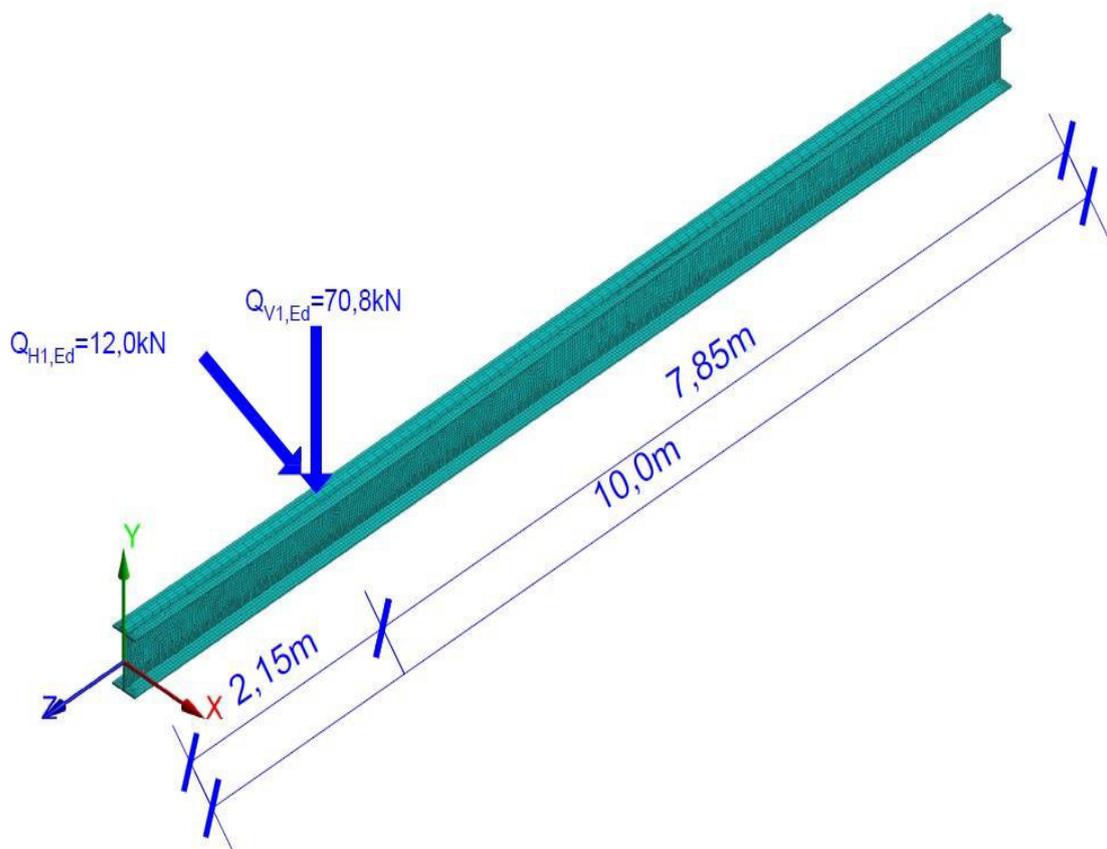


Abbildung 5.26: Lastaufstellung für QS2 SY4 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 11,543
 Einheit: mm
 20.02.2021 14:26

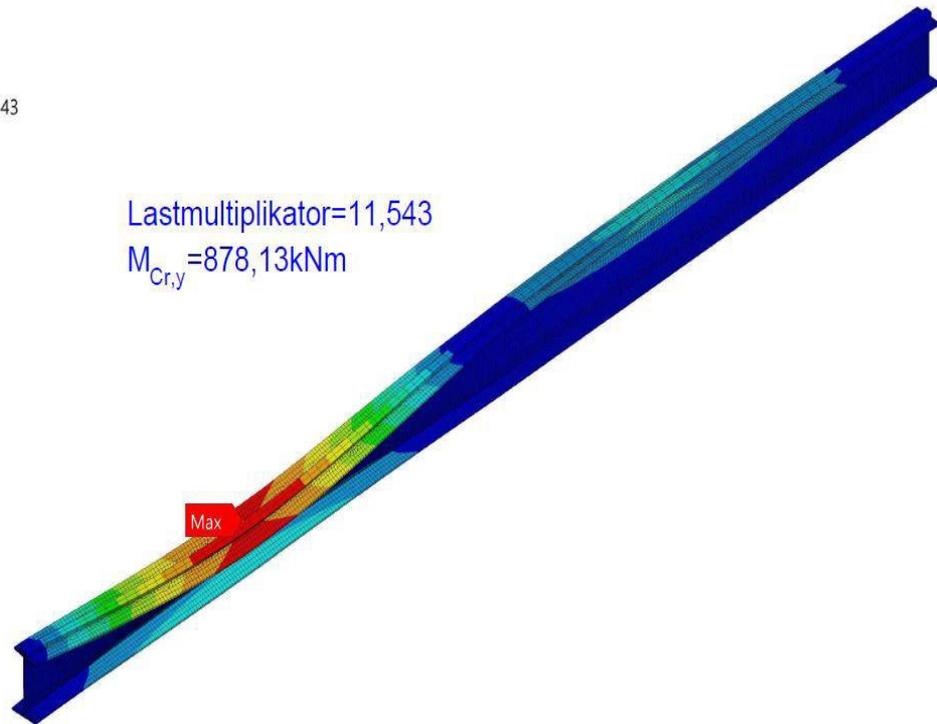
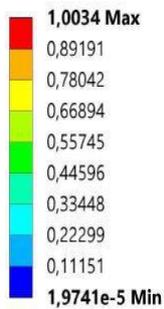


Abbildung 5.27: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS2SY4SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{2250 \cdot 23,5}{878,13}} = 0,78$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,78 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,78^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,82$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,82 + \sqrt{0,82^2 - 0,75 \cdot 0,78^2}} \quad \chi_{LT} = 0,77$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,77 \cdot 528,8} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{112,8} \leq 1$$

0,428 \leq 1 Auslastung: 42,8%.

- Nachweis für QS2SY4SC2:

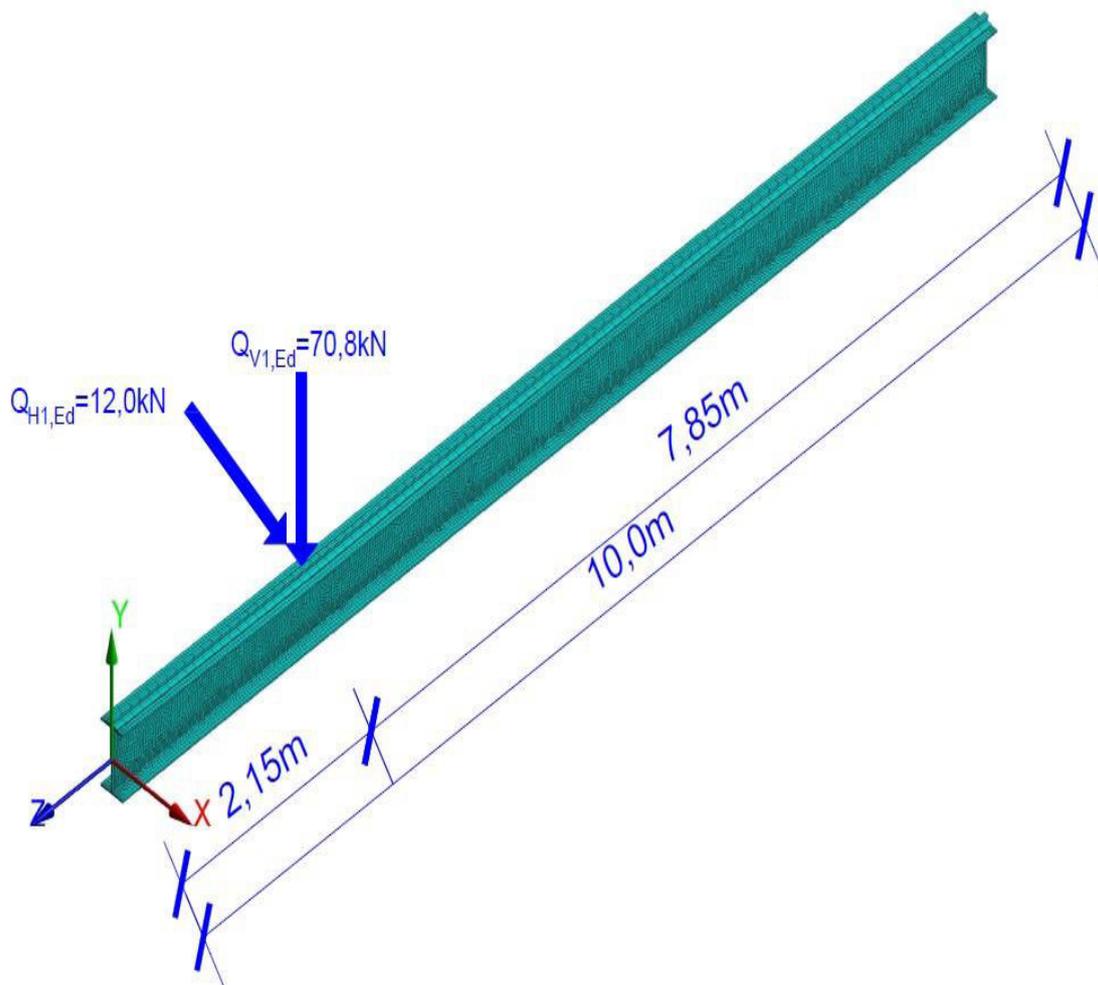


Abbildung 5.28: Lastaufstellung für QS2 SY4 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 9,3958
 Einheit: mm
 20.02.2021 14:33

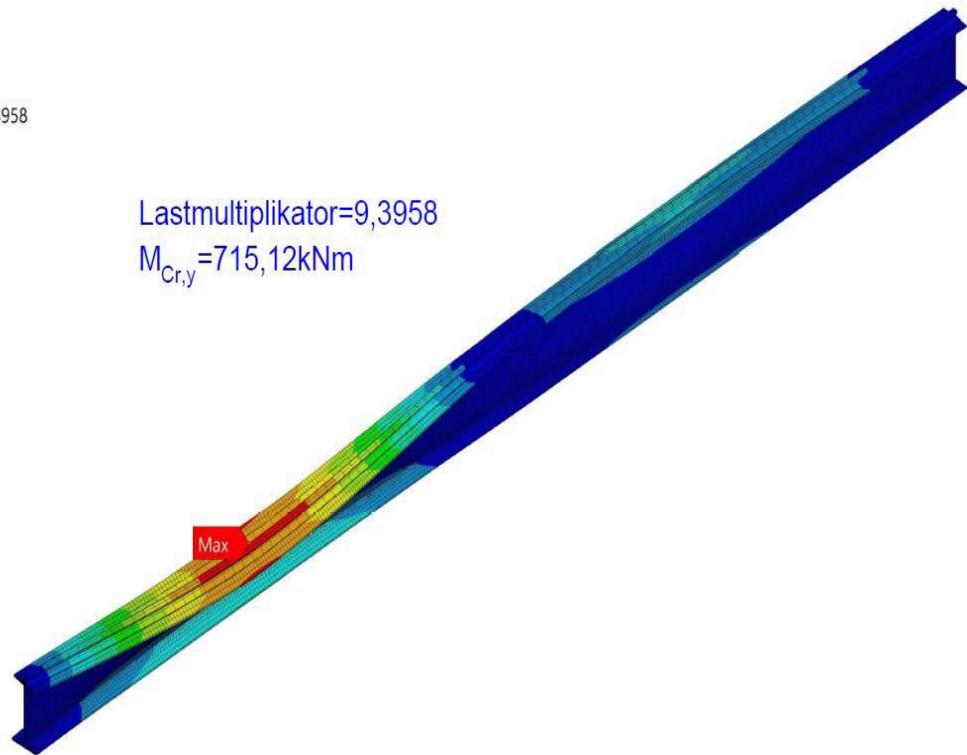
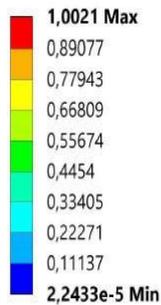


Abbildung 5.29: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS2SY4SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{2550 \cdot 23,5}{715,12}} = 0,92$$

- Knicklinie: c Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,49$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,49 \cdot (0,92 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,92^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,94$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT} für Biegedrillknicken:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,94 + \sqrt{0,94^2 - 0,75 \cdot 0,92^2}} \quad \chi_{LT} = 0,69$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,69 \cdot 528,8} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{112,8} \leq 1$$

$0,452 \leq 1$ Auslastung: 45,2%.

5.2.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2

- Es werden zuerst die Stahlsorte, Querschnittswerte und Querschnittseinordnung für
- Querschnitt 1 (QS3) erläutert (siehe Abschnitt 2.3).
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 3.2) zu sehen.
- Die vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$)

$$M_{y,Rk} = M_{pl,y,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{7100 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 1668,5 \text{ kNm}$$

$$M_{z,Rk} = M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{645 \text{ cm}^3 \cdot 23,5 \text{ kN/cm}^2}{1,0} = 151,57 \text{ kNm}$$

- Nachweis für QS3SY2SC1:

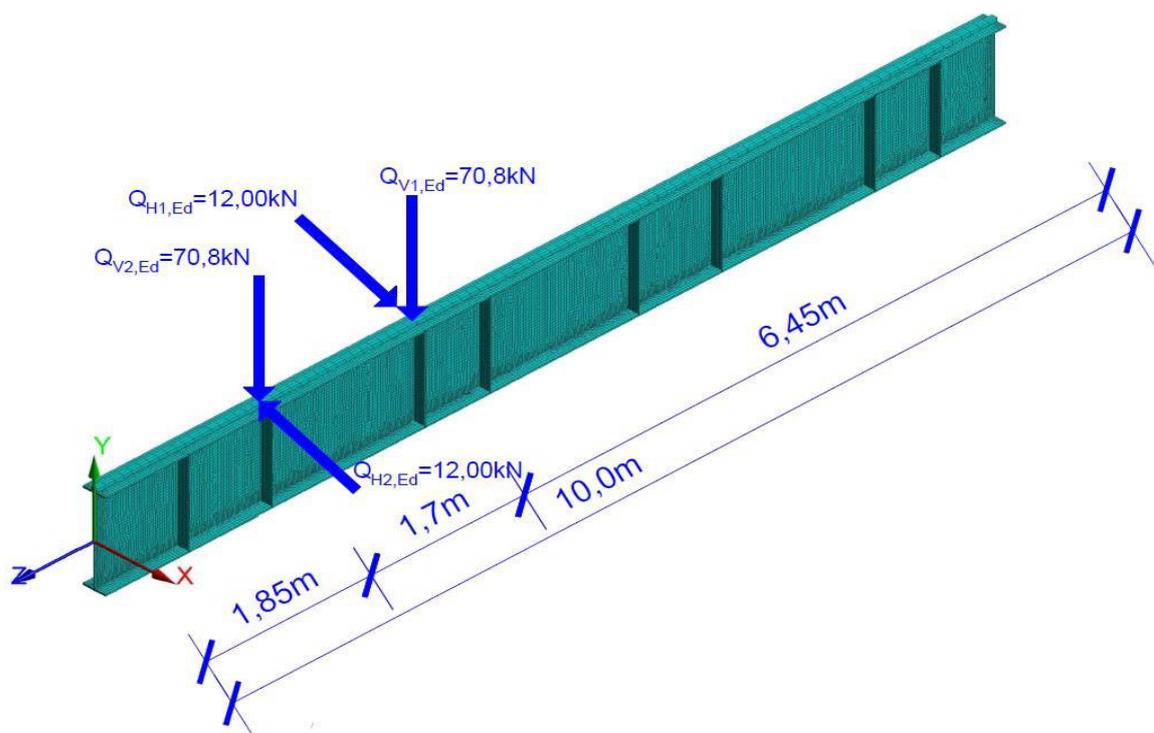


Abbildung 5.30: Lastaufstellung für QS3 SY2 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 18,701
 Einheit: mm
 17.02.2021 16:12

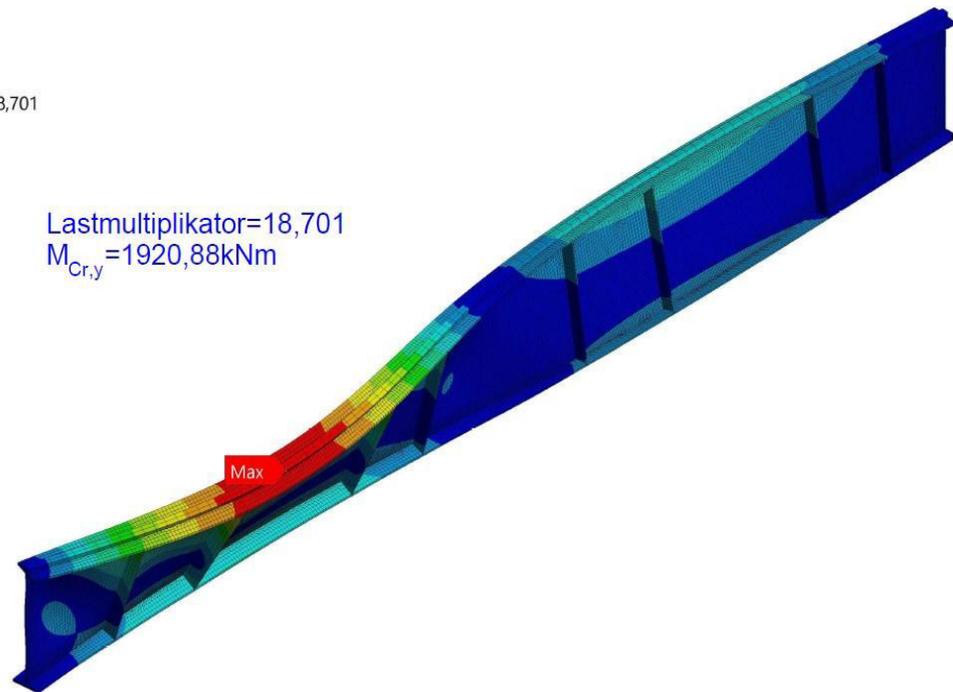
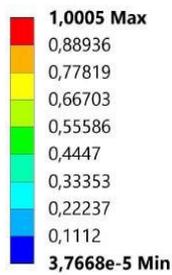


Abbildung 5.31: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS3SY2SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{7100 \cdot 23,5}{1920,88}} = 0,93$$

- Knicklinie: d Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,76$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,76 \cdot (0,93 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,93^2)$$

$$\phi_{LT} = 1,03$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,03 + \sqrt{1,03^2 - 0,75 \cdot 0,93^2}} \quad \chi_{LT} = 0,59$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,59 \cdot 1668,5} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{151,57} \leq 1$$

0,212 ≤ 1 Auslastung: 21,2%.

- Nachweis für QS3SY2SC2:

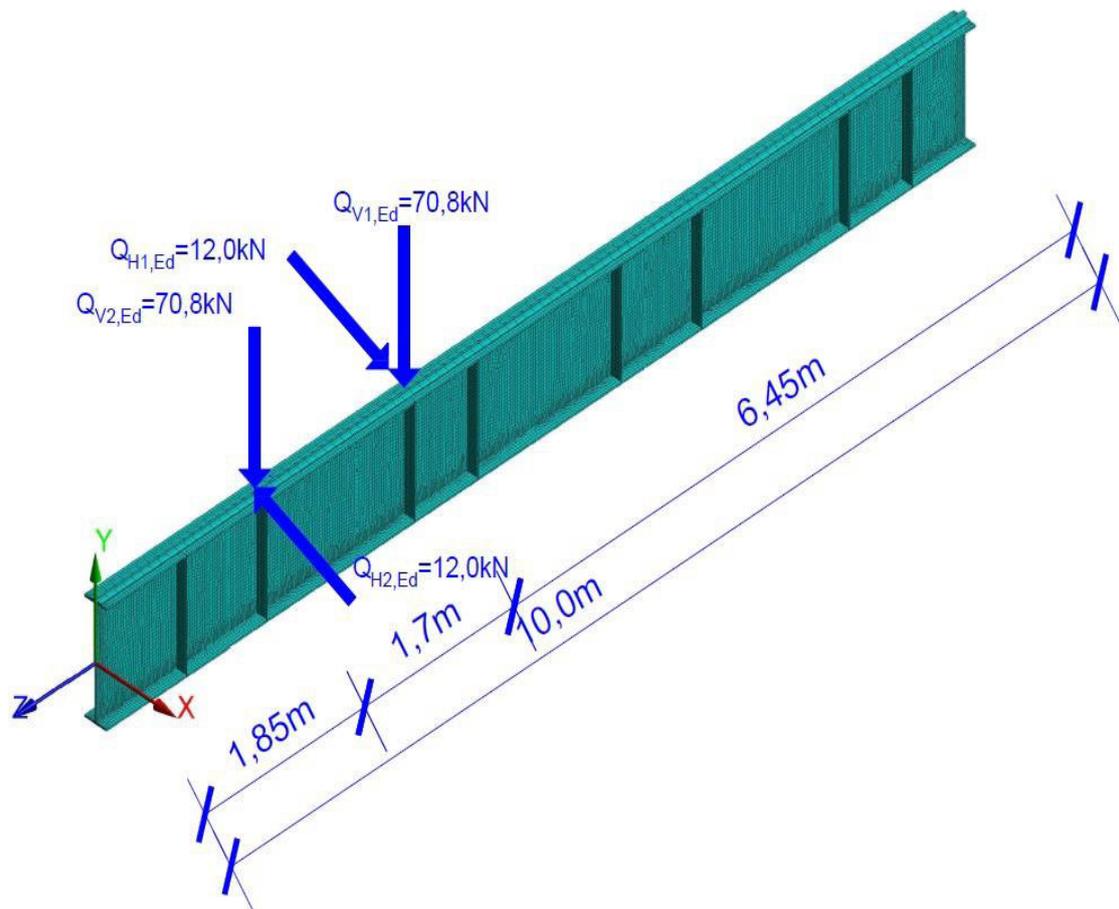


Abbildung 5.32: Lastaufstellung für QS3 SY2 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 18,685
 Einheit: mm
 17.02.2021 16:24

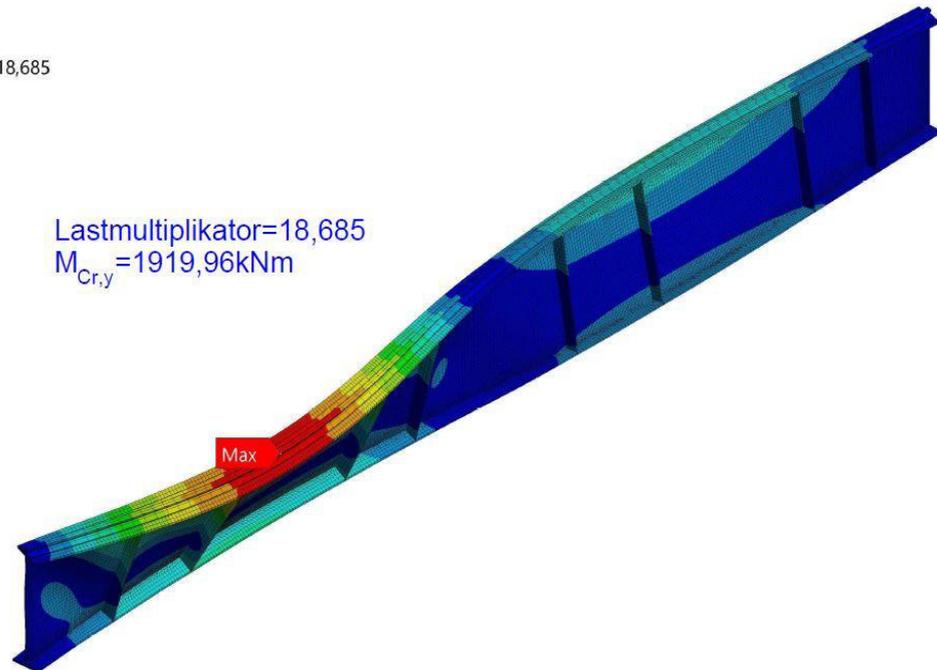
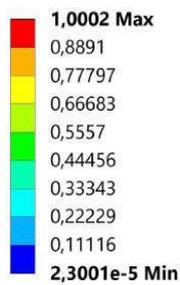


Abbildung 5.33: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS3SY2SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{7100 \cdot 23,5}{1919,96}} = 0,93$$

- Knicklinie: d Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,76$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,76 \cdot (0,93 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,93^2)$$

$$\phi_{LT} = 1,03$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT} für Biegedrillknicken:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,03 + \sqrt{1,03^2 - 0,75 \cdot 0,93^2}} \quad \chi_{LT} = 0,59$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$
$$\frac{100,0 \cdot 1,1}{0,59 \cdot 1668,5} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 7,74 \cdot 1,1}{151,57} \leq 1$$

0,212 ≤ 1 Auslastung:21,2%.

5.2.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2

- Die Querschnittswerte, Widerstandsmomente und vollplastischen Schnittgrößen mit ($\gamma_{M0} = 1,0$) für QS1 gleich wie bei Abschnitt 5.3.7.
- Die Schnittgrößen sind mit Hilfe von Ruck Zuck berechnet und danach händisch nachgezeichnet worden, in der (Abbildung 2.4) zu sehen.

- Nachweis für QS3SY4SC1:

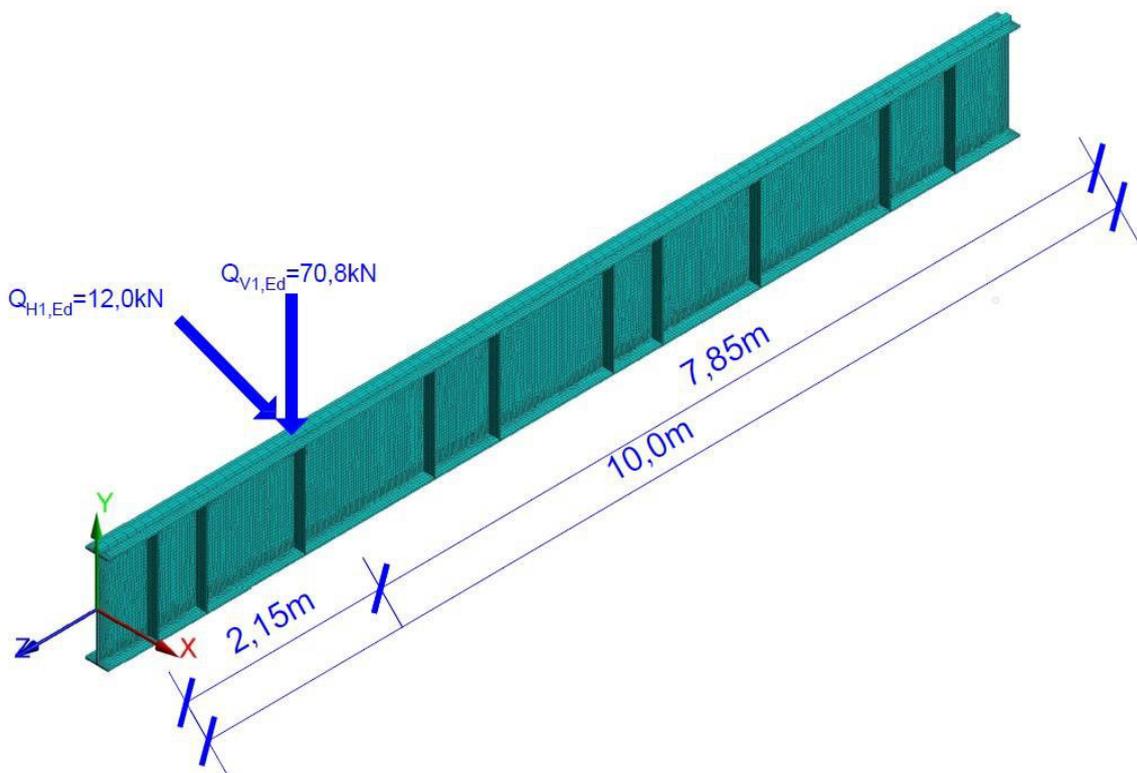


Abbildung 5.34: Lastaufstellung für QS3 SY4 SC1.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 28,148
 Einheit: mm
 17.02.2021 16:55

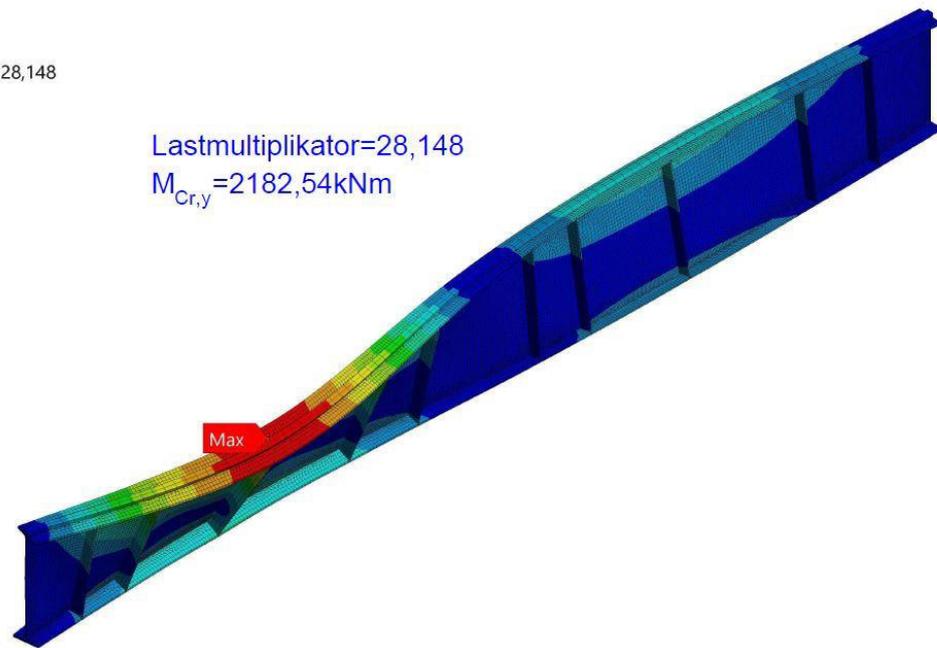
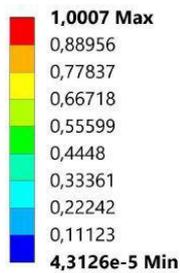


Abbildung 5.35: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS3SY4SC1.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{7100 \cdot 23,5}{2182,54}} = 0,87$$

- Knicklinie: d Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,76$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,76 \cdot (0,87 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,87^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,96$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT}

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,96 + \sqrt{0,96^2 - 0,75 \cdot 0,87^2}} \quad \chi_{LT} = 0,64$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$
$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,64 \cdot 1668,5} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{151,57} \leq 1$$

0,243 ≤ 1 Auslastung: 24,3%.

- Nachweise für QS3SY4SC2:

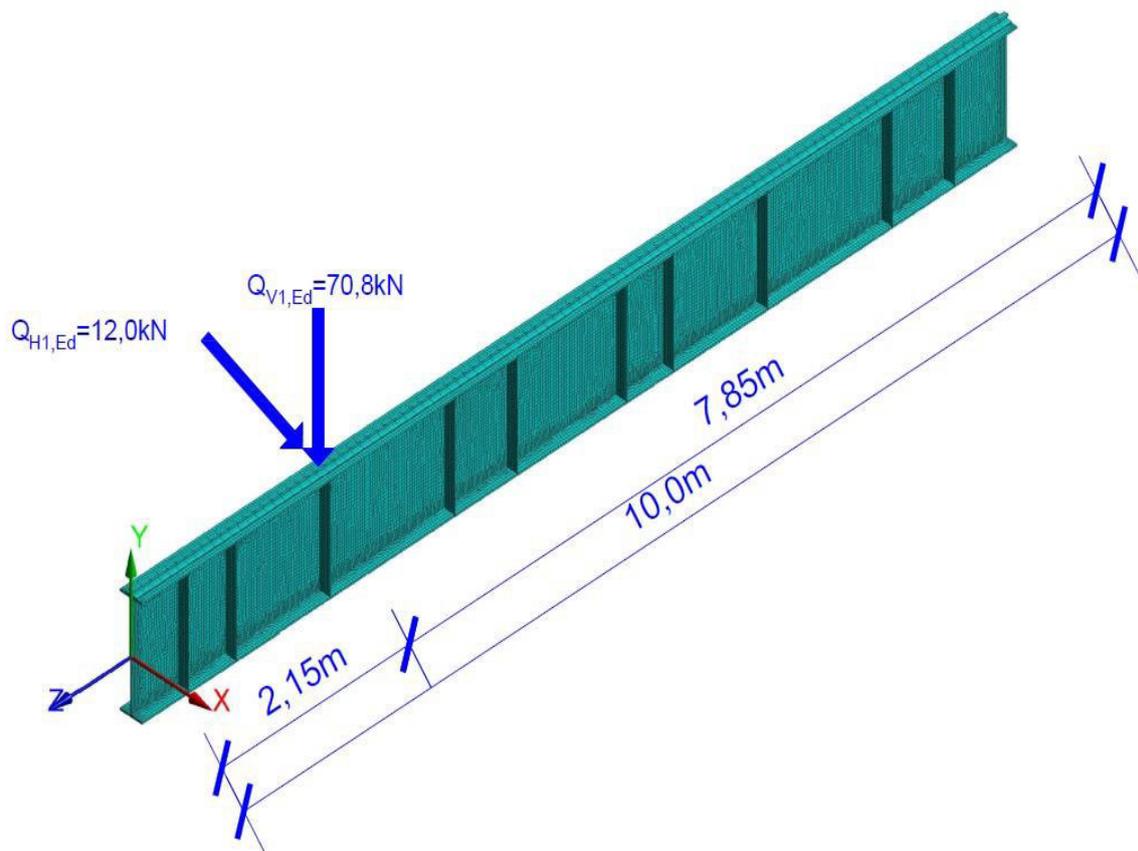


Abbildung 5.36: Lastaufstellung für QS3 SY4 SC2.

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 22,295
 Einheit: mm
 17.02.2021 17:05

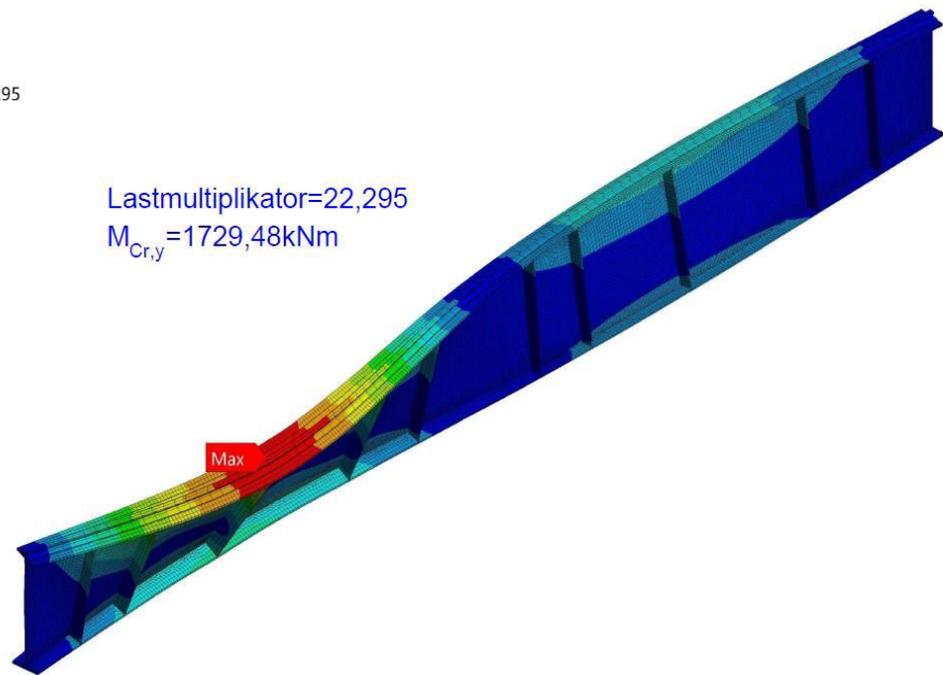
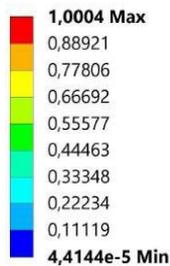


Abbildung 5.37: $M_{y,cr}$ aus der numerischen Ermittlung für QS3SY4SC2.

- Bezogene Schlankheit $\bar{\lambda}_{LT}$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{y,cr}}} = \sqrt{\frac{7100 \cdot 23,5}{1729,48}} = 0,98$$

- Knicklinie: d Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT} = 0,76$.

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4 \text{ und } \beta = 0,75$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2)$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,76 \cdot (0,98 - 0,4) + 0,75 \cdot 0,98^2)$$

$$\phi_{LT} = 1,08$$

- Der Abminderungsfaktor χ_{LT} für Biegedrillknicken:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{1,08 + \sqrt{1,08^2 - 0,75 \cdot 0,98^2}} \quad \chi_{LT} = 0,57$$

- Nachweis für ($C_{mz} = 0,9$):

$$\frac{M_{y,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{\chi_{LT} \cdot M_{y,Rk}} + \frac{C_{mz} \cdot 2 \cdot M_{z,Ed} \cdot \gamma_{M1}}{M_{z,Rk}} \leq 1$$

$$\frac{77,45 \cdot 1,1}{0,57 \cdot 1668,5} + \frac{0,9 \cdot 2 \cdot 12,46 \cdot 1,1}{151,57} \leq 1$$

0,252 ≤ 1 Auslastung: 25,2%.

5.3 Ergebnisvergleich BDK-Nachweis nach [1], Anhang A

BDK-Nachweis nach EC 3-6, Anhang A			$M_{y,Ed}$ [kNm]	$M_{z,Ed}$ [kNm]	W_y [cm ³]	$M_{y,Rk}$ [kNm]	$M_{z,Rk}$ [kNm]	$M_{y,cr}$ [kNm]	λ_{LT}	χ_{LT}	Auslastung [%]
QS1	SY1	SC1	124,53	8,48	3216,00	755,76	226,90	1361,37	0,75	0,79	30,30
QS1	SY3	SC1	95,80	15,02	3216,00	755,76	226,90	1586,49	0,70	0,82	30,10
QS1	SY2	SC1	100,00	7,74	3216,00	755,76	226,90	1690,87	0,67	0,85	23,80
QS1	SY4	SC1	77,45	12,46	3216,00	755,76	226,90	1839,37	0,64	0,87	23,80
QS2	SY2	SC1	100,00	7,74	2250,00	528,80	112,80	776,54	0,83	0,75	41,30
QS2	SY4	SC1	77,45	12,46	2550,00	528,80	112,80	878,13	0,78	0,77	42,80
QS3	SY2	SC1	100,00	7,74	7100,00	1668,50	151,57	1920,88	0,93	0,59	21,20
QS3	SY4	SC1	77,45	12,46	7100,00	1668,50	151,57	2182,54	0,87	0,64	24,30
QS1	SY1	SC2	124,53	8,48	3216,00	755,76	226,90	1201,92	0,80	0,76	31,30
QS1	SY3	SC2	95,80	15,02	3216,00	755,76	226,90	1471,80	0,72	0,81	30,10
QS1	SY2	SC2	100,00	7,74	3216,00	755,76	226,90	1551,68	0,69	0,83	24,30
QS1	SY4	SC2	77,45	12,46	3216,00	755,76	226,90	1312,56	0,76	0,79	25,10
QS2	SY2	SC2	100,00	7,74	2550,00	528,80	112,80	541,48	0,99	0,65	45,60
QS2	SY4	SC2	77,45	12,46	2550,00	528,80	112,80	715,12	0,92	0,69	45,20
QS3	SY2	SC2	100,00	7,74	7100,00	1668,50	151,57	1919,96	0,93	0,59	21,20
QS3	SY4	SC2	77,45	12,46	7100,00	1668,50	151,57	1729,48	0,98	0,57	25,20

Tabelle 5-5: Vergleich von allen Nachweisen „BDK-Nachweis nach EC 3-6, Anhang A“.

Wie aus Tabelle 5-5 ersichtlich ist, vermindert sich das ideale Biegedrillknickmoment $M_{y,cr}$ bei allen Trägern mit der Schiene SC2 ausgerechnet mit [3]. Das ist darauf zurückzuführen, dass die Schiene SC2 und somit auch der gesamte Kranbahnträger einen höheren Lastangriff-punkt hat als die Träger mit der Schiene SC1. Durch den um 15mm größeren Hebelsarm entsteht durch die aufgebrachtten Horizontallasten eine größere Torsionsbeanspruchung. Das ideale Biegedrillknickmoment $M_{y,cr}$ hat Einfluss auf die bezogene Schlankheit (siehe Abbildung 5.38) und somit auch auf den Abminderungsfaktor χ_{LT} (siehe Abbildung 5.39) und in weiterer Folge die Auslastung (siehe Abbildung 5.40).

Der Kranbahnträger mit QS2 zeigt die kleinsten Werte der charakteristischen Momentenbeanspruchbarkeiten ($M_{y,Rk}$ und $M_{z,Rk}$) was zu der Größten Auslastung von allen drei Querschnitten führt (siehe Tabelle 5-5 und Abbildung 5.40).

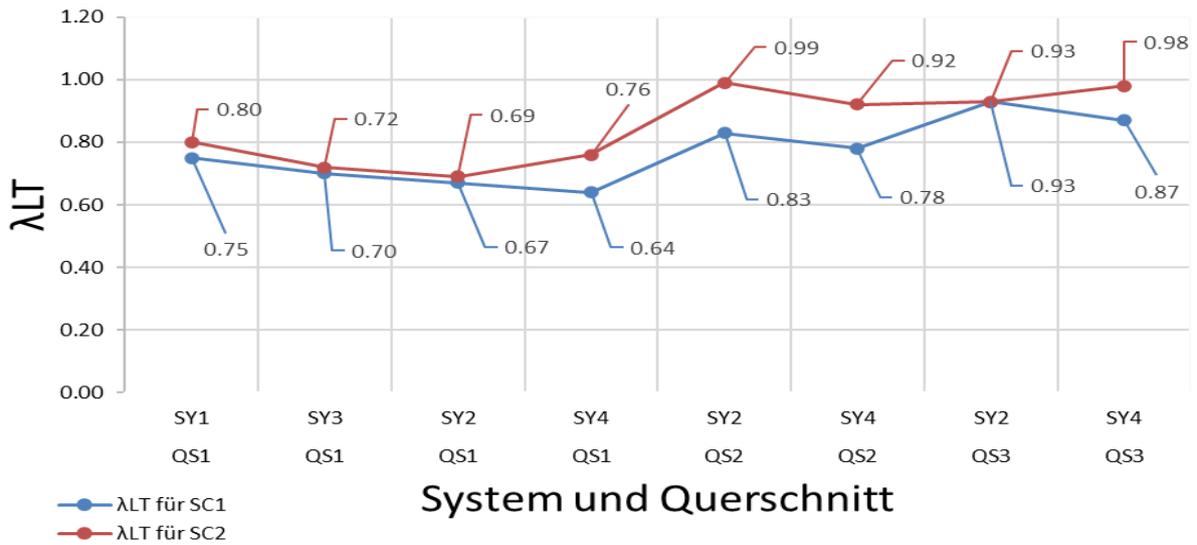


Abbildung 5.38: Die Werte von $\overline{\lambda}_{LT}$.

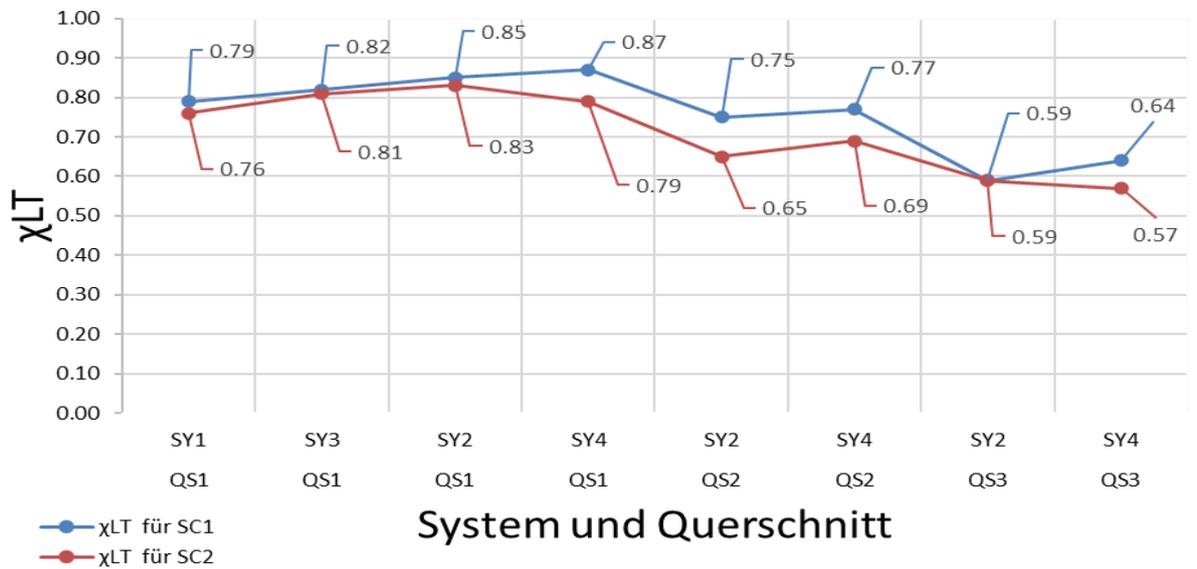


Abbildung 5.39 : Die Werte von χ_{LT} .

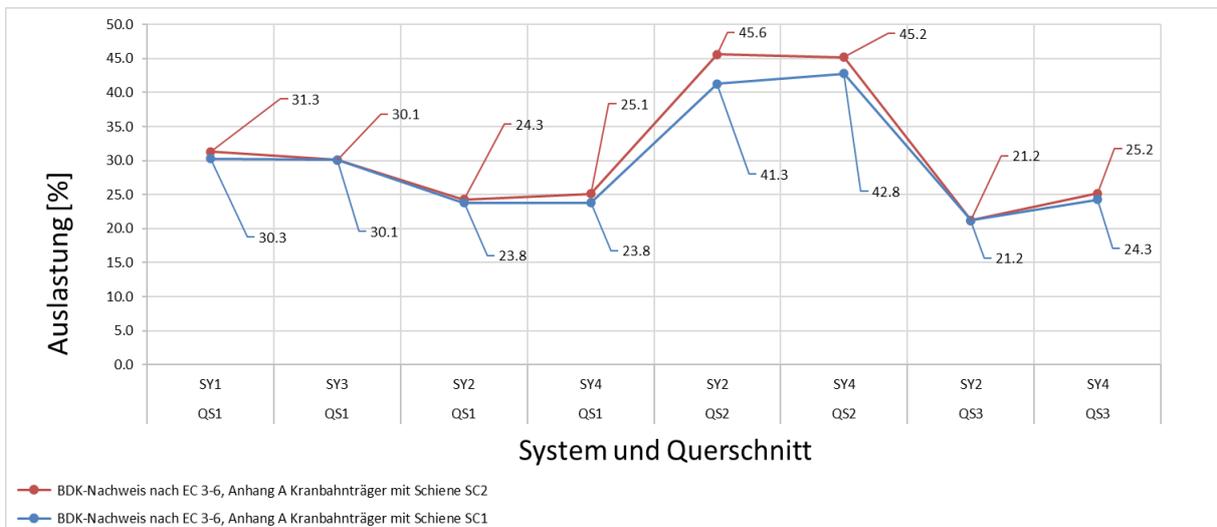


Abbildung 5.40: Auslastung für „BDK-Nachweis nach EC 3-6, Anhang A“.

6. Numerische-Berechnung

Die Numerische-Berechnung wird mit Hilfe des Programms ANSYS 19. [3] durchgeführt, dabei werden alle Kranbahnen mit Finiten Elementen modelliert.

So entwickelte Modelle unterliegen dann folgendem „Procedere“:

1. Lineare Eigenwert-Beuelanalyse (die Ergebnisse befinden sich in den Kapiteln 5.2.1 - Kapitel 5.2.8);
2. Skalierung der Eigenwert-Beuelanalyse mit Ersatzimperfection „C: e0“ (siehe Kapitel 7.) oder „D: e0“ (siehe Kapitel 8.);
3. GNIA-Berechnung wobei die Kraft $Q_{v,fyD}$ an der Fließgrenze gesucht wird, detailliert erklärt in Kapitel 7.;
4. GMNIA-Berechnung wobei die Traglast des Systems F_{Ult} beim Bruch ermittelt wird, detailliert erklärt in Kapitel 8.

6.1 Finite-Elemente-Modell

Die FE-Modelle die in der Masterarbeit entwickelt wurden, basieren auf folgenden Annahmen:

- Die entwickelten Modelle entsprechen den vier Systemen (SY1, SY2, SY3, SY4) aus dem Kapitel 3. Alle Träger sind symmetrisch, die Radlasten werden zentrisch auf der Kranbahnschiene aufgebracht. Dadurch wird die Rechenzeit pro Modell massiv reduziert.
- Die Materialparameter des Stahls, der in den Modellen benutzt wurde, sind mit einem E-Modul von 210.000 N/mm^2 und einer Poisson'schen Zahl von 0,3 definiert. Es wurde ein linear elastisches-idealplastisches Material für die Berechnung benutzt mit einer Fließgrenze ($f_{y,Ed} = 23,5 \text{ kN/cm}^2$) und einem Tangentenmodul $E_T = 0$ (siehe Abbildung 6.1).

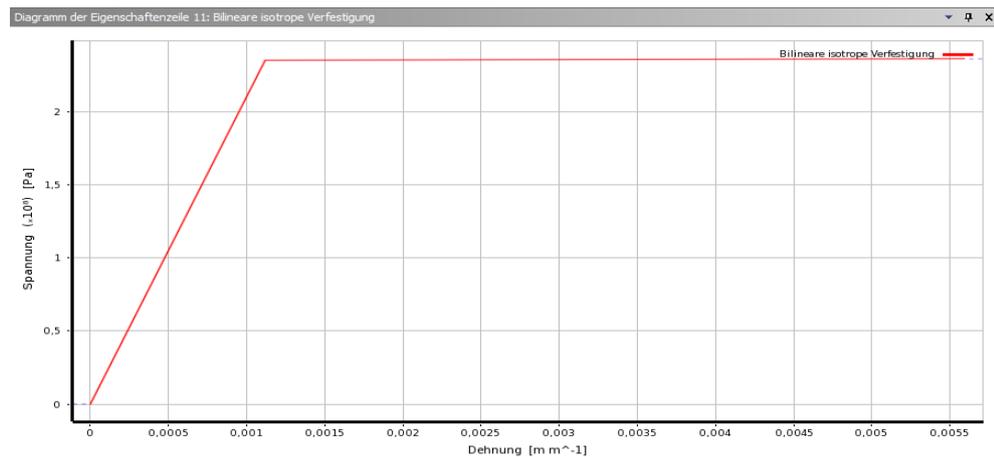


Abbildung 6.1: Das Linear elastisches-idealplastisches Material in Ansys 19. [3].

- Die Schienen wurden mit Volumenelementen und die Träger mit Schalenelementen modelliert. Dadurch konnte die Rechenzeit für das Gesamtmodell reduziert werden (siehe Abbildung 6.2).
- In der Berechnung werden keine Schweißnähte und keine Schienenhalterungen behandelt oder modelliert.

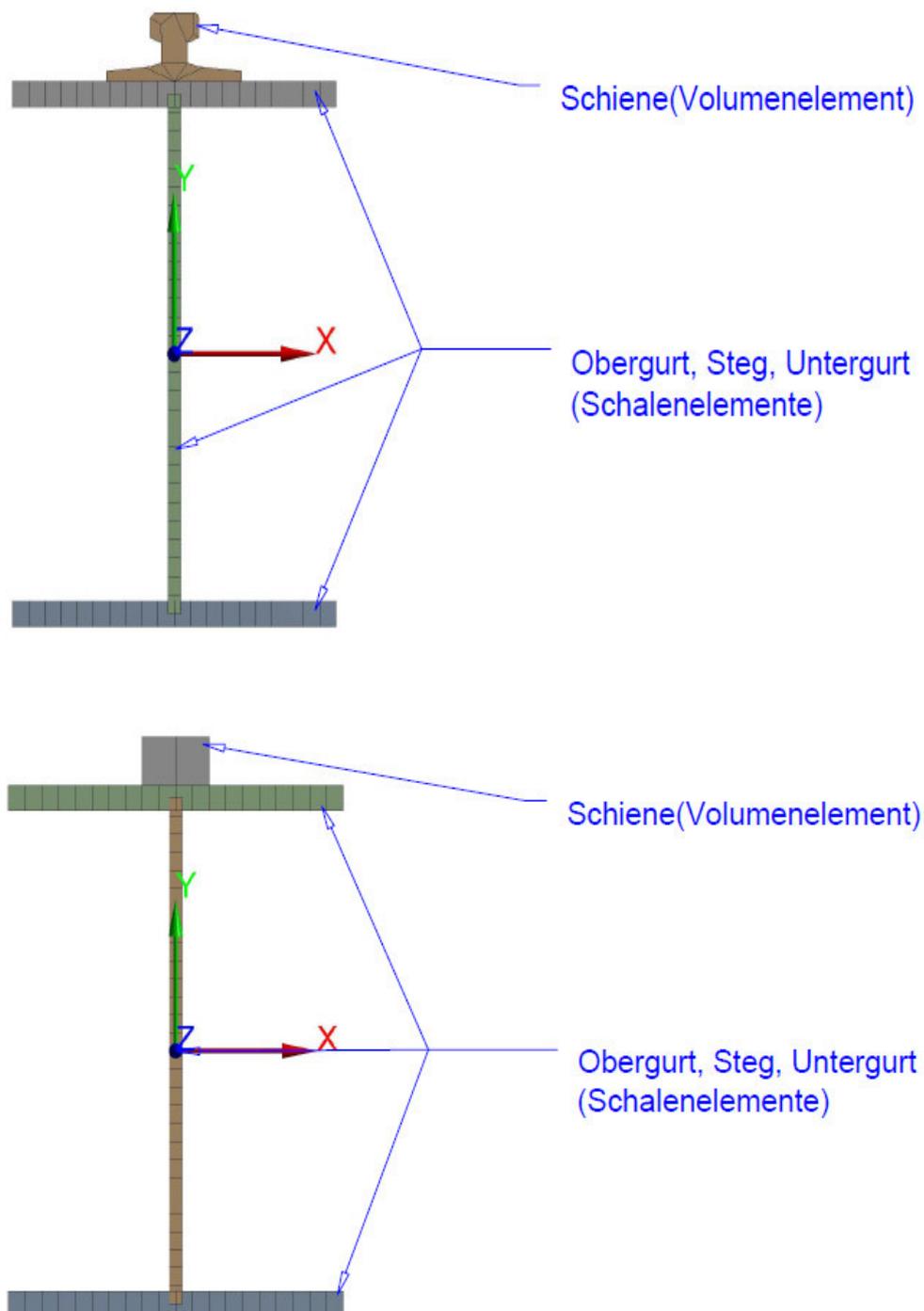


Abbildung 6.2: Aufbau vom Kranbahnträger im Ansys 19. [3].

- Bei den Berechnungsmodellen sind die Kranschiene als angeschweißt angenommen. Für die Verbindung zwischen Schiene (Volumenkörper) und Flansch (Schalenelement) wird in [3] ein „Kontaktbereich“ verwendet. Die Verbindung zwischen Flansch (Schalenelement) und Steg (Schalenelement) wird zusätzlich durch zahlreiche Netzverbindungen zwischen den Schalenelementen hergestellt (siehe Abbildung 6.3).

