

**Institut für Stahlbau**

*Institutsvorstand*  
*Univ.Prof. DI Dr. H. Unterweger*

Lessingstr. 25,  
A-8010 Graz  
Tel: ++43-316/873-6200  
Fax: ++43-316/873-6707  
h.unterweger@tugraz.at

Sekretariat: Lisa Lebitsch  
Tel.: ++43 316/873-6201  
lisa.lebitsch@tugraz.at

DVR: 008 1833

UID: ATU 574 77 929

## BRÜCKE WÖRTH

### Bericht über die FE-Berechnungen zur Abschätzung der zusätzlichen Längsnormalspannungen aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung

Univ.Prof. DI Dr. Unterweger Harald  
Bearbeiter: DI Dr. Kettler Markus  
Institut für Stahlbau, TU Graz  
September 2013



Auftraggeber:

KUPSA & MORIANZ  
ZT Gesellschaft m.b.H. für Bauingenieurwesen  
Waltendorfer Hauptstr. 32A/II  
8010 GRAZ



# Bericht über die FE-Berechnungen zur Abschätzung der zusätzlichen Längsnormalspannungen aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung

---

Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterwiesing

Bearbeiter: DI Dr. Markus Kettler

*Institut für Stahlbau, TU Graz*

## Inhalt

1.	Problemstellung.....	2
2.	Berechnungsgrundlagen.....	3
2.1.	Material und Geometrieparameter.....	3
2.2.	Belastung, Randbedingungen und Modellierung.....	4
2.2.1.	Allgemein.....	4
2.2.2.	Modell 1.....	5
2.2.3.	Modell 2.....	8
2.3.	Berechnungsmethode.....	10
3.	Berechnungsergebnisse.....	11
3.1.	Ergebnisse am Modell 1.....	11
3.1.1.	Allgemein.....	11
3.1.2.	Lastfall A.....	11
3.1.3.	Lastfall B.....	13
3.2.	Ergebnisse am Modell 2.....	15
3.2.1.	Allgemein.....	15
3.2.2.	Lastfall A.....	15
3.2.3.	Lastfall B.....	19
4.	Zusammenfassung.....	23

# 1. Problemstellung

Der vorliegende Bericht stellt die ergänzenden Untersuchungen zur Abschätzung der zusätzlichen Längsnormalspannungen aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung für die statischen Berechnungen der Brücke Wörth dar. Es werden zwei unterschiedliche Finite-Elemente-Modelle des längsten Brückenfeldes 05-06 (siehe Abb. 1) erstellt. Die Lagerung in den Achsen 05 bzw. 06 erfolgt über starre Einspannungen (Wölbbehinderung). Durch diese Vorgehensweise kann der Einfluss aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung auf der sicheren Seite liegend abgeschätzt werden.

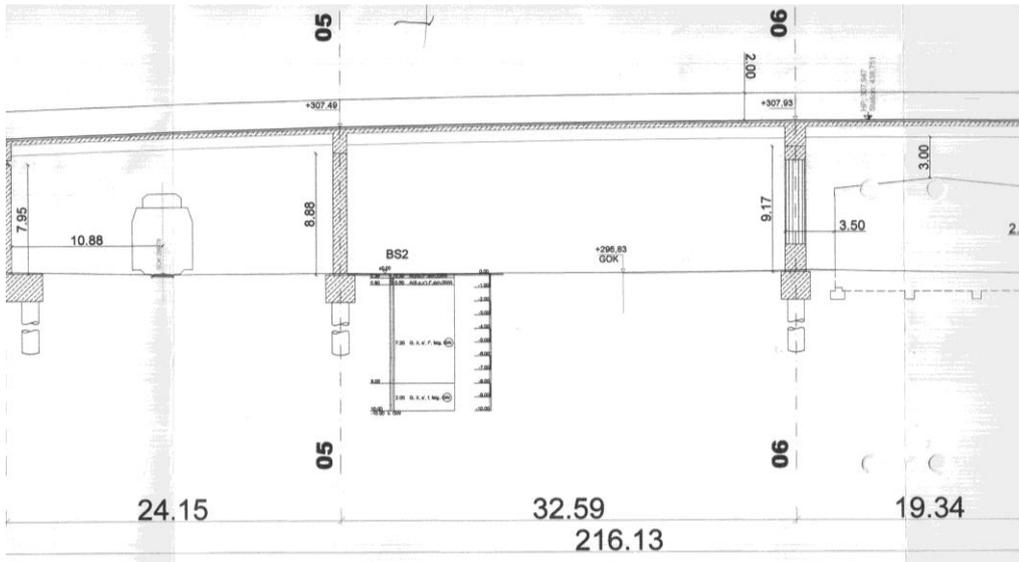


Abb. 1 Ausschnitt Brücke Wörth, Brückenfeld 05-06.

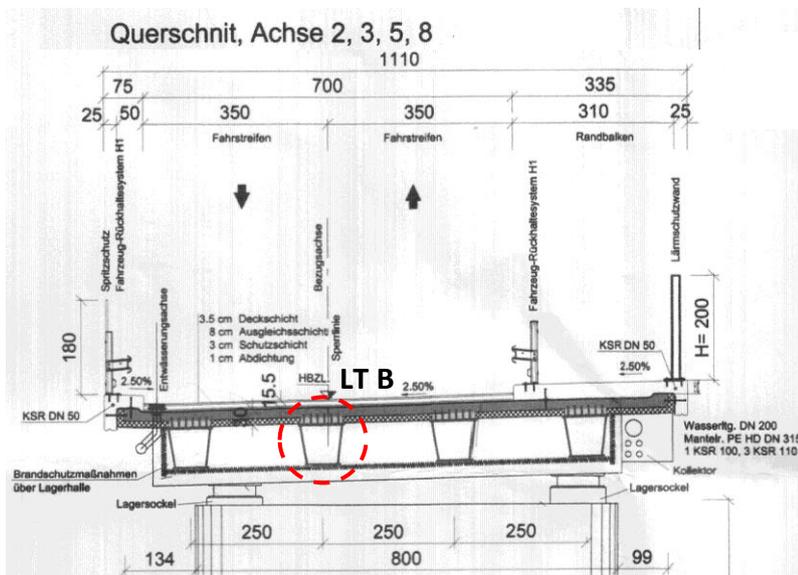


Abb. 2 Brückenquerschnitt mit Längsträger B (LT B).

Bei dem vorliegenden Brückentragwerk handelt es sich um eine Stahl-Beton-Verbundbrücke mit vier stählernen Längsträgern (Kastenprofile) und einer Betonplatte bestehend aus 12cm Betonfertigteilen und einer Aufbetonschicht von etwa 13cm, siehe Abb. 2. Die Betonplatte wird in den Berechnungen mit  $d=25\text{cm}$  angesetzt.

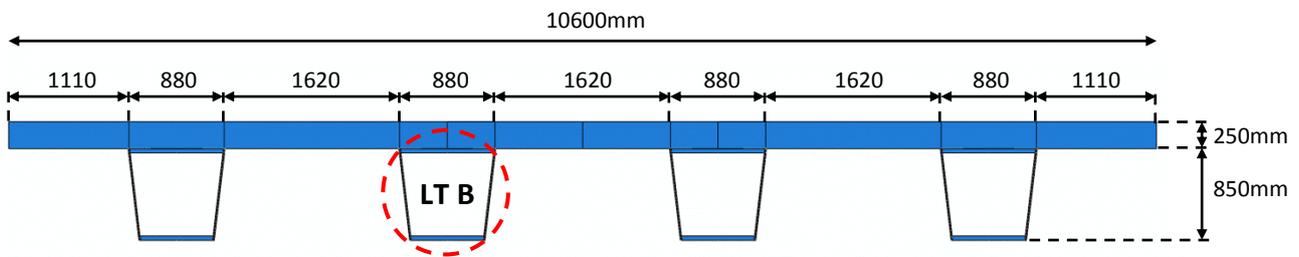
## 2. Berechnungsgrundlagen

### 2.1. Material und Geometrieparameter

Die Modellierung des Materials erfolgte sowohl für die Stahl- als auch für die Betonbauteile linear elastisch. Das Stahlmaterial wurde mit einem E-Modul von  $E=210000\text{N/mm}^2$  und einer Querkontraktionszahl von  $\nu=0,3$  abgebildet. Der Beton (sofern in den Berechnungen angesetzt) näherungsweise mit  $E=3000\text{N/mm}^2$  und  $\nu=0,2$ .

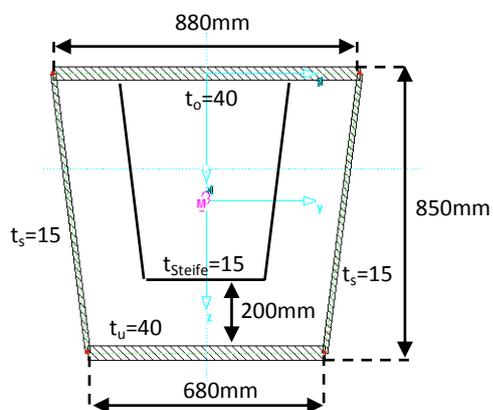
Die nachfolgende Abb. 3 zeigt den gegenständlichen Brückenquerschnitt mit einer Betonplatte der Stärke  $d=25\text{cm}$  und vier Längsträgern aus Stahl. Die Laststellungen wurden jeweils so gewählt, dass die ungünstigsten Verhältnisse (maximale Längsnormalspannungen aus Torsion) im Längsträger B vorliegen. Dessen Lage ist in der Abbildung graphisch hervorgehoben.

Als Spannweite wurde das längste Brückenfeld 05-06 zugrunde gelegt. Unter Abzug der beidseitig angeordneten Auflager-Querträger verbleibt eine restliche Spannweite von  $L = 32,59\text{m} - 1,20\text{m} = 31,39\text{m}$ .



**Abb. 3** Brückenquerschnitt mit untersuchtem Längsträger B (LT B).

Die nachfolgende Abb. 4 zeigt die zugrunde gelegten Geometrieparameter von Längsträger B. Im betrachteten Feld 05-06 wurden 5 innenliegende Quersteifen ( $t = 15\text{mm}$ ) angeordnet, deren Abmessungen ebenfalls der Abbildung zu entnehmen sind. Ihr Abstand in Längsrichtung beträgt  $L/6 = 5,23\text{m}$ . Die Ober- und Untergurtabmessungen stellen idealisierte Annahmen dar, die jedoch keine nennenswerten Änderungen der hier untersuchten maximalen Längsnormalspannungen, gegenüber dem ausgeführten Querschnitt, bewirken.



**Abb. 4** Abmessungen Längsträger B.

## 2.2. Belastung, Randbedingungen und Modellierung

### 2.2.1. Allgemein

Die Torsionswirkung aus ständiger Last ist vernachlässigbar, sodass nur vertikale Verkehrslasten zu beachten sind. Als Belastung wurde das Lastmodell 1 gemäß EN 1991-2 zugrunde gelegt. Gesucht ist jene Belastungssituation, bei der maximale Torsion in Längsträger B entsteht. Daher wurde ausschließlich Fahrstreifen 1 des Lastmodells angesetzt und folgende beiden Lastfälle untersucht:

- **Lastfall A:** Fahrstreifen 1 ( $b=3,0\text{m}$ ) ist in der Mitte des Brückenquerschnitts angeordnet, siehe Abb. 5. Die Doppelachse ( $a=2,0\text{m}$ ) liegt in der Mitte des Fahrstreifens. In Brückenlängsrichtung ist sie in Feldmitte angeordnet.