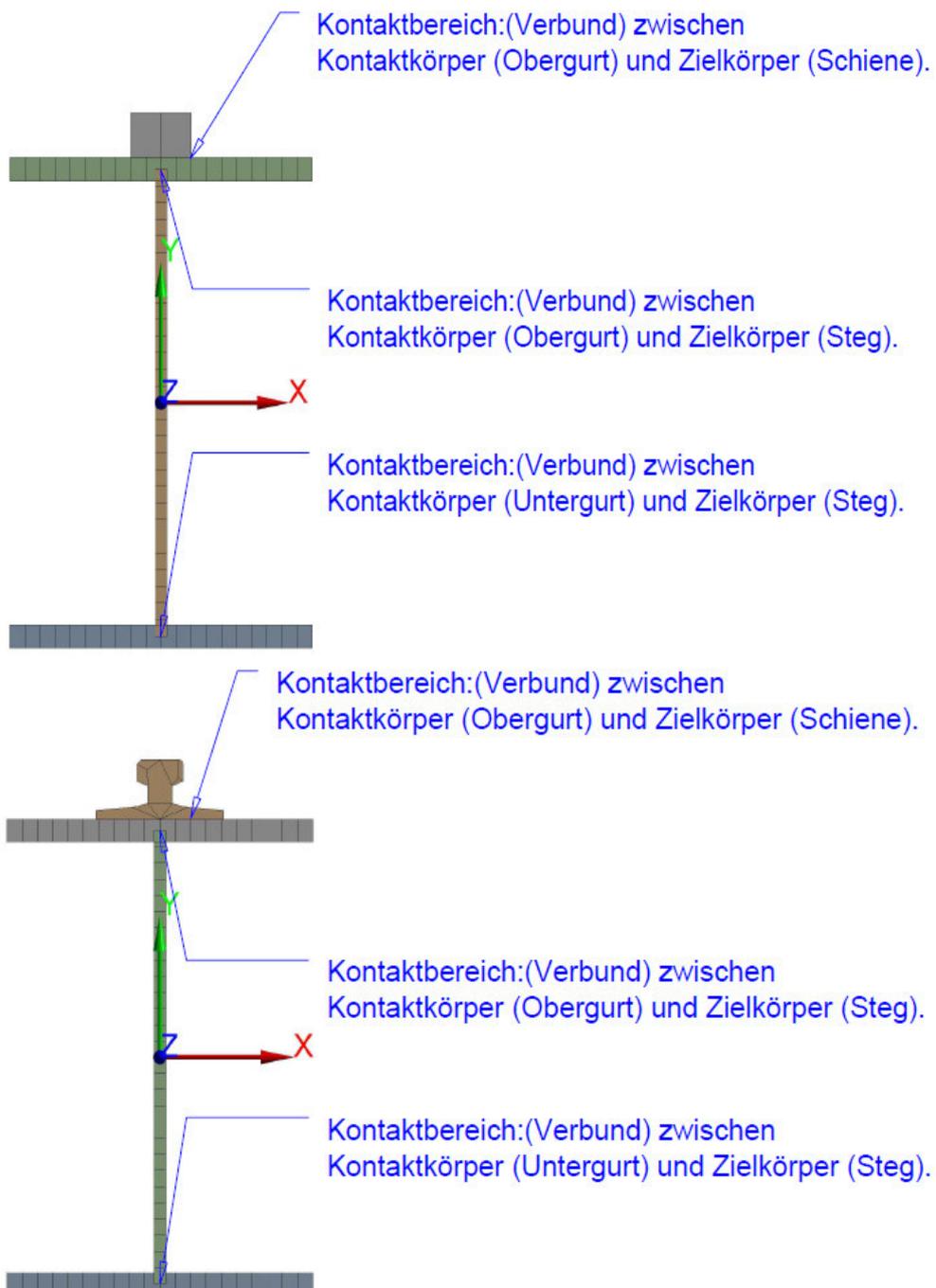


Abbildung 6.3: Kopplung zwischen Einzelteilen Obergurt-Steg -Untergurt und Obergurt-Schiene des FE-Modells [3].

- Die Gabellagerungen werden in [3] als „Externe Verschiebungen“ auf Kanten vom Kranbahnträger modelliert. Bei allen „Externen Verschiebungen“ wurde die Verhaltungsweise als verformbar gewählt und die Verschiebungen und Rotationen so gesperrt, dass sie einem Festlager oder Loslager entsprechen. Dabei wird die Wölbkrafttorsion nicht gesperrt (siehe Abbildung 6.4). Solch eine Lagerung verhindert Biegedrillknicken am Auflager.

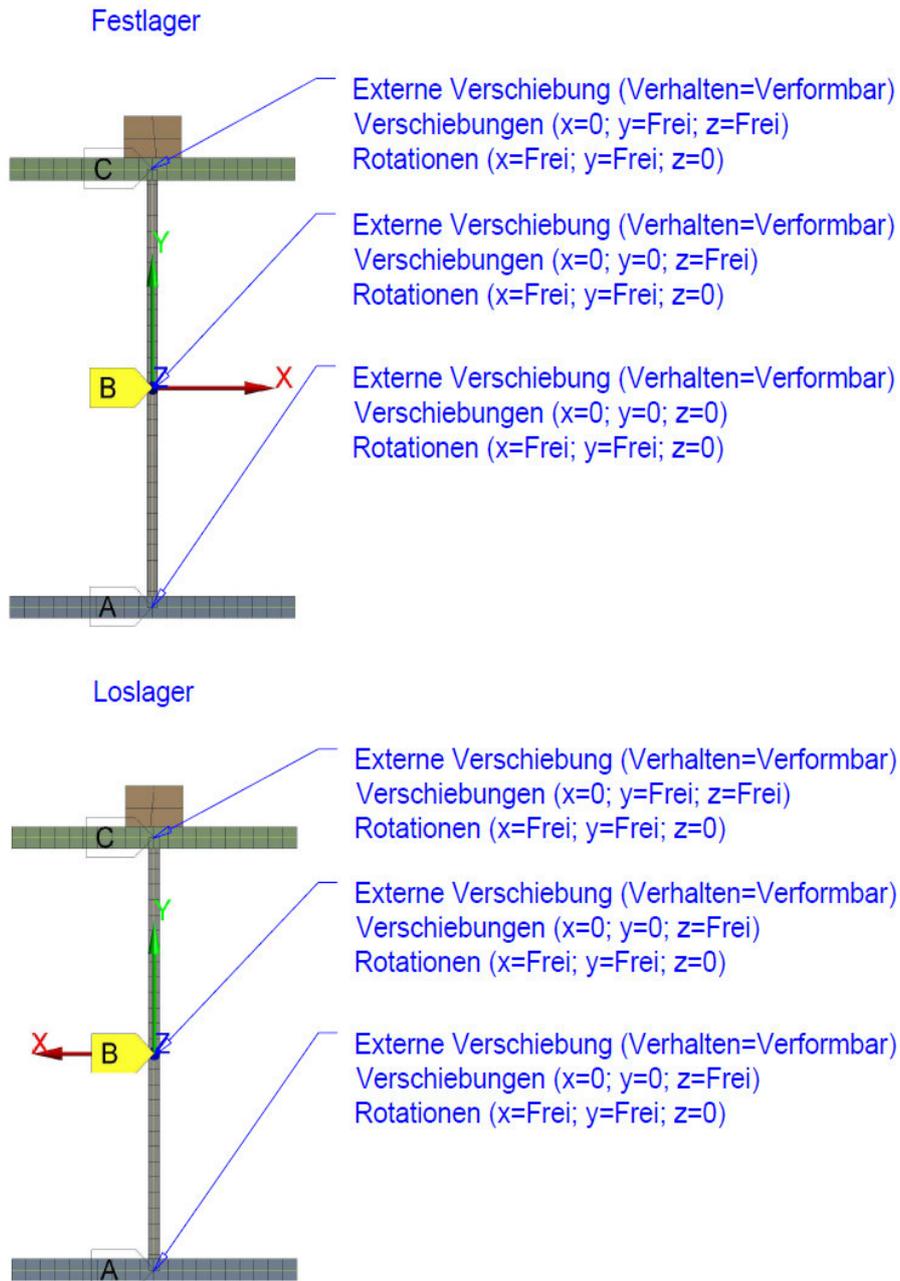


Abbildung 6.4: Gabellagerung (Festlager und Loslager) im [3].

- Die Physikvoreinstellung für das Netz ist auf Mechanik gesetzt und es wird eine quadratische Ansatzfunktion in der Berechnung benutzt. Bevor das Netz und die Blechdicken (Dicke der Schalenelemente) dem Modell zugewiesen werden sind im Modell nur die Mittelflächen von den Gurten und Steg zu sehen. Die Flächenelemente werden in einer maximalen Flächengröße von 15 mm angesetzt und die Volumenkörper (Schienen) mit einer Elementgröße von 100mm mit Wachstumsrate von 1,85 eingestellt (siehe Abbildung 6.5).

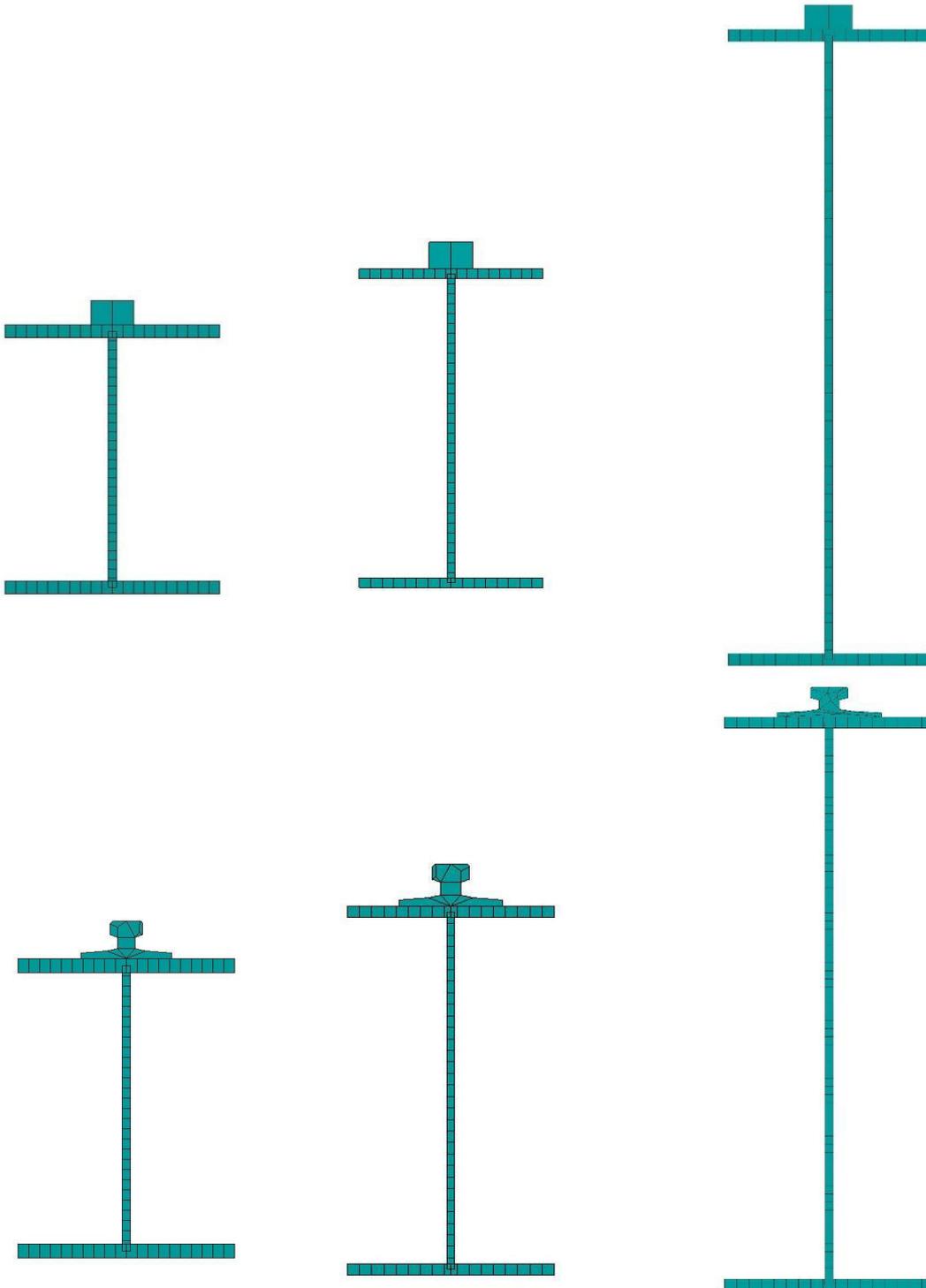


Abbildung 6.5: : Finite-Elemente-Netz für alle Kranbahnträger im [3].

Numerische-Berechnung

- Alle im Programm (Ansys 19.) [3] auftretenden Kräfte werden als Linienkräfte auf die Kranschiene aufgebracht, Singularitäten bei den Ergebnissen zu vermeiden (siehe Abbildung 6.6 und 6.7). Der Liniendruck wurde wie gefolgt umgerechnet:

$$Q_{V,Ed} = Q_V \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN} = 1181,3 \text{ N/mm}' \quad \text{für SC1 (Länge 60mm)}$$

$$Q_{H,Ed} = Q_H \cdot \gamma_Q = 8,9 \cdot 1,35 = 12,0 \text{ kN} = 200,25 \text{ N/mm}' \quad \text{für SC1 (Länge 60mm)}$$

$$Q_{V,Ed} = Q_V \cdot \gamma_Q = 52,5 \cdot 1,35 = 70,8 \text{ kN} = 1915,15 \text{ N/mm}' \quad \text{für SC2 (Länge 37mm)}$$

$$Q_{H,Ed} = Q_H \cdot \gamma_Q = 8,9 \cdot 1,35 = 12,0 \text{ kN} = 324,73 \text{ N/mm}' \quad \text{für SC2 (Länge 37mm)}$$

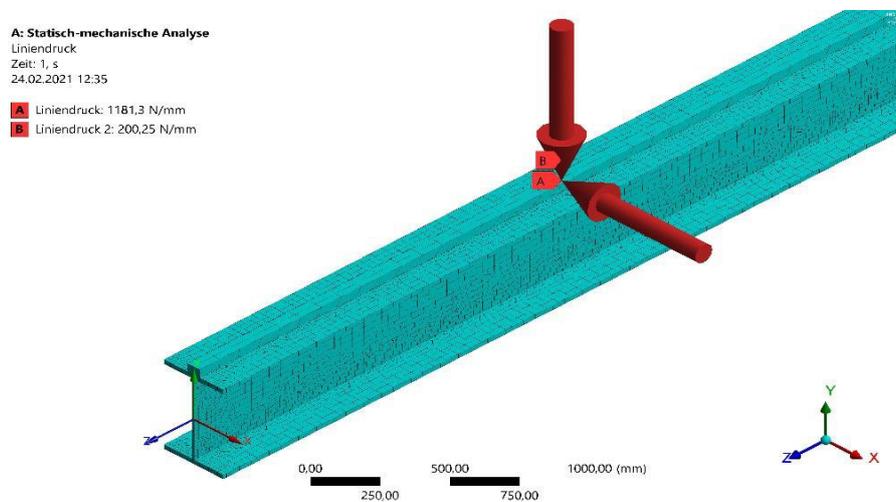


Abbildung 6.6: Linien Druck auf Schiene SC1.

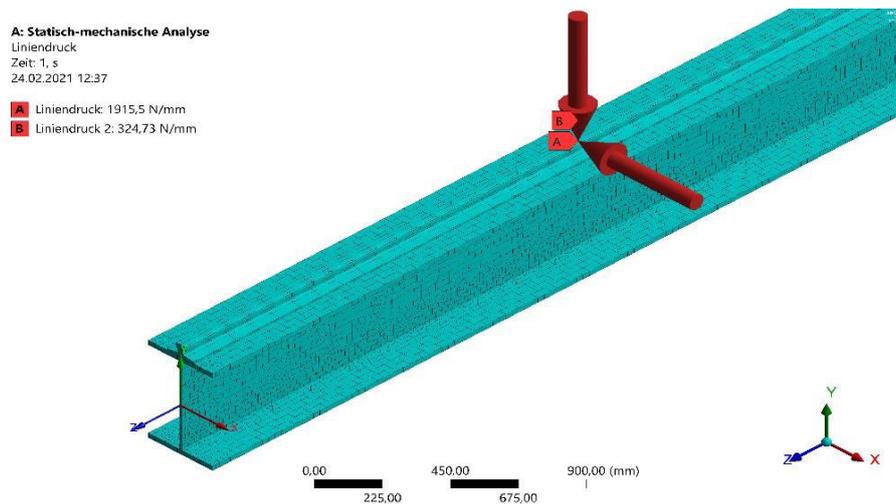


Abbildung 6.7: Linien Druck auf Schiene SC2.

7. GNIA-Berechnung

GNIA oder Geometrisch nichtlineare elastische Berechnungen mit Imperfektionen basiert auf der Wölbkrafttorsionstheorie II. Ordnung unter Ansatz von Imperfektionen und der nichtlinearen Theorie großer Verformungen. Vor der Berechnung erhält die Kranbahn eine Ersatzimperfektion „C: e0“ lt. [2] (siehe Abbildung 7.3) und die Randbedingungen werden so modelliert, dass die Wölbkrafttorsion nicht gesperrt ist (siehe Kapitel 6.1). Es folgt eine Berechnung bei der die Kraft $Q_{v,fy d}$ an der Fließgrenze errechnet wird, dabei werden große Verformungen zugelassen.

7.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2

- Nach der Eingabe von Material, Geometrie, Randbedingungen und Lasten mit einem Endwert (siehe Abbildung 7.1) folgt eine Lineare Analyse mit [3] auch Satisch-Mechanische Analyse genannt.

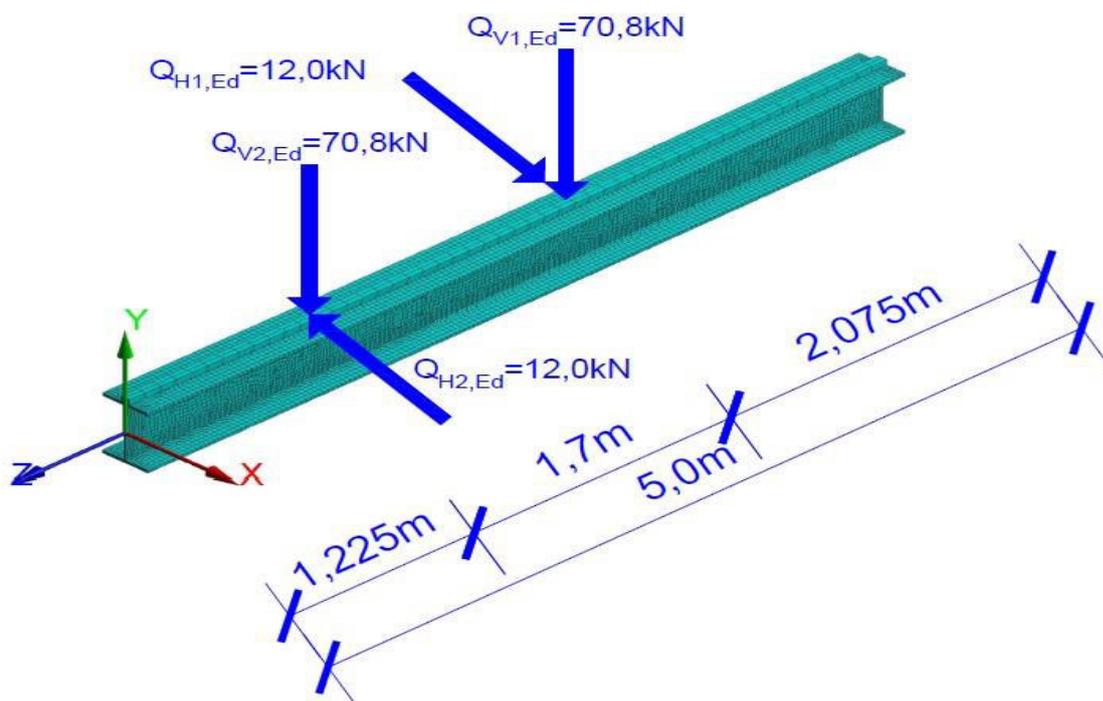
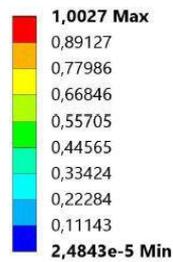


Abbildung 7.1: Lastaufstellung für die Lineare Berechnung von QS1 SY1 SC1.

Ein so berechneter Kranbahnträger wird weiter mittels einer Eigenwert-Beulanalyse, welche mit der Satisch-Mechanischen Analyse gekoppelt ist berechnet. Aus dieser linearen Elastischen Analyse wird die Gesamtverformung als Ergebnis ausgegeben. Die Gesamtverformung ist die erste Eigenform des Kranbahnträgers mit einem passenden Lastmultiplikator (siehe Abbildung 7.2).

B: Eigenwert-Beulanalyse

Gesamtverformung
 Typ: Gesamtverformung
 Lastmultiplikator (Nonlinear): 10,595
 Einheit: mm
 20.02.2021 12:55



Lastmultiplikator=10,595
 $M_{Cr,y} = 1405,09 \text{ kNm}$

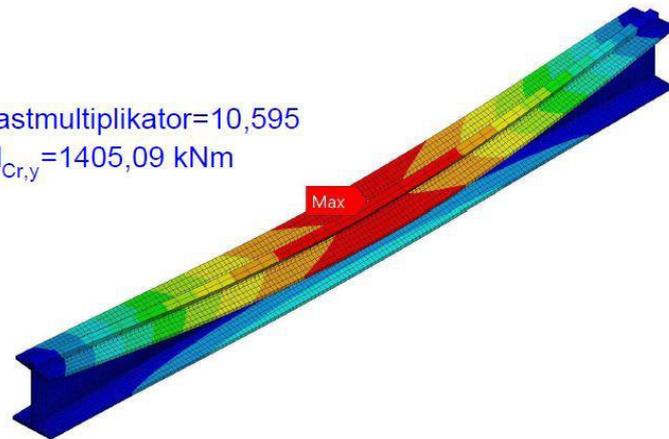


Abbildung 7.2: Erste Eigenform von QS1 SY1 SC1 mit Lastmultiplikator [3].

- Der Kranbahnträger mit der ersten Eigenform zeigt im Bereich des Maximums eine Verformung in Höhe von 1mm (siehe Abbildung 7.2).
- Für die weiteren Berechnungen werden noch zwei Statisch-Mechanische Analysen herangezogen und mit der vorigen Berechnung verbunden. Die Statisch-Mechanische Analyse mit der Beschriftung „C:“ wird zu der GNIA-Berechnung, die andere mit Beschriftung „D:“ wird zu der GMNIA-Berechnung die weiter in Kapitel 8. bearbeitet wird (siehe Kapitel 8.1 bis 8.10).
- Vor der weiteren Berechnung wird die Statisch-Mechanische Analyse „C:“ mit der passenden Ersatzimperfektion „C: e0“ skaliert (siehe Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-2).

Knicklinie nach Tabelle 6.2	elastische Berechnung	plastische Berechnung
	e_0/L	e_0/L
a ₀	1/350	1/300
a	1/300	1/250
b	1/250	1/200
c	1/200	1/150
d	1/150	1/100

Dabei dürfen die Ersatzimperfektionen für $\bar{\lambda}_{LT} < 0,7$ und $\bar{\lambda}_{LT} > 1,3$ halbiert werden.

Tabelle 7-1:Bemessungswert der Ersatzimperfektion e_0/L von Buteilen [2], Tab.5.1

Kranbahnquerschnitt	Knicklinie nach Tabelle 6.2	elastische Berechnung C:e0
QS1	c	500/200= 2,5 cm
QS2	c	500/200= 2,5 cm
QS3	d	500/150= 3,33 cm

Tabelle 7-2: Bemessungswerte der Erstzimperfektionen „C:e0“ für die einzelnen Kranbahnquerschnitte.

- Die Werte für $\overline{\lambda}_{LT}$ wurden aus dem Kapitel 5. entnommen und die Ersatzimperfektionen „C: e0“ entsprechend halbiert (siehe Tabelle 7-3).

Kranbahnträger			λ_{LT}	Ersatzimperfektion C:e0 [cm]
QS1	SY1	SC1	0,75	2.50
QS1	SY3	SC1	0,7	2.50
QS1	SY2	SC1	0,67	1.25
QS1	SY4	SC1	0,64	1.25
QS2	SY2	SC1	0,83	2.50
QS2	SY4	SC1	0,78	2.50
QS3	SY2	SC1	0,93	3.33
QS3	SY4	SC1	0,87	3.33
Kranbahnträger			λ_{LT}	Ersatzimperfektion C:e0 [cm]
QS1	SY1	SC2	0,8	2.50
QS1	SY3	SC2	0,72	2.50
QS1	SY2	SC2	0,69	1.25
QS1	SY4	SC2	0,76	2.50
QS2	SY2	SC2	0,99	2.50
QS2	SY4	SC2	0,92	2.50
QS3	SY2	SC2	0,93	3.33
QS3	SY4	SC2	0,98	3.33

Tabelle 7-3: Ersatzimperfektion „C:e0“ für alle berechneten Kranbahnträger.

- Die Werte „C: e0“ aus der Abbildung 7.3 werden zum Skalierfaktor der Statisch-Mechanischen Analyse „C:“ und ergeben die Vorverformung.

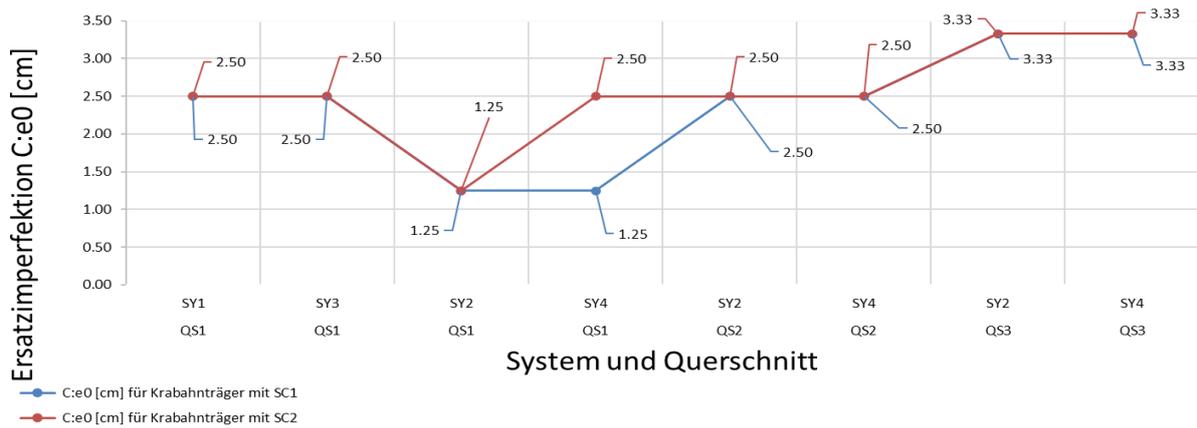


Abbildung 7.3: Diagramm der Ersatzimperfectionen „C:e0“.

- Ein derart verformter Kranbahnträger wird mit ständig gesteigerten vertikalen Kräften belastet, wobei die Horizontalkräfte konstant gehalten werden. Für die Belastung der Kranbahnträger wird in der Analyseinstellung eine Schrittsteuerung durch Substeps eingestellt, dies bedeutet, dass man mit einem Tausendstel der Kraft anfängt und mit tausend Iterationen rechnet bis der Bruch eintritt (siehe Abbildung 7.4).

C: C:
 Liniendruck 3
 Zeit: 1, s
 24.02.2021 13:04

- A Liniendruck 3: 48333 N/mm
- B Liniendruck 4: 16,67 N/mm
- C Liniendruck 5: 48333 N/mm
- D Liniendruck 6: 16,67 N/mm

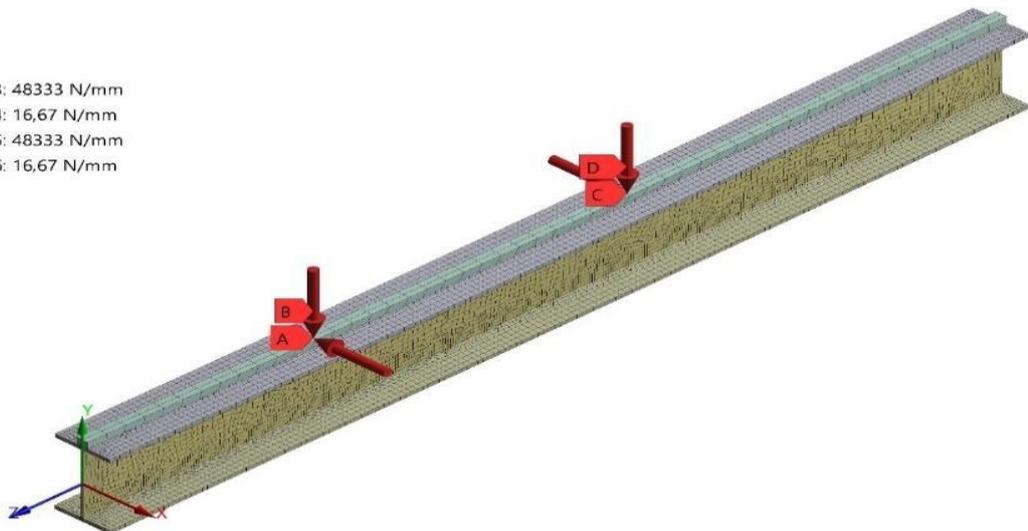


Abbildung 7.4: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC1.

- Die Statisch-Mechanische Analyse „C:“ wird noch mit Großen Verformungen die in der Solver-Steuerung vorgesehen, sodass es auch Nichtlinear berechnet wird.

C: C:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 2,4e-002
 23.03.2021 12:21

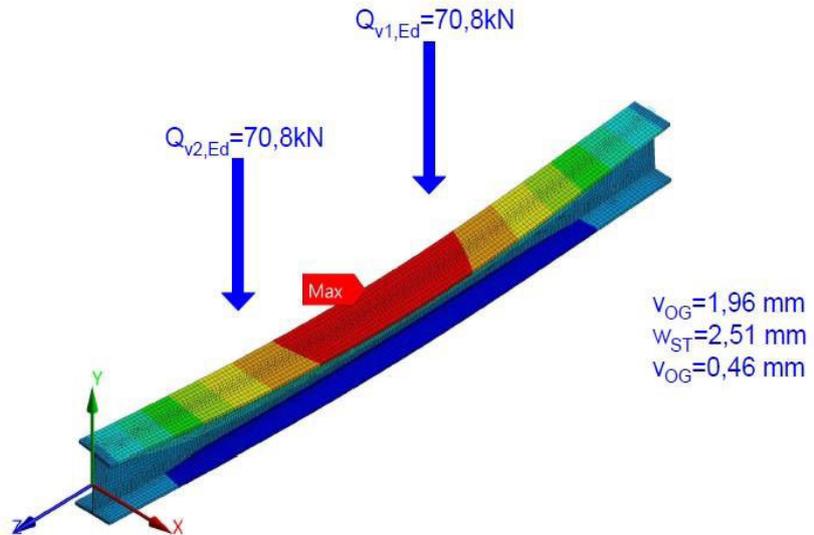
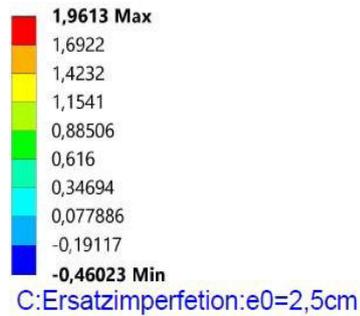


Abbildung 7.5: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

Für die GNIA-Berechnung werden die Vertikallasten so lange gesteigert bis es an der Randfaser zum Fließen kommt und die Elastizitätsgrenze mit Kraft $Q_{v,fy,d}$ erreicht wird (siehe Abbildung 7.5).

C: C:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 8,2e-002
 23.03.2021 12:17

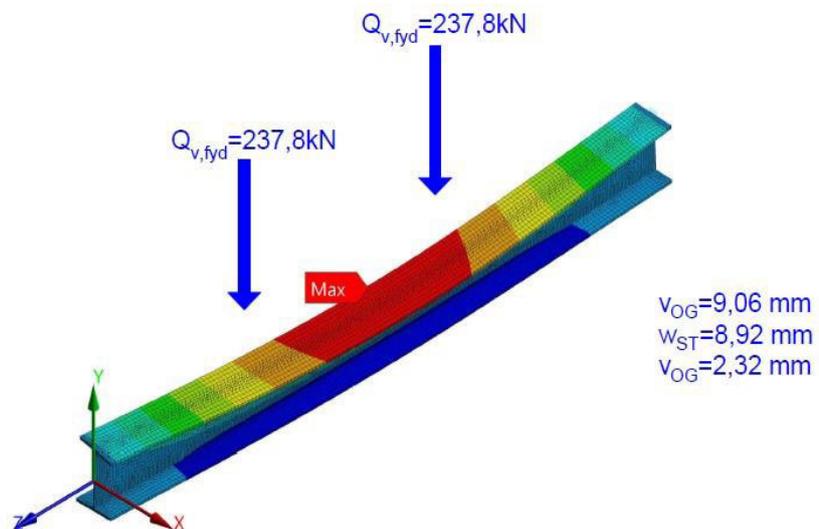
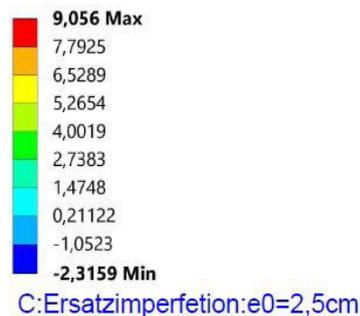


Abbildung 7.6: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fy,d}$ an der Elastizitätsgrenze.

Das $F-\Delta$ Diagramm wird aus den Ergebnissen der Statisch-Mechanische Analyse „C:“ zusammengestellt, um ein besseres Bild der GNIA-Berechnung zu schaffen, es enthält Verformungen von Obergurt (v_{OG}), Steg (v_{ST}) und Untergurt (v_{UG}) (siehe Abbildung 7.7).

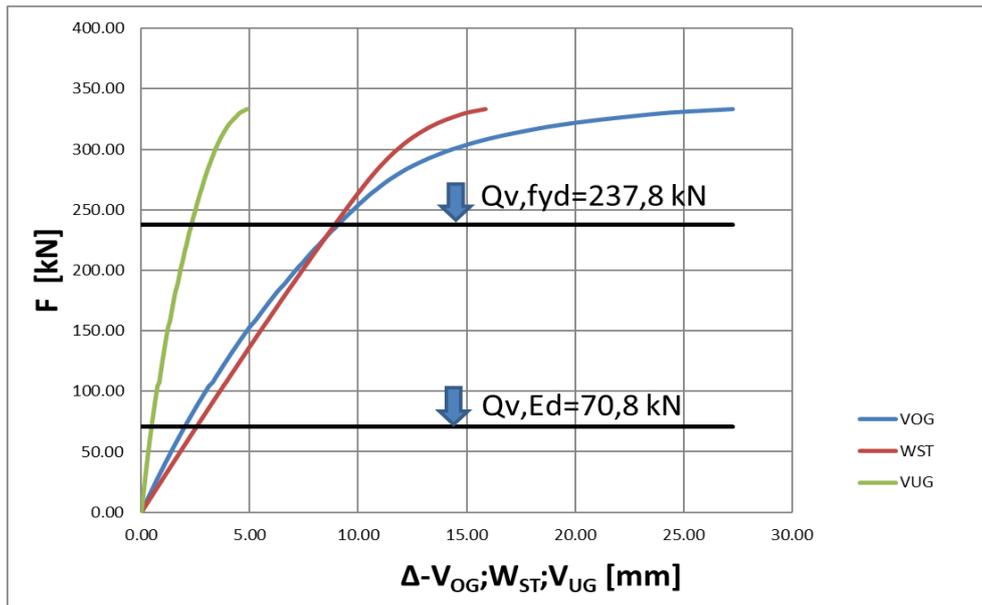


Abbildung 7.7: F–Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC1 .

- Die Auslastung folgt aus dem Vergleich der Kraft $Q_{v,Ed}$ und der Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze wie in der Gleichung (16).

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = [\%] \quad (16)$$

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{237,8} \cdot 100 = 29,8\%$$

- Um den Umfang dieser Arbeit zu reduzieren, wurde nur im Abschnitt 7.1 die Komplette GNIA-Berechnung für den Kranbahnträger QS1SY1SC1 gezeigt, für die nachfolgenden Kranbahnträger werden die Ergebnisse der Gesamtverformung mit passenden F–Δ Diagrammen und der Auslastung dargestellt.
- Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse die vor der GNIA -Berechnung gemacht werden befinden sich in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.8.

- Kranbahnträger QS1 SY1 SC2:

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

24.02.2021 14:20

- A** Liniendruck 3: 81081 N/mm
- B** Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C** Liniendruck 5: 81081 N/mm
- D** Liniendruck 6: 27,027 N/mm

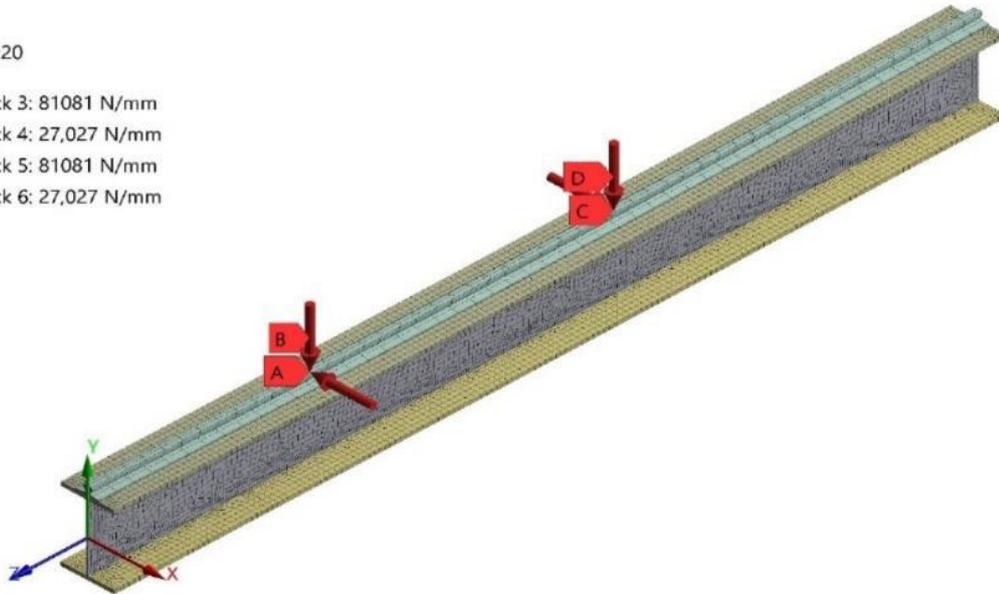


Abbildung 7.8: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

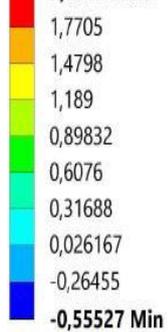
Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,3e-002

23.03.2021 12:31

2,0612 Max



C: Ersatzimperfektion: $e_0=2,5\text{cm}$

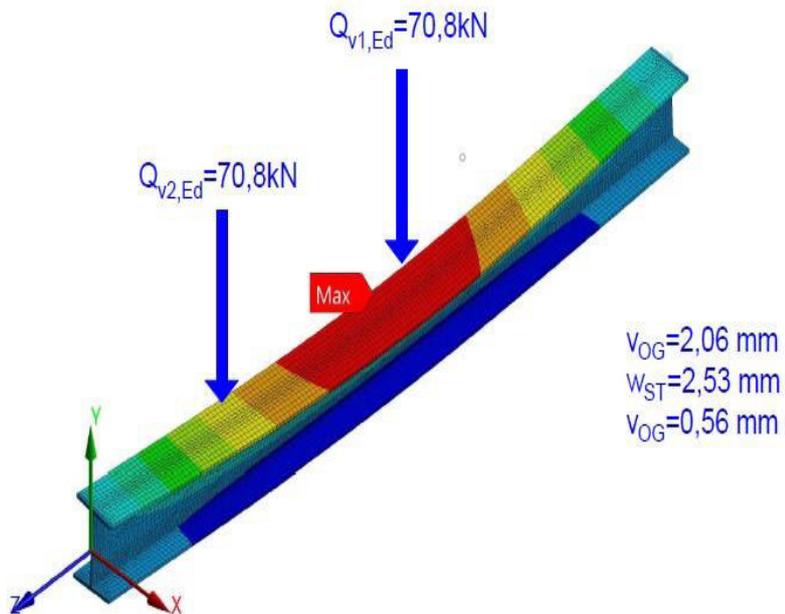


Abbildung 7.9: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 7,7e-002

23.03.2021 12:31

9,2859 Max

7,9656

6,6453

5,325

4,0047

2,6844

1,3641

0,043781

-1,2765

-2,5968 Min

C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

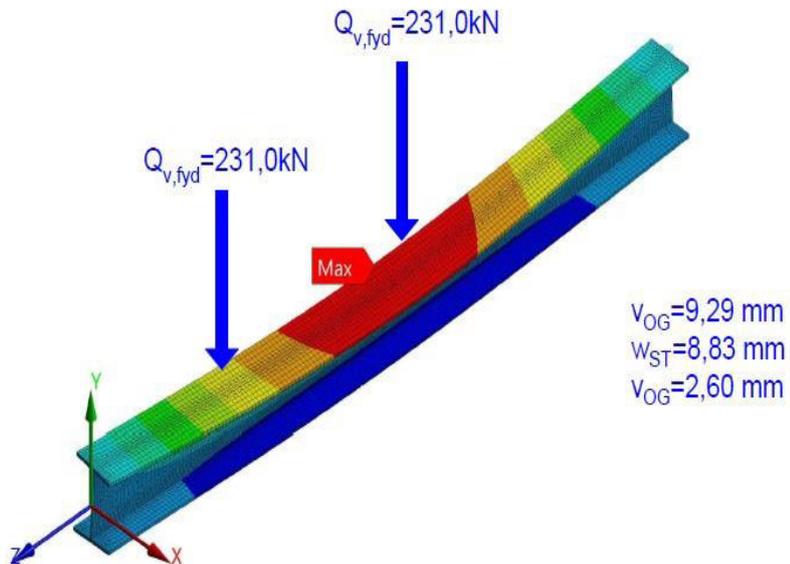


Abbildung 7.10: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

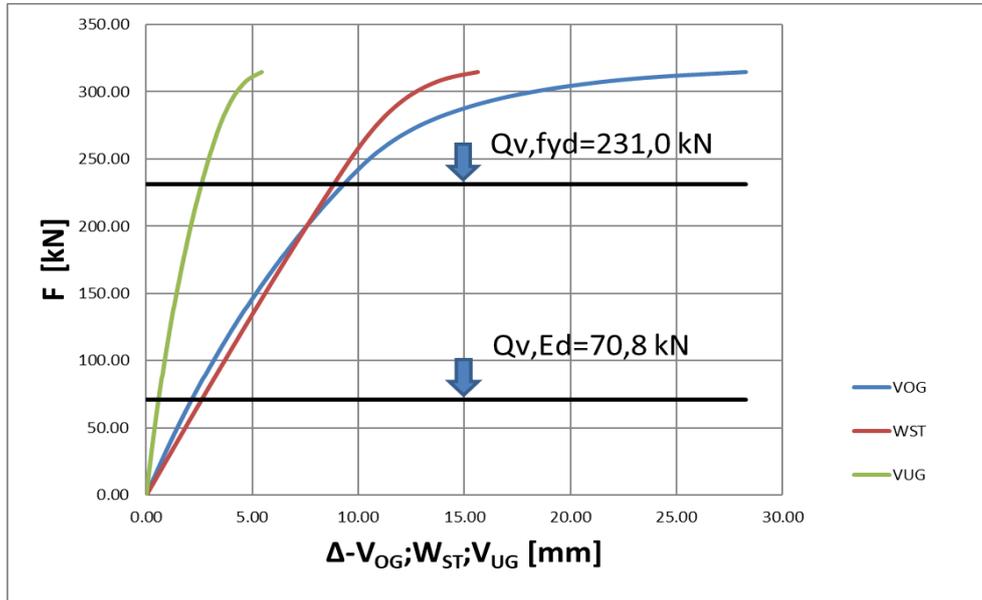


Abbildung 7.11: F- Δ Diagramm für GNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC2.

$$\text{Auslastung} = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{231,0} \cdot 100 = 30,6\%$$

7.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2

- Kranbahnträger QS1 SY2 SC1

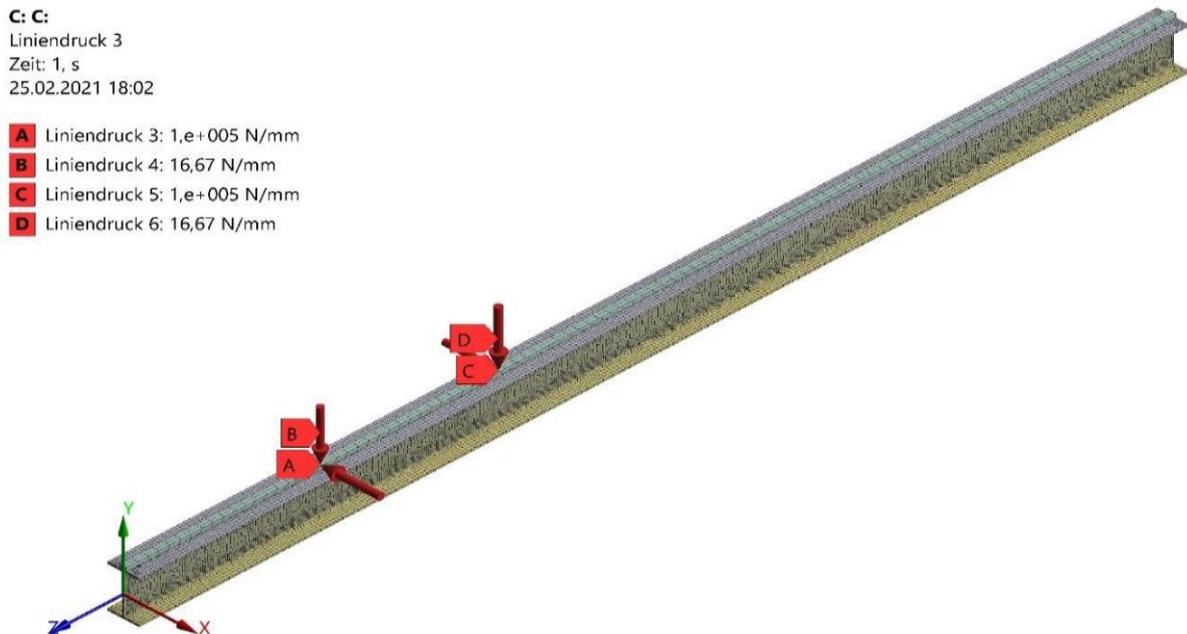


Abbildung 7.12: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC1.

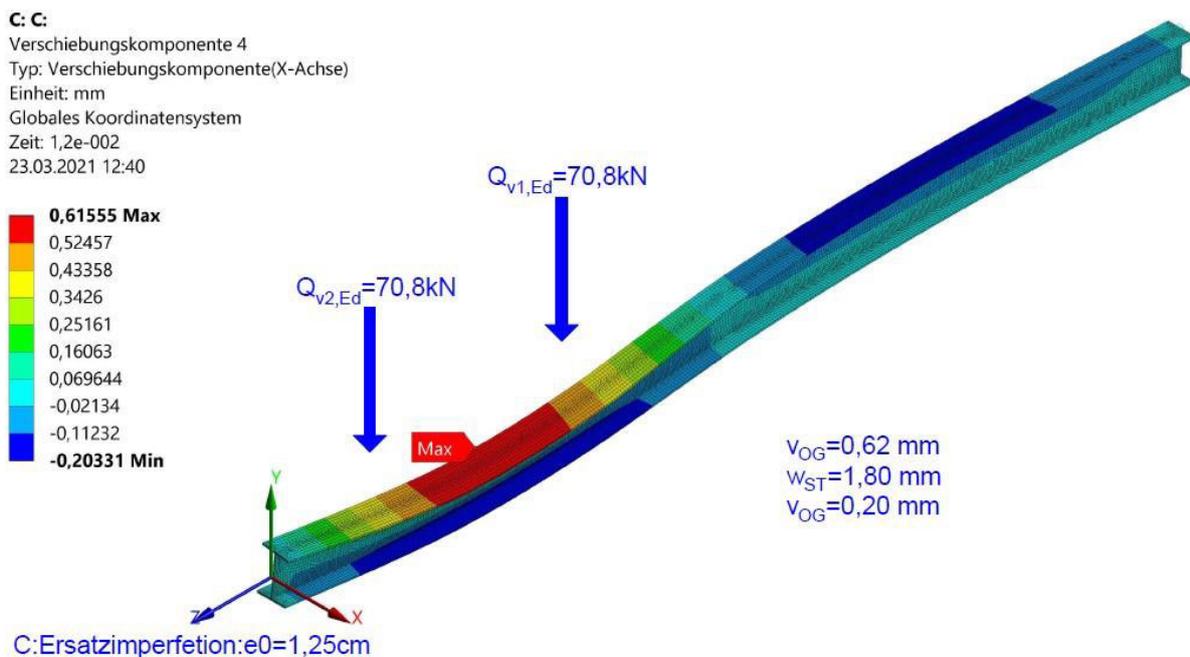


Abbildung 7.13: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

GNIA-Berechnung

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 6,3e-002

23.03.2021 12:41

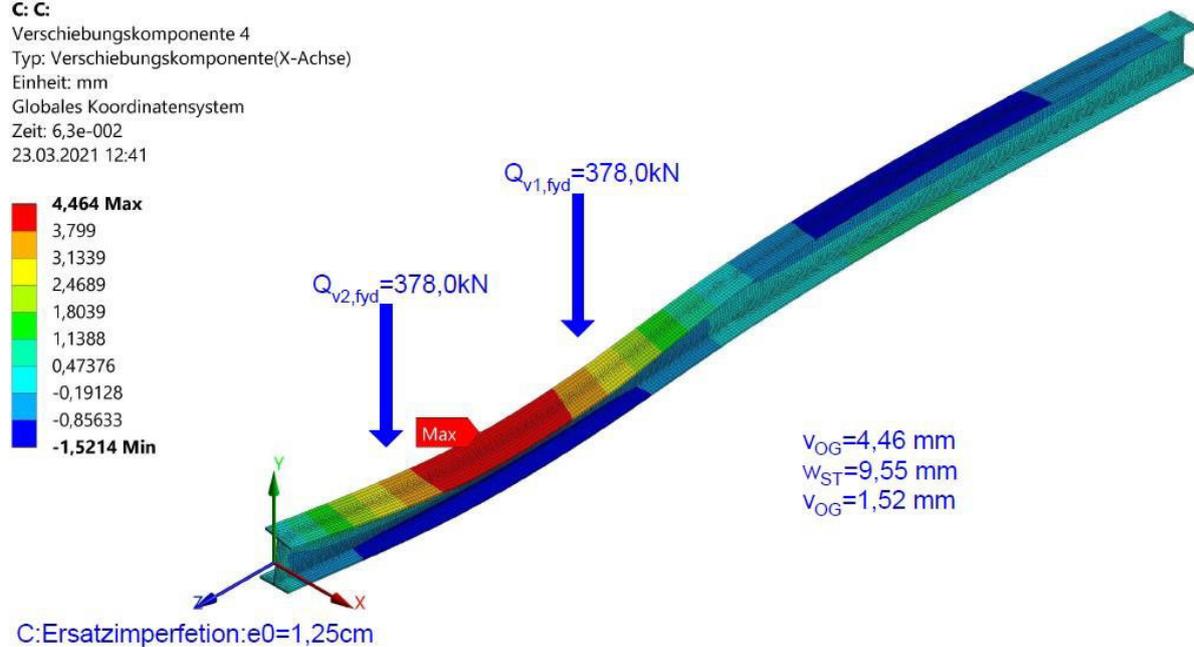
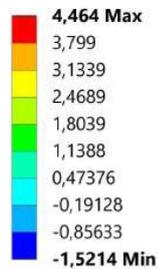


Abbildung 7.14: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

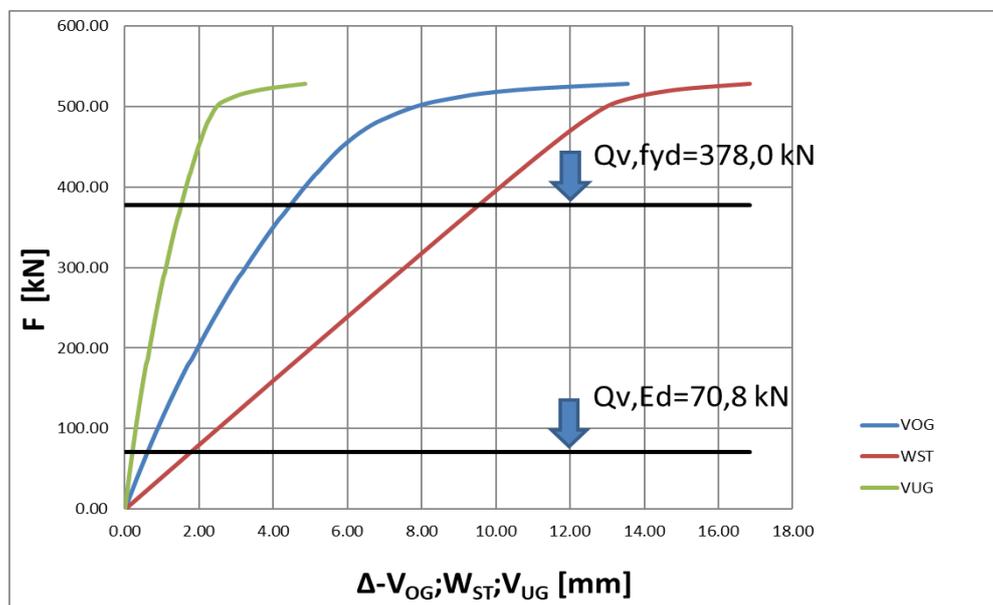


Abbildung 7.15: F- Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC1.

$$\text{Auslastung} = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{378,0} \cdot 100 = 18,7\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY2 SC2:

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:16

- A** Liniendruck 3: 1,0811e+005 N/mm
- B** Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C** Liniendruck 5: 1,0811e+005 N/mm
- D** Liniendruck 6: 27,027 N/mm