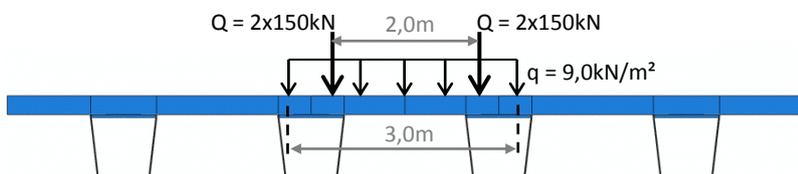


Abb. 5 Lastfall A – graphische Darstellung.

- **Lastfall B:** Fahrstreifen 1 ( $b=3,0\text{m}$ ) ist in Bezug auf die Mitte des Brückenquerschnitts etwas weiter rechts angeordnet, siehe Abb. 6. Die Doppelachse ( $a=2,0\text{m}$ ) ist innerhalb des Fahrstreifens so positioniert, dass sich für Längsträger B die ungünstigste Belastung (maximale Torsion) ergibt. In Brückenlängsrichtung ist die Doppelachse in Feldmitte angeordnet.

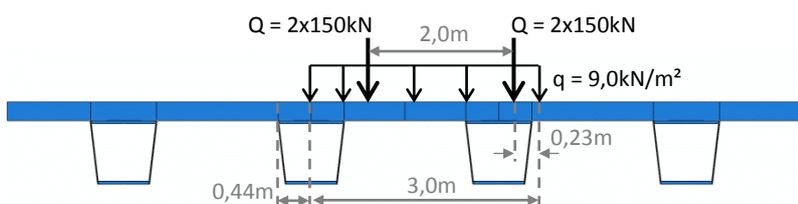
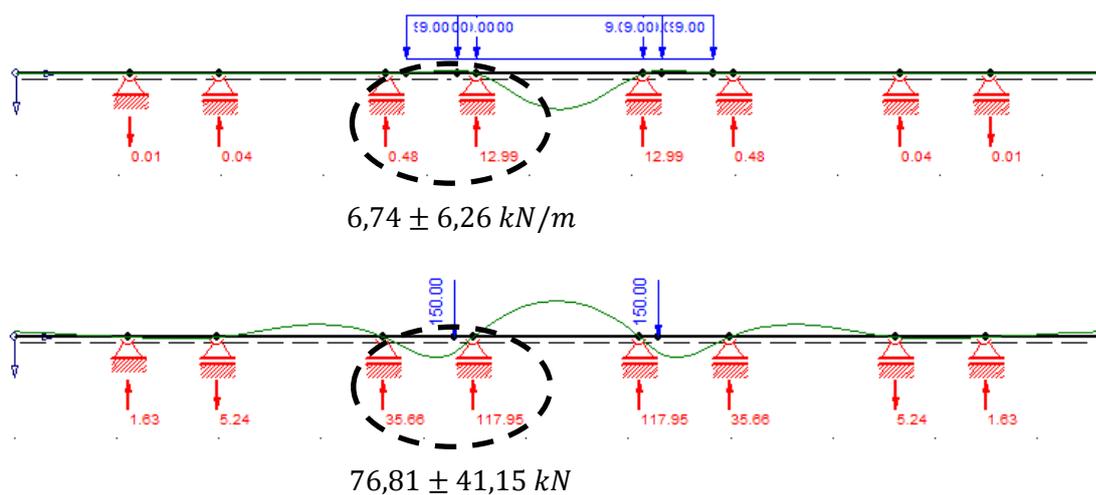


Abb. 6 Lastfall B – graphische Darstellung.

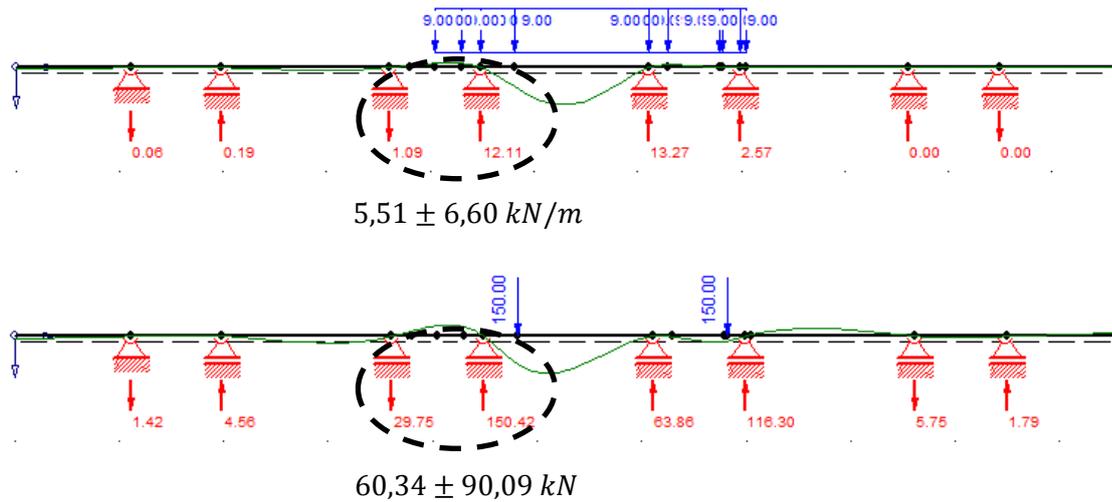
Um die maximalen Längsnormalspannungen aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung zu ermitteln, wurden zwei unterschiedliche Modelle entwickelt. Zum einen ist dies das Modell 1, das die alleinige Abbildung des isolierten Kastenträgers LT B ( $L=31,39\text{m}$ ) ohne Betonplatte vorsieht. Zum anderen wurde für Modell 2 der gesamte Brückenquerschnitt modelliert (Betonplatte plus vier Längsträger). Details zur Modellierung, den Randbedingungen und den aufgebrachtten Lasten sind in den folgenden beiden Abschnitten zusammengestellt. Hierbei beschreibt Abschnitt 2.2.2 das Modell 1 und Abschnitt 2.2.3 das Modell 2.

## 2.2.2 Modell 1

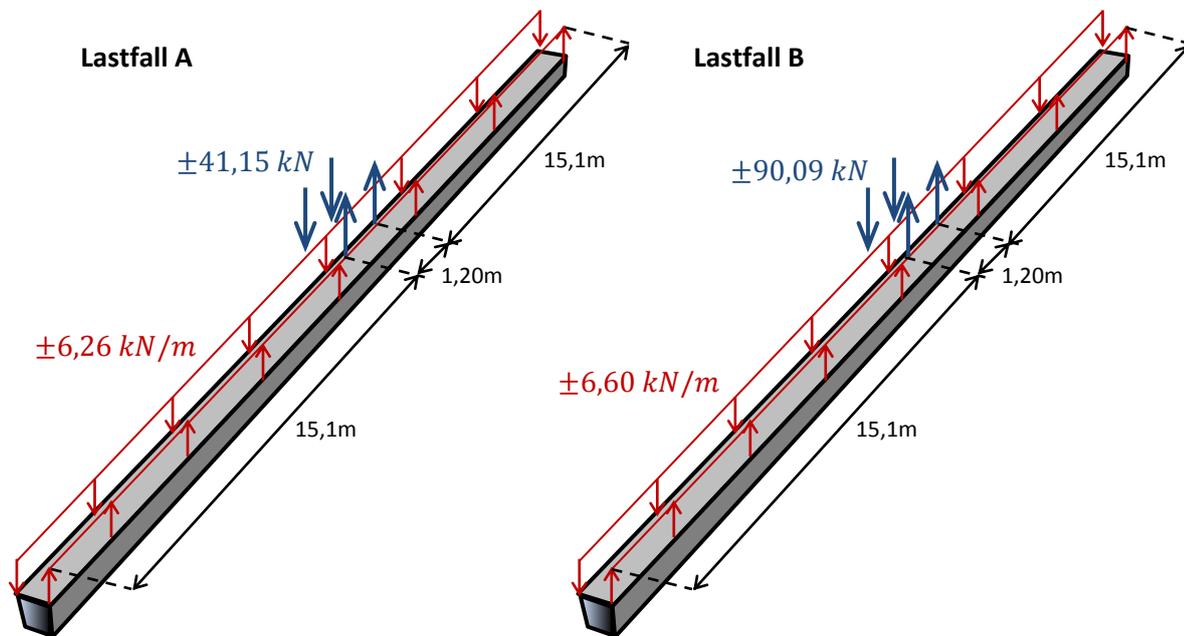
Die Belastung, infolge des Lastmodells 1, gemäß Eurocode EN 1991 – 2, für Lastfall A und B besteht aus einer Gleichlast (Flächenlast,  $p = 9 \text{ kN/m}^2$ ) und einer Doppelachse ( $2 * 300 \text{ kN}$ ) je Fahrstreifen. Für das Modell 1, bei dem ausschließlich der isoliert gedachte Längsträger B modelliert wurde, mussten diese Lasten in Linien- und Einzellasten umgerechnet werden. Konservativ wurde angenommen, dass die Längsträger eine starre Lagerung für das Quersystem darstellen. Demnach wurden hierbei sowohl die Biegesteifigkeit als auch die Torsionssteifigkeit der Längsträger als starr angenommen. Die Ermittlung der auf den Längsträger B aufgebrachtten Lasten sowie der zugehörigen Reaktionskräfte, die die eigentliche Belastung bei Modell 1 darstellen, kann den folgenden beiden Abbildungen entnommen werden. Dabei zeigt Abb. 7 die Werte für Lastfall A und Abb. 8 die Werte für Lastfall B. Abb. 9 zeigt die in der FE-Berechnung (Software: ABAQUS) aufgebrachtten Lasten für die beiden Lastfälle. Da es bei den gegenständlichen Untersuchungen ausschließlich um das Torsionsverhalten des Trägers geht, wurden nur die antimetrischen Lastanteile berücksichtigt (Anm.: die symmetrischen Lastanteile, die zu einer alleinigen globalen Biegebeanspruchung von LT B führen, sind direkt in der Systemberechnung der Brücke enthalten. Die symmetrischen Lastanteile sind in Abb. 7 und 8 ergänzend ausgewiesen).



**Abb. 7** Konservative Ermittlung der Belastung des isoliert gedachten LT B für Lastfall A, oben: aus Gleichlast, unten: aus Doppelachse.