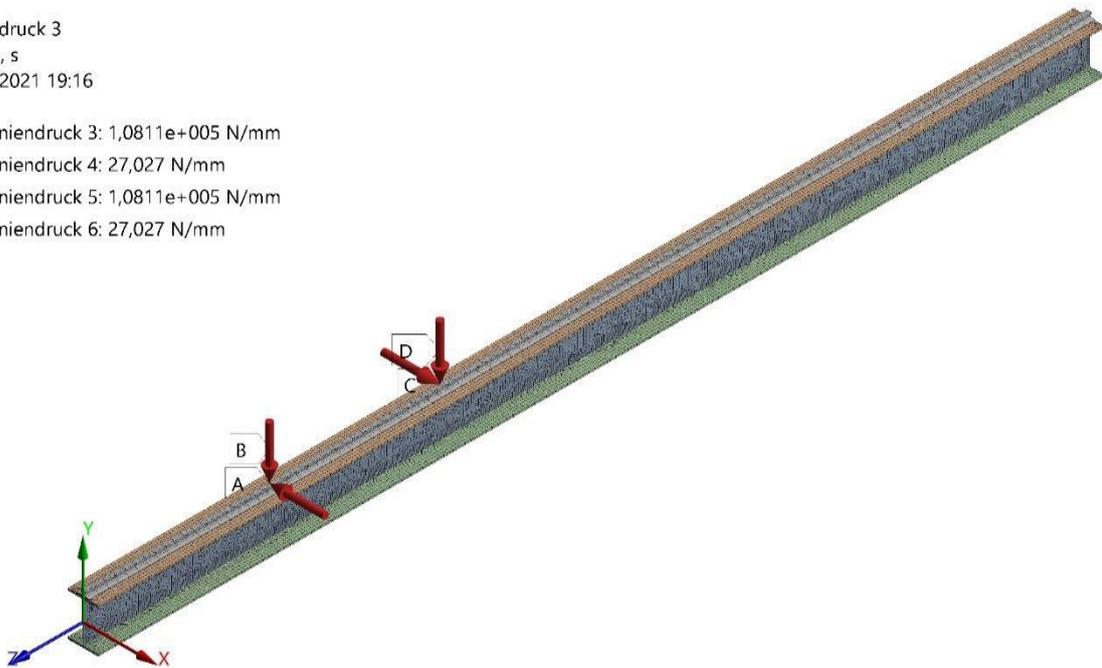


Abbildung 7.16: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,8e-002

23.03.2021 12:49

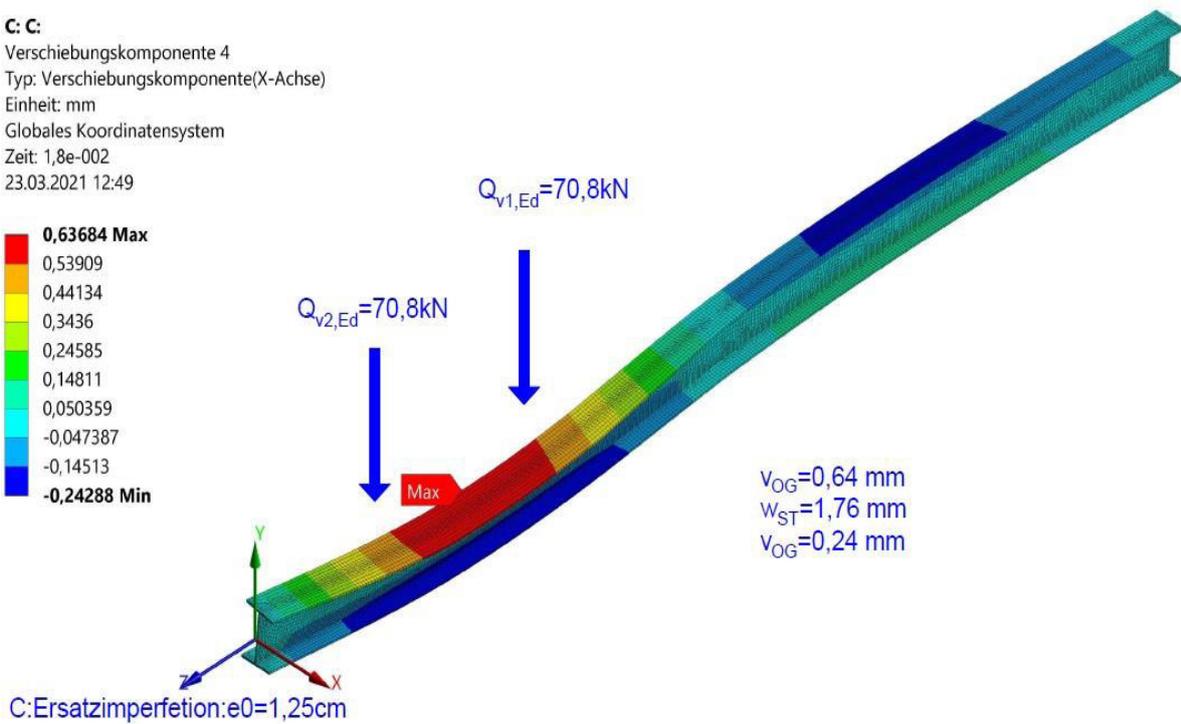
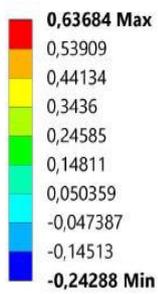


Abbildung 7.17: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

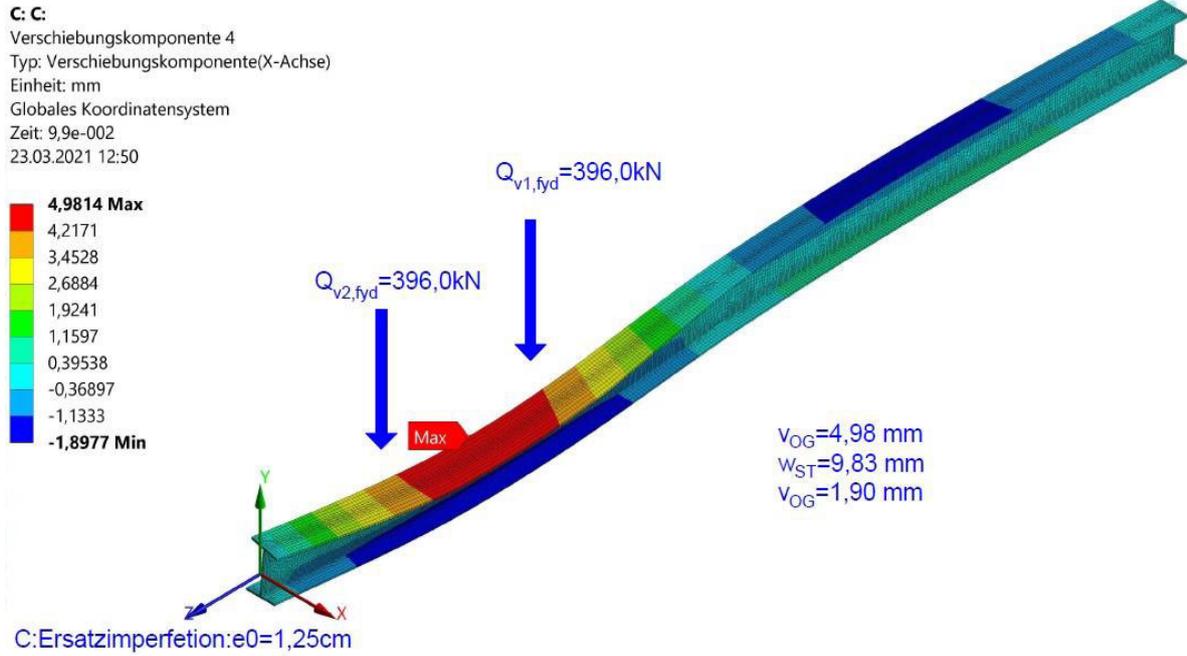


Abbildung 7.18: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

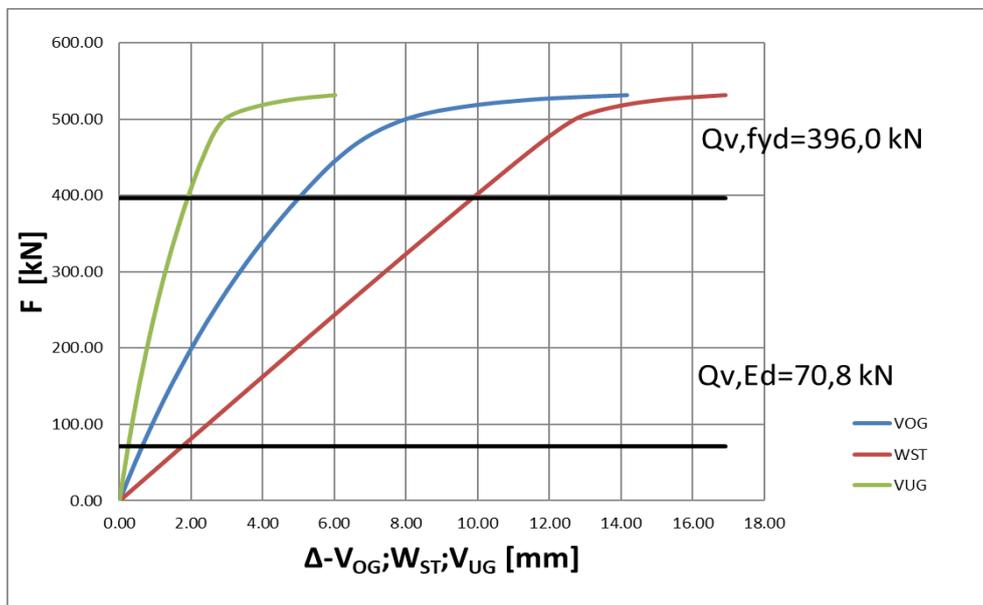


Abbildung 7.19: F– Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC2.

$$\text{Auslastung} = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{396,0} \cdot 100 = 17,9\%$$

7.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2

- Kranbahnträger QS1 SY3 SC1:

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:07

A Liniendruck 3: 90000 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

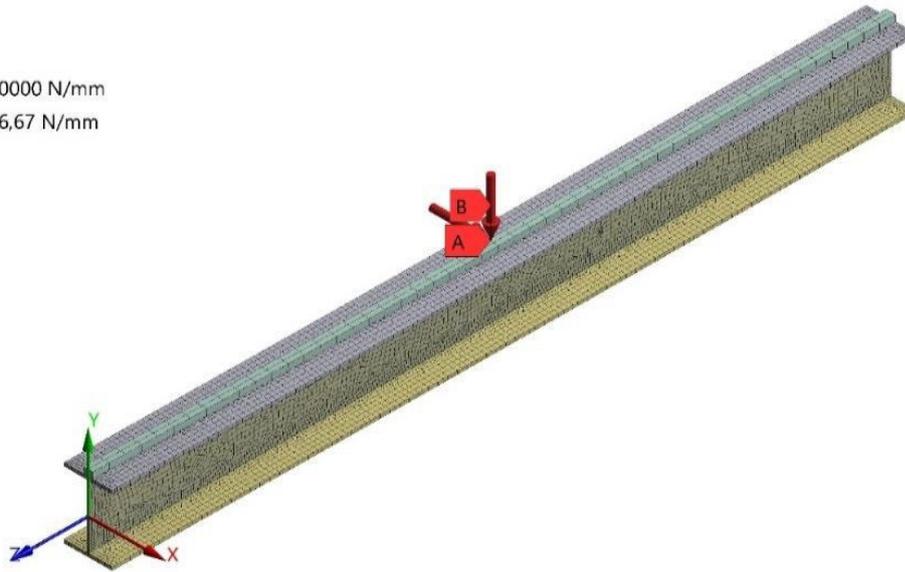


Abbildung 7.20: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC1.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 12:57

1,1983 Max

1,0295

0,8606

0,69174

0,52288

0,35402

0,18516

0,016302

-0,15256

-0,32142 Min

C: Ersatzimperfection: e0=2,5cm

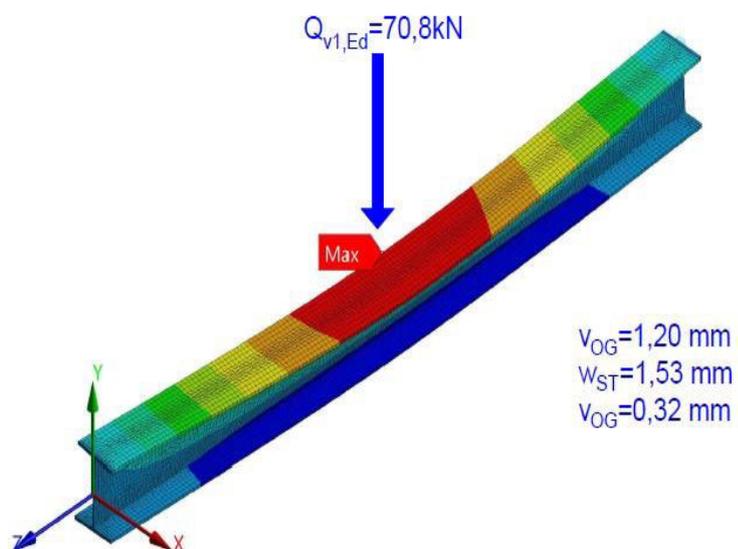


Abbildung 7.21: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 6,e-002

23.03.2021 12:59

7,2358 Max

6,2032

5,1706

4,138

3,1053

2,0727

1,0401

0,0074212

-1,0252

-2,0578 Min

C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

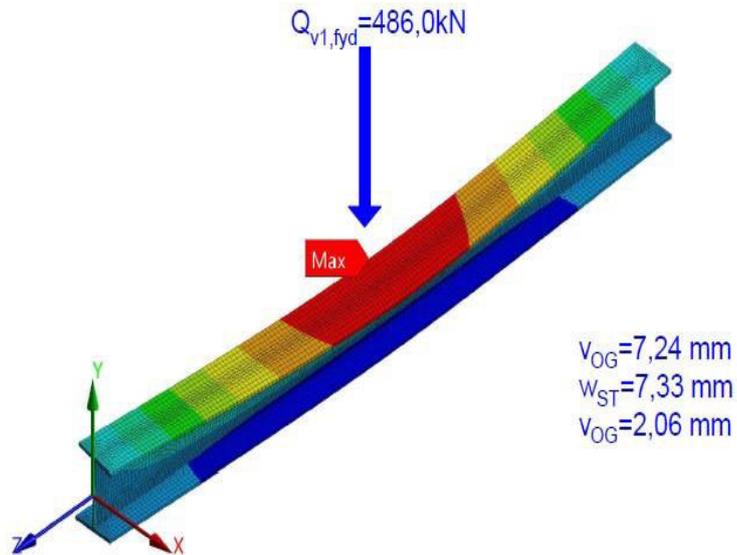


Abbildung 7.22: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

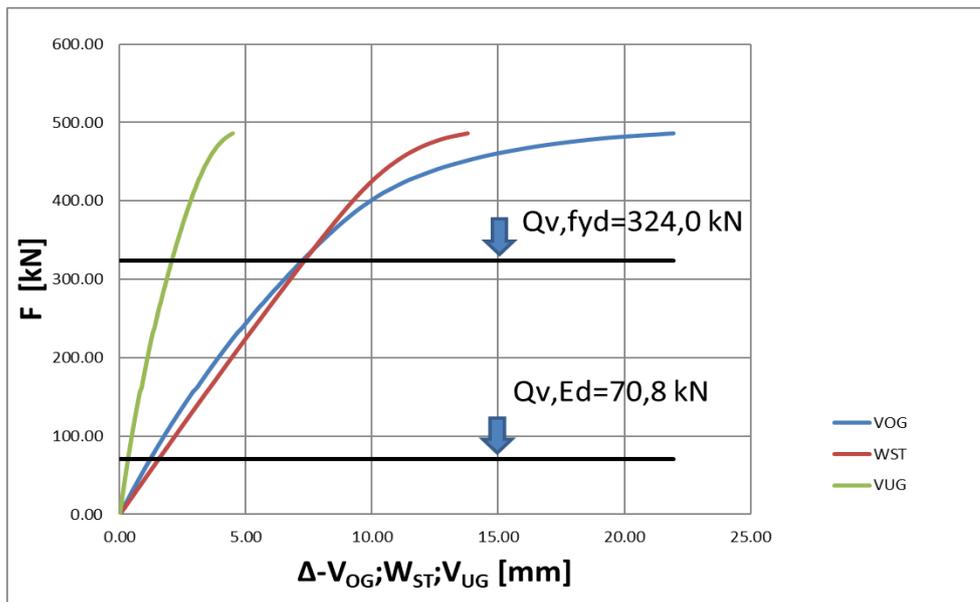


Abbildung 7.23: F–Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{324,0} \cdot 100 = 21,9\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY3 SC2:

C: C:

Liniendruck 3
 Zeit: 0,89722 s
 25.02.2021 18:46

- A** Liniendruck 3: 96996 N/mm
- B** Liniendruck 4: 24,249 N/mm

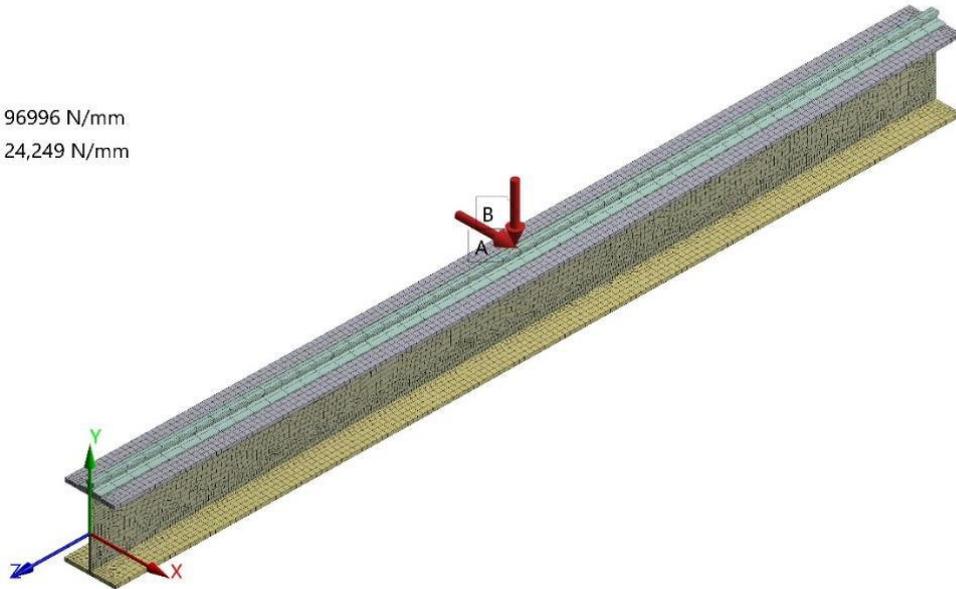
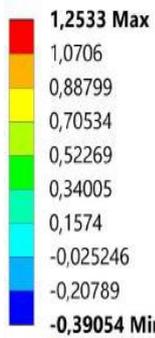


Abbildung 7.24: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 1,8e-002
 23.03.2021 13:05



C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

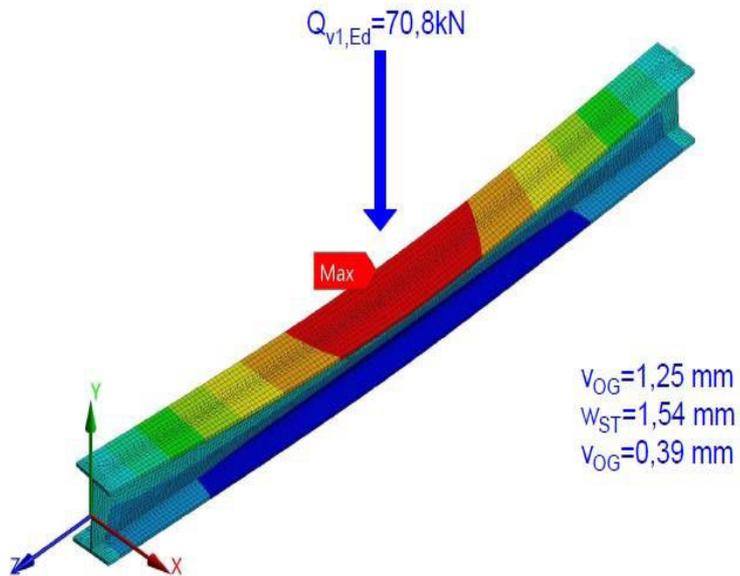


Abbildung 7.25: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

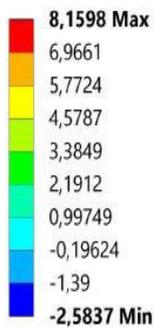
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 8,7e-002

23.03.2021 13:07



C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

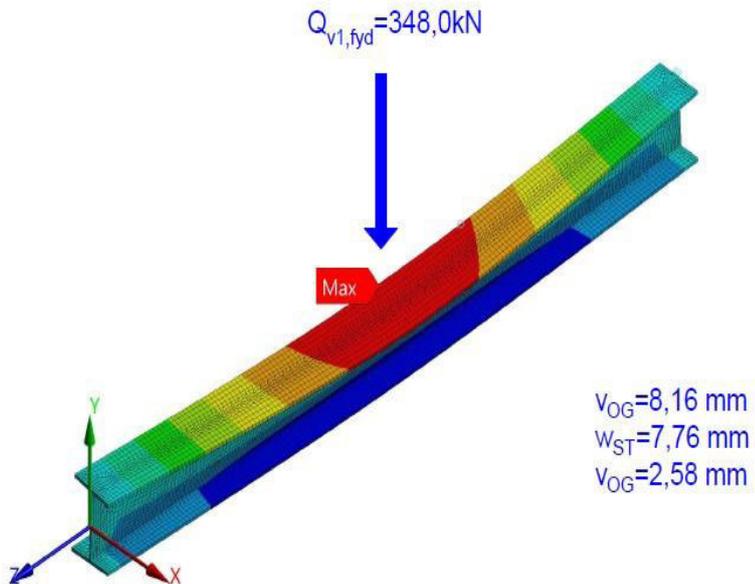


Abbildung 7.26: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

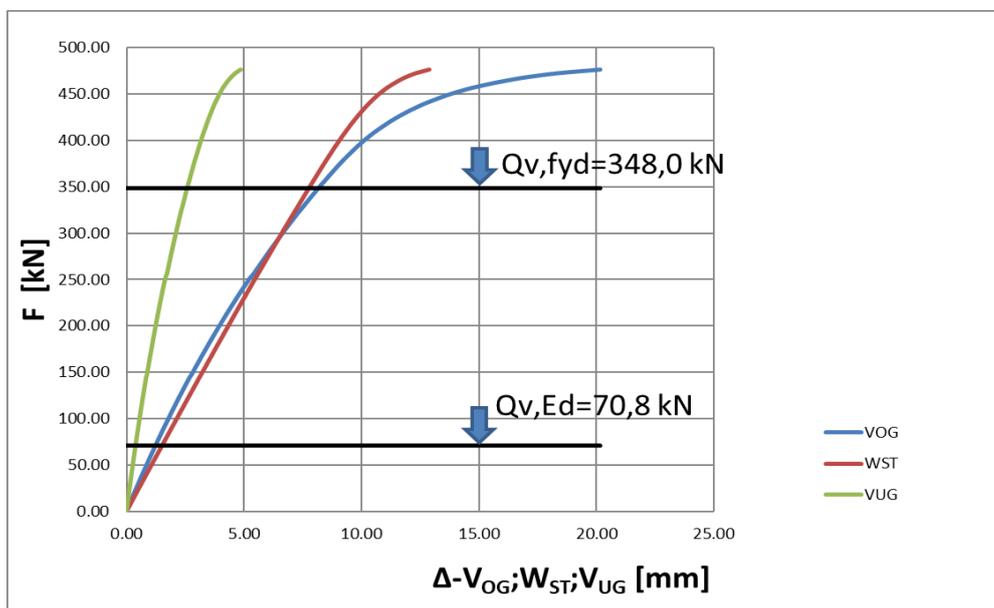


Abbildung 7.27: F- Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{348,0} \cdot 100 = 20,3\%$$

7.3.1 Kommentar zu den F-Δ Diagrammen aus Kapitel 7.1 und 7.3

Aus den F-Δ Diagrammen in den Abbildungen 7.7; 7.11 und 7.23; 7.27 sehen wir, dass sich das dünnste Einzelteil (Steg) vor dem Obergurt und Untergurt beim Ausknicken aktiviert.

Das entsteht durch das Dickenverhältnis zwischen Gurt und Steg, weil der Steg nur halb so dünn ist wie der Obergurt und der Untergurt beim Querschnitt QS1.

Die Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2 (siehe Abbildungen 7.7 und 7.11) weisen eine größere Kraft $Q_{v,fy,d}$ und eine kleinere Auslastung als die Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2 (siehe Abbildungen 7.23 und 7.27) was durch das System SY3 bedingt ist, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte auftritt (siehe Kapitel 3.3).

7.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2

- Kranbahnträger QS1 SY4 SC1:

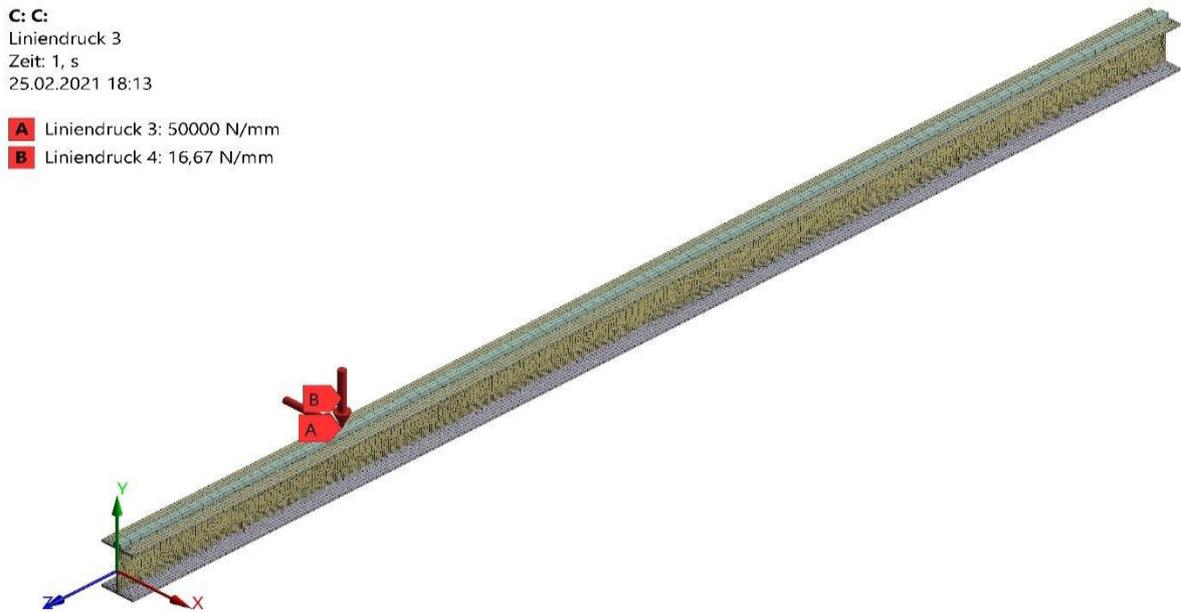


Abbildung 7.28: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC1.

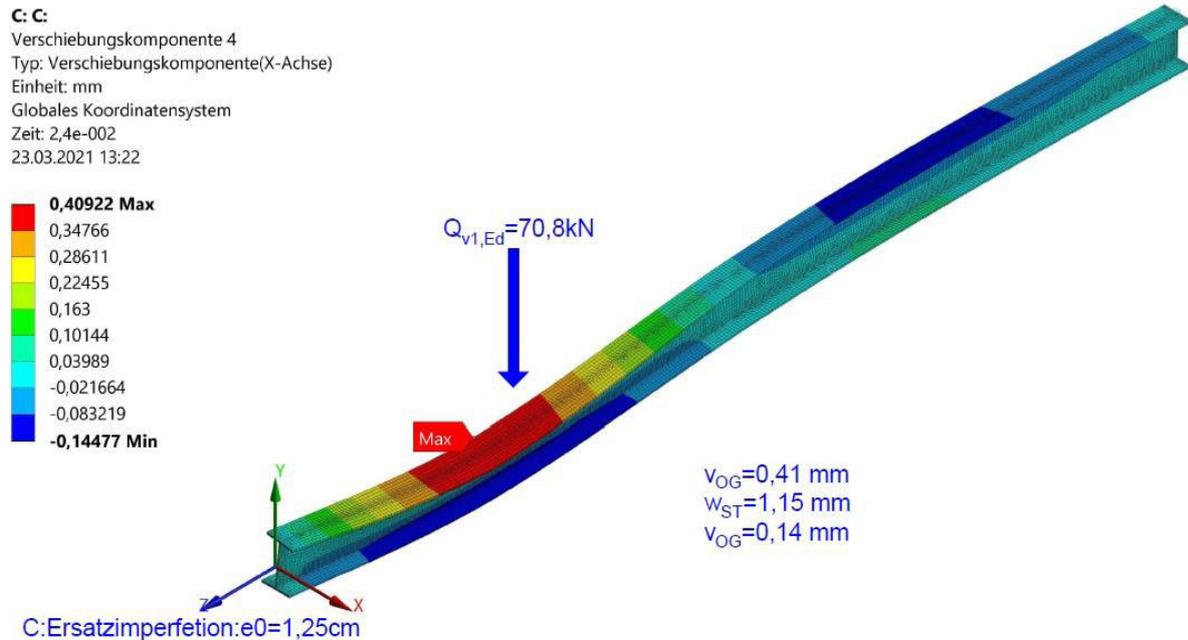


Abbildung 7.29: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 0,136
 23.03.2021 13:24

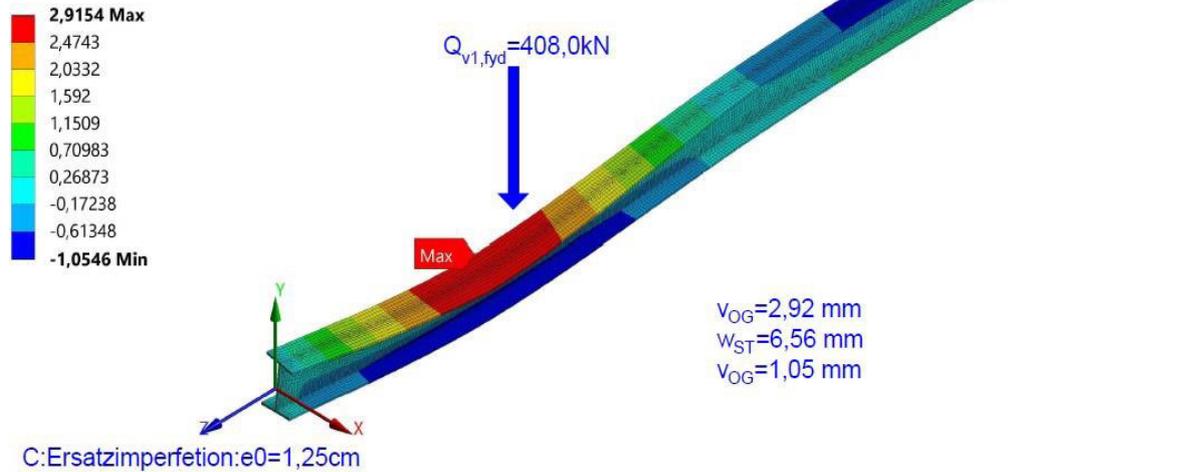


Abbildung 7.30: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

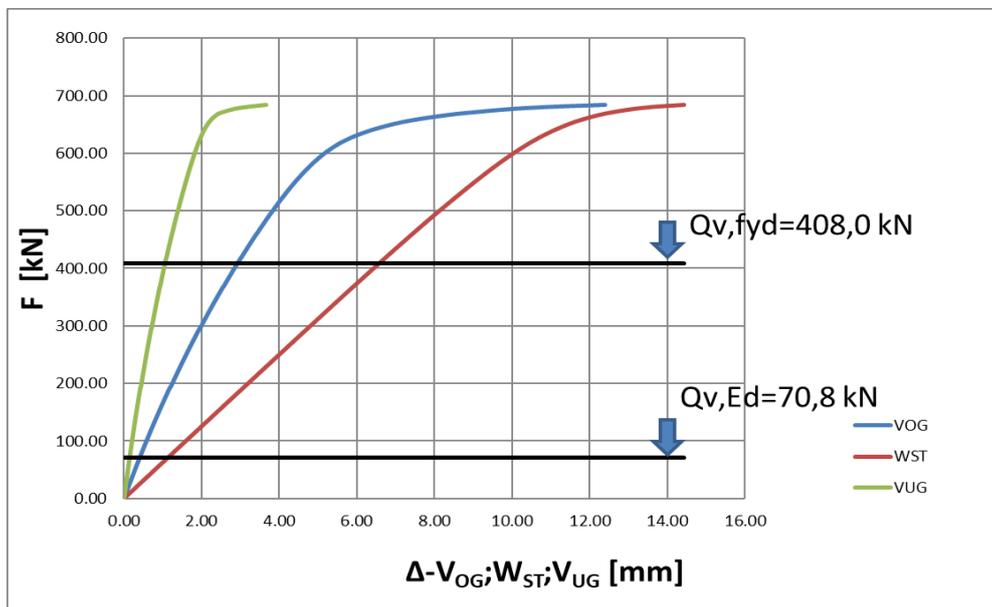


Abbildung 7.31: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{408,0} \cdot 100 = 17,4\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY4 SC2:

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:57

A Liniendruck 3: 1,4595e+005 N/mm

B Liniendruck 4: 27,027 N/mm

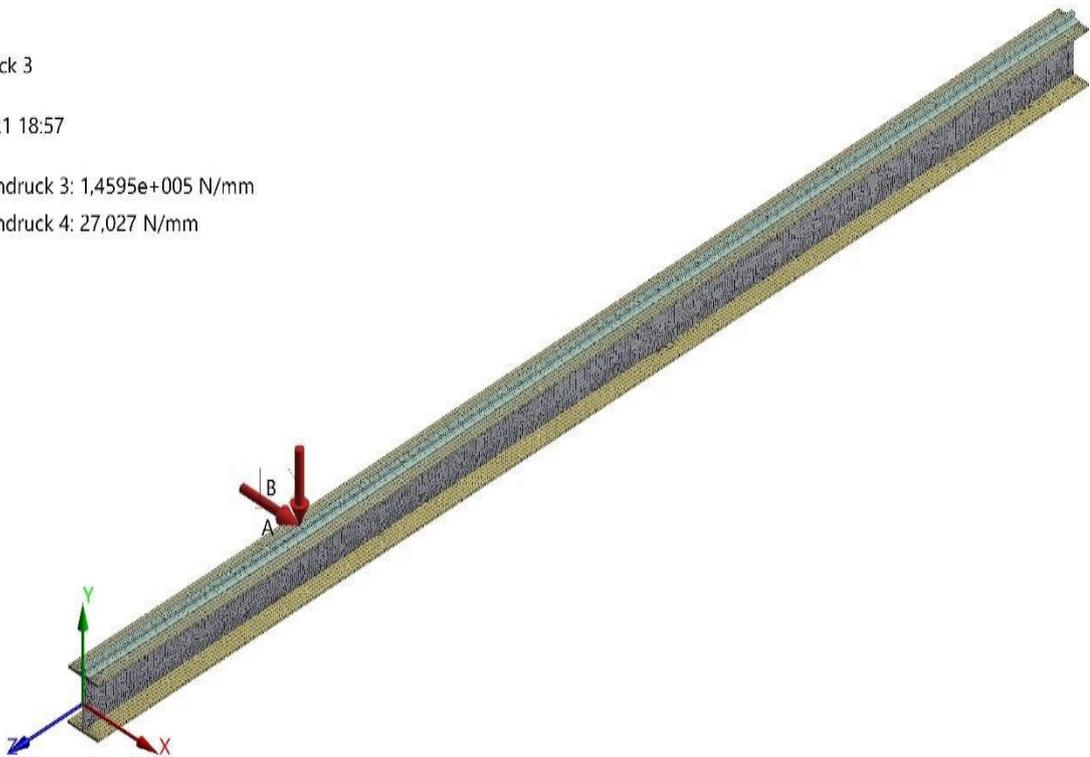


Abbildung 7.32: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 5

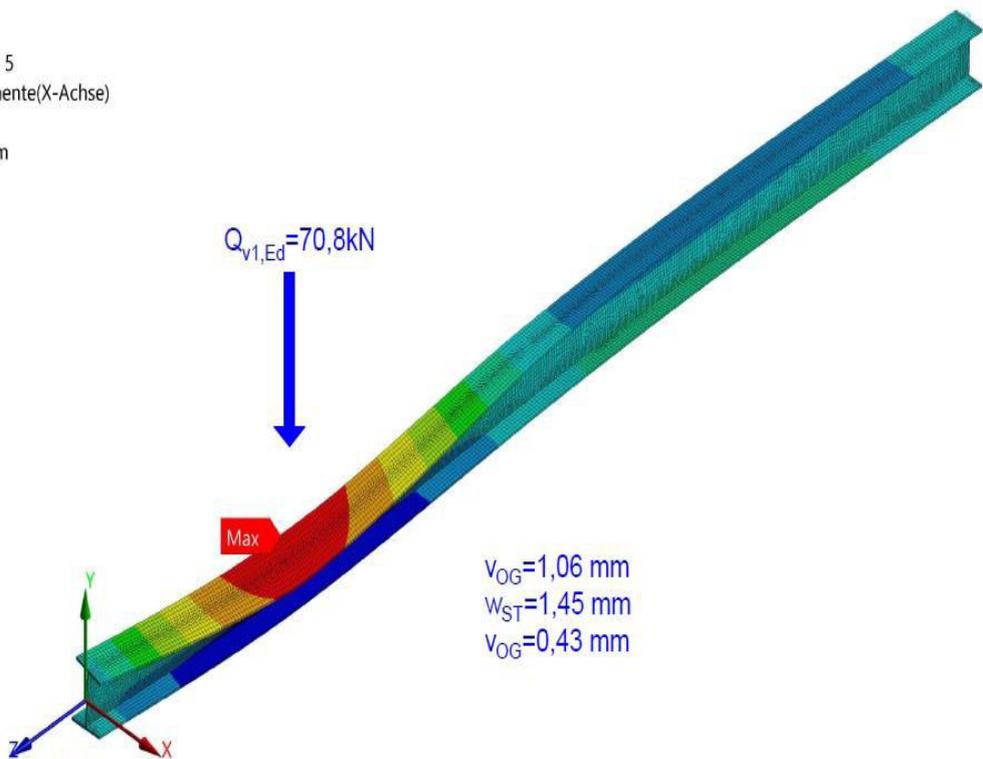
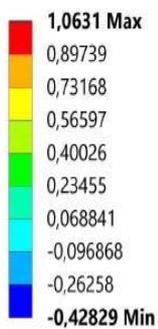
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 13:34



C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

Abbildung 7.33: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 5

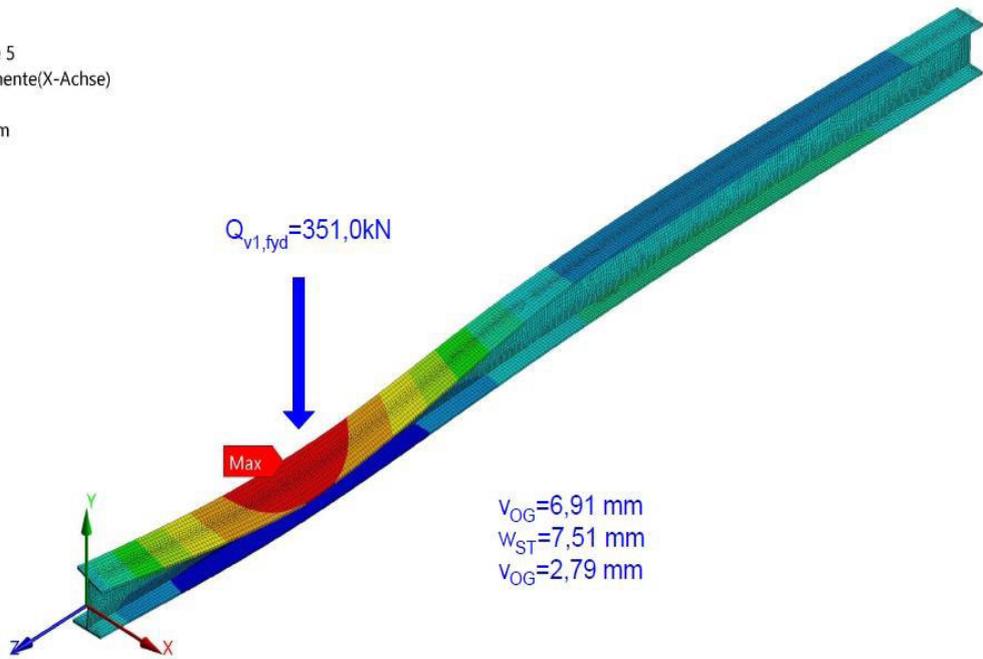
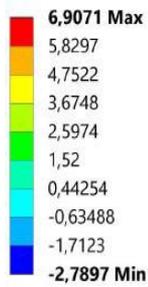
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 6,5e-002

23.03.2021 13:35



C:Ersatzimperfektion:e0=2,5cm

Abbildung 7.34: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

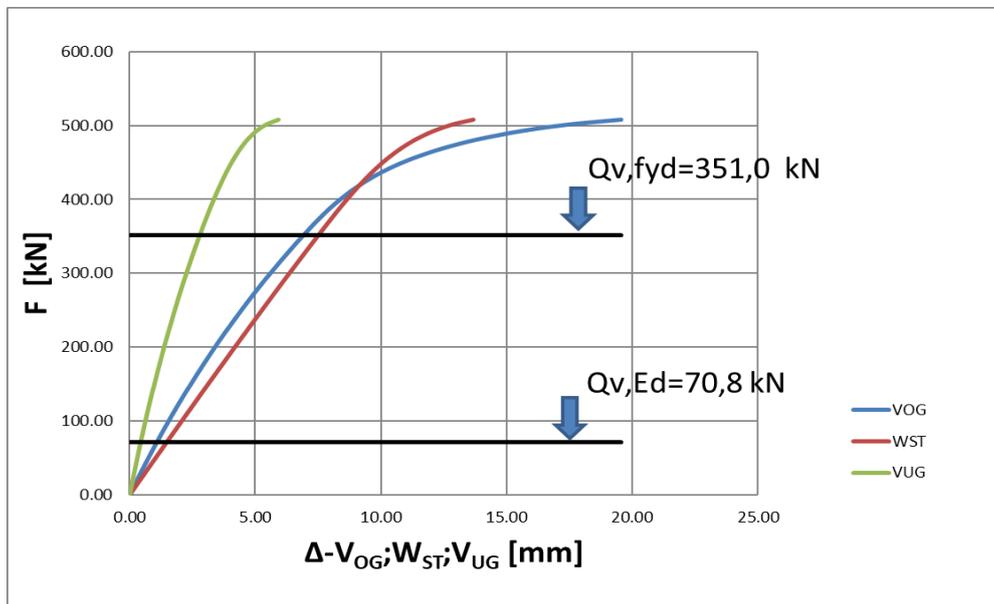


Abbildung 7.35: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{351,0} \cdot 100 = 20,2\%$$

7.4.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 7.2 und 7.4

Die F- Δ Diagramme in den Abbildungen 7.15; 7.19 und 7.31; 7.35 zeigen das der Steg zuerst ausknickt, das lässt sich aus dem Dickenverhältnis erklären zwischen Gurt und Steg beim QS1.

Der Kranbahnträger QS1SY4SC1 weist eine größere Kraft $Q_{v,fy d}$ auf und eine kleinere Auslastung als der Kranbahnträger QS1SY2SC1 (siehe Abbildungen 7.15 und 7.31). Das ist durch das System SY4 bedingt, bei welchem nur eine Vertikale Last in Feldmitte von dem Zweifeldträger auftritt (siehe Kapitel 3.2 und 3.4).

Bei den Kranbahnträger QS1SY4SC2 und QS1SY2SC2 ist es nicht der Fall. Eine doppelt so große Ersatzimperfektion „C:e0“ beim Kranbahnträger QS1SY4SC2 hat zur Folge, dass die Fließgrenze bei einer kleineren Kraft erreicht wird und bringt höhere Auslastungen mit sich.

7.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2

- Kranbahnträger QS2 SY2 SC2:

C: C:

Liniendruck
Zeit: 0,5007 s
25.02.2021 18:20

- A** Liniendruck: 50070 N/mm
- B** Liniendruck 2: 8,3466 N/mm
- C** Liniendruck 3: 50070 N/mm
- D** Liniendruck 4: 8,3466 N/mm

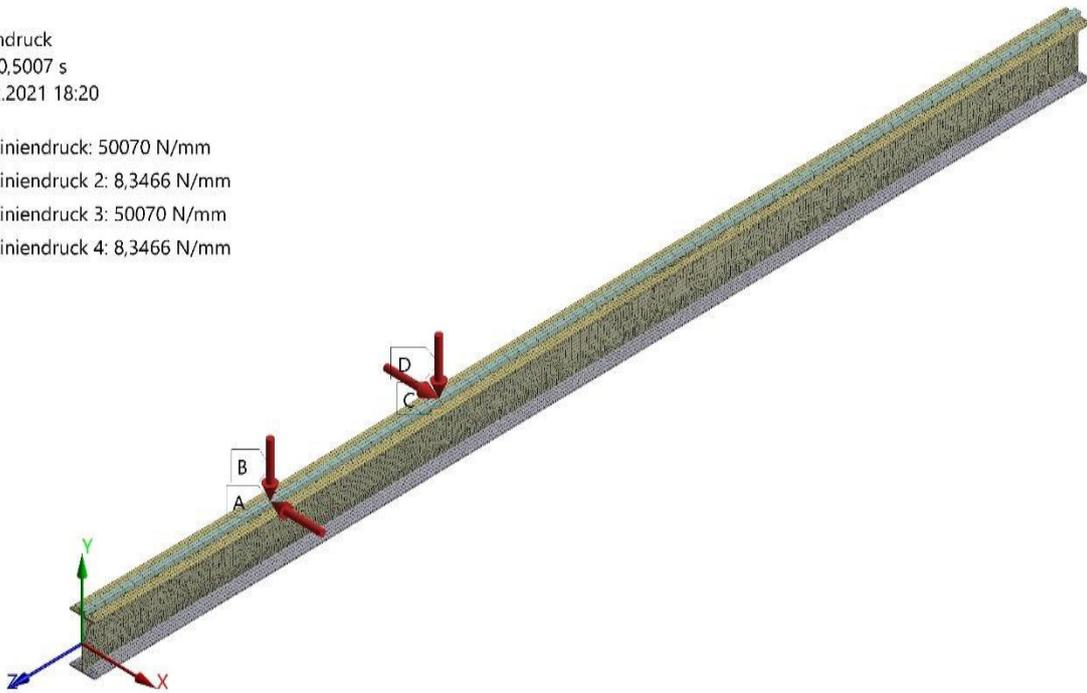


Abbildung 7.36: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC1.

C: C:

Verschiebungskomponente 5
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
Einheit: mm
Globales Koordinatensystem
Zeit: 1,2e-002
23.03.2021 13:40

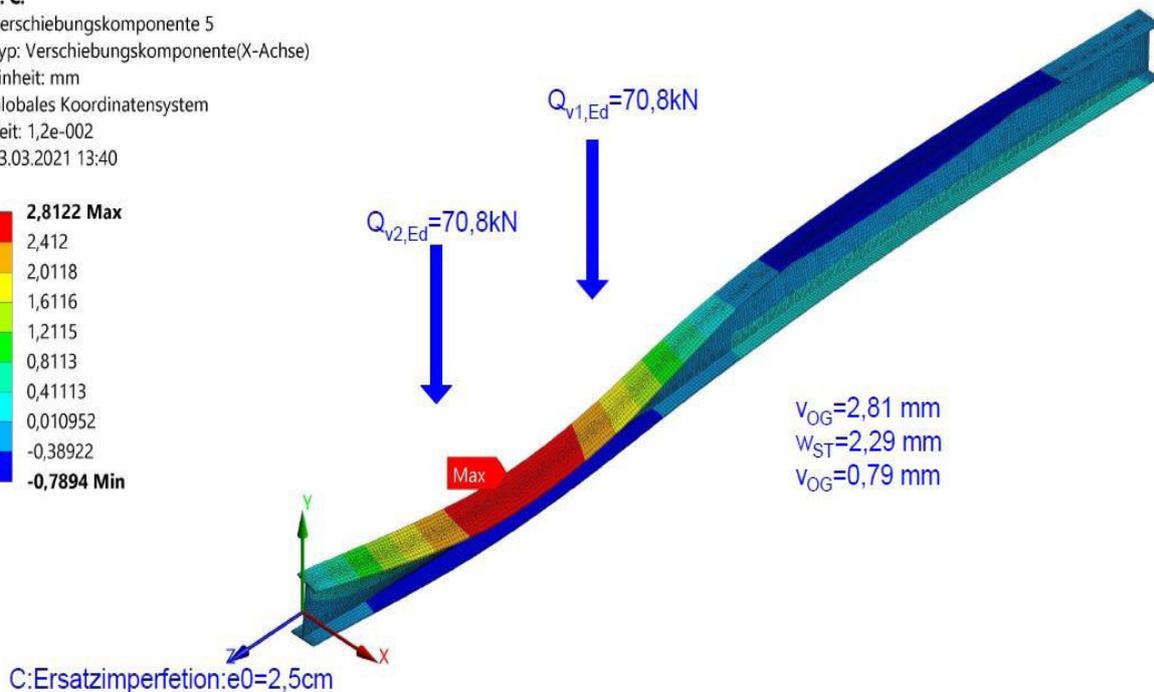


Abbildung 7.37: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 5
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 3,2e-002
 23.03.2021 13:40

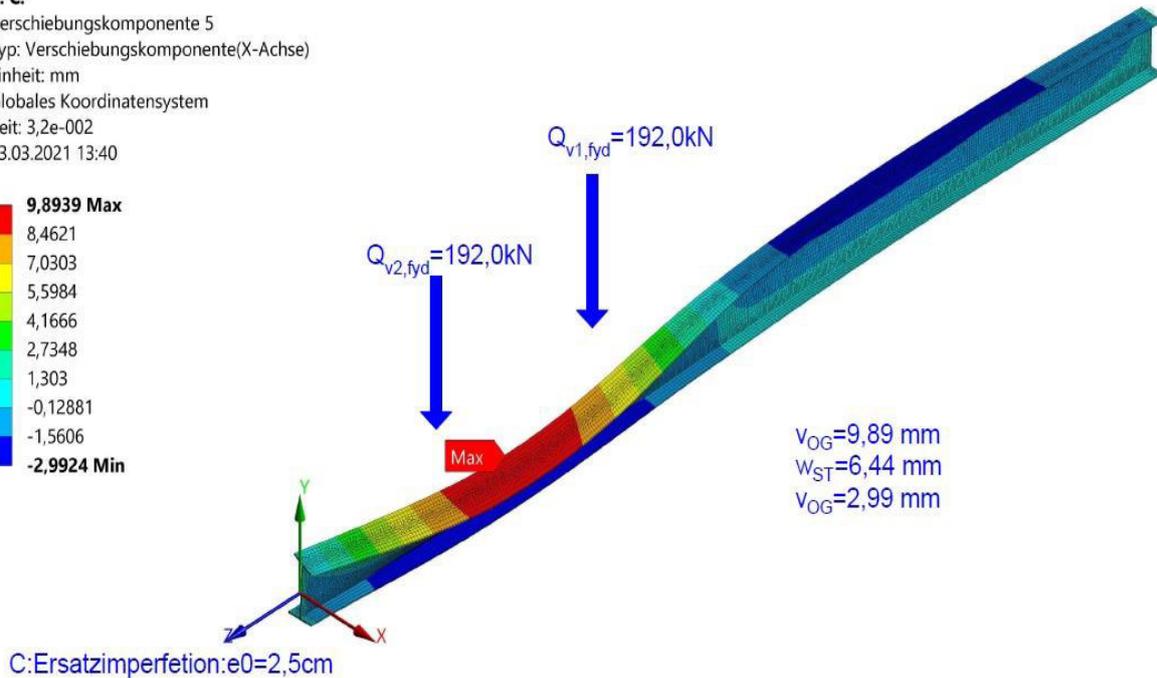
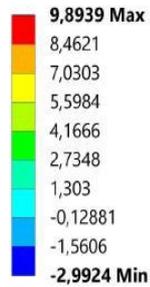


Abbildung 7.38: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

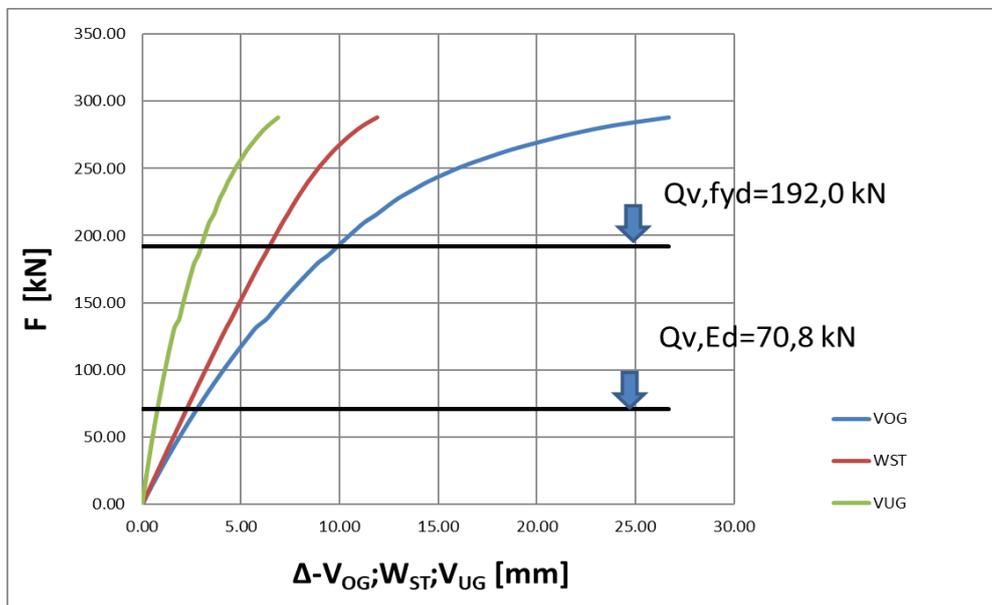


Abbildung 7.39: F_{Ult} - Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{Q_{V,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{192,0} \cdot 100 = 36,9\%$$

- Kranbahnträger QS2 SY2 SC2:

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:18

- A** Liniendruck 3: 86486 N/mm
- B** Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C** Liniendruck 5: 86486 N/mm
- D** Liniendruck 6: 27,027 N/mm