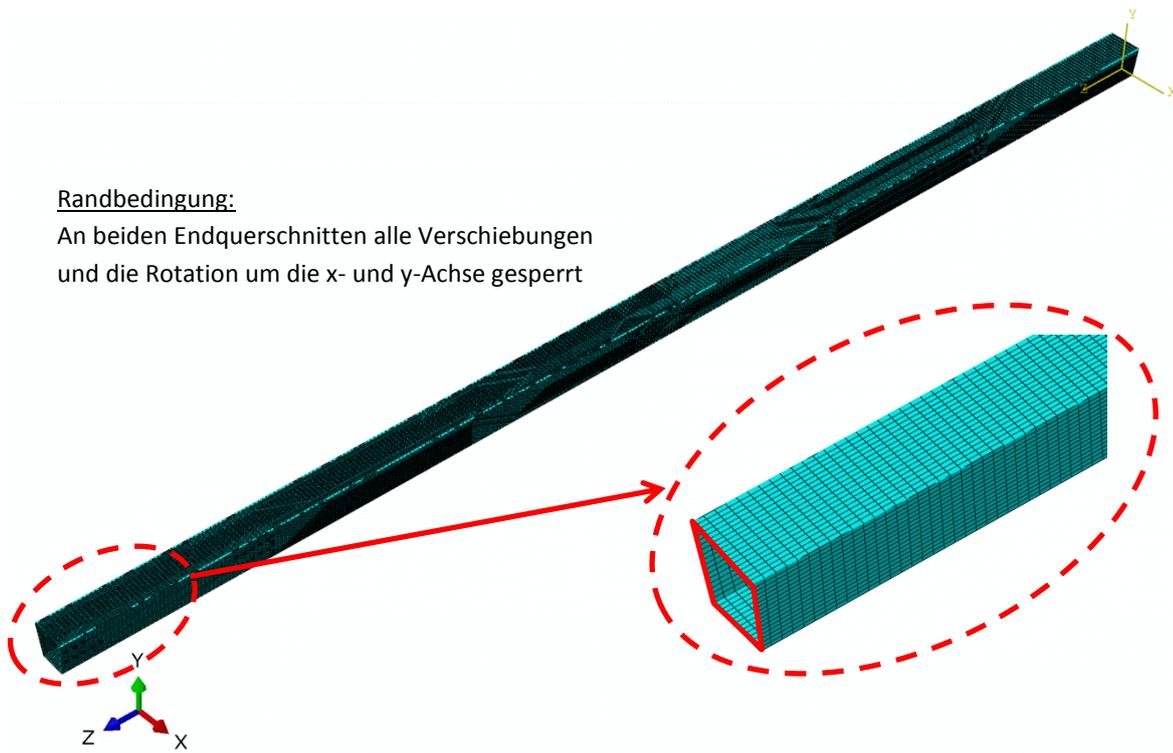


**Abb. 8** Konservative Ermittlung der Belastung des isoliert gedachten LT B für Lastfall B, oben: aus Gleichlast, unten: aus Doppelachse.



**Abb. 9** Belastung des isoliert gedachten LT B, links: Lastfall A, rechts: Lastfall B.

Der Längsträger B wurde mittels linearer Schalenelemente des Typs S4R modelliert (ca. 22.000 Elemente). Sie haben eine durchschnittliche Abmessung von etwa 50x100mm, siehe Abb. 10. Die Lagerung des Trägers erfolgte an dessen Endquerschnitten. Dort wurden sämtliche Freiheitsgrade mit Ausnahme der Rotation um die Träger-Längsachse (z-Achse) gesperrt. Somit liegt eine Einspannung mit voller Wölbeinspannung und Gabellagerung an beiden Endquerschnitten vor.



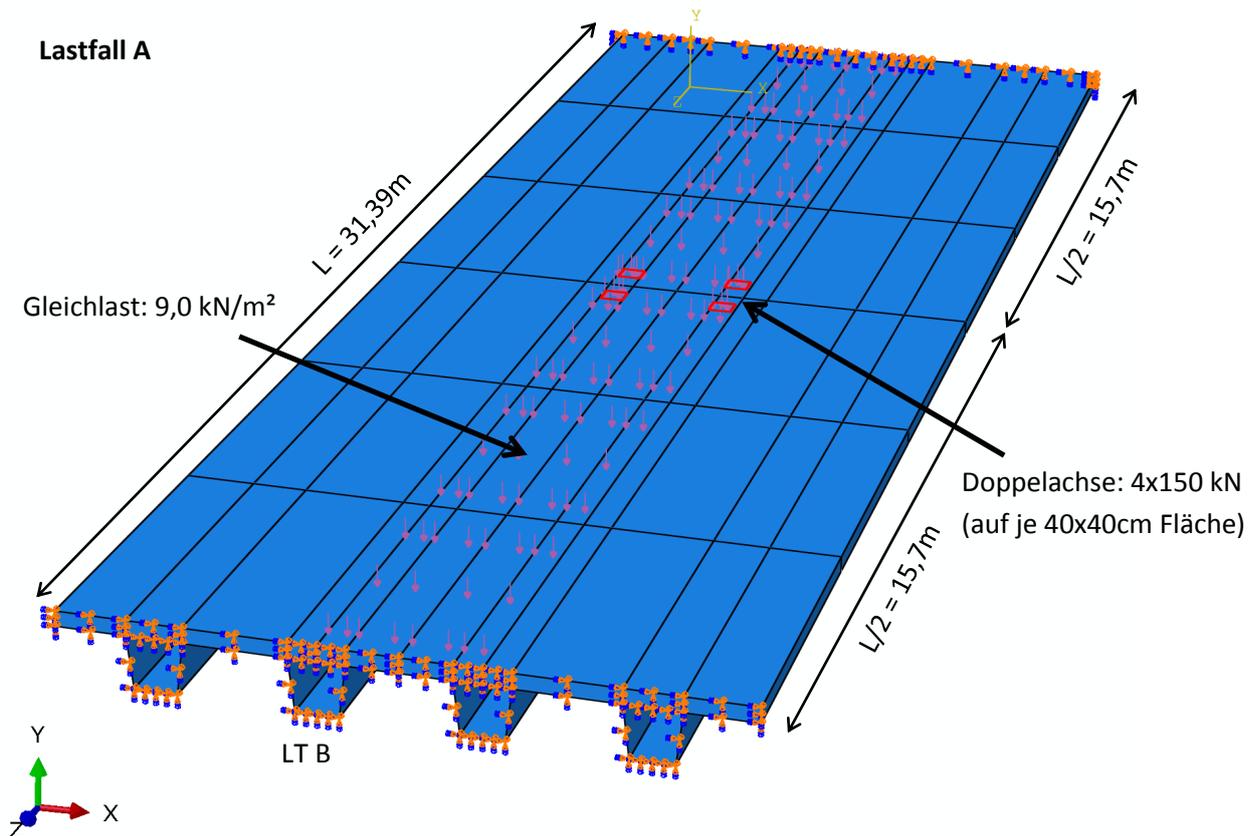
Randbedingung:

An beiden Endquerschnitten alle Verschiebungen  
und die Rotation um die x- und y-Achse gesperrt

**Abb. 10** Verwendetes FE-Netz und Randbedingungen des isoliert gedachten Längsträger B.

### 2.2.3 Modell 2

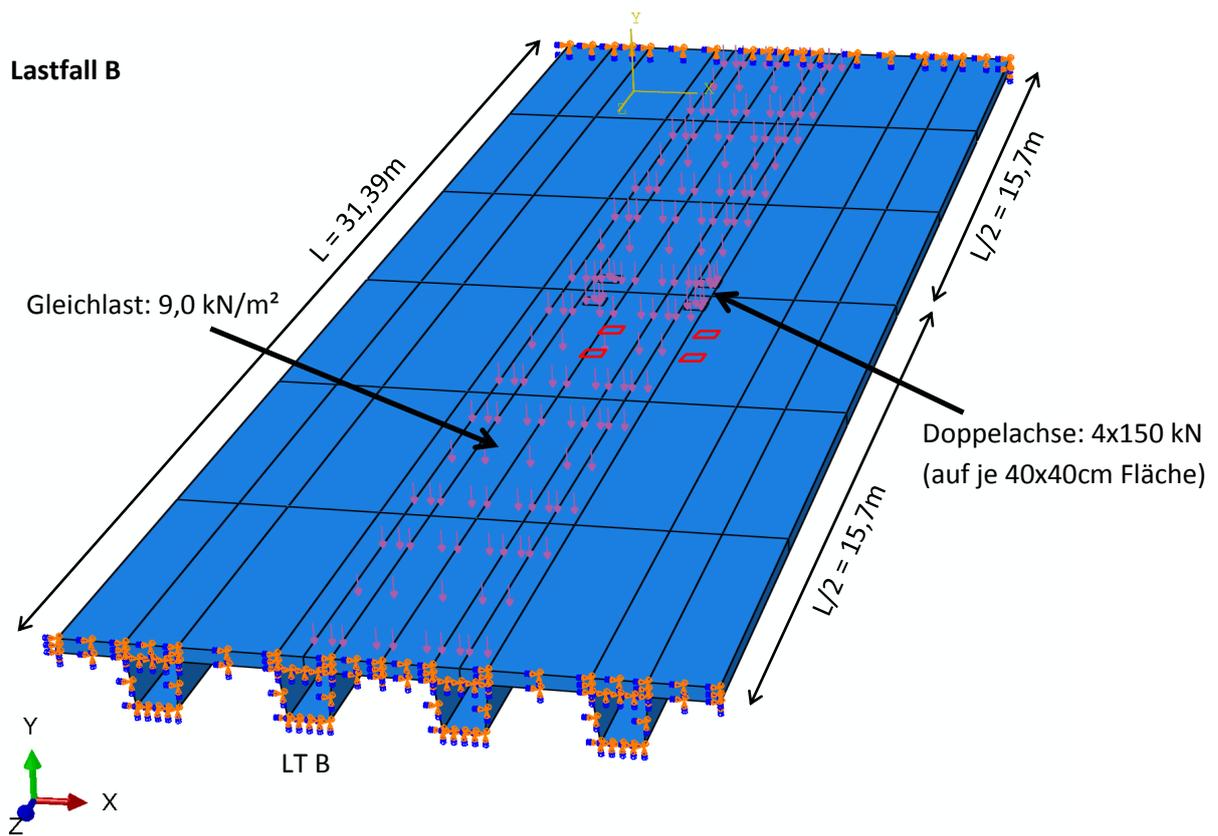
Die Lasten (Flächenlast und Doppelachse für Lastfall A und B) des Lastmodells 1 gemäß Eurocode wurden direkt auf die modellierte Betonplatte aufgebracht. Abb. 11 zeigt die in der FE-Berechnung aufgetragenen Lasten für Lastfall A, Abb. 12 jene für Lastfall B. Da es bei den gegenständlichen Untersuchungen ausschließlich um das Torsionsverhalten des Längsträgers B geht, wurden die ermittelten Ergebnisse im Anschluss an die FE-Berechnung in ihre symmetrischen und antisymmetrischen Anteile aufgegliedert, siehe Abschnitt 3.2. (Abspaltung der reinen globalen Biegung von LT B).