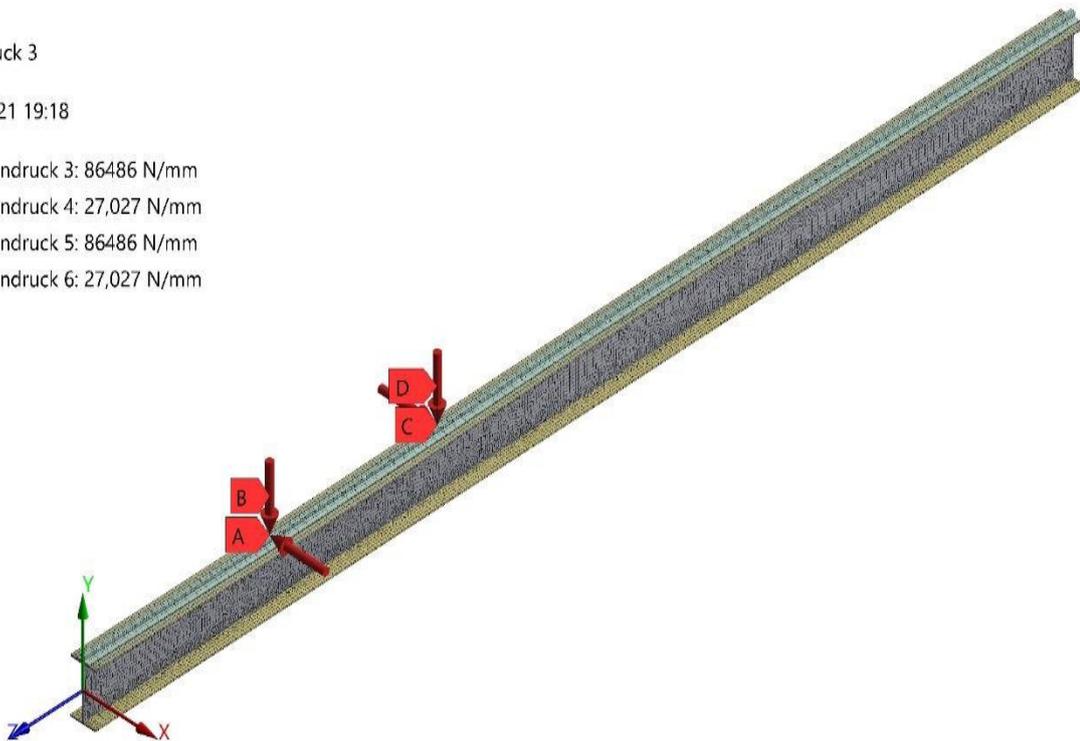


Abbildung 7.40: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,2e-002

23.03.2021 13:47

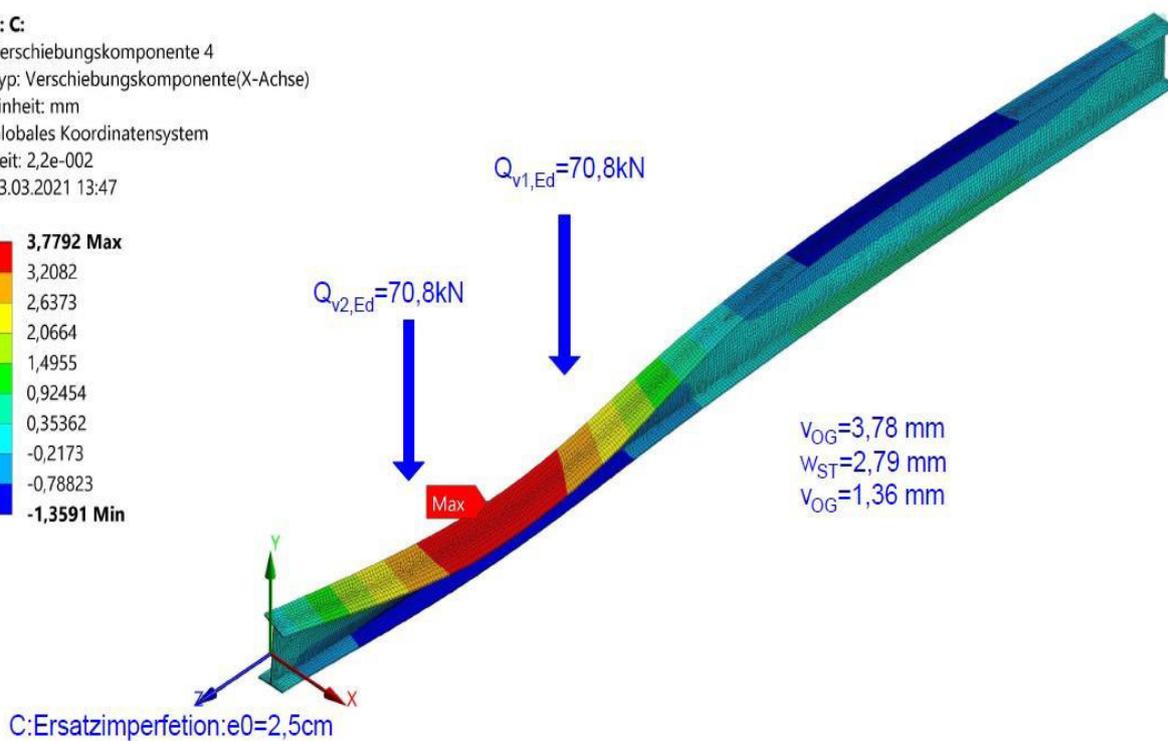
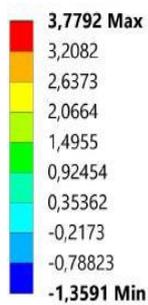


Abbildung 7.41: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

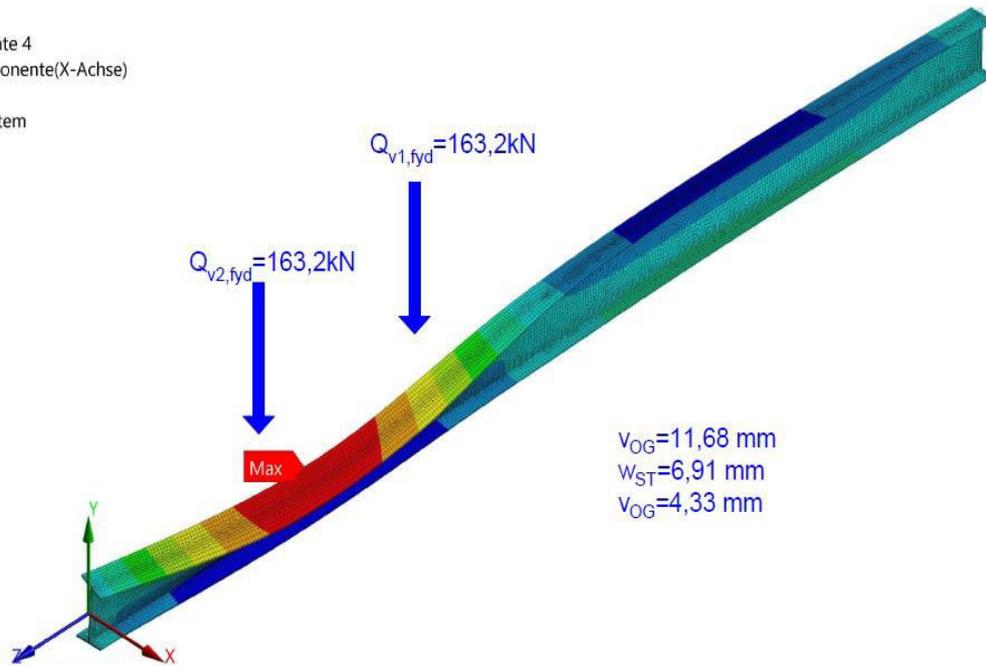
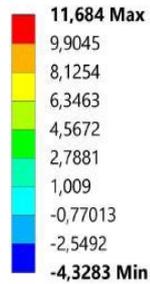
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 5,1e-002

23.03.2021 13:48



C: Ersatzimperfektion: e0=2,5cm

Abbildung 7.42: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

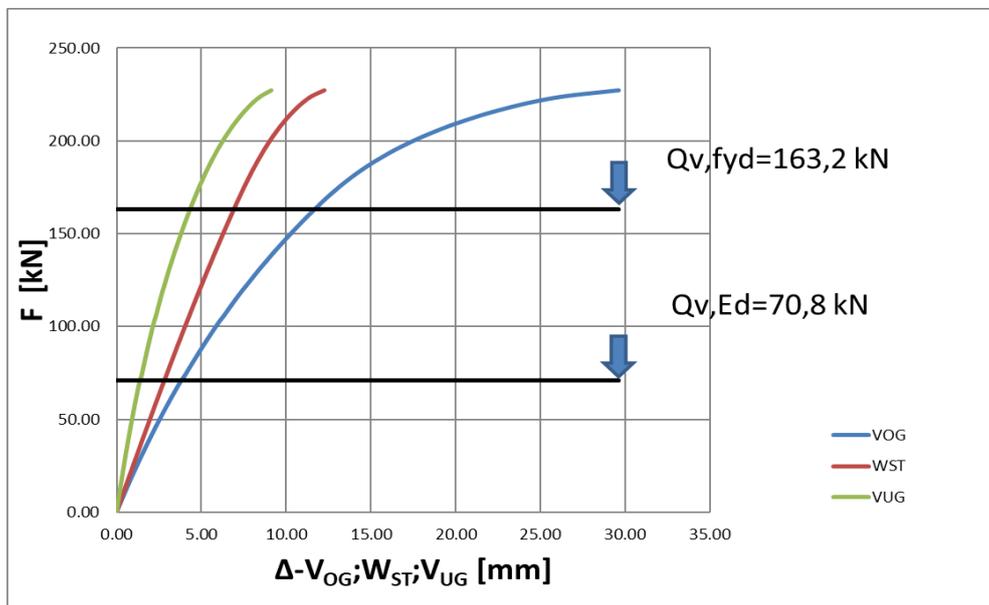


Abbildung 7.43: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{163,2} \cdot 100 = 43,4\%$$

7.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2

- Kranbahnträger QS2 SY4 SC1:

C: C:

Liniendruck
Zeit: 0,5 s
25.02.2021 18:23

- A** Liniendruck: 25000 N/mm
- B** Liniendruck 2: 8,335 N/mm

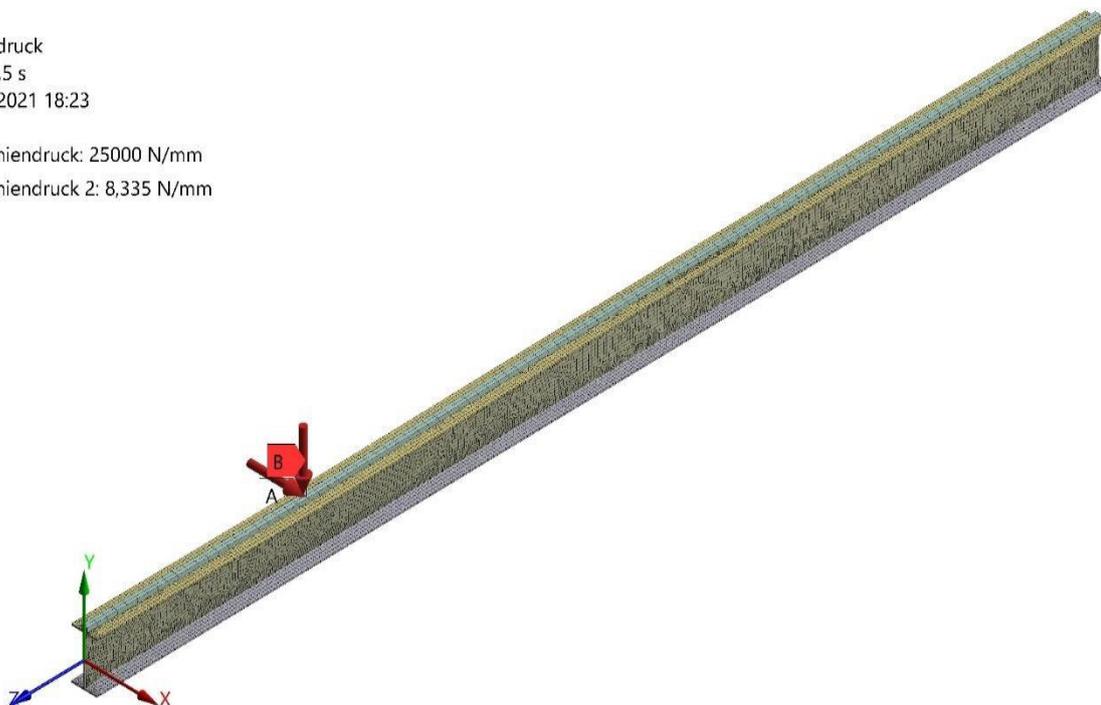


Abbildung 7.44: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC1.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
Einheit: mm
Globales Koordinatensystem
Zeit: 2,4e-002
23.03.2021 13:55

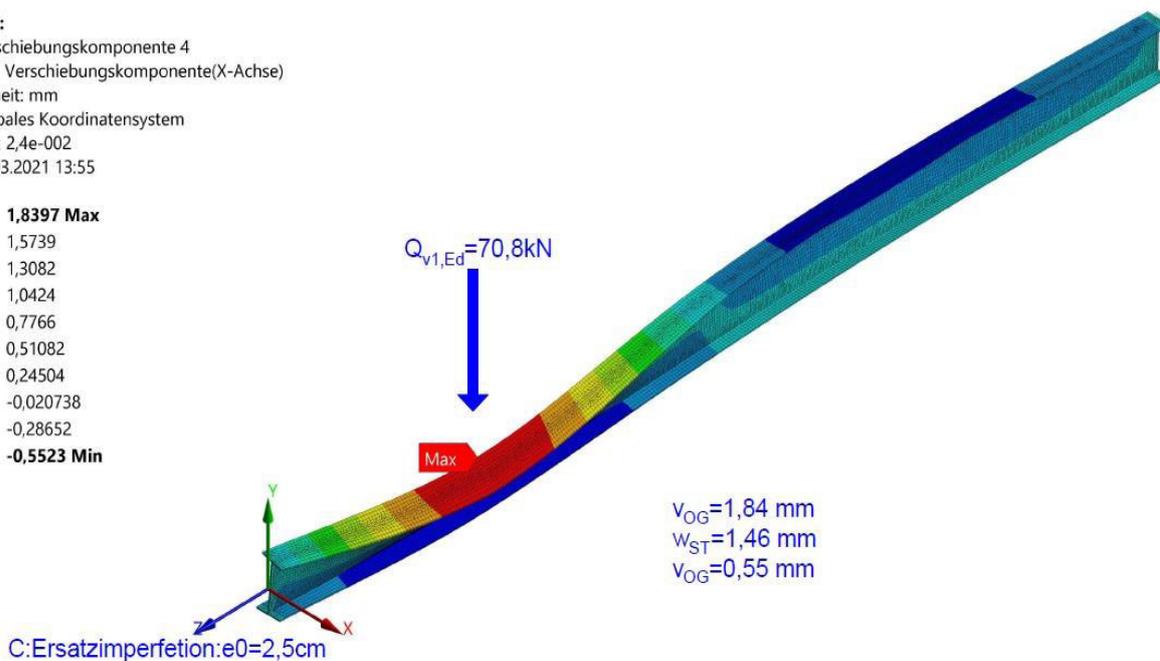
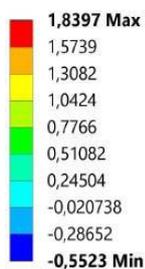


Abbildung 7.45: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 8,4e-002
 23.03.2021 13:55

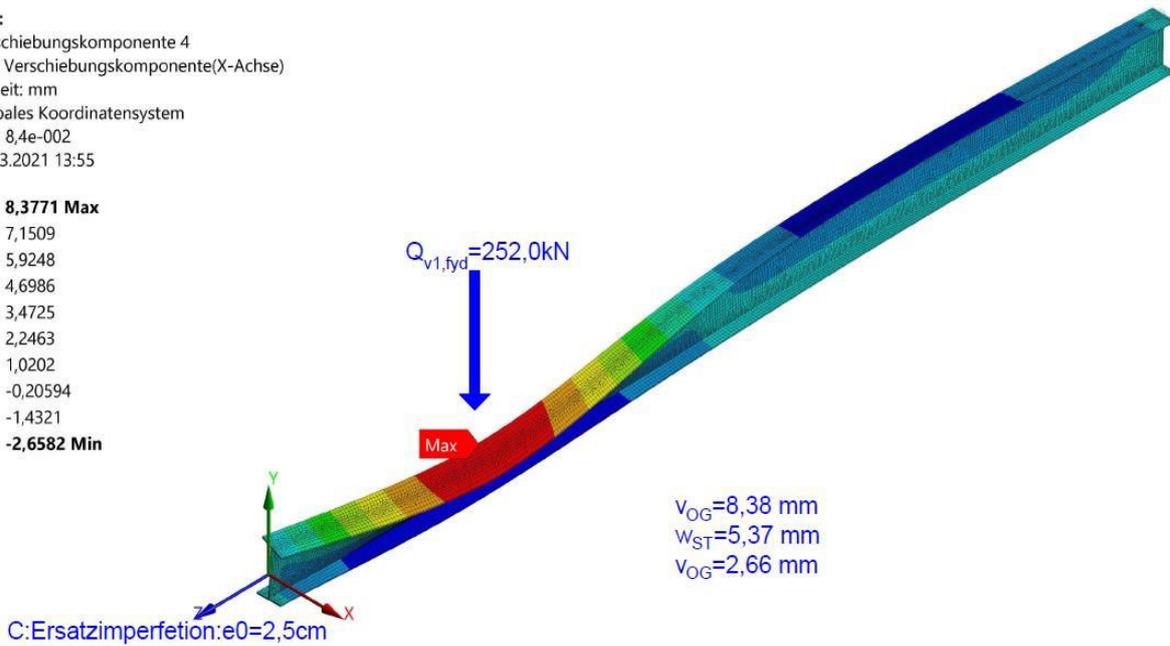
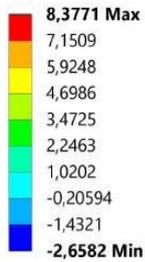


Abbildung 7.46: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

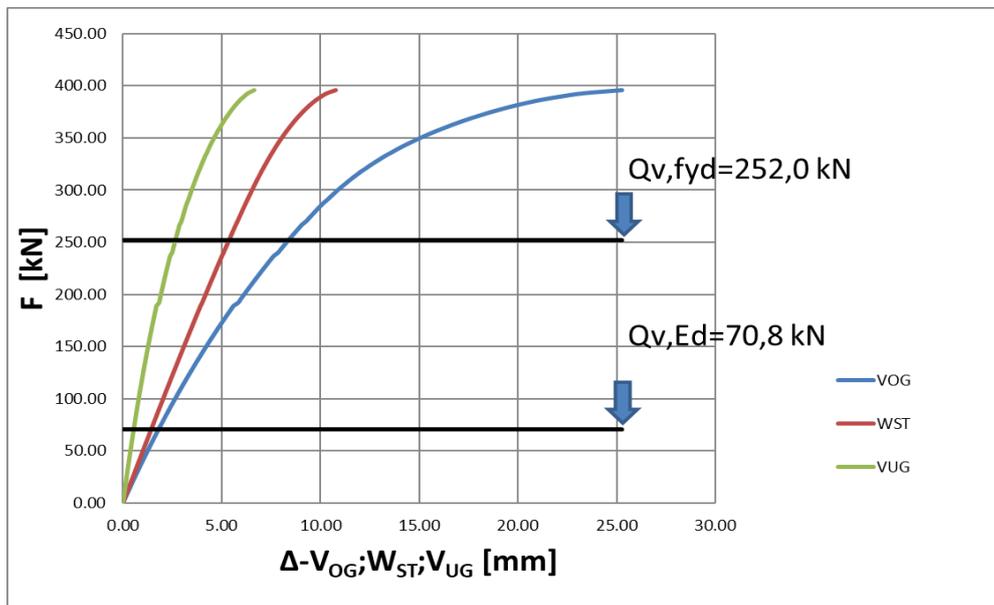


Abbildung 7.47: F_{Ult} – Δ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{252,0} \cdot 100 = 28,1\%$$

- Kranbahnträger QS2 SY4 SC2:

C: C:

Liniendruck

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:23

A Liniendruck: 2,7027e+005 N/mm

B Liniendruck 2: 27,027 N/mm

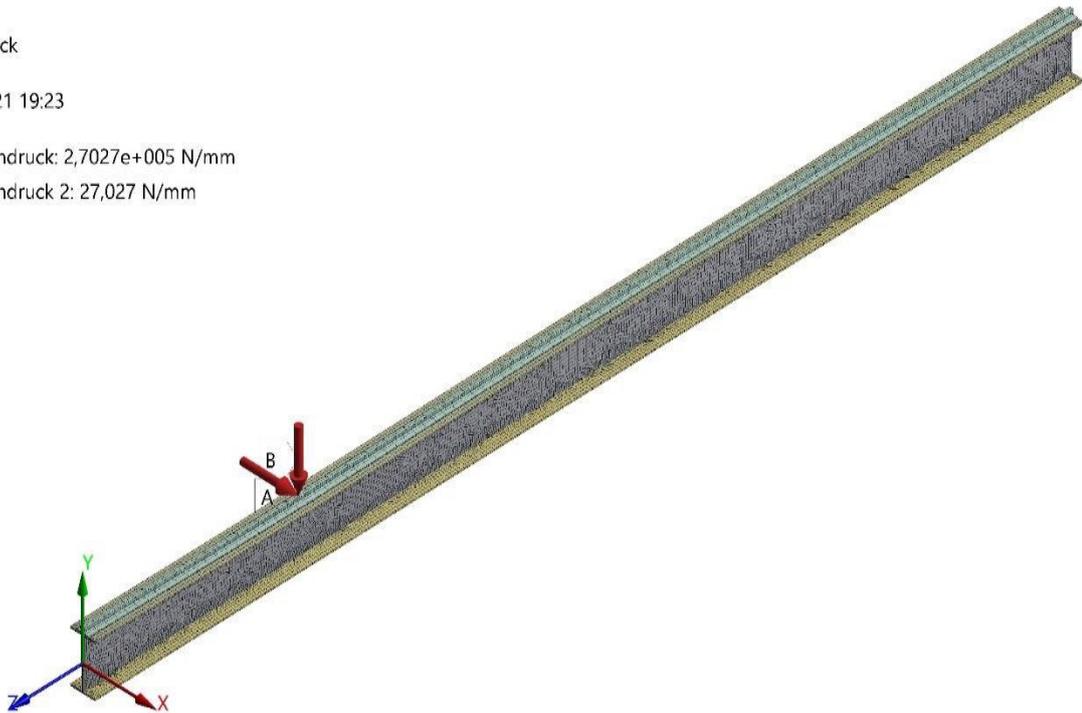


Abbildung 7.48: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 7,e-003

23.03.2021 14:01

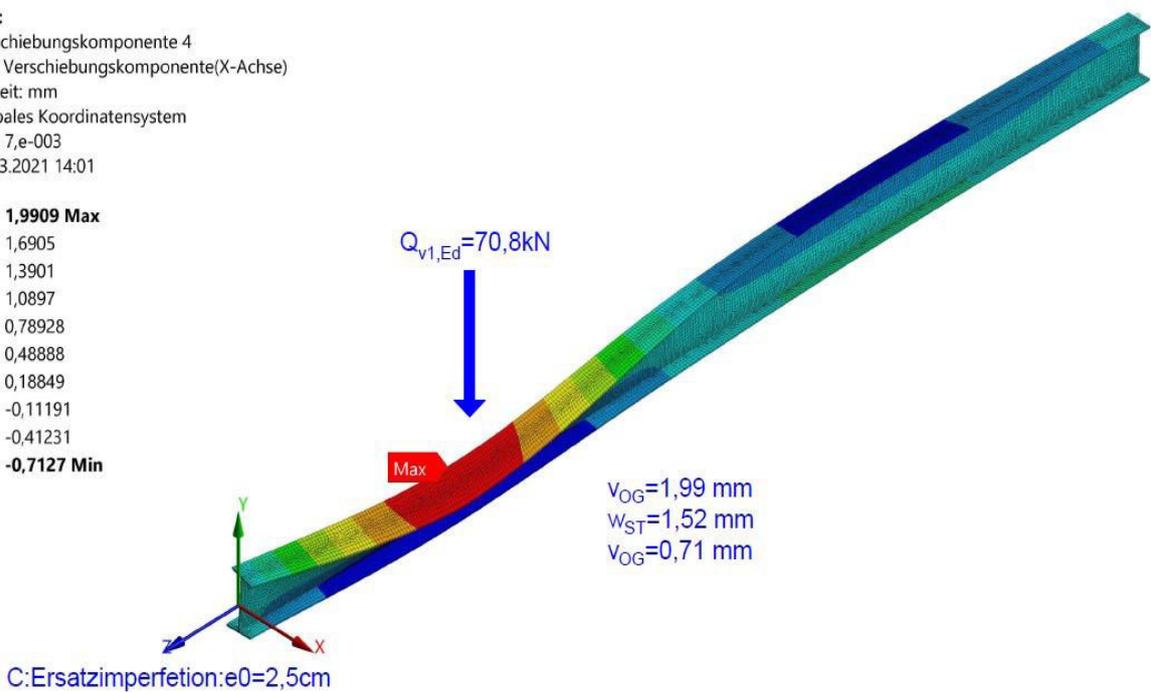
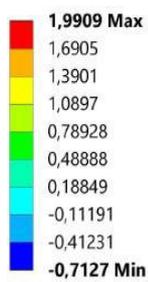


Abbildung 7.49: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 2,5e-002
 23.03.2021 14:02

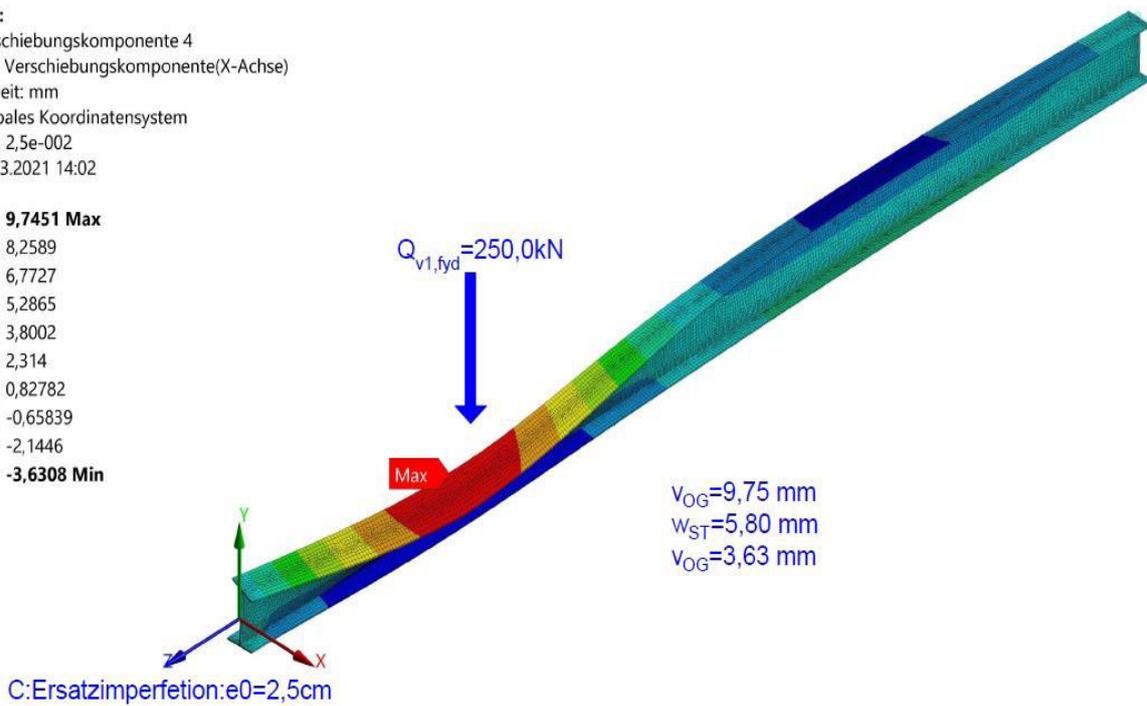
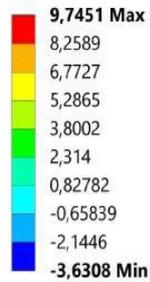


Abbildung 7.50: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v, fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

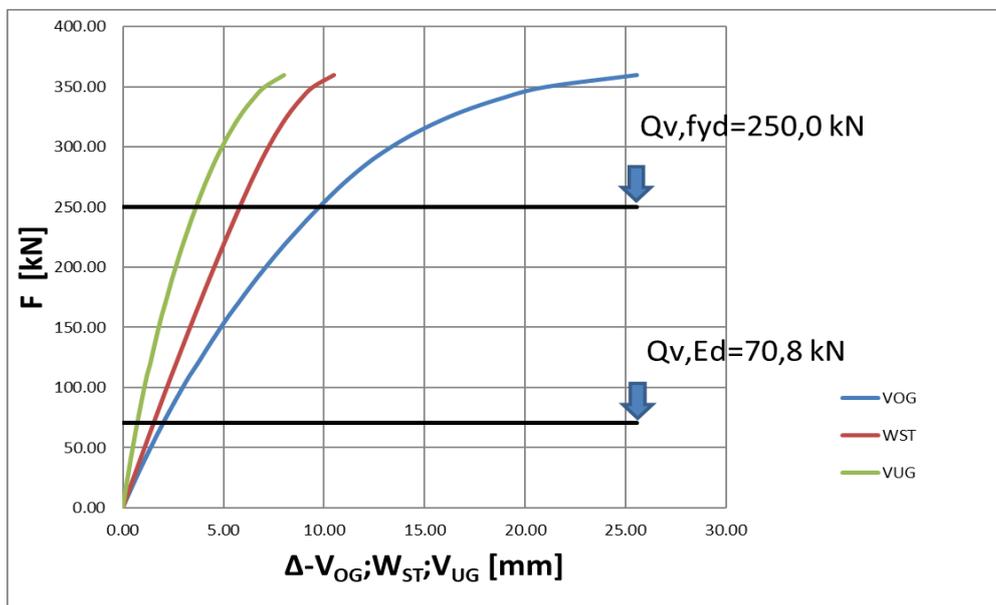


Abbildung 7.51: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{Q_{V,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{250,0} \cdot 100 = 28,3\%$$

7.6.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 7.5 und 7.6

Aus den F- Δ Diagrammen in Abbildungen 7.39; 7.43 und 7.47; 7.51 ist zu sehen das der Obergurt zuerst ausknickt danach folgt der Steg und zuletzt der Untergurt, wofür wieder das Dickenverhältnis zwischen Gurt (15mm) und Steg (10mm) von Querschnitt QS2 zuständig ist. Der kleine Unterschied führt dazu, dass sich die Einzelteile beim Ausknicken hintereinander aktivieren.

Die Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2 (siehe Abbildungen 7.47 und 7.51) weisen eine größere Kraft $Q_{v,fy\bar{d}}$ und eine kleinere Auslastung als die Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2 (siehe Abbildungen 7.39 und 7.43). Das ist durch das System SY4 bedingt, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte des Zweifeldträgers aufgebracht wird (siehe Kapitel 3.2 und 3.4).

7.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2

- Kranbahnträger QS3 SY2 SC1:

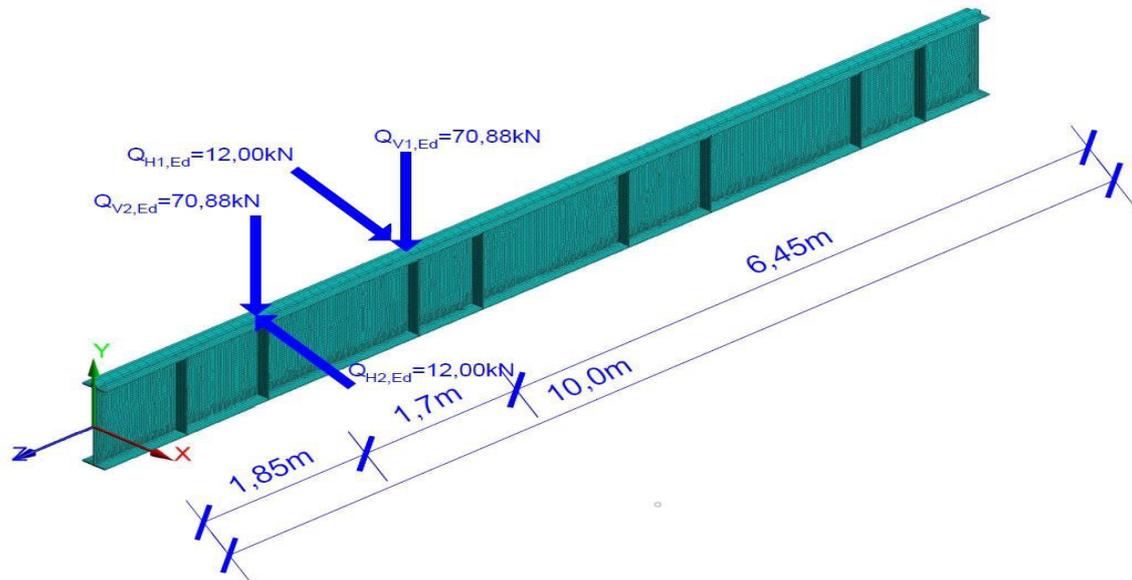


Abbildung 7.52: Lastaufstellung für die Lineare Berechnung von QS3 SY2 SC1.

- Beim Kranbahnträger mit QS3 werden massenlose Steifen an den Orten eines lokalen Ausbeulens in der ersten Eigenform mitmodelliert, um eine globale Verformung des Kranbahnträgers zu erzwingen (siehe Abbildungen 7.53 - 7.55 und Abbildungen 7.54 - 7.56).

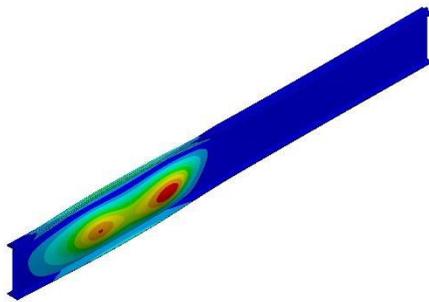


Abbildung 7.53: Eigenform ohne Steifen.

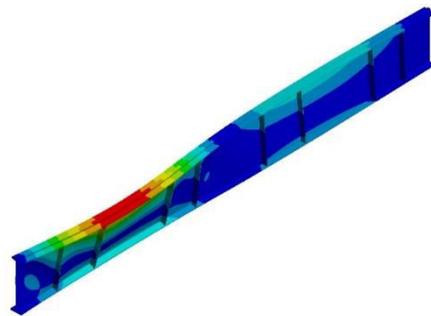


Abbildung 7.54: Eigenform mit Steifen.



Abbildung 7.55: Lokale Verformung.

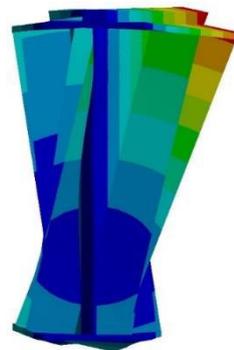


Abbildung 7.56: Globale Verformung.

- Der Kranbahnträger auf Abbildung 7.57 ohne Steifen wird in der weiteren GNIA-Berechnung benutzt.

C: C:
 Liniendruck 3
 Zeit: 1, s
 25.02.2021 18:30

- A** Liniendruck 3: 1,0833e+005 N/mm
- B** Liniendruck 4: 16,67 N/mm
- C** Liniendruck 5: 1,0833e+005 N/mm
- D** Liniendruck 6: 16,67 N/mm

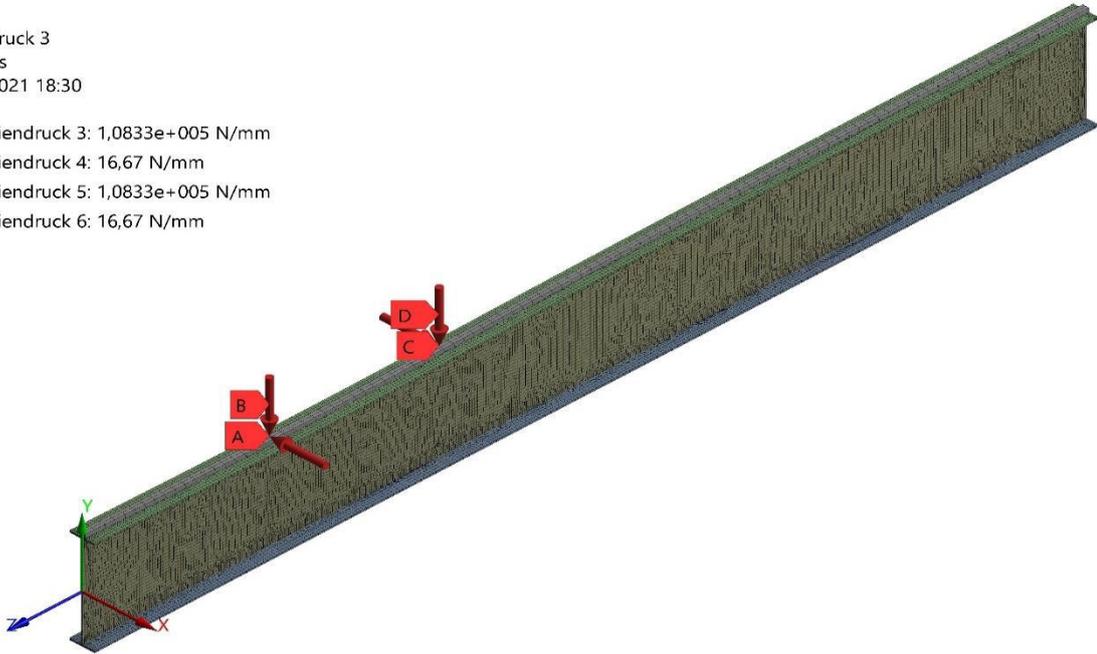
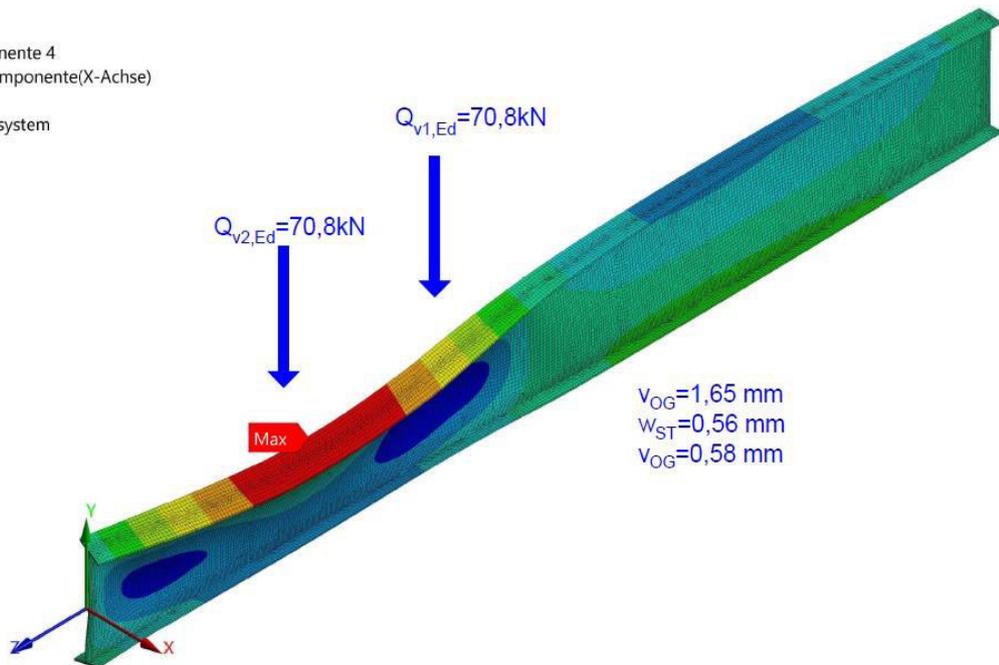


Abbildung 7.57: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC1.

C: C:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 1,1e-002
 23.03.2021 14:18

- 1,6522 Max
- 1,3548
- 1,0575
- 0,76017
- 0,46284
- 0,1655
- 0,13184
- 0,42917
- 0,72651
- 1,0238 Min



C:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

Abbildung 7.58: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 5,4e-002
 23.03.2021 14:19

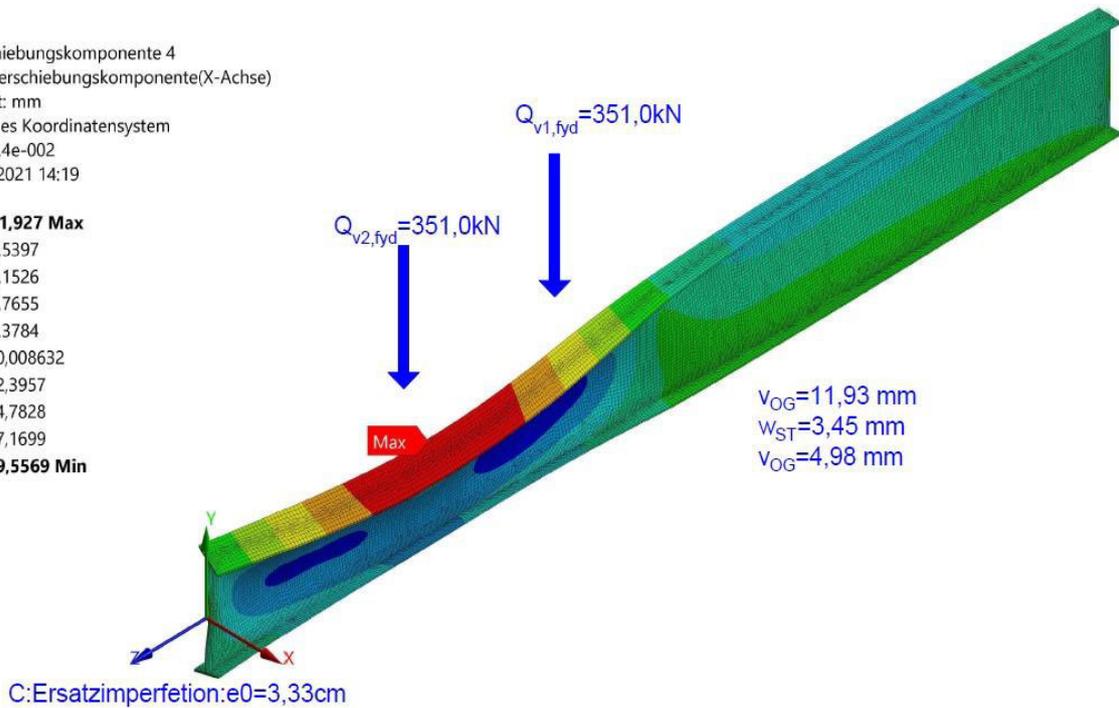
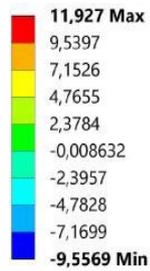


Abbildung 7.59: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

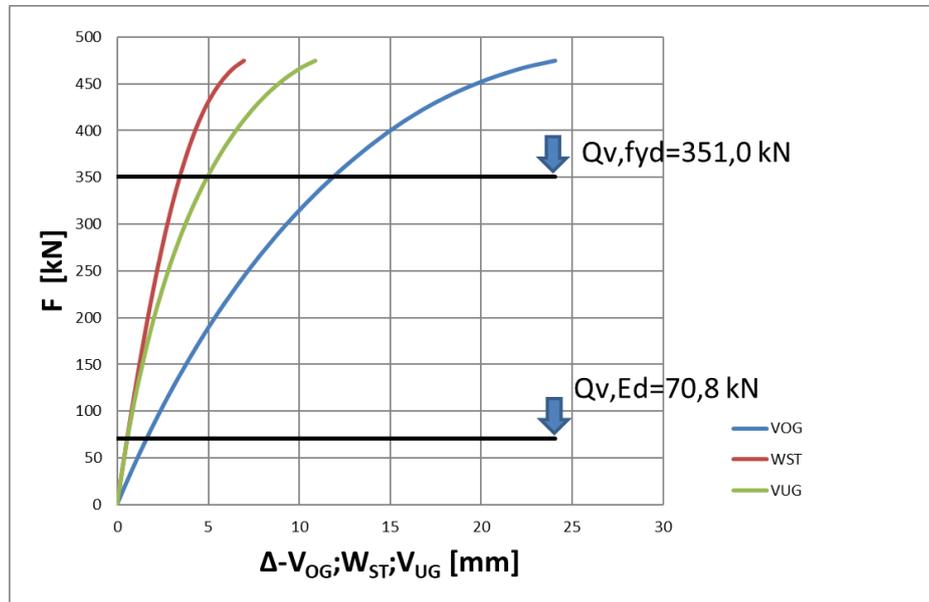


Abbildung 7.60: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{351,0} \cdot 100 = 20,2\%$$

- Kranbahnträger QS3 SY2 SC2:

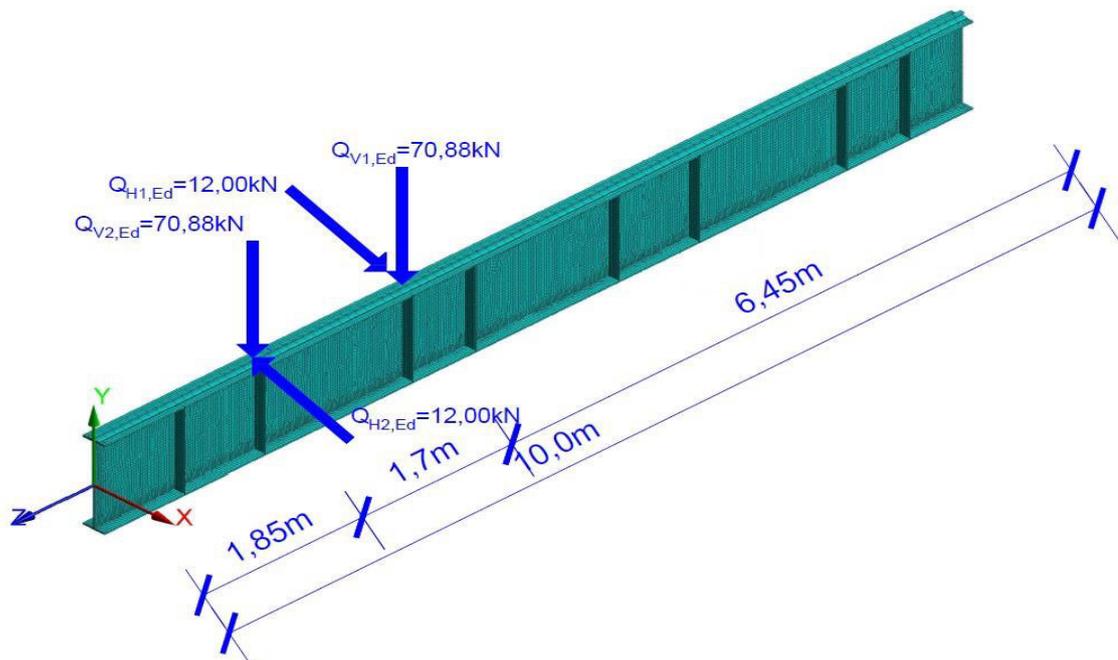


Abbildung 7.61: Lastaufstellung für die Lineare Berechnung von QS3 SY2 SC2.

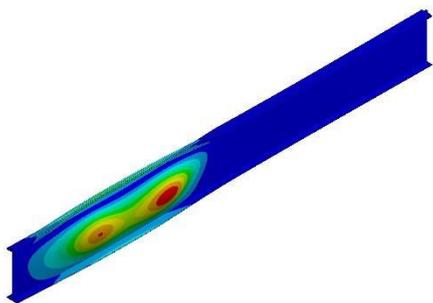


Abbildung 7.62: Eigenform ohne Steifen.

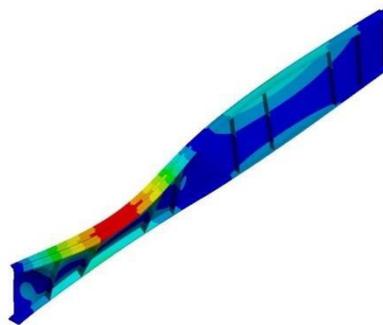


Abbildung 7.63: Eigenform mit Steifen.

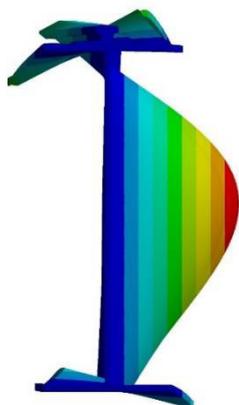


Abbildung 7.64: Lokale Verformung.

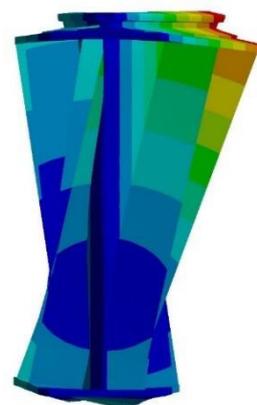


Abbildung 7.65: Globale Verformung.

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:27

- A** Liniendruck 3: 67568 N/mm
- B** Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C** Liniendruck 5: 67568 N/mm
- D** Liniendruck 6: 27,027 N/mm

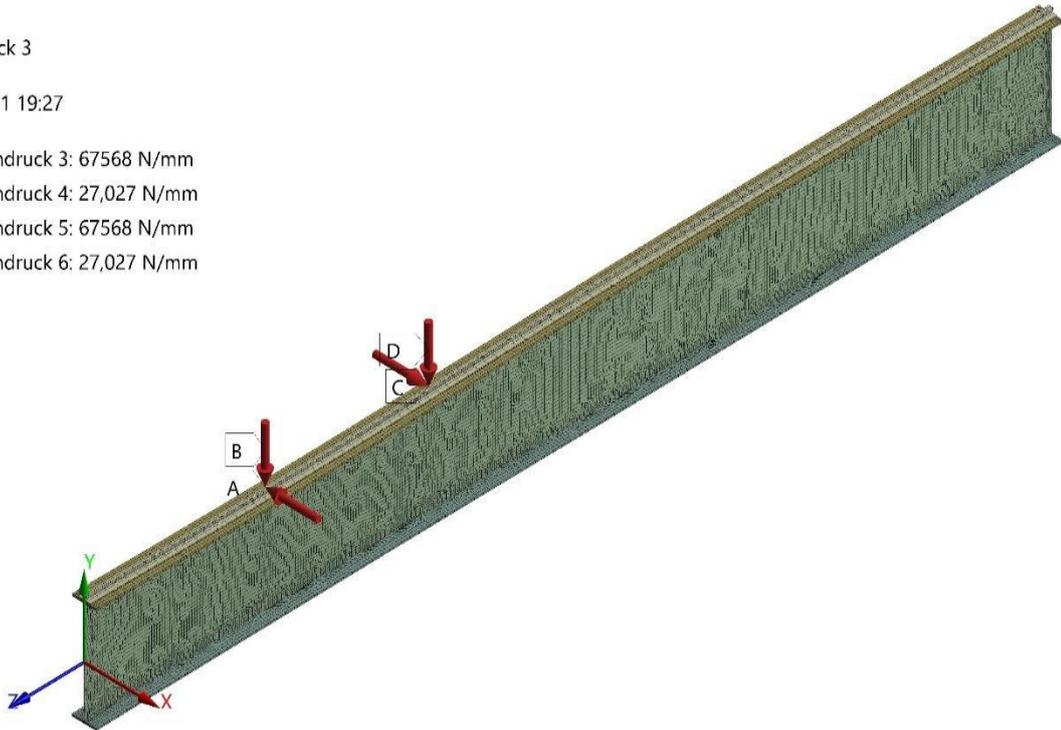


Abbildung 7.66: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC2.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,8e-002

23.03.2021 14:31

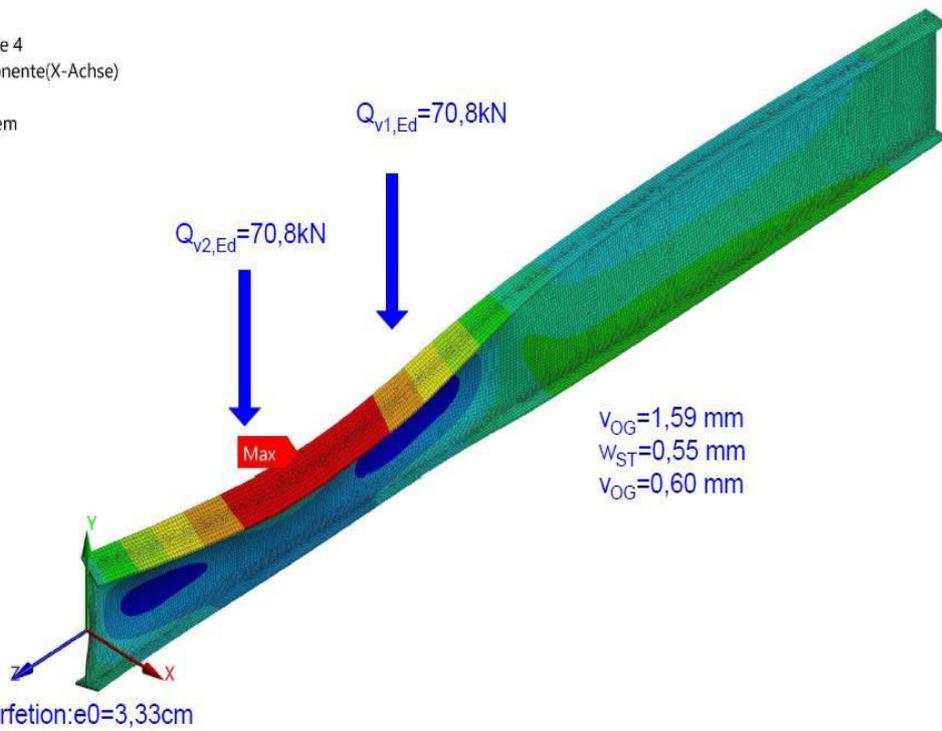
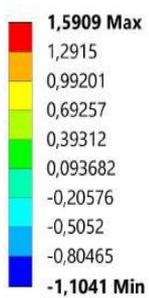


Abbildung 7.67: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 0,149

23.03.2021 14:32

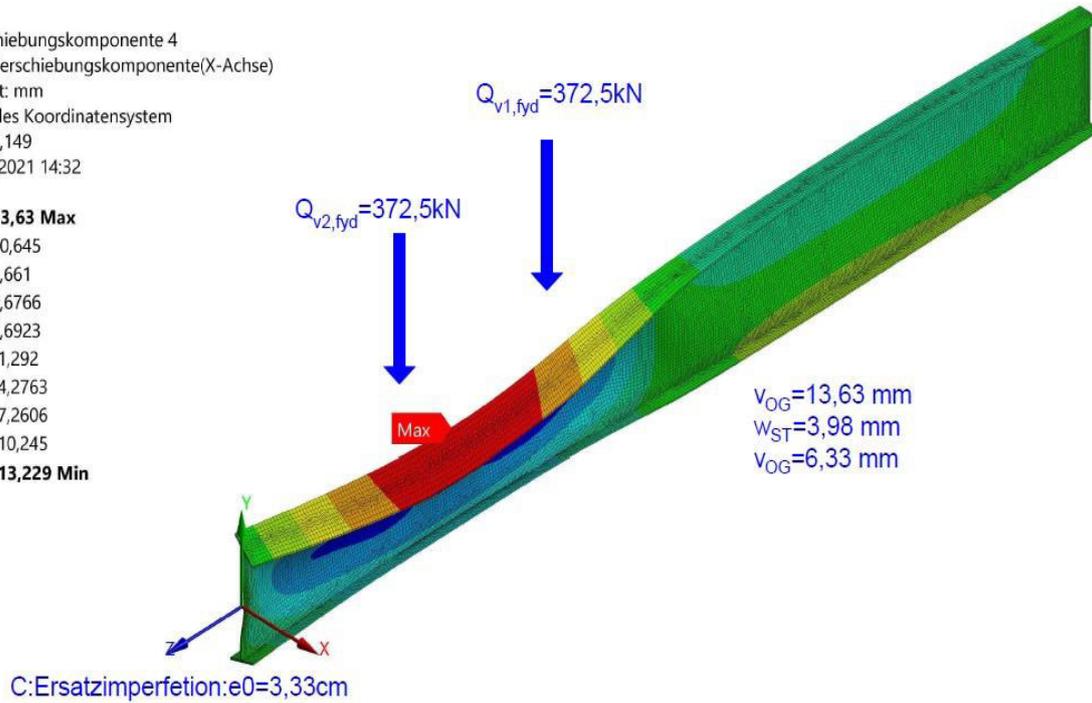
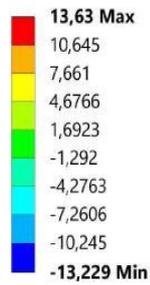


Abbildung 7.68: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

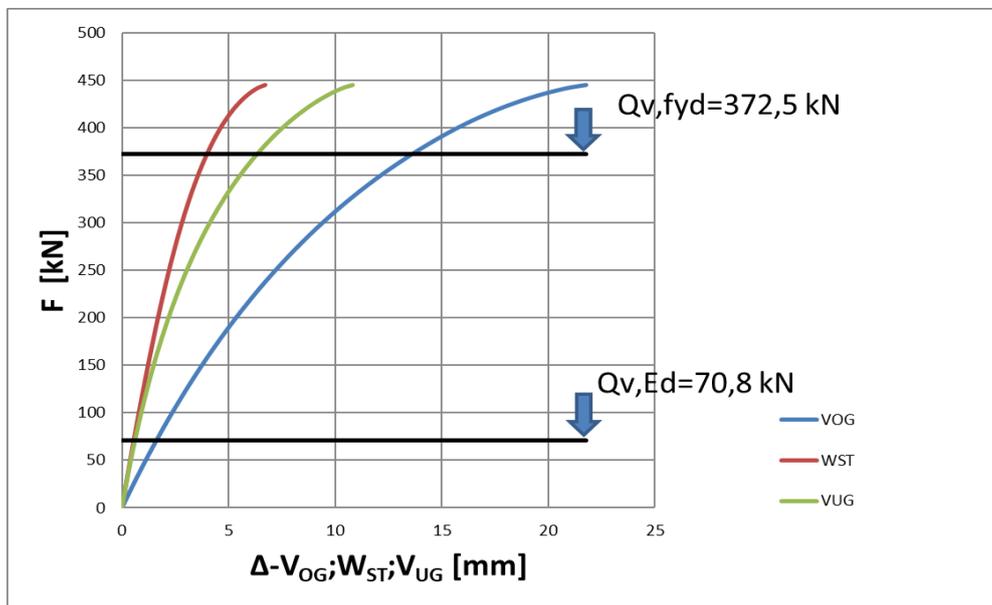


Abbildung 7.69: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{372,5} \cdot 100 = 19,0\%$$

7.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2

- Kranbahnträger QS3 SY4 SC1:

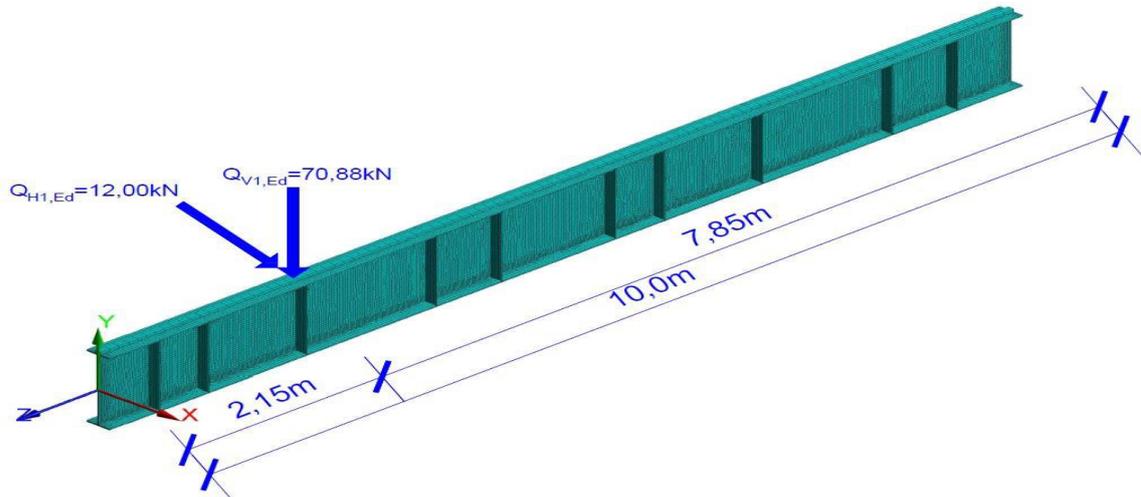


Abbildung 7.70: Lastaufstellung für die Lineare Berechnung von QS3 SY4 SC1.

Auch bei der Untersuchung des Kranbahnträgers QS3 SY4 SC1 und QS3 SY4 SC2 wurden masselose Steifen mitmodelliert, um wie beim zuvor untersuchten Träger lokales Ausbeulen durch die große Steghöhe zu unterbinden und eine globale Verformung zu erzwingen. Die Steifen wurden entsprechend der Momentenlinie an jenen Orten modelliert, wo es vermutlich zu einem lokalen Ausbeulen kommen kann (siehe Abbildungen 7.71 – 7.73 und Abbildungen 7.72 - 7.74).

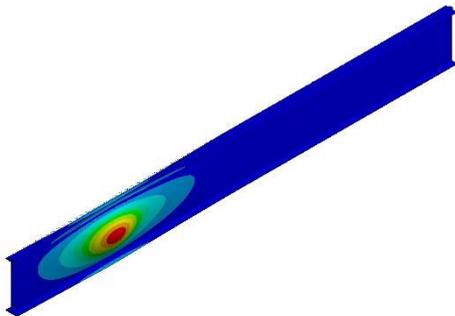


Abbildung 7.71: Eigenform ohne Steifen.

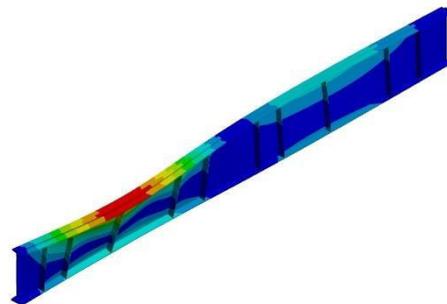


Abbildung 7.72: Eigenform mit Steifen.



Abbildung 7.73: Lokale Verformung.



Abbildung 7.74: Globale Verformung.

- Der Kranbahnträger aus Abbildung 7.75 ohne Steifen wird in der weiteren GNIA-Berechnung verwendet.

C: C:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:35

A Liniendruck 3: 90000 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

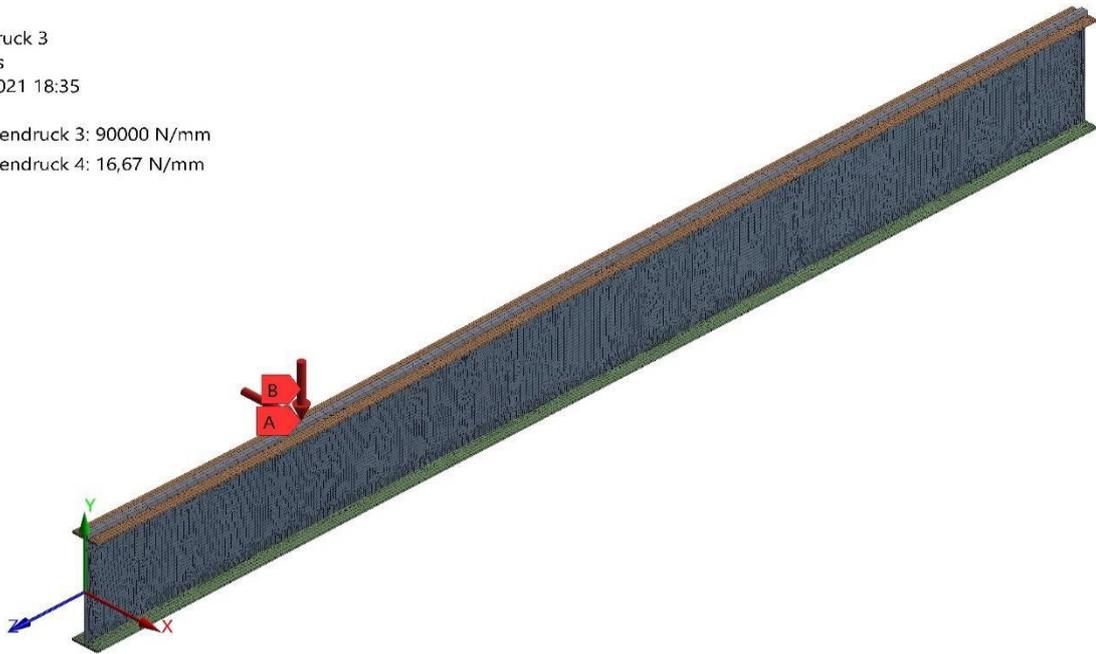


Abbildung 7.75: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC1.

C: C:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 14:41

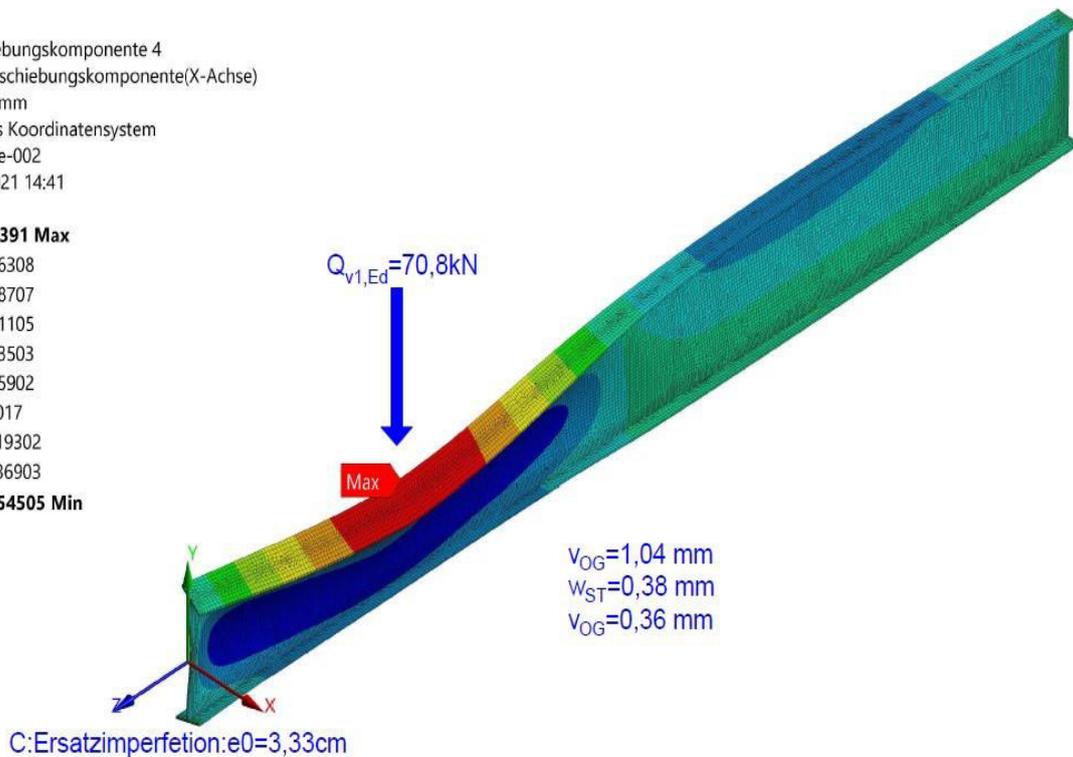
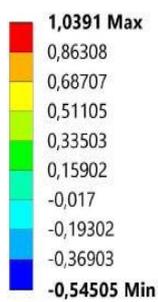


Abbildung 7.76: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 8,4e-002
 23.03.2021 14:41

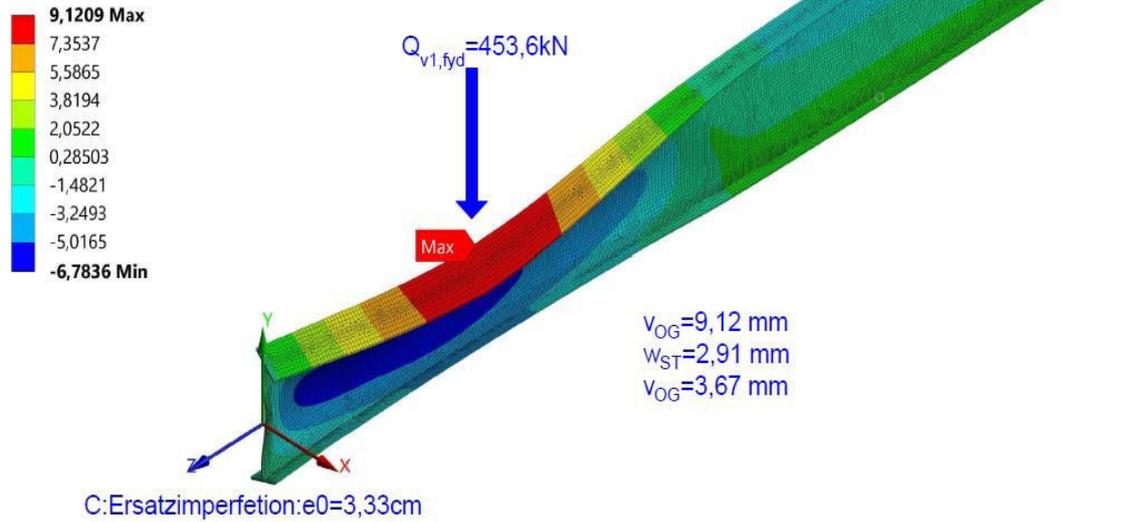


Abbildung 7.77: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC1 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

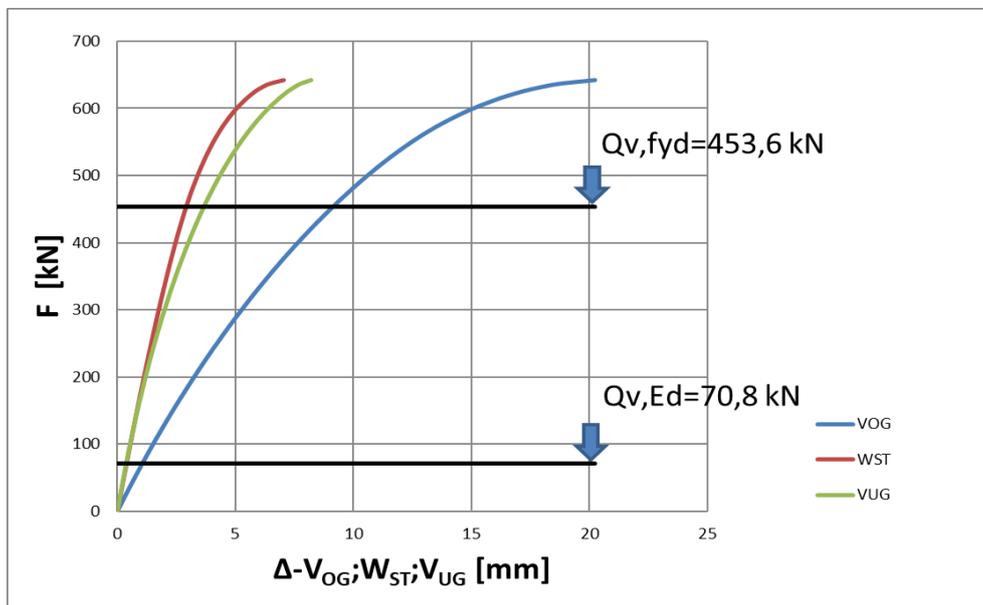


Abbildung 7.78: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{453,6} \cdot 100 = 15,6\%$$

- Kranbahnträger QS3 SY4 SC2:

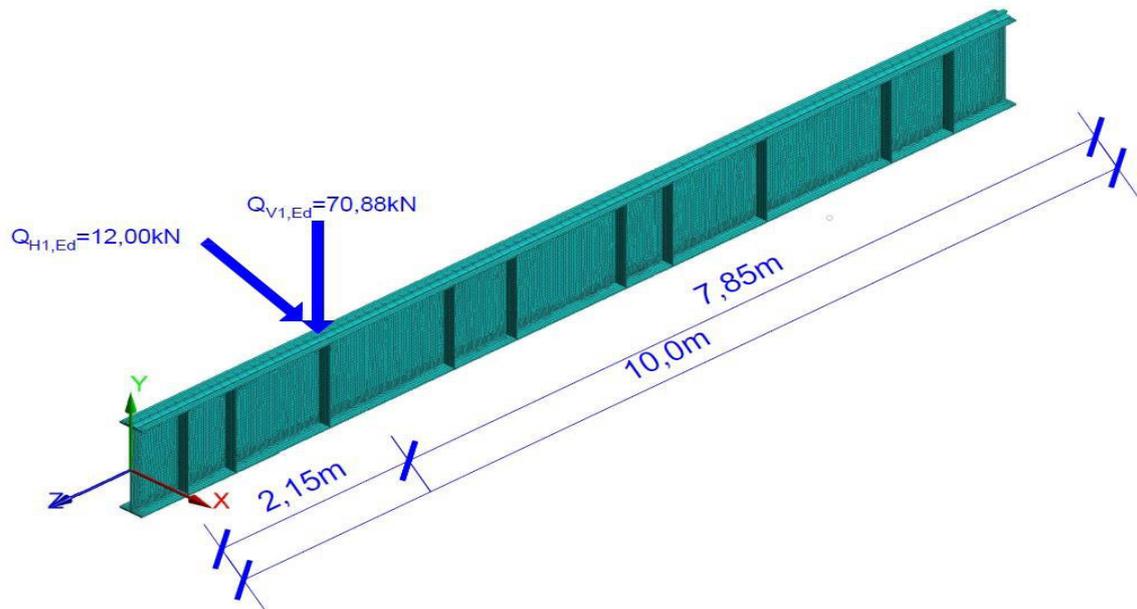


Abbildung 7.79: Lastaufstellung für die Lineare Berechnung von QS3 SY4 SC2.

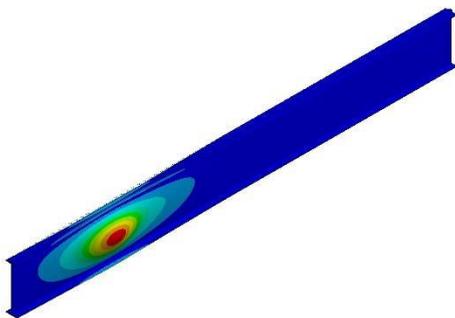


Abbildung 7.80: Eigenform ohne Steifen.

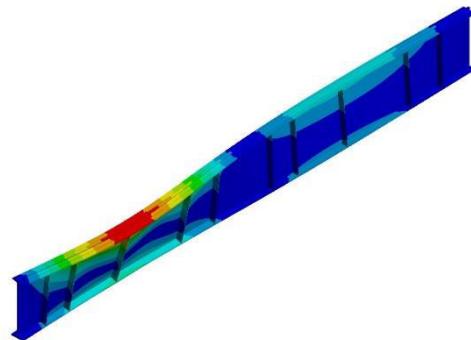


Abbildung 7.81: Eigenform mit Steifen.

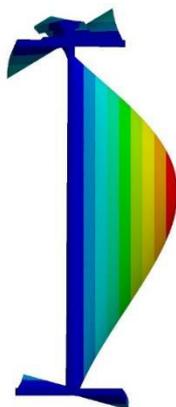


Abbildung 7.82: Lokale Verformung.

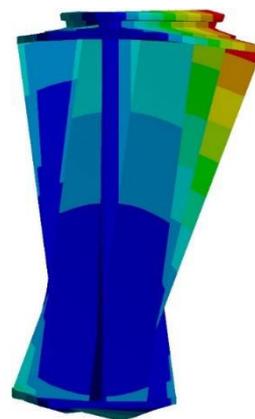


Abbildung 7.83: Globale Verformung.

C: C:
 Liniendruck 3
 Zeit: 1, s
 25.02.2021 19:32

- A Liniendruck 3: 1,4595e+005 N/mm
- B Liniendruck 4: 27,027 N/mm

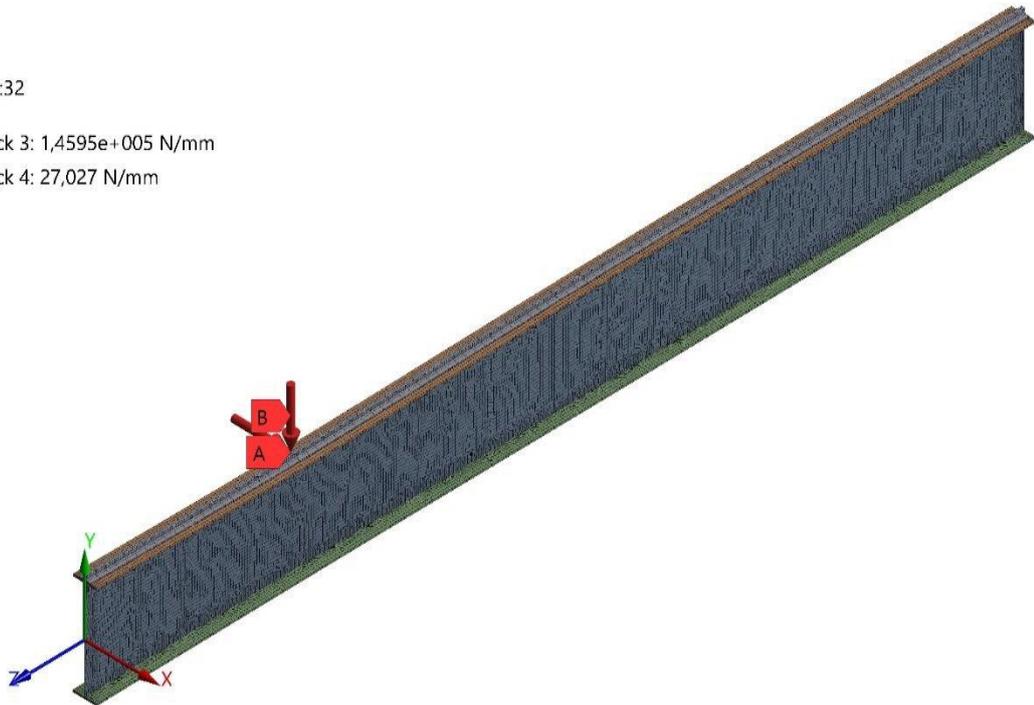


Abbildung 7.84: Lastaufstellung für die GNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC2.

C: C:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 1,3e-002
 23.03.2021 14:49

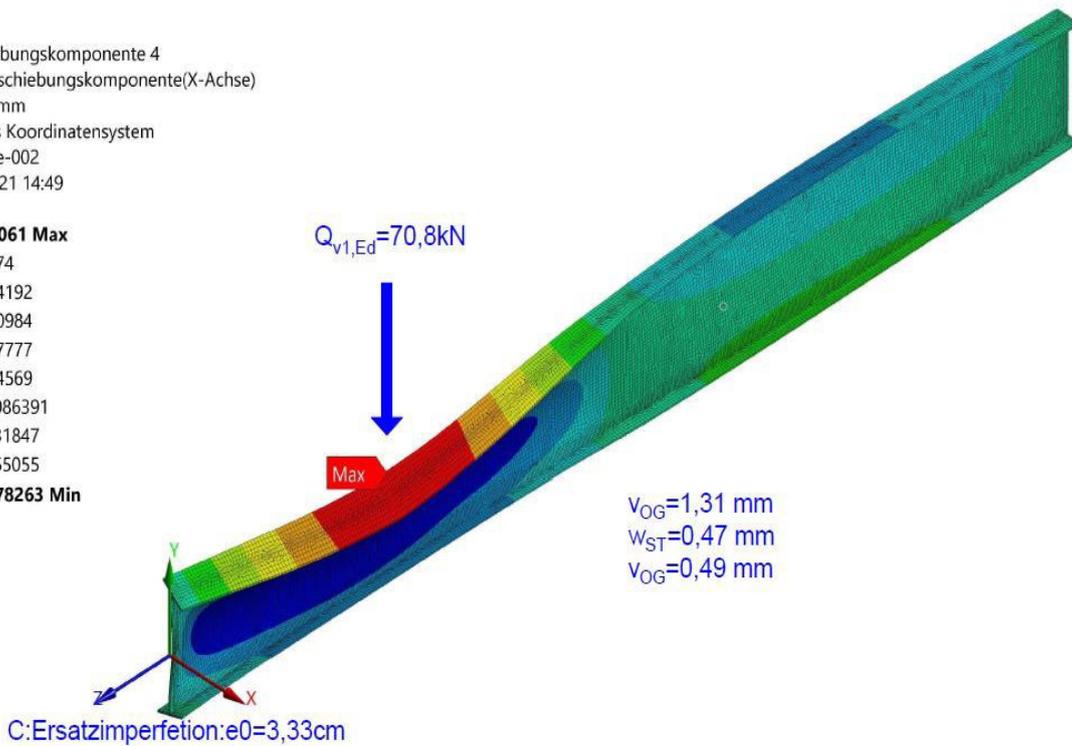
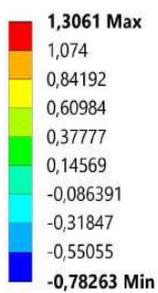


Abbildung 7.85: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 7,4e-002
 23.03.2021 14:50

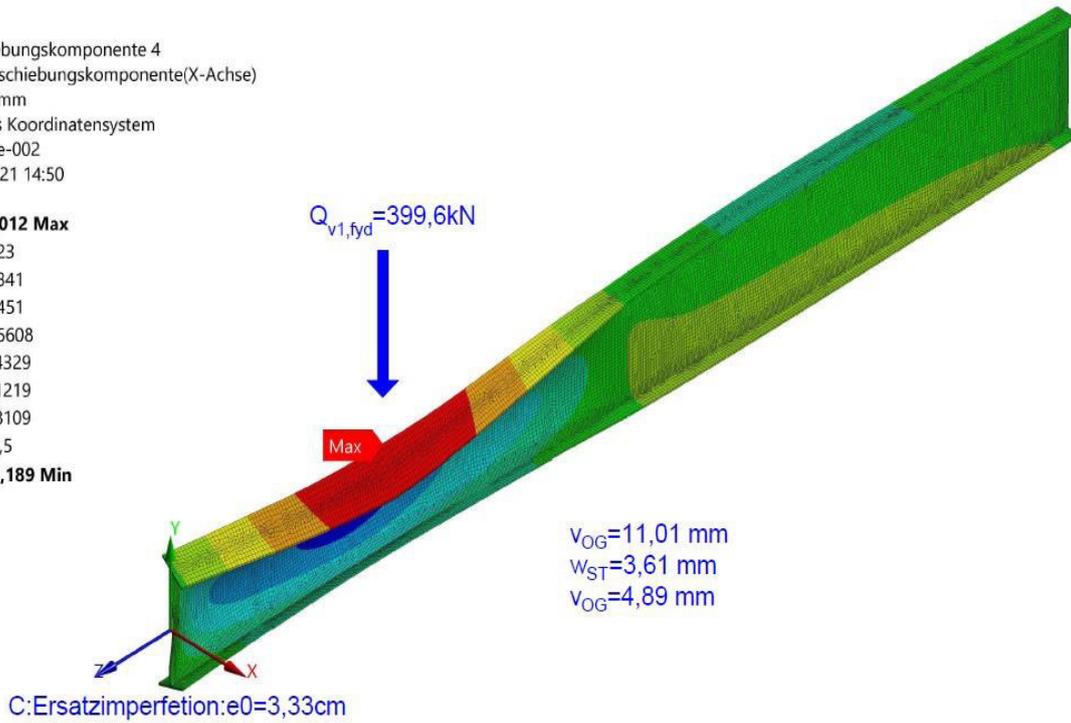
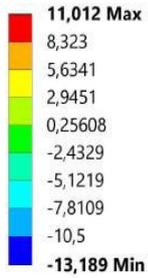


Abbildung 7.86: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC2 für die erreichte Kraft $Q_{v,fyd}$ an der Elastizitätsgrenze.

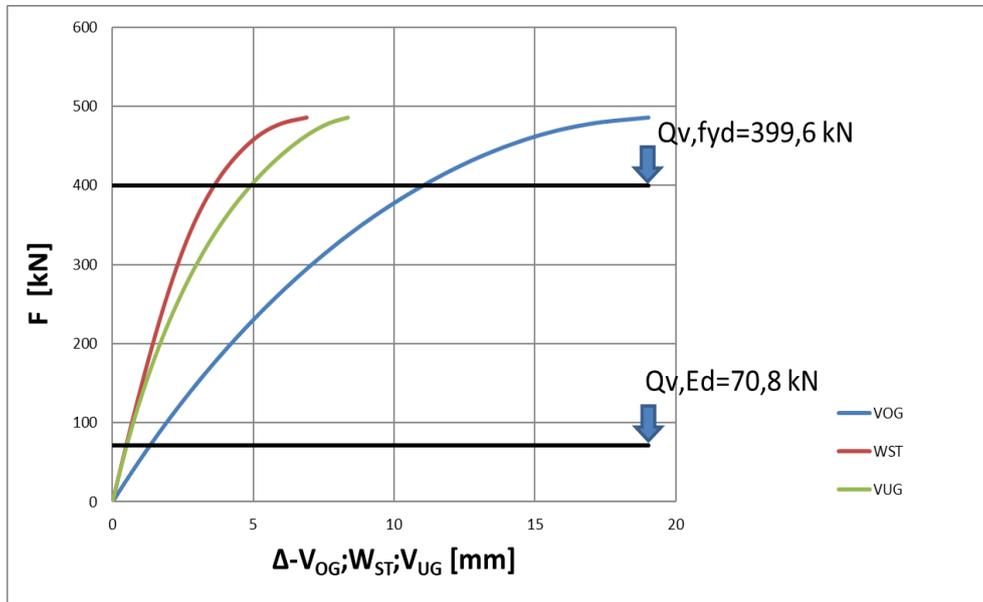


Abbildung 7.87: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{Q_{v,fyd}} \cdot 100 = \frac{70,8}{399,6} \cdot 100 = 17,7\%$$

7.8.1 Kommentar zu den F-Δ Diagrammen aus Kapitel 7.7 und 7.8

Aus den F-Δ Diagrammen in Abbildungen 7.60; 7.69 und 7.78; 7.87 ist zu sehen, dass erst nach dem ausknicken vom Obergurt und Untergurt der Steg folgt. Der sehr dünne Steg des Querschnitts QS3 mit einer Höhe von 1020 mm knickt schwieriger aus als die Gurte.

Die Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2 (siehe Abbildungen 7.60 und 7.69) weisen eine größere Kraft $Q_{v,fy,d}$ und kleinere Auslastung auf als die Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2 (siehe Abbildungen 7.78 und 7.87). Das ist wie im Abschnitt 7.6.1 durch das System SY4 bedingt, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte des Zweifeldträgers aufgebracht wird (siehe Kapitel 3.2 und 3.4).

7.9 Ergebnisvergleich der GNIA-Berechnung

GNIA-Berechnung			C:e0 [cm]	$Q_{v,Ed}$	$Q_{v,fyd}$ für SC1 [kN]	GNIA Auslastung für SC1 [%]
QS1	SY1	SC1	2.50	70.8	237.8	29.8
QS1	SY3	SC1	2.50	70.8	324.0	21.9
QS1	SY2	SC1	1.25	70.8	378.0	18.7
QS1	SY4	SC1	1.25	70.8	408.0	17.4
QS2	SY2	SC1	2.50	70.8	192.0	36.9
QS2	SY4	SC1	2.50	70.8	252.0	28.1
QS3	SY2	SC1	3.33	70.8	351.0	20.2
QS3	SY4	SC1	3.33	70.8	453.6	15.6
GNIA-Berechnung			C:e0 [cm]	$Q_{v,Ed}$	$Q_{v,fyd}$ für SC2 [kN]	GNIA Auslastung für SC2 [%]
QS1	SY1	SC2	2.50	70.8	231.0	30.6
QS1	SY3	SC2	2.50	70.8	348.0	20.3
QS1	SY2	SC2	1.25	70.8	396.0	17.9
QS1	SY4	SC2	2.50	70.8	351.0	20.2
QS2	SY2	SC2	2.50	70.8	163.2	43.4
QS2	SY4	SC2	2.50	70.8	250.0	28.3
QS3	SY2	SC2	3.33	70.8	372.5	19.0
QS3	SY4	SC2	3.33	70.8	399.6	17.7

Tabelle 7-4: Vergleich aller Ergebnisse der GNIA-Berechnung.

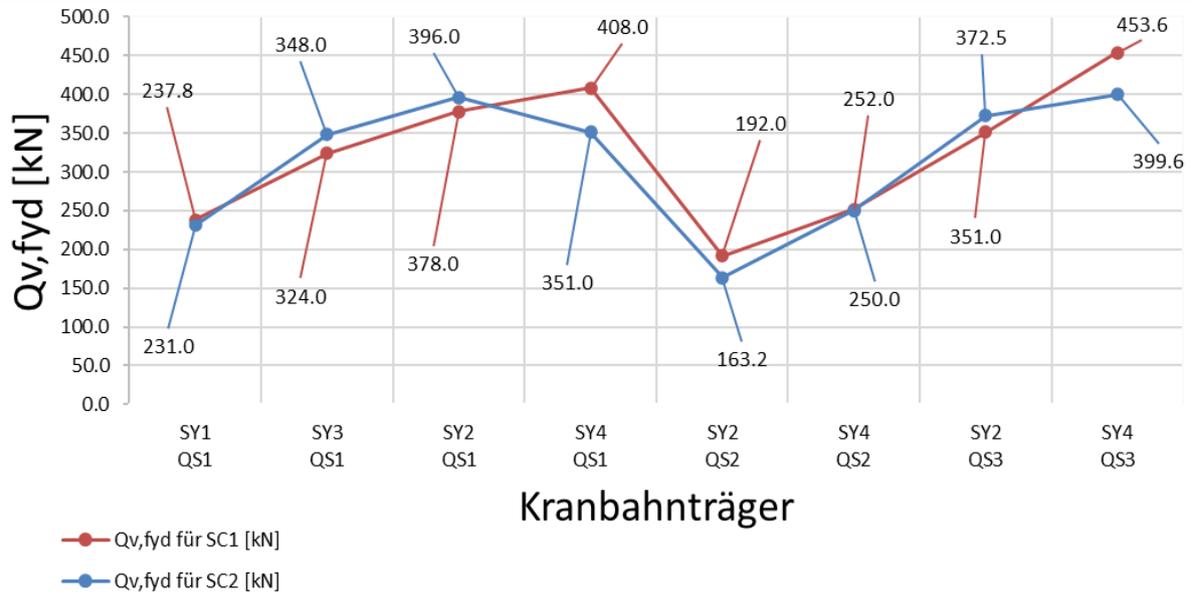


Abbildung 7.88: Kräfte $Q_{v,fyd}$ an der elastischen Grenze aus der GNIA-Berechnung.

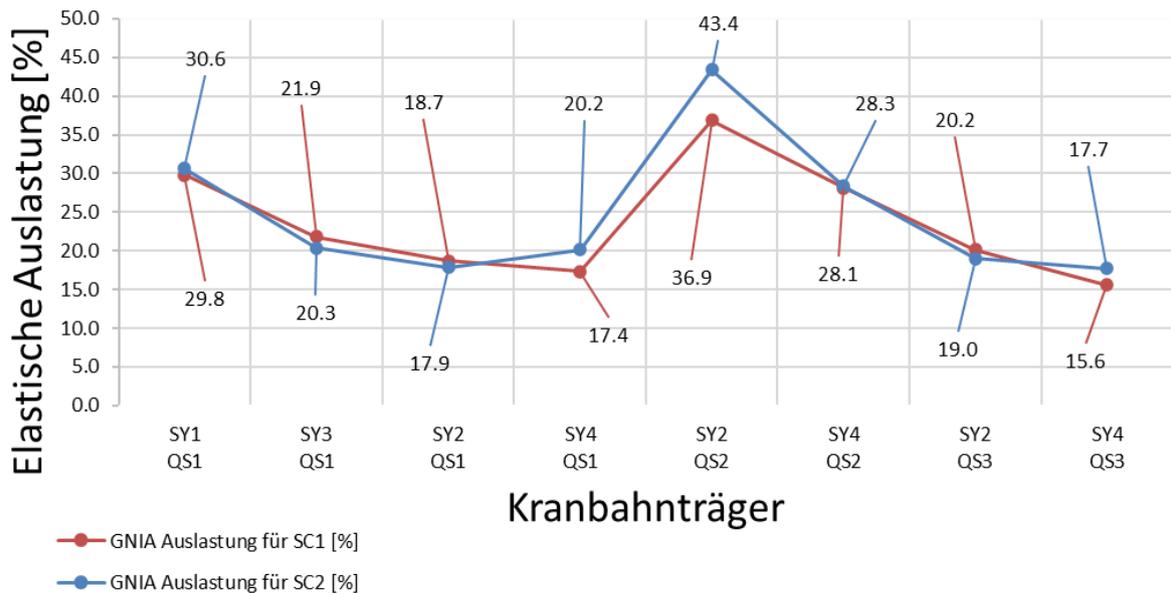


Abbildung 7.89: Auslastungen aus der GNIA-Berechnung.

Die Tabelle 7.4 und die Abbildungen 7.88 bis 7.89 deuten darauf hin, dass die Kranbahnen mit der Schiene SC2 eine kleinere Tragfähigkeit aufweisen. Da die Materialeigenschaften bei beiden Schienen gleich sind, ist davon auszugehen, dass Geometrie, Gewicht und Höhe der Schiene einen Einfluss haben (siehe Tabelle 7-5).

Die Höhe der Schiene SC2 verursacht ein größeres Torsionsmoment als bei Schiene SC1, zusätzlich hat die Schiene SC2 ein kleineres Torsionsträgheitsmoment als die Schiene SC1, was dazuer zu einer geringeren Tragfähigkeit führt.

	SC1	SC2
h [cm]	4.00	5.50
b [cm]	6.00	12.50
A [cm ²]	24.00	28.20
I _y [cm ⁴]	32.00	90.00
I _z [cm ⁴]	72.00	170.00
I _T [cm ⁴]	75.12	39.00
g [kN/mm]	0.26	0.29

Tabelle 7-5: Kranbahnschienen mit Querschnittswerten.

Aus der Tabelle 7.4 ist auch zu sehen, dass der Kranbahnträger mit QS1 die größte Tragfähigkeit hat. Danach folgt QS3 und zuletzt der Kranbahnträger mit QS2. Dies ist durch die Querschnittswerte wie das Trägheitsmoment und das Widerstandsmoment in Z-richtung, die Steghöhen und -dicken sowie die Flanscbreiten und -dicken bedingt.

	QS1	QS2	QS3
h [cm]	44.00	48.00	104.00
b_f [cm]	30.00	25.00	25.00
t_w [cm]	1.15	1.00	1.00
t_f [cm]	2.10	1.50	2.00
A [cm ²]	178.03	120.00	200.00
I_y [cm ⁴]	63721.63	48150.00	343466.66
I_z [cm ⁴]	9465.33	3910.00	5126.66
$W_{el,y}$ [cm ³]	2896.00	2006.30	6605.00
$W_{el,z}$ [cm ³]	631.00	312.80	417.00
$W_{pl,y}$ [cm ³]	3216.00	2250.00	7600.00
$W_{pl,z}$ [cm ³]	966.00	480.00	645.00
g [kN/mm]	1.89	1.27	2.12

Tabelle 7-6: Querschnittswerte der berechneten Kranbahnträger.

8. GMNIA-Berechnung

GMNIA oder Geometrisch und materiell nichtlineare Berechnung mit Imperfektionen basiert auch auf der Wölbkrafttorsionstheorie II. Ordnung unter Ansatz von Imperfektionen und der nichtlinearen Theorie großer Verformungen. Das bedeutet, dass die Kranbahn vor der Berechnung eine Ersatzimperfektion „D:e0“ lt. [2] (siehe Abbildung 8.1) erhält und die Randbedingungen so modelliert sind, dass die Wölbkrafttorsion nicht verhindert wird. Es folgt die Berechnung, bei der die maximale Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich errechnet wird. Auch hier werden große Verformungen zugelassen.

8.1 Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2

- Wie in Kapitel 7.1 schon erwähnt, wird die Statisch-mechanische Analyse mit der Bezeichnung "D:" der Eigenwert-Beulanalyse zur GMNIA-Berechnung herangezogen.
- Vor der weiteren Berechnung wird die Statisch-Mechanische Analyse „D:“ mit der passenden Ersatzimperfektion „D: e0“ skaliert (siehe Tabelle 7-1 bis Tabelle 7-2).

Kranbahnquerschnitt	Knicklinie nach Tabelle 6.2	plastische Berechnug D:e0
QS1	c	500/150= 3,33 cm
QS2	c	500/150= 3,33 cm
QS3	d	500/100= 5,0 cm

Tabelle 8-1: Bemessungswerte der Erstazimperfektionen „D:e0“ für die einzelnen Kranbahnquerschnitte.

- Die Werte für $\overline{\lambda}_{LT}$ wurden aus dem Kapitel 5. entnommen und die Ersatzimperfektionen „D: e0“ entsprechend halbiert (siehe Tabelle 8-2).

Kranbahnträger			λ_{LT}	Ersatzimperfektion D:e0 [cm]
QS1	SY1	SC1	0.75	3.33
QS1	SY3	SC1	0.70	3.33
QS1	SY2	SC1	0.67	1.67
QS1	SY4	SC1	0.64	1.67
QS2	SY2	SC1	0.83	3.33
QS2	SY4	SC1	0.78	3.33
QS3	SY2	SC1	0.93	5.00
QS3	SY4	SC1	0.87	5.00
Kranbahnträger			λ_{LT}	Ersatzimperfektion D:e0 [cm]
QS1	SY1	SC2	0.80	3.33
QS1	SY3	SC2	0.72	3.33
QS1	SY2	SC2	0.69	1.67
QS1	SY4	SC2	0.76	3.33
QS2	SY2	SC2	0.99	3.33
QS2	SY4	SC2	0.92	3.33
QS3	SY2	SC2	0.93	5.00
QS3	SY4	SC2	0.98	5.00

Tabelle 8-2: Ersatzimperfektion „D:e0“ für alle berechneten Kranbahnträger.

- Die Werte „D: e0“ aus der Abbildung 8.1 werden zum Skalierfaktor der Statisch-Mechanischen Analyse „D:“ und ergeben die Vorverformung.

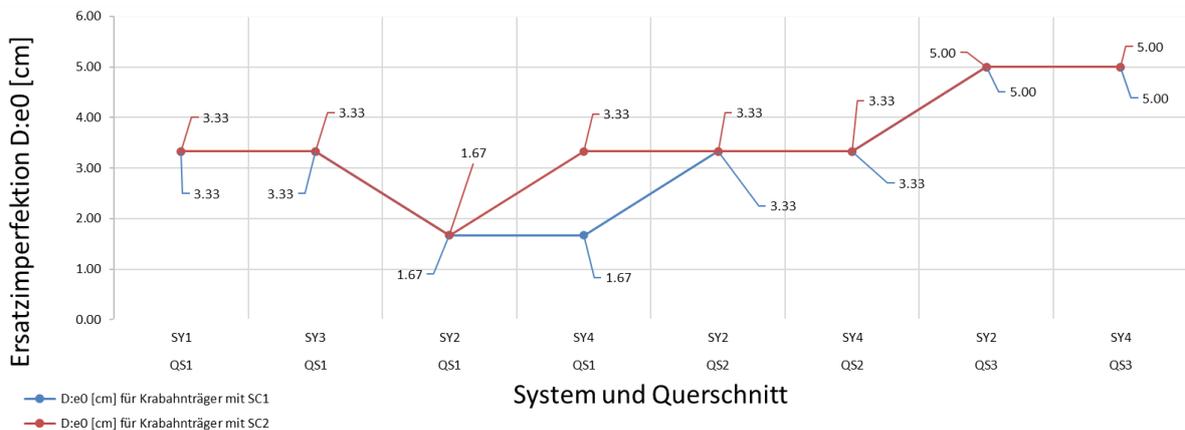


Abbildung 8.1: Diagramm der Ersatzimperfektionen „D:e0“.

- Der Kranbahnträger mit der skalierten Verformung „D:e0“ wird gleich belastet wie der Träger aus Kapitel 7. Auch hier wird die vertikale Belastung ständig gesteigert, die horizontalen Kräfte bleiben konstant.
- In der Analyseneinstellung wird wie bei der GNIA- Berechnung, eine Schrittsteuerung durch Substeps eingestellt (siehe Abbildung 8.2).

D: D:

Liniendruck 3
Zeit: 1, s
24.02.2021 13:21

- A Liniendruck 3: 48333 N/mm
- B Liniendruck 4: 16,67 N/mm
- C Liniendruck 5: 48333 N/mm
- D Liniendruck 6: 16,67 N/mm

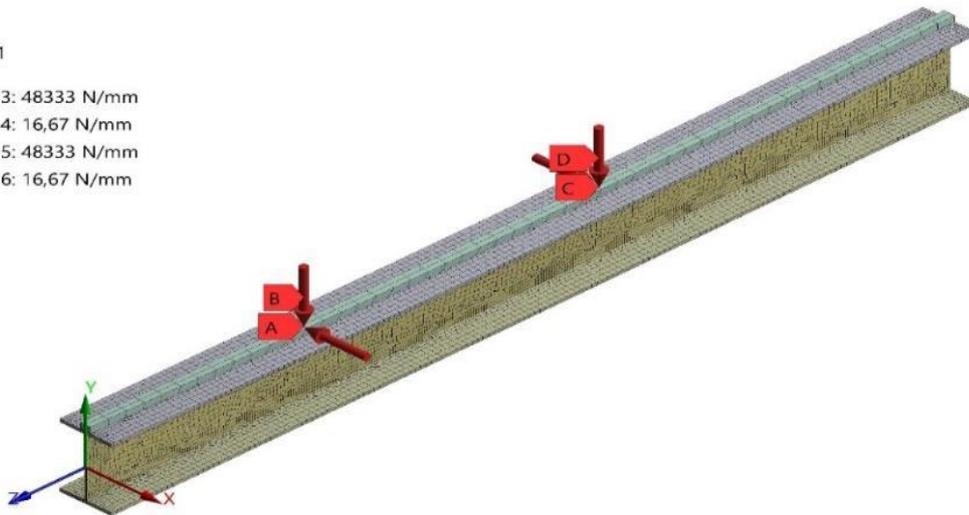
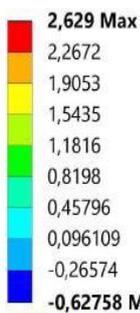


Abbildung 8.2: Lastaufstellung für die GMNIA – Berechnung von QS1 SY1 SC1.

- Damit auch bei der Mechanischen Analyse „D:“ eine nichtlineare Berechnung möglich wird, werden wie im Kapitel 7. große Verformungen zugelassen.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
Einheit: mm
Globales Koordinatensystem
Zeit: 2,4e-002
23.03.2021 12:25



D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

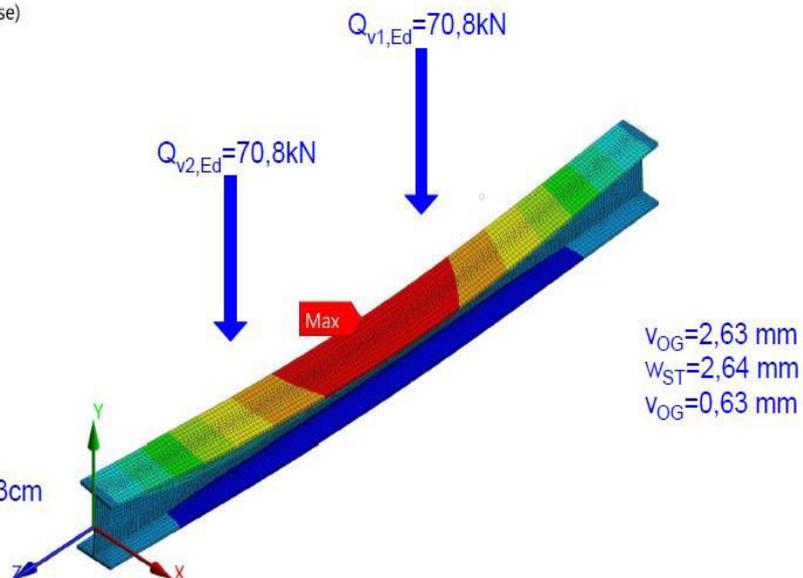


Abbildung 8.3: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

- Für die GMNIA-Berechnung werden die Vertikallasten so lange gesteigert bis es zum Versagen des Kranbahnträgers kommt und die Plastische Kapazität mit der Traglast des Systems F_{Ult} erreicht wird (siehe Abbildung 8.4).

D: D:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 0,106

20.02.2021 13:01

32,101 Max

27,888

23,675

19,462

15,25

11,037

6,8241

2,6114

-1,6014

-5,8142 Min

D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

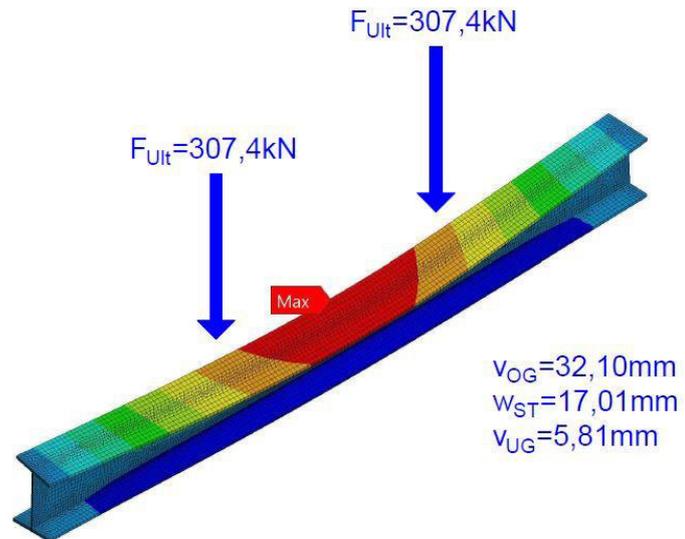


Abbildung 8.4: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

- Es werden $F-\Delta$ Diagramme mit den Ergebnissen der GMNIA-Berechnung erstellt, man sieht die Verformungen von: Obergurt (v_{OG}), Steg (v_{ST}) und Untergurt (v_{UG}).
- Ebenfalls dargestellt sind die Kräfte, die das Verhalten des Querschnitts zeigen: $Q_{v,Ed}$: die tatsächlich auftretende Kraft, $Q_{v,fy,d}$: jene Kraft, bei der die Fließgrenze erreicht wird und das Plastizieren des Querschnitts beginnt, F_{Ult} : jene Kraft, die zu einem vollständigen Plastizieren des Querschnitts führt und die maximale Traglast des Systems darstellt.

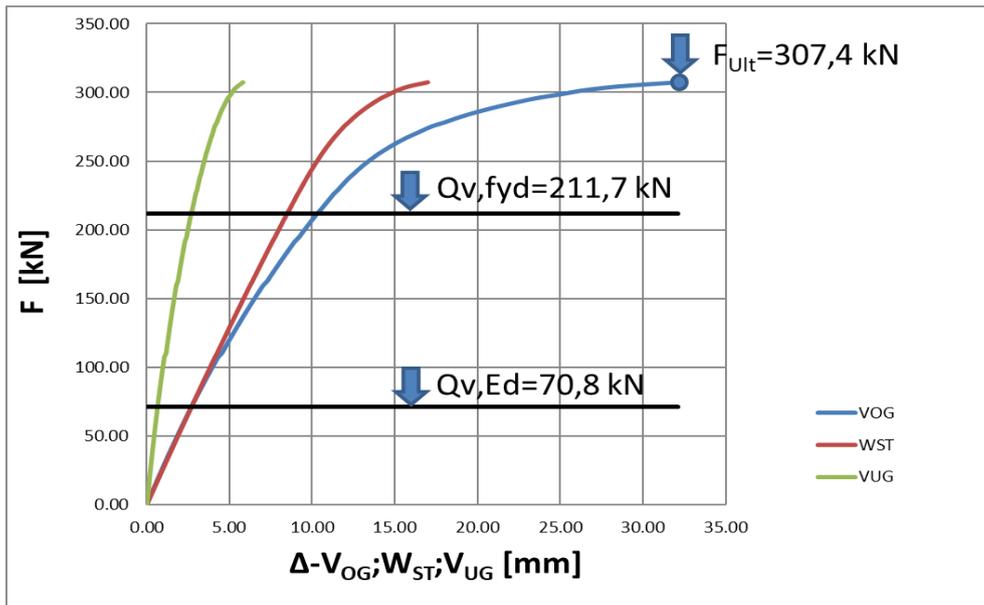


Abbildung 8.5: F– Δ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC1.

- Die Auslastung folgt aus dem Vergleich der Kraft $Q_{v,Ed}$ und der maximalen Traglast F_{Ult} im Plastischen Bereich wie in der Gleichung (17).

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = [\%] \quad (17)$$

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{307,4} \cdot 100 = 23,0\%$$

- Um den Umfang dieser Arbeit zu reduzieren, wird im Abschnitt 8.1 nur die Komplette GMNIA-Berechnung für den Kranbahnträger QS1SY1SC1 gezeigt, für die nachfolgenden Kranbahnträger werden die Ergebnisse der Gesamtverformung mit passenden F– Δ Diagrammen und der Auslastung dargestellt.
- Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse für die lineare Berechnung befinden sich in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.8.