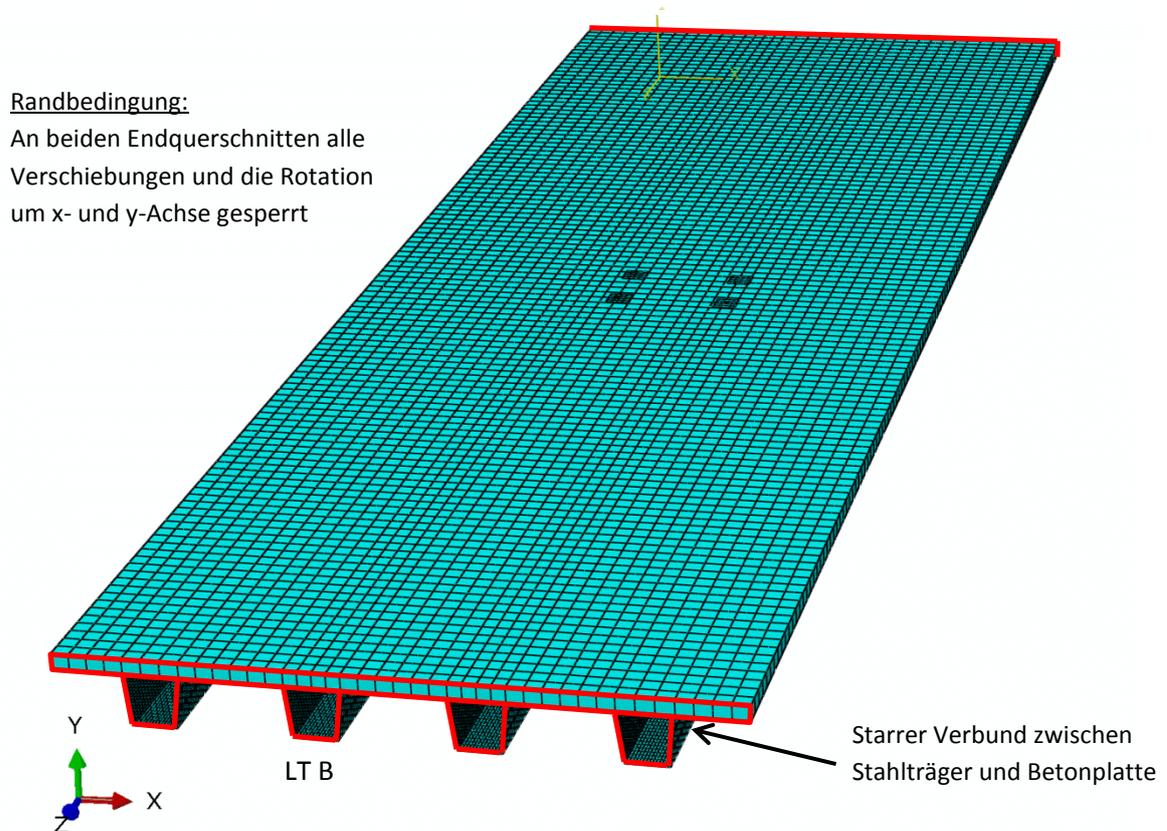
**Abb. 11** Belastung des modellierten Brückenabschnitts, Lastfall A.

Die Längsträger wurden mittels linearer Schalenelemente des Typs S4R modelliert (4x ca. 22.000 Elemente). Die „Stahlelemente“ haben eine durchschnittliche Abmessung von etwa  $50 \times 100\text{ mm}$ . Die Betonplatte wurde mit quadratischen Volumenelemente des Typs C3D20R modelliert (ca. 2300 Elemente). Die Betonelemente haben eine Kantenlänge von etwa  $250\text{ mm}$ , siehe Abb. 13. Die Verbindung zwischen Stahlträgern und Betonplatte wurde hier idealisiert als starrer Verbund angenommen.

Die Lagerung des Brückenabschnitts erfolgte an dessen Endquerschnitten. Dort wurden sämtliche Freiheitsgrade mit Ausnahme der Rotation um die Brücken-Längsachse (z-Achse) gesperrt. Somit liegt eine Einspannung mit voller Wölbeinspannung und Gabellagerung an beiden Querrändern vor.



**Abb. 12** Belastung des modellierten Brückenabschnitts, Lastfall B.



**Abb. 13** Verwendetes FE-Netz und Randbedingungen des modellierten Brückenabschnitts.

## **2.3. Berechnungsmethode**

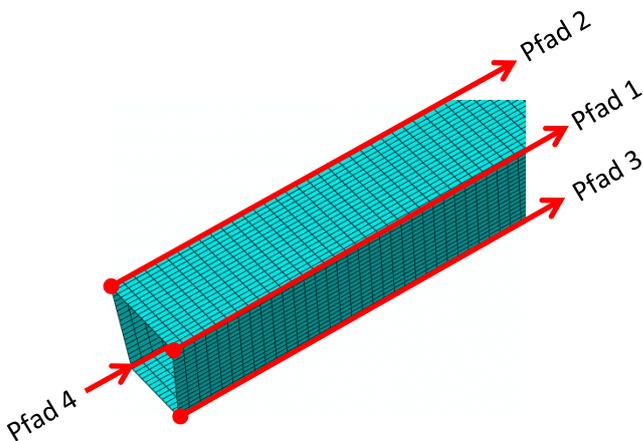
Sämtliche FE-Berechnungen wurden mit dem Finiten-Elemente-Programm Abaqus, Version 6.11 als linear elastische Analysen (LEA) durchgeführt.

## 3. Berechnungsergebnisse

### 3.1. Ergebnisse am Modell 1

#### 3.1.1. Allgemein

In den beiden nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen für Modell 1 und Lastfall A (3.1.2) bzw. Lastfall B (3.1.3) zusammengefasst. Neben den Verformungen des Systems wurden vor allem die Längsnormalspannungen zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung herausgearbeitet. Zur Darstellung der Längsnormalspannungen wurden in den vier Eckbereichen des Kastenquerschnitts vier Pfade für die Ergebnisdarstellung in Trägerlängsrichtung eingeführt, siehe Abb. 14.



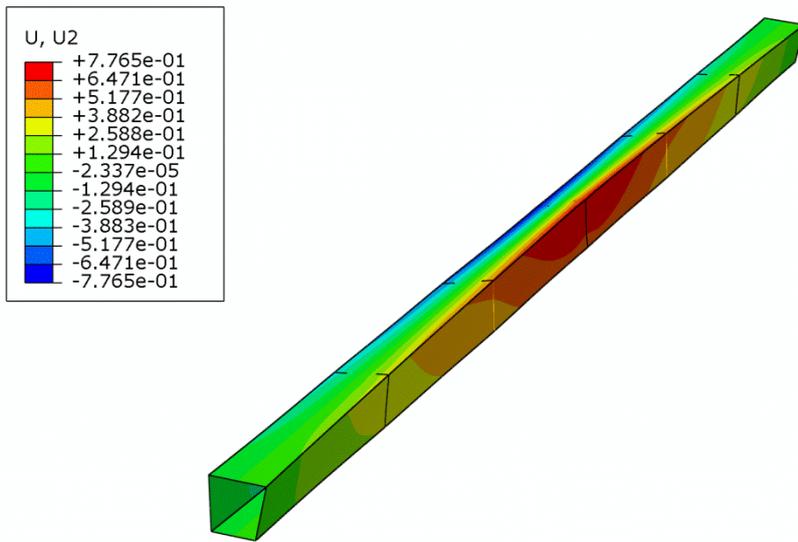
**Abb. 14** Definition der Ergebnispfade 1 bis 4 für Modell 1.

#### 3.1.2. Lastfall A

Abb. 15 zeigt die Vertikalverformungen des isolierten Längsträgers B zufolge Lastfall A. Die reine Torsionsbeanspruchung ist an den Verformungen gut zu erkennen. Die Stegoberkanten weisen eine maximale Vertikalverformung von  $\pm 0,8$  mm auf.

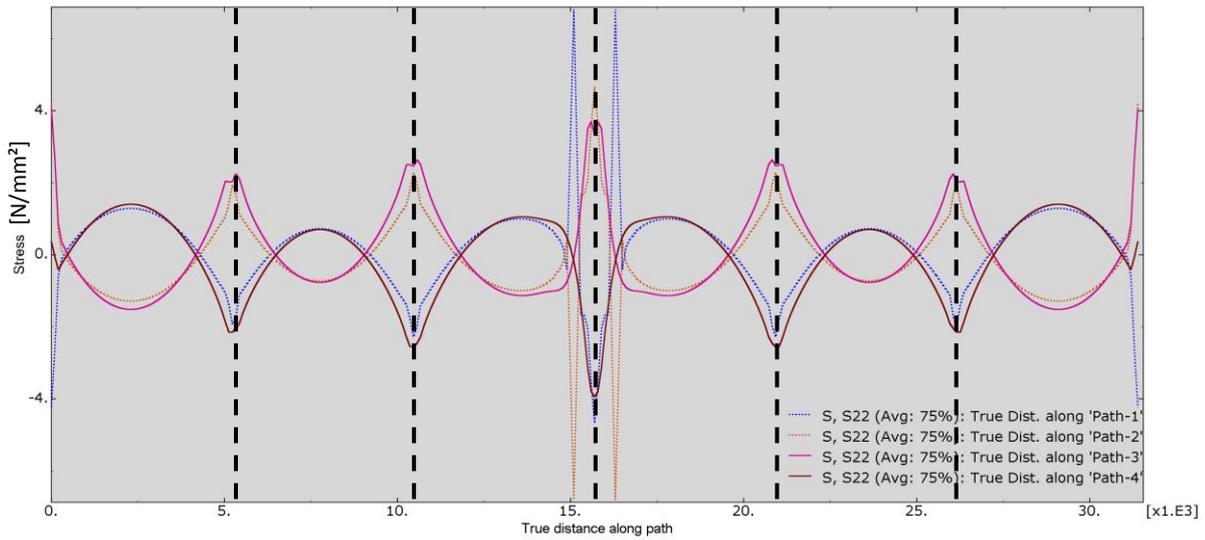
Abb. 16 fasst die Längsnormalspannungen entlang der Pfade 1 bis 4 zusammen. Aufgrund der Schwerpunktlage sind die Spannungen im Untergurt (Pfade 3 und 4) etwas höher als im Obergurt (Pfade 1 und 2). Die Pfade 1 und 2 zeigen exakt denselben Spannungsverlauf mit unterschiedlichem Vorzeichen, wie er auch der Einheitsverwölbung des Querschnitts entspricht. Selbiges gilt für die Pfade 3 und 4. Die Spannungsspitzen für die Endquerschnitte und die fünf innenliegenden Quersteifen sind deutlich zu erkennen. Die Normalspannungsverläufe in Längsrichtung lassen die lokale Biegung von linkem und rechtem Trägerquerschnitt (Steg & mitwirkender Ober- und Untergurt) zwischen den Querscheiben gut erkennen. Die Spannungskonzentrationen im Bereich der Achslasten (konzentrierte Einzellasten) haben numerische Gründe und sind für die Beurteilung der Längsnormalspannungen aus Torsion ohne Bedeutung. In der Realität würden hier keine Einzellasten, sondern Radlasten mit einer gewissen Aufstandsfläche wirken.

Die maximalen Längsnormalspannungen für Lastfall A zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung betragen demnach in etwa  $5,0 \text{ N/mm}^2$ .