- Kranbahnträger QS1 SY1 SC2:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

24.02.2021 14:24

- A Liniendruck 3: 81081 N/mm
- B Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C Liniendruck 5: 81081 N/mm
- D Liniendruck 6: 27,027 N/mm

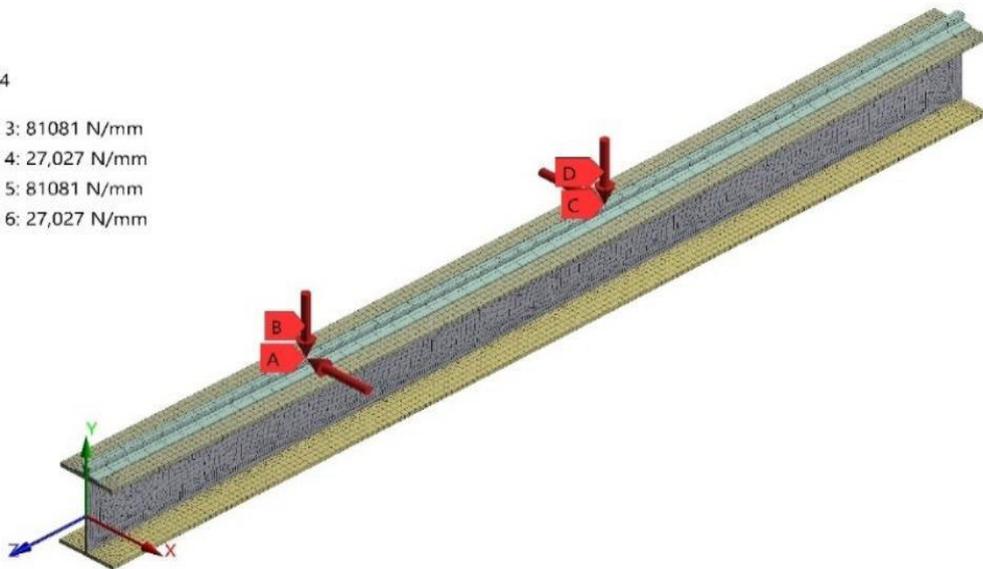


Abbildung 8.6: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

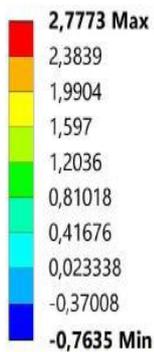
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,3e-002

23.03.2021 12:36



D: Ersatzimperfektion: $e_0 = 3,33 \text{ cm}$

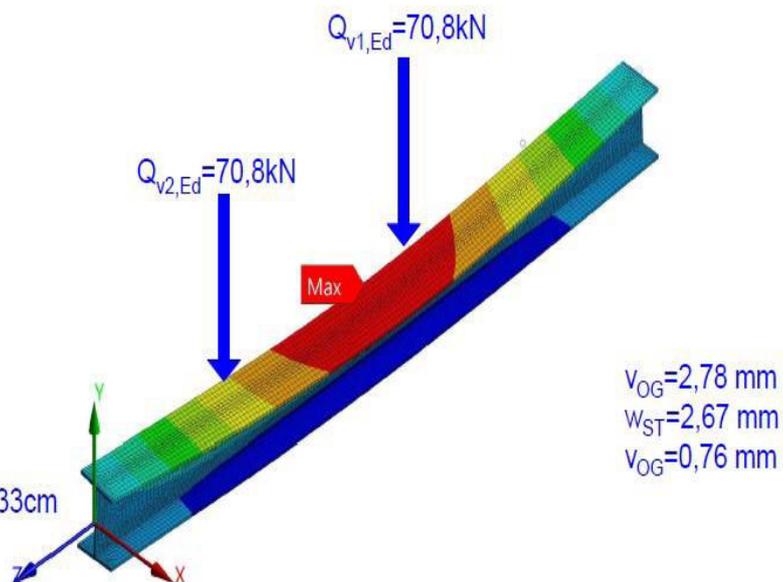
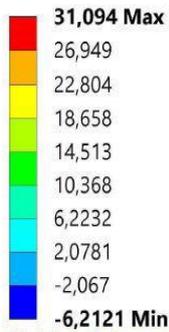


Abbildung 8.7: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 9,6e-002
 21.02.2021 17:00



D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

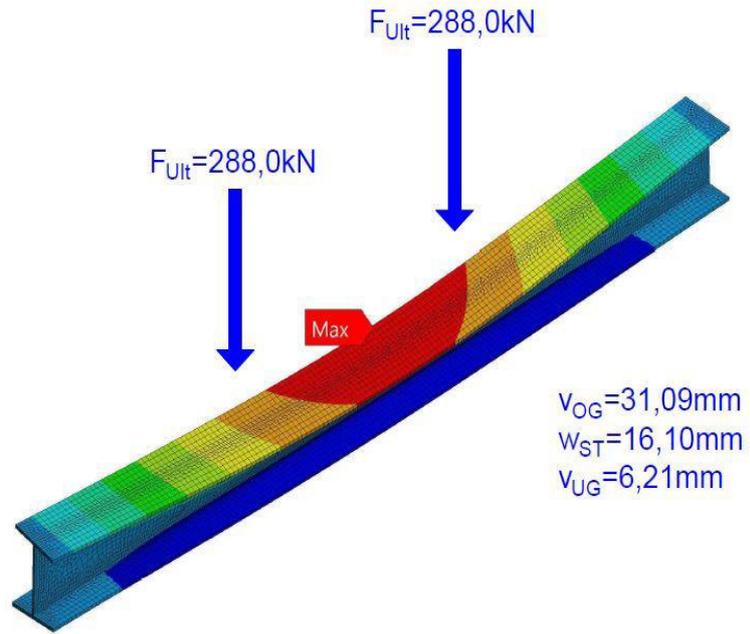


Abbildung 8.8: Gesamtverformung von QS1 SY1 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

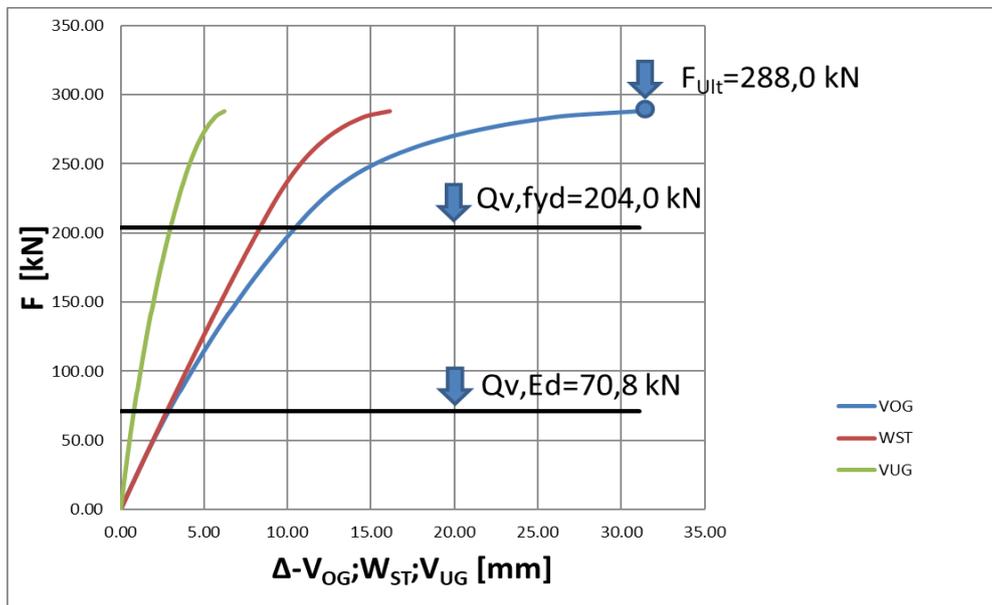


Abbildung 8.9: F–Δ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY1 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{288,0} \cdot 100 = 24,6\%$$

8.2 Kranbahnträger QS1SY2SC1 und QS1SY2SC2

- Kranbahnträger QS1 SY2 SC1:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:04

A Liniendruck 3: 1,e+005 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

C Liniendruck 5: 1,e+005 N/mm

D Liniendruck 6: 16,67 N/mm

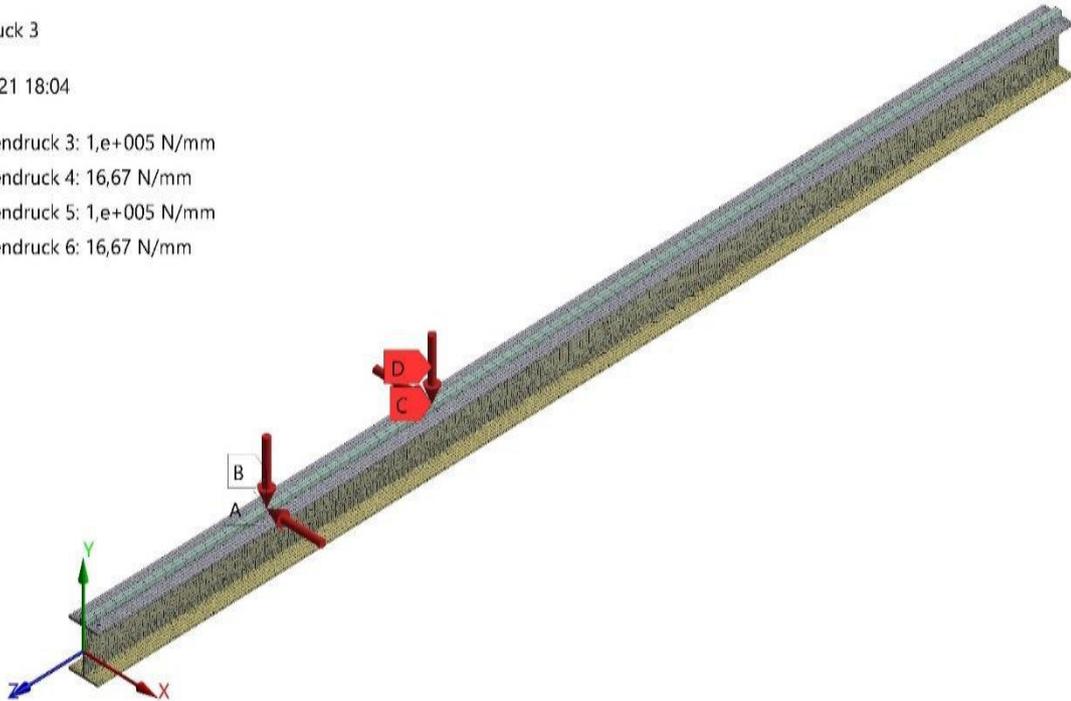


Abbildung 8.10: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

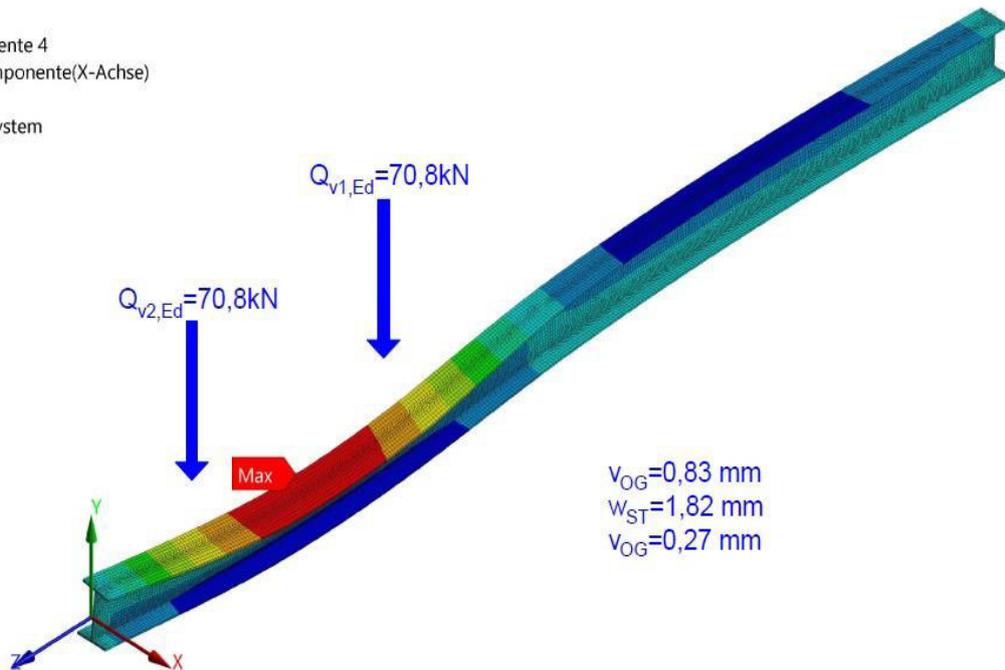
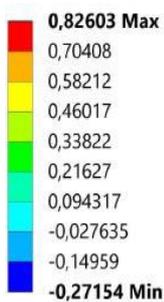
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,2e-002

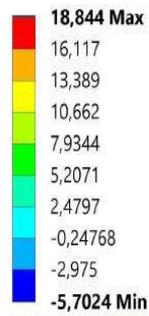
23.03.2021 12:44



D:Ersatzimperfektion:e0=1,67cm

Abbildung 8.11: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 8,6e-002
 20.02.2021 13:13



D: Ersatzimperfektion: $e_0 = 1,67\text{cm}$

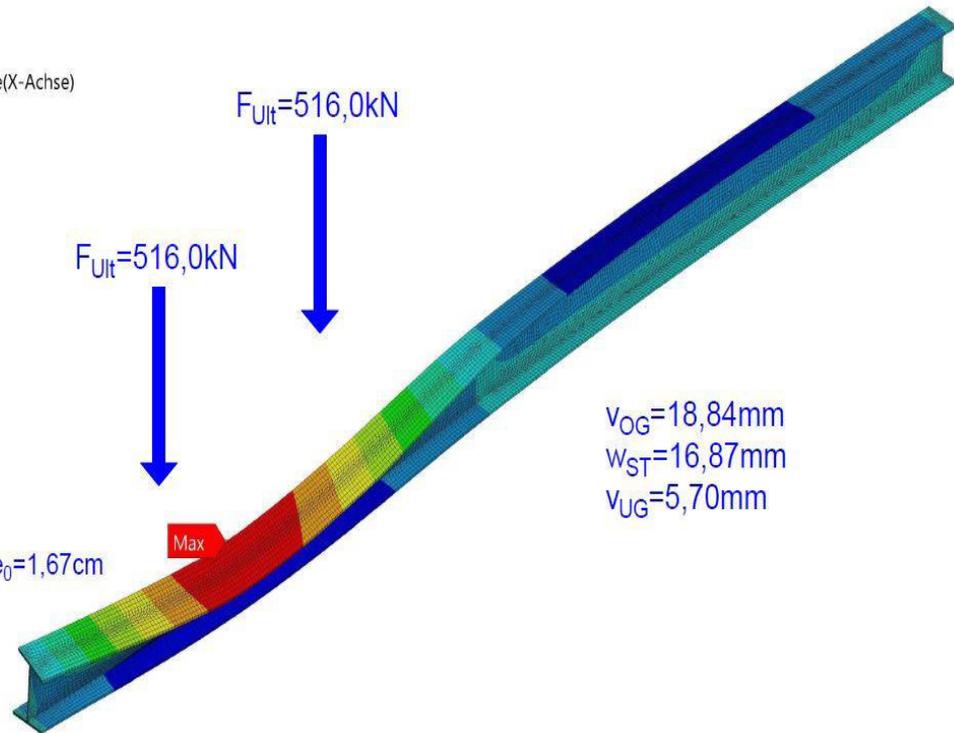


Abbildung 8.12: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

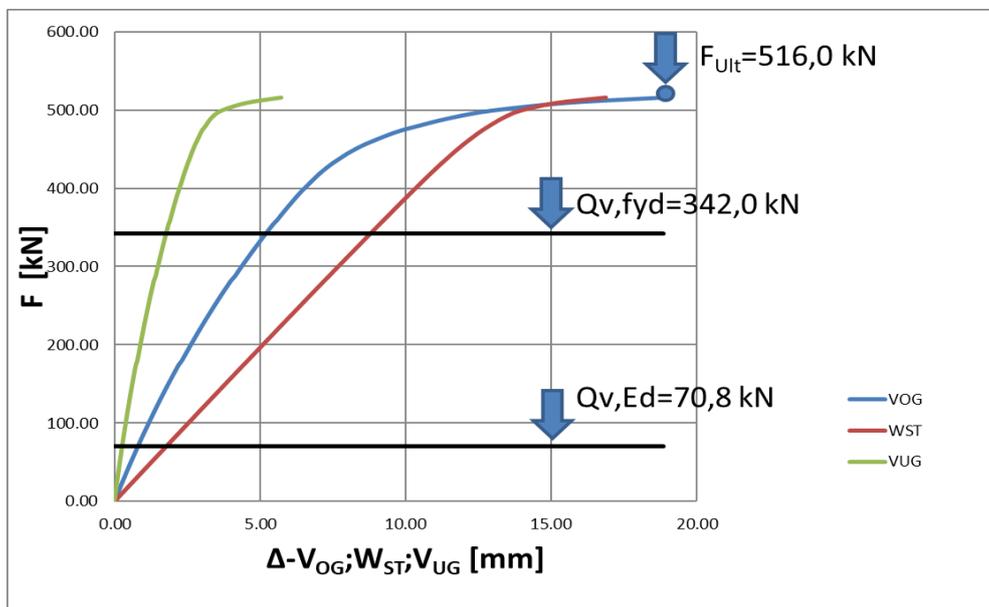


Abbildung 8.13: F- Δ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC1

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{516,0} \cdot 100 = 13,7\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY2 SC2:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:43

- A** Liniendruck 3: 1,0811e+005 N/mm
- B** Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C** Liniendruck 5: 1,0811e+005 N/mm
- D** Liniendruck 6: 27,027 N/mm

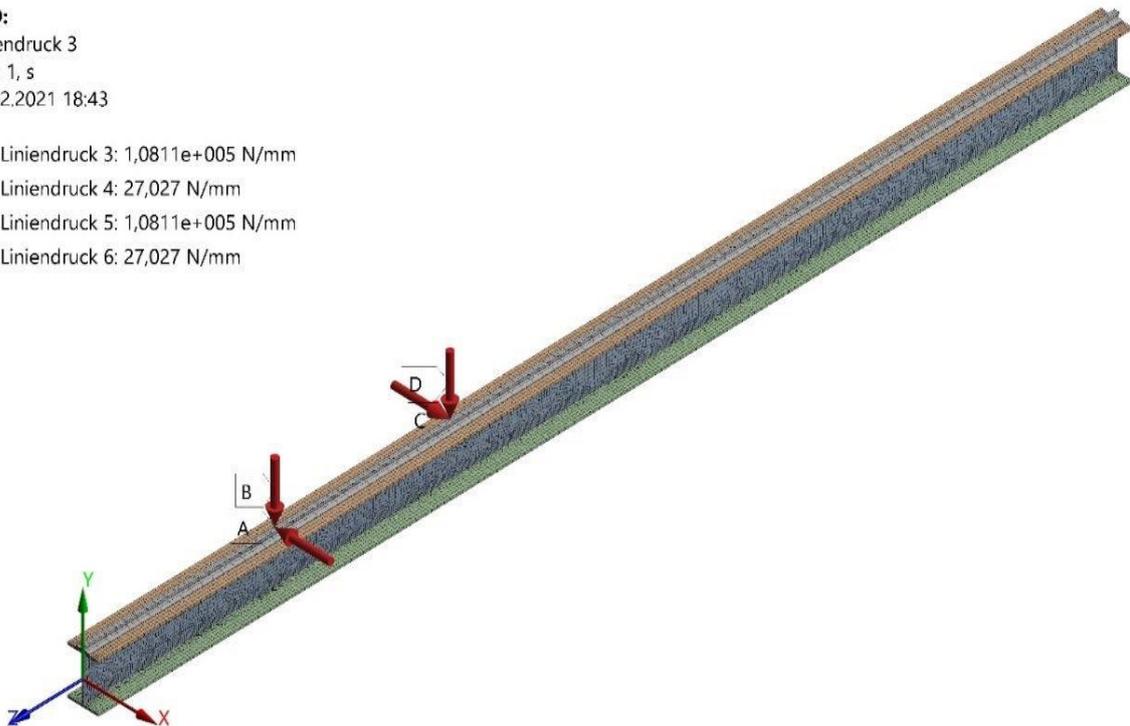


Abbildung 8.14: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

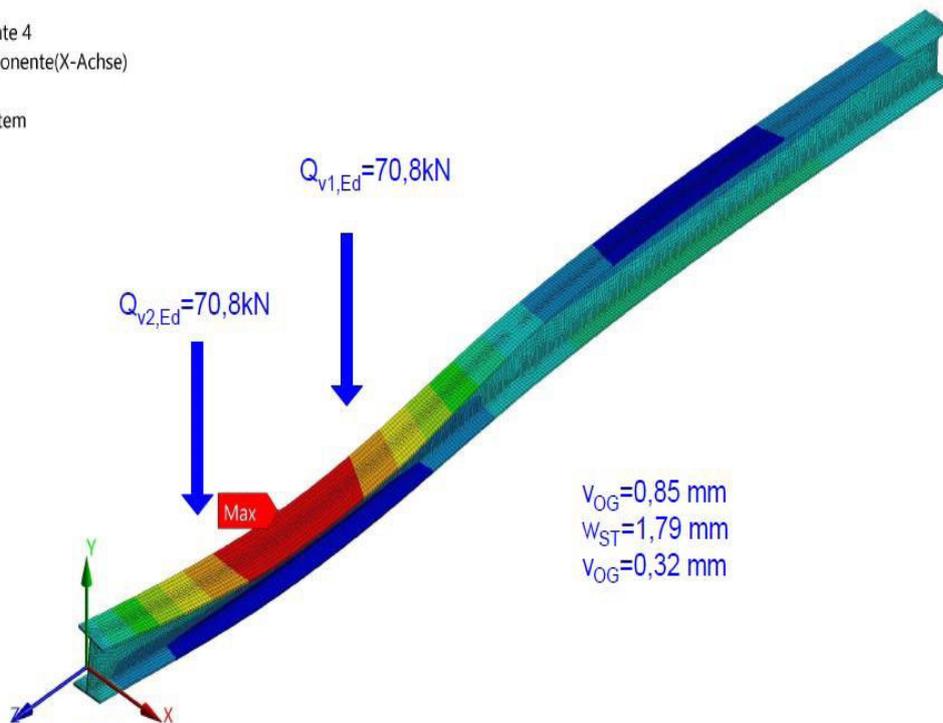
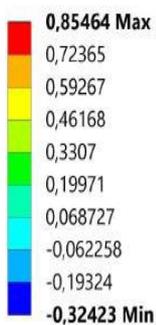
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,8e-002

23.03.2021 12:53



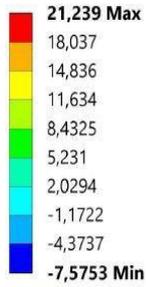
$V_{OG} = 0,85 \text{ mm}$
 $W_{ST} = 1,79 \text{ mm}$
 $V_{OG} = 0,32 \text{ mm}$

D: Ersatzimperfektion: $e_0 = 1,67 \text{ cm}$

Abbildung 8.15: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 0,13
 20.02.2021 13:21



D: Ersatzimperfektion: $e_0 = 1,67\text{cm}$

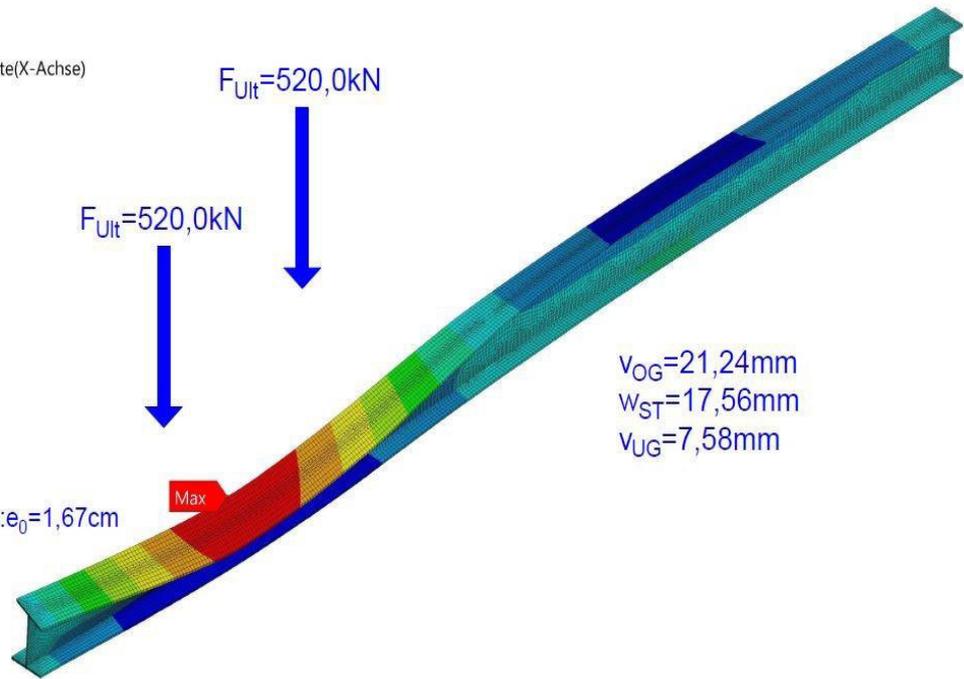


Abbildung 8.16: Gesamtverformung von QS1 SY2 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

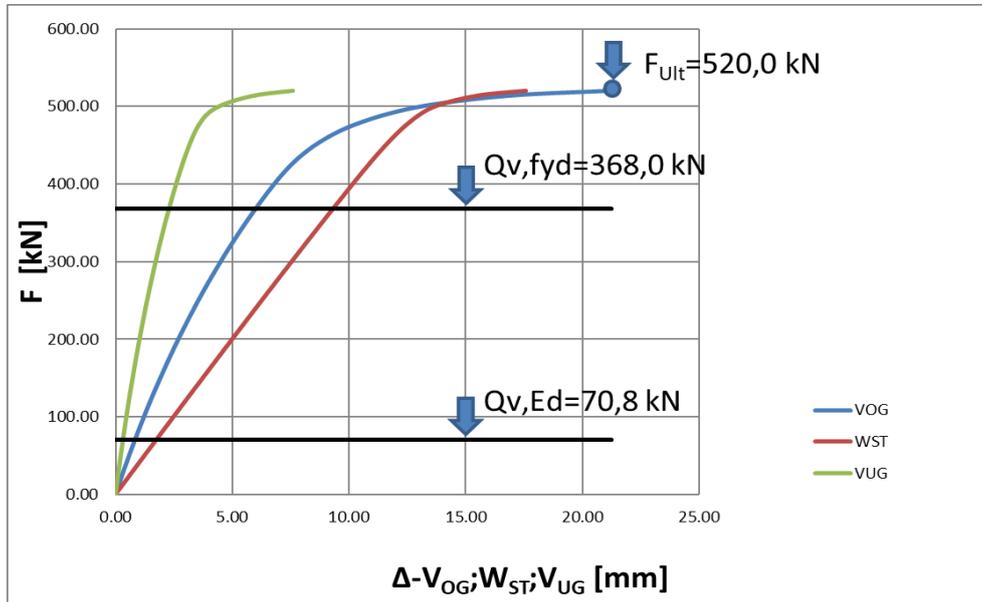


Abbildung 8.17: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY2 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{520,0} \cdot 100 = 13,6\%$$

8.3 Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2

- Kranbahnträger QS1 SY3 SC1:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:10

A Liniendruck 3: 80000 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

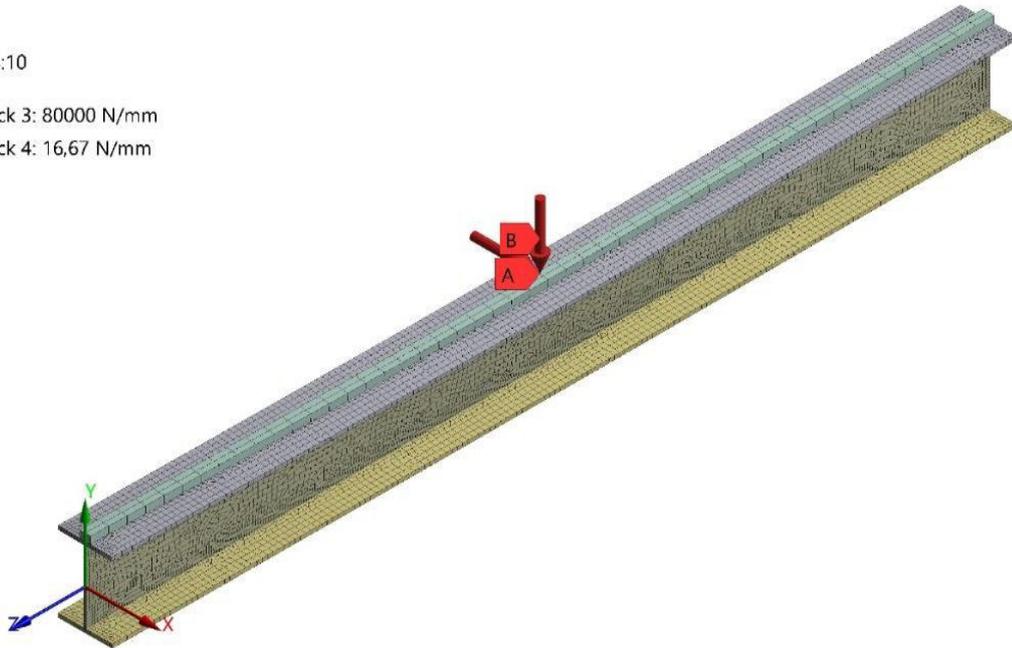


Abbildung 8.18: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,5e-002

23.03.2021 13:01

1,6545 Max

1,4209

1,1872

0,95362

0,71999

0,48636

0,25273

0,019102

-0,21453

-0,44816 Min

D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

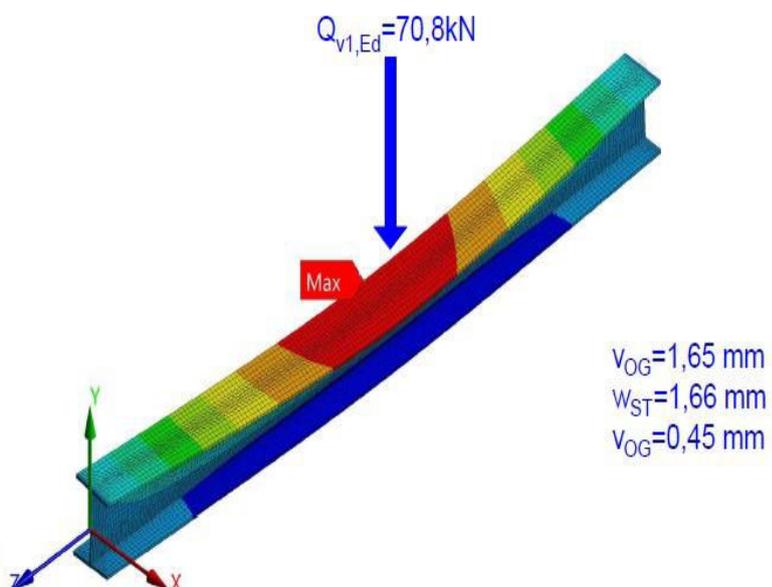
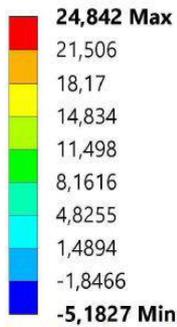


Abbildung 8.19: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 9,3e-002
 20.02.2021 13:30



D: Ersatzimperfection: $e_0=3,33\text{cm}$

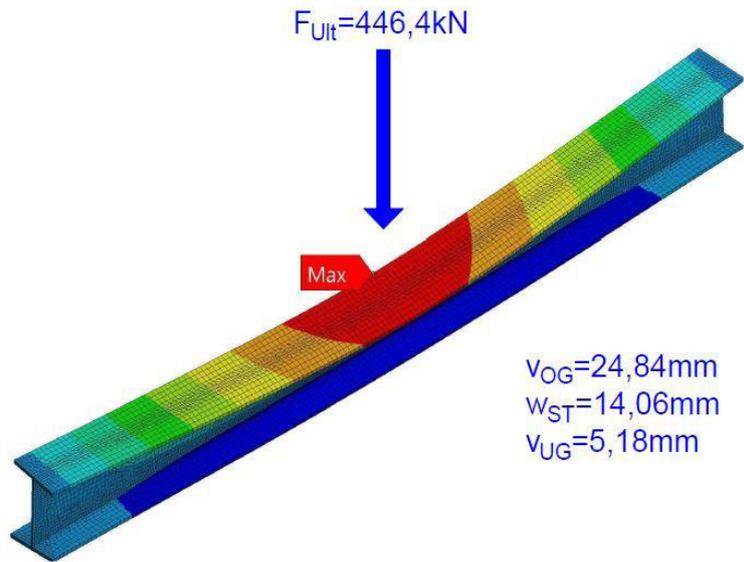


Abbildung 8.20: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

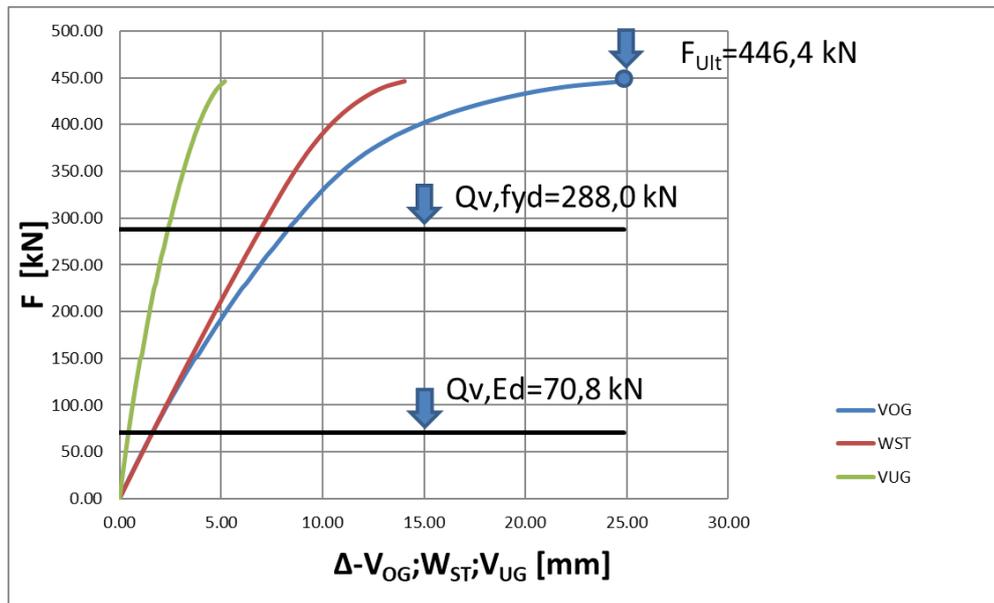


Abbildung 8.21: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{446,4} \cdot 100 = 15,9\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY3 SC2:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:51

A Liniendruck 3: 97297 N/mm

B Liniendruck 4: 27,027 N/mm

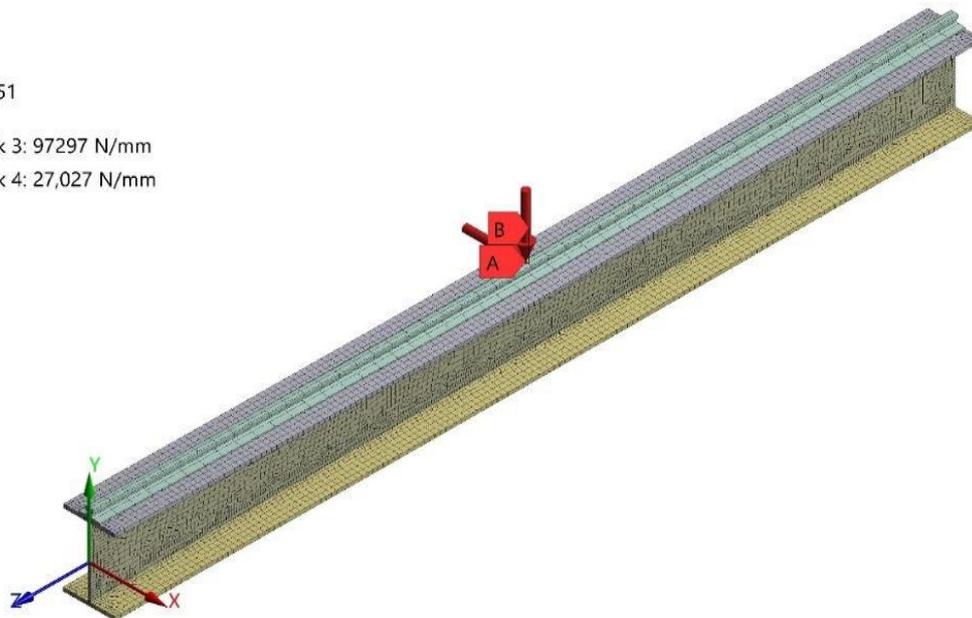


Abbildung 8.22: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

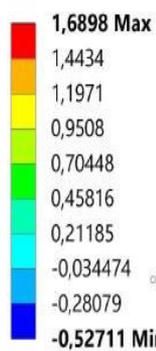
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,e-002

23.03.2021 13:09



D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

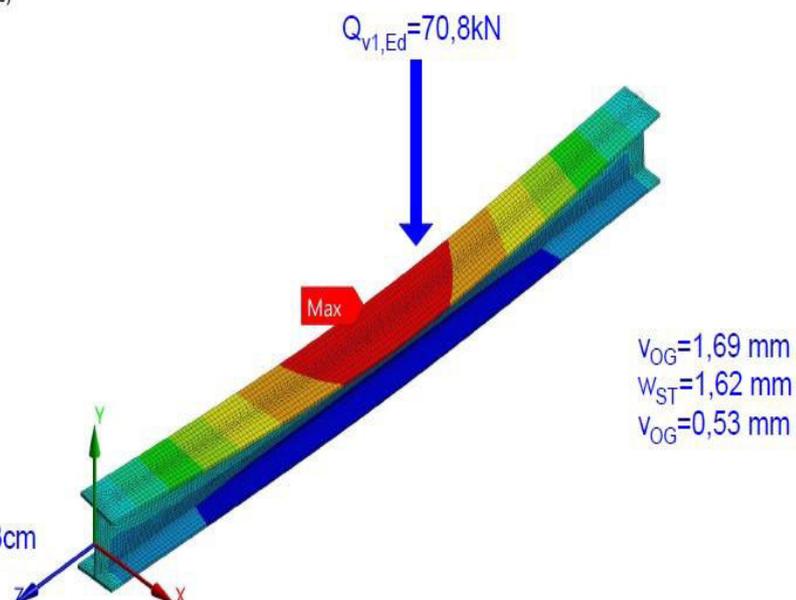


Abbildung 8.23: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

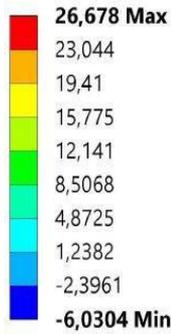
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 0,123

20.02.2021 13:35



D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

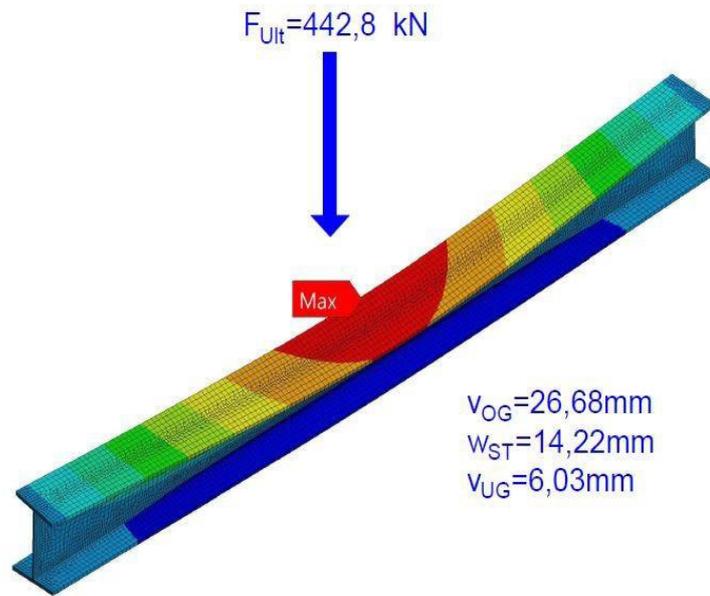


Abbildung 8.24: Gesamtverformung von QS1 SY3 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

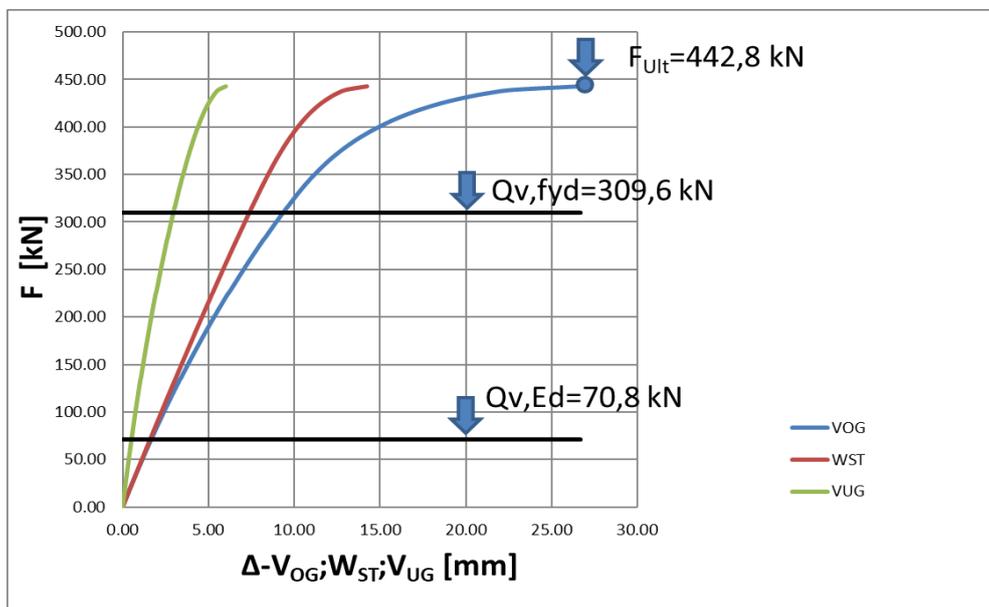


Abbildung 8.25: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY3 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{442,8} \cdot 100 = 16,0\%$$

8.3.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.1 und 8.3

Aus den F- Δ Diagrammen in den Abbildungen 8.5; 8.9 und 8.21; 8.25 ist zu sehen, dass sich das dünnste Einzelteil (Steg) vor dem Obergurt und Untergurt beim Ausknicken aktiviert. Das entsteht durch das Dickenverhältnis zwischen Gurt und Steg, weil der Steg halb so dick ist wie der Obergurt und Untergurt vom Querschnitt QS1. Am Ende versagt doch zuerst der Obergurt gefolgt mit Steg und Untergurt.

Die Kranbahnträger QS1SY3SC1 und QS1SY3SC2 (siehe Abbildungen 8.21 und 8.25) weisen eine größere Traglast F_{Ult} und eine kleinere Auslastung als die Kranbahnträger QS1SY1SC1 und QS1SY1SC2 auf (siehe Abbildungen 8.5 und 8.9) was durch das System SY3 bedingt ist, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte aufgebracht wird (siehe Kapitel 3.3).

8.4 Kranbahnträger QS1SY4SC1 und QS1SY4SC2

- Kranbahnträger QS1 SY4 SC1:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:16

A Liniendruck 3: 50000 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

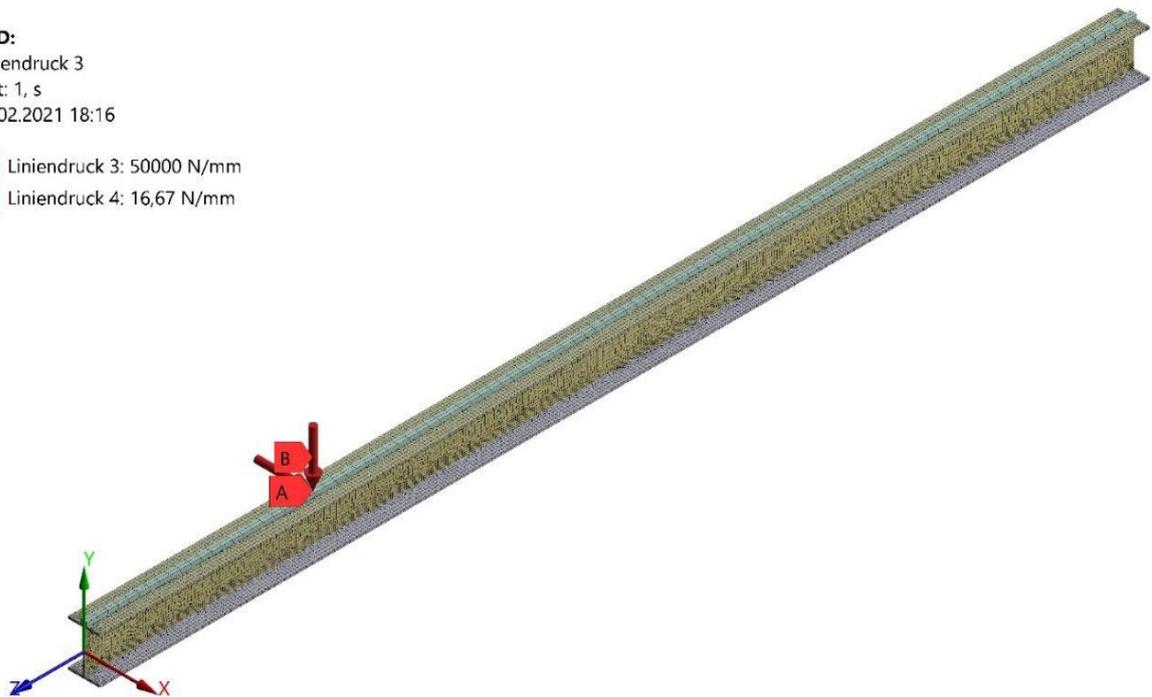


Abbildung 8.26: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,4e-002

23.03.2021 13:26

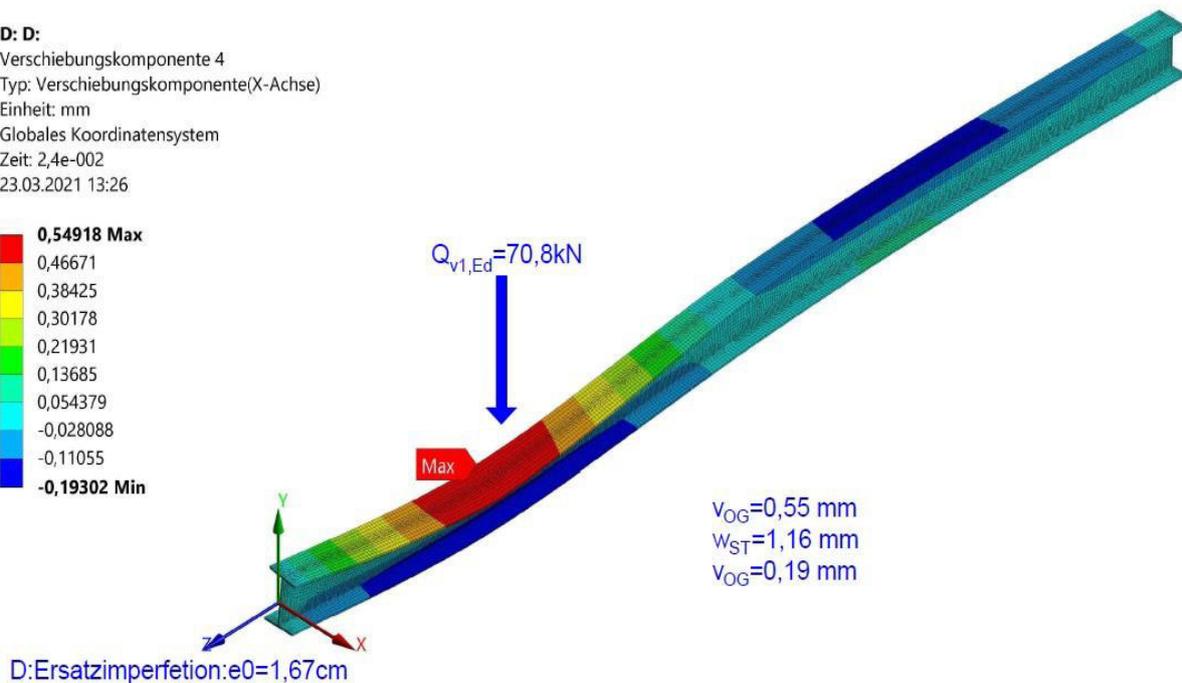
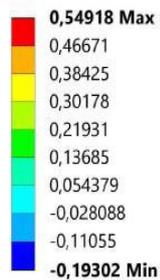
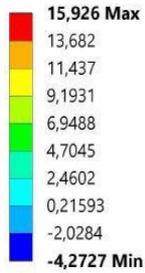


Abbildung 8.27: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 0,222
 20.02.2021 14:05



D: Ersatzimperfektion: $e_0 = 1,67\text{cm}$

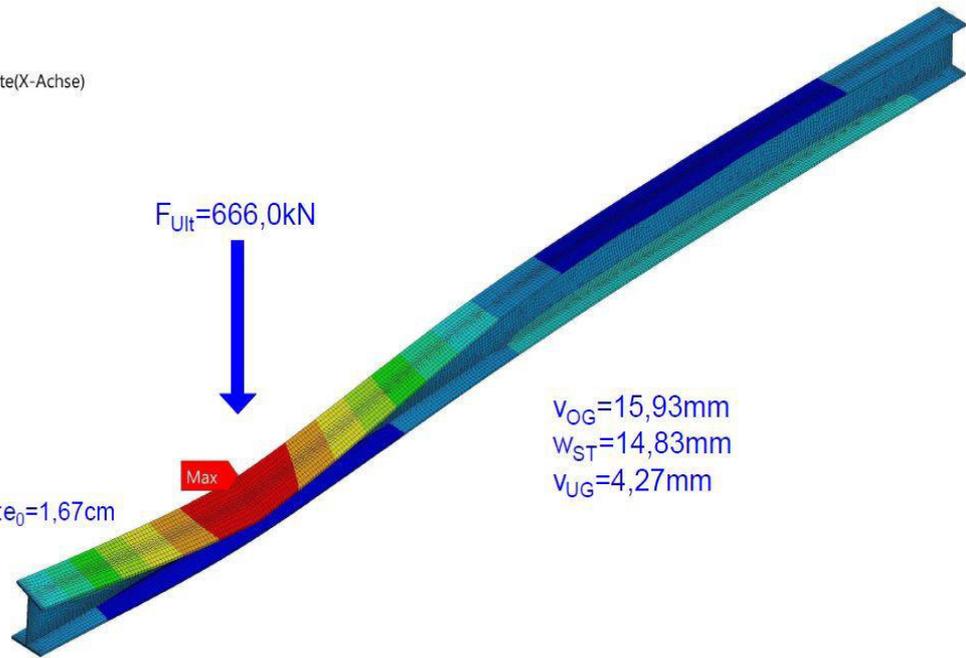


Abbildung 8.28: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

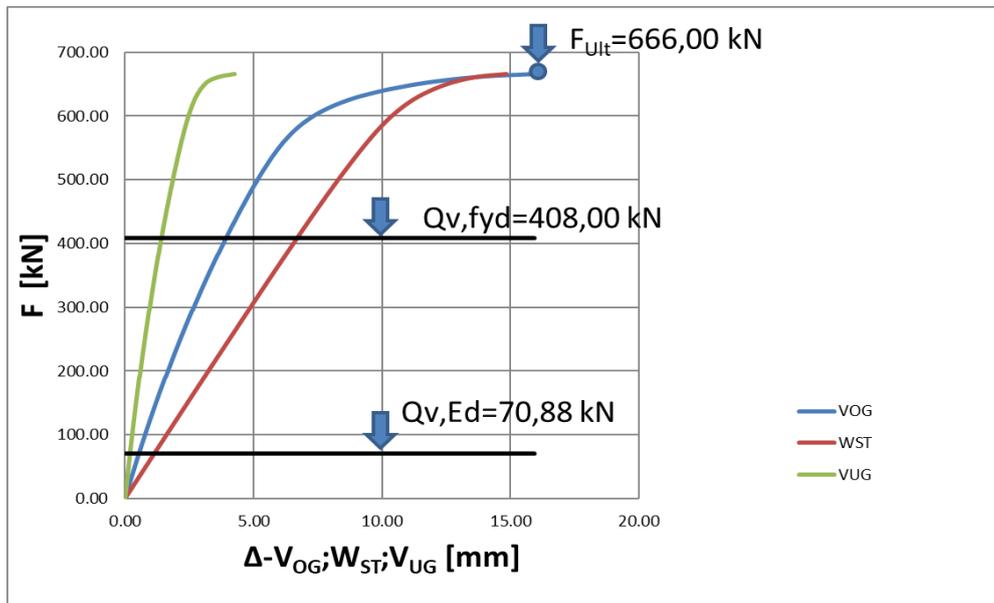


Abbildung 8.29: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{666,0} \cdot 100 = 10,6\%$$

- Kranbahnträger QS1 SY4 SC2:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:59

A Liniendruck 3: 1,4595e+005 N/mm

B Liniendruck 4: 27,027 N/mm

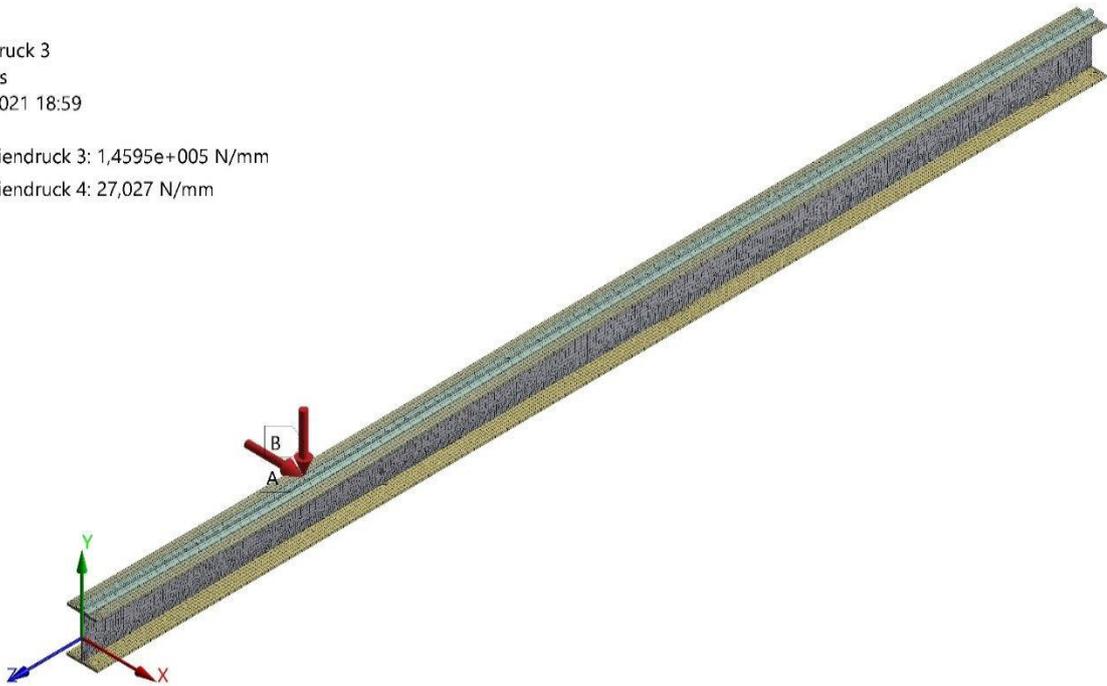


Abbildung 8.30: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

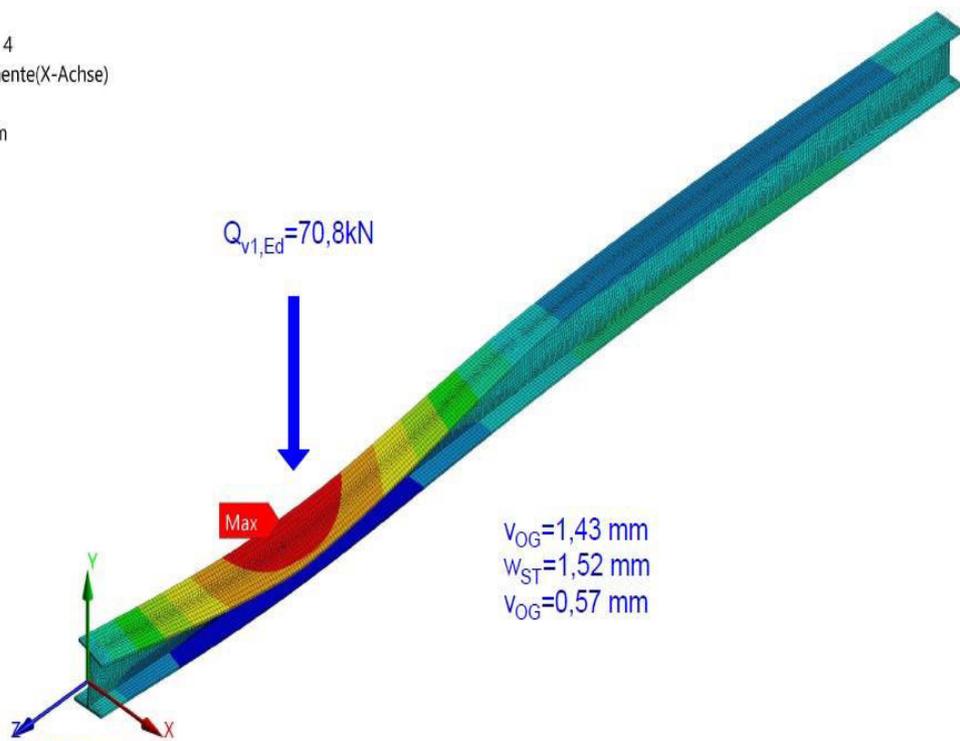
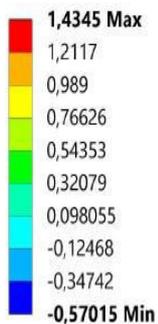
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 13:33



$v_{OG} = 1,43 \text{ mm}$

$w_{ST} = 1,52 \text{ mm}$

$v_{OG} = 0,57 \text{ mm}$

D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

Abbildung 8.31: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

C: C:

Verschiebungskomponente 5

Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 6,5e-002

23.03.2021 13:35

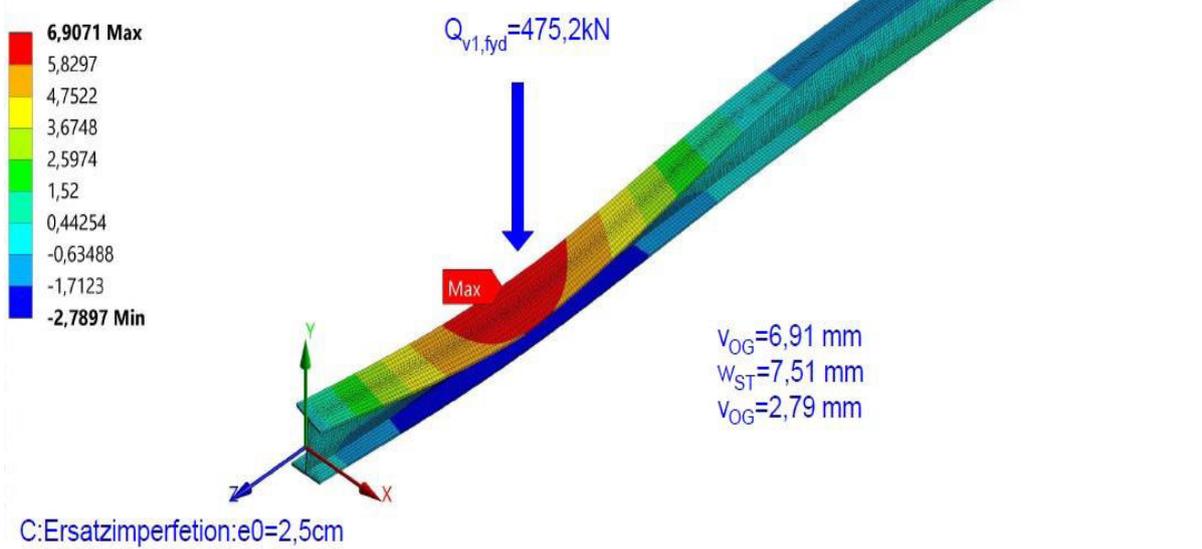


Abbildung 8.32: Gesamtverformung von QS1 SY4 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

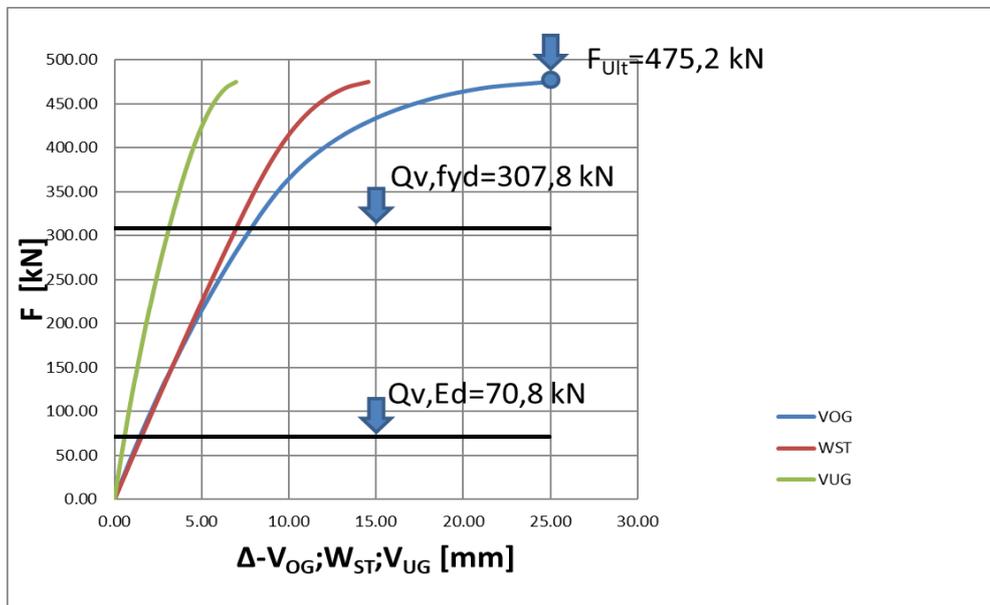


Abbildung 8.33: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS1 SY4 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{475,2} \cdot 100 = 14,9\%$$

8.4.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.2 und 8.4

Die F- Δ Diagramme in den Abbildungen 8.13; 8.17 und 8.29; 8.33 zeigen, dass der Steg zuerst ausknickt, das kommt wieder aus den Dickenverhältnis zwischen Gurt und Steg bei QS1. Schlussendlich versagt zuerst wieder der Obergurt gefolgt mit Steg und Untergurt.

Der Kranbahnträger QS1SY4SC1 weist eine größere Traglast des Systems F_{Ult} und kleinere Auslastung als der Kranbahnträger QS1SY2SC1 auf (siehe Abbildungen 8.29 und 8.13), dies tritt nicht auf bei den Kranbahnträger QS1SY4SC2 und QS1SY2SC2. Eine doppelt so große Ersatzimperfektion „C:e0“ führt dazu, dass der Kranbahnträger bei einer kleineren Traglast F_{Ult} QS1SY4SC2 früher versagt. Die Auslastungen sind ebenfalls höher.

8.5 Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2

- Kranbahnträger QS2 SY2 SC1:

D: D:

Liniendruck
Zeit: 0,5 s
25.02.2021 18:22

- A** Liniendruck: 40000 N/mm
- B** Liniendruck 2: 8,335 N/mm
- C** Liniendruck 3: 40000 N/mm
- D** Liniendruck 4: 8,335 N/mm

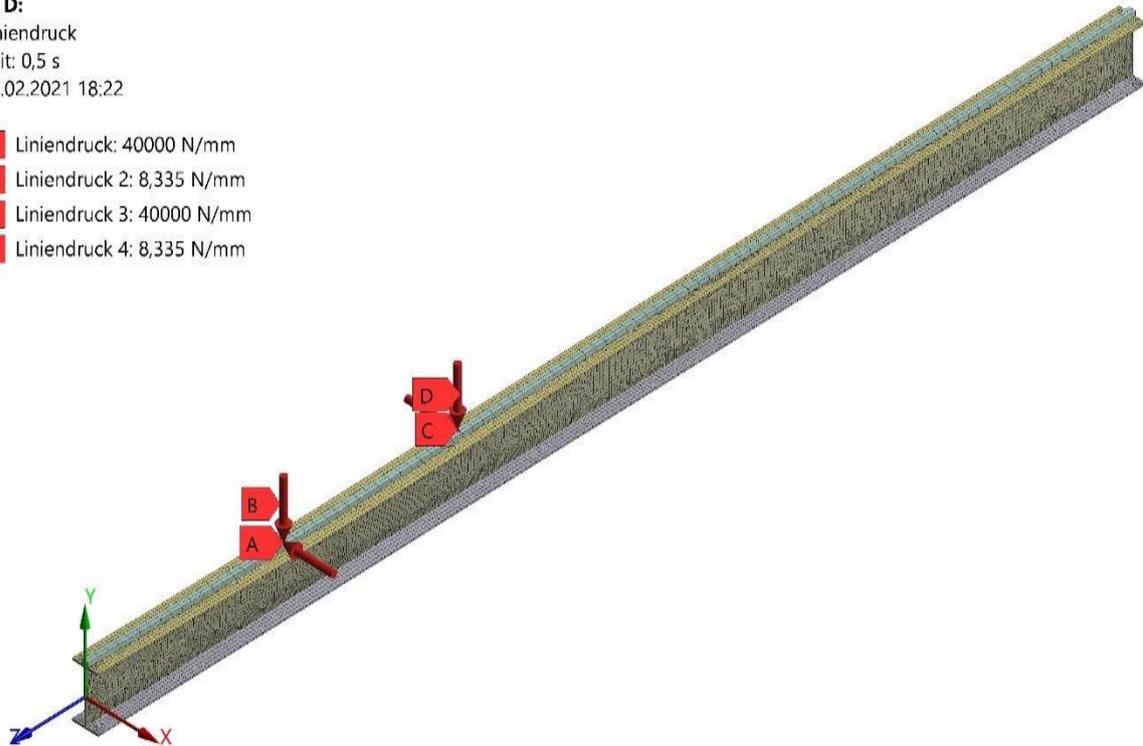


Abbildung 8.34: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
Einheit: mm
Globales Koordinatensystem
Zeit: 1,5e-002
23.03.2021 13:43

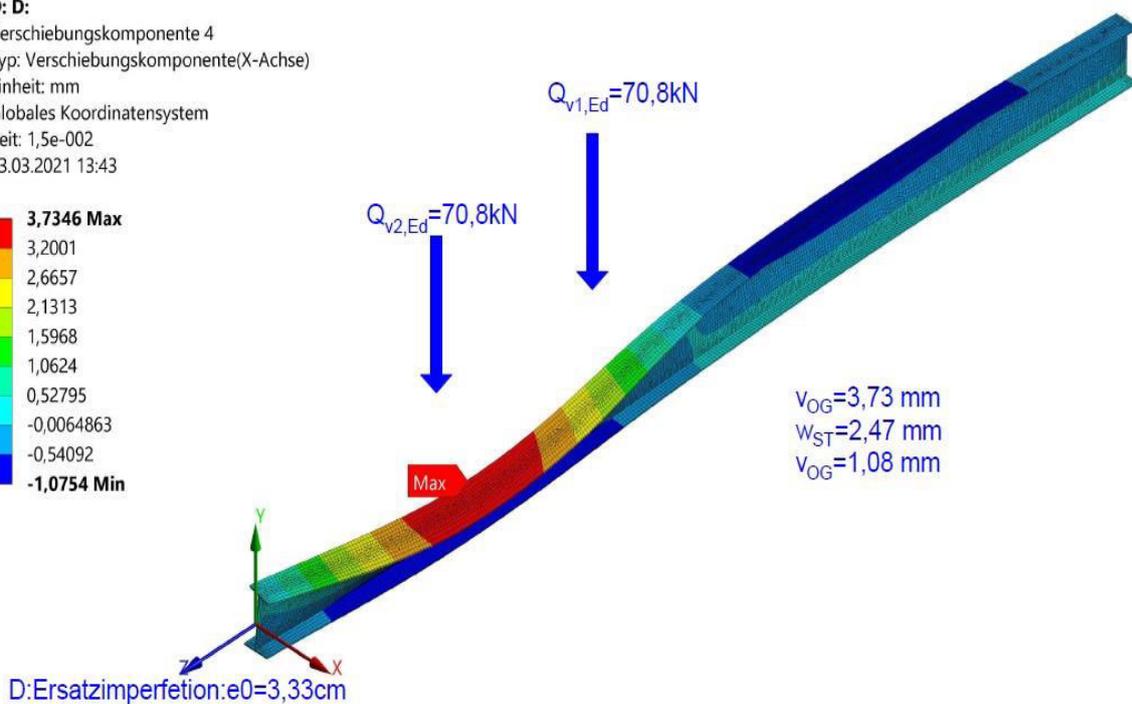
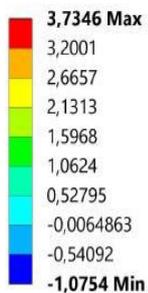


Abbildung 8.35: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

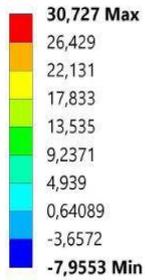
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 5,5e-002

20.02.2021 14:17



D: Ersatzimperfection: $e_0=3,33\text{cm}$

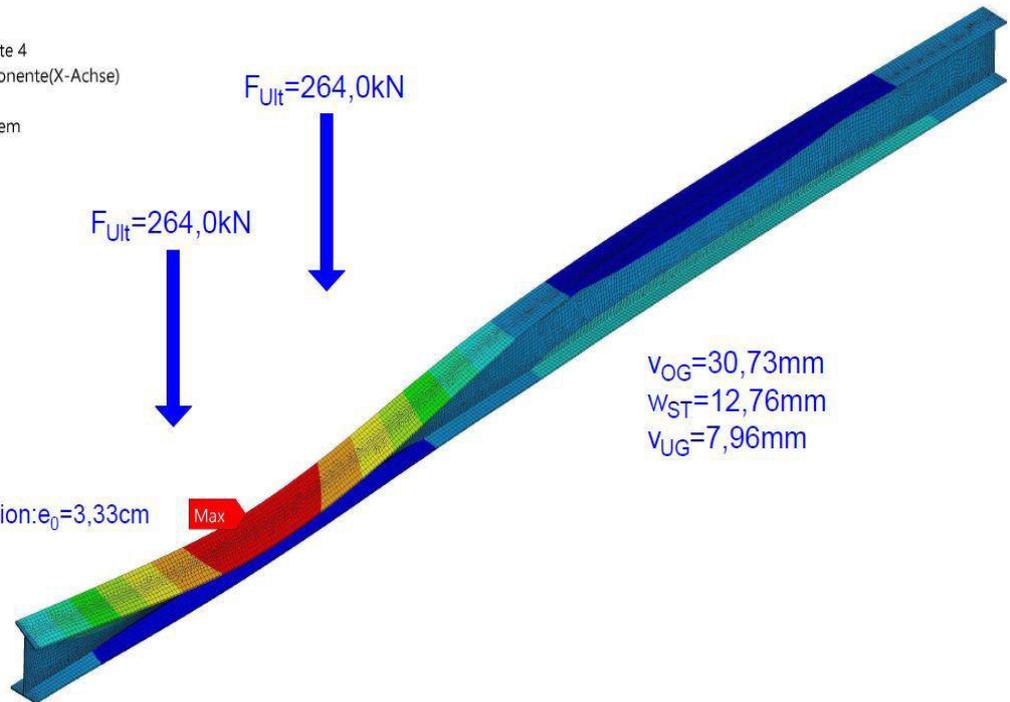


Abbildung 8.36: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

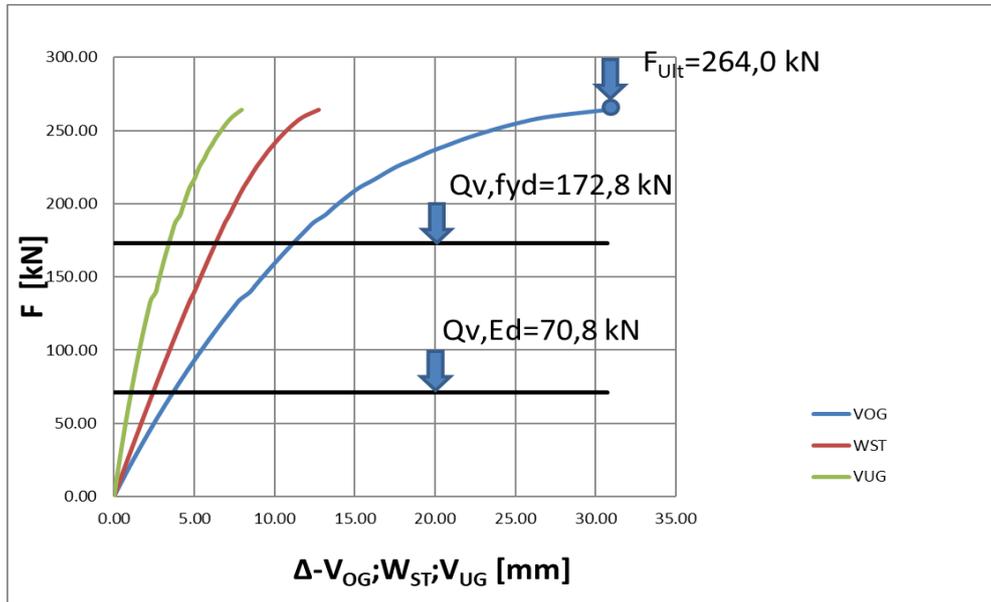


Abbildung 8.37: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{264,0} \cdot 100 = 26,8\%$$

- Kranbahnträger QS2 SY2 SC2:

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:20

- A Liniendruck 3: 86486 N/mm
- B Liniendruck 4: 27,027 N/mm
- C Liniendruck 5: 86486 N/mm
- D Liniendruck 6: 27,027 N/mm

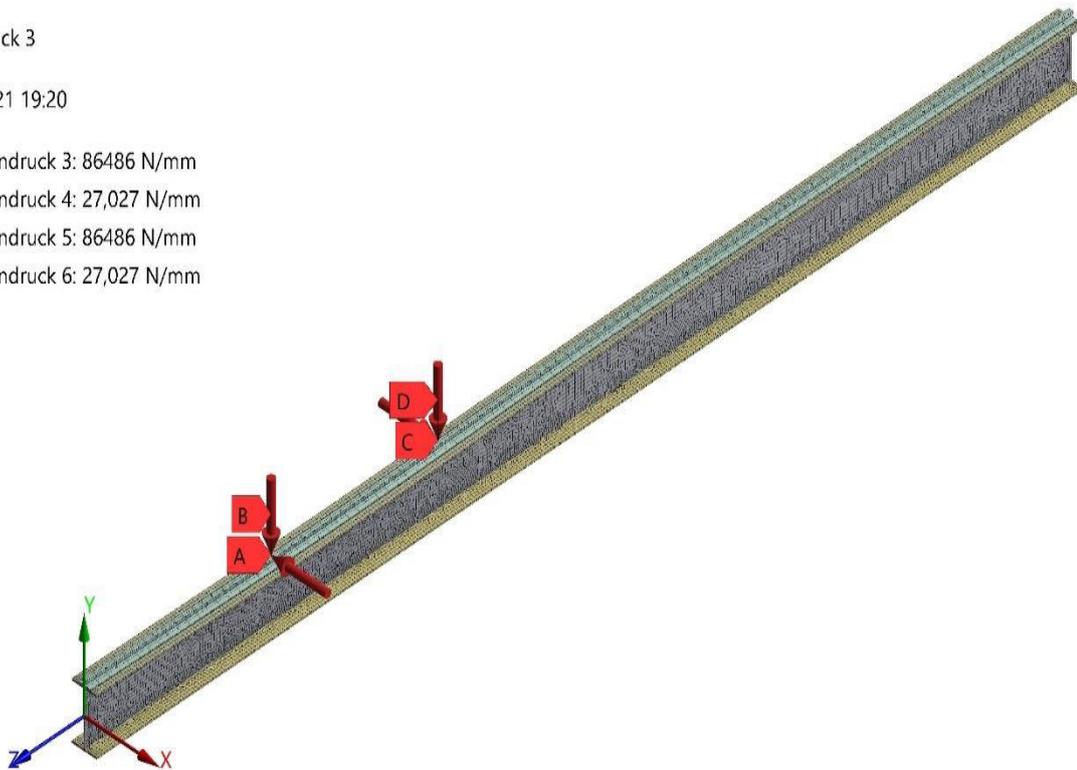


Abbildung 8.38: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

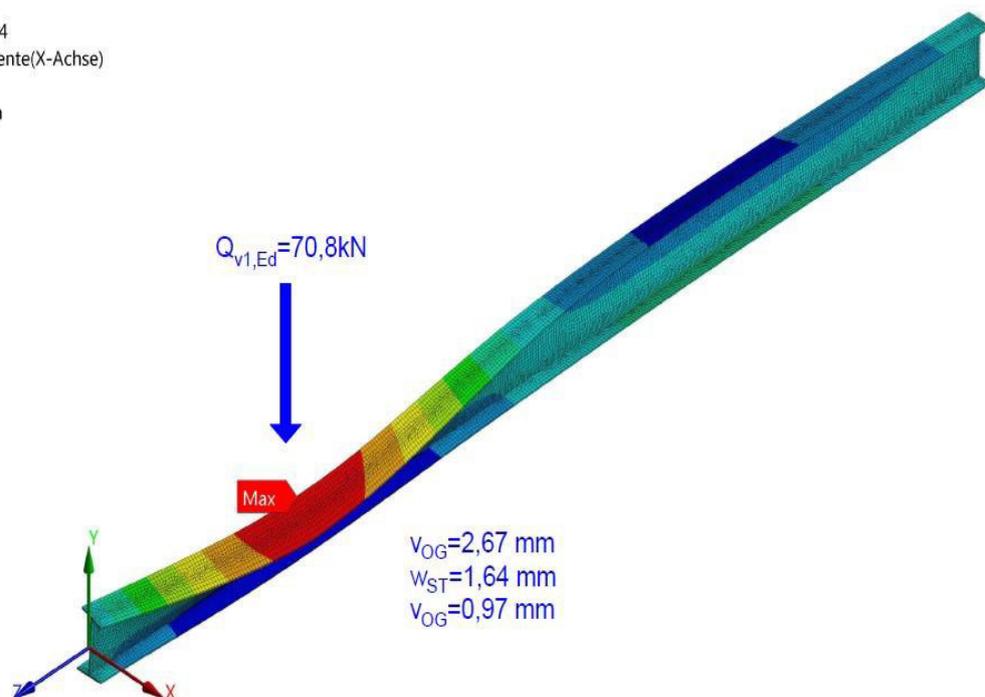
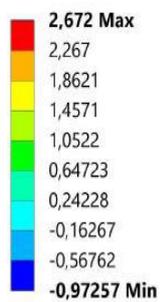
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,7e-002

23.03.2021 14:05



D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

Abbildung 8.39: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

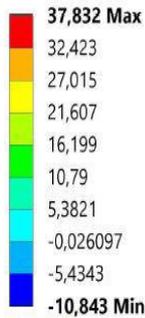
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 6,5e-002

20.02.2021 14:23



D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

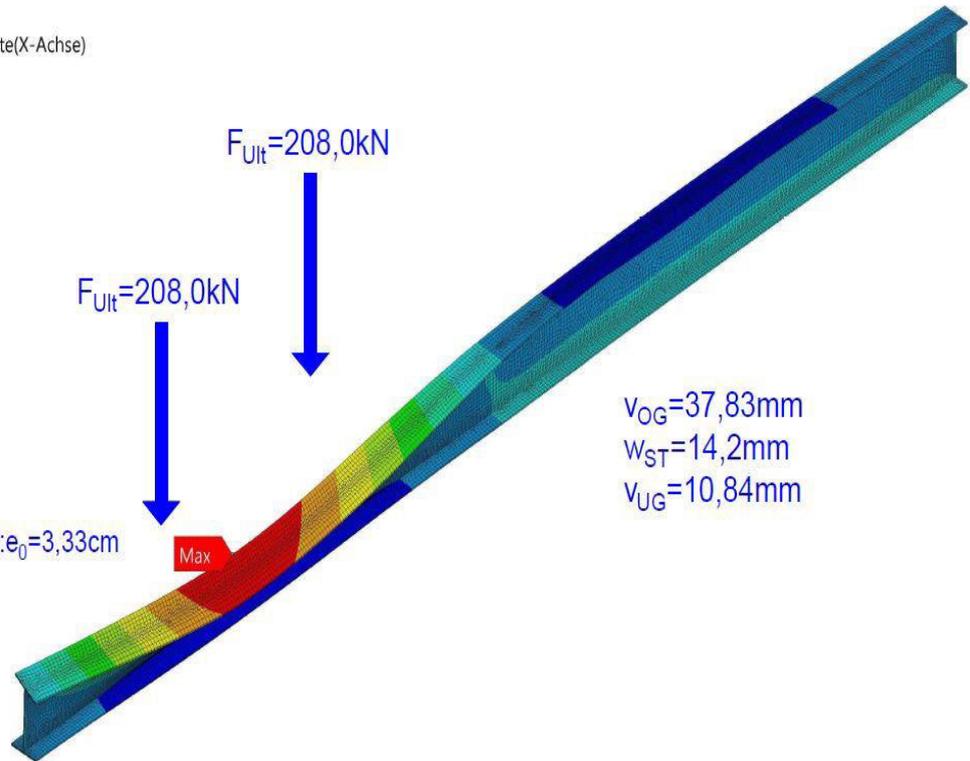


Abbildung 8.40: Gesamtverformung von QS2 SY2 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

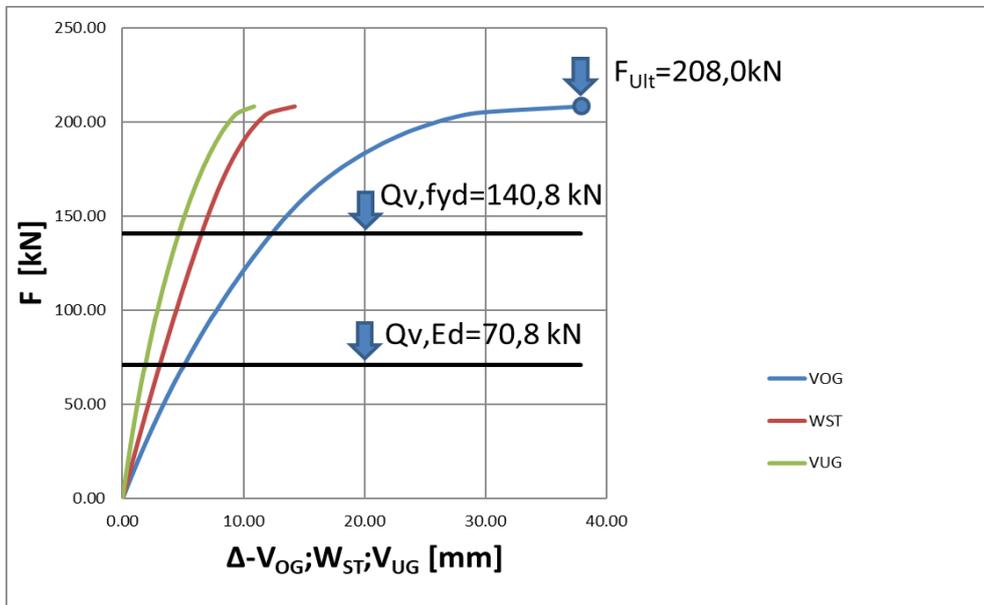


Abbildung 8.41: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{208,0} \cdot 100 = 34,0\%$$

8.6 Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2

- Kranbahnträger QS2 SY4 SC1:

D: D:

Liniendruck

Zeit: 0,5 s

25.02.2021 18:27

A Liniendruck: 25000 N/mm

B Liniendruck 2: 8,335 N/mm

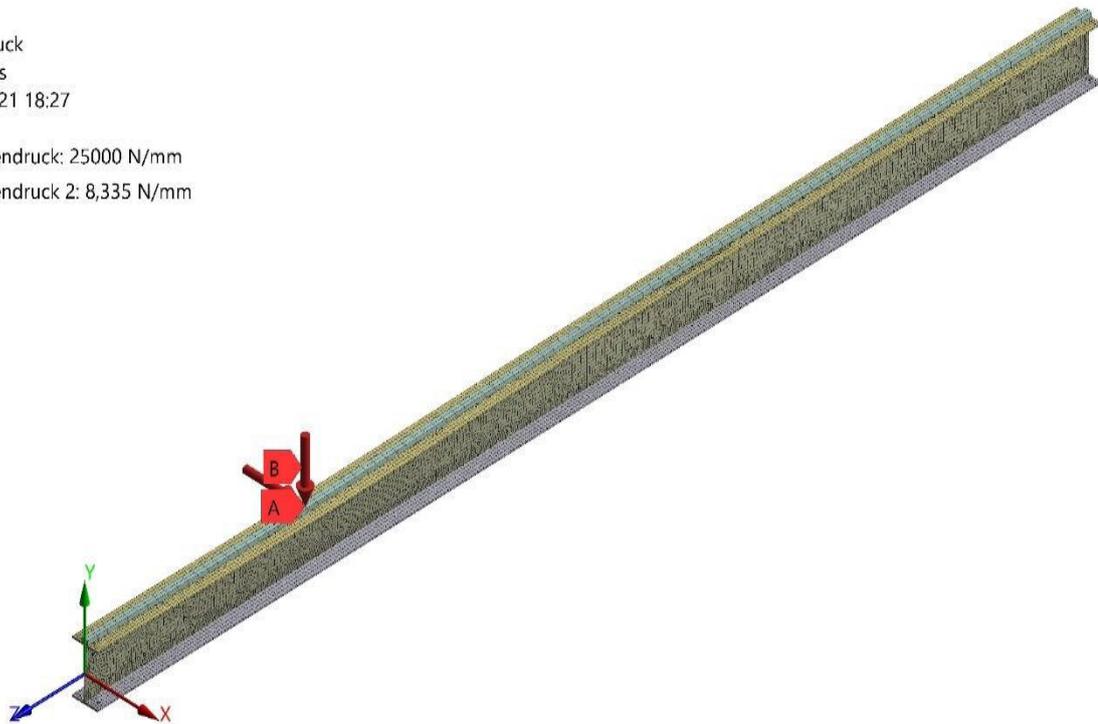


Abbildung 8.42: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

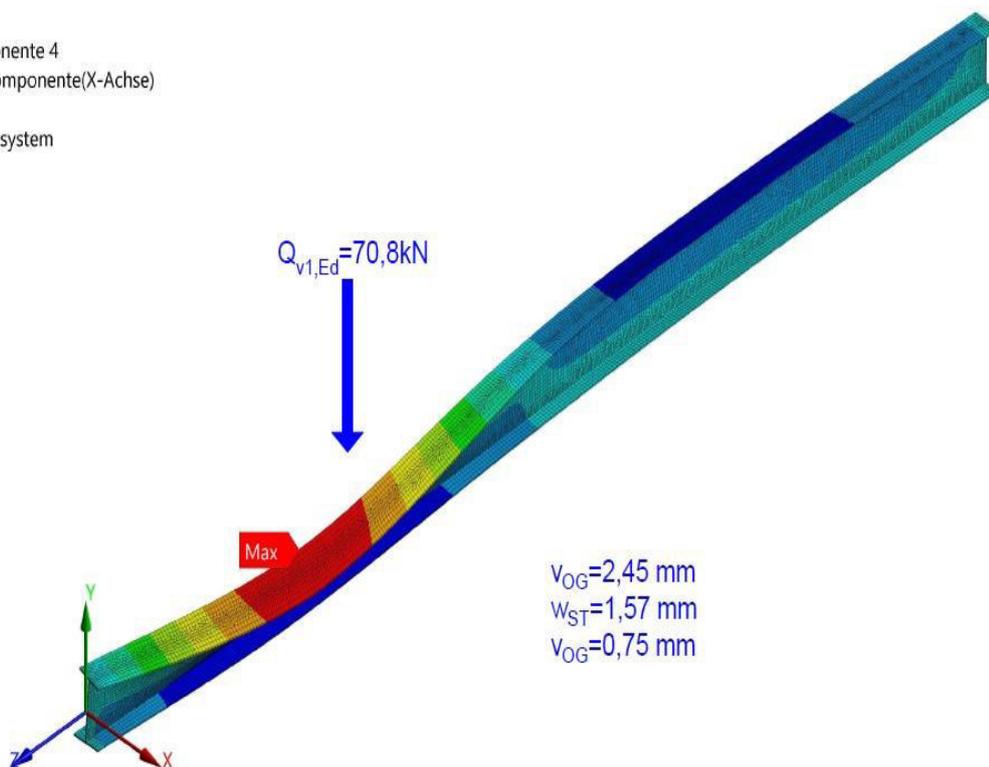
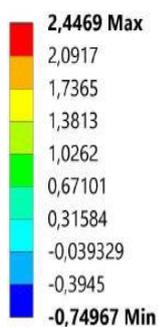
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 2,4e-002

23.03.2021 13:57



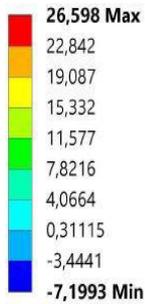
$v_{OG}=2,45$ mm
 $w_{ST}=1,57$ mm
 $v_{OG}=0,75$ mm

D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

Abbildung 8.43: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 0,119
 20.02.2021 14:31



D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

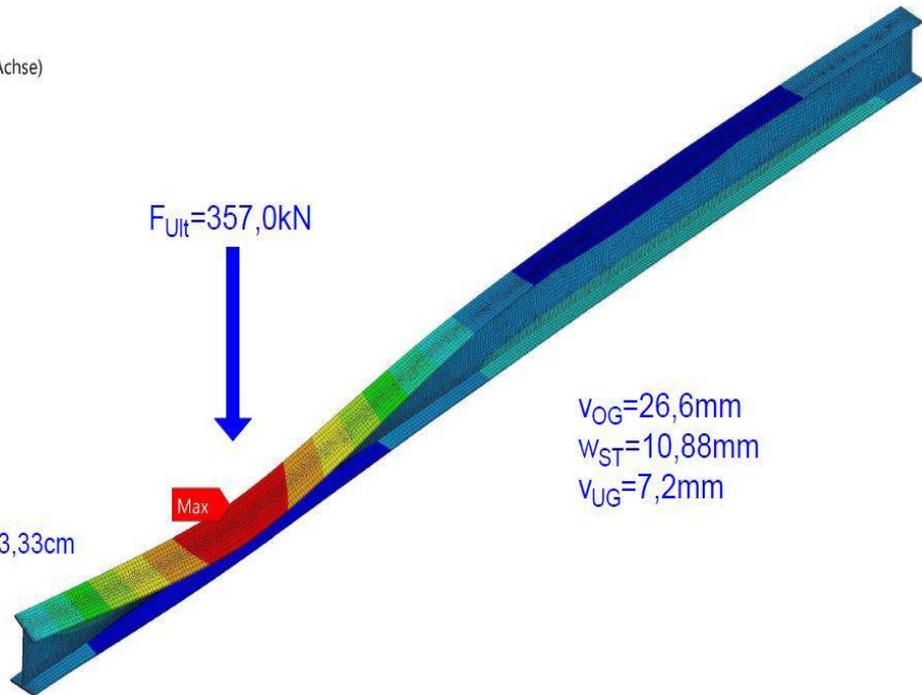


Abbildung 8.44: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

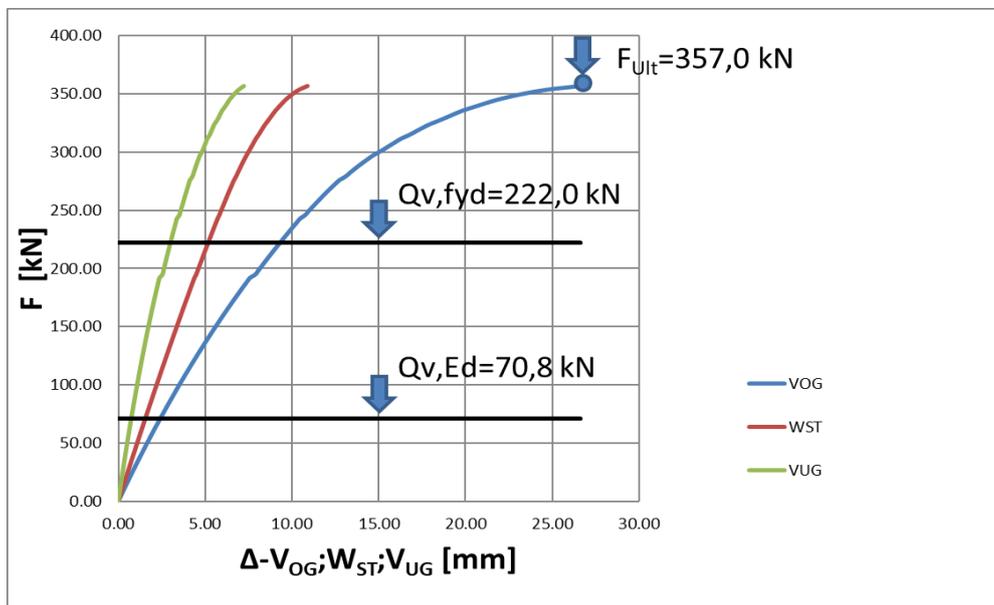


Abbildung 8.45: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{357,0} \cdot 100 = 19,8\%$$

- Kranbahnträger QS2 SY4 SC2:

D: D:

Liniendruck

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:25

A Liniendruck: 1,1081e+005 N/mm

B Liniendruck 2: 27,027 N/mm

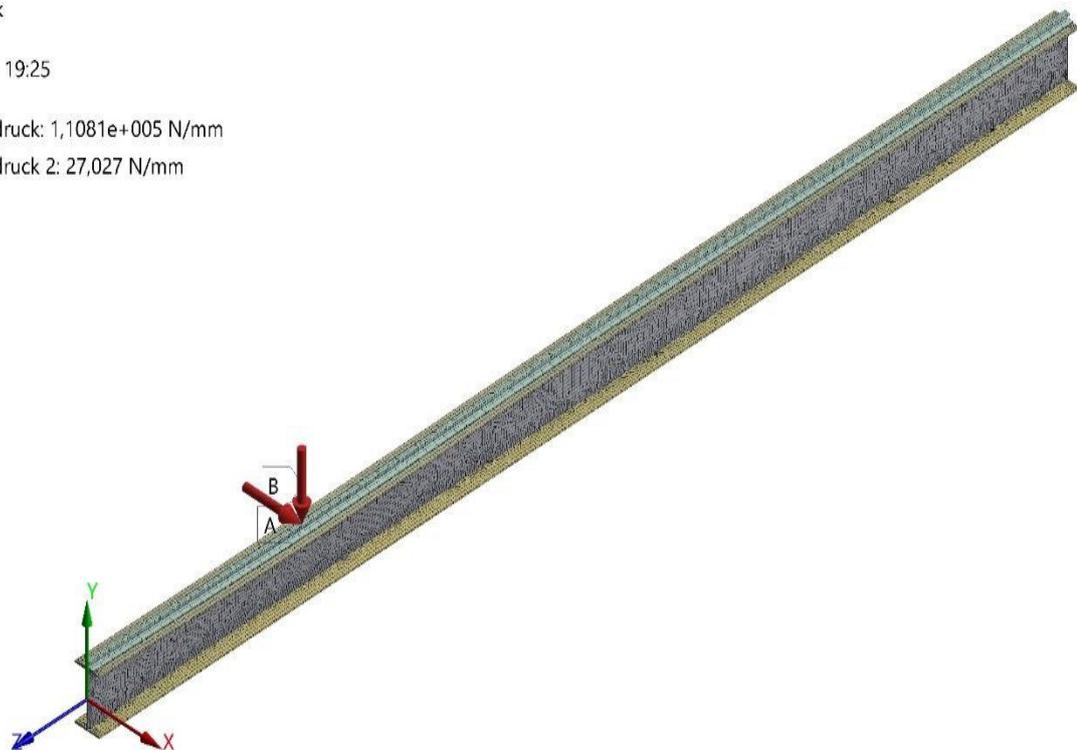


Abbildung 8.46: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

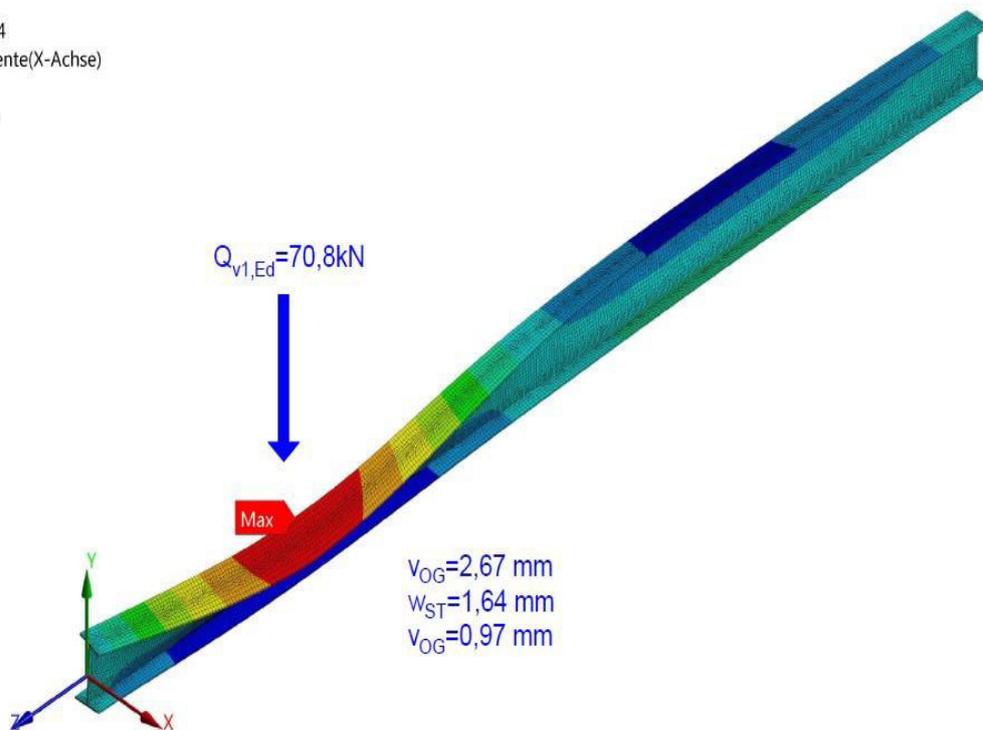
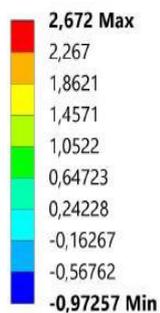
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,7e-002

23.03.2021 14:05

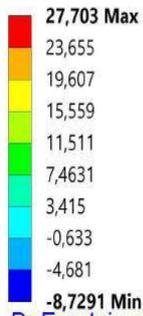


D:Ersatzimperfektion:e0=3,33cm

Abbildung 8.47: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 7,9e-002
 20.02.2021 14:37



D: Ersatzimperfektion: $e_0=3,33\text{cm}$

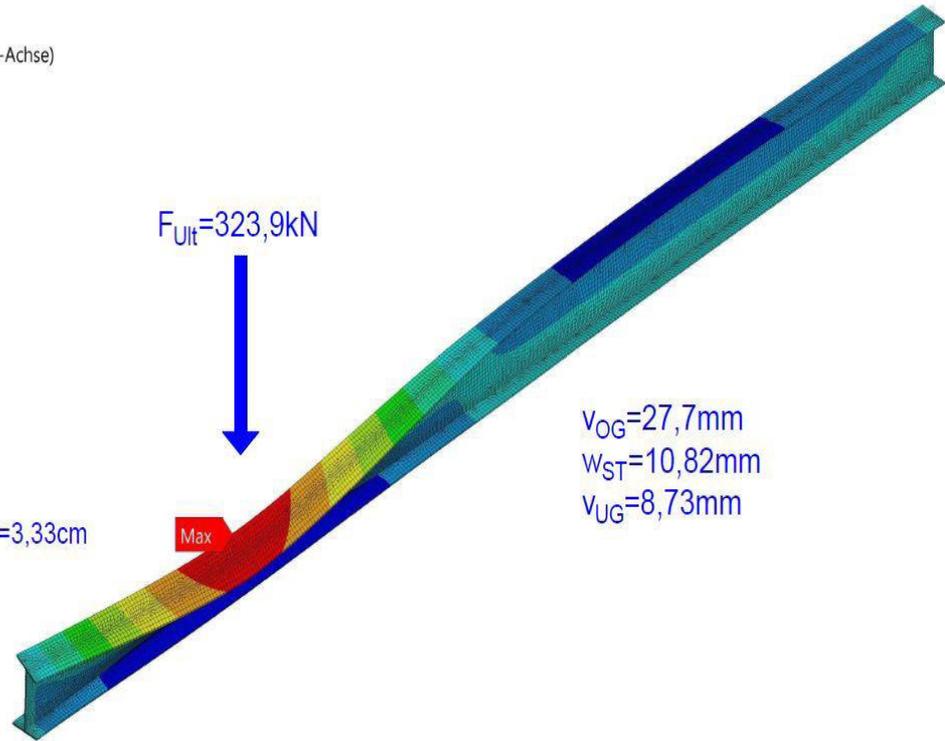


Abbildung 8.48: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

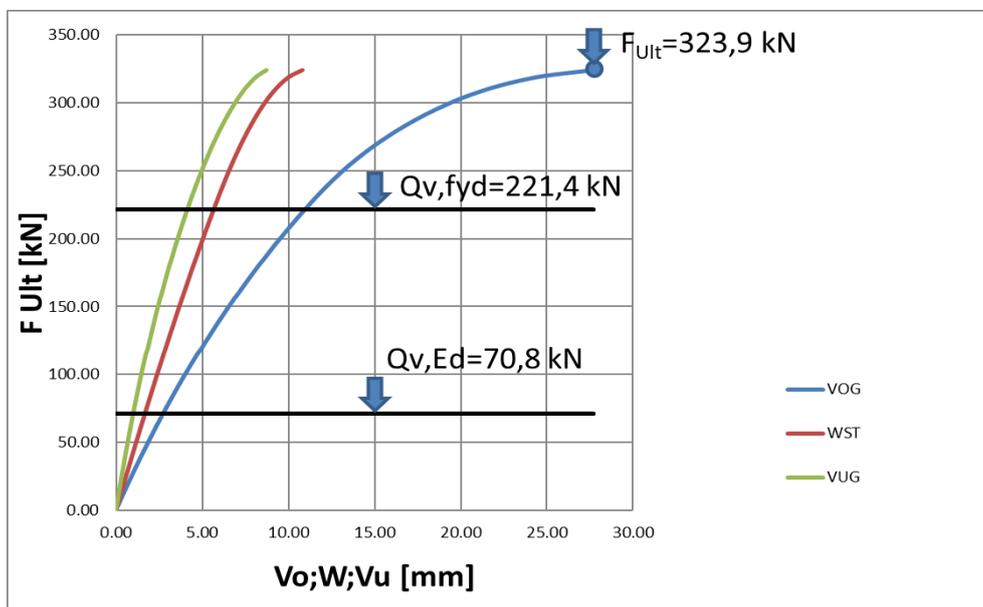


Abbildung 8.49: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS2 SY4 SC2.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{323,9} \cdot 100 = 21,9\%$$

8.6.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.5 und 8.6

Aus den F- Δ Diagrammen in Abbildungen 8.37; 8.41 und 8.45; 8.49 ist zu sehen, dass der Obergurt zuerst ausknickt danach folgt der Steg und zuletzt der Untergurt, wobei für das Dickenverhältnis zwischen Gurt (15mm) und Steg (10mm) von Querschnitt QS2 verantwortlich ist. Der kleine Unterschied führt dazu, dass sich die Einzelteile beim Ausknicken hintereinander aktivieren.

Die Kranbahnträger QS2SY4SC1 und QS2SY4SC2 (siehe Abbildungen 8.45 und 8.49) weisen eine größere Traglast des Systems F_{Ult} und eine kleinere Auslastung als die Kranbahnträger QS2SY2SC1 und QS2SY2SC2 auf (siehe Abbildungen 8.37 und 8.41). Das ist durch das System SY4 bedingt, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte des Zweifeldträgers aufgebracht wird (siehe Kapitel 3.2 und 3.4).

8.7 Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2

- Kranbahnträger QS3 SY2 SC1:

Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse mit Steifen und ohne Steifen befinden sich in Kapitel 7.7.

D: D:
 Liniendruck 3
 Zeit: 1, s
 25.02.2021 18:31

- A** Liniendruck 3: 1,e+005 N/mm
- B** Liniendruck 4: 16,67 N/mm
- C** Liniendruck 5: 1,e+005 N/mm
- D** Liniendruck 6: 16,67 N/mm

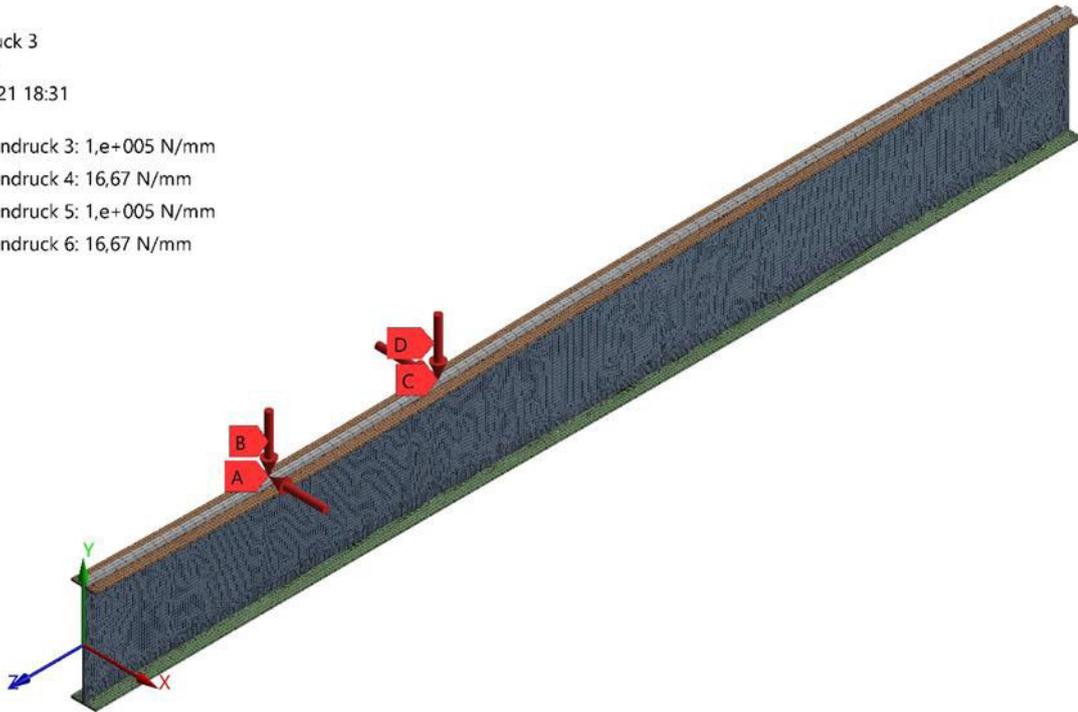
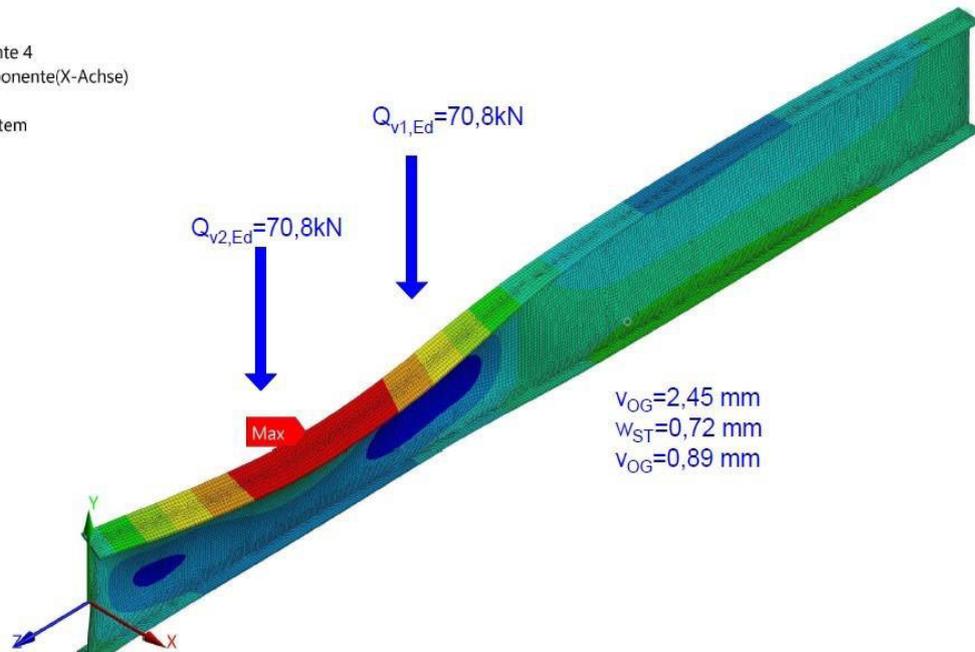
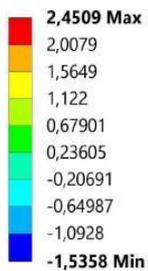


Abbildung 8.50: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC1.

D: D:
 Verschiebungskomponente 4
 Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)
 Einheit: mm
 Globales Koordinatensystem
 Zeit: 1,2e-002
 23.03.2021 14:21



D:Ersatzimperfektion:e0=5,0cm

Abbildung 8.51: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

GMNIA-Berechnung

D: D:

Verschiebungskomponente 4

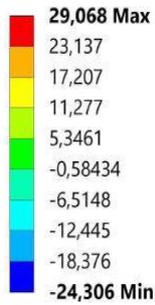
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 7,2e-002

17.02.2021 16:19



D: Ersatzimperfection: $e_0=5,0\text{cm}$

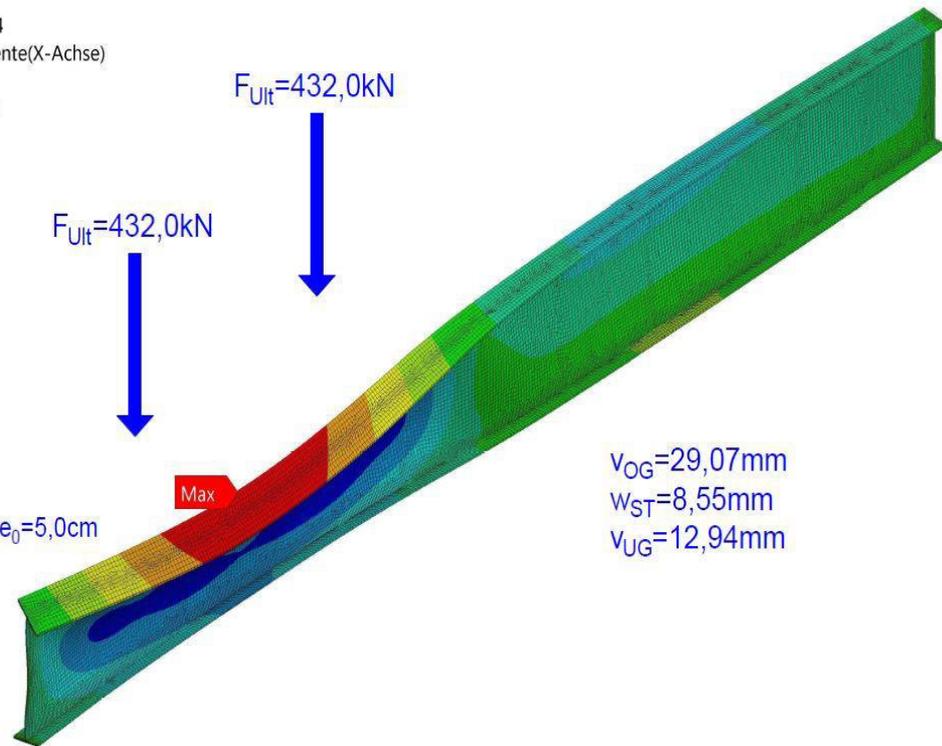


Abbildung 8.52: Gesamtverformung von QS2 SY4 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

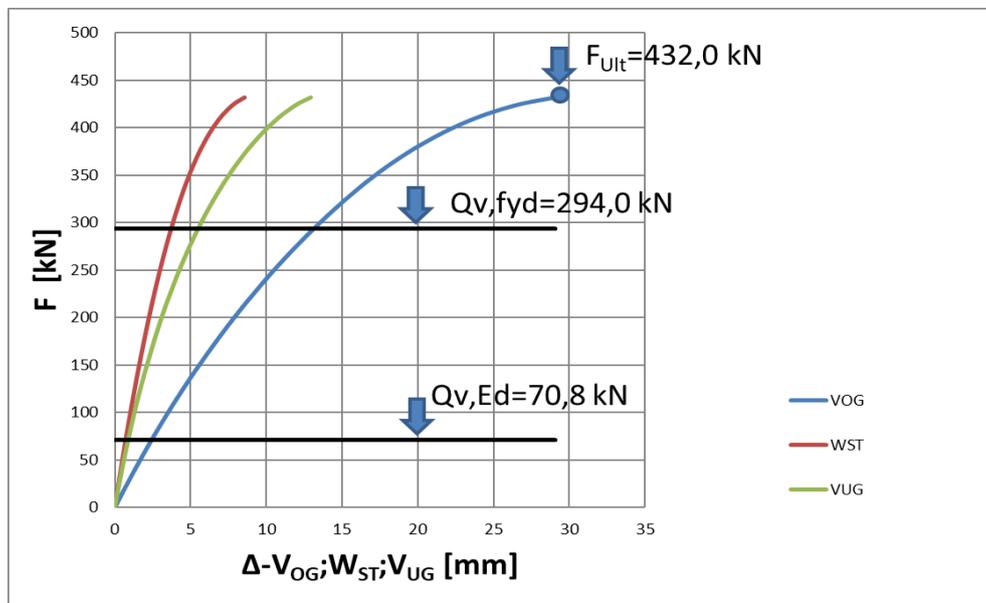


Abbildung 8.53: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{432,0} \cdot 100 = 16,4\%$$

- Kranbahnträger QS3 SY2 SC2:

Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse mit Steifen und ohne Steifen befinden sich in Kapitel 7.7.