ODB: Bruecke\_Woerth\_nurKasten\_calc02.odb    Abaqus/Standard 6.11-PR3  
 Step: Step-1  
 Increment 1: Step Time = 1.000  
 Primary Var: U, U2  
 Deformed Var: U    Deformation Scale Factor: +2.000e+02

**Abb. 15** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 1 (isolierter Längsträger B) und Lastfall A.



**Abb. 16** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 1 (isolierter Längsträger B) und Lastfall A.

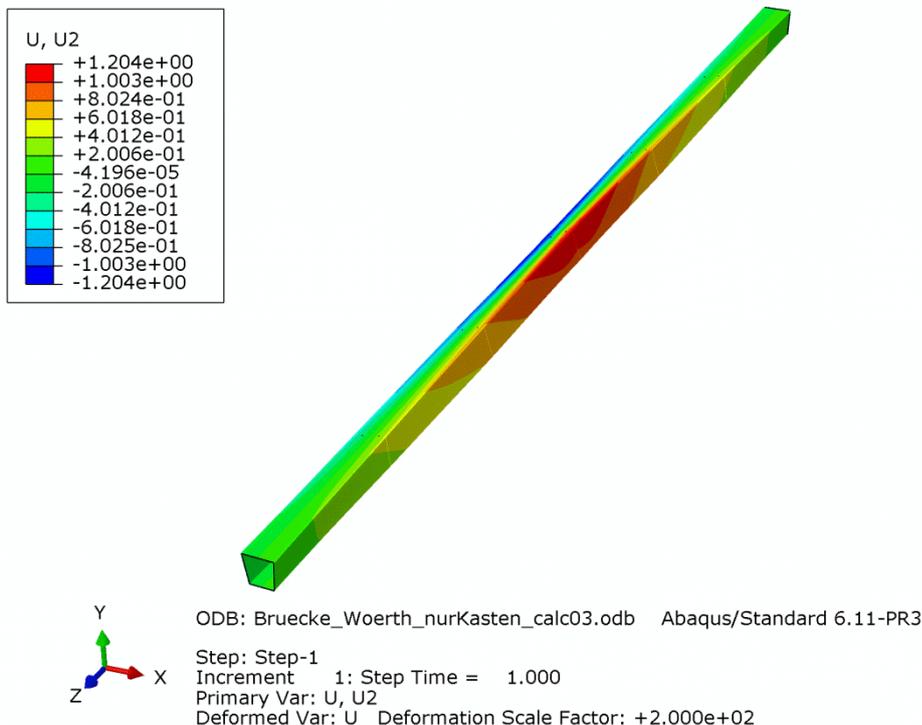
### 3.1.3. Lastfall B

Abb. 17 zeigt die Vertikalverformungen des isolierten Längsträgers B zufolge Lastfall B. Die reine Torsionsbeanspruchung ist an den Verformungen gut zu erkennen. Die Stegoberkanten weisen eine maximale Vertikalverformung von  $\pm 1,2$  mm auf. Damit sind die Verformungen im Vergleich zu Lastfall A um 50% größer.

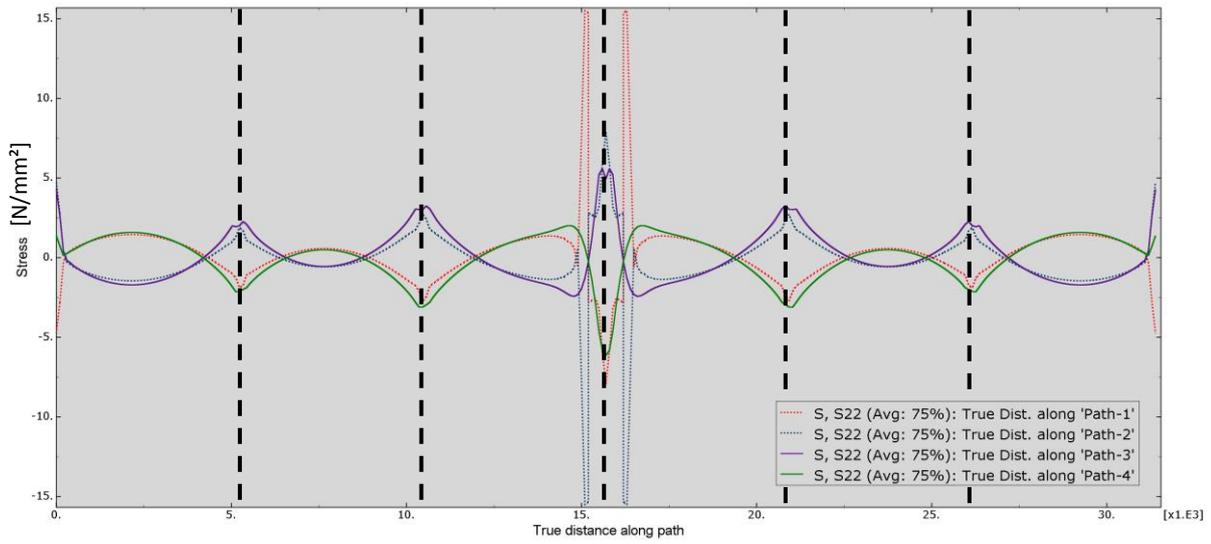
Abb. 18 fasst die Längsnormalspannungen entlang der Pfade 1 bis 4 zusammen. Aufgrund der Schwerpunktlage sind die Spannungen im Untergurt (Pfade 3 und 4) auch hier etwas höher als im Obergurt (Pfade 1 und 2). Die Pfade 1 und 2 zeigen exakt denselben Spannungsverlauf mit unterschiedlichem Vorzeichen, wie er auch der Einheitsverwölbung des Querschnitts entspricht. Selbiges gilt für die Pfade 3 und 4. Die Spannungsspitzen für die Endquerschnitte und die fünf innenliegenden Quersteifen sind deutlich zu erkennen. Die Spannungskonzentrationen im Bereich der Achslasten (konzentrierte Einzellasten) haben numerische Gründe und sind für die Beurteilung der Längsnormalspannungen aus Torsion ohne Bedeutung. In der Realität würden hier keine Einzellasten, sondern Radlasten mit einer gewissen Aufstandsfläche wirken.

Die maximalen Längsnormalspannungen für Lastfall B zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung betragen demnach in etwa  $7,5 \text{ N/mm}^2$ . Damit sind auch die Spannungen im Vergleich zu Lastfall A um 50% größer.

Zusammenfassend kann für das konservative Modell 1 mit den ebenfalls konservativen Lastannahmen gesagt werden, dass die aus Torsion maximal zusätzlich auftretenden (lokal sehr begrenzten) Längsnormalspannungen nur  $7,5 \text{ N/mm}^2$  betragen. Dies sind charakteristische Werte, die im Falle der ULS-Kombination noch mit  $\gamma_f = 1,35$  zu erhöhen sind, sodass sich  $\max \sigma_{xd} = 10,0 \text{ N/mm}^2$  ergibt.



**Abb. 17** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 1 (isolierter Längsträger B) und Lastfall B.



**Abb. 18** Längsnormalspannungen  $[\text{N/mm}^2]$  für Modell 1 (isolierter Längsträger B) und Lastfall B.

## 3.2. Ergebnisse am Modell 2

### 3.2.1. Allgemein

In den beiden nachfolgenden Abschnitten sind die Ergebnisse der FE-Berechnungen für Modell 2 und Lastfall A (3.2.2) bzw. Lastfall B (3.2.3) zusammengefasst. Neben den Verformungen des Systems wurden vor allem die Längsnormalspannungen zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung herausgearbeitet. Zur Darstellung der Längsnormalspannungen wurden in den vier Eckbereichen des Kastenquerschnitts vier Pfade für die Ergebnisdarstellung in Trägerlängsrichtung eingeführt, siehe Abb. 19.

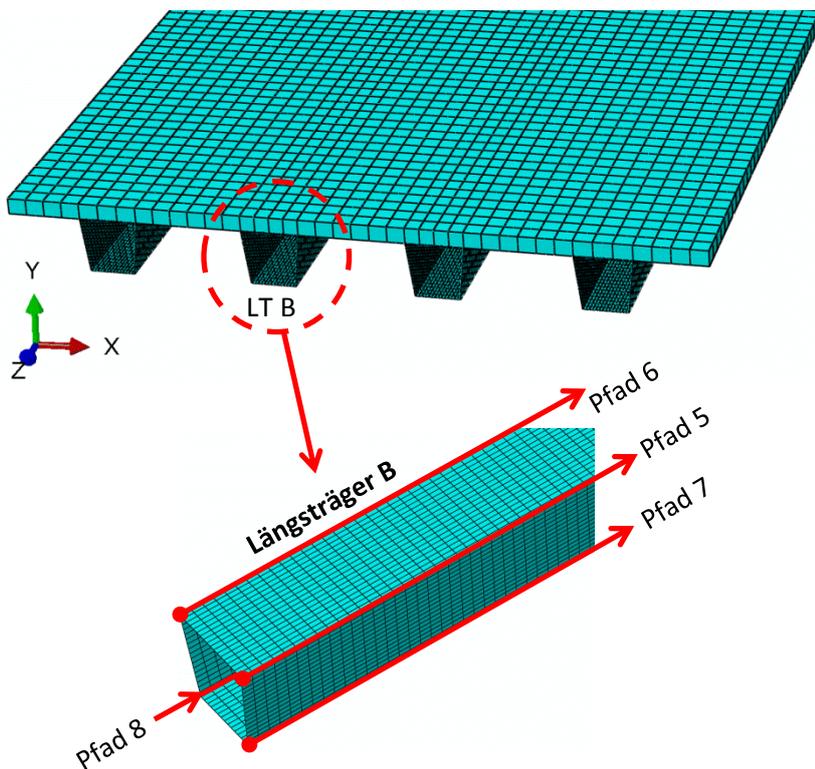
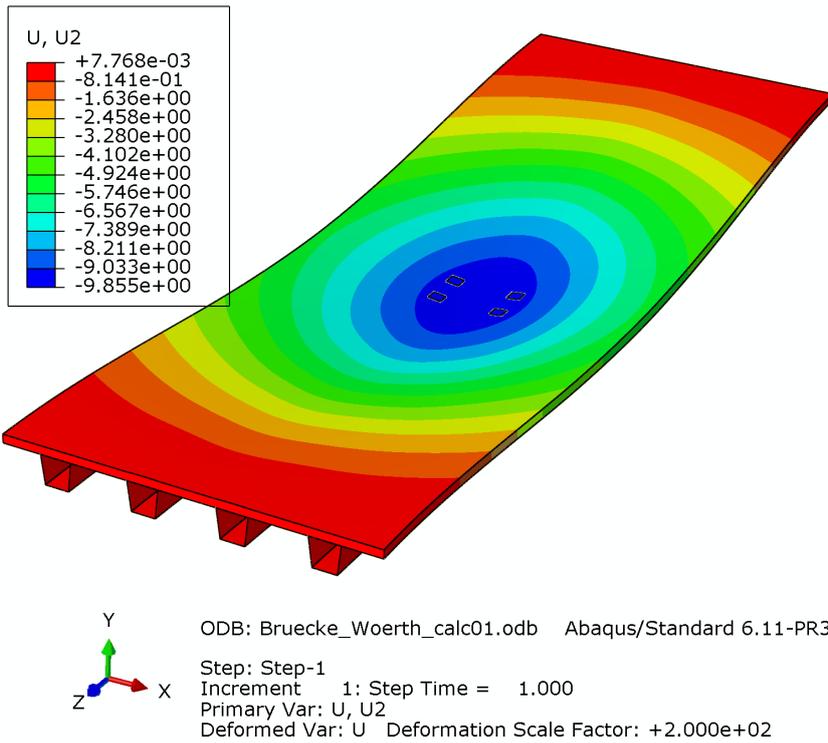


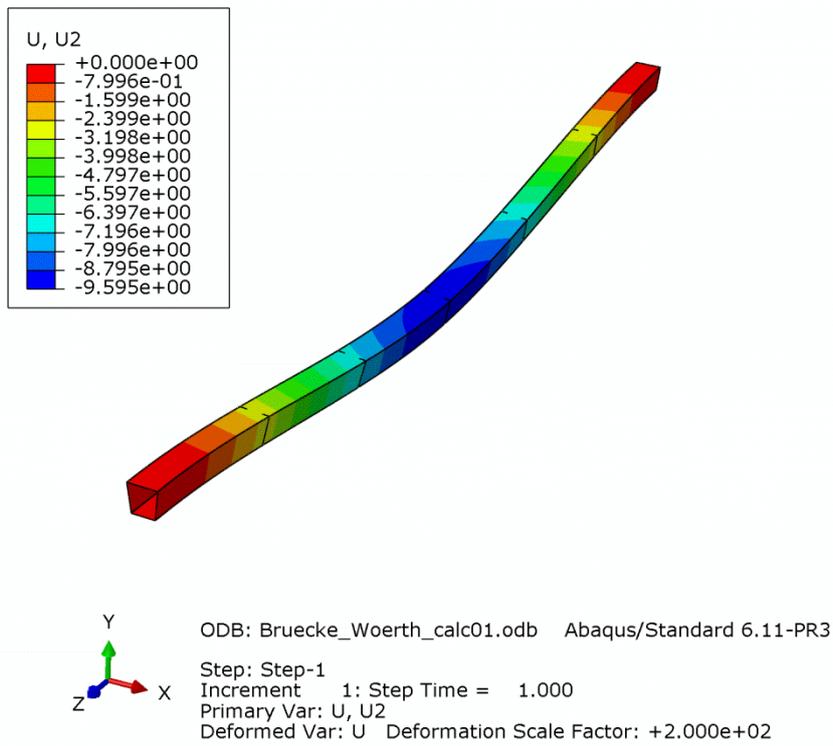
Abb. 19 Definition der Ergebnispfade 5 bis 8 für Modell 2.

### 3.2.2. Lastfall A

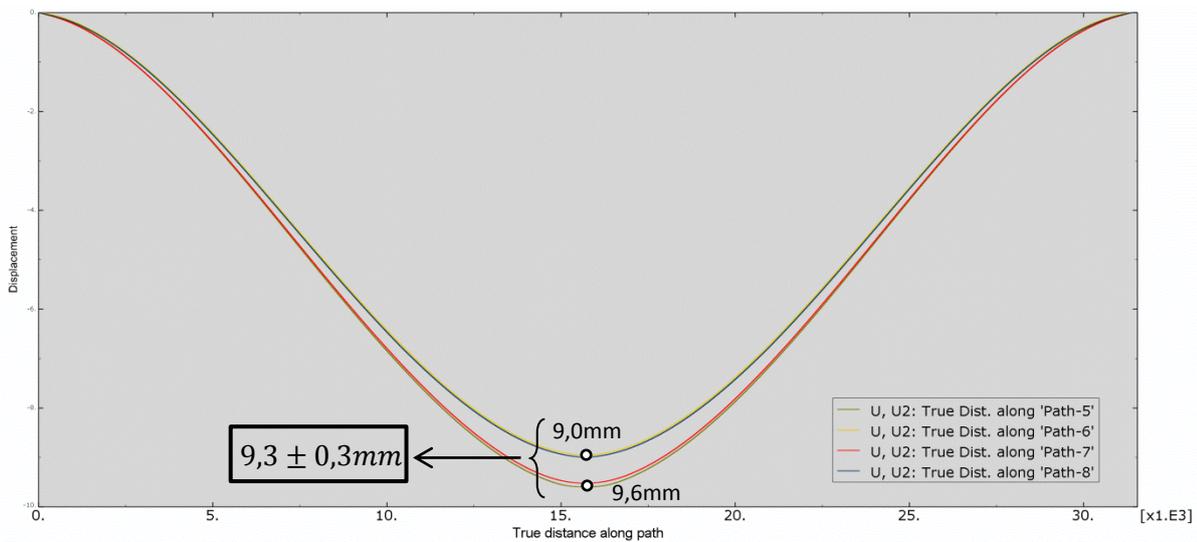
Abb. 20 bzw. Abb. 21 zeigen die Vertikalverformungen von Modell 2 bzw. des Teilausschnitts Längsträger B zufolge Lastfall A. Die gemeinsame Wirkung von globaler Biegung und Torsion ist an den Verformungen gut zu erkennen. Um den reinen Torsionsanteil herauszuarbeiten, sind die Vertikalverformungen in Abb. 22 entlang der Pfade 5 bis 8 aufgetragen. Die Verformungen können so in ihren symmetrischen Anteil (reine Biegung) und in ihren antisymmetrischen Anteil (reine Torsion) zerlegt werden. Die Stegoberkanten weisen aus Torsion eine maximale Vertikalverformung von  $\pm 0,3$  mm auf. Dies ist deutlich geringer wie am isoliert betrachteten LT B im Modell 1.



**Abb. 20** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 und Lastfall A.



**Abb. 21** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 (nur Längsträger B) und Lastfall A.



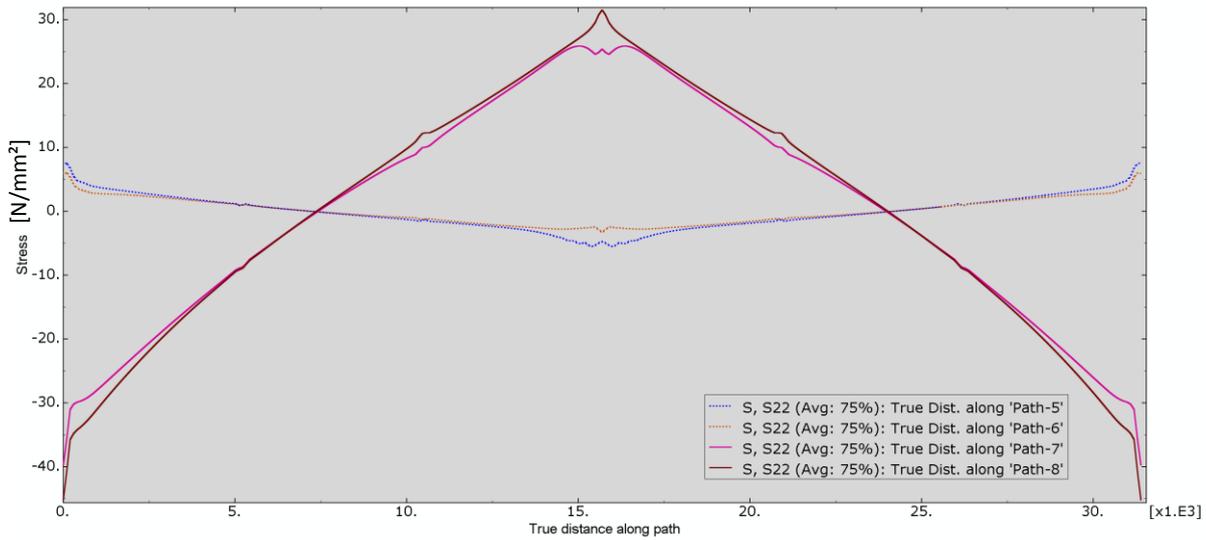
**Abb. 22** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 und Lastfall A entlang der Pfade 5 bis 8.

Abb. 23 fasst die Längsnormalspannungen zufolge Lastfall A entlang der Pfade 5 bis 8 zusammen. Aufgrund der Schwerpunktslage sind die Spannungen im Untergurt (Pfade 7 und 8) deutlich höher als im Obergurt (Pfade 5 und 6). Die gemeinsame Wirkung von globaler Biegung und Torsion ist auch anhand der Spannungen deutlich zu erkennen. Um den reinen Torsionsanteil herauszuarbeiten, wurden die Spannungen in ihre symmetrischen und antimetrischen Anteile aufgespalten. Der symmetrische Anteil ist in Abb. 24 dargestellt und beschreibt die alleinigen Spannungen aus globaler Biegung.

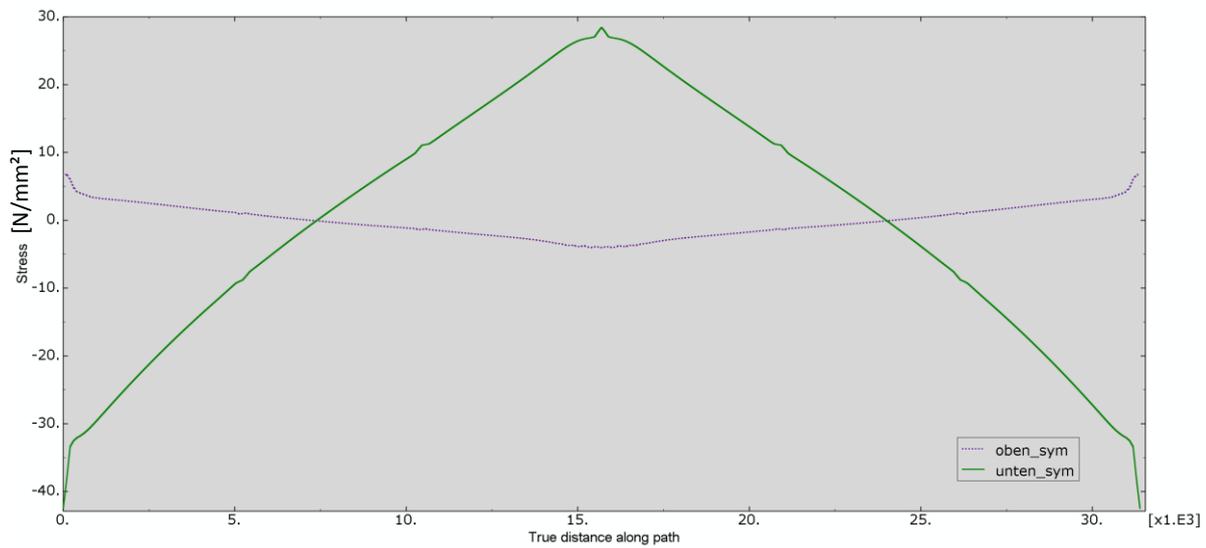
Der verbleibende antimetrische Anteil, der aus der reinen Torsionswirkung stammt, ist in Abb. 25 abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass die Pfade 5 und 6 gemeinsam als „oben\_antim“ ausgewertet wurden, da sie sich nur durch ihr Vorzeichen unterscheiden, dieses aber für die gegenständlichen Untersuchungen ohne Bedeutung ist. Ebenso wurden die Pfade 7 und 8 gemeinsam als „unten\_antim“ ausgewertet.

Die Spannungsspitzen für die Endquerschnitte und die Querschnitte mit Querscheiben, insbesondere in Feldmitte (Mittelquerschnitt), sind deutlich zu erkennen. An den übrigen vier innenliegenden Quersteifen sind hier im Vergleich zu Modell 1 deutlich geringere Spannungsspitzen auszumachen. Die lastverteilende Wirkung der Betonplatte ist im Bereich der Doppelachse gut zu erkennen.

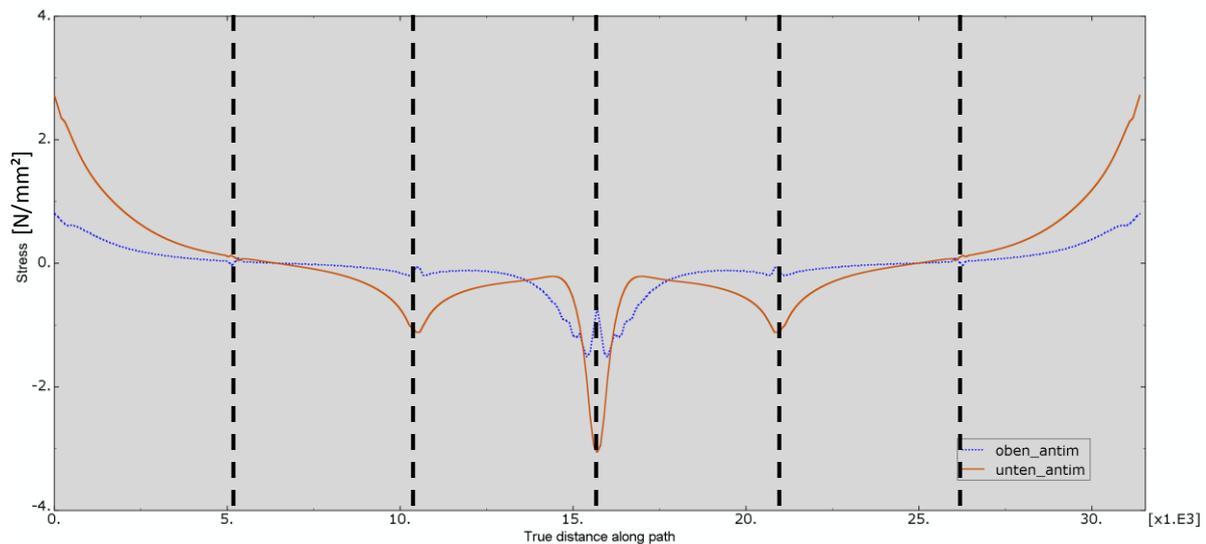
Die maximalen Längsnormalspannungen für Lastfall A zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung liegen mit etwa 3,0 N/mm<sup>2</sup> niedriger als jene für Modell 1 (dort 5,0 N/mm<sup>2</sup>).



**Abb. 23** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall A, symmetrischer + antimetrischer Anteil.



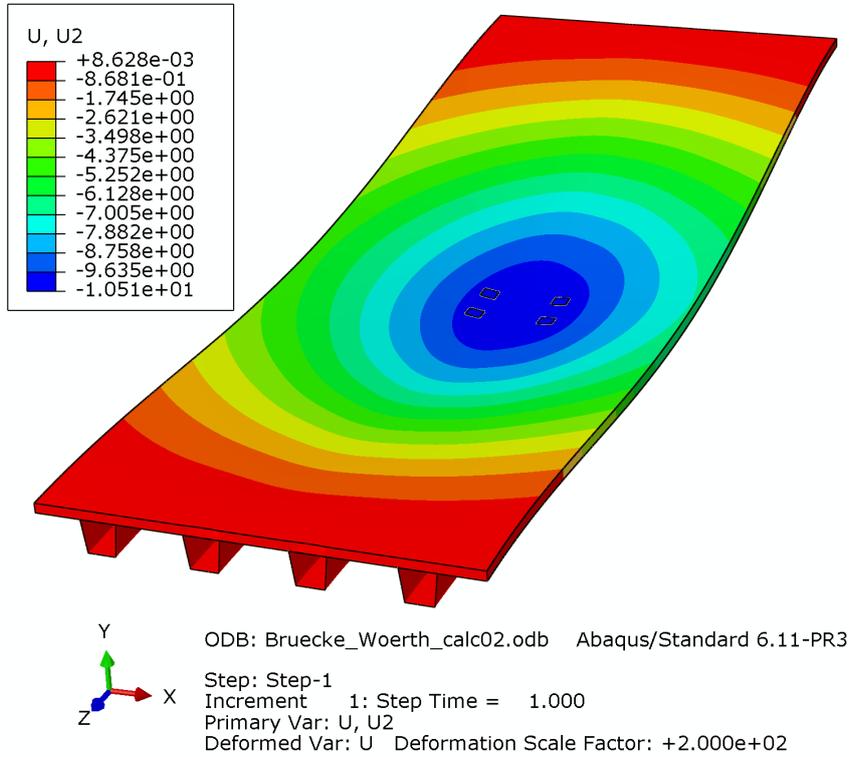
**Abb. 24** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall A, symmetrischer Anteil (reine Biegung).



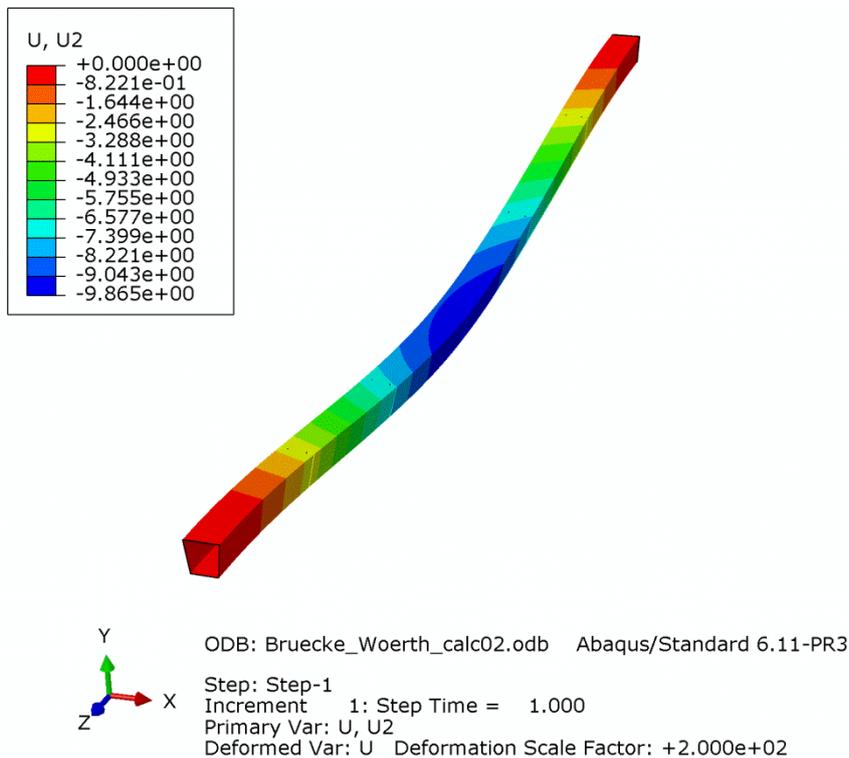
**Abb. 25** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall A, antimetrischer Anteil (reine Torsion).

### 3.2.3. Lastfall B

Abb. 26 bzw. Abb. 27 zeigen die Vertikalverformungen von Modell 2 bzw. des Teilausschnitts Längsträger B zufolge Lastfall B.

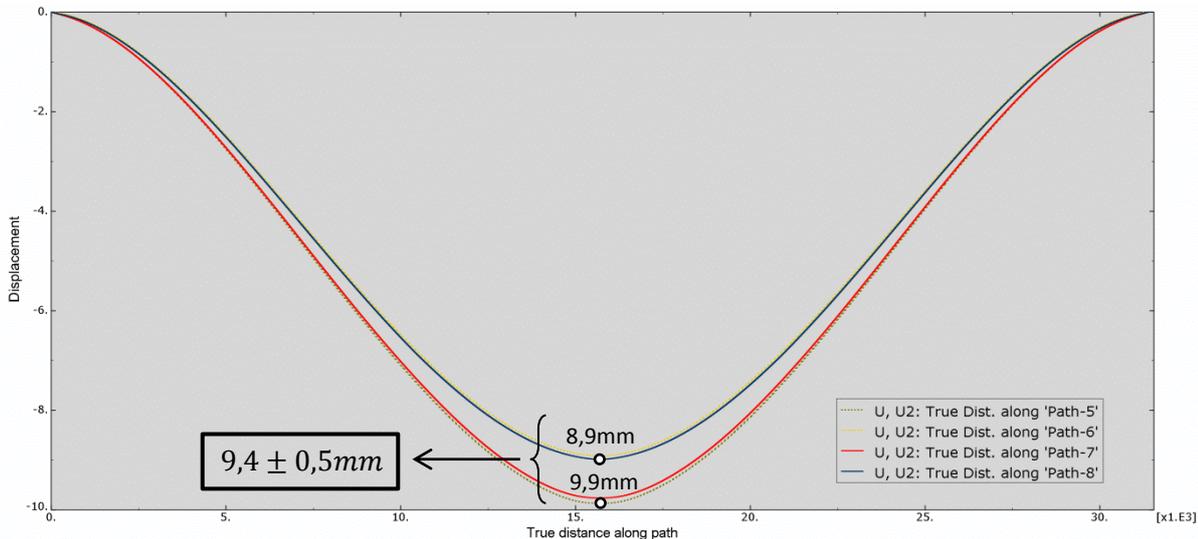


**Abb. 26** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 und Lastfall B.



**Abb. 27** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 (nur Längsträger B) und Lastfall B.

Die gemeinsame Wirkung von globaler Biegung und Torsion ist an den Verformungen gut zu erkennen. Um den reinen Torsionsanteil herauszuarbeiten, sind die Vertikalverformungen in Abb. 28 entlang der Pfade 5 bis 8 aufgetragen. Die Verformungen können so in ihren symmetrischen Anteil (reine Biegung) und in ihren antimetrischen Anteil (reine Torsion) zerlegt werden. Die Stegoberkanten weisen aus Torsion eine maximale Vertikalverformung von  $\pm 0,5$  mm auf. Damit sind die Verformungen im Vergleich zu Lastfall A um rund 67% größer und auch hier deutlich kleiner wie in Modell 1.



**Abb. 28** Vertikalverformungen U2 [mm] für Modell 2 und Lastfall B entlang der Pfade 5 bis 8.

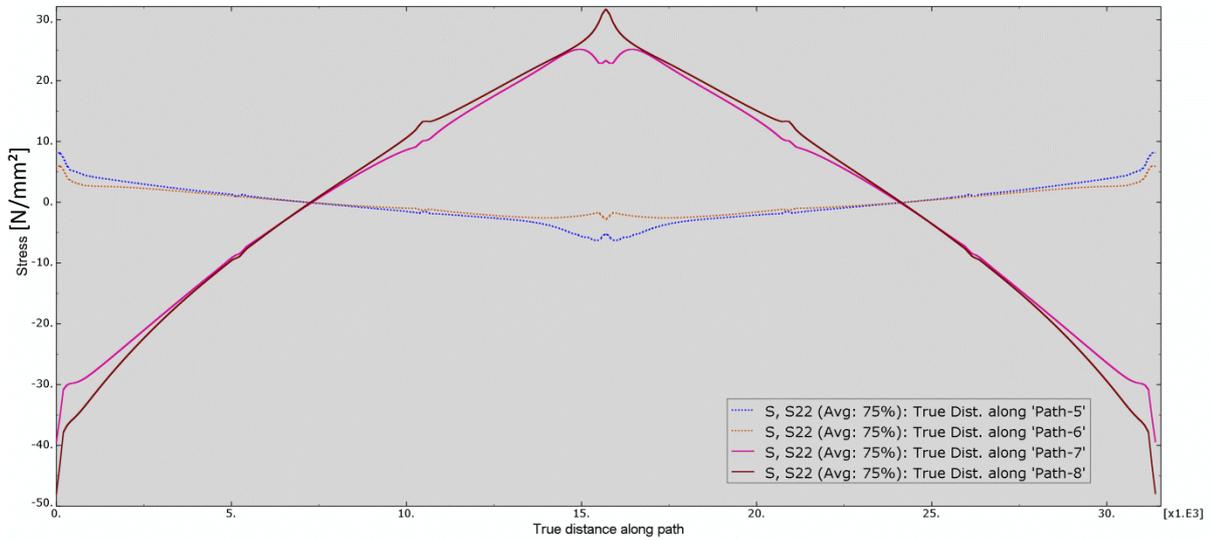
Abb. 29 fasst die Längsnormalspannungen zufolge Lastfall B entlang der Pfade 5 bis 8 zusammen. Aufgrund der Schwerpunktslage sind die Spannungen im Untergurt (Pfade 7 und 8) deutlich höher als im Obergurt (Pfade 5 und 6). Die gemeinsame Wirkung von globaler Biegung und Torsion ist auch anhand der Spannungen deutlich zu erkennen. Um den reinen Torsionsanteil herauszuarbeiten, wurden die Spannungen in ihre symmetrischen und antimetrischen Anteile aufgespalten. Der symmetrische Anteil ist in Abb. 30 dargestellt und beschreibt die Spannungen aus globaler Biegung.

Der verbleibende antimetrische Anteil, der aus der reinen Torsionswirkung stammt, ist in Abb. 31 abgebildet. Dabei ist zu beachten, dass die Pfade 5 und 6 gemeinsam als „oben\_antim“ ausgewertet wurden, da sie sich nur durch ihr Vorzeichen unterscheiden, dieses aber für die gegenständlichen Untersuchungen ohne Bedeutung ist. Ebenso wurden die Pfade 7 und 8 gemeinsam als „unten\_antim“ ausgewertet.

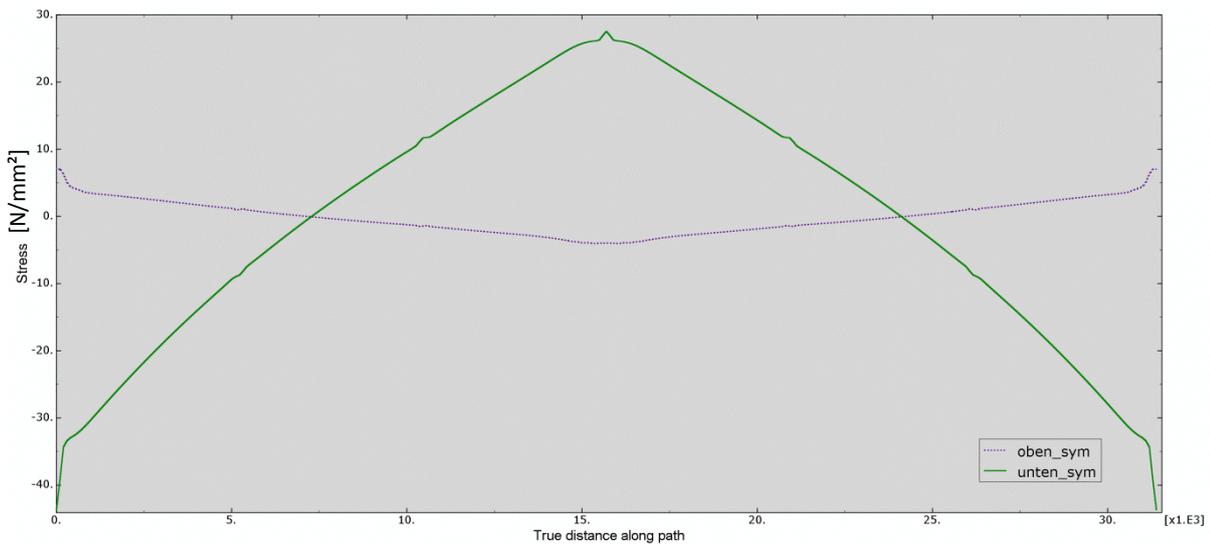
Die Spannungsspitzen für die Endquerschnitte und die Querschnitte mit Querscheiben, insbesondere in Feldmitte (Mittelquerschnitt), sind deutlich zu erkennen. An den übrigen vier innenliegenden Quersteifen sind hier im Vergleich zu Modell 1 deutlich geringere Spannungsspitzen auszumachen. Die lastverteilende Wirkung der Betonplatte ist im Bereich der Doppelachse gut zu erkennen.

Die maximalen Längsnormalspannungen für Lastfall B zufolge Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung liegen mit etwa  $4,3 \text{ N/mm}^2$  niedriger als jene für Modell 1 (dort  $7,5 \text{ N/mm}^2$ ). Damit sind die Spannungen im Vergleich zu Lastfall A (Modell 2) um rund 43% größer.

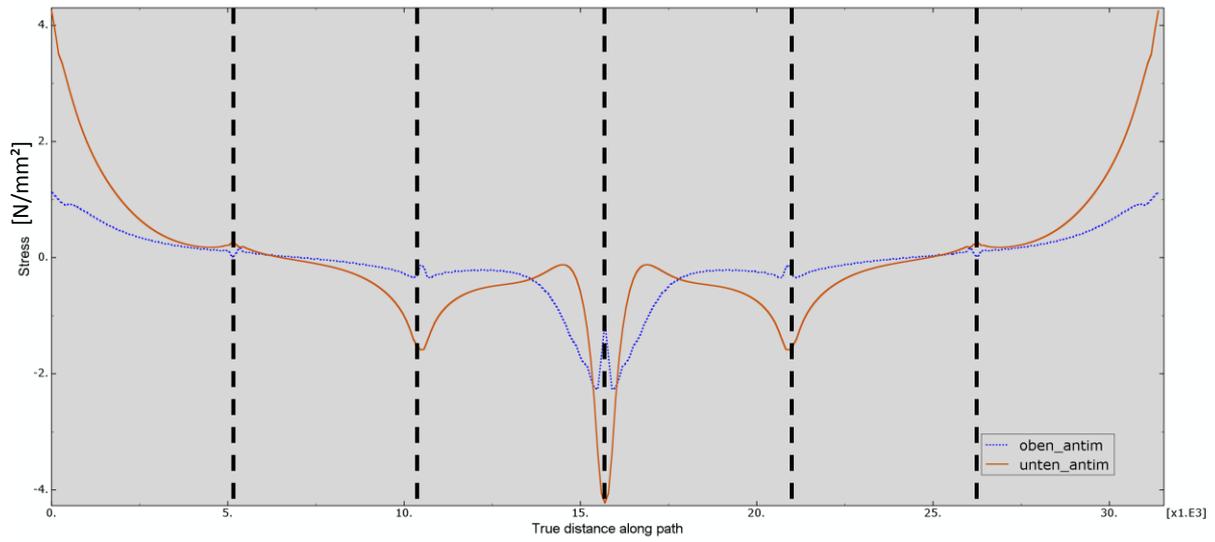
Zusammenfassend kann für das Modell 2 gesagt werden, dass die aus Torsion maximal zusätzlich auftretenden (lokal begrenzten) Längsnormalspannungen nur 4,3 N/mm<sup>2</sup> betragen. Für die ULS-Kombination ist dieser Wert wieder um  $\gamma_f = 1,35$  zu erhöhen.



**Abb. 29** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall B, symmetrischer + antisymmetrischer Anteil.



**Abb. 30** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall B, symmetrischer Anteil (reine Biegung).



**Abb. 31** Längsnormalspannungen [N/mm<sup>2</sup>] für Modell 2 und Lastfall B, antimetrischer Anteil (reine Torsion).

## 4. Zusammenfassung – Einfluss von Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung an den stählernen Hauptträgern

Die Finite-Elemente-Berechnungen im Rahmen dieses Berichts wurden durchgeführt, um die aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung zusätzlich auftretenden Längsnormalspannungen abschätzen zu können. Dabei sind die Auswirkungen aus ständiger Last vernachlässigbar, sodass nur die vertikalen Verkehrslasten (LM 1 nach EN 1991-2) erfasst werden müssen. Dafür wurden zwei unterschiedliche Modelle des längsten Brückenfeldes 05-06 ( $L = 32,59\text{m} - 1,20\text{m} = 31,39\text{m}$ ) entwickelt und mit jeweils zwei hinsichtlich Torsion repräsentativen Lastfällen berechnet. Die nachfolgende Tabelle 1 fasst die gewonnenen Ergebnisse zusammen.

**Tabelle 1** Zusammenfassung der Ergebnisse der FE-Berechnungen.

	Modell 1 (konservativ)		Modell 2	
	Lastfall A	Lastfall B	Lastfall A	Lastfall B
Maximale Vertikalverformungen – in Stegebene – aus Torsion [mm] <sup>1)</sup>	± 0,8	± 1,2	± 0,3	± 0,5
Maximale Längsnormalspannungen aus Torsion [N/mm <sup>2</sup> ] - $\gamma_f = 1,0$	5,0	7,5	3,0	4,3

1) Entspricht einer Verdrehung des Mittelquerschnitts

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich bei Modell 1 - des isolierten Längsträgers B - um ein eher konservatives Modell handelt (insbesondere hinsichtlich der Torsionsbelastung), kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die zusätzlichen Längsnormalspannungen aus Wölbkrafttorsion und Querschnittsverformung maximal rund  $5,0 \text{ N/mm}^2$  betragen (charakteristischer Wert aus Verkehr).

Somit kann dieser Effekt in den ULS-Nachweisen (Berechnung des Gesamttragwerkes ohne die Erfassung von Wölbkrafttorsion bzw. Querschnittsverformung – nur  $\tau$  infolge St. Venant'scher Torsion erfasst) durch eine **pauschale Erhöhung** der Längsnormalspannungen  $\sigma_x$  in allen Hauptträgerquerschnitten (ungünstige ULS-Kombination) **um  $5,0 * 1,35 \approx 7,0 \text{ N/mm}^2$**  berücksichtigt werden.