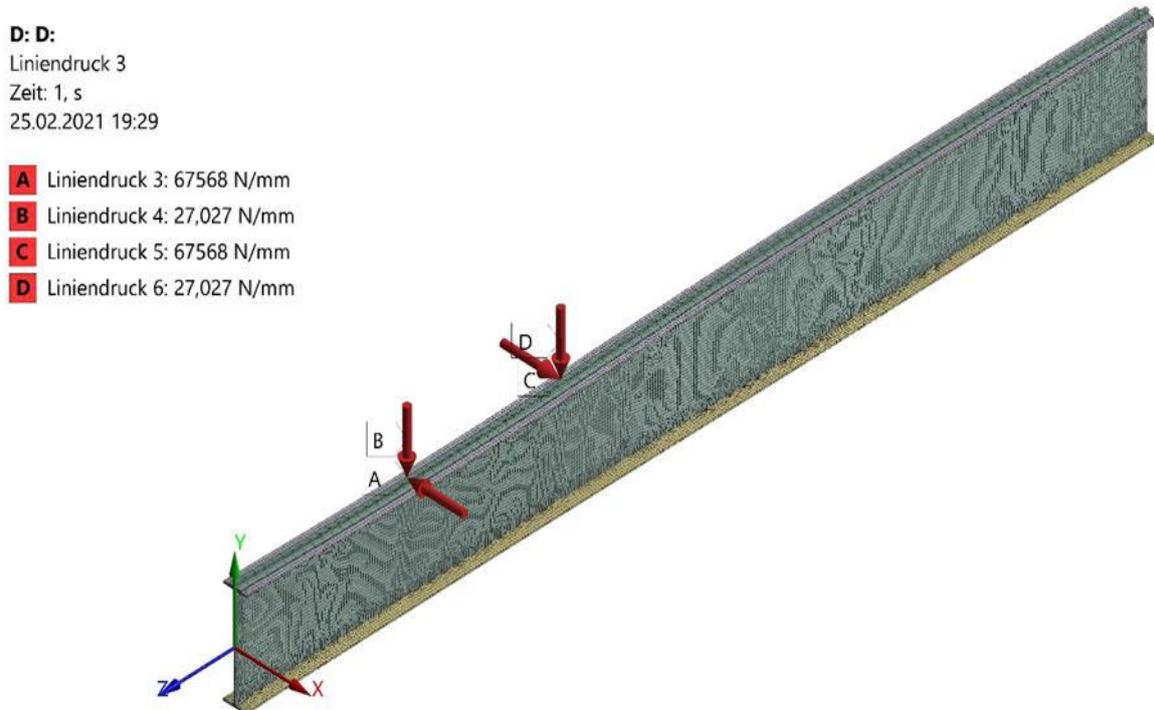


Abbildung 8.54: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC2.

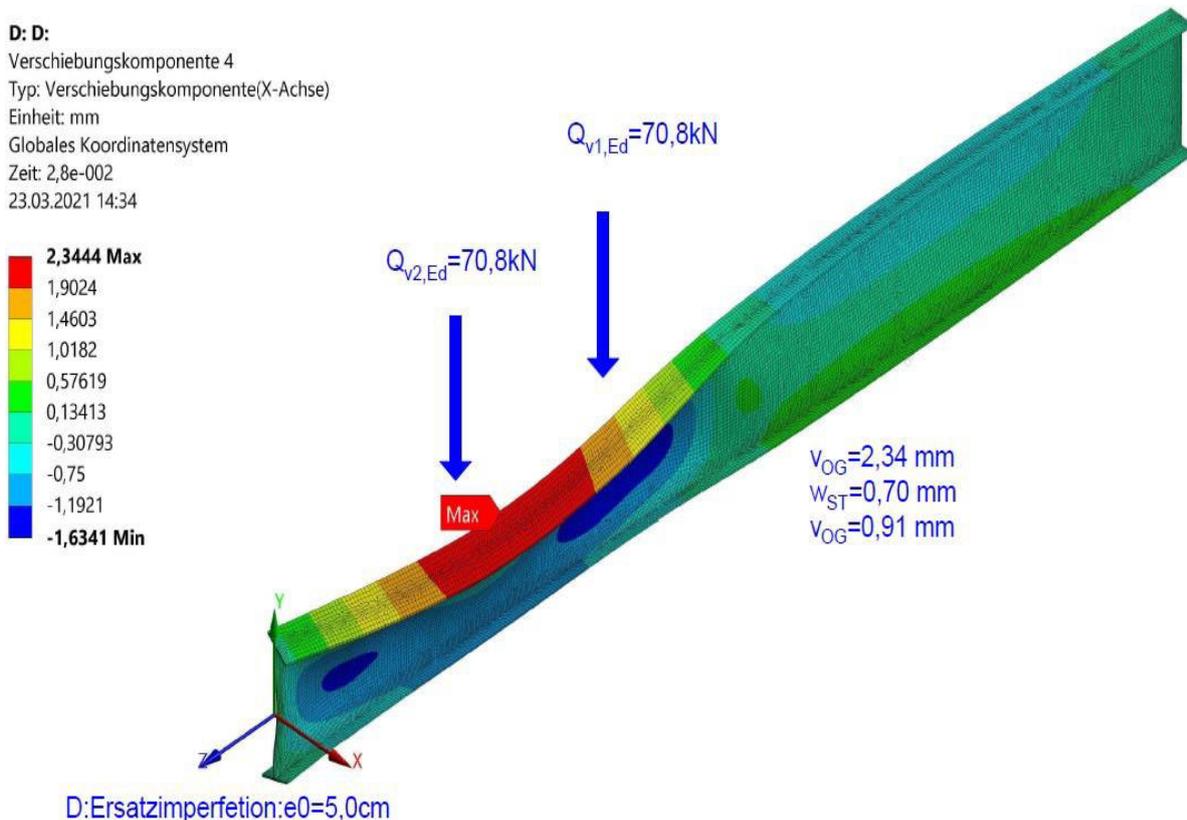


Abbildung 8.55: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

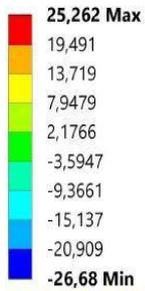
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 0,163

20.02.2021 14:57



D: Ersatzimperfektion: $e_0=5,0\text{cm}$

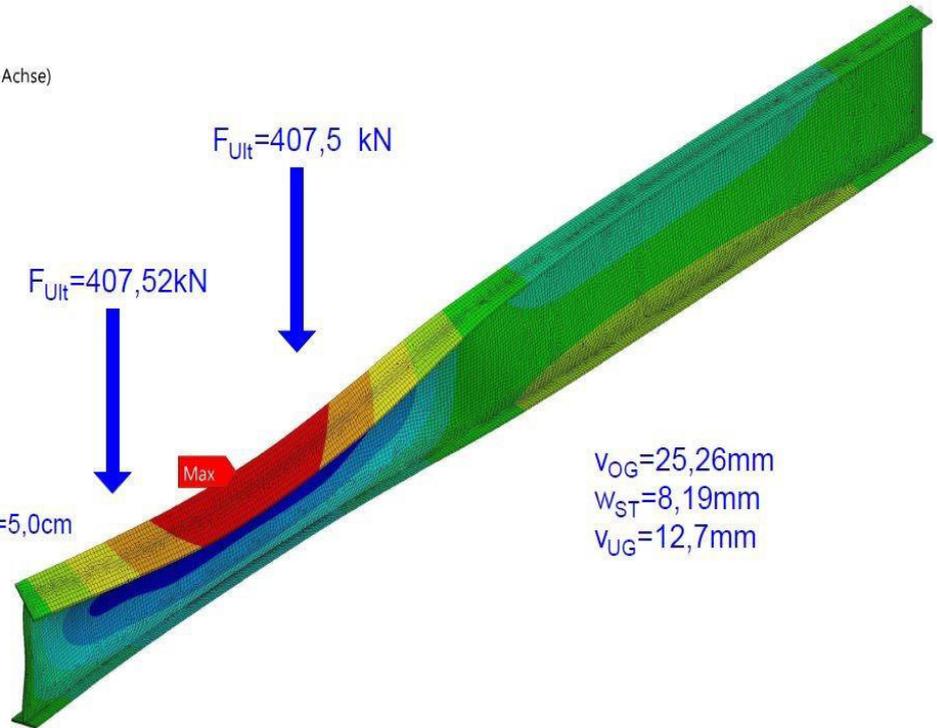


Abbildung 8.56: Gesamtverformung von QS3 SY2 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

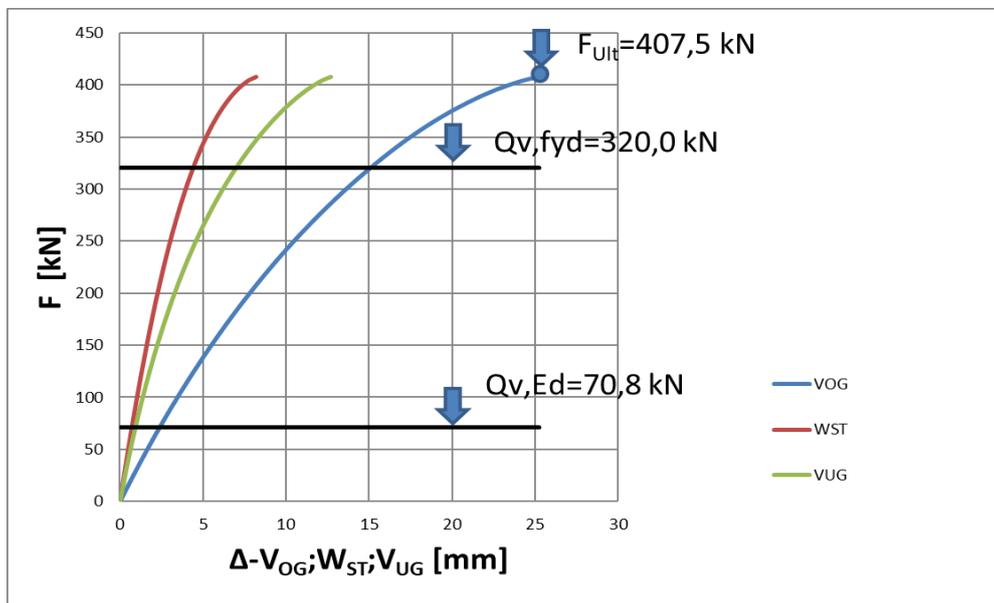


Abbildung 8.57: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY2 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{v,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{407,5} \cdot 100 = 17,4\%$$

8.8 Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2

- Kranbahnträger QS3 SY4 SC1:

Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse mit Steifen und ohne Steifen befinden sich in Kapitel 7.8.

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 18:37

A Liniendruck 3: 90000 N/mm

B Liniendruck 4: 16,67 N/mm

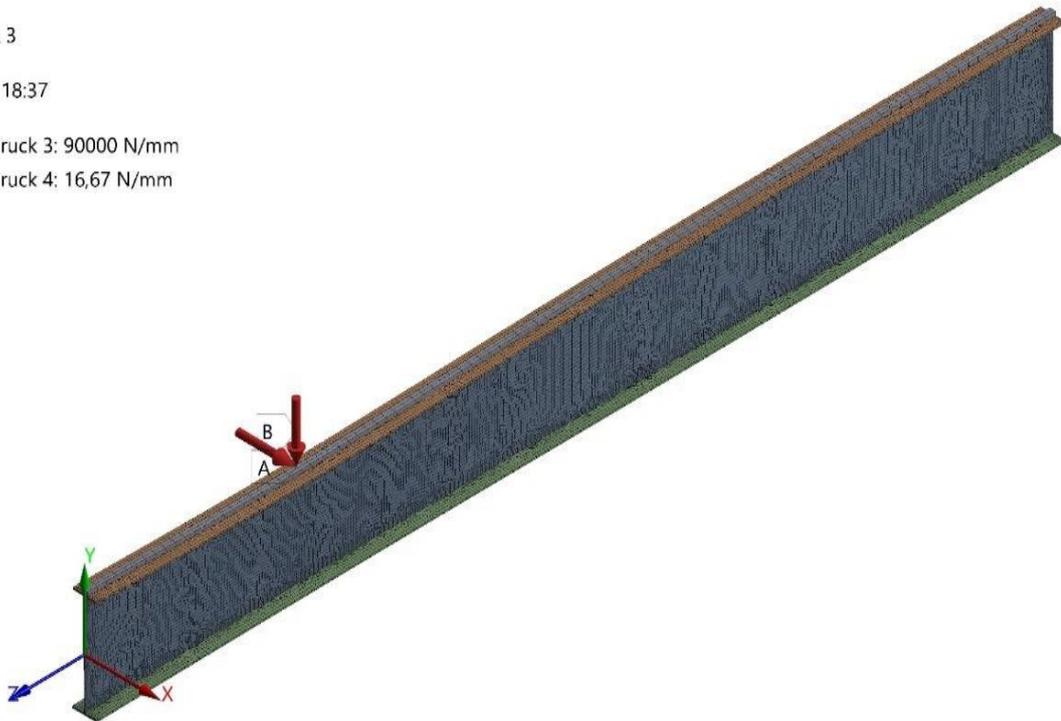


Abbildung 8.58: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC1.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

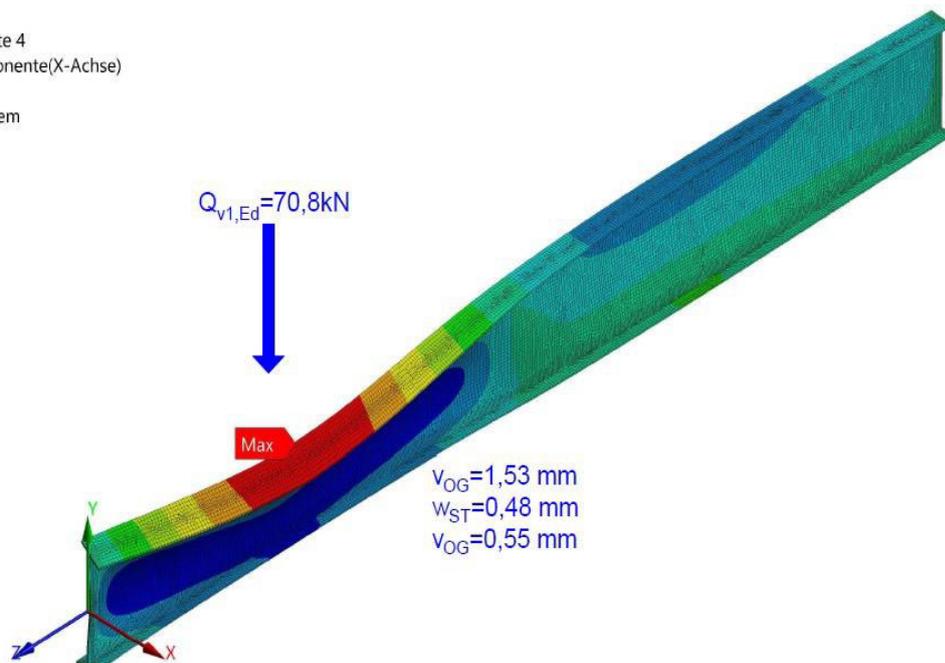
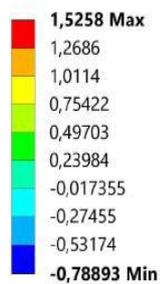
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 14:43



D:Ersatzimperfektion:e0=5,0cm

Abbildung 8.59: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC1 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

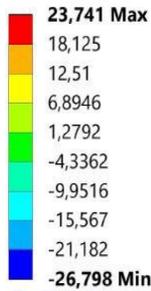
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 0,108

17.02.2021 17:01



D: Ersatzimperfection: $e_0=5,0\text{cm}$

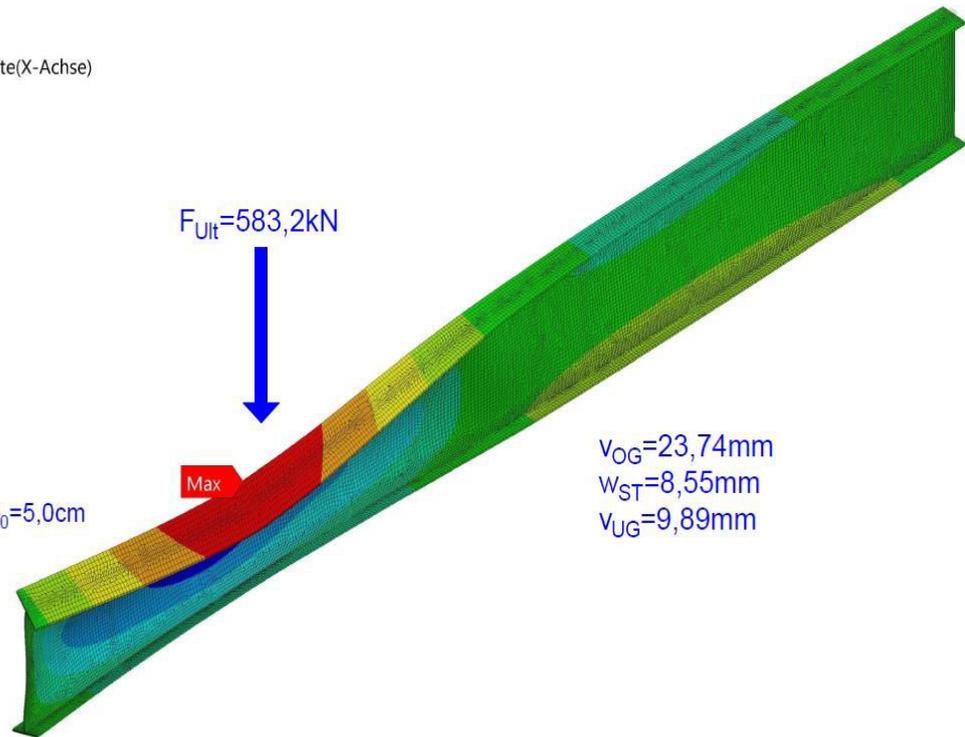


Abbildung 8.60: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC1 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

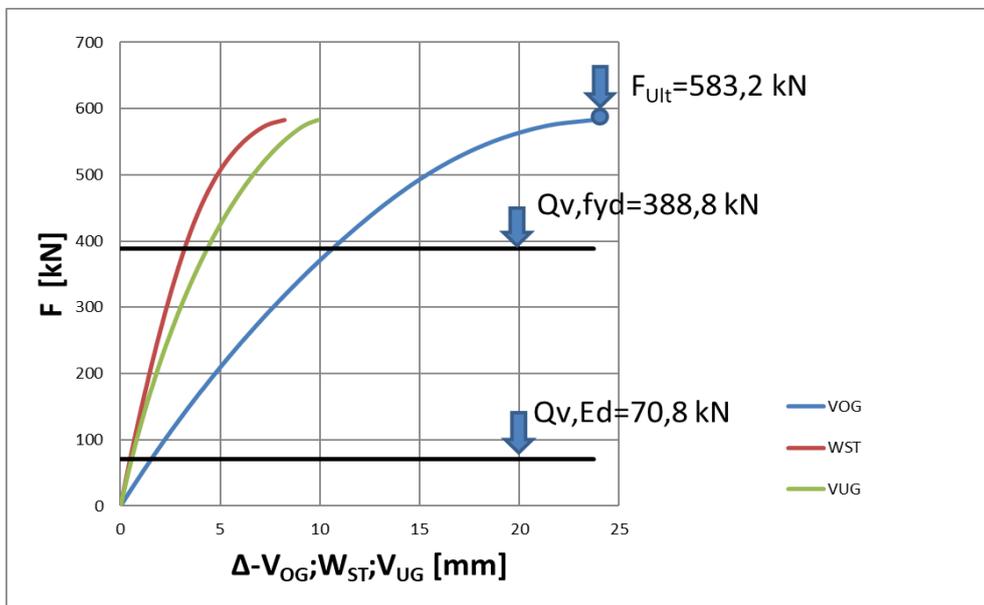


Abbildung 8.61: $F_{Ult} - \Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{583,2} \cdot 100 = 12,1\%$$

- Kranbahnträger QS3 SY4 SC2:

Die Abbildungen der Lastaufstellung und der Eigenwert-Beulanalyse mit Steifen und ohne Steifen befinden sich in Kapitel 7.8.

D: D:

Liniendruck 3

Zeit: 1, s

25.02.2021 19:34

A Liniendruck 3: 1,4595e+005 N/mm

B Liniendruck 4: 27,027 N/mm

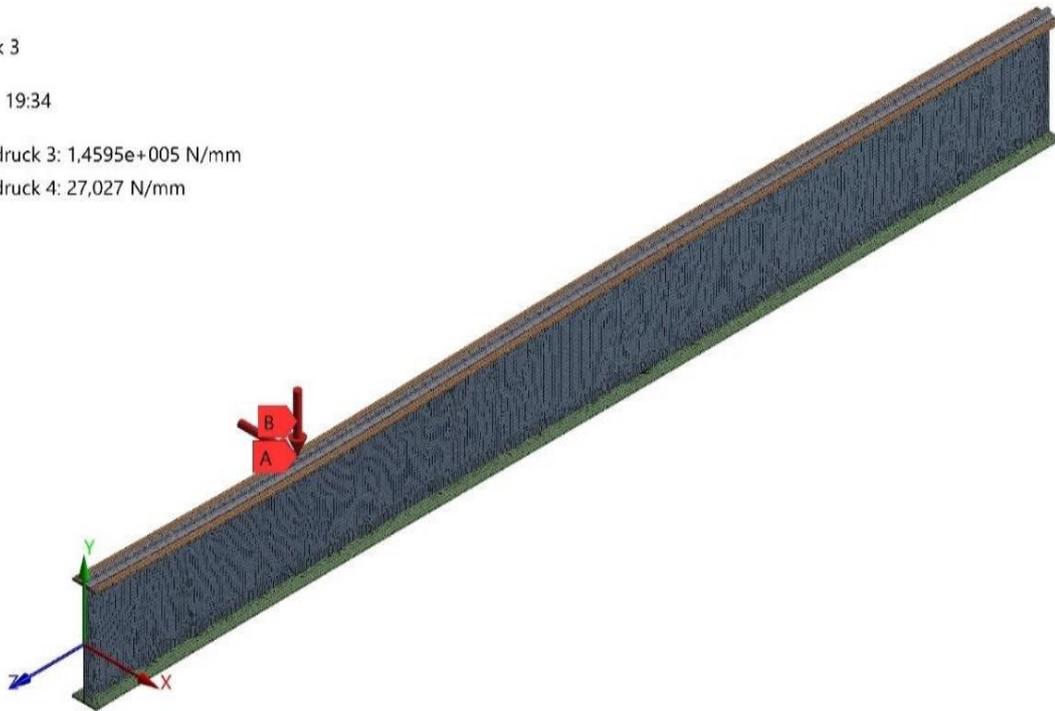


Abbildung 8.62: Lastaufstellung für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC2.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

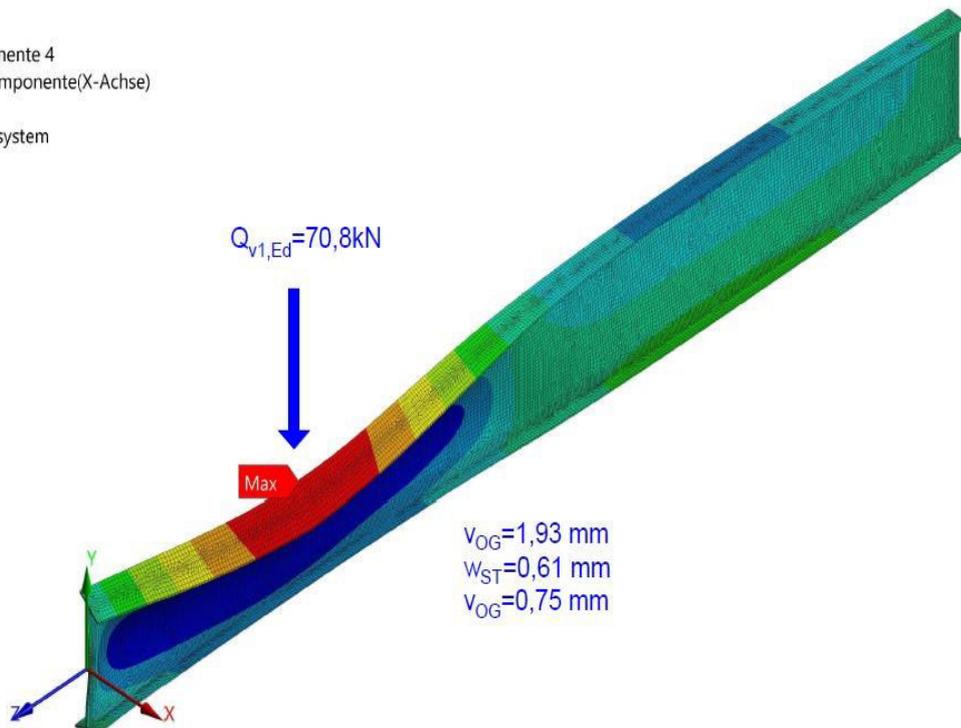
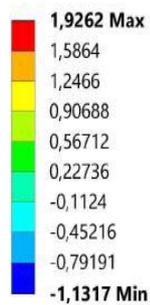
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 1,3e-002

23.03.2021 14:52



D:Ersatzimperfektion:e0=5,0cm

Abbildung 8.63: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC2 für die vorgegebene Kraft $Q_{v,Ed}$.

D: D:

Verschiebungskomponente 4

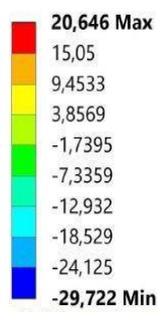
Typ: Verschiebungskomponente(X-Achse)

Einheit: mm

Globales Koordinatensystem

Zeit: 8,e-002

17.02.2021 17:10



D: Ersatzimperfektion: $e_0=5,0\text{cm}$

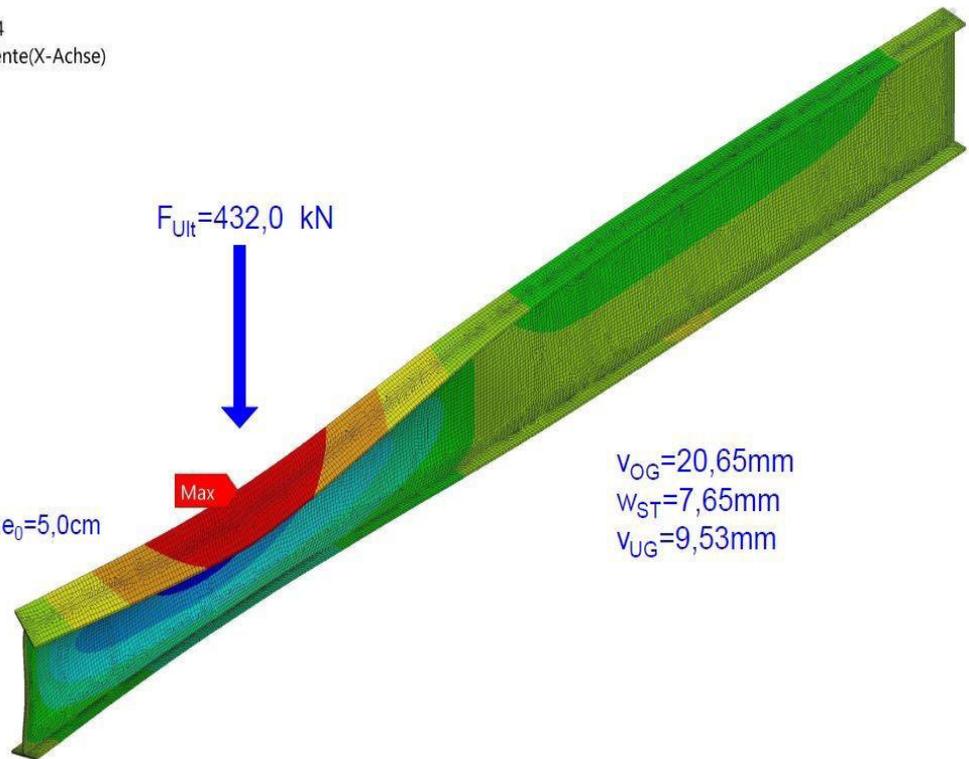


Abbildung 8.64: Gesamtverformung von QS3 SY4 SC2 für die Traglast des Systems F_{Ult} im plastischen Bereich.

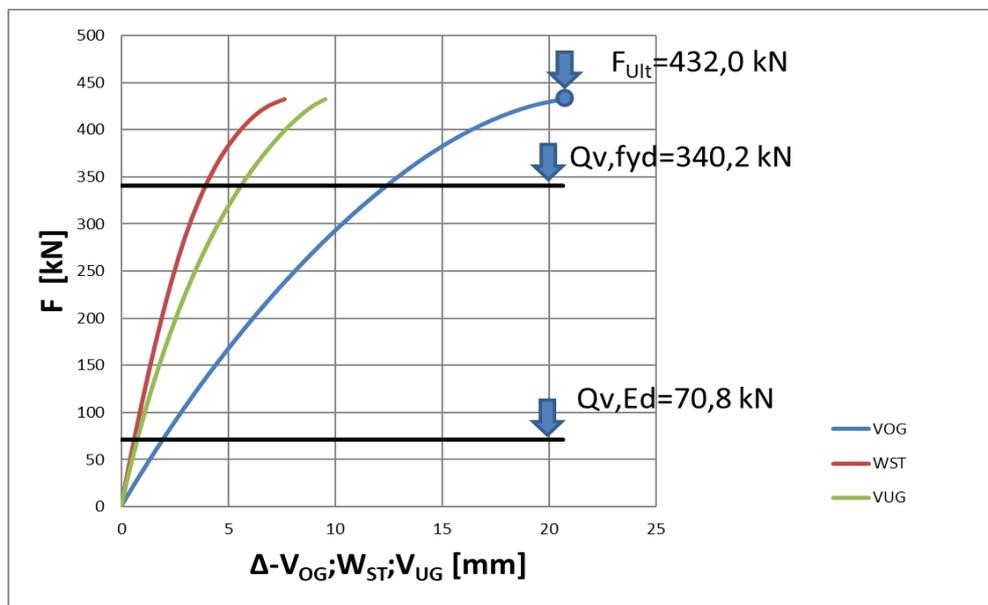


Abbildung 8.65: $F_{Ult}-\Delta$ Diagramm für die GMNIA - Berechnung von QS3 SY4 SC1.

$$Auslastung = \frac{Q_{V,Ed}}{F_{Ult}} \cdot 100 = \frac{70,8}{432,0} \cdot 100 = 16,4\%$$

8.8.1 Kommentar zu den F- Δ Diagrammen aus Kapitel 8.7 und 8.8

Aus den F- Δ Diagrammen in Abbildungen 8.53; 8.57 und 8.61; 8.65 ist zu sehen, dass der Steg erst nach dem Ausknicken vom Ober- und Untergurt versagt. Der sehr dünne Steg vom Querschnitt QS3 mit einer Höhe von 1020 mm knickt schwieriger aus als die Gurte.

Die Kranbahnträger QS3SY4SC1 und QS3SY4SC2 (siehe Abbildungen 8.61 und 8.65) weisen eine größere Traglast F_{Ult} und eine kleinere Auslastung als die Kranbahnträger QS3SY2SC1 und QS3SY2SC2 auf (siehe Abbildungen 8.53 und 8.57). Das ist wie im Abschnitt 8.6.1 durch das System SY4 bedingt, bei welchem nur eine vertikale Last in Feldmitte des Zweifeldträgers aufgebracht wird (siehe Kapitel 3.2 und 3.4).

8.9 Ergebnisvergleich der GMNIA-Berechnung

GMNIA-Berechnung			D:e0 [cm]	$Q_{v,Ed}$	F_{Ult} für SC1 [kN]	GMNIA Auslastung für SC1 [%]
QS1	SY1	SC1	3.33	70.8	307.4	23.0
QS1	SY3	SC1	3.33	70.8	446.4	15.9
QS1	SY2	SC1	1.67	70.8	516.0	13.7
QS1	SY4	SC1	1.67	70.8	666.0	10.6
QS2	SY2	SC1	3.33	70.8	264.0	26.8
QS2	SY4	SC1	3.33	70.8	357.0	19.8
QS3	SY2	SC1	5.00	70.8	432.0	16.4
QS3	SY4	SC1	5.00	70.8	583.2	12.1
GMNIA-Berechnung			D:e0 [cm]	$Q_{v,Ed}$	F_{Ult} für SC2 [kN]	GMNIA Auslastung für SC2 [%]
QS1	SY1	SC2	3.33	70.8	288.0	24.6
QS1	SY3	SC2	3.33	70.8	442.8	16.0
QS1	SY2	SC2	1.67	70.8	520.0	13.6
QS1	SY4	SC2	3.33	70.8	475.2	14.9
QS2	SY2	SC2	3.33	70.8	208.0	34.0
QS2	SY4	SC2	3.33	70.8	323.9	21.9
QS3	SY2	SC2	5.00	70.8	407.5	17.4
QS3	SY4	SC2	5.00	70.8	432.0	16.4

Tabelle 8-3: Vergleich aller Ergebnisse aus der GMNIA-Berechnung.

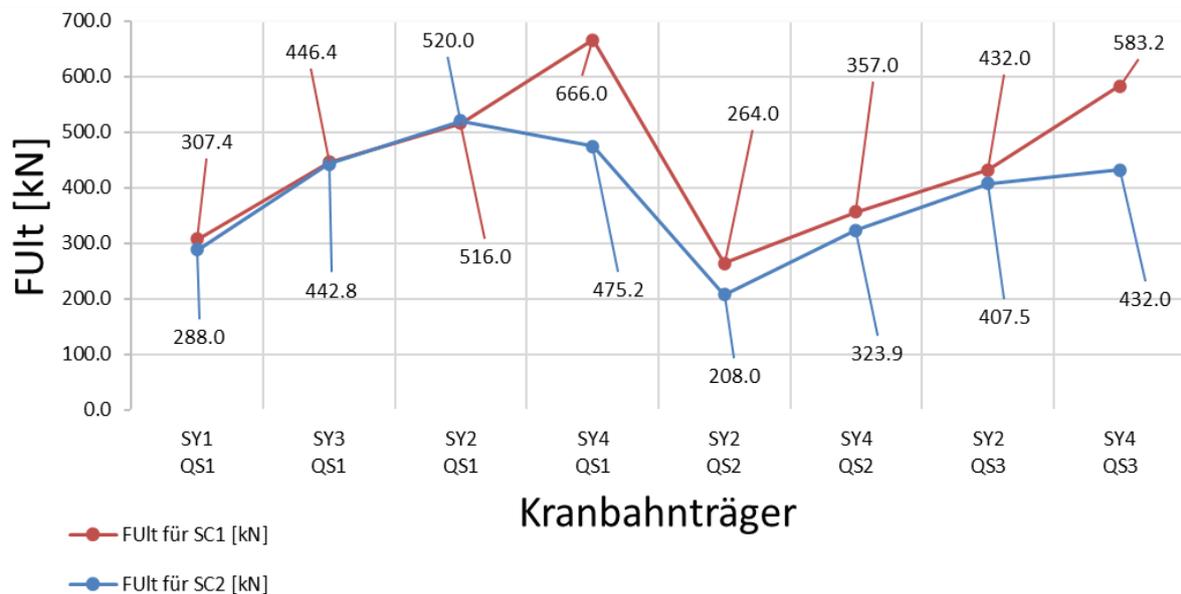


Abbildung 8.66: Traglasten des Systems F_{Ult} aus der GMNIA-Berechnung.

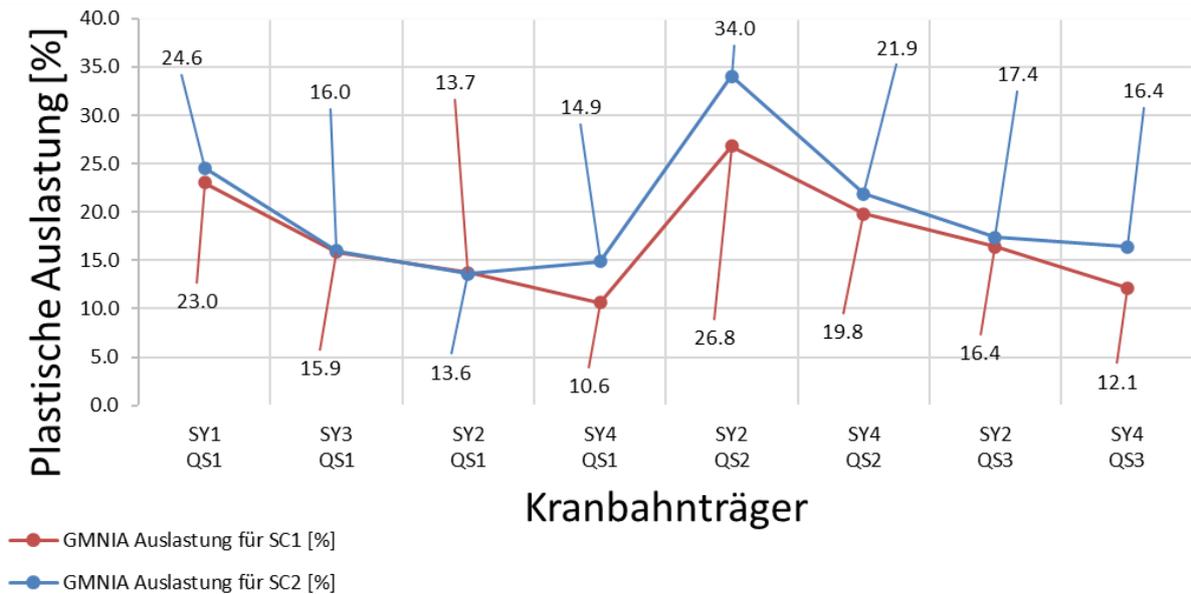


Abbildung 8.67: Auslastung aus der GMNIA-Berechnung.

Aus der Tabelle 8-3 und den Abbildungen 8.66 und 8.67 ist wieder der Einfluss der Schiene auf die Ergebnisse der Berechnung erkennbar, die Kranbahnträger mit Schiene SC2 weisen eine kleinere Traglast des Systems F_{Ult} und eine größere Auslastung auf. Im Kapitel 7.9 wurde näher erklärt, welchen Einfluss die Schiene und der Querschnitt auf die Ergebnisse haben. Die Systeme SY2 und SY4 aus der Tabelle 8-3 einzeln betrachtet, deuten drauf hin das der Kranbahnträger mit Querschnitt QS1 die größte Tragfähigkeit hat, gefolgt von Kranbahnträger mit QS3 und zuletzt QS2.

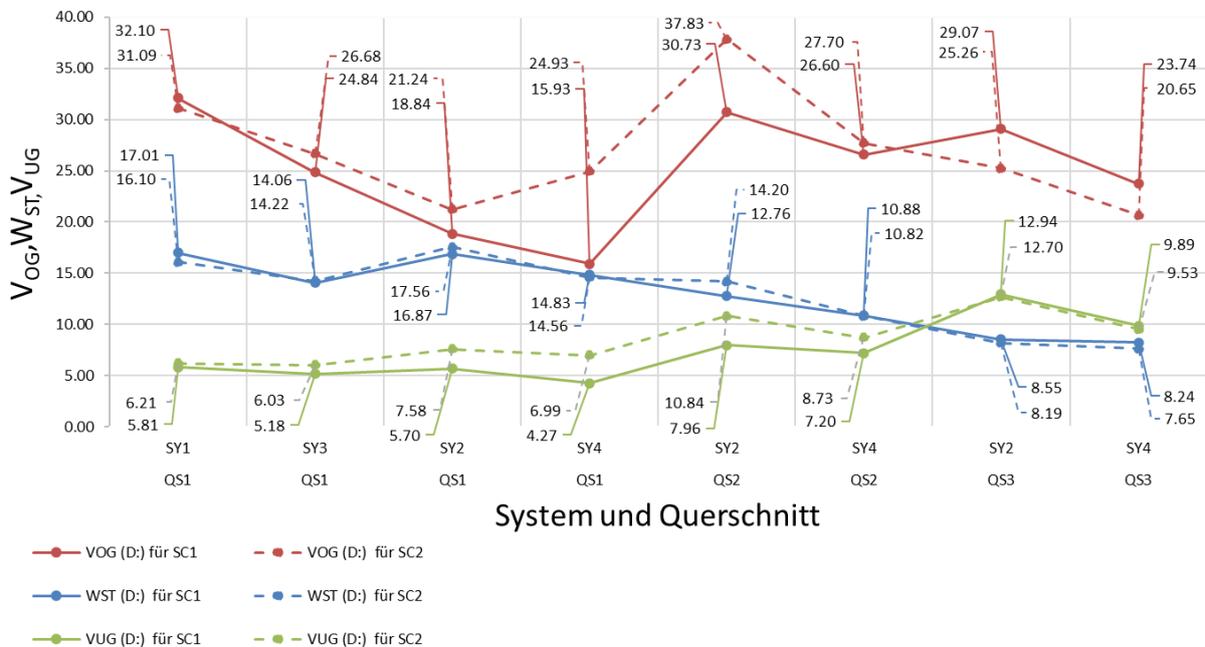


Abbildung 8.68: Endverformungen $V_{OG}; W_{ST}; V_{UG}$ für F_{Ult} Kranbahnträger mit SC1 und SC2.

Die Abbildung 8.68 und zeigt die Endverformungen für die Traglast des Systems F_{Ult} und somit jene Verformung der Kranbahnträger kurz vor dem Versagen.

8.10 Parallele zwischen der GMNIA- und GNIA-Berechnung

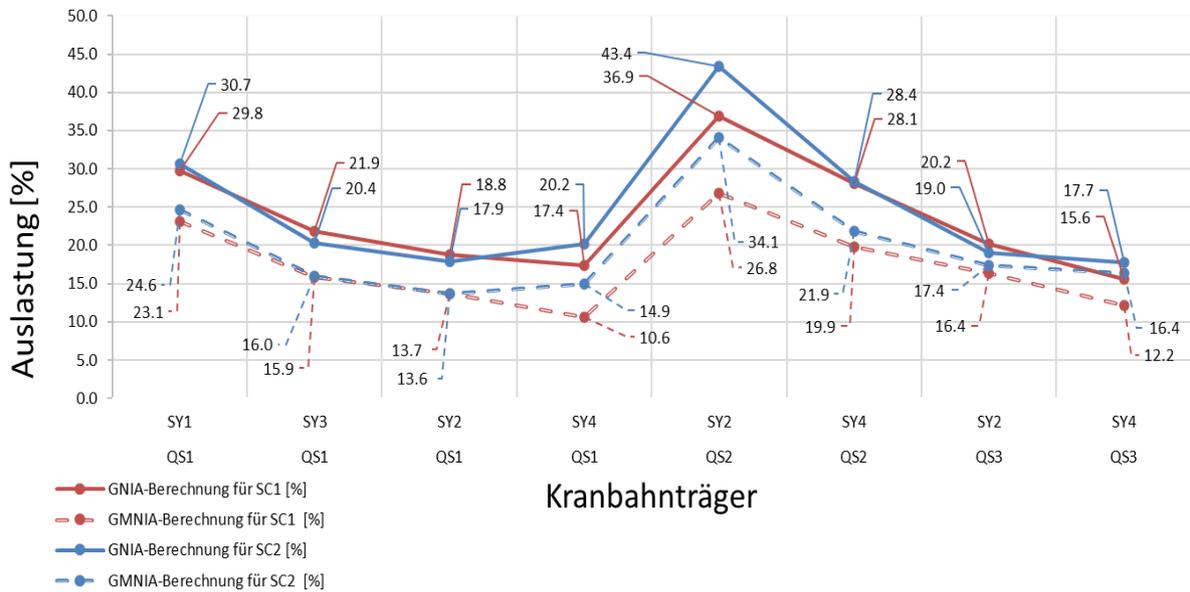


Abbildung 8.69: Vergleich aller Auslastungen aus der GNIA- und GMNIA-Berechnung.

Aus der Abbildung 9.3 ist es eindeutig zu sehen, dass die GNIA-Berechnung größere Auslastungen als die GMNIA-Berechnung liefert. Es hängt damit zusammen das die Auslastungen der GNIA-Berechnung beim Fließen der Randfasern erreicht werden (siehe Kapitel 7.), und die Auslastungen aus der GMNIA-Berechnung entstehen durch das komplette Plastizieren der Querschnitte beim Bruch der Träger. (siehe Kapitel 8.).

Ein weiterer Grund liegt in den Ersatzimperfektionen „D:e0“ die größer ist als „C:e0“ und bildet daher eher einen realistischen Zustand ab.

9. Vergleich baupraktischer Nachweisformen mit numerischen Berechnungen

Kranbahnträger mit SC1			Auslastung			
			Knickender OG. [%]	Anhang A [%]	GNIA-Berechnung [%]	GMNIA-Berechnung [%]
QS1	SY1	SC1	25.0	30.3	29.8	23.1
QS1	SY3	SC1	19.8	30.1	21.9	15.9
QS1	SY2	SC1	19.3	23.8	18.8	13.7
QS1	SY4	SC1	15.0	23.8	17.4	10.6
QS2	SY2	SC1	29.6	41.3	36.9	26.8
QS2	SY4	SC1	23.1	42.8	28.1	19.9
QS3	SY2	SC1	9.6	21.2	20.2	16.4
QS3	SY4	SC1	7.5	24.3	15.6	12.2
Kranbahnträger mit SC2			Auslastung			
			Knickender OG. [%]	Anhang A [%]	GNIA-Berechnung [%]	GMNIA-Berechnung [%]
QS1	SY1	SC2	25.0	31.3	30.7	24.6
QS1	SY3	SC2	19.8	30.1	20.4	16.0
QS1	SY2	SC2	19.3	24.3	17.9	13.6
QS1	SY4	SC2	15.0	25.1	20.2	14.9
QS2	SY2	SC2	29.6	45.6	43.4	34.1
QS2	SY4	SC2	23.1	45.2	28.4	21.9
QS3	SY2	SC2	9.6	21.2	19.0	17.4
QS3	SY4	SC2	7.5	25.2	17.7	16.4

Tabelle 9-1: Vergleich von Auslastungen aus den BDK-Nachweisen.

Aus allen angewendeten BDK-Nachweisen kann schlussendlich ein Vergleich abgeleitet werden (siehe Tabelle 9-1 und Abbildungen 9.1 und 9.2):

1. Der BDK-Nachweis nach [1], Anhang A zeigte die größten Auslastungen. Der Grund, dass dieser Nachweis höhere Auslastung liefert, liegt in der Auswahl der Berechnungsmethode von $M_{y.cr}$ (siehe Kapitel 5.2).
2. Die GNIA-Berechnung dagegen ist eine elastische Berechnung, die Auslastungen dieser Berechnung entsprechen am ehesten jenen aus dem BDK-Nachweis nach [1], Anhang A. Die horizontalen Lasten wurden in der Nachweisführung vernachlässigt.

- Die Methode des Knickenden Obergurts ist in keiner Hinsicht mit der numerischen Berechnung verbunden. Das ist eine grobe Händische Berechnung nur abhängig von der Geometrie des Kranbahnträgers, trotzdem gab sie geringere Auslastungen als der BDK-Nachweis nach [1], Anhang A und die GNIA-Berechnung.
- Die GMNIA-Berechnung ist eine numerische Traglastberechnung, die von einem vollständigen Plastizieren ausgeht. Die Auslastungen sind am geringsten von allen vier Nachweismethoden. Die horizontalen Lasten wurden in der Nachweisführung vernachlässigt.

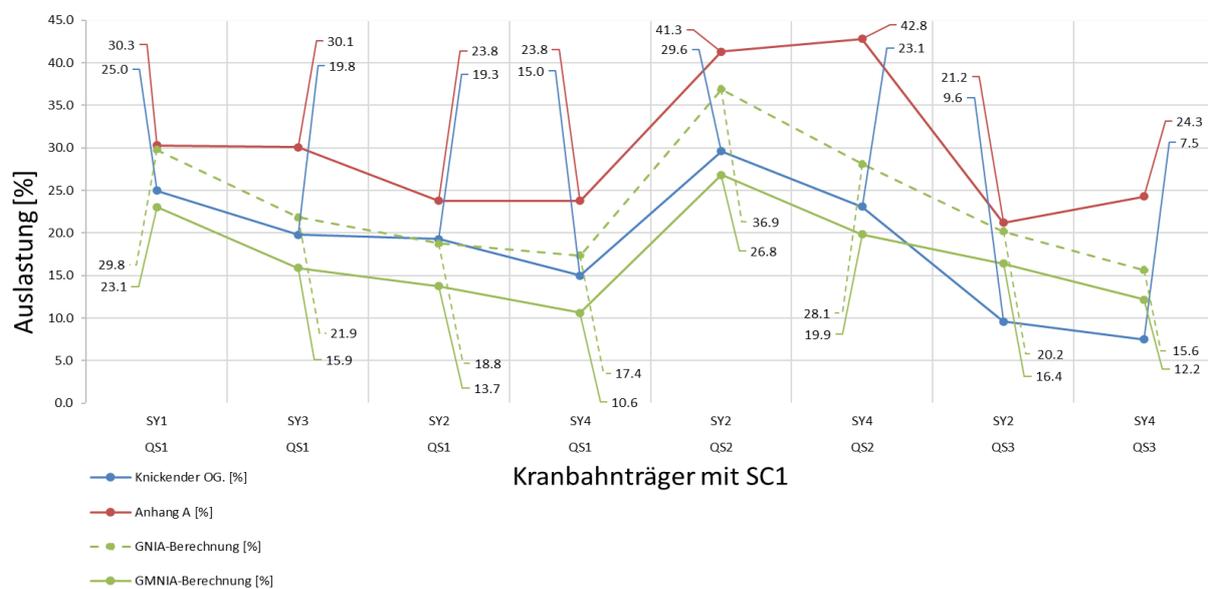


Abbildung 9.1: Vergleich aller Nachweis Formen für Kranbahnträger mit SC1.

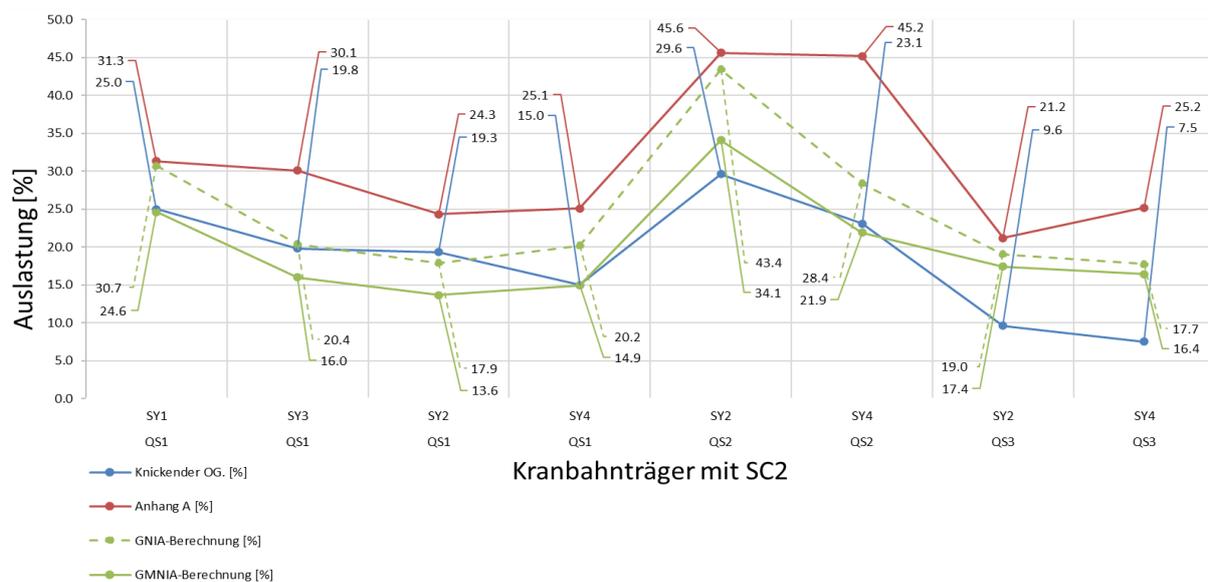


Abbildung 9.2: Vergleich aller Nachweis Formen für Kranbahnträger mit SC2.

10. Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Aus der Arbeit lässt sich viel über die Auswahl vom Querschnitt des Kranbahnträgers und der Kranschiene ableiten. Die Berechnungen wurden ohne seitliche Halterungen durchgeführt, was in der Regel bei bereits ausgeführten Kranbahnträgern nicht der Fall ist. Gewalzte Profile wie der Querschnitt QS1 (HEA 450) sind immer eine bessere Wahl als ein geschweißter Querschnitt wie QS2 oder QS3, wenn eine seitliche Halterung in Form eines Verbands nicht vorhanden ist. Die geschweißten Querschnitte sollen nur im Fall zu hoher Lasten verwendet werden, bzw. wenn wirtschaftlicher mit dem Material umgegangen werden soll. Bei der Auswahl der Kranschienen ist immer zu beachten, dass solange vom Kranhersteller nichts vorgeschrieben ist eine Schiene gewählt wird die den Horizontal Kräften Stand halten kann. Die Höhe und das Torsionsträgheitsmoment der Schiene sollten dabei beachtet werden.

Aus den BDK-Nachweisen sehen wir, dass der „Knickende Obergurt“ mit der Handrechnung der einfachste Weg zur Lösung des Biegedrillknicken von Kranbahnträgern ist, und es führt zu kleineren Auslastungen dadurch weiter zu kleineren Querschnittauswahl. Dieser Nachweis kann einfach zur Überprüfung einer numerischen Berechnung eingesetzt werden.

Der BDK-Nachweis nach EC3-6, Anhang A ist viel aufwändiger durch das Berechnen von $M_{y.cr}$ wozu [3] benutzt worden ist, damit der Nachweis in Folge händisch geführt werden kann. Die Auslastungen sind größer als die aus dem „Knickendem Obergurt“ was zu konservativen Querschnittauswahl führt.

Die aufwändigste Berechnung ist die Numerische-Berechnung, da sie die realen Bedingungen gut abbilden kann. Sie verlangt eine sehr gute Kenntnis der FEM-Berechnung überhaupt, und nimmt viel Zeit in Anspruch. Die zwei Berechnungen die in den Kapiteln 7. und 8. ergeben hohe Auslastungen, obwohl die horizontalen Lasten ignoriert wurden. Erst wenn man die Interaktion aller Kranbahnen berücksichtigen würde durch den einen kompletten Kran würde die FE-Berechnung zu Günstigeren Ergebnissen führen.

10.2 Ausblick

Die durchgeführten BDK-Nachweise „Knickender Obergurt“ und „Anhang A“ zeigen sich als optimal für die alltägliche Berechnung wegen der schnellen und einfachen Anwendbarkeit bei unterschiedlichen Kranbahnträgern. Dies ist von Vorteil, da die Berechnung einer Kranbahn ohnehin schon sehr aufwändig ist - die Ermittlung aller Lasten, Ermüdungsnachweise und Überprüfungen der Schweißnähte sowie das Führen der Beulnachweise. Die numerische Berechnung ist nur dann zu empfehlen, wenn sehr hohe Auslastungen zu erwarten sind bzw. wenn ohnehin eine FEM - Überprüfung erforderlich ist.

11. Literaturverzeichnis

- [1] ÖNORM EN 1993-6, Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 6: Kranbahnen, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 15.08.2010.
- [2] ÖNORM EN 1993-1, Eurocode 3, Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten; Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 15.10.2014.
- [3] A. Inc., *ASYS 19. Release, Software*, 2020.
- [4] K. O. Mursoft Wörgötter, *RuckZuck 6.0 Studentenversion*, 2009.
- [5] P.-I. C. Seeßelberg, *Kranbahnen Bemessung und konstruktive Gestaltung nach Eurocode 4*, vollständige überarbeitete Auflage, Berlin: Beuth Verlag GmbH Berlin-Wien-Zürich, 2014.
- [6] U. K. Rolf Kidman, *Stahlbau Teil1: Grundlagen Mit Beispielen nach Eurocode 3*, 5. Auflage, Berlin, Deutschland: Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2013.
- [7] CTICM, *LTBeam*, Paris, 2002.
- [8] C. Gebhardt, *Praxisbuch FEM mit Ansys Workbench*, Einführung in die lineare und nichtlineare Mechanik, München, Deutschland: Carl Hasner Verlag München, 2011.

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl