



# **Lastmodelle für den Ermüdungsnachweis von orthotropen Fahrbahnplatten bei Straßenbrücken**

Diplomarbeit

Vorgelegt zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Diplomingenieurs der Studienrichtung Bauingenieurwesen

Von

Novak Friedrich

Verfasst am

Institut für Stahlbau

Technische Universität Graz

Betreuer:

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

Mitbetreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Kettler Markus

Graz, Januar 2013



---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

## **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 content from the used sources.

Graz, am .....

.....  
(Unterschrift)



---

## Kurzfassung

In Österreich wurden in den 1970er Jahren viele Straßenbrücken mit einer orthotropen Fahrbahnplatte aus Stahl und einem Belag aus Asphalt errichtet. Zum Zeitpunkt der Planung und der statischen Berechnung dieser Stahlbrückentragwerke wurden hauptsächlich Bemessungen im Hinblick auf die Tragsicherheit durchgeführt. Dem Phänomen der Ermüdung des Brückendecks durch häufig wiederkehrende Beanspruchungsspiele wurde nahezu keine Aufmerksamkeit gewidmet. Deshalb beschäftigt sich diese Diplomarbeit mit der Ermüdungsberechnung von Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte.

Der Eurocode 1 – Teil 2 erlaubt eine Berücksichtigung des Effektes der lastverteilenden Wirkung des Belages unter der lokalen Belastung eines Fahrzeugrades (Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  über die Dicke des Belages). Da dieser Effekt große Auswirkungen auf die Ergebnisse der Ermüdungsberechnung hat wurde dieser Sachverhalt genauer untersucht.

Zu diesem Zwecke wurden Berechnungen an mehreren Finite-Element Modellen mit dem Softwarepaket Abaqus durchgeführt. Dies stellt den Hauptbestandteil dieser Arbeit dar. Diese FE-Modelle bilden einen Ausschnitt des Fahrbahndecks einer Straßenbrücke mit bzw. ohne Asphalt Belag ab. Es wurden im Rahmen dieser Arbeit noch weitere lokale FE-Modelle erstellt, an denen eine Diskretisierungsstudie durchgeführt wurde, um ein optimiertes FE-Netz zu erhalten. Zusammenfassend konnte der günstige Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  bestätigt werden. Abschließend wurde eine Ermüdungsschädigungsanalyse der einzelnen Fahrzeugtypen des Lastmodells LM4 nach Eurocode an einigen maßgebenden Kerbdetailpunkten des Fahrbahndecks durchgeführt.

## Abstract

During the 1970 many bridges were constructed in Austria with an orthotropic steel deck and an asphalt road surface. At that time, the calculations were carried out mainly based on the ultimate limit states. The effects due to the fatigue phenomena, through repeated loading at the deck plate level, were almost totally neglected. Therefore this Master thesis will investigate the effect of the fatigue calculations on the road bridges' orthotropic steel decks.

The Eurocode 1, part 2, states that the effects of local loads propagate through the height of the road surface at an angle of  $45^\circ$ . As this angle of propagation has a very large beneficial influence on the fatigue calculations, a more exact analysis has been carried out in this thesis.

The main part of this thesis is concerned with the results from finite element calculations. These were obtained using the software Abaqus. These FE-models represent a section of the bridge deck of a road bridge with and without asphalt layer. More local FE-models were produced to get an optimised finite element mesh for the final calculations. In summary the beneficial effect of the asphalt, using a load distribution angle of  $45^\circ$ , was confirmed. Lastly, a fatigue analysis was carried out on the bridge deck at the critical geometrical stress points, sharing the fatigue damage parts of the individual truck types of fatigue load model 4 of the Eurocode.

---



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung und Überblick der Arbeit.....	1
1.2	Lastmodell 4 für Ermüdungsnachweise nach EN 1991-2.....	3
1.3	Hauptproblemstellungen der Arbeit.....	5
1.4	Motivation und Ziele der Arbeit .....	7
1.5	Umfang der Arbeit .....	9
<b>2</b>	<b>Analyse mittels FE-Modellen.....</b>	<b>10</b>
2.1	Allgemein.....	10
2.2	Detailbereiche .....	10
2.3	Belastung – Achslasten B und C nach LM4.....	13
2.4	FE-Modelle.....	15
2.5	Schädigungsanalyse.....	20
<b>3</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>21</b>
3.1	Maßgebende Normalspannungen am Fahrbahndeck aus Achslastüberfahrt: Vergleich Modell A – Modell B – Lokale Modelle.....	21
3.1.1	Überfahrt der Achse B.....	21
3.1.1.1	Ergebnisse für Detail D1 bei LR-2 und D1* bei LR-8.....	21
3.1.1.2	Ergebnis für Detail D2 bei LR-2 und D2* bei LR-8.....	22
3.1.2	Überfahrt der Achse C .....	23
3.1.2.1	Ergebnisse für Detail D1 bei LR-2 und D1* bei LR-8.....	23
3.1.2.2	Ergebnisse für Detail D2 bei LR-2 und D2* bei LR-8.....	23
3.2	Ergebnisse der Schädigungsanalyse .....	24
<b>A 1.</b>	<b>Modell A (ohne Belag).....</b>	<b>1-1</b>
A 1.1.	Allgemeines.....	1-1
A 1.2.	Modellbildung .....	1-2
A 1.2.1.	Allgemein.....	1-2
A 1.2.2.	Bestandteile des Fahrbahndecks .....	1-4
A 1.2.2.1.	Deckblech .....	1-4
A 1.2.2.2.	Hauptträger.....	1-4
A 1.2.2.3.	Querrippen.....	1-5
A 1.2.2.4.	Längsrippen.....	1-6
A 1.2.3.	Diskretisierung des FE-Modells im Detail.....	1-7
A 1.2.3.1.	Deckblech .....	1-7
A 1.2.3.2.	Hauptträger.....	1-8
A 1.2.3.3.	Querrippen.....	1-8
A 1.2.3.4.	Längsrippen.....	1-9
A 1.3.	Untersuchte Detailbereiche.....	1-10
A 1.3.1.	Detail D1 .....	1-10
A 1.3.2.	Detail D1* .....	1-13
A 1.3.3.	Detail D2.....	1-14
A 1.3.4.	Detail D2* .....	1-16

<b>A 1.4.</b>	<b>Belastung zur Ermittlung der Einflusslinien .....</b>	<b>1-17</b>
A 1.4.1.	Allgemein .....	1-17
A 1.4.2.	Laststellungen für Detail D1 .....	1-22
A 1.4.2.1.	Achse B .....	1-22
A 1.4.2.2.	Achse C .....	1-24
A 1.4.3.	Laststellungen für Detail D2 .....	1-26
A 1.4.3.1.	Achse B .....	1-26
A 1.4.3.2.	Achse C .....	1-28
<b>A 1.5.</b>	<b>Ermittlung der maßgebenden Laststellungen in Brückenquerrichtung .....</b>	<b>1-30</b>
A 1.5.1.	Einflusslinien für Achse B .....	1-30
A 1.5.1.1.	Detail D1 bei LR-2 .....	1-30
A 1.5.1.2.	Detail D1* bei LR-8 .....	1-31
A 1.5.1.3.	Detail D2 bei LR-2 .....	1-32
A 1.5.1.4.	Detail D2* bei LR-8 .....	1-33
A 1.5.2.	Einflusslinien für Achse C .....	1-34
A 1.5.2.1.	Detail D1 bei LR-2 .....	1-34
A 1.5.2.2.	Detail D1* bei LR-8 .....	1-35
A 1.5.2.3.	Detail D2 bei LR-2 .....	1-36
A 1.5.2.4.	Detail D2* bei LR-8 .....	1-37
A 1.5.3.	Maßgebende Laststellungen .....	1-38
<b>A 1.6.</b>	<b>Optimierung Modell A (ohne Belag) .....</b>	<b>1-39</b>
A 1.6.1.	Allgemeines .....	1-39
A 1.6.2.	Optimierung FE-Netz für das Deckblech .....	1-39
A 1.6.3.	Optimierung FE-Netz für die Längsrippen .....	1-41
<b>A 1.7.</b>	<b>Ergebnisse für Achse B .....</b>	<b>1-42</b>
A 1.7.1.	Detail D1 .....	1-42
A 1.7.1.1.	Achse B( <b><i>b</i>0</b> ): .....	1-44
A 1.7.1.2.	Achse B( <b><i>b</i></b> ): .....	1-44
A 1.7.2.	Detail D1* .....	1-45
A 1.7.2.1.	Achse B( <b><i>b</i>0</b> ): .....	1-45
A 1.7.2.2.	Achse B( <b><i>b</i></b> ): .....	1-46
A 1.7.3.	Detail D2 .....	1-47
A 1.7.3.1.	Achse B( <b><i>b</i>0</b> ): .....	1-48
A 1.7.3.2.	Achse B( <b><i>b</i></b> ): .....	1-48
A 1.7.4.	Detail D2* .....	1-49
A 1.7.4.1.	Achse B( <b><i>b</i>0</b> ): .....	1-49
A 1.7.4.2.	Achse B( <b><i>b</i></b> ): .....	1-49
<b>A 1.8.</b>	<b>Ergebnisse Achse C .....</b>	<b>1-50</b>
A 1.8.1.	Detail D1 .....	1-50
A 1.8.1.1.	Achse C( <b><i>b</i>0</b> ) .....	1-51
A 1.8.1.2.	Achse C( <b><i>b</i></b> ) .....	1-51
A 1.8.2.	Detail D1* .....	1-52
A 1.8.2.1.	Achse C( <b><i>b</i>0</b> ) .....	1-52
A 1.8.2.2.	Achse C( <b><i>b</i></b> ) .....	1-52
A 1.8.3.	Detail D2 .....	1-53
A 1.8.3.1.	Achse C( <b><i>b</i>0</b> ) .....	1-53
A 1.8.3.2.	Achse C( <b><i>b</i></b> ) .....	1-53
A 1.8.4.	Detail D2* .....	1-54
A 1.8.4.1.	Achse C( <b><i>b</i>0</b> ) .....	1-54
A 1.8.4.2.	Achse C( <b><i>b</i></b> ) .....	1-54
<b>A 1.9.</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse - Modell A .....</b>	<b>1-55</b>
<b>A 2.</b>	<b>Analyse an lokalen Modellen .....</b>	<b>2-1</b>
<b>A 2.1.</b>	<b>Allgemeines .....</b>	<b>2-1</b>

<b>A 2.2.</b>	<b>Verbesserte lokale FE-Modelle .....</b>	<b>2-3</b>
A 2.2.1.	Lokales Modell L1 – Belag und starres Deckblech .....	2-3
A 2.2.1.1.	Beschreibung des FE-Modells .....	2-3
A 2.2.1.2.	Belastung .....	2-4
A 2.2.2.	Lokales Modell L2 – Fahrbahndeck ohne Belag .....	2-4
A 2.2.2.1.	Beschreibung des FE-Modells .....	2-4
A 2.2.2.2.	Belastung .....	2-5
A 2.2.3.	Lokales Modell L2m – Fahrbahndeck mit Belag/starrer Verbund .....	2-6
A 2.2.3.1.	Beschreibung des FE-Modells .....	2-6
A 2.2.3.2.	Belastung .....	2-7
A 2.2.4.	Lokales Modell L3m – Fahrbahndeck mit Belag/ohne Verbund .....	2-8
A 2.2.4.1.	Beschreibung des FE-Modells .....	2-8
A 2.2.4.2.	Belastung .....	2-8
<b>A 2.3.</b>	<b>Diskretisierungsstudie.....</b>	<b>2-9</b>
A 2.3.1.	Lokales Modell L3m: Druckverteilung im Schnitt A-A .....	2-9
A 2.3.2.	Lokales Modell L3m: Druckverteilung vertikal im Schnitt B-B .....	2-10
A 2.3.3.	Lokales Modell L3m: Quernormalspannungen an Deckblech UK .....	2-11
A 2.3.3.1.	Netzverfeinerung in Dickenrichtung .....	2-11
A 2.3.3.2.	Netzverfeinerung in der Ebene des Deckblechs .....	2-12
<b>A 2.4.</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>2-15</b>
A 2.4.1.	Vertikale Druckverteilung an Belagsunterseite .....	2-15
A 2.4.1.1.	Sommer (40°C) .....	2-15
A 2.4.1.2.	Winter (0°C) .....	2-16
A 2.4.1.3.	Aussage zur Vereinfachung einer Lastausbreitung .....	2-18
A 2.4.1.4.	Quernormalspannungen an der Deckblechunterseite .....	2-19
<b>A 3.</b>	<b>Analyse Modell B – Fahrbahndeck mit Belag .....</b>	<b>3-1</b>
<b>A 3.1.</b>	<b>Allgemeines.....</b>	<b>3-1</b>
A 3.1.1.	Modell B-1; mit Belag/voller Verbund .....	3-2
A 3.1.2.	Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund .....	3-3
<b>A 3.2.</b>	<b>Belastung .....</b>	<b>3-4</b>
A 3.2.1.	Achse B( <i>b</i> 0) .....	3-4
A 3.2.2.	Achse C( <i>b</i> 0) .....	3-5
<b>A 3.3.</b>	<b>Detailbereiche .....</b>	<b>3-5</b>
<b>A 3.4.</b>	<b>Ergebnisse infolge Belastung Achse B (mit Belag).....</b>	<b>3-6</b>
A 3.4.1.	Modell B-1; mit Belag/voller Verbund .....	3-6
A 3.4.1.1.	Detail D1 .....	3-6
A 3.4.1.2.	Detail D1* .....	3-7
A 3.4.1.3.	Detail D2 .....	3-7
A 3.4.1.4.	Detail D2* .....	3-8
A 3.4.2.	Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund .....	3-8
A 3.4.2.1.	Detail D1 .....	3-8
A 3.4.2.2.	Detail D1* .....	3-9
A 3.4.2.3.	Detail D2 .....	3-9
A 3.4.2.4.	Detail D2* .....	3-10
<b>A 3.5.</b>	<b>Ergebnisse infolge Belastung Achse C .....</b>	<b>3-10</b>
A 3.5.1.	Modell B-1; mit Belag/voller Verbund .....	3-11
A 3.5.1.1.	Detail D1 .....	3-11
A 3.5.1.2.	Detail D1* .....	3-11
A 3.5.1.3.	Detail D2 .....	3-12
A 3.5.1.4.	Detail D2* .....	3-12
A 3.5.2.	Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund .....	3-13
A 3.5.2.1.	Detail D1 .....	3-13

A 3.5.2.2.	Detail D1* .....	3-13
A 3.5.2.3.	Detail D2.....	3-14
A 3.5.2.4.	Detail D2* .....	3-14
<b>A 3.6.</b>	<b>Zusammenfassung der Ergebnisse.....</b>	<b>3-15</b>
A 3.6.1.	Modell B-1; mit Belag/voller Verbund .....	3-15
A 3.6.2.	Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund.....	3-15
<b>A 4.</b>	<b>Ergebnisvergleich: Modell A – Modell B – lokale Modelle.....</b>	<b>4-1</b>
<b>A 4.1.</b>	<b>Belastung infolge Achse B .....</b>	<b>4-2</b>
A 4.1.1.	Detail D1 bzw. D1* - Deckblechbiegung .....	4-2
A 4.1.2.	Detail D2 bzw. D2* - Anschluss Längsrippe/Querrippe .....	4-2
<b>A 4.2.</b>	<b>Belastung infolge Achse C .....</b>	<b>4-3</b>
A 4.2.1.	Detail D1 bzw. D1* - Deckblechbiegung .....	4-3
A 4.2.2.	Detail D2 bzw. D2* - Anschluss Längsrippe/Querrippe .....	4-3
<b>A 5.</b>	<b>Schädigungsanalyse einiger Kerbdetails .....</b>	<b>5-1</b>
<b>A 5.1.</b>	<b>Allgemeines .....</b>	<b>5-1</b>
<b>A 5.2.</b>	<b>Ermittlung der Schädigungen für Detail D1.....</b>	<b>5-2</b>
A 5.2.1.	Beschreibung Detail D1 .....	5-2
A 5.2.2.	Einflusslinien der Einzelachsen .....	5-5
A 5.2.2.1.	Achse A .....	5-5
A 5.2.2.2.	Achse B .....	5-6
A 5.2.2.3.	Achse C .....	5-6
A 5.2.3.	Spannungsverläufe bei Überfahrt der Fahrzeugtypen T1 bis T5 .....	5-7
A 5.2.3.1.	Typ T1.....	5-7
A 5.2.3.2.	Typ T2.....	5-7
A 5.2.3.3.	Typ T3.....	5-8
A 5.2.3.4.	Typ T4.....	5-8
A 5.2.3.5.	Typ T5.....	5-8
A 5.2.4.	Lastkollektiv .....	5-9
<b>A 5.3.</b>	<b>Ermittlung der Schädigung für Detail D2.....</b>	<b>5-10</b>
A 5.3.1.	Beschreibung Detail D2 .....	5-10
A 5.3.2.	Einflusslinien der Einzelachsen .....	5-11
A 5.3.2.1.	Achse A .....	5-12
A 5.3.2.2.	Achse B .....	5-12
A 5.3.2.3.	Achse C .....	5-12
A 5.3.3.	Spannungsverläufe bei Überfahrt der Fahrzeugtypen T1 bis T5 .....	5-13
A 5.3.3.1.	Typ T1.....	5-13
A 5.3.3.2.	Typ T2.....	5-13
A 5.3.3.3.	Typ T3.....	5-14
A 5.3.3.4.	Typ T4.....	5-14
A 5.3.3.5.	Typ T5.....	5-14
A 5.3.4.	Lastkollektiv .....	5-15
<b>A 5.4.</b>	<b>Untersuchte Kerbdetails an der Praterbrücke (Dehnungsmessungen).....</b>	<b>5-16</b>
A 5.4.1.	Allgemeines .....	5-16
A 5.4.2.	Punkt P1.....	5-16
A 5.4.3.	Punkt P2.....	5-17
A 5.4.4.	Punkt P3a .....	5-17
A 5.4.5.	Punkt P3b .....	5-18
A 5.4.6.	Punkt P5.....	5-19
A 5.4.7.	Punkt P7.....	5-20
<b>A 5.5.</b>	<b>Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen .....</b>	<b>5-22</b>
A 5.5.1.	Punkte P1 bis P7 .....	5-22

A 5.5.1. Punkte P1 bis P7, D1 und D2.....	5-23
<b>A 6. Spannungsverläufe &amp; Einflusslinien für Modell A (ohne Belag).....</b>	<b>6-1</b>
<b>A 6.1. Detail D1 .....</b>	<b>6-1</b>
A 6.1.1. Spannungsverläufe entlang des Pfades 1.....	6-1
A 6.1.1.1. Achse B( <b>b</b> 0): .....	6-1
A 6.1.1.2. Achse B( <b>b</b> ).....	6-8
A 6.1.1.3. Achse C( <b>b</b> 0): .....	6-9
A 6.1.1.4. Achse C( <b>b</b> ).....	6-16
A 6.1.2. Einflusslinien .....	6-17
A 6.1.2.1. Achse B( <b>b</b> 0): .....	6-17
A 6.1.2.2. Achse C( <b>b</b> 0): .....	6-22
<b>A 6.2. Detail D2 .....</b>	<b>6-28</b>
A 6.2.1. Spannungsverläufe entlang des Pfades 2.....	6-28
A 6.2.1.1. Achse B( <b>b</b> 0): .....	6-28
A 6.2.1.2. Achse B( <b>b</b> ).....	6-35
A 6.2.1.3. Achse C( <b>b</b> 0): .....	6-36
A 6.2.1.4. Achse C( <b>b</b> ).....	6-43
A 6.2.2. Einflusslinien .....	6-44
A 6.2.2.1. Achse B( <b>b</b> 0): .....	6-44
A 6.2.2.2. Achse C( <b>b</b> 0): .....	6-49
<b>A 7. Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>7-1</b>
<b>A 8. Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>8-1</b>
<b>A 9. Literaturnachweis .....</b>	<b>9-1</b>



# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Überblick der Arbeit

In den 1970er Jahren wurden in Österreich viele Brückentragwerke mit einer orthotropen Platte als Fahrbahndeck gebaut. Zu dieser Zeit erfolgten jedoch keinerlei Ermüdungsnachweise zum Fahrbahndeck. Bedingt durch die im Laufe der letzten Jahrzehnte stetig steigende Schwerverkehrsbeanspruchung sowie der Feststellung von Rissen und Schäden in einigen Ländern (insbesondere Niederlande[5]) gibt dies Anlass Untersuchungen der Lastmodelle für den Ermüdungsnachweis anzustellen. Zu dem Zeitpunkt der Planung und statischen Berechnung dieser Stahlbrückentragwerke wurde das Hauptaugenmerk auf die Tragsicherheit gelegt und den Erscheinungen der Ermüdung des Brückendecks infolge der langjährigen Nutzung dieser Brücken wurde nahezu keine Aufmerksamkeit gegeben. Man muss beachten, dass vor 40 Jahren der Verkehr auf Österreichs Autobahnen bei weitem nicht diese Ausmaße hatte, wie sie zum heutigen Zeitpunkt vorliegen und es war zur damaligen Zeit schwierig vorauszusehen, dass der Schwerverkehr solch einen extremen Anstieg erfahren würde.

An und für sich hat eine orthotrope Platte aus Stahl immense Umlagerungsmöglichkeiten bei statischer Beanspruchung und hat große Tragreserven. Dennoch weist diese Konstruktion unter Umständen Schwachstellen auf. So sind beispielsweise die Schweißnähte des Fahrbahndecks wesentliche Kerbstellen an denen es durch über Jahre lang andauernde Ermüdungsbeanspruchungen (Spannungsspiele) infolge der Überfahrten des Schwerlastverkehrs zu Rissen kommen kann, welche sich fortpflanzen und es zu einem lokalen Versagen an diesen Stellen kommt. Dies führt auch zu großen, lokalen Verformungen des Fahrbahndecks, welche der Belag nicht mitmachen kann und dies führt zu Belagsrissen.

Bei der Ermüdungsbeanspruchung des Fahrbahndecks kann man einen großen Nutzen aus einer lastverteilenden Wirkung des Belages ziehen, da unter Berücksichtigung dieses Effektes der Lastausbreitung die Beanspruchungen deutlich geringer werden (Anm.: in der statischen Berechnung bleibt der Fahrbahnbelag selbst unberücksichtigt). Wenn eine Straßenbrücke zum Beispiel einen Belag mit einer Dicke von 70 [mm] hat und man den laut EN 1991-2 [1] erlaubten Lastausbreitungswinkel von 45° ansetzt, so verbreitert sich die Belastungsfläche des Rades eines Fahrzeuges um eben diese Dicke des Belages an jeder Kante der Fläche, also in diesem Beispiel um allseitig 70 [mm]. Wie in den später durchgeführten Berechnungen zu sehen ist, werden dadurch die Spannungen an den maßgebenden Kerbstellen der Konstruktion doch deutlich günstig beeinflusst.

In dieser Arbeit wurde daher speziell die Wirkung des Belages bei Straßenbrücken mit orthotropen Platten hinsichtlich der Lastausbreitung und der damit verbundenen günstigen Wirkung auf die Berechnung der Ermüdung untersucht.

Im Speziellen wurde die Praterbrücke in Wien als Untersuchungsobjekt gewählt, da Mitarbeiter des Institutes für Stahlbau bereits an dieser Konstruktion umfangreiche Berechnungen durchführten [3] und die Konstruktion der Brücke ein repräsentatives Beispiel der in den 1970er Jahren erbauten Straßenbrücken mit orthotropen Platten

als Fahrbahndeck darstellt, wobei zu vermerken ist, dass das Tragwerk dieser Brücke zu späteren Zeitpunkten bereits einigen Sanierungs- und Erweiterungsmaßnahmen unterworfen wurde.

Mithilfe von einigen FE-Modellen sollten Berechnungen mit dem Softwarepaket Abaqus [7] durchgeführt werden, welche eine Überfahrt verschiedenster Lastkraftwagen abbilden sollen, wobei hierfür die genormten Radaufstandsflächen und Fahrzeugtypen, so wie sie im Eurocode 1 - Teil 2 [1] abgebildet sind (siehe Abbildung 1 und Abbildung 2), verwendet wurden.

Dies geschah mit einem von Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Andreas Taras erstellten FE-Modell der Praterbrücke [4], welches dann zweckmäßig optimiert und erweitert wurde. Es wurden ergänzend noch weitere lokale Modelle für das Fahrbahndeck erstellt, die dieselbe Geometrie aufweisen, sich jedoch auf Grenzabmessungen von 2 x 2 [m] beschränken. Mit deren Hilfe wurde eine umfangreiche Analyse gestartet, mit dem Ziel eine optimale Diskretisierung zu finden, die dann bei den größeren Modellen angewandt wurde, um deren Rechenzeit in einem überschaubaren Rahmen zu halten.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei der wesentlichen Kerbstellen einer orthotropen Platte untersucht (Längsrippenanschluss zum Deckblech, Anschluss der Längsrippe an die Querrippe) und durch eine Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den verschiedenen Modellen wurde dann eine Beurteilung der Wirkung des Belages getroffen.

Abschließend wurden dann diese zwei Detailpunkte, mit den Belastungsannahmen zum Schwerverkehr für den Ermüdungsnachweis aus den durchgeführten Berechnungen an der Praterbrücke, einer Schädigungsanalyse unterzogen und daraus ein Lastkollektiv erstellt. Diese Ergebnisse wurden dann mit den bereits vorhandenen Daten der Ermüdungsberechnung der Praterbrücke [3] verglichen, um eventuell Vereinfachungen treffen zu können bezüglich der Nachweisführung der Ermüdung, da diese einen sehr großen Aufwand mit sich bringt. Immerhin werden im Eurocode 1 – Teil 2 [1] fünf verschiedene Fahrzeugtypen mit unterschiedlicher Achsanordnung und zugehöriger Achslast definiert (Lastmodell), wobei zusätzlich zwischen drei verschiedenen Achsarten unterschieden wird (unterschiedliche Abmessungen der Radaufstandsflächen – siehe Abbildung 2, welche wesentlichen Einfluss auf die einwirkenden Spannungen an den Kerbdetails haben). So wäre es eine Vereinfachung, könnte man einen oder gar zwei Fahrzeugtypen von der Liste streichen, oder eventuell eine einheitliche Achsart definieren, um den Umfang der Nachweisführung zu reduzieren, da die Lastannahmen einer Straßenbrücke ohnehin mit sehr großen Unsicherheiten verbunden sind.

## 1.2 Lastmodell 4 für Ermüdungsnachweise nach EN 1991-2

Für den Ermüdungsnachweis des stählernen Fahrbahndecks ist das einfache Lastmodell LM3 (4 Achsen á 120 [kN]) nur bedingt anwendbar. Insbesondere für die Beurteilung von Bestandsbrücken aus den 1970er Jahren – wie in dieser Arbeit zugrunde gelegt – ist das Lastmodell LM4 als Grundlage deutlich besser geeignet. Dies auch deshalb, da darauf aufbauend auch örtlich gemessene Schwerverkehrsdaten mit einbezogen werden können (siehe [3]).

In diesem Abschnitt wird das nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5 [1], zulässige Lastmodell 4 für die Ermüdungsberechnung vorgestellt, welches aus einer Gruppe von Standardlastkraftwagen besteht (5 Fahrzeugtypen) und welches die für die jeweilige Strecke prognostizierte idealisierte Schwerverkehrsbelastung darstellen soll. Die Fahrzeugtypen unterscheiden sich in ihrer Geometrie, Achskonfiguration und zugehöriger fiktiven Achslast (siehe Abbildung 1).

Die Ermüdungsbeanspruchung muss anhand des Spannungsspektrums ermittelt werden, wobei jedes Fahrzeug die Brücke einzeln überfährt und die dadurch entstandenen Spannungswechsel mit der Rainflow- oder der Reservoir Methode auszuzählen sind. Unter Berücksichtigung der Anzahl der Überfahrten der einzelnen Fahrzeugtypen kann dann das Gesamtkollektiv ermittelt werden, dass dann auf ein schadensäquivalentes Einstufenkollektiv umgerechnet wird.

Abbildung 1 zeigt dieses Lastmodell 4 (LM4) (Gruppe der häufigen LKW nach EN 1991-2: Abschnitt 4.6.5 Tabelle 4.7 [1]) mit den fünf Fahrzeugtypen, deren Achskonfiguration und deren zugehöriger fiktiven Achslast.

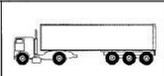
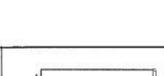
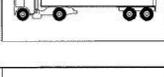
FAHRZEUGTYP			VERKEHRSART			
1	2	3	4	5	6	7
			Große Entfernung	Mittlere Entfernung	Ortsverkehr	
SCHWERFAHRZEUG	Achsabstand (m)	Ersatzachslast (kN)	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Schwerverkehrsanteil	Reifenart
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C
	3,40 6,00 1,80	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C

Abbildung 1: Ermüdungs- LM4 - Gruppe von Ersatzfahrzeugen nach EN 1991-2: 4.6.5 – Tab.4.7

Den Fahrzeugtypen aus Abbildung 1 werden in Spalte 7 fiktive Reifen- bzw. Achsarten zugewiesen, welche sich in der Geometrie der Radaufstandsflächen voneinander unterscheiden. Die Abmessungen der Radaufstandsflächen der insgesamt drei Reifen- bzw. Achsarten (nach EN 1991-2 Abschnitt 4.6.5 – Tabelle 4.8 [1]) werden in Abbildung 2 dargestellt.

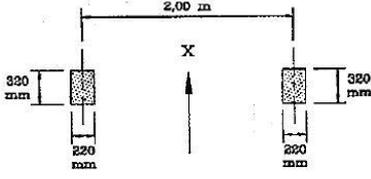
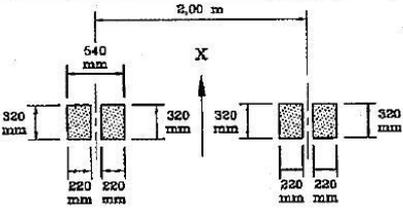
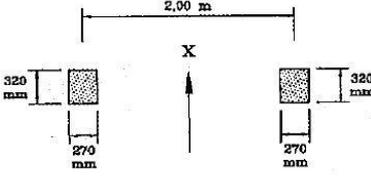
REIFEN/ ACHSART	GEOMETRISCHE ABMESSUNGEN
A	
B	
C	

Abbildung 2: Definition der Achsarten nach EN 1991-2: 4.6.5 – Tab.4.8 [1]

Weiterführend wird der nach EN 1991-2, Abschnitt 4.3.6 (3) [1], zulässige Lastausbreitungswinkel für Straßenbrücken mit orthotroper Platte präsentiert, welcher im Sinne dieser Arbeit auf seine Richtigkeit überprüft werden sollte.

Der Eurocode erlaubt eine Lastverteilung durch den Belag und das Deckblech der Fahrbahnplatte von 45° bis zur Mittellinie des Fahrbahndeckbleches, wie es in Abbildung 3 dargestellt wird. Dies bedeutet, dass die Radlast durch eine Flächenlast mit der Breite  $b$  ersetzt werden darf. Bei der statischen Berechnung des Fahrbahndecks selbst bleibt der Fahrbahnbelag selbst dann jedoch unberücksichtigt.

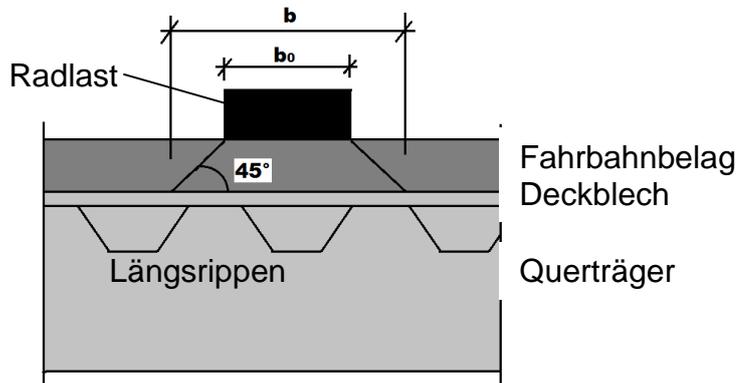


Abbildung 3: Lastausbreitungswinkel für lokale Radlasten nach EN 1991-2: 4.3.6 (3)

### 1.3 Hauptproblemstellungen der Arbeit

Wie schon in Abschnitt 1.2 erwähnt, darf eine günstig wirkende Lastverteilung durch den Belag bei Straßenbrücken in Form eines Ausbreitungswinkels von  $45^\circ$  für die statische Berechnung angesetzt werden. Dies hat zur Folge, dass die laut EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5 [1], vorgegebenen Radaufstandsflächen der Achsarten nach Abbildung 2 an jeder Kante um den Betrag der Belagsdicke vergrößert werden dürfen, wie es in Abbildung 4 exemplarisch für die Achse C, bei einer normierten Achslast von  $F = 100 \text{ [kN]}$  und einer Belagsdicke  $t_{\text{Belag}} = 70 \text{ [mm]}$  dargestellt ist.



Abbildung 4: Achsart C mit lastverteilender Wirkung des Belags für Belagsdicke  $t_{\text{Bel}} = 70 \text{ [mm]}$

Die Flächenlast  $p$  ergibt sich zu:

$$p = \frac{F}{2 \cdot a \cdot b} = \frac{100 \cdot 10^3}{4 \cdot 460 \cdot 410} = 0,27 \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \right]$$

$$a = a_0 + 2 \cdot t_{\text{Belag}} = 320 + 2 \cdot 70 = 460 \text{ [mm]}$$

$$b = b_0 + 2 \cdot t_{\text{Belag}} + 100 = 270 + 2 \cdot 70 = 410 \text{ [mm]}$$

Achslast  $F = 100 \text{ [kN]}$

$a_0$  = Länge der Radaufstandsfläche

$b_0$  = Breite der Radaufstandsfläche

$a$  = Länge der Radaufstandsfläche inklusive Lastverteilung

$b$  = Breite der Radaufstandsfläche inklusive Lastverteilung

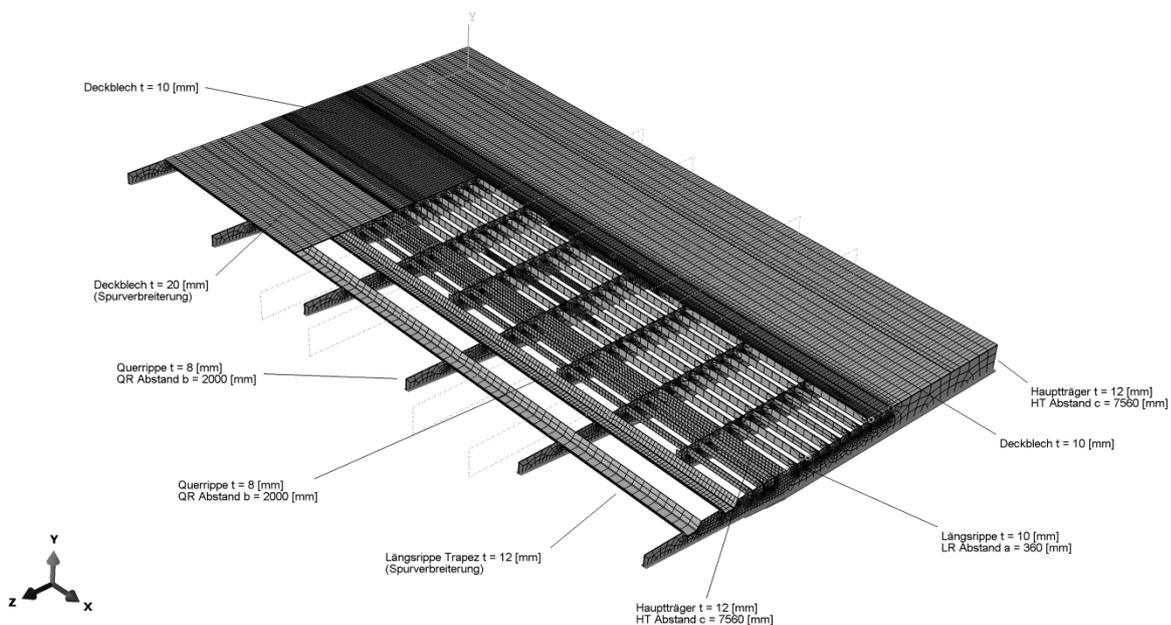
$t_{\text{Belag}}$  = Dicke des Belags

In diesem Zusammenhang wird nun auf eine von de Jong erstellte Dissertation im Jahr 2007 [5] hingewiesen, worin behauptet wird, dass ein Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  keine konservative und hinreichende Annäherung darstellt. Diese Aussage beruht auf den Berechnungen eines für diese Dissertation erstelltes FE-Modells, welches jedoch den wesentlichen Effekt der Nachgiebigkeit der orthotropen Platte nicht berücksichtigt, da das Fahrbahndeckblech an seiner Unterkante in alle Richtungen starr gelagert wurde.

Da zum Beispiel die Ermüdungsbeanspruchung  $\Delta\sigma_e$  für das Anschlussdetail der Längsrippe an das Deckblech sehr stark von der Geometrie der Radaufstandsflächen abhängig ist und sich die dort auftretenden Spannungen im Faktor von 1,7 voneinander unterscheiden (Berechnung mit bzw. ohne Lastverteilung) ist die Kenntnis der realen Lastverteilung des Belages bei einer realen orthotropen Platte sehr wichtig.

Die Überprüfung der zutreffenden Lastverteilung durch den Fahrbahnbelag stellt die Hauptproblemstellung dieser Arbeit dar.

Abbildung 5 zeigt das verwendete FE-Modell für das orthotrope Fahrbahndeck der Praterbrücke mit offenen Längsrippen (Flachsteifen), an dem die Analysen durchgeführt wurden. Es ist zu erkennen, dass es sich hierbei um ein recht umfangreiches Modell handelt, da es eine Länge von 20 [m] der Brücke abbildet und damit die Anzahl der vorhandenen Freiheitsgrade dementsprechend hoch ist (Modell A:  $\text{DOF} \approx 1$  Mio.), sodass es zu Leistungsproblemen des PC kommen kann, vor allem bei der zusätzlichen Modellierung des Fahrbahnbelags mit Volumenelementen (Modell B-2:  $\text{DOF} \approx 1,8$  Mio.).



**Abbildung 5: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag)**

Bevor ein Fahrbahnbelag an dem FE-Modell des reinen stählernen Fahrbahndecks adaptiert werden konnte, musste an einem kleineren lokalen Modell, welches Grenzabmessungen von lediglich 2 x 2 [m] im Grundriss umfasst, eine umfangreiche Studie gestartet werden in der festzustellen war, welche Diskretisierung hinreichend genaue Ergebnisse liefert, bei möglichst geringer Elementanzahl bzw. Anzahl an Freiheitsgraden. Grundsätzlich wurde auch untersucht, welche Verformungsansätze der Elemente die gewünschten Ergebnisse überhaupt annähern können und welche Elementteilung in Dickenrichtung der Volumenelemente notwendig ist, da diese ausschlaggebend für die benötigte Rechenzeit ist.

Im Zusammenhang mit der Modellierung des Belages stellte sich die Suche nach realistischen Materialkennwerten des Belages, wobei im Sinne dieser Arbeit der Belag als Asphalt modelliert werden sollte, zu einem weiteren Problem heraus, da der Elastizitätsmodul des Asphalts extrem von der Temperatur abhängig ist. Beispielsweise hat dieser laut den Daten aus der Literatur „Leitfaden zum DIN Fachbericht 103“ [6] bei einer Temperatur von 0°C einen mittleren E-Modul von 10.000 [N/mm<sup>2</sup>], wogegen bei einer Temperatur von +40°C dieser nur mehr einen E-Modul von 600 [N/mm<sup>2</sup>] aufweist.

## 1.4 Motivation und Ziele der Arbeit

Bei der Ermüdungsbeanspruchung an den maßgebenden Stellen von orthotropen Platten aus der lokalen Plattentragwirkung spielt bereits die Größe der angesetzten Radaufstandsfläche eine große Rolle. Bei der Spannungsberechnung selbst wird der Asphaltbelag zwar vernachlässigt, jedoch sollte dieser eine günstige lastverteilende Wirkung aufweisen, sodass am Deckblech selbst eine gegenüber der tatsächlichen Radaufstandsfläche vergrößerte Fläche – mit reduzierter Flächenlast – ansetzbar sein sollte.

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit war es daher, eine Beurteilung über die lastverteilende Wirkung des Belages an Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte treffen zu können, da der Eurocode [1] zwar eine günstig wirkende Lastverteilung zulässt, jedoch gibt es keine detaillierten Untersuchungen über die Richtigkeit dieser vereinfachten Annahme, die primär für die Nachweise der Tragsicherheit angewendet werden. Es wurde nur eine FE-Analyse in der Dissertation von de Jong [5] gefunden, in welcher der nach Eurocode [1] zulässige Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  als ein zu ungenaues und nicht konservatives Verfahren dargestellt wird. Zusammenfassend sind die Ergebnisse von de Jong im Vergleich zum Eurocode in Abbildung 6 dargestellt.

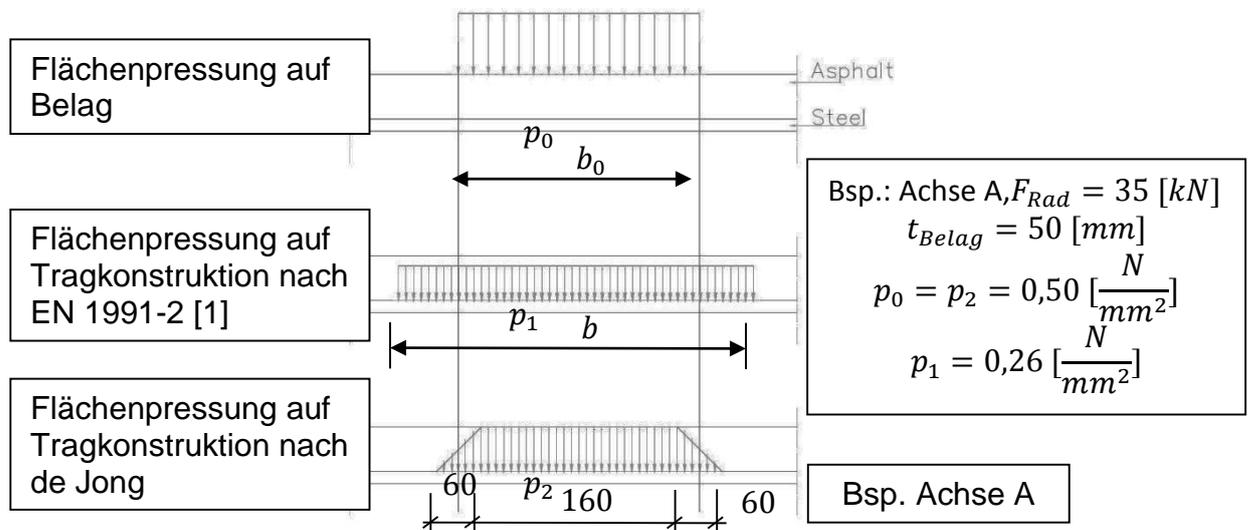


Abbildung 6: Vorschlag für Lastverteilung nach de Jong [5]

Dies gab nun Anlass eine umfangreiche Analyse dieser Wirkung des Belages durchzuführen, da diese Lastausbreitung den Nachweis der Ermüdung deutlich günstig beeinflusst. Diese Analysen waren sehr aufwendig, so dass sie den wesentlichen Anteil der Arbeit darstellen.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit war es, das vorhandene Lastmodell 4 nach EN 1991-2 Abschnitt 4.6.5 [1] eventuell vereinfachen zu können, in dem man Berechnungen der Ermüdungsschädigungen an mehreren maßgebenden Punkten des Fahrbahndecks durchführt und diese dann miteinander vergleicht.

Da das Lastmodell 4 durch eine Unterscheidung in fünf verschiedenen Fahrzeugtypen, mit jeweilig zugehöriger Achslastkonfiguration, einen großen Aufwand bei der praktischen Berechnung darstellt (Simulation der Überfahrt aller 5 Fahrzeugtypen mit anschließender Spannungskollektivermittlung notwendig) wurde der Versuch unternommen Fahrzeugtypen, die keine oder nur geringe Schädigungen an den betrachteten Kerbdetails verursachen, aus der Nachweisführung für die Ermüdung herauszufiltern.

Die Nachweisführung der Ermüdung mit dem Lastmodell 4 nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5 [1] bringt einen sehr großen Aufwand mit sich, daher gab es den Ansporn mittels Untersuchung der durch die Fahrzeugtypen auftretenden Schädigungen an einigen Kerbdetails der Praterbrücke eine reduzierte Form des Nachweises auf Basis des Eurocodes zu finden.

## 1.5 Umfang der Arbeit

Um die in Abschnitt 1.4 definierten Ziele der Arbeit ermöglichen zu können, waren mehrere Schritte notwendig. So war es erforderlich, mehrere FE-Modelle zu entwickeln, diese unter einer maßgebenden Laststellung mit einer Einheitsachslast zu beanspruchen und die daraus resultierenden Ergebnisse – in Form der maßgebenden Spannungen - miteinander zu vergleichen.

Es wurden zu diesem Zwecke insgesamt drei FE-Modelle, die einen größeren Teilausschnitt eines orthotropen Fahrbahndecks abbilden, generiert:

- Modell A (ohne Belag),
- Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) und
- Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund),

wobei die Modelle B-1 und B-2 erweiterte Versionen des Modells A sind.

Jedoch mussten noch einige Zwischenschritte gemacht werden, bevor das Modell A erweitert werden konnte, da es noch Unsicherheiten über die Qualität der errechneten Spannungen in den maßgebenden Detailpunkten gab.

Um diese Unschärfe bereinigen zu können wurden weitere Modelle entwickelt, die nur einen kleineren Fahrbahnausschnitt abdecken (etwa 2,0 x 2,0 m):

- Lokales Modell L1
- Lokales Modell L2 (ohne Belag)
- Lokales Modell L2m (mit Belag, voller Verbund)
- Lokales Modell L3m (mit Belag, ohne Verbund)

Mithilfe einer Diskretisierungsstudie konnte ein auf die zu erwartenden Ergebnisse optimiertes FE-Netz generiert werden, dass bei den Modellen A, B-1 und B-2 anschließend Anwendung fand.

## 2 Analyse mittels FE-Modellen

### 2.1 Allgemein

Um die in Abschnitt 1.4 definierten Ziele erarbeiten zu können, wurden einige FE-Modelle erstellt, wie sie in Abschnitt 1.5 bereits kurz vorgestellt wurden. Im folgenden Abschnitt wird ein Überblick über die betrachteten Detailpunkte gegeben, wobei auch die Belastungen, welche auf die Modelle einwirken dargestellt werden. Auch die durchgeführten Berechnungen an den FE-Modellen werden kurz beschrieben.

Im Weiteren wurde auch eine Schädigungsanalyse am Modell der Praterbrücke durchgeführt, wobei hierfür Daten aus einer Arbeit des Institutes für Stahlbau [3] übernommen wurden und zwei weitere Detailpunkte untersucht wurden, die in Abschnitt 2.2 näher erklärt werden. Nachfolgend wurden die Ergebnisse gegenübergestellt und versucht eine Vereinfachung des Lastmodells 4 nach EN 1991-2 [1] (siehe Abschnitt 1.2) zu finden.

### 2.2 Detailbereiche

Im Sinne dieser Arbeit wurden zwei wesentliche Detailpunkte des Fahrbahndecks einer orthotropen Platte nach alter Bauweise (etwa 1970er Jahre) zu einer genaueren Betrachtung ausgewählt, an denen die Spannungen abgefragt wurden, damit diese dann zu einem Vergleich herangezogen werden konnten.

Diese zwei Detailpunkte sind zwei der wesentlichen Kerbdetails einer orthotropen Platte mit offenen Längsrippen.

- **Detailpunkt D1:**

Detailpunkt D1 stellt den Anschluss der Längsrippe an das Deckblech dar und die Schweißnaht, welche die beiden Stahlbleche miteinander verbindet ist das maßgebende Kerbdetail an dem es zu großen Spannungsspielen kommen kann. Die großen Spannungsspiele ergeben sich aus den großen Blechbiegespannungen in Brückenquerrichtung bedingt durch sehr schlanke Deckblechbereiche (z.B. Praterbrücke: Längsrippenabstand  $e_{LR} = 360 [mm]$ , Deckblechdicke  $t_{DB} = 10 [mm]$ ).

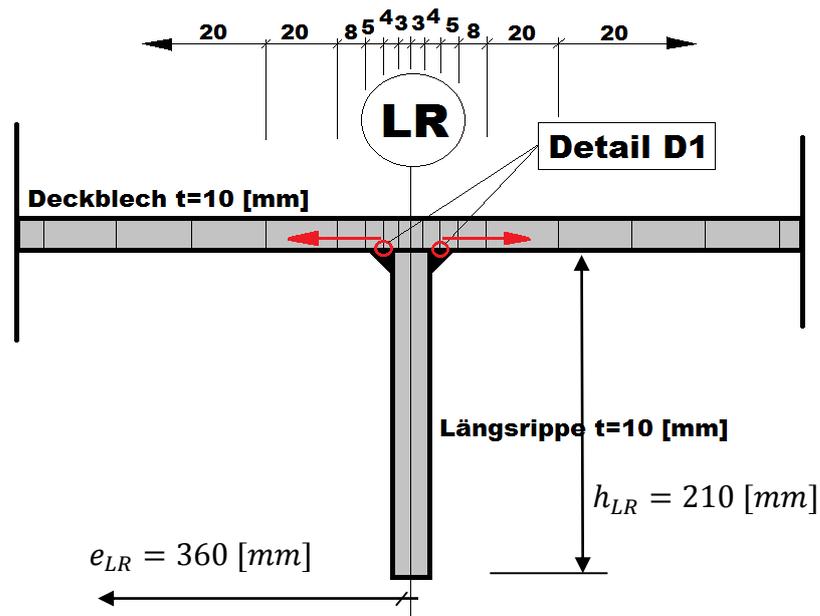


Abbildung 7: Detail D1

Abbildung 7 zeigt das beschriebene Kerbdetail, wobei nun nicht von Anfang an klar ist, ob die größten Spannungen im Randbereich, nahe Hauptträger A zu erwarten sind, oder ob die maximalen Spannungen eher im Feldbereich auftreten, wo die Längsrippen eine geringere Biegesteifigkeit aufweisen und damit größere Verformungen zu erwarten sind. Aus diesem Grund wird für das Detail D1 weiter zwischen Detail D1 im Randbereich und Detail D1\* im Feldbereich (zwischen den Hauptträgern) unterschieden und es wurde untersucht, welche der beiden Bereiche für eine Ermüdungsberechnung maßgebend wird.

Abbildung 8 zeigt jene Bereiche, die für die Details D1 und D1\* in Frage kommen, wobei in der Abbildung ein Schnitt in Brückenquerrichtung zu sehen ist. Dargestellt ist der Querträger, der Hauptträger A und die untersuchten Längsrippen.

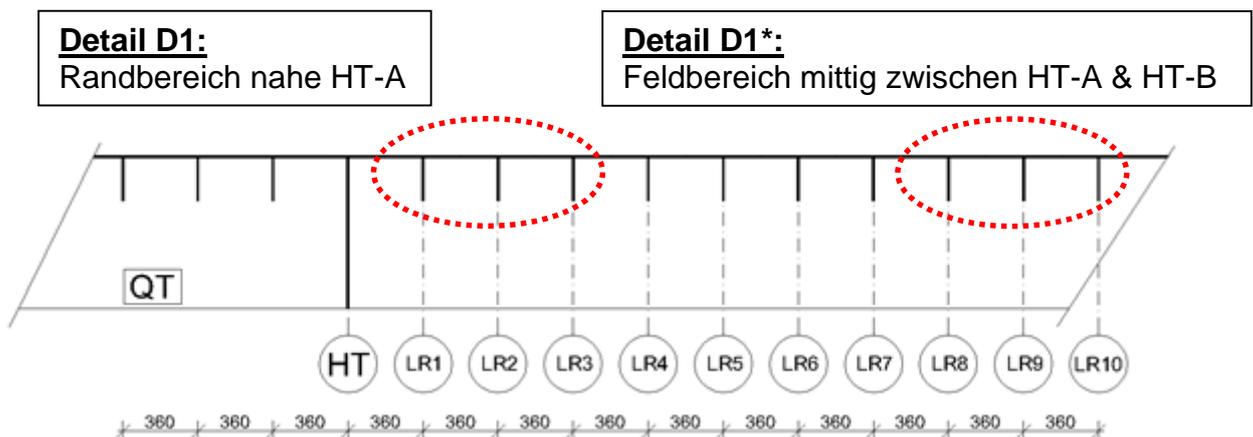


Abbildung 8: Maßgebende Lage der Detailpunkte D1 und D1\*

- **Detailpunkt D2:**

Detailpunkt D2 stellt den Anschluss der Längsrippe an den Querträger bzw. die Querrippe dar. Maßgebend ist der unterste Punkt der Kehlnaht zwischen den beiden Blechen am oberen Ende des Stegausschnittes in der Querrippe. Maßgebend sind die Längsnormalspannungen in der Längsrippe an dieser Stelle.

Abbildung 9 zeigt den Detailpunkt D2, wobei auch hier wieder zwischen Detail D2 im Randbereich und Detail D2\* im Feldbereich (zwischen den Hauptträgern) unterschieden wird, um den Einfluss einer höheren Steifigkeit der Querrippen nahe dem Hauptträger erfassen zu können.

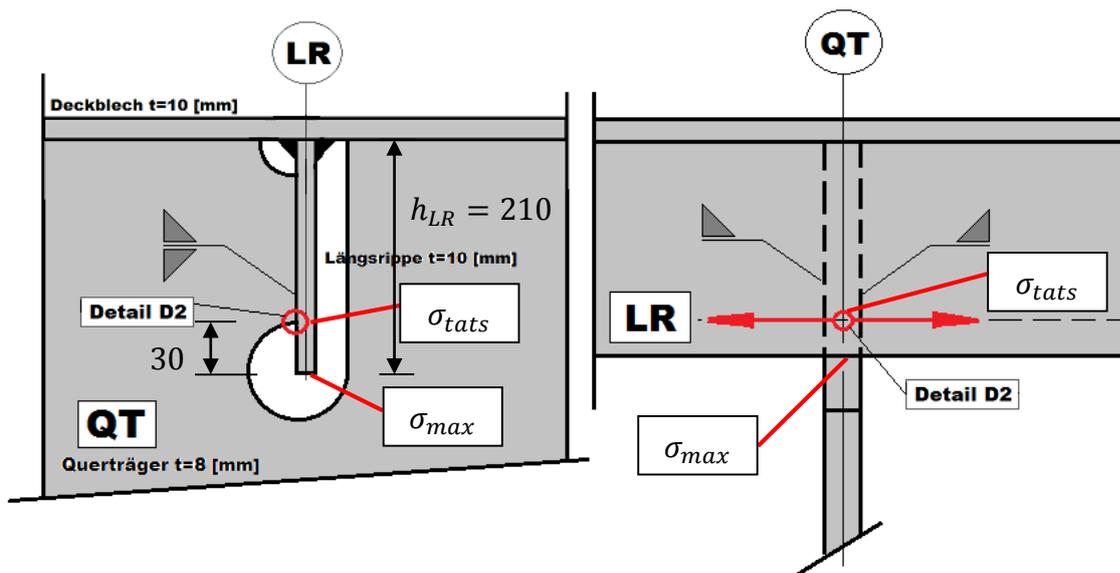


Abbildung 9: Untersuchtes Detail D2

In Abbildung 10 sind jene Bereiche dargestellt, die für Detail D2 und D2\* in Frage kommen, wobei in dieser Abbildung wieder derselbe Schnitt wie zuvor bei Detailpunkt D1 dargestellt wird. So zeigt Abbildung 10 einen Querschnitt der Brücke mit dem Querträger, Hauptträger A und den untersuchten Längsrippen.

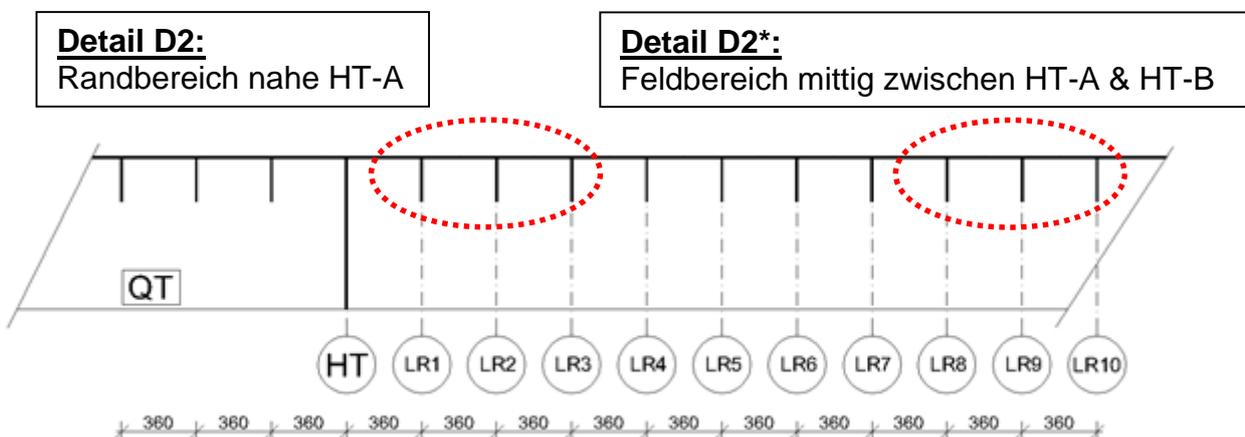


Abbildung 10: Maßgebende Lage der Detailpunkte D2 und D2\*

## 2.3 Belastung – Achslasten B und C nach LM4

In diesem Abschnitt wird die Lastfallbezeichnung kurz beschrieben, da die Achslasten B und C nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.8 [1], in Querrichtung der Brücke von Hauptträger A beginnend hin zur Feldmitte immer mit dem halben Abstand der Längsrippen  $l_{LR}/2 = 360/2 = 180$  [mm] weitergeschoben wurden und die Spannungen an dem jeweiligen Detailpunkt abgelesen wurden.

Für die Berechnungen an den FE-Modellen wurden die Achslast B und die Achslast C nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 2), herangezogen. Die Achse B ist jene mit Zwillingsbereifung, wie sie bei Antriebsachsen vorkommt und Achse C ist jene mit Einzelreifen, die häufig bei Achsen von Anhängern der Schwerlastfahrzeuge zu finden ist.

Um die Ergebnisse aus den Berechnungen später einer Gegenüberstellung unterwerfen zu können, wurde eine einheitliche Achslast von  $F_{Achse} = 100$  [kN] gewählt (Radlast somit  $F_{Rad} = 50$  [kN]).

Abbildung 11 zeigt jeweils die Lastpositionen des linken Rades in Querrichtung der Brücke, wobei die jeweilige Achse B oder Achse C immer um 180 [mm] weitergeschoben wurde (das rechte Rad der Achse ist nicht dargestellt).

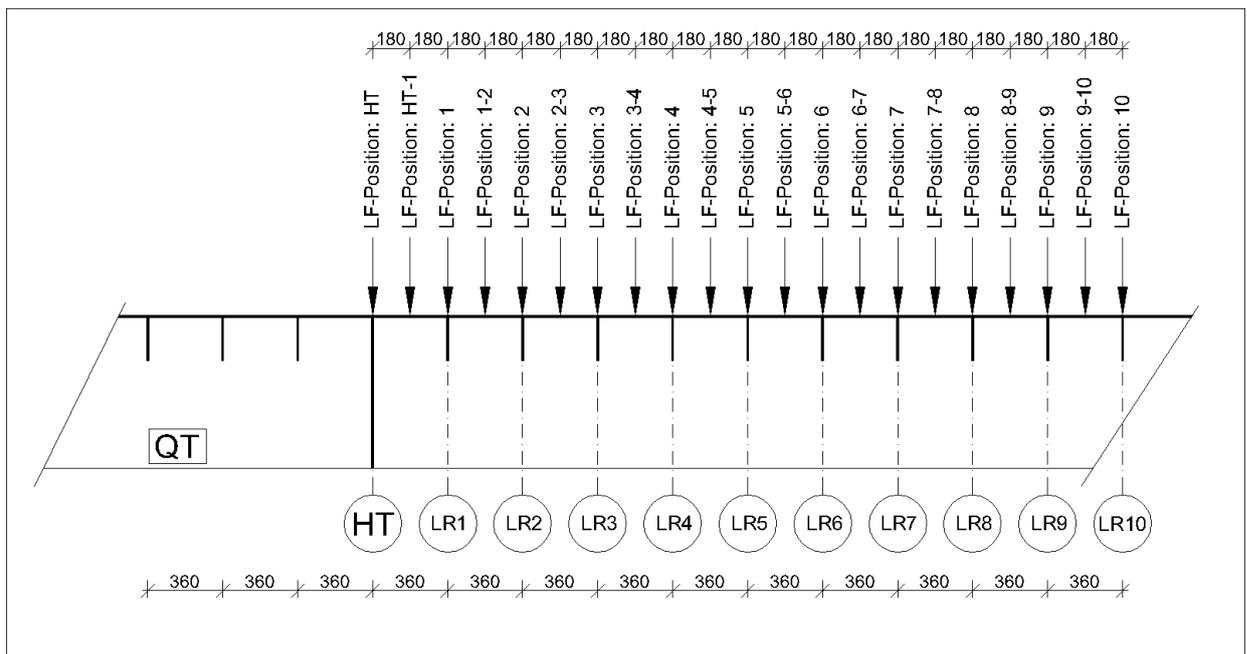


Abbildung 11: Laststellungen (linkes Rad der Achse) in Querrichtung der Brücke – Schnitt A-A

Am Modell A (ohne Belag) wurden die Achslasten B und C zuerst ohne Berücksichtigung einer Lastausbreitung durch den Belag nach EN 1991-2, Abschnitt 4.3.6 (3) [1], aufgebracht und danach folgte ein weiteres Aufbringen der Achslasten B und C mit einem günstig wirkenden Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$ , wie es in Abbildung 12 dargestellt ist (reduzierte Flächenlast, verteilt auf die vergrößerte Breite  $b$ ). Es wurde eine Belagsdicke von  $t_{Belag} = 70$  [mm] vorausgesetzt.

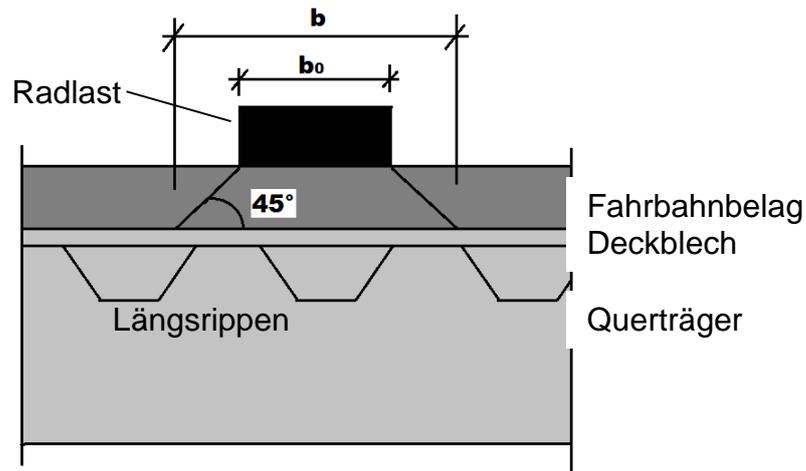
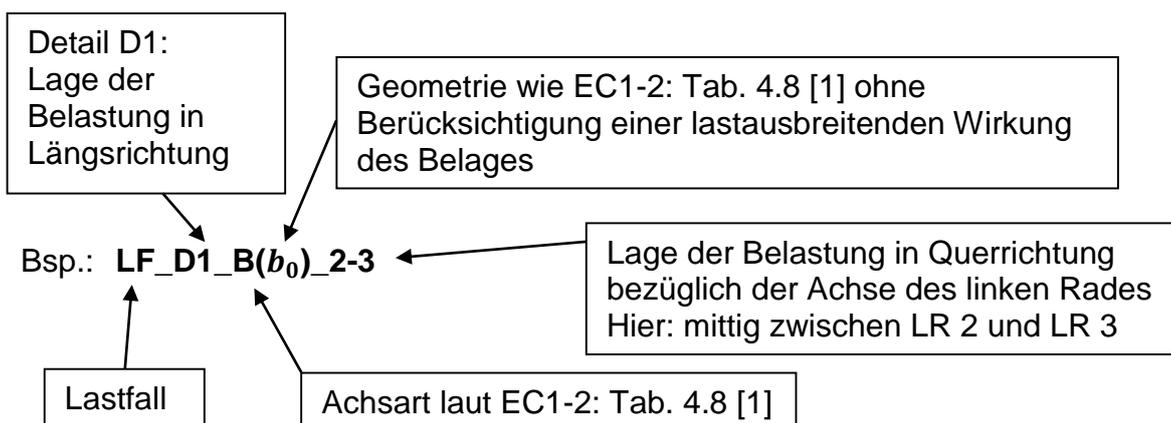


Abbildung 12: Lastausbreitungswinkel nach EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1]

Im Weiteren musste eine Unterscheidung der Lastposition in Brückenlängsrichtung getroffen werden, welche vom jeweilig betrachteten Detailpunkt abhängig ist. So treten die maximalen Spannungen im Detail D1 und D1\* auf, wenn die Achslast sich genau mittig zwischen zwei Querträgern befindet. Bei Detail D2 und D2\* treten die maximalen Spannungen etwa dann auf, wenn sich die Achslast ca. im Abstand von  $a = 700 [mm]$  vom betrachteten Querträger befindet.

Auf eine detaillierte Beschreibung der Lastfälle wird in diesem Kapitel verzichtet, da eine sehr genaue Beschreibung dieser Lastfallbezeichnungen im Anhang unter Abschnitt A 1.4 zu finden ist.

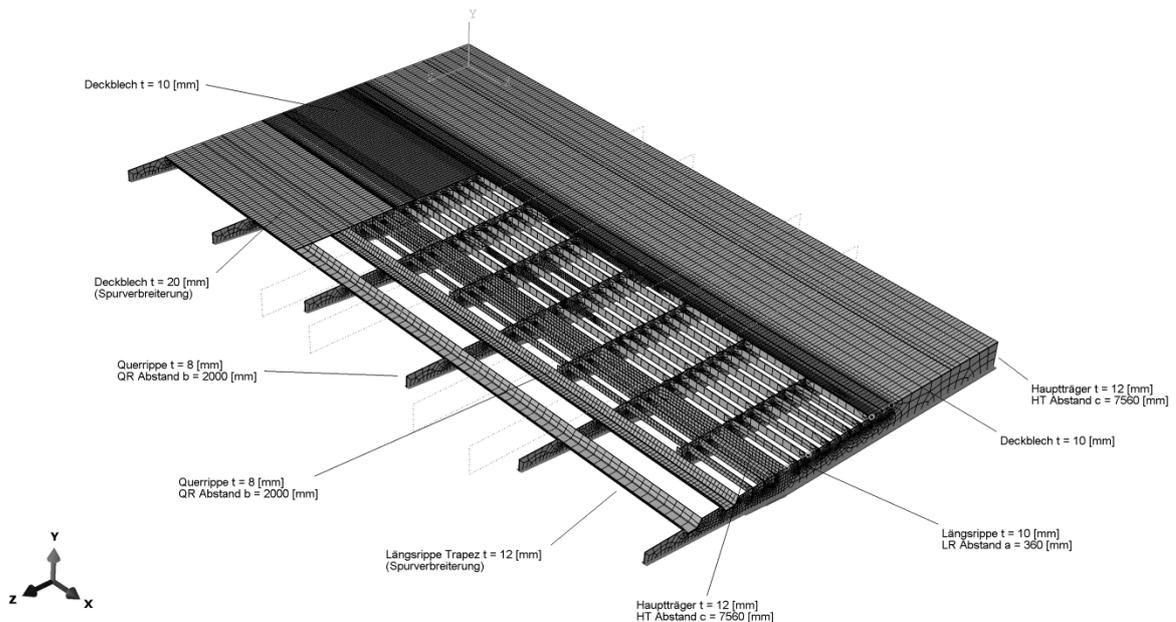
Es wurde eine standardisierte Formatierung der Bezeichnungen, wie sie in Kapitel A 1.4.2 genauer erklärt ist, gewählt, um eine gewisse Transparenz bezüglich der Positionen der Lasten zu schaffen.



## 2.4 FE-Modelle

In diesem Abschnitt werden die erstellten FE-Modelle dargestellt und kurz erklärt. Es wurden zu Anfang zahlreiche Berechnungen am Modell A durchgeführt, um für die jeweiligen Detailpunkte die maßgebenden Laststellungen in Querrichtung der Brücke zu erhalten. An den erweiterten Modellen B-1 und B-2 wurden dann lediglich die maßgebenden Laststellungen aufgebracht und berechnet.

- **Modell A (ohne Belag)**



**Abbildung 13: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag)**

Dieses Modell wurde von Hr. Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Andreas Taras für eine Ermüdungsberechnung der Praterbrücke [4] erstellt und diente als Basis für die Bearbeitung dieser Arbeit. Es bildet das Fahrbahndeck zwischen zwei Hauptträgern und im auskragenden Randbereich (links in Abbildung 13) ab. Insgesamt sind 6 Hauptquerrippen mit zusätzlichen Untergurtverstärkungen und 5 Zwischenquerrippen abgebildet. Nach der Durchführung einer umfangreichen Diskretisierungsstudie an mehreren lokalen Modellen wurde das Modell A einer Optimierung unterzogen, wobei die Netzstruktur des FE-Modells für die Zwecke und Ziele dieser Arbeit verbessert wurde.

Abbildung 13 zeigt eine isometrische Übersicht des Modells A (ohne Belag) mit Kennzeichnung der einzelnen Teile des Fahrbahndecks.

- **Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund)**

Es wurde das Modell A durch einen Asphaltbelag erweitert, wie es in Abbildung 14 dargestellt wird. Der Belag wurde mit einer Dicke von  $t_{Belag} = 70 [mm]$  modelliert und den Elementen wurden die Eigenschaften eines Asphalt im Sommer zugewiesen. So hat dieser bei einer Temperatur von  $+40^{\circ}C$  nur einen mittleren E-Modul von  $E_{Belag} = 600 [N/mm^2]$  und zugehörig eine Querdehnzahl von  $\mu_{Belag} = 0,4$  (aus [6]).

Der Belag wurde beidseits der Achse A (siehe Abbildung 14) mit einer Einflussbreite von je 4 [m] modelliert, wobei Achse A jene Achse ist, an der die Spannungen von Detail D1 abgefragt werden (mittig zwischen zwei Querträgern).

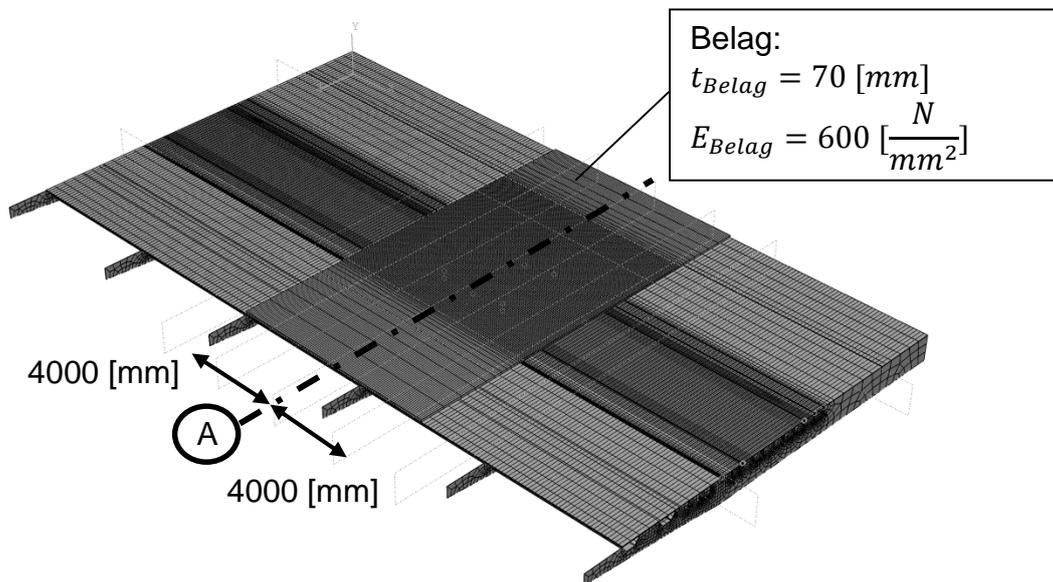


Abbildung 14: Modell B-1: isometrische Ansicht - Übersicht

- **Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund)**

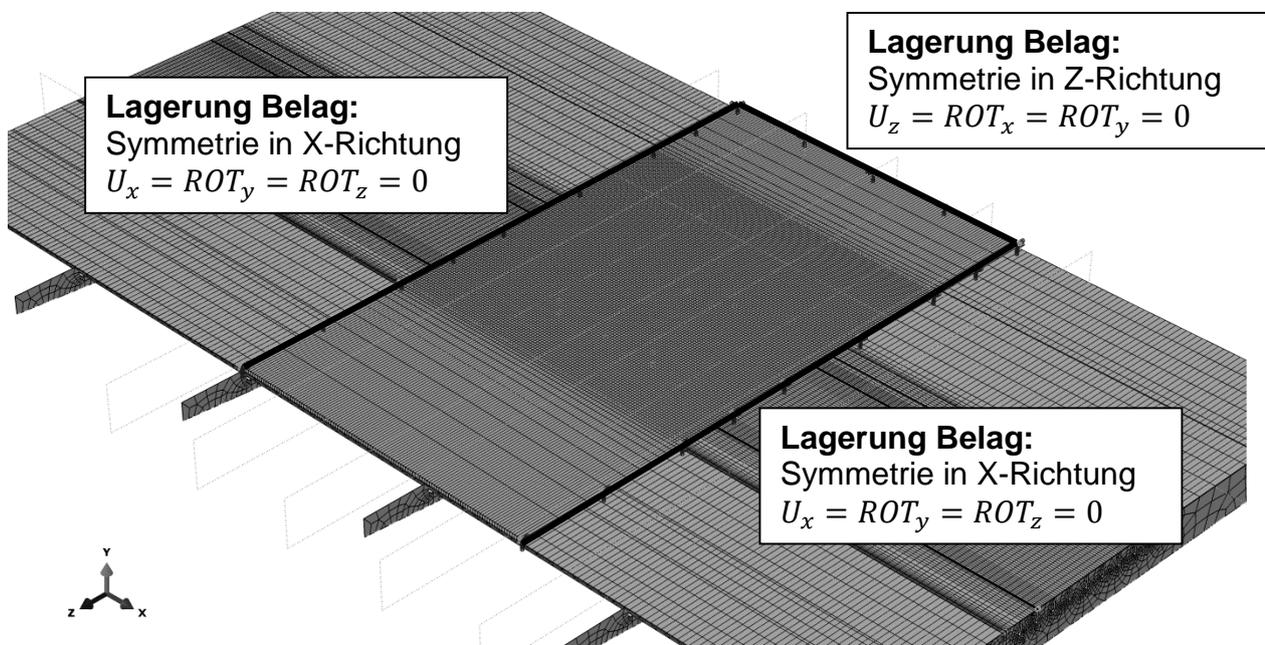


Abbildung 15: Modell B-2: isometrische Ansicht – Lagerung Belag

Modell B-2 stellt eine Erweiterung des Modells B-1 dar. Es wurde die starre Verbindung des Deckbleches und des Belages gelöst, sodass der Belag auf dem

Deckblech quasi lose aufliegt und keine Reibung zwischen den Elementen vorhanden ist.

Da der Belag nun vom restlichen System entkoppelt wurde, war dieser Teil in horizontaler Richtung frei beweglich und musste mithilfe von zusätzlichen Symmetriebedingungen, wie sie in Abbildung 15 dargestellt sind, horizontal gelagert werden.

Zur Durchführung einer Diskretisierungsstudie wurden weitere lokale Modelle erstellt, welche Grenzabmessungen von 2 x 2 [m] aufweisen, jedoch die gleichen Abmessungen von Deckblech und Längsrippen haben, um Vergleiche mit den Modellen A, B-1 und B-2 anstellen zu können.

Im Weiteren waren diese Modelle auch hilfreich bei der Untersuchung der vertikalen Druckverteilung auf das Deckblech bei einer Belastung auf den Belag in Form eines Fahrzeugreifens und mit einer einheitlichen Radlast von 50 [kN].

- **Lokales Modell L1**

Abbildung 16 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells L1 mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

Dieses Modell stellt lediglich den Belag der Brücke dar mit einer Dicke von  $t_{Belag} = 70$  [mm], der an der Unterfläche starr gelagert ist, wobei zwischen zwei unterschiedlichen E-Modulen variiert wurde, da dieser sehr stark von der Temperatur abhängig ist. So wurde ein E-Modul für den Sommer modelliert und einer für den Winter, indem zwischen möglichen Grenzwerten der Mittelwert gebildet wurde. Die Grenzwerte des E-Moduls mit der zugehörigen Temperatur wurden folgender Literatur entnommen: Leitfaden DIN-Fachbericht 103 [6]. Dieses FE-Modell entspricht jenen von de Jong [5].

Die Ergebnisse dieses Modells sollten mit jenen Ergebniswerten verglichen werden, die in der Dissertation von de Jong [5] (siehe Abschnitt A 2.1) präsentiert werden, in der ein Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  als unzulässige Annäherung der günstigen lastausbreitenden Wirkung des Belags dargestellt wird.

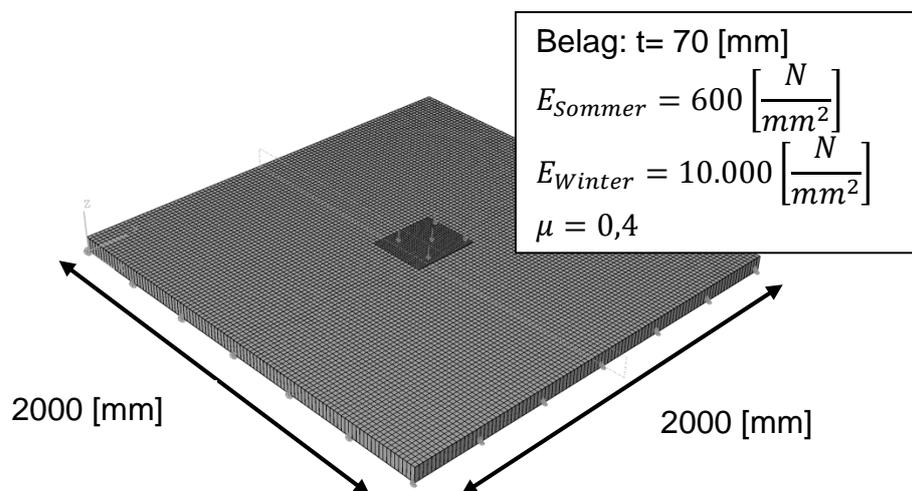


Abbildung 16: Lokales Modell L1: isometrische Ansicht

- **Lokales Modell L2 (ohne Belag)**

Abbildung 17 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells L2 mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

Dieses Modell bildet einen Ausschnitt der orthotropen Platte aus Modell A (ohne Belag) ab und dient der Überprüfung der Ergebnisse aus Modell A (starre Einspannung sowie vertikale Lagerung der Längsrippenenden).

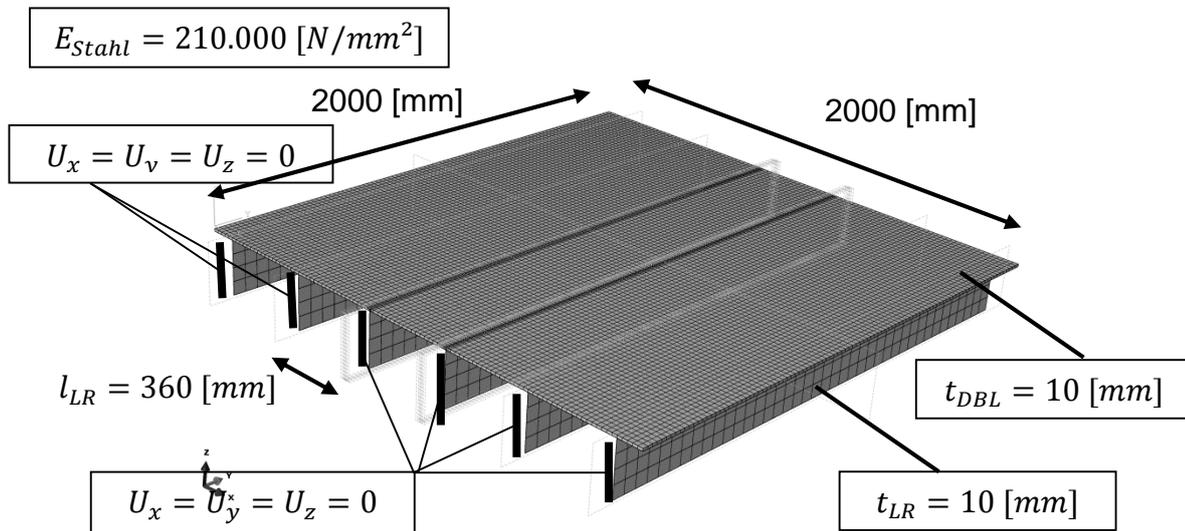


Abbildung 17: Lokales Modell L2 (ohne Belag): isometrische Ansicht

- **Lokales Modell L2m (mit Belag)**

Abbildung 18 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells L2m mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

Bei diesem Modell wurde ein Belag, wie jener aus dem lokalen Modell L1 hinzugefügt und dieser ist starr mit dem Deckblech gekoppelt, stellt also den Fall eines vollen Verbundes zwischen dem Belag und der orthotropen Platte dar.

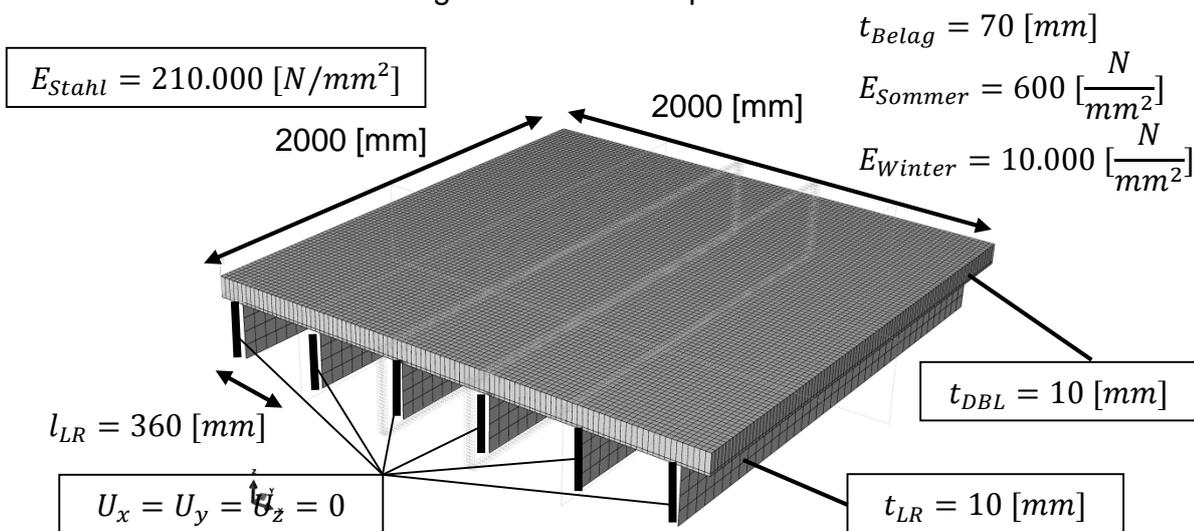


Abbildung 18: Lokales Modell L2m (mit Belag): isometrische Ansicht

- **Lokales Modell L3m**

Abbildung 19 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells L3m mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

Dieses Modell ist eine Erweiterung von dem lokalen Modell L2m (mit Belag), in dem die starre Koppelung zwischen dem Belag und dem Deckblech gelöst wurde und der Belag reibungslos auf der orthotropen Platte aufliegt, sodass dies als der Grenzfall ohne Verbund angesehen werden kann.

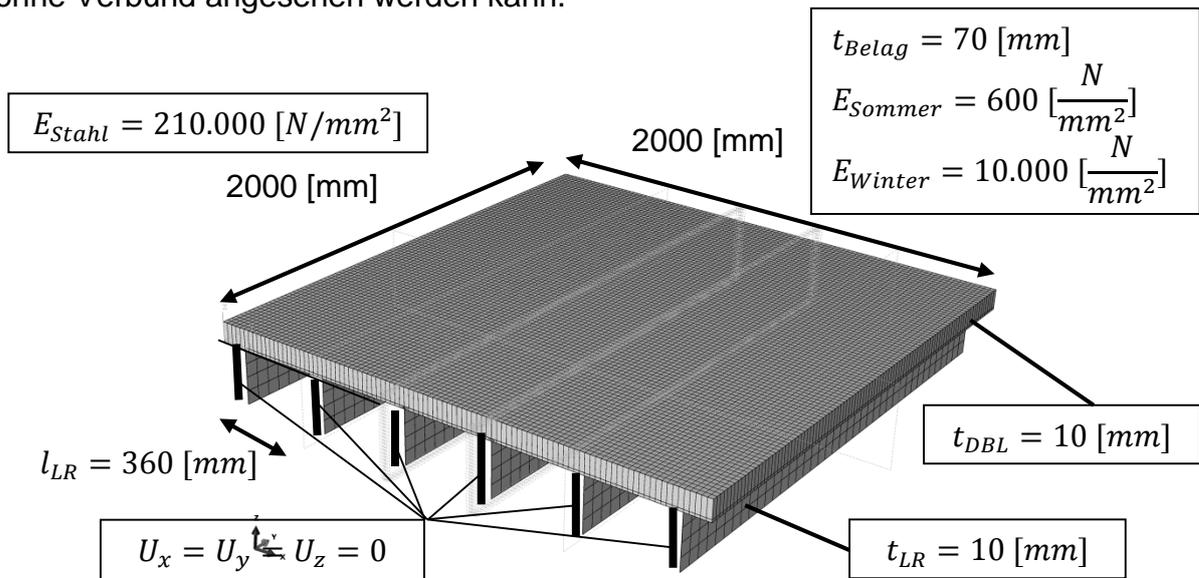


Abbildung 19: Lokales Modell L3m: isometrische Ansicht

## 2.5 Schädigungsanalyse

Das Institut für Stahlbau führte eine umfangreiche Analyse der Ermüdungsschädigungen an der Praterbrücke an definierten Punkten (P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7) der Brücke durch und die aus den Berechnungen erhaltenen Ergebnisse wurden mit Messungen aus an der Brücke angebrachten Dehnungsmessstreifen miteinander verglichen [3].

In Abschnitt A 5.4 werden die Orte dieser Punkte angegeben und die Ergebnisse präsentiert, welche dann in dieser Arbeit weiter Anwendung fanden, in dem die Schädigungen der einzelnen Fahrzeugtypen nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.7 [1] (siehe Abbildung 1), weiter aufgeschlüsselt wurden, sodass dann jeder Achse eines Fahrzeugtyps ein prozentueller Anteil der Schädigung bei einer definierten Überfahrt des Fahrzeugtyps zugewiesen werden konnte. Mithilfe einer solchen genaueren Aufschlüsselung der Schädigungen sollte eine eventuelle Vereinfachung des Lastmodells 4 für die Ermüdungsrechnung nach EN 1991-2 [1] gelingen, da man in tabellarischer Form erkennen kann, welcher Fahrzeugtyp und welche zugehörige Achse den größten Anteil der Schädigung an den untersuchten Kerbdetails aufweist.

Die untersuchten Punkte P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 wurden speziell für die Messungen des Schwerverkehrs der Praterbrücke ausgesucht und sind daher nicht unbedingt als maßgebende Kerbdetailpunkte einer orthotropen Platte mit offenen Längsrippen anzusehen.

Im Sinne dieser Diplomarbeit wurden auch die Detailpunkte D1 und D2 einer solchen Schädigungsanalyse unterzogen, um über einen größeren Umfang an Daten verfügen zu können und vor allem deshalb, da die Detailpunkte D1 und D2 maßgebende Kerbdetails der orthotropen Platte mit offenen Längsrippen repräsentieren.

Der genaue Ablauf der Berechnung der Schädigungen an Detail D1 befindet sich in Abschnitt A 5.2 und jener für Detail D2 befindet sich in Abschnitt A 5.3. Es wurden zunächst die maßgebenden Stellen für D1 und D2 unter Berücksichtigung der sich auf der Fahrbahn befindlichen Spuren ausgewählt und dann eine Simulation von Überfahrten der Achsen A, B und C nach EN 1991-2, Abschnitt 4.6.5, Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 2), an dem FE-Modell der Praterbrücke gestartet, wobei die Spannungswerte an den definierten Stellen für Detail D1 und D2 abgelesen wurden. Somit konnten für jedes Detail Einflusslinien der Einzelachsen generiert werden. Es sei jedoch angemerkt, dass die Simulation der Überfahrten statisch, durch Weiterschieben der jeweiligen Achse auf dessen Spur (vorerst mit Einheitsachslast von  $F_{Achse} = 100 [kN]$ ) über die Brücke durchgeführt wurde und eine dynamische Beanspruchung des Modells nicht getätigt wurde. Mittels dieser Einflusslinien der Achsen konnte dann die Spannungen bei Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen T1 bis T5, mit deren Achskonfiguration und den zugehörigen Achslasten ermittelt werden. Anschließend erfolgte eine Auszählung der Spannungsspiele mittels der Rainflow Methode. Unter Berücksichtigung eines für die jeweilige Spur angegebenen Typenverteilungsschlüssels der Fahrzeugtypen wurden dann die Schädigungen und Lastkollektive der Details D1 und D2 ermittelt.

### 3 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden nur die wesentlichen Ergebnisse dieser Arbeit präsentiert und daraus Schlussfolgerungen gezogen im Hinblick auf die in Abschnitt 1.4 definierten Ziele.

In Abschnitt 3.1 werden die Ergebnisse aus den Berechnungen an den Modellen A, B-1 und B-2 für Detail D1 bzw. D1\* sowie Detail D2 bzw. D2\* gezeigt, wobei die Achslasten B und C voneinander getrennt dargestellt werden, da nicht beabsichtigt wurde zwei unterschiedliche Achsarten miteinander zu vergleichen.

Es sollte die Fragestellung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages an Straßenbrücken mit orthotroper Fahrbahnplatte, anhand von Spannungsvergleichen an maßgebenden Kerbdetails des Fahrbahndecks behandelt werden. Dies erfolgte durch Berechnungen an Modellen ohne Belag, mit und ohne Berücksichtigung einer Lastausbreitung von 45°, sowie an Modellen mit Belag.

Abschnitt 3.2 beinhaltet die Ergebnisse aus der Berechnung der Schädigungen an den Detailpunkten D1 und D2 an der Praterbrücke, sowie die Schädigungen an den Punkten P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 aus den Analysen des Institutes für Stahlbau [3].

### 3.1 Maßgebende Normalspannungen am Fahrbahndeck aus Achslastüberfahrt: Vergleich Modell A – Modell B – Lokale Modelle

#### 3.1.1 Überfahrt der Achse B

##### 3.1.1.1 Ergebnisse für Detail D1 bei LR-2 und D1\* bei LR-8

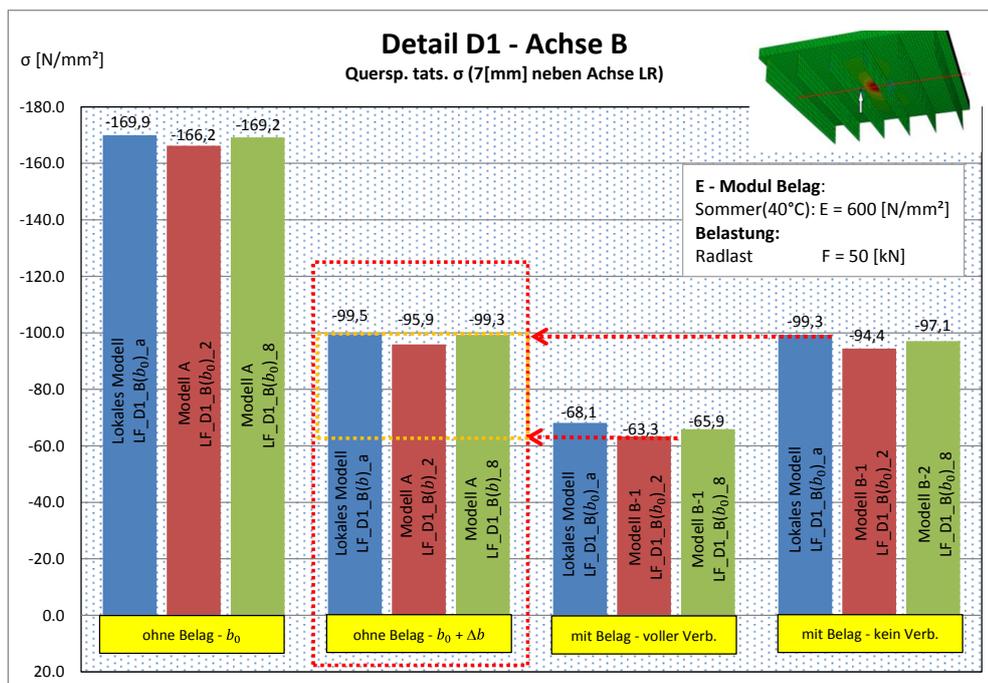


Abbildung 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse B – Detail D1 bei LR-2 & D1\* bei LR-8

Abbildung 20 zeigt die maßgebenden Normalspannungen für Detail D1 bei LR-2 und D1\* bei LR-8 aus den Berechnungen der Modelle A, B-1 und B-2, sowie jene aus den lokalen Modellen. Dabei wurde die Achse B an der ungünstigsten Lastposition aufgebracht.

Der E-Modul des Belages wurde so gewählt, dass er jenem eines Asphalttes im Sommer bei einer Temperatur von 40°C [6] entspricht und es wurde immer eine einheitliche Achslast von  $F_{Achse} = 100 [kN]$  angesetzt, was einer Radlast von  $F_{Rad} = 50 [kN]$  entspricht.

Im Allgemeinen herrscht bei Detail D1 und D1\* ein sehr großer Unterschied zwischen den Spannungswerten aus Modell A (ohne Belag), wenn man eine günstige Lastausbreitung des Belages berücksichtigt oder nicht.

In Abbildung 20 ist sehr deutlich zu erkennen, dass die Spannungswerte an Detail D1 und D1\* unter der Last der Achse B aus dem Modell A (ohne Belag) und inklusive einer Berücksichtigung eines Lastausbreitungswinkels von 45° sehr ähnlich den Spannungswerten aus dem Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund) mit denselben Belastungskriterien sind. Damit bestätigt sich die Verwendung des günstigen Lastausbreitungswinkels von 45°, im Gegensatz zur Aussage von de Jong [5].

### 3.1.1.2 Ergebnis für Detail D2 bei LR-2 und D2\* bei LR-8

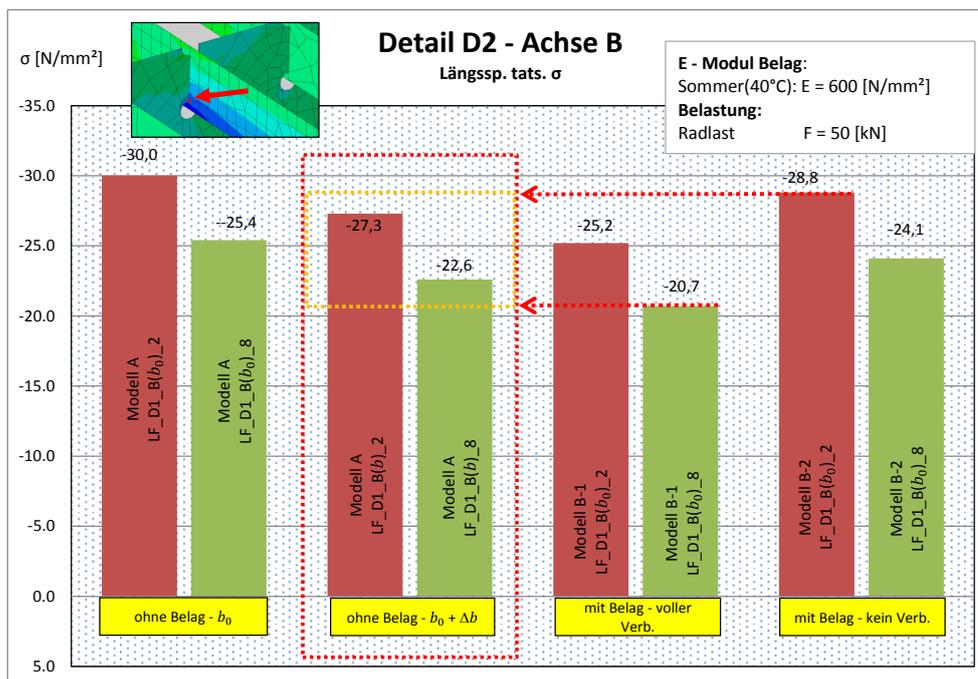


Abbildung 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse B – Detail D2 bei LR-2 & D2\* bei LR-8

Abbildung 21 zeigt die maßgebenden Normalspannungen für Detail D2 bei LR-2 und D2\* bei LR-8 aus den Berechnungen der Modelle A, B-1 und B-2, wobei die Achse B an der ungünstigsten Lastposition aufgebracht wurde.

Das Diagramm lässt darauf hindeuten, dass Detailpunkt D2 und D2\* nicht sehr sensibel auf eine Änderung der Radaufstandsfläche reagiert. Dennoch stellt auch hier eine Lastausbreitung von 45° eine gute und konservative Annäherung dar.

### 3.1.2 Überfahrt der Achse C

Die Ergebnisse bei Überfahrt der Achse C weisen für die Detailpunkte D1 bzw. D1\* und D2 bzw. D2\* ähnlich gute Qualität auf, wie Abbildung 22 und Abbildung 23 erkennen lässt.

#### 3.1.2.1 Ergebnisse für Detail D1 bei LR-2 und D1\* bei LR-8

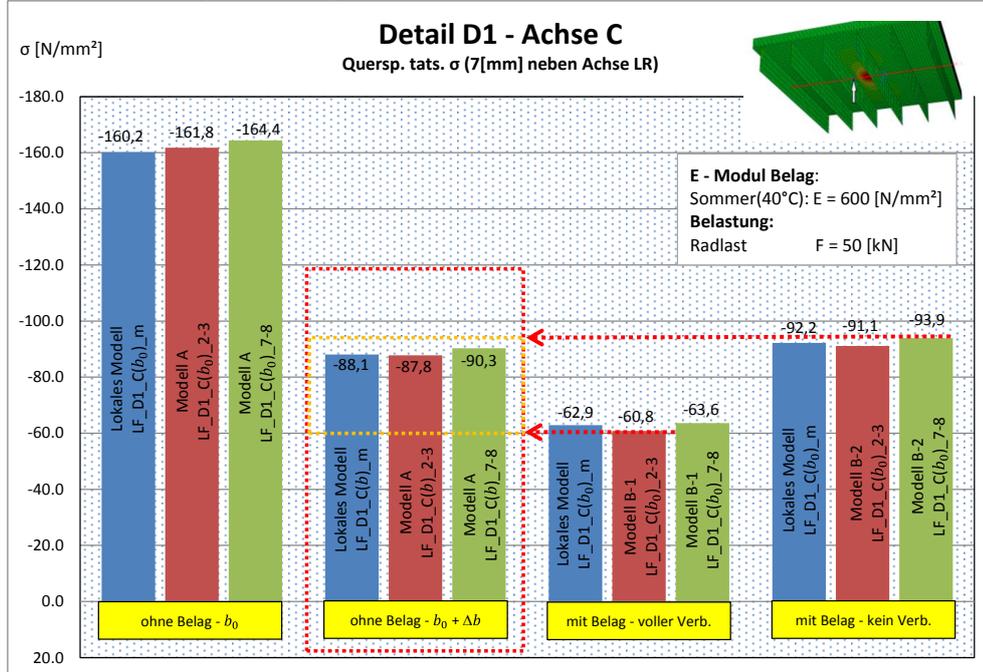


Abbildung 22: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse C – Detail D1 bei LR-2 & D1\* bei LR-8

#### 3.1.2.2 Ergebnisse für Detail D2 bei LR-2 und D2\* bei LR-8

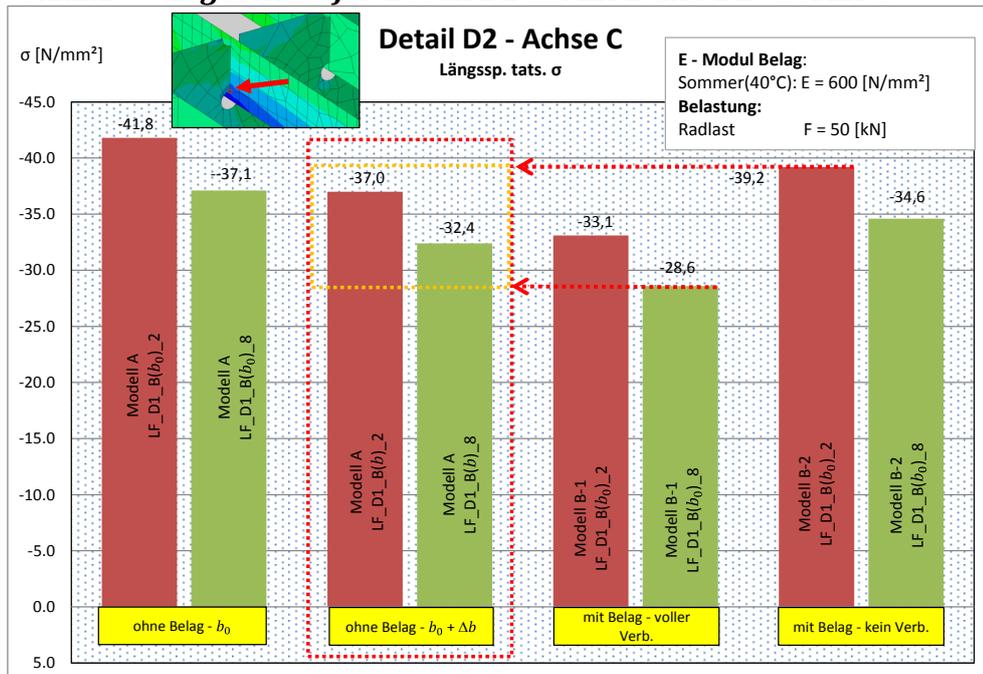


Abbildung 23: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse C – Detail D2 bei LR-2 & D2\* bei LR-8

**Fazit:**

Der laut EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässige Lastausbreitungswinkel von 45° über die Höhe des Belages, stellt eine ausreichend genaue und vor allem einfache Annäherung dar, die günstige lastverteilende Wirkung des Belages auf orthotropen Platten im Straßenbau berücksichtigen zu können. Damit kann bei der Berechnung am alleinigen stählernen Fahrbahndeck von einer reduzierten Flächenlast und einer vergrößerten Radaufstandsfläche ausgegangen werden (vgl. Abbildung 3).

### 3.2 Ergebnisse der Schädigungsanalyse

Um die Ermüdungsschädigungen der einzelnen Fahrzeugtypen gut veranschaulichen zu können, wurden die Schädigungen infolge Schwerverkehr für die einzelnen Details D1 und D2, sowie P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 [3] auf eine Überfahrt des jeweiligen Fahrzeugtyps rückgerechnet. Der prozentuelle Anteil der Schädigung wurde dann für eine fiktive Überfahrt von jeweils 2 Mio. Fahrzeugen jedes einzelnen Typs errechnet und in Tabelle 1 eingetragen.

Ermüdungsschädigung [%] bei 2 Mio. Überfahrten jedes einzelnen Fahrzeugtyps																			
	Typ T1		Typ T2			Typ T3					Typ T4				Typ T5				
Achse	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P3a	0	3	3	6	0	0	7	0	0	0	0	5	0	0	0	4	0	0	0
	3		9			7					5				4				
P3b	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	0		4			3					2				0				
P5	0	15	0	7	37	0	45	0	0	0	0	31	0	3	0	14	0	0	0
	15		44			45					34				14				
P7	0	3	0	6	12	0	10	0	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0
	3		18			10					6				3				
D1	9	49	23	73	104	10	107	25	14	17	8	77	9	16	4	46	8	9	12
	58		200			173					110				79				
D2	0	0	0	6	6	0	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0	0	2	2
	0		12			14					0				4				

**Tabelle 1: Zusammenfassung der Schädigungen der Kerbdetails P1 bis P7, D1 und D2 bei Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen**

Ein Wert von 100% bedeutet, dass gerade 2 Mio. Fahrzeuge dieses Typs – ohne einen Ermüdungsschaden zu verursachen – verkehren können.

Keine Schädigung einzelner Achsen bzw. Fahrzeugtypen rührt daher, dass die geringere Schadenswirkung unter der Dauerfestigkeit nach EN 1993-1-9 [2] berücksichtigt wurde, die auch eine untere Grenze der Schädigung aufweist.

Es ist schwierig einen oder gar mehrere Fahrzeugtypen bei der Ermüdungsrechnung auszuschließen, da jeder Typ bei mindestens vier betrachteten Detailpunkten eine schädigende Wirkung ausübt. Vor allem ist sehr gut zu erkennen, dass die Antriebsachse der jeweiligen Fahrzeuge (Achse 2), welche eine Zwillingsbereifung aufweist, den größten Anteil der Schädigung ausübt. Dies auch deshalb, da diese Achse die größte Achslast aufweist.

Dem Detail D1 sollte erhöhte Aufmerksamkeit zugesprochen werden, da wie in Tabelle 1 zu erkennen ist, jede Achse jedes Fahrzeugtyps eine schädigende Wirkung ausübt. Dies bedeutet, dass bei Brücken mit ähnlich schlanken Deckblech (hier:  $e_{LR}/t_{DB} = 360/10 = 36$ ), die Gefahr von Ermüdungsrissen besteht.



## A 1. Modell A (ohne Belag)

### A 1.1. Allgemeines

Ein Ziel dieser Arbeit ist es den laut Eurocode 1 – Teil 2 erlaubten Lastausbreitungswinkel unter der lokalen Radlast (über die Dicke des Belages) einer Straßenbrücke mithilfe von Finite Element – Modellen zu untersuchen und eine Beurteilung treffen zu können, ob der angegebene Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  (siehe Abbildung 3) eine gute Annäherung darstellt. Anhand des in diesem Kapitel dargestellten Modell A, welches den Ausschnitt einer Straßenbrücke [4], bestehend aus einer orthotropen Platte ohne Belag abbildet, wurden zwei Grenzfälle untersucht um diese mit später folgenden Ergebnissen an Modellen mit Belag gegenüberstellen zu können.

- Grenzfall 1: Belastung unmittelbar auf das Deckblech ohne günstig wirkende Lastausbreitung durch den Belag
- Grenzfall 2: Belastung unmittelbar auf das Deckblech mit Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages (Dicke  $t = 70 \text{ mm}$ ) über seine Dicke durch einen Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  laut Eurocode 1 – Teil 2

Als Belastung wurden die drei unterschiedlichen Achstypen der Tabelle 4.8 aus dem Eurocode 1 – Teil 2 (vgl. Abbildung 2) für die Berechnungen am Modell herangezogen, wobei eine Einheitsachslast von  $100 \text{ [kN]}$  gewählt wurde, um die daraus folgenden Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Eine genaue Darstellung der sogenannten Radaufstandflächen laut Eurocode und deren Laststellungen befindet sich im Unterkapitel A 1.4 Belastung.

Die Beurteilung der lastverteilenden Wirkung des Belages wird anhand von Vergleichen von Spannungen an definierten Detailpunkten durchgeführt. Diese Detailpunkte sind zwei der wesentlichen Kerbdetails, welche bei solch einer orthotropen Platte bei der Berechnung der Restlebensdauer maßgebend sein können, es sind dies sozusagen die „Achillesfersen“ einer solchen Konstruktion. Eine detaillierte Erläuterung dieser Detailbereiche befindet sich im Unterkapitel A 1.3 Untersuchte Detailbereiche.

Um Festzustellen, welche der Längsrippen in Brückenquerrichtung die größten Spannungen liefert wurde für jede Längsrippe eine Einflusslinie in Querrichtung erstellt, um dann entscheiden zu können, welche am sensibelsten auf die dazugehörige Laststellung reagiert. Generell sollten zwei vom Tragverhalten unterschiedliche Längsrippen untersucht werden, zum einen eine Längsrippe nahe dem Hauptträger, die an den Querrrippen nahezu starr gestützt ist und zum anderen eine mittig zwischen den Hauptträgern liegende Längsrippe.

## A 1.2. Modellbildung

### A 1.2.1. Allgemein

Für die folgenden Berechnungen wurde ein bereits bestehendes Modell des Fahrbahndecks der Praterbrücke gewählt, welches von Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Taras Andreas für die Untersuchung einer Ermüdungsberechnung der Praterbrücke erstellt wurde [4]. Es wurde das FE-Softwarepaket Abaqus [7] verwendet.

Die Praterbrücke ist eine Autobahnbrücke über die Donau in Wien und gehört zur Südost Tangente (A23). Sie wurde 1970 für den Verkehr freigegeben und hatte je Richtung 3 Fahrspuren, im Jahre 1997 musste die Brücke aufgrund dem Bau eines Kraftwerks um 1,8 [m] angehoben werden, wobei auch eine Fahrspurverbreiterung auf aktuell 4 Fahrspuren durchgeführt wurde und der Geh- und Radweg als abgehängte Konstruktion unter die Brücke verlegt wurde.

Das Modell des Fahrbahndecks weist eine Gesamtlänge von 20 [m] auf (6 Querrippen) und stellt im Querschnitt den Fahrbahnbereich zwischen zwei Hauptträger sowie den auskragenden Randbereich dar, womit das Modell eine Gesamtbreite von ca. 12 [m] aufweist. Das Deckblech hat eine Dicke von 10 [mm], die Längsrippen sind als Bleche mit einer Stärke von 10 [mm] ausgeführt, wobei der Längsrippenabstand 360 [mm] beträgt. Die Stege der Querrippen haben eine Dicke von 8 [mm] und die Untergurte wurden als Stabelemente modelliert. Der Abstand der Querrippen beträgt 2 [m], wobei nur jede zweite Querrippe im Zuge der außenseitigen Verbreiterung verlängert wurde. Sowohl die Längsrippen als auch die Querträgerstege wurden mit Schalenelementen abgebildet. Die Stege der Hauptträger weisen eine Dicke von 12 [mm] auf, wobei diese nur bis zur unteren Kante der Querrippen modelliert wurden und die Hauptträger an dieser Kante linienförmig und vertikal starr gelagert sind. Bei der erwähnten Fahrspurverbreiterung wurde außenseitig neu ein Deckblech mit der Breite von ca. 1,90 [m] und einer Dicke von 20 [mm] angeschweißt, wobei zwei geschlossene trapezförmige Längsrippen mit der Stärke von 12 [mm] hinzugefügt wurden. (vgl. Abbildung 27 und Abbildung 28)

Dieses Fahrbahndeck stellt ein repräsentatives Beispiel einer Straßenbrücke aus Stahl dar, wie sie in den 1970er Jahren häufig erbaut wurde. Bei der statischen Beanspruchbarkeit bietet eine solche orthotrope Platte enorme Umlagerungsmöglichkeiten, jedoch wurden damals keine Untersuchungen des Tragwerks hinsichtlich Ermüdung angestellt. Der Verkehr hat auf den Straßen in den letzten Jahrzehnten derart stark zugenommen, dass nun eben die Effekte der Langzeitbeanspruchung durch die über die Jahre andauernden Spannungswechsel immer mehr zu Schäden an den Tragwerken und den Straßenbelägen führt.

In Abbildung 24 ist das Modell A als isometrische Ansicht dargestellt und Abbildung 25 zeigt den Querschnitt des Modells.

Modell A (ohne Belag)

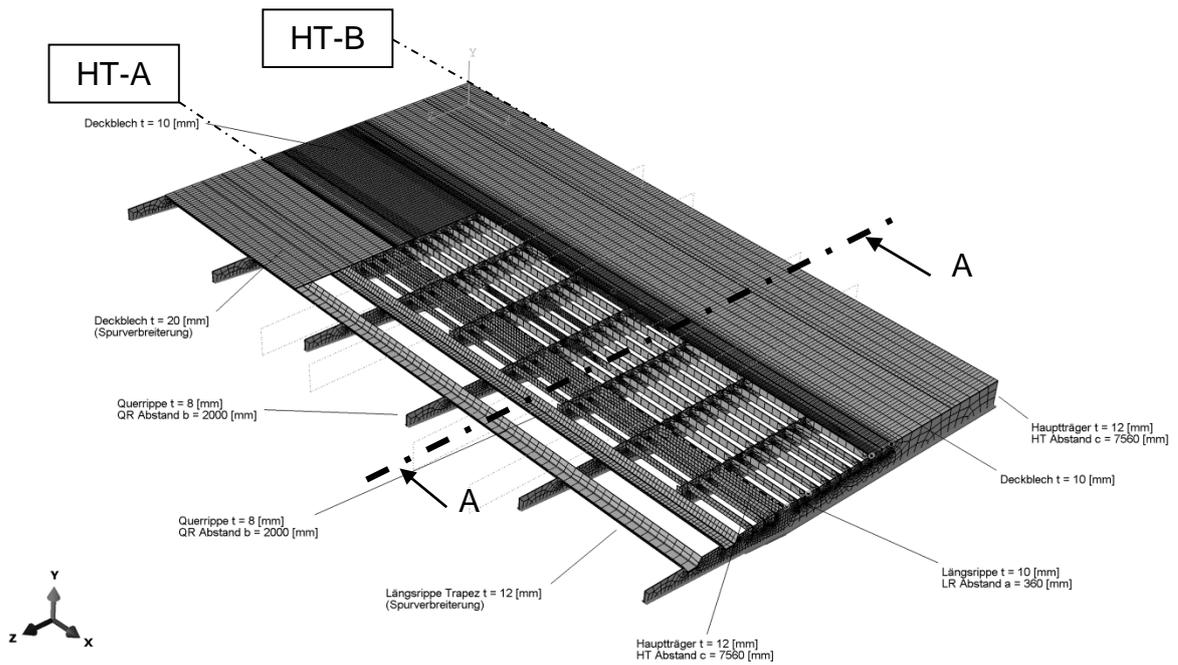


Abbildung 24: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag)

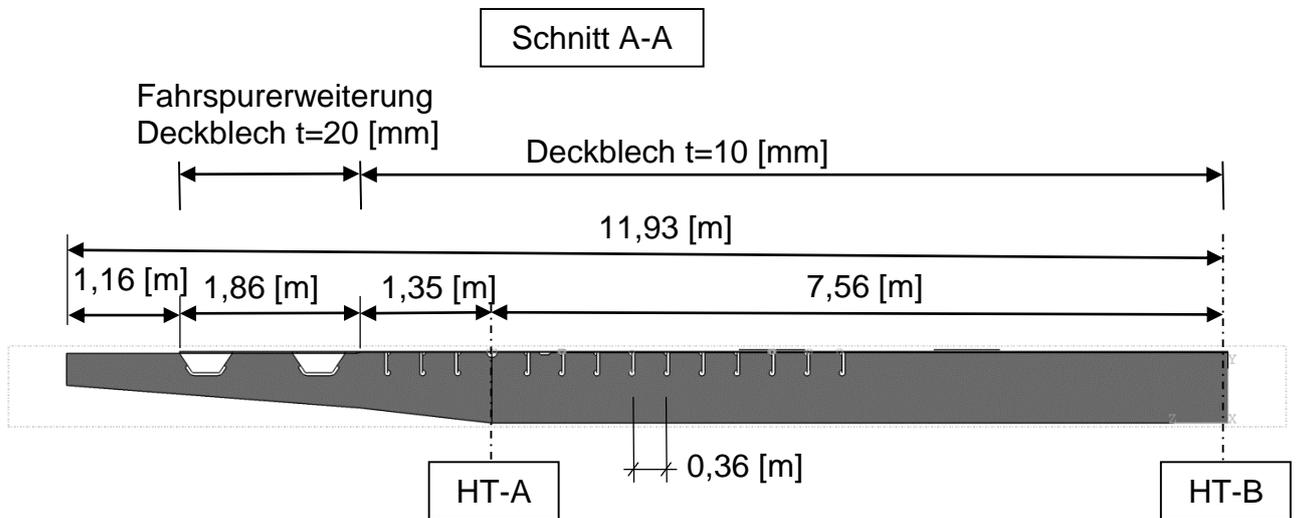


Abbildung 25: Querschnitt A-A - Modell A (ohne Belag)

## A 1.2.2. Bestandteile des Fahrbahndecks

### A 1.2.2.1. Deckblech

Das Deckblech wurde mit Hilfe von Kontinuumselementen, also mit Volumenkörpern modelliert, um auch Spannungsänderungen (in Dickenrichtung) über die Dicke abgreifen zu können.

Da das Deckblech aufgrund der nachträglich hergestellten Spurverbreiterung unterschiedliche Stärken aufweist, wird es in 2 Bereiche aufgeteilt:

- Bereich A: Deckblechdicke  $t_{DB,A} = 10 [mm]$
- Bereich B: Deckblechdicke  $t_{DB,B} = 20 [mm]$

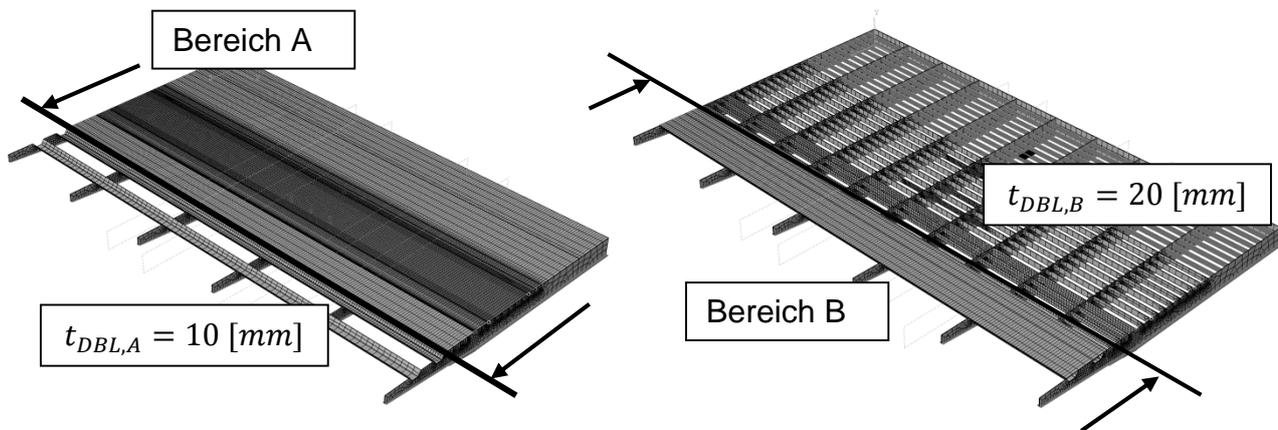


Abbildung 26: Isometrische Ansicht Modell A - Deckblech

### A 1.2.2.2. Hauptträger

Die globale Tragwirkung des Systems wurde hier nicht berücksichtigt, da die für die Ermüdung wirksamen Spannungen nur aus der örtlichen Tragwirkung des Fahrbahndecks rühren (Spannungsspiele aus der globalen Tragwirkung sind vernachlässigbar klein).

Die Hauptträgerstege wurden mit Schalenelementen mit einer Dicke von  $t_{HT} = 12 [mm]$  und einer Gesamthöhe von  $h_{HT} = 728 [mm]$  modelliert und sind an der unteren Kante vertikal starr gelagert (siehe Abbildung 27).

Das bedeutet, dass durch die angenommene vertikale Lagerung der gesamten Hauptträger, die globale Tragwirkung des Systems hier nicht berücksichtigt wurde. Die für die Ermüdung relevanten Spannungen entstehen durch lokale Effekte, weswegen der Einfluss der globalen Effekte vernachlässigt werden kann.

Der Abstand der beiden Hauptträger zueinander beträgt  $l_{HT} = 7560 [mm]$ .

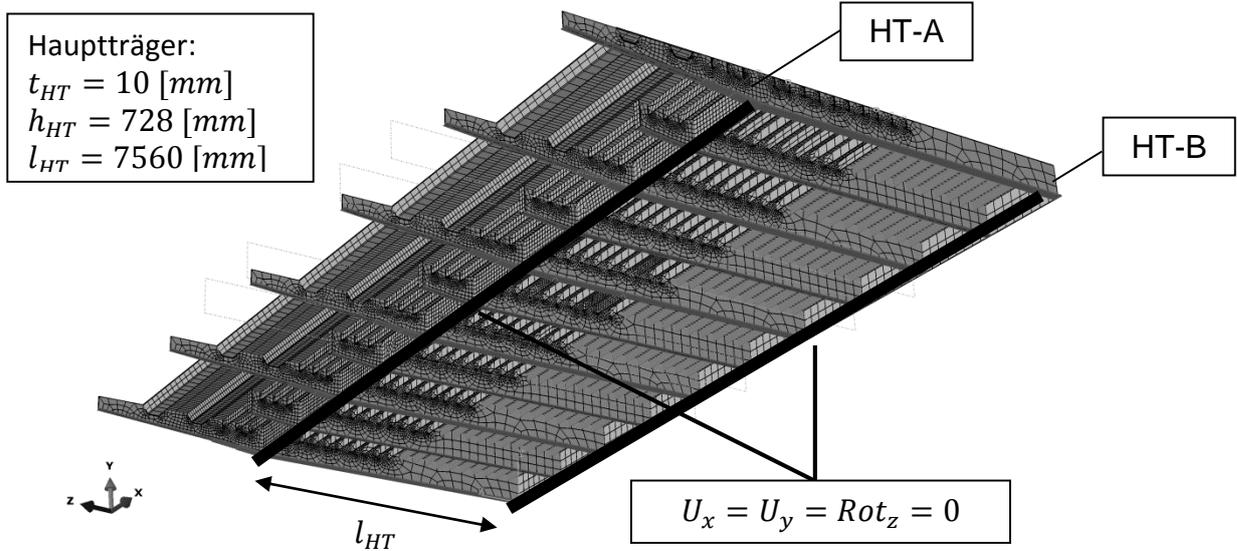


Abbildung 27: Isometrische Ansicht Modell A - Hauptträger

### A 1.2.2.3. Querrippen

Die Stege der Querrippen wurden mit Schalenelementen modelliert, mit einer Dicke von  $t_{QR} = 8 [mm]$  und einer Gesamthöhe von  $h_{QR} = 728 [mm]$ . Der Abstand der Querrippen untereinander beträgt 2000 [mm], wobei jede zweite Querrippe aufgrund der Fahrbahnverbreiterung verlängert wurde. Die Untergurte der Querrippen wurden als Stabelemente modelliert.

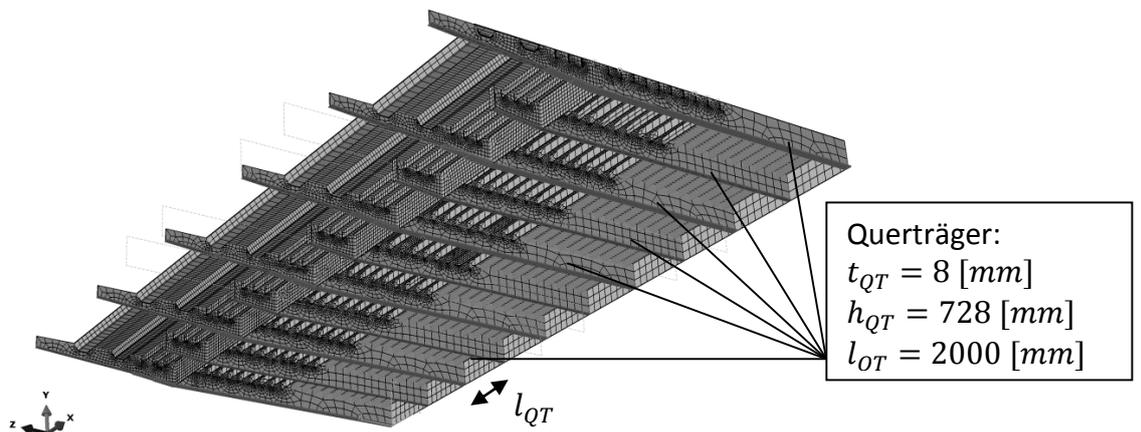


Abbildung 28: Isometrische Ansicht Modell A - Querträger

#### A 1.2.2.4. Längsrippen

Die offenen Längsrippen im Bereich A, bei einer Deckblechstärke von 10 [mm], sind als Schalenelemente modelliert mit einer Blechdicke von  $t_{LR,A} = 10$  [mm], einer Gesamthöhe von  $h_{LR,A} = 210$  [mm] und einem Achsabstand zueinander von  $l_{LR,A} = 360$  [mm]. Die Querrippen sind – angepasst an die reale Ausführung - bei den Längsrippenanschlüssen ausgeschnitten, sodass die Längsrippen durchlaufen und nur an einer Seite an die jeweilige Querrippe angeschweißt sind. (siehe Abbildung 29 und Abbildung 43)

Die Längsrippen im Bereich B, bei einer Deckblechstärke von 20 [mm], sind ebenfalls als Schalenelemente modelliert, wobei diese jedoch geschlossene, trapezförmige Längsrippen mit einer Stärke von  $t_{LR,B} = 12$  [mm] und einer Gesamthöhe von  $h_{LR,B} = 200$  [mm] sind, siehe Abbildung 30. Der Achsabstand zueinander beträgt  $l_{LR,B} = 1160$  [mm].

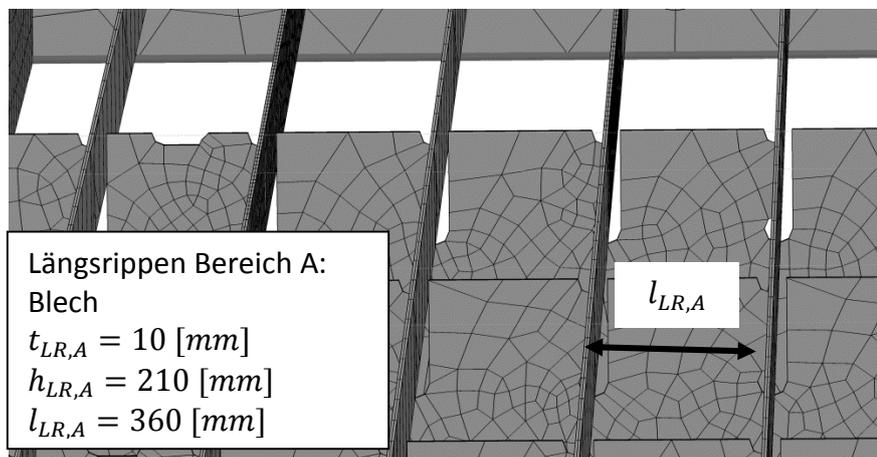


Abbildung 29: Anschluss Längsrippe an Querrippe Bereich - A

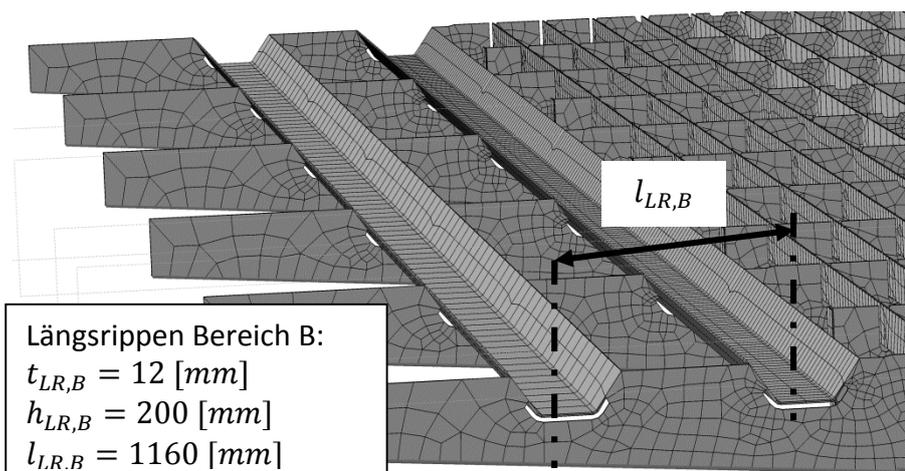


Abbildung 30: Anschluss Längsrippe an Querrippe Bereich - B

### A 1.2.3. Diskretisierung des FE-Modells im Detail

Die in diesem Unterkapitel gezeigte Diskretisierung wurde für die Ermittlung der Einflusslinien in Querrichtung am Modell A verwendet (siehe Kapitel A 1.5 Ermittlung der maßgebenden Laststellungen), um entscheiden zu können, welche der Längsrippen die höchste Beanspruchung erfährt.

Im Laufe der Arbeit wurde dann eine Diskretisierungsstudie an einem kleineren, lokalen Modell (siehe Kapitel A 2.3 Diskretisierungsstudie) durchgeführt und dann das Netz von Modell A verbessert, sodass die Rechenzeit verkürzt werden konnte, ohne die Ergebnisse damit negativ zu beeinflussen.

Für die Finite-Element-Berechnungen wurde das Softwarepaket Abaqus [7] verwendet.

#### A 1.2.3.1. Deckblech

Das Deckblech wurde mit Volumenelementen modelliert und es wurden parabolische Elemente gewählt. Über die Dicke des Bleches wurde eine Elementteilung durchgeführt, um die Spannungsänderung über die Dicke geeignet abbilden zu können. Es zeigte sich jedoch, dass ein Element über die Dicke des Deckbleches mit einem parabolischen Verformungsansatz die gewünschten Spannungsänderungen über die Dicke sehr gut abbildet. Im Weiteren wurde das Netz im Bereich der Längsrippen zwischen den beiden Hauptträgern verfeinert, um bessere Ergebnisse erzielen zu können. Abbildung 31 zeigt den gewählten Bereich der Netzverdichtung, in dem später die Belastung aufgebracht wurde.



Abbildung 31: Diskretisierung des Deckbleches

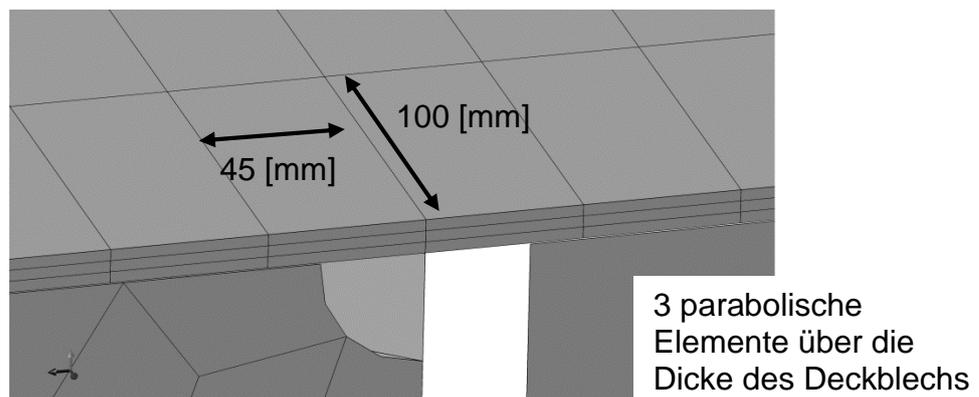


Abbildung 32: Diskretisierung des Deckbleches – Detail A

### A 1.2.3.2. Hauptträger

Die beiden Hauptträgerstege wurden mit Schalenelementen modelliert, wobei auch hier parabolische Elemente gewählt wurden. Abbildung 34 zeigt die definierte Elementgröße, welche gewählt wurde, wobei noch zu beachten ist, dass die beiden Hauptträger an den unteren Kanten vertikal starr gelagert sind und daher keine Verformungen der Hauptträger zu erwarten sind.

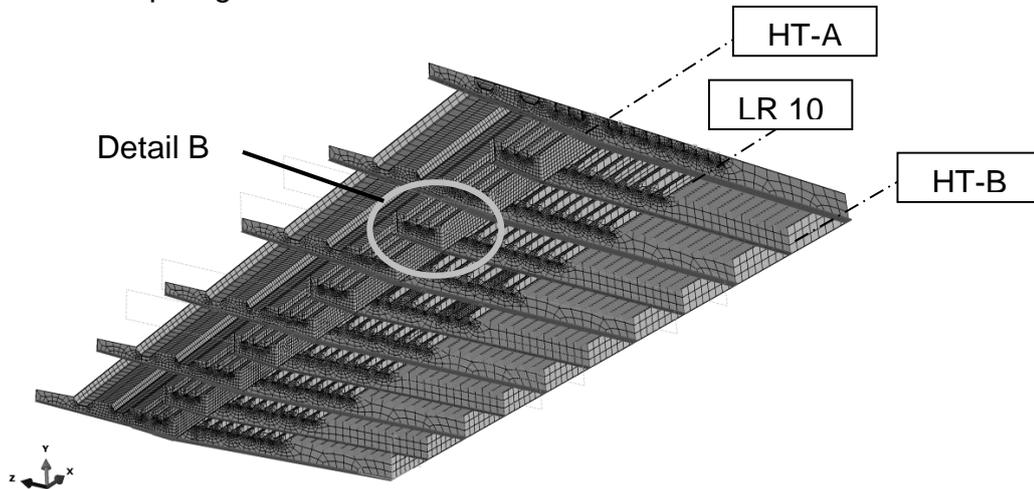


Abbildung 33: Diskretisierung des Hauptträgers – Übersicht

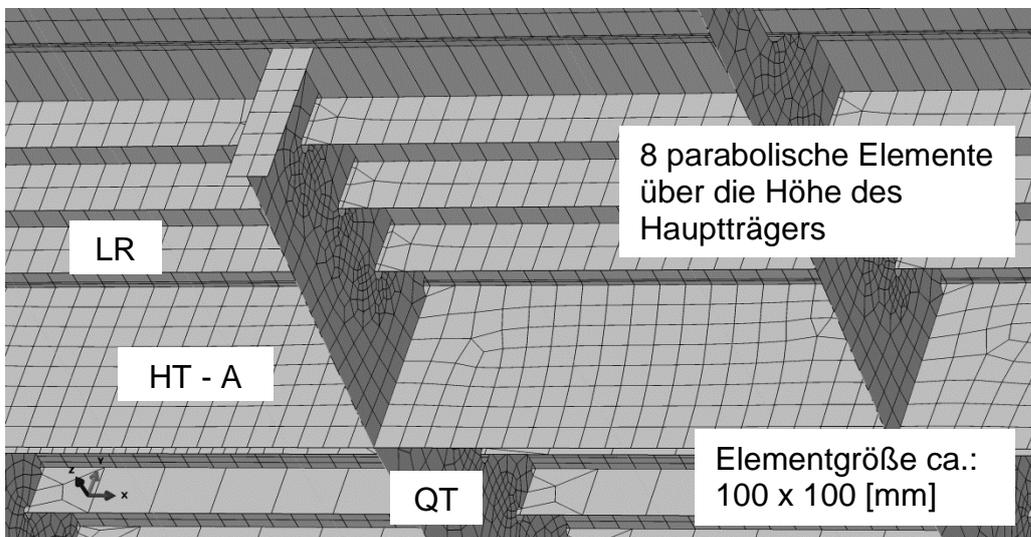


Abbildung 34: Diskretisierung des Hauptträgers – Detail B

### A 1.2.3.3. Querrippen

Die Querrippen wurden ebenfalls als Schalenelementen mit parabolischen Eigenschaften modelliert, wobei die Querrippen an den Längsrippenanschlüssen ausgeschnitten wurden, wie es in Abbildung 29 bereits dargestellt wurde. Die Untergurte der Querrippen wurden als Stabelemente modelliert.

#### ***A 1.2.3.4. Längsrippen***

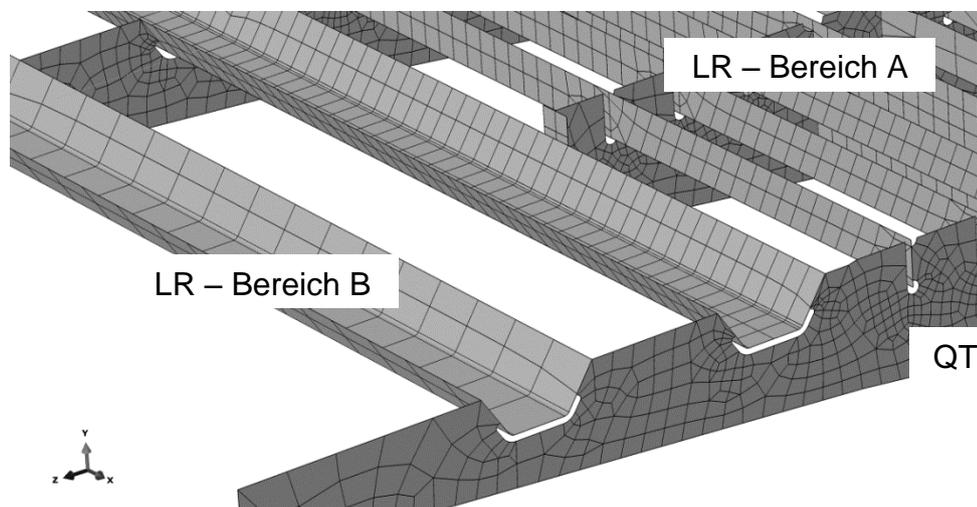
##### **Bereich A (offene Steifen zw. HT-A und HT-B):**

Im Allgemeinen weisen die Längsrippen im Bereich A eine relativ grobe Elementteilung auf, da sie in der Regel zwei parabolische Elemente über die Höhe aufweisen und sich die Länge der Elemente auf 250 [mm] erstreckt. Da für die Längsrippen ein über die Höhe linear veränderlicher Normalspannungsverlauf zu erwarten ist, und ein parabolisches Element einen solchen Spannungsgradienten abbilden kann, darf die gewählte Elementteilung zur Erfassung globaler Effekte als ausreichend erachtet werden. An den Anschlussbereichen der Längsrippen an die Querträger wurde eine Netzverdichtung durchgeführt (siehe Abbildung 34), da dort die lokalen Längsnormalspannungen abgegriffen wurden. Diese Schweißnähte der Anschlüsse sind eines der wesentlichen Kerbdetails einer orthotropen Platte. In Abbildung 34 sind die Netze der Längsrippen dargestellt. Vom Hauptträger A beginnend bis in die Feldmitte wurden 10 Längsrippen als Schalenelemente abgebildet, wobei sich Längsrippe 10 in der Mitte der beiden Hauptträger befindet. Alle weiteren Längsrippen hin zu Hauptträger B wurden als Stabelemente modelliert, siehe Abbildung 33.

Mit diesen FEM Netzen wurden die lokalen Spannungen an den Anschlussstellen der Längsrippen an die Querträger (siehe Kapitel A 1.3.3 und Kapitel A 1.3.4) abgelesen und dann Einflusslinien in Brückenquerrichtung erstellt, um dann entscheiden zu können, welche der Längsrippen die größten Beanspruchungen erfährt und somit maßgebend wird. In einem weiteren Schritt wurden dann diese Längsrippen in einem gewissen Einflussbereich für eine Netzverfeinerung ausgewählt. Im Zuge dessen wurde eine allgemeine Optimierung des FEM Netzes des gesamten Modells durchgeführt, um dann Berechnungen am Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) und Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund) überhaupt ermöglichen zu können.

##### **Bereich B (geschl. Steifen im auskragenden Bereich d. Brückenquerschnitts):**

Die Netzteilung der geschlossenen Längsrippen im Bereich B (im auskragenden Bereich des Brückenquerschnitts) ist in Abbildung 35 zu sehen. Es wurden hier keine Netzverfeinerungen vorgenommen, da dieser Bereich für eine Untersuchung der Detailbereiche nicht relevant ist. Auch hier kamen parabolische Schalenelemente zum Einsatz.



**Abbildung 35: Diskretisierung der Längsrippen – Bereich B**

## A 1.3. Untersuchte Detailbereiche

In dieser Arbeit wurden zwei der wesentlichen Kerbdetails einer orthotropen Platte bei der Berechnung ihrer Restlebensdauer genauer untersucht werden. Weiters soll diese Arbeit dann Aufschluss geben, über die laut Eurocode EN 1991 Teil 2 zulässige Lastausbreitung durch den Belag, welche die lokalen Spannungen deutlich günstig beeinflusst.

In den folgenden Kapitel A 1.3.1 bis A 1.3.4 werden diese Detailpunkte genauer beschrieben und dargestellt.

### A 1.3.1. Detail D1

Detailbereich D1 ist der Anschluss der Längsrippe an das Deckblech, wobei die Spannungsspiele aus Deckblechquerbiegung zufolge Verkehrslasten an der Unterkante des Deckbleches interessant sind (maßgebender Kerbfall), wie in Abbildung 36 dargestellt.

Trotz der zu erwartenden Druckspannungen infolge der Belastung durch den Verkehr auf der Brücke ist dieses Detail maßgebend, da hier hohe Zugeigenspannungen aus dem Herstellprozess vorliegen können.

Da vorerst Einflusslinien in Brückenquerrichtung für diesen Detailbereich erstellt wurden, mit denen dann die am stärksten beanspruchte Längsrippe ausgewählt wurde, wurden die Normalspannungen an der Unterkante des Deckbleches direkt an der Achse der Längsrippe abgelesen.

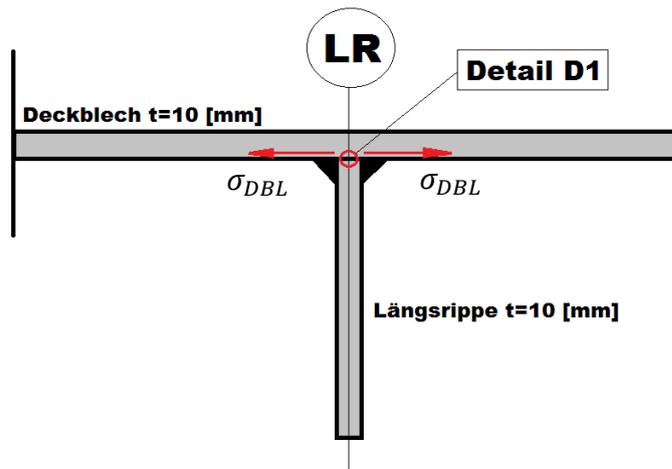


Abbildung 36: Modell A – Detail D1

Es ist zu erwarten, dass in Feldmitte zwischen zwei Querträgern die größten Normalspannungen im Deckblech in Brückenquerrichtung auftreten, daher wurde der Pfad 1 entsprechend gewählt, wie er in Abbildung 37 dargestellt ist.

Abbildung 38 zeigt die Einflusslinie der Achsart B (Abbildung 49) in Längsrichtung der Brücke (für LR-9), wobei der Nullpunkt der Abszissenachse der Lage der Achse mittig über dem Detailpunkt entspricht, wie es in Abbildung 37 dargestellt ist.

Es ist zu erkennen, dass die höchsten Spannungen auftreten, wenn sich die Resultierende der Belastung direkt über Detailpunkt D1 befindet.

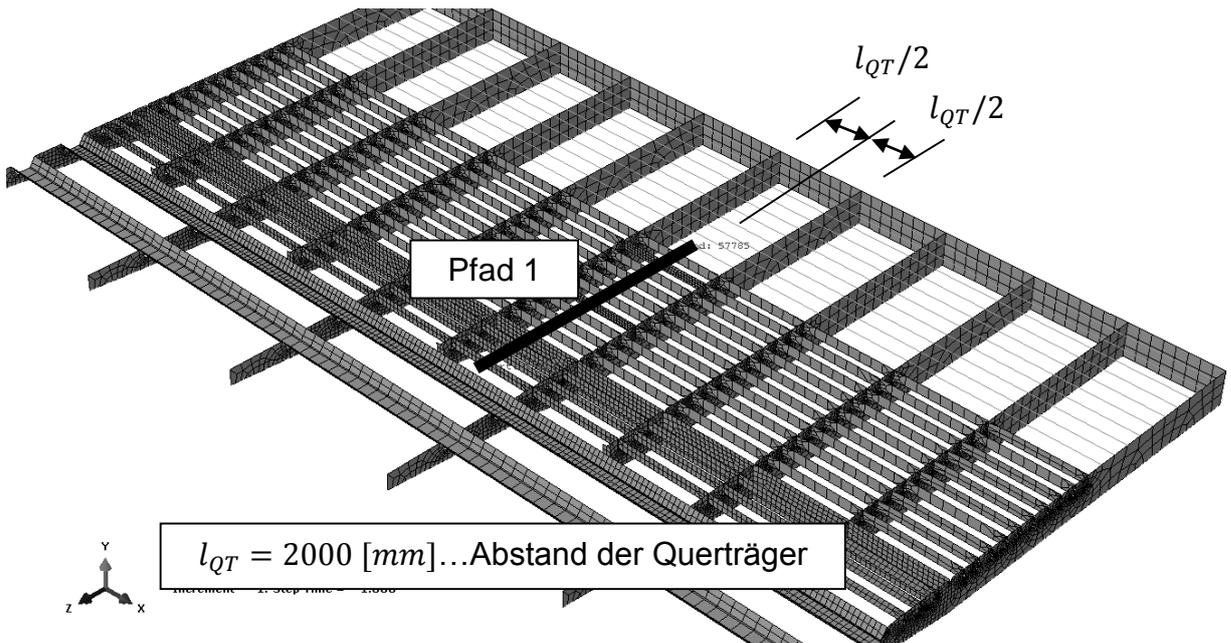


Abbildung 37: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad 1

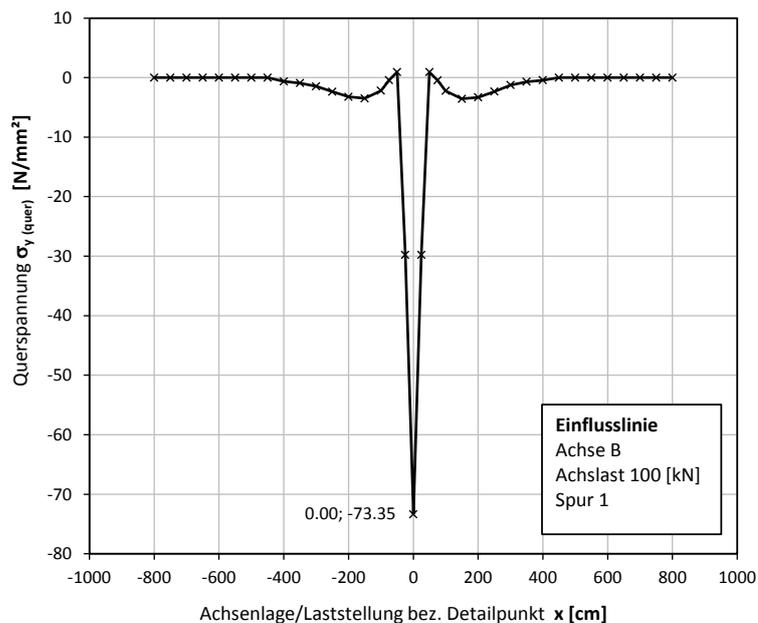


Abbildung 38: Einflusslinie in Brückenlängsrichtung Detail D1 bei LR-9 – Überfahrt Achse B

Mit dem Detailbereich D1 sollte eine Längsrippe gewählt werden, die sich möglichst nahe dem Hauptträger befindet und daher vertikal besser gestützt wird als die innenliegende Längsrippe.

Abbildung 40 zeigt, welche Punkte dafür in Frage kommen (LR-1 bzw. LR-2). Die endgültige Entscheidung kann erst nach Auswertung der Einflusslinien in Querrichtung getroffen werden. Es ergab sich, dass das Detail D1 bei LR-2 maßgebend wird.

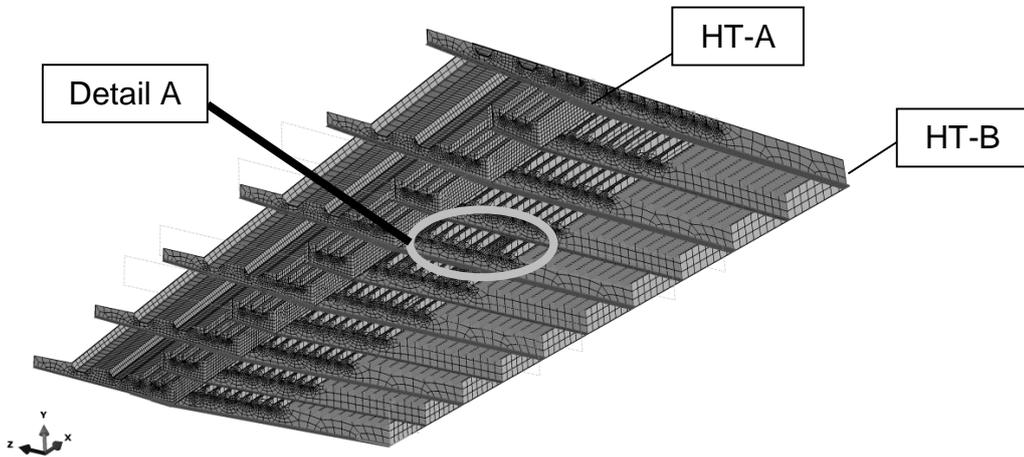


Abbildung 39: Modell A - Übersicht: Ansicht von unten

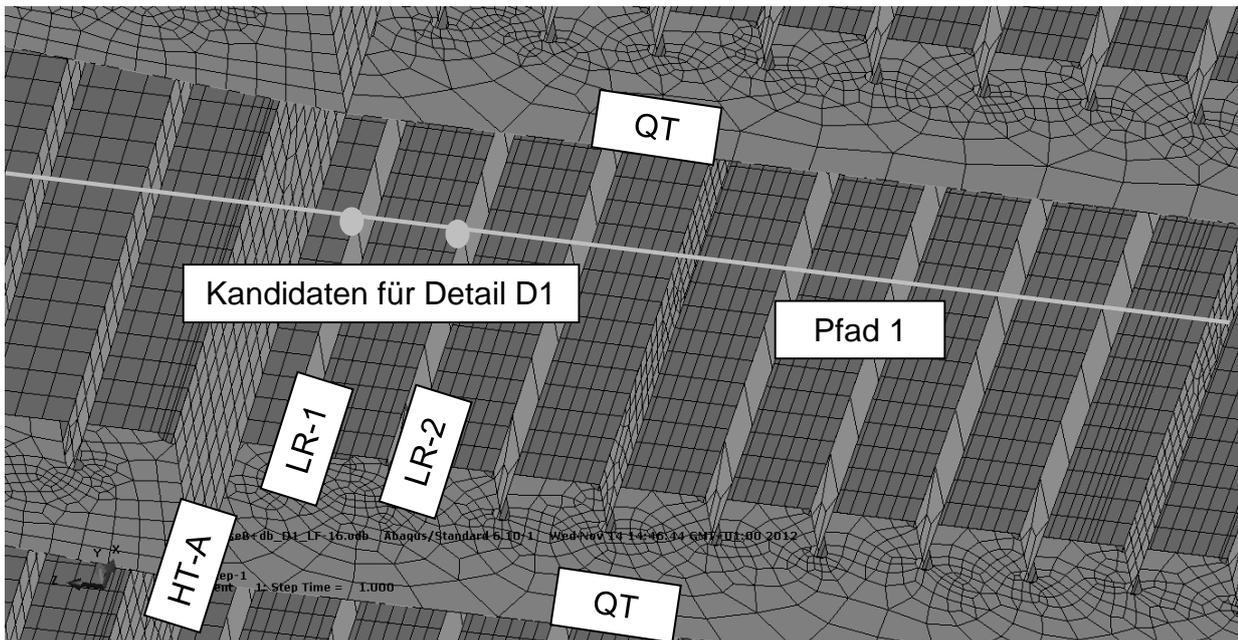


Abbildung 40: Modell A – Detail A

### A 1.3.2. Detail D1\*

Detailbereich D1\* ist wie Detailbereich D1 der Anschluss der Längsrippe an das Deckblech, wobei hier nicht eine Längsrippe möglichst nahe dem Hauptträger betrachtet werden sollte, sondern eine Längsrippe möglichst in Feldmitte zwischen den beiden Hauptträgern.

Wie in Abbildung 41 dargestellt ist, wurden wie bei Detailpunkt D1 die Normalspannungen an der Unterkante des Deckbleches abgelesen.

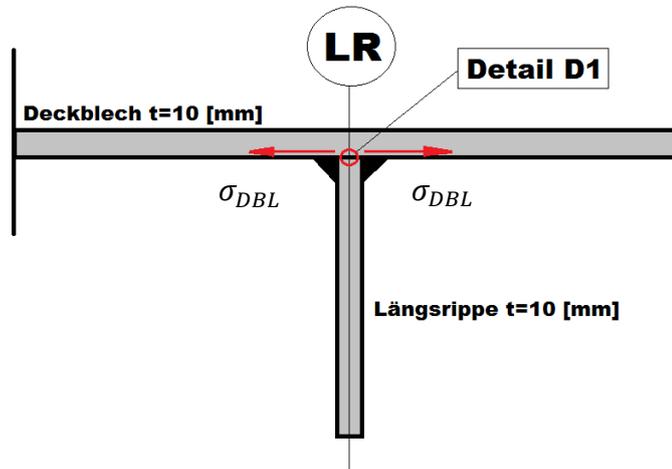


Abbildung 41: Modell A – Detail D1\*

Abbildung 42 zeigt, welche Punkte dafür in Frage kommen (LR-8 bis LR-10). Die endgültige Entscheidung, welche Längsrippe maßgebend ist kann erst nach Auswertung der Einflusslinien in Querrichtung getroffen werden.

Bedingt durch die geringen Unterschiede im Tragverhalten und die vereinfachte Modellbildung der Längsrippen neben LR-10, wurde das Detail D1\* bei LR-8 festgelegt.

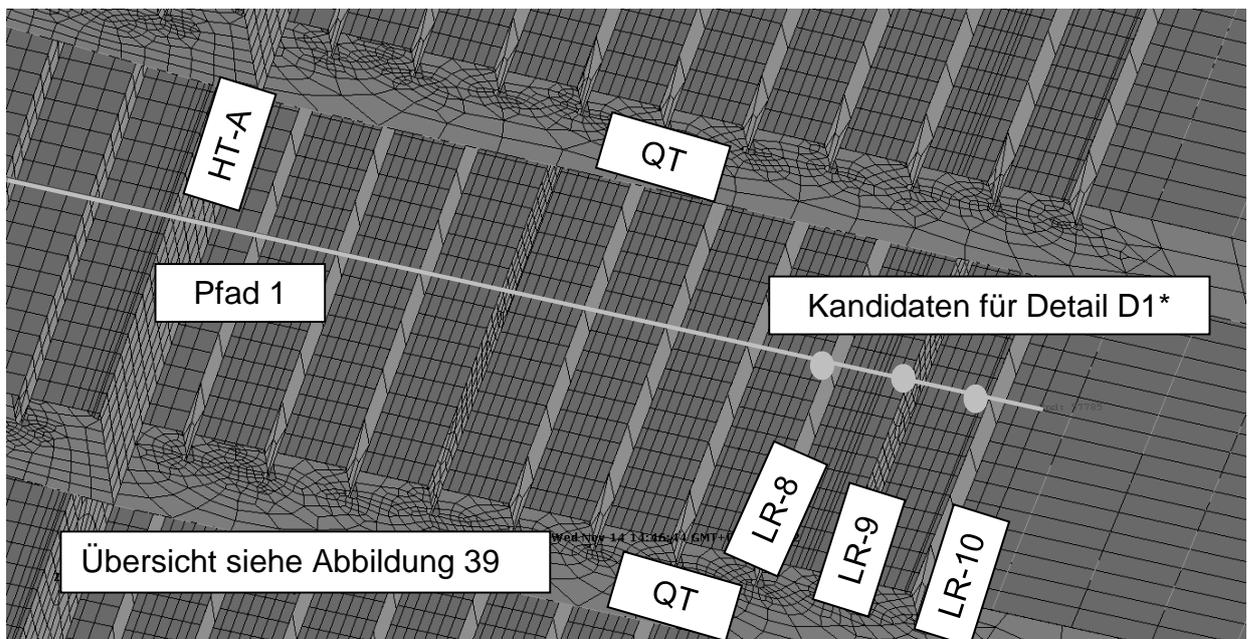


Abbildung 42: Modell A – Detail A

### A 1.3.3. Detail D2

Der Detailbereich D2 (siehe Abbildung 43) ist der Anschluss der Längsrippe an den Querträger bzw. die Querrippe, wobei hier eine Längsrippe ähnlich wie in Detailbereich D1 (Kapitel A 1.3.1) betrachtet werden sollte, die sich möglichst nahe dem Hauptträger A befindet.

Die für dieses Kerbdetail maßgebende Spannung ist die Längsnormalspannung der Längsrippe an deren Unterkante, da hier die größten Spannungen auftreten. Für die Ermittlung der Einflusslinien ist die Spannung an der Unterkante ausreichend, die Berechnung der Schädigungen an diesem Detailpunkt an der Praterbrücke wurden jedoch mit den maximalen Spannungen in Höhe der Schweißnaht an der Ausrundung durchgeführt.

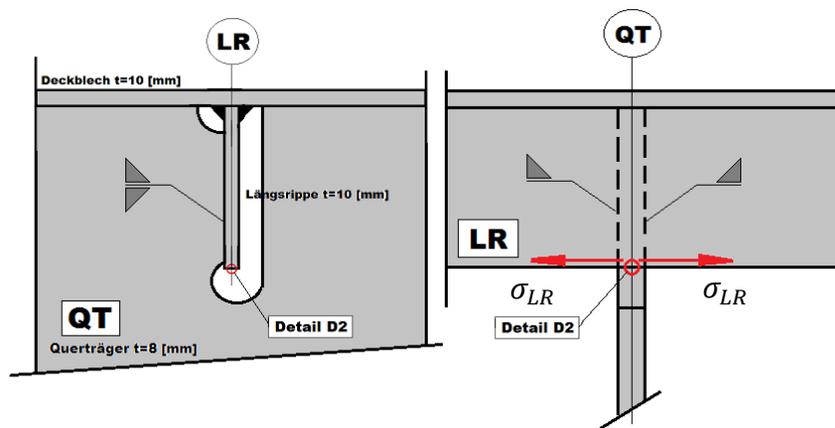


Abbildung 43: Modell A – Detail D2

Die Längsnormalspannungen der Längsrippen wurden entlang des Pfades 2 – direkt bei der Querrippe - abgegriffen und daraus wurden dann die benötigten Einflusslinien erstellt.

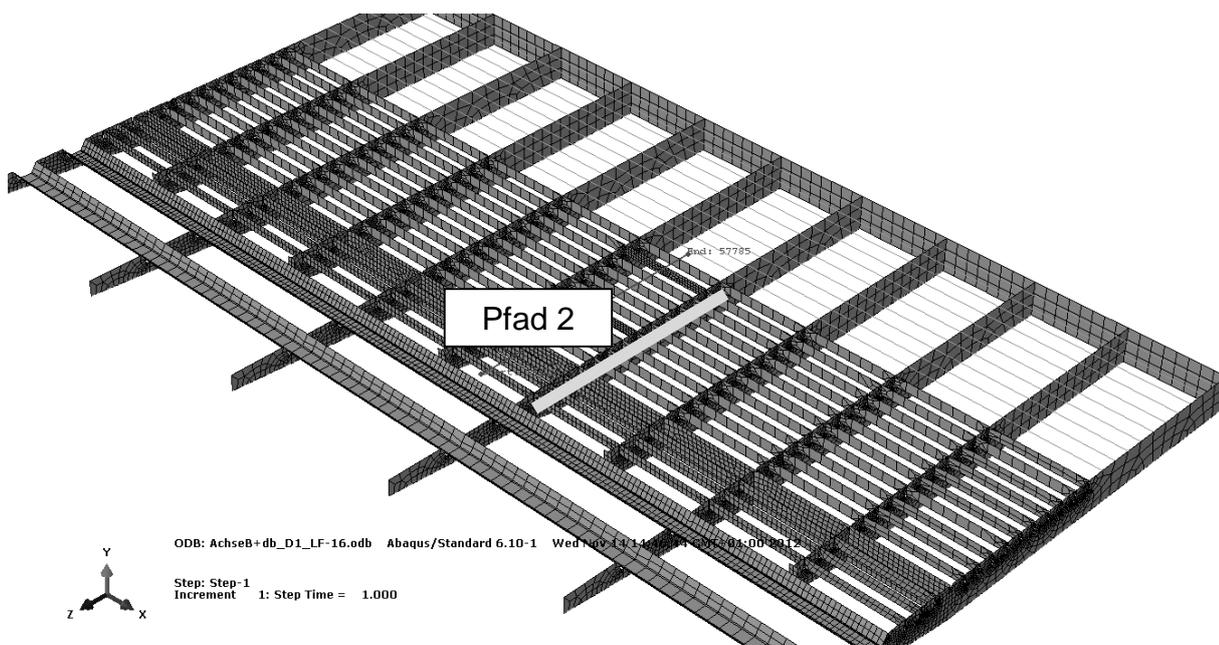


Abbildung 44: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad 2

Abbildung 45 zeigt eine Einflusslinie in Längsrichtung der Brücke von Detailpunkt D2 bei Längsrippe LR-4. Daraus kann man erkennen, dass der betrachtete Detailpunkt die größte Beanspruchung erfährt, wenn sich die Resultierende der Belastung im Abstand von 70 - 80 [cm] vom Detailpunkt entfernt befindet. Diese für LR-4 zutreffende Lage wurde vereinfacht für alle anderen Längsrippen übernommen.

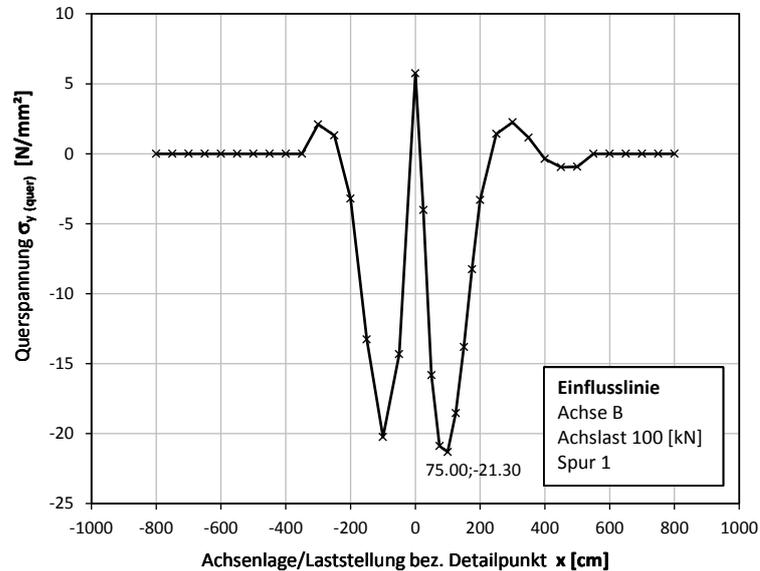


Abbildung 45: Einflusslinie in Brückenlängsrichtung Detail D2 bei LR-4 – Überfahrt Achse B

Abbildung 46 zeigt die möglichen Detailpunkte für D2. Maßgebend ist jene Längsrippe, die an den in der Abbildung markierten Punkten die größten Spannungen aufweist. Maßgebend wird das Detail D2 bei Längsrippe LR-2.

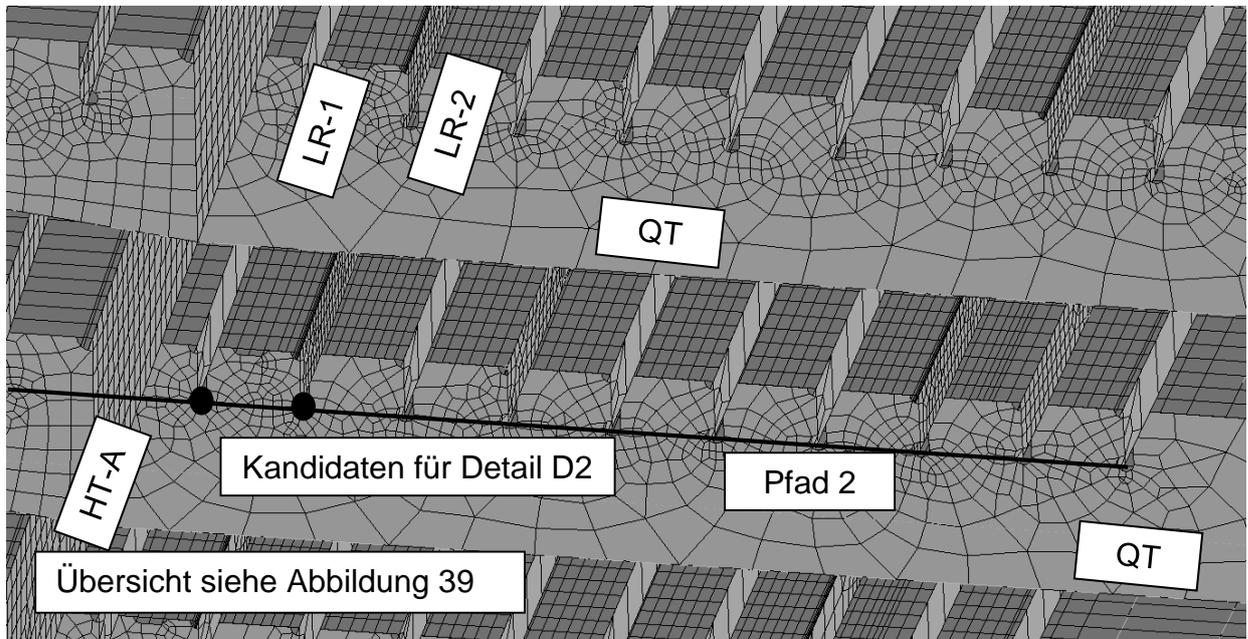


Abbildung 46: Modell A – Detail A

### A 1.3.4. Detail D2\*

Am Detailbereich D2\* wurden die gleichen Spannungen wie bei Detailbereich D2 (siehe Kapitel A 1.3.3) abgelesen. Dieser Detailpunkt unterscheidet sich lediglich durch seine Position im Querschnitt der Brücke, so befindet sich Detailpunkt D2\* mittig zwischen den beiden Hauptträgern bei Längsrippe LR-8.

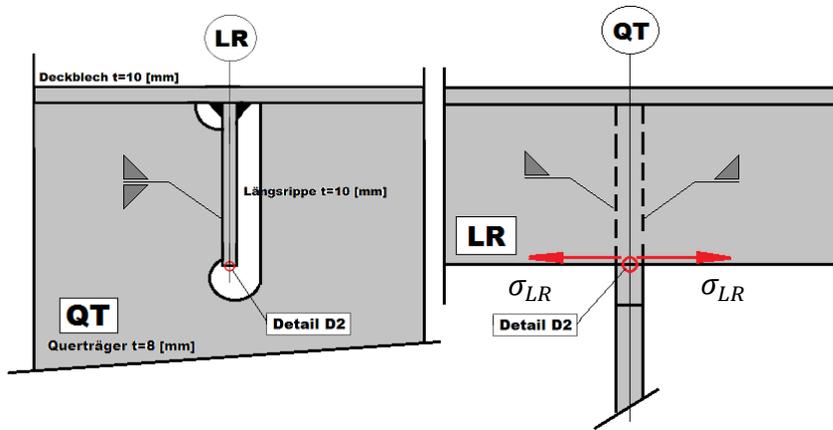


Abbildung 47: Modell A – Detail D2\*

Abbildung 48 zeigt die möglichen Detailpunkte für D2\*. Maßgebend ist jene Längsrippe, die an den in der Abbildung markierten Punkten die größten Spannungen aufweist, es ist dies LR-8.

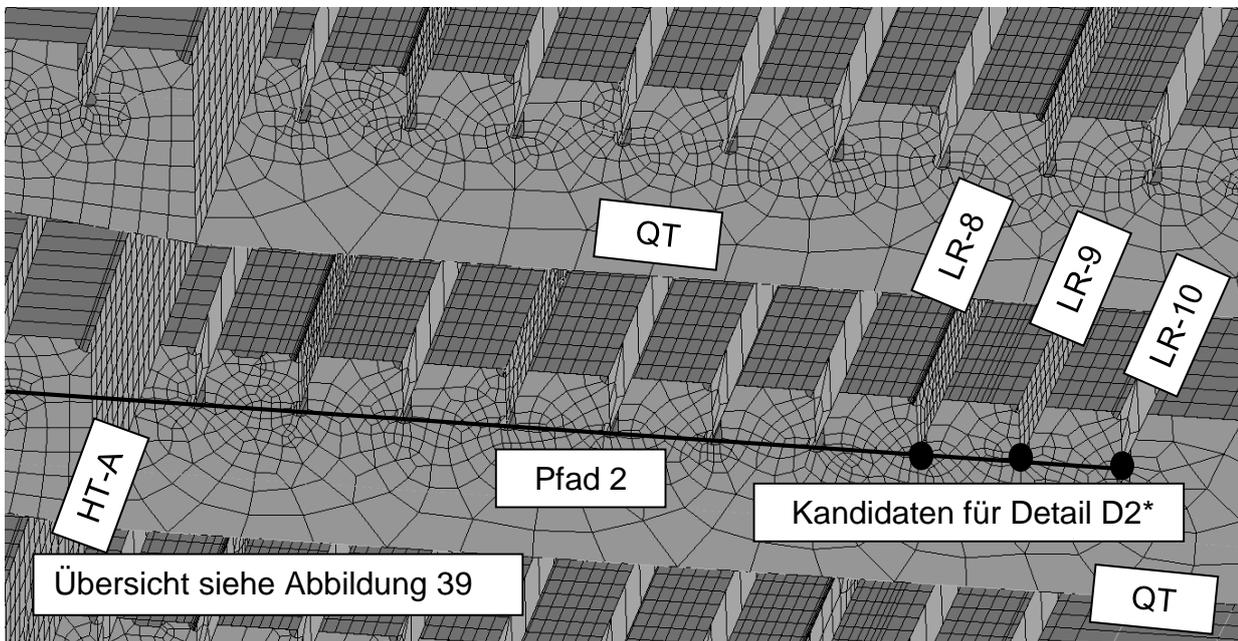


Abbildung 48: Modell A – Detail A

## A 1.4. Belastung zur Ermittlung der Einflusslinien

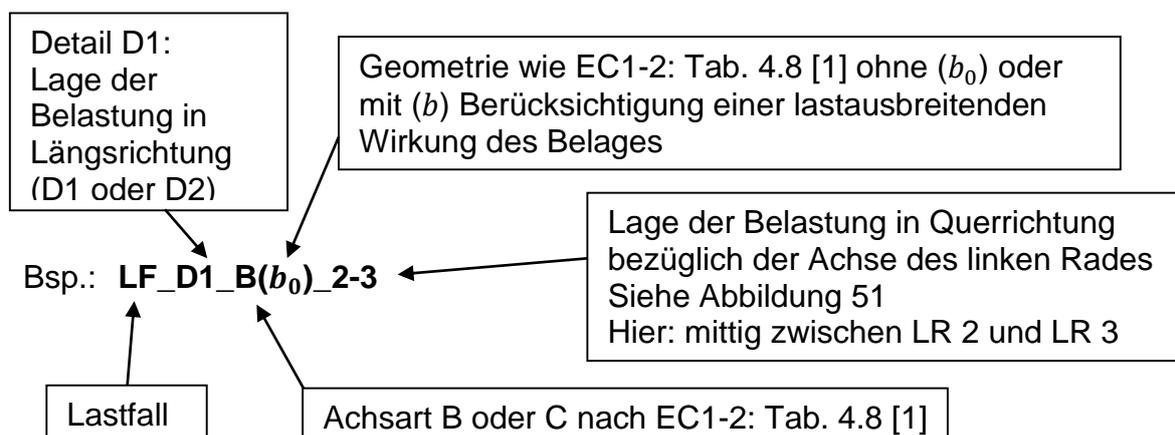
### A 1.4.1. Allgemein

Um entscheiden zu können, welche der Längsrippen für die jeweiligen Detailbereiche maßgebend sind, war es erforderlich für jede Längsrippe eine Einflusslinie in Querrichtung zu erstellen, wobei dies mit der Achsart B sowie Achsart C erfolgte. Die Achsarten sind dem Eurocode 1, Teil 2 – Tabelle 4.8 [1], entnommen (siehe Abbildung 49). Die Achsen wurden beginnend von der Achse des Hauptträgers A weg in Richtung Brückenmitte immer um den halben Abstand der Längsrippen ( $e = 180 \text{ mm}$ ) weiterschoben und die Spannungen an den in Kapitel A 1.3 beschriebenen Punkten für jede dieser Achslagen abgenommen, sodass sich für jeden Lastfall ein Spannungsverlauf pro Detail ergab mit denen dann die gewünschten Einflusslinien generiert werden konnten.

AXLE/WHEEL TYPES	GEOMETRICAL DEFINITION
A	
B	
C	

Abbildung 49: EN 1991-2: Tabelle 4.8 – Definition der Radaufstandsflächen u. Radabstände

Es wurde eine standardisierte Formatierung der Bezeichnungen, wie sie in Kapitel A 1.4.2 genauer erklärt ist, gewählt, um eine gewisse Transparenz bezüglich der Positionen der Lasten zu schaffen.



## Modell A (ohne Belag)

Die Achsen B und C laut EN 1991-2: Tab. 4.8 [1] wurden als Flächenlasten angesetzt, sowohl mit den in der Tabelle angegebenen Abmessungen (Abbildung 49), als auch unter einer Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages, wie es der Eurocode gemäß EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässt (siehe Abbildung 52). Es wurde von einer Belagsdicke  $t = 70$  [mm] ausgegangen.

Abbildung 51 zeigt die gewählten Laststellungen in Querrichtung der Brücke beginnend vom Hauptträger A in die Brückenmitte bis Längsrippe 10, da dies die letzte Längsrippe ist, die mit Schalenelementen modelliert wurde und sich in der Mitte der beiden Hauptträger befindet. Alle weiteren Längsrippen wurden als Stabelemente modelliert.

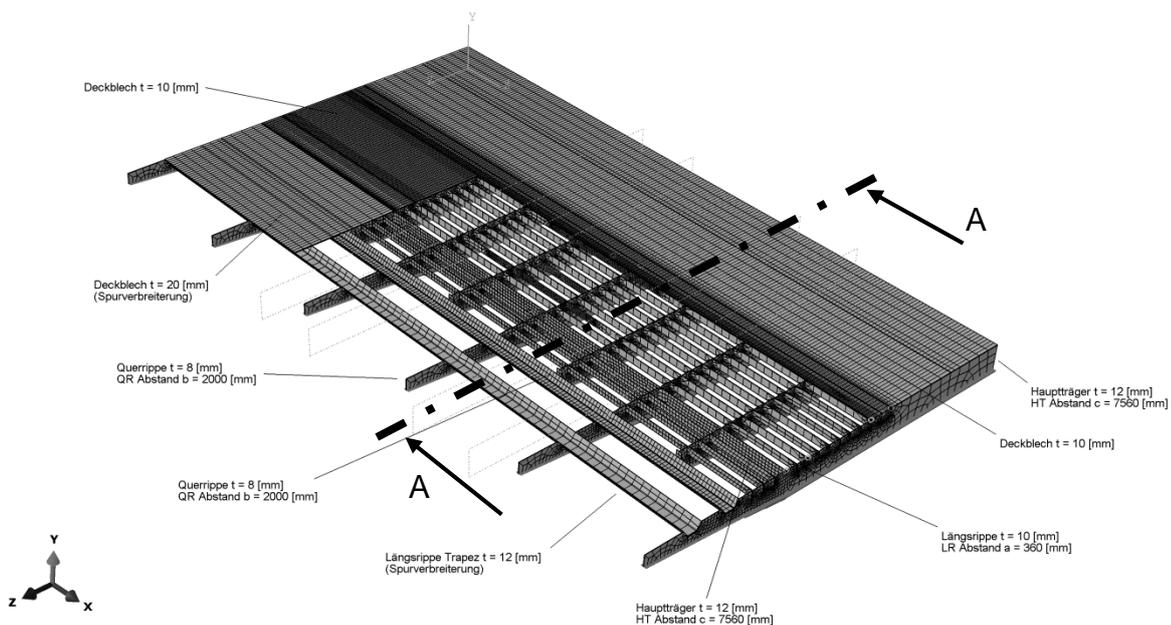


Abbildung 50: Laststellungen in Querrichtung der Brücke - Übersicht

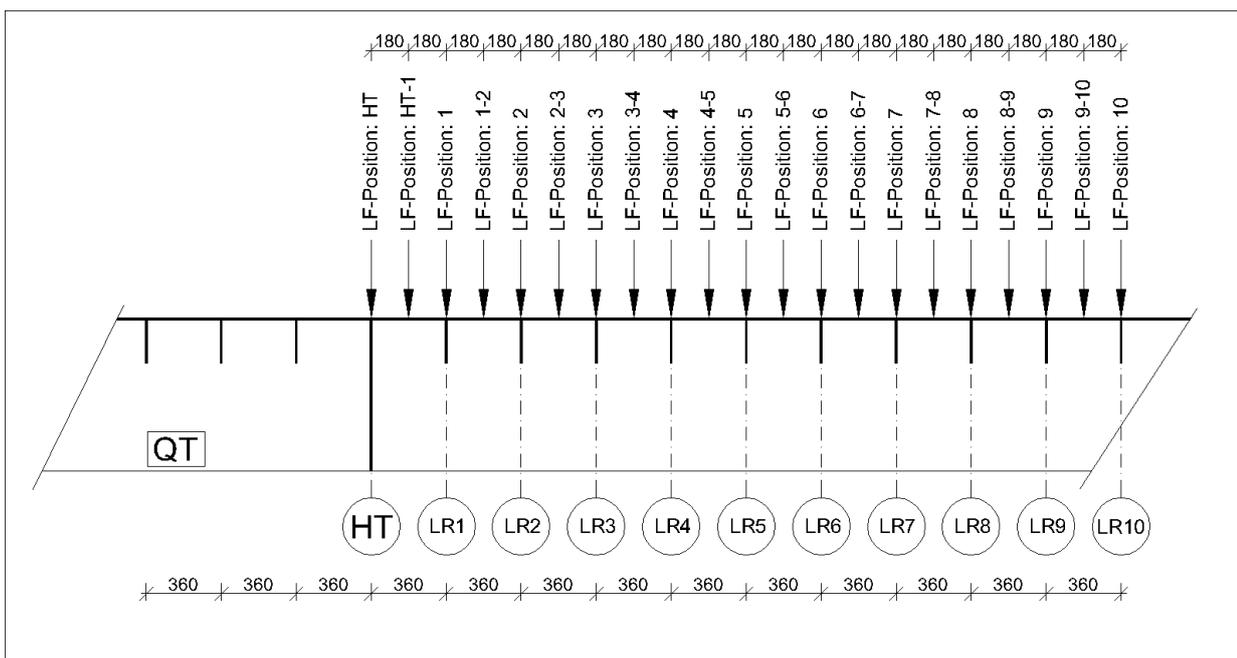


Abbildung 51: Laststellungen in Querrichtung der Brücke – Schnitt A-A

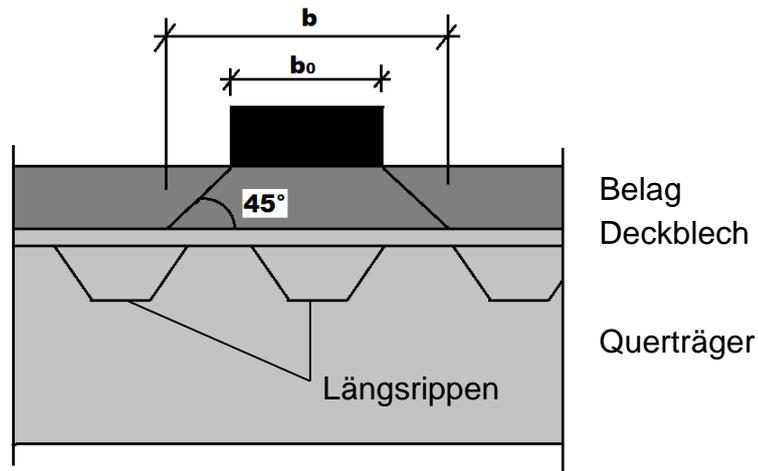


Abbildung 52: Lastausbreitungswinkel nach EN 1991-2: 4.3.6 (3)

Da die Spannungen nicht nur von einer Variation der Laststellung in Querrichtung, sondern auch von einer unterschiedlichen Laststellung der Achsen in Längsrichtung abhängig sind, müssen für Detail D1 und Detail D2 unterschiedliche Laststellungen in Längsrichtung generiert werden.

Bei Detail D1 treten die maximalen Spannungen an der Unterkante des Deckblechs am Anschluss der Längsrippe auf, wenn die fiktive Achse genau mittig zwischen zwei benachbarten Querträgern steht.

Bei Detail D2 treten die maximalen Spannungen an der Unterkante der Längsrippe am Anschluss an den Querträger auf, wenn die fiktive Achse im Abstand von 700 [mm] vom Querträger entfernt aufgestellt wird.

Darum wird bei den Bezeichnungen der Lastfälle zwischen Detail D1 und Detail D2 unterschieden, dieser Index beschreibt somit die Laststellung in Längsrichtung der modellierten Brücke.

Für alle Laststellungen wurde eine einheitliche Achslast von  $F = 100 \text{ [kN]}$  gewählt, um die daraus folgenden Ergebnisse miteinander vergleichen zu können. Da die Radaufstandsflächen in ihren Abmessungen variieren ergeben sich unterschiedliche Flächenpressungen auf das Deckblech.

**Achse B( $b_0$ ):** Abmessungen der Radaufstandsflächen der Achsart B nach Abbildung 49 ohne Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages.

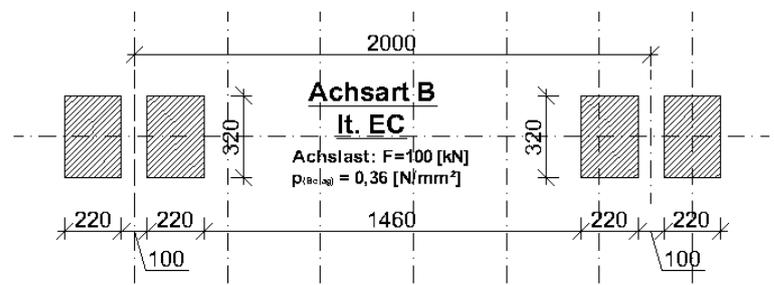


Abbildung 53: Achsart B ohne lastverteilende Wirkung des Belags

$$p = \frac{F}{4 \cdot a_0 \cdot b_0} = \frac{100 \cdot 10^3}{4 \cdot 320 \cdot 220} = 0,36 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Achslast  $F = 100 \text{ [kN]}$

$a_0$  = Länge der Radaufstandsfläche

$b_0$  = Breite der Radaufstandsfläche

**Achse B(b):**

Abmessungen der Radaufstandsflächen der Achsart B nach Abbildung 49 mit Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages.

Belagsdicke:  $t_{Belag} = 70 \text{ [mm]}$



Abbildung 54: Achsart B mit lastverteiler Wirkung des Belages

$$p = \frac{F}{2 \cdot a \cdot b} = \frac{100 \cdot 10^3}{2 \cdot 460 \cdot 680} = 0,16 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$a = a_0 + 2 \cdot t_{Belag} = 320 + 2 \cdot 70 = 460 \text{ [mm]}$$

$$b = 2 \cdot b_0 + 2 \cdot t_{Belag} + 100 = 2 \cdot 220 + 2 \cdot 70 + 100$$

$$b = 680 \text{ [mm]}$$

Achslast  $F = 100 \text{ [kN]}$

$a_0$  = Länge der Radaufstandsfläche

$b_0$  = Breite der Radaufstandsfläche

$a$  = Länge der Radaufstandsfläche mit Lastverteilung

$b$  = Breite der Radaufstandsfläche mit Lastverteilung

$t_{Belag}$  = Dicke des Belages

**Achse C( $b_0$ ):**

Abmessungen der Radaufstandsflächen der Achsart C nach Abbildung 49 ohne Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belages.

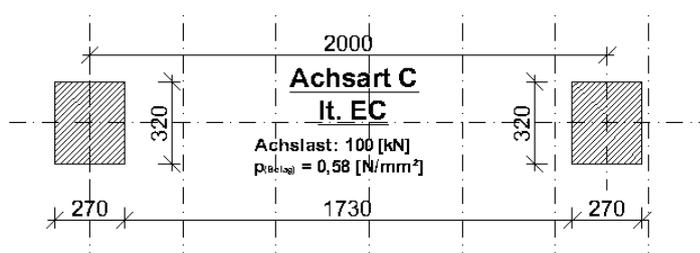


Abbildung 55: Achsart C ohne lastverteilende Wirkung des Belages

$$p = \frac{F}{2 \cdot a_0 \cdot b_0} = \frac{100 \cdot 10^3}{4 \cdot 320 \cdot 270} = 0,58 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

Achslast  $F = 100$  [kN]

$a_0$  = Länge der Radaufstandsfläche

$b_0$  = Breite der Radaufstandsfläche

**Achse C(b):**

Abmessungen der Radaufstandsflächen der Achsart C nach Abbildung 49 mit Berücksichtigung einer lastausbreitenden Wirkung des Belags.



**Abbildung 56: Achsart C mit lastverteilender Wirkung des Belags**

$$p = \frac{F}{2 \cdot a \cdot b} = \frac{100 \cdot 10^3}{4 \cdot 460 \cdot 410} = 0,27 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$$

$$a = a_0 + 2 \cdot t_{Belag} = 320 + 2 \cdot 70 = 460 \text{ [mm]}$$

$$b = b_0 + 2 \cdot t_{Belag} + 100 = 270 + 2 \cdot 70 = 410 \text{ [mm]}$$

Achslast  $F = 100$  [kN]

$a_0$  = Länge der Radaufstandsfläche

$b_0$  = Breite der Radaufstandsfläche

$a$  = Länge der Radaufstandsfläche mit Lastverteilung

$b$  = Breite der Radaufstandsfläche mit Lastverteilung

$t_{Belag}$  = Dicke des Belags

## A 1.4.2. Laststellungen für Detail D1

### A 1.4.2.1. Achse B

Abbildung 57 zeigt die Laststellung der Achse B, ohne Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D1\_B( $b_0$ )\_HT**

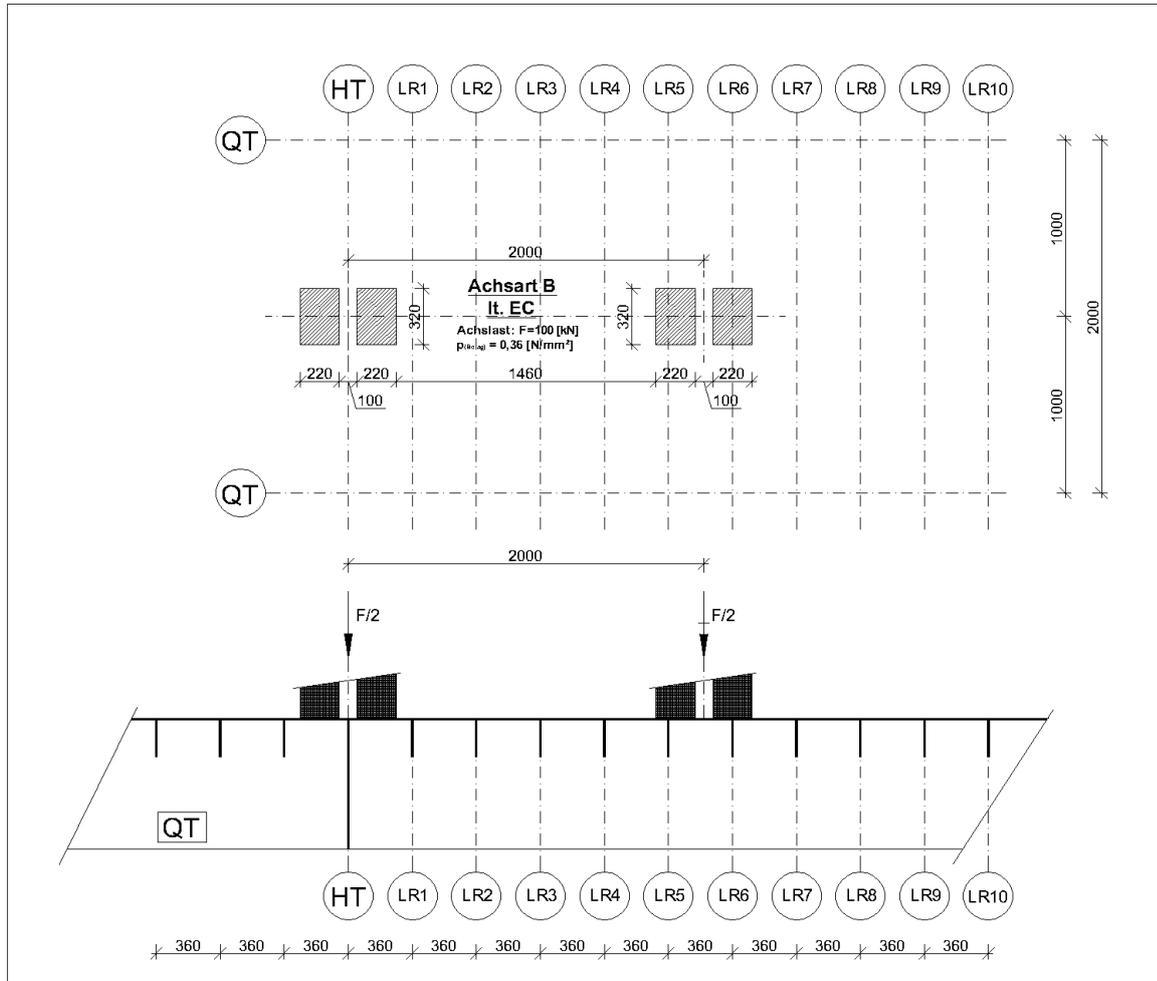


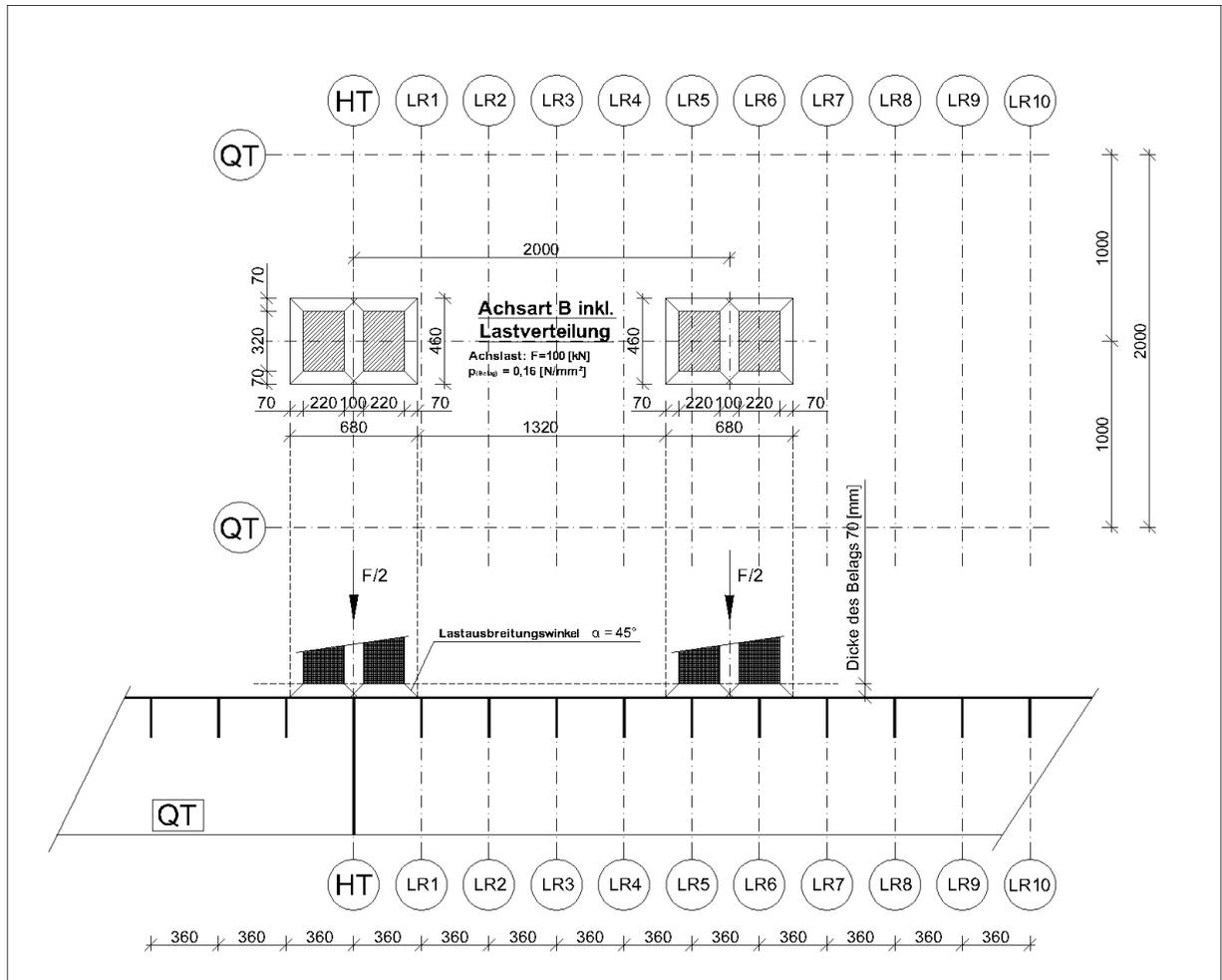
Abbildung 57: Laststellung Achsart B( $b_0$ ) für Detail D1

Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180$  [mm] in Brückenquerrichtung weitergeschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

LF_D1_B( $b_0$ )_HT	LF_D1_B( $b_0$ )_3-4	LF_D1_B( $b_0$ )_7
LF_D1_B( $b_0$ )_HT-1	LF_D1_B( $b_0$ )_4	LF_D1_B( $b_0$ )_7-8
LF_D1_B( $b_0$ )_1	LF_D1_B( $b_0$ )_4-5	LF_D1_B( $b_0$ )_8
LF_D1_B( $b_0$ )_1-2	LF_D1_B( $b_0$ )_5	LF_D1_B( $b_0$ )_8-9
LF_D1_B( $b_0$ )_2	LF_D1_B( $b_0$ )_5-6	LF_D1_B( $b_0$ )_9
LF_D1_B( $b_0$ )_2-3	LF_D1_B( $b_0$ )_6	LF_D1_B( $b_0$ )_9-10
LF_D1_B( $b_0$ )_3	LF_D1_B( $b_0$ )_6-7	LF_D1_B( $b_0$ )_10

Abbildung 58 zeigt die Laststellung der Achse B, mit Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D1\_B(b)\_HT**



**Abbildung 58: Laststellung Achsart B(b) für Detail D1**

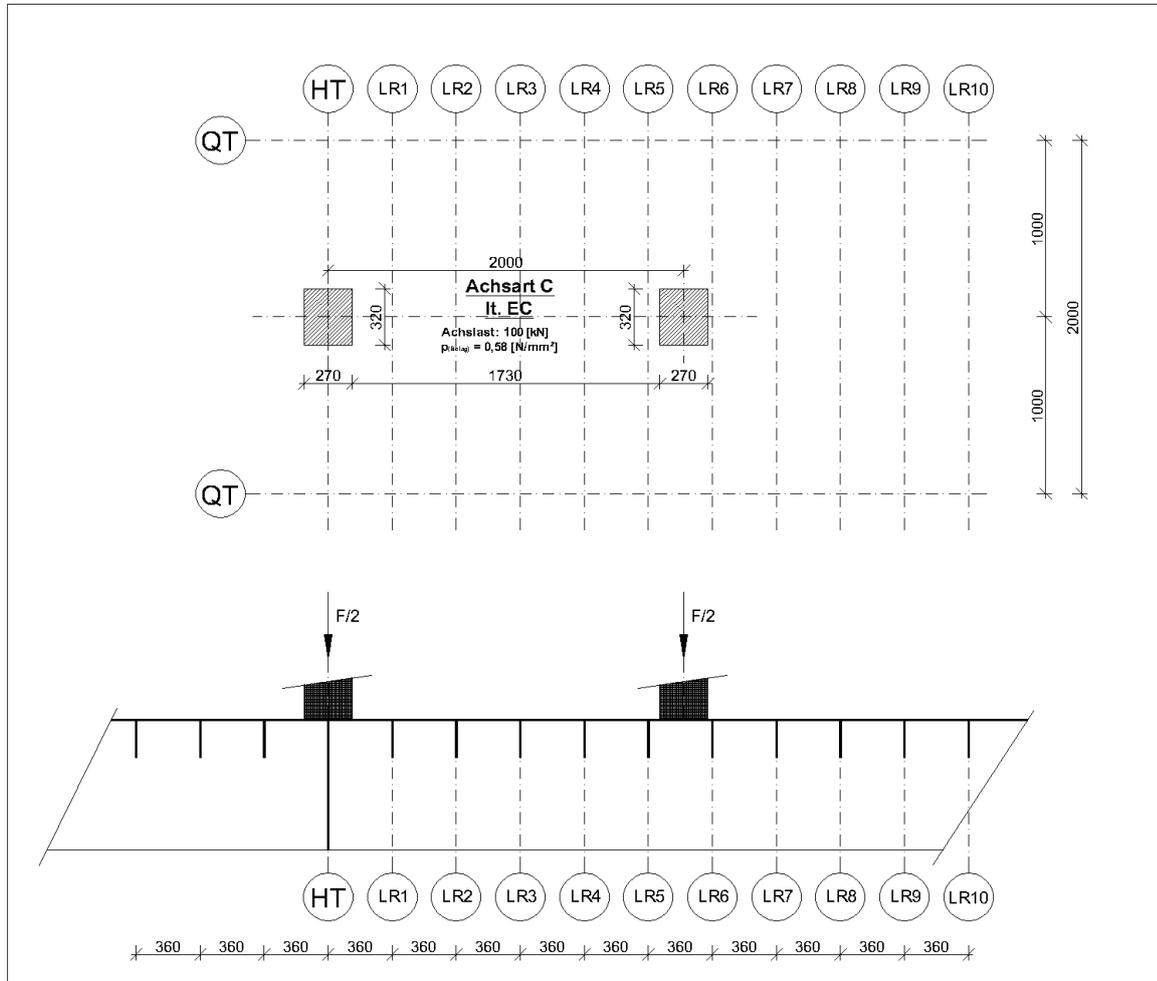
Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180 [mm]$  in Brückenquerrichtung weiterschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

- |                 |                |                 |
|-----------------|----------------|-----------------|
| LF_D1_B(b)_HT   | LF_D1_B(b)_3-4 | LF_D1_B(b)_7    |
| LF_D1_B(b)_HT-1 | LF_D1_B(b)_4   | LF_D1_B(b)_7-8  |
| LF_D1_B(b)_1    | LF_D1_B(b)_4-5 | LF_D1_B(b)_8    |
| LF_D1_B(b)_1-2  | LF_D1_B(b)_5   | LF_D1_B(b)_8-9  |
| LF_D1_B(b)_2    | LF_D1_B(b)_5-6 | LF_D1_B(b)_9    |
| LF_D1_B(b)_2-3  | LF_D1_B(b)_6   | LF_D1_B(b)_9-10 |
| LF_D1_B(b)_3    | LF_D1_B(b)_6-7 | LF_D1_B(b)_10   |

**A 1.4.2.2. Achse C**

Abbildung 59 zeigt die Laststellung der Achse C, ohne Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D1\_C( $b_0$ )\_HT**



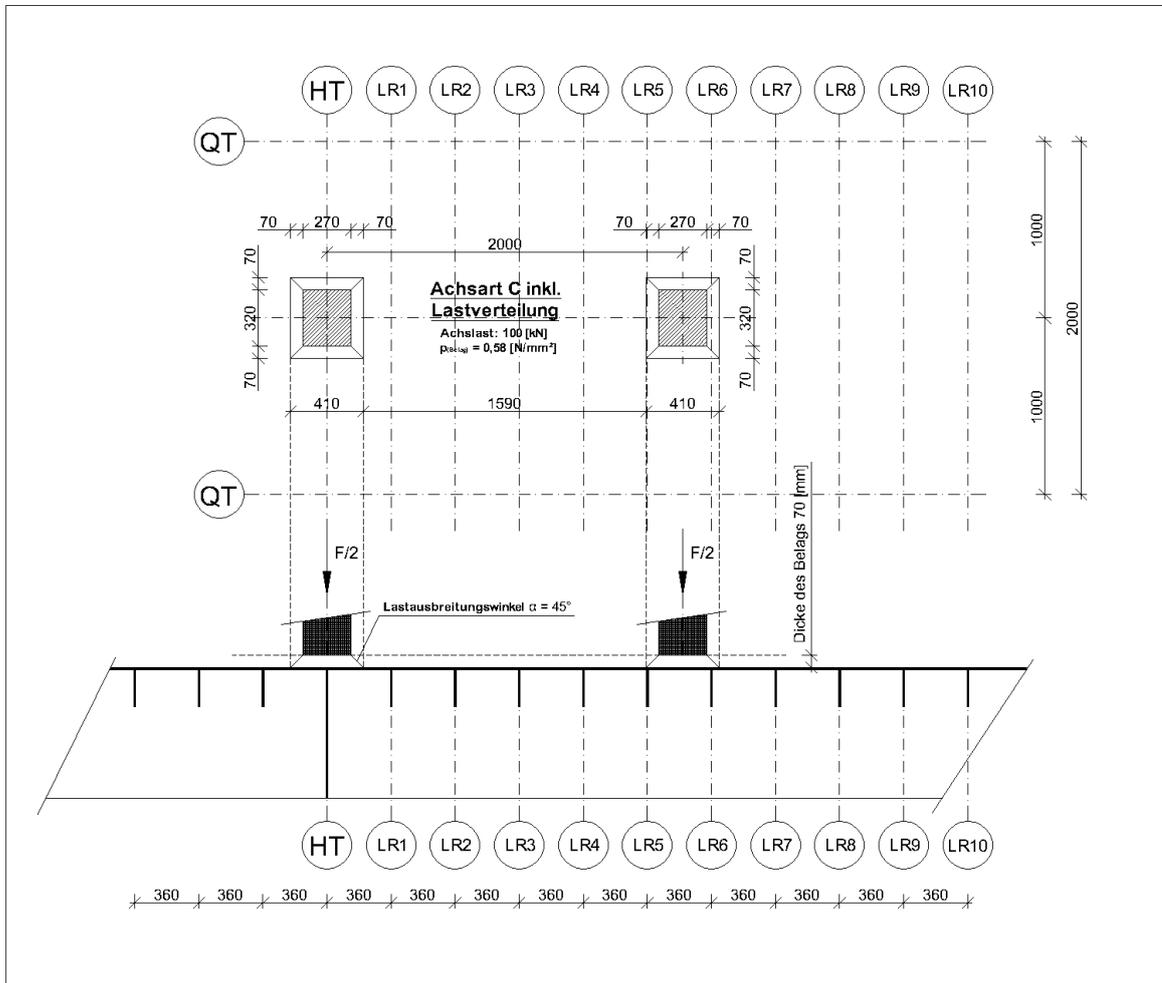
**Abbildung 59: Laststellung Achsart C( $b_0$ ) für Detail D1**

Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180$  [mm] in Brückenquerrichtung weitergeschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

- |                       |                      |                       |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| LF_D1_C( $b_0$ )_HT   | LF_D1_C( $b_0$ )_3-4 | LF_D1_C( $b_0$ )_7    |
| LF_D1_C( $b_0$ )_HT-1 | LF_D1_C( $b_0$ )_4   | LF_D1_C( $b_0$ )_7-8  |
| LF_D1_C( $b_0$ )_1    | LF_D1_C( $b_0$ )_4-5 | LF_D1_C( $b_0$ )_8    |
| LF_D1_C( $b_0$ )_1-2  | LF_D1_C( $b_0$ )_5   | LF_D1_C( $b_0$ )_8-9  |
| LF_D1_C( $b_0$ )_2    | LF_D1_C( $b_0$ )_5-6 | LF_D1_C( $b_0$ )_9    |
| LF_D1_C( $b_0$ )_2-3  | LF_D1_C( $b_0$ )_6   | LF_D1_C( $b_0$ )_9-10 |
| LF_D1_C( $b_0$ )_3    | LF_D1_C( $b_0$ )_6-7 | LF_D1_C( $b_0$ )_10   |

Abbildung 60 zeigt die Laststellung der Achse C, mit Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D1\_C(b)\_HT**



**Abbildung 60: Laststellung Achsart C(b) für Detail D1**

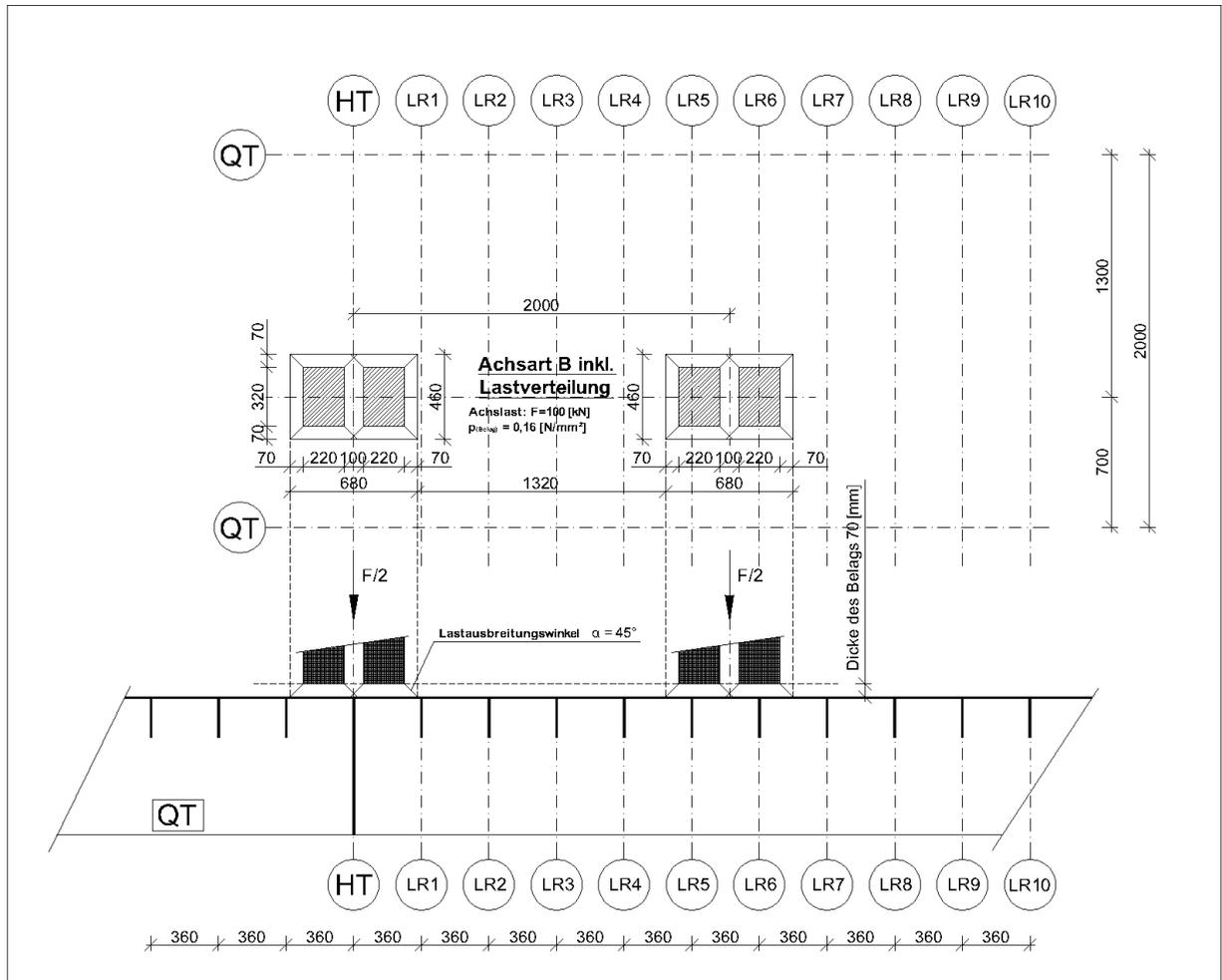
Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180$  [mm] in Brückenquerrichtung weiterschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

- |                 |                |                 |
|-----------------|----------------|-----------------|
| LF_D1_C(b)_HT   | LF_D1_C(b)_3-4 | LF_D1_C(b)_7    |
| LF_D1_C(b)_HT-1 | LF_D1_C(b)_4   | LF_D1_C(b)_7-8  |
| LF_D1_C(b)_1    | LF_D1_C(b)_4-5 | LF_D1_C(b)_8    |
| LF_D1_C(b)_1-2  | LF_D1_C(b)_5   | LF_D1_C(b)_8-9  |
| LF_D1_C(b)_2    | LF_D1_C(b)_5-6 | LF_D1_C(b)_9    |
| LF_D1_C(b)_2-3  | LF_D1_C(b)_6   | LF_D1_C(b)_9-10 |
| LF_D1_C(b)_3    | LF_D1_C(b)_6-7 | LF_D1_C(b)_10   |



Abbildung 62 zeigt die Laststellung der Achse B, mit Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D2\_B(b)\_HT**



**Abbildung 62: Laststellung Achsart B(b) für Detail D2**

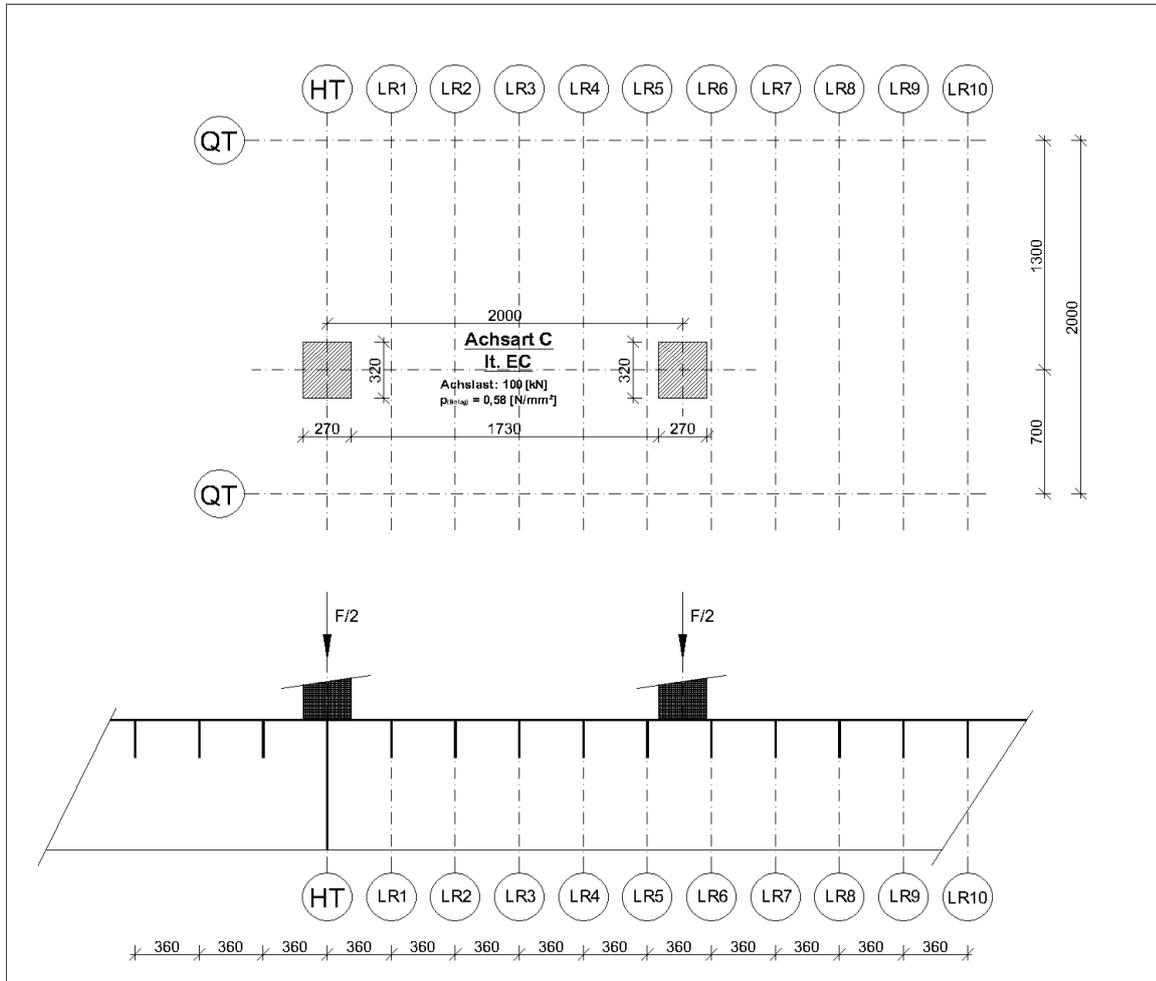
Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180 [mm]$  in Brückenquerrichtung weiterschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

- |                 |                |                 |
|-----------------|----------------|-----------------|
| LF_D2_B(b)_HT   | LF_D2_B(b)_3-4 | LF_D2_B(b)_7    |
| LF_D2_B(b)_HT-1 | LF_D2_B(b)_4   | LF_D2_B(b)_7-8  |
| LF_D2_B(b)_1    | LF_D2_B(b)_4-5 | LF_D2_B(b)_8    |
| LF_D2_B(b)_1-2  | LF_D2_B(b)_5   | LF_D2_B(b)_8-9  |
| LF_D2_B(b)_2    | LF_D2_B(b)_5-6 | LF_D2_B(b)_9    |
| LF_D2_B(b)_2-3  | LF_D2_B(b)_6   | LF_D2_B(b)_9-10 |
| LF_D2_B(b)_3    | LF_D2_B(b)_6-7 | LF_D2_B(b)_10   |

**A 1.4.3.2. Achse C**

Abbildung 63 zeigt die Laststellung der Achse B, ohne Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages, direkt über dem Hauptträger.

Die Lastfallbezeichnung für diesen Lastfall lautet: **LF\_D2\_C( $b_0$ )\_HT**



**Abbildung 63: Laststellung Achsart C( $b_0$ ) für Detail D2**

Diese Achse wurde immer um den halben Abstand der Längsrippen, also um  $360/2 = 180$  [mm] in Brückenquerrichtung weitergeschoben, daraus ergeben sich folgende Lastfälle:

- |                       |                      |                       |
|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| LF_D2_C( $b_0$ )_HT   | LF_D2_C( $b_0$ )_3-4 | LF_D2_C( $b_0$ )_7    |
| LF_D2_C( $b_0$ )_HT-1 | LF_D2_C( $b_0$ )_4   | LF_D2_C( $b_0$ )_7-8  |
| LF_D2_C( $b_0$ )_1    | LF_D2_C( $b_0$ )_4-5 | LF_D2_C( $b_0$ )_8    |
| LF_D2_C( $b_0$ )_1-2  | LF_D2_C( $b_0$ )_5   | LF_D2_C( $b_0$ )_8-9  |
| LF_D2_C( $b_0$ )_2    | LF_D2_C( $b_0$ )_5-6 | LF_D2_C( $b_0$ )_9    |
| LF_D2_C( $b_0$ )_2-3  | LF_D2_C( $b_0$ )_6   | LF_D2_C( $b_0$ )_9-10 |
| LF_D2_C( $b_0$ )_3    | LF_D2_C( $b_0$ )_6-7 | LF_D2_C( $b_0$ )_10   |



## A 1.5. Ermittlung der maßgebenden Laststellungen in Brückenquerrichtung

Mit Hilfe aller in Kapitel A 1.4 beschriebenen Lastfälle entlang der Pfade 1 und 2 (siehe Kapitel A 1.3) wurde für jede Längsrippe im Bereich A (siehe Abbildung 26) eine Einflusslinie in Querrichtung der Brücke generiert.

In diesem Kapitel werden nun die Einflusslinien der für die einzelnen Detailbereiche zutreffenden Längsrippen präsentiert. Die gesamte Sammlung aller Spannungsverläufe entlang der jeweiligen Pfade der Detailbereiche und die daraus resultierenden Einflusslinien befinden sich in Kapitel A 6.

### A 1.5.1. Einflusslinien für Achse B

#### A 1.5.1.1. Detail D1 bei LR-2

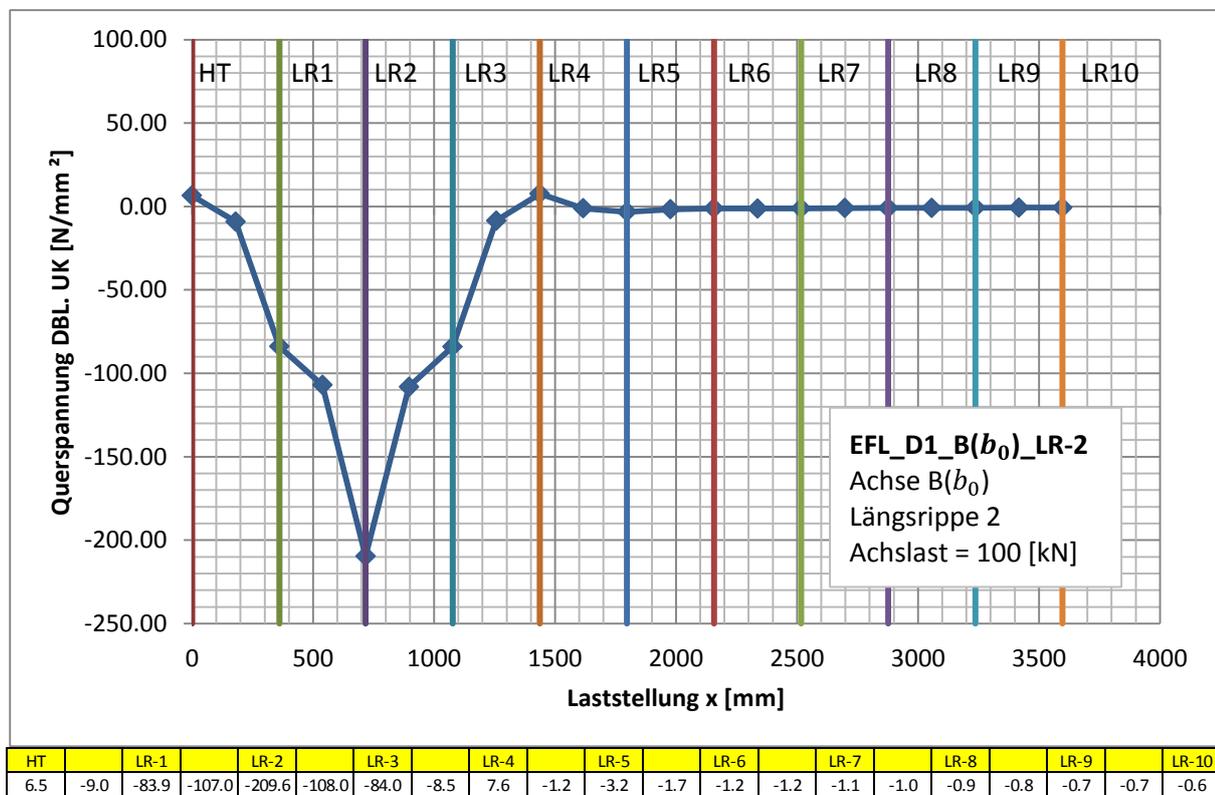


Abbildung 65: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-2

Für Detailpunkt, siehe Kapitel A 1.3.1, wird jene Längsrippe gewählt, die nahe Hauptträger A liegt aber nicht von ihm beeinflusst wird.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.2.1 für die Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag.

Abbildung 65 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 2 in Querrichtung der Brücke.

Es ist eine Symmetrie der Kurve um die Linie LR2 zu erkennen, was auf eine gleichmäßige Steifigkeit links und rechts der Längsrippe schließen lässt. Noch dazu sind die Spannungen in diesem Detailpunkt nahezu null, wenn die Last direkt über dem Hauptträger steht. Eine Beeinflussung der Spannungen an LR-2 durch HT-A kann demnach ausgeschlossen werden.

Wesentlich ist die Erkenntnis, dass die maximalen Spannungen im Detailpunkt auftreten, wenn die Achse B direkt über der Längsrippe ist, somit ergab sich nun für

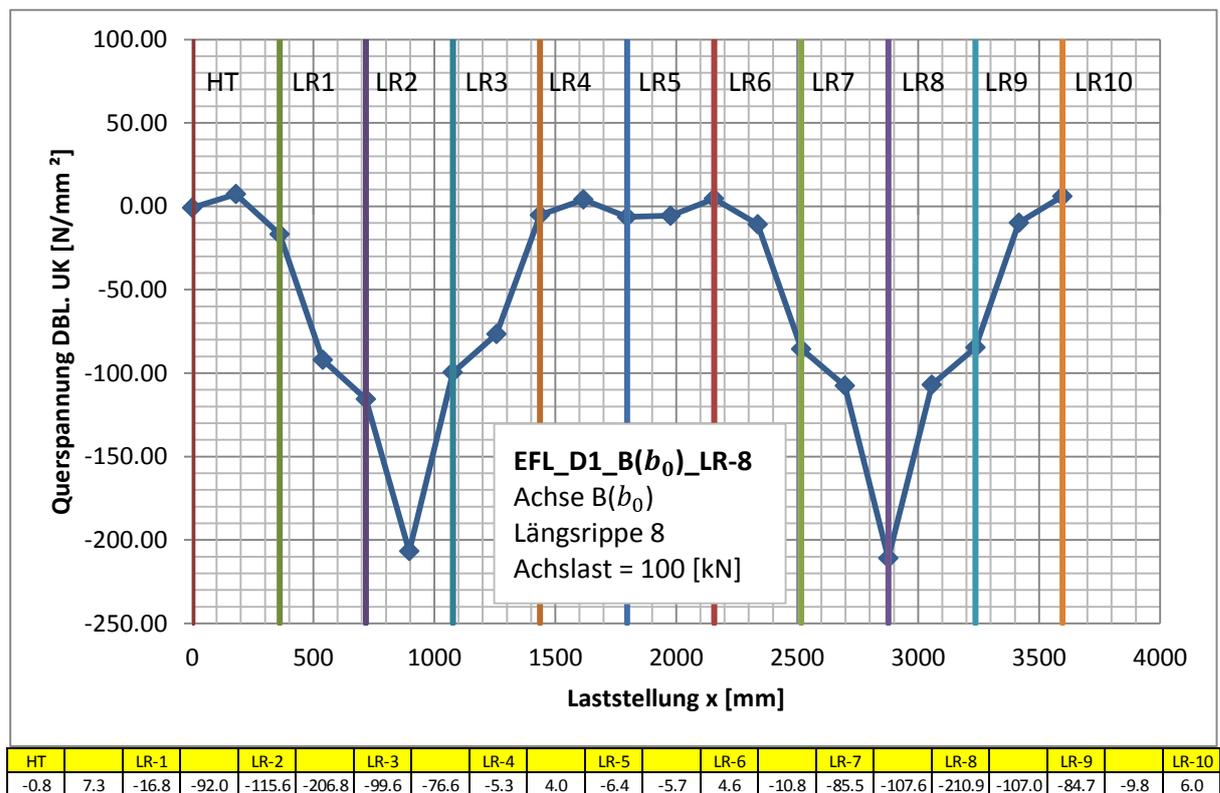
spätere Berechnungen an weiteren Modellen die maßgebende Laststellung für dieses Detail.

Für alle anderen Längsrippen ergeben sich geringere Querbiegespannungen, sodass für Detail D1 der Anschluss zu Längsrippe LR-2 maßgebend wird.

Maßgebende Laststellung für Achse B – Detail D1 bei LR-2:

- LF\_D1\_B( $b_0$ )\_2** Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D1\_B( $b$ )\_2** Achse B mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

**A 1.5.1.2. Detail D1\* bei LR-8**



**Abbildung 66: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-8**

Für Detailpunkt D1\*, siehe Kapitel A 1.3.2, wird jene Längsrippe gewählt, die sich möglichst in Feldmitte zwischen den beiden Hauptträgern befindet, jedoch ein Einfluss aus der in der zweiten Feldhälfte als Stabelemente modellierten Längsrippen ausgeschlossen werden kann.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.2.1 für die Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben. Abbildung 66 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 8 in Querrichtung der Brücke. Zu beachten ist, dass hier die Einflusslinie für eine Achse und nicht ein einzelnes Rad vorliegt. Daher rührt das zweite Maximum zwischen LR-2 und LR-3 (rechtes Rad der Achse). Für das Maximum bei LR-8 ist das linke Rad verantwortlich. Wieder ist eine Symmetrie der Einflusslinie um die Linie LR8 gegeben und wie auch bei Detail D1 (Kapitel A 1.5.1.1) treten die maximalen Spannungen auf, wenn die Last direkt über der Längsrippe steht.

Maßgebende Laststellung für Achse B – Detail D1\* bei LR-8:

- LF\_D1\_B( $b_0$ )\_8 Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D1\_B(b)\_8 Achse B mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

A 1.5.1.3. Detail D2 bei LR-2

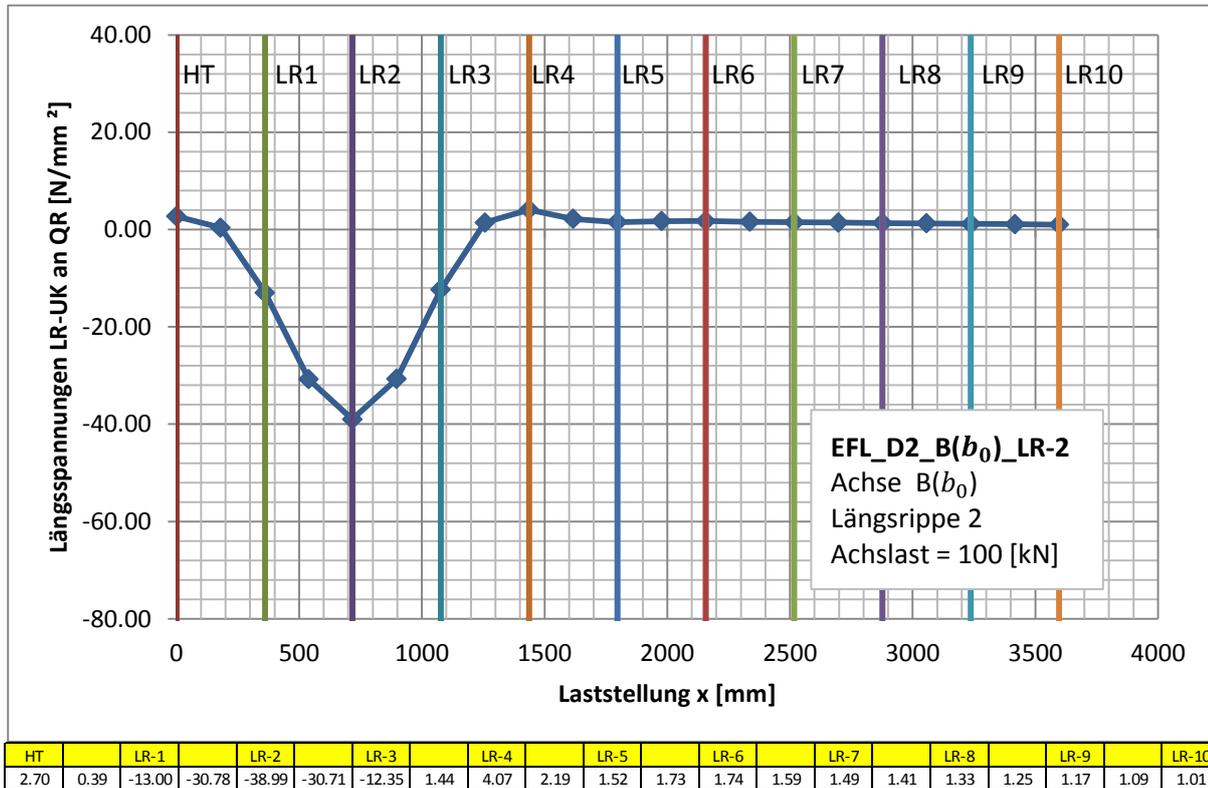


Abbildung 67: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-2

Detailpunkt D2 wird in Kapitel A 1.3.3 beschrieben. Es handelt sich hierbei um den Anschluss der Längsrippe an die Querrippe und Abbildung 67 zeigt die aus den einzelnen Spannungsverläufen (Kapitel A 6.2.1.1) ermittelte Einflusslinie für die Längsrippe 2. Die gesamte Sammlung aller Einflusslinien für dieses Detail befindet sich in Kapitel A 6.2.2.1.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.3.1 für die Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben.

Es ist am EL-Verlauf zu erkennen, dass der Hauptträger keinerlei Einfluss auf diese Längsrippe ausübt (wegen Symmetrie des Verlaufes) und das Spannungsmaximum in diesem Detailpunkt wird erreicht, wenn die Achse B direkt über der Längsrippe ist. Es sei im Weiteren angemerkt, dass bei Betrachtung dieses Detailpunktes gut zu erkennen ist, dass die benachbarten Längsrippen noch eine Beanspruchung erfahren und somit die LR-2 entlasten. Steht die Belastung andererseits direkt über Längsrippe 3 so erfährt Längsrippe 2 immerhin noch ein Viertel der bei direkter Belastung (Last über LR-2) auftretenden maximalen Spannung.

Maßgebende Laststellung für Achse B – Detail D2 bei LR-2:

- LF\_D2\_B( $b_0$ )\_2 Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D2\_B( $b$ )\_2 Achse B mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

A 1.5.1.4. Detail D2\* bei LR-8

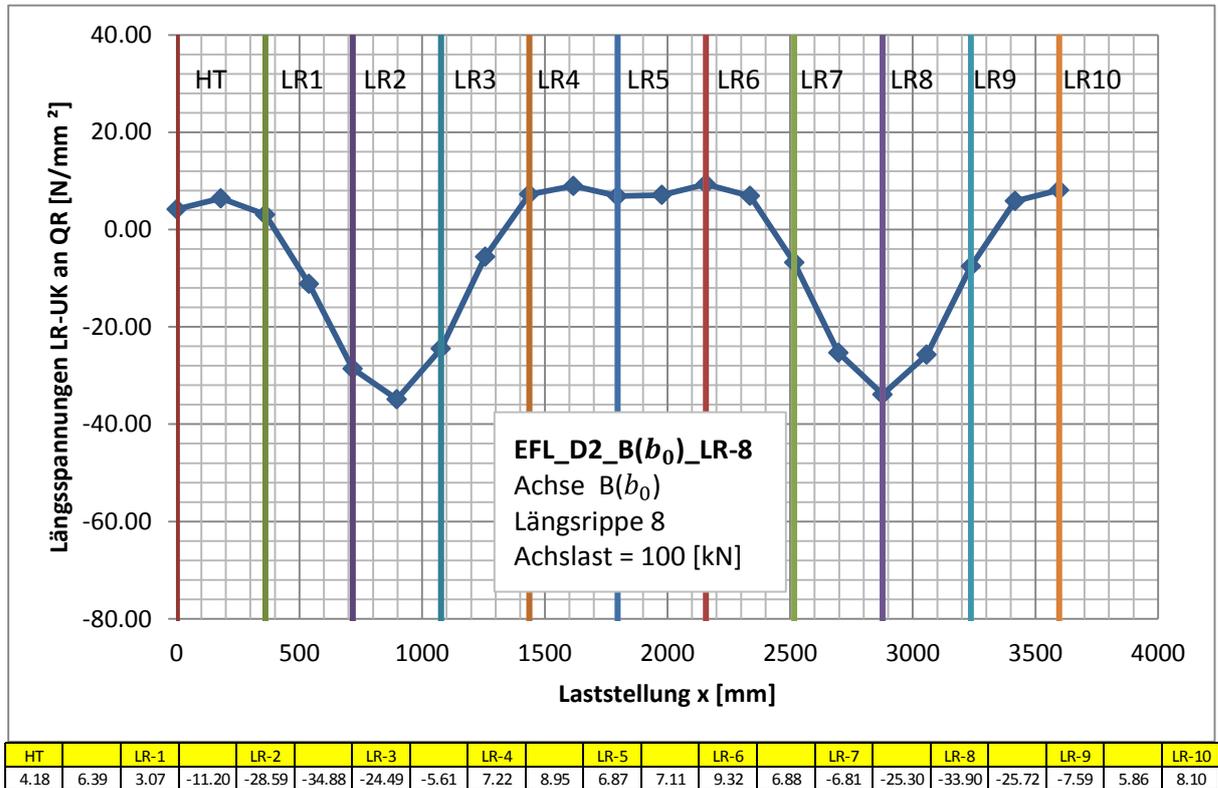


Abbildung 68: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-8

Detailpunkt D2\* wird in Kapitel A 1.3.4 beschrieben und ist der Anschluss der Längsrippe an den Querträger, wobei hierfür eine Längsrippe untersucht wurde, die sich möglichst in Feldmitte befindet, ohne dass sie von den in der zweiten Feldhälfte verwendeten Stabelementen beeinflusst wird.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.3.1 für die Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben. Abbildung 68 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 8 in Querrichtung der Brücke.

Es kann nun festgestellt werden, dass bei Detail D1, D1\*, D2 und D2\* die maximalen Spannungen infolge einer Einwirkung durch Achse B immer dann auftreten, wenn die Achse B direkt über der betrachteten Längsrippe ist.

Der Verlauf der Kurve der Einflusslinie ist ähnlich zur Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-2 (siehe Abbildung 67), jedoch sind die Maximalwerte nicht ident. So treten bei Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-8 kleinere Maximalspannungen auf, was mit einer geringeren Steifigkeit der orthotropen Platte im Feldbereich erklärbar ist.

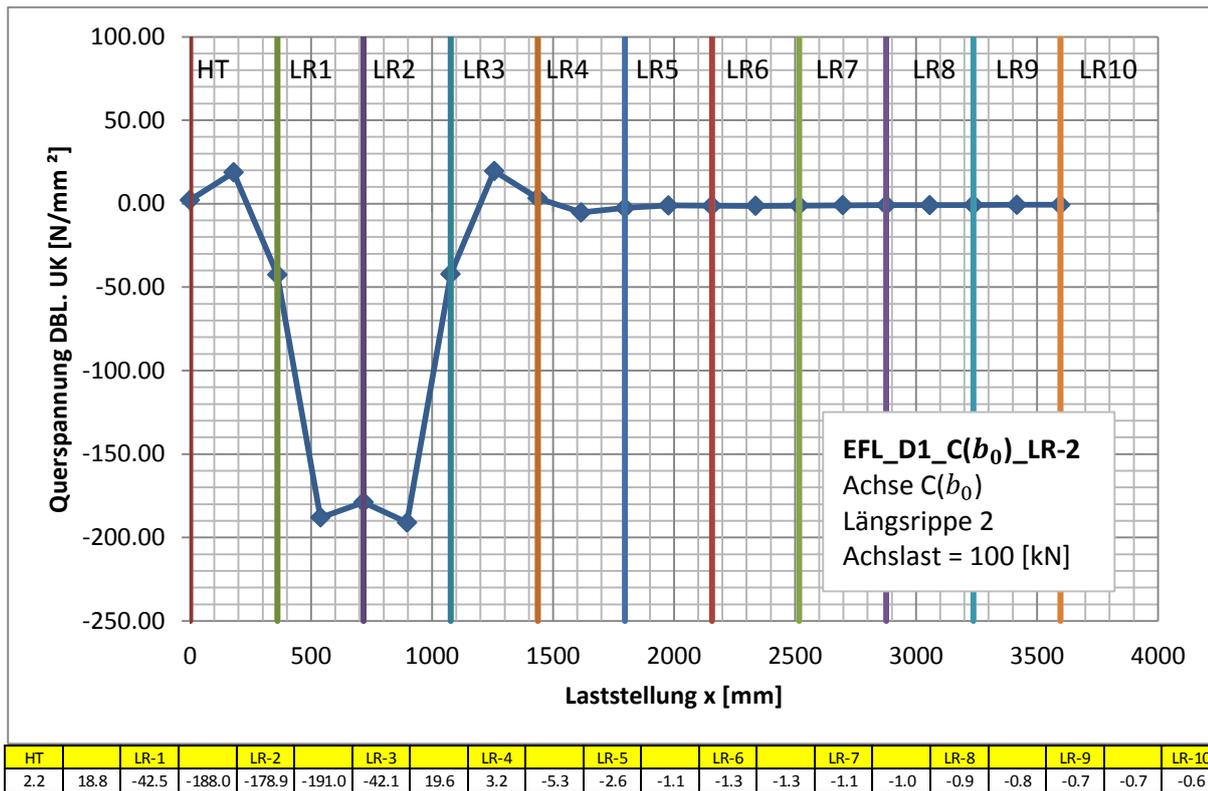
Die maximale Längsnormalspannung bei LR-2 aus EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-2 beträgt  $\sigma_{max,LR-2} = -39 \text{ N/mm}^2$  und bei LR-8 aus EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-8 beträgt  $\sigma_{max,LR-8} = -33,9 \text{ N/mm}^2$ .

Maßgebende Laststellung für Achse B – Detail D2\* bei LR-8:

- LF\_D2\_B( $b_0$ )\_8** Achse B ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D2\_B( $b$ )\_8** Achse B mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

**A 1.5.2. Einflusslinien für Achse C**

**A 1.5.2.1. Detail D1 bei LR-2**



**Abbildung 69: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-2**

Auf eine Beschreibung des Detailpunktes D1 wird hier verzichtet, es sei auf das Kapitel A 1.3.1 verwiesen.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.2.2 für die Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben.

Abbildung 69 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 2 unter der Achslast von 100 [kN] und der Achsgeometrie der Achse C.

Wie hier sehr gut zu erkennen ist, tritt ein Maximum der Spannungen im Detailpunkt auf, wenn die Radlast sich in der Mitte zweier Längsrippen befindet, anders als es bei Achse B der Fall war, welche die Maximalspannungen verursachte, wenn sie direkt über der betrachteten Längsrippe stand. Dies liegt lediglich an der anderen Geometrie der Achse C, welche eine Breite  $b_0 = 270 [mm]$  aufweist, wobei der Längsrippenabstand  $l_{LR} = 360 [mm]$  beträgt und die größten Spannungen in Detail D1 hervorruft, wenn der Reifen mittig zwischen zwei Längsrippen steht. (siehe Abbildung 70)

## Modell A (ohne Belag)

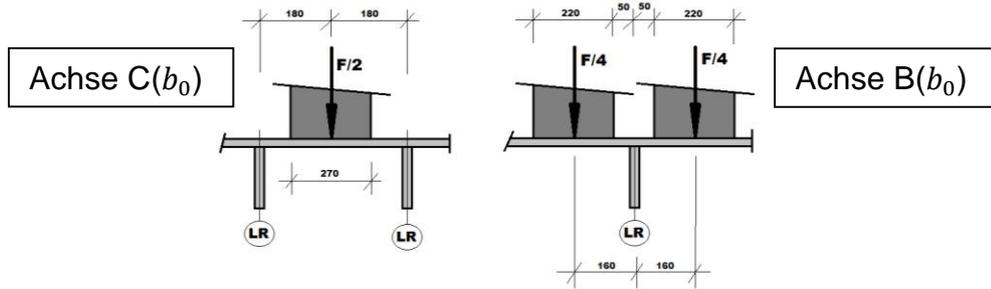


Abbildung 70: maßgebende Laststellungen (Achse B & C) für Detail D1 und D1\*

### Maßgebende Laststellung für Achse C – Detail D1 bei LR-2:

- LF\_D2\_C( $b_0$ )\_2-3 Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D2\_C(b)\_2-3 Achse C mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

#### A 1.5.2.2. Detail D1\* bei LR-8

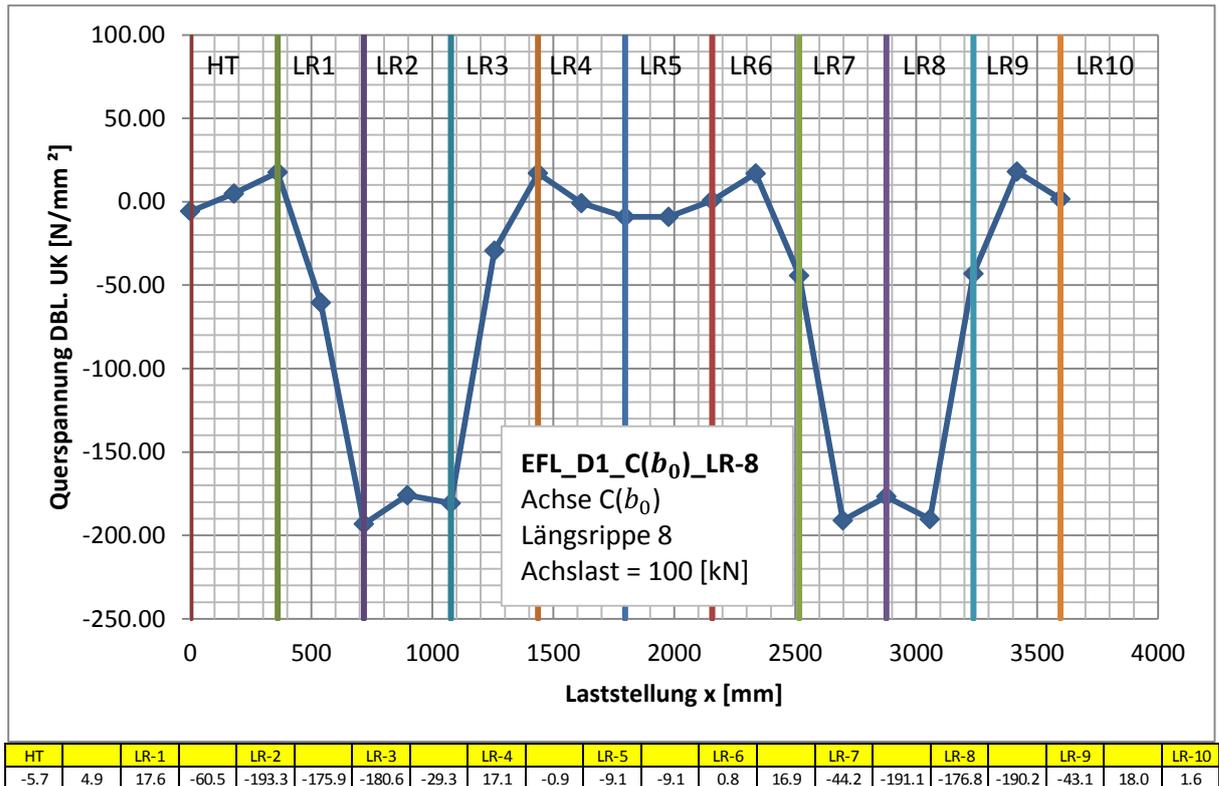


Abbildung 71: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-8

Auf eine Beschreibung des Detailpunktes D1\* wird hier verzichtet, es sei auf das Kapitel A 1.3.2 verwiesen.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.2.2 für die Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben.

Abbildung 71 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 8 unter der Achslast von 100 [kN] und der Achsgeometrie der Achse C.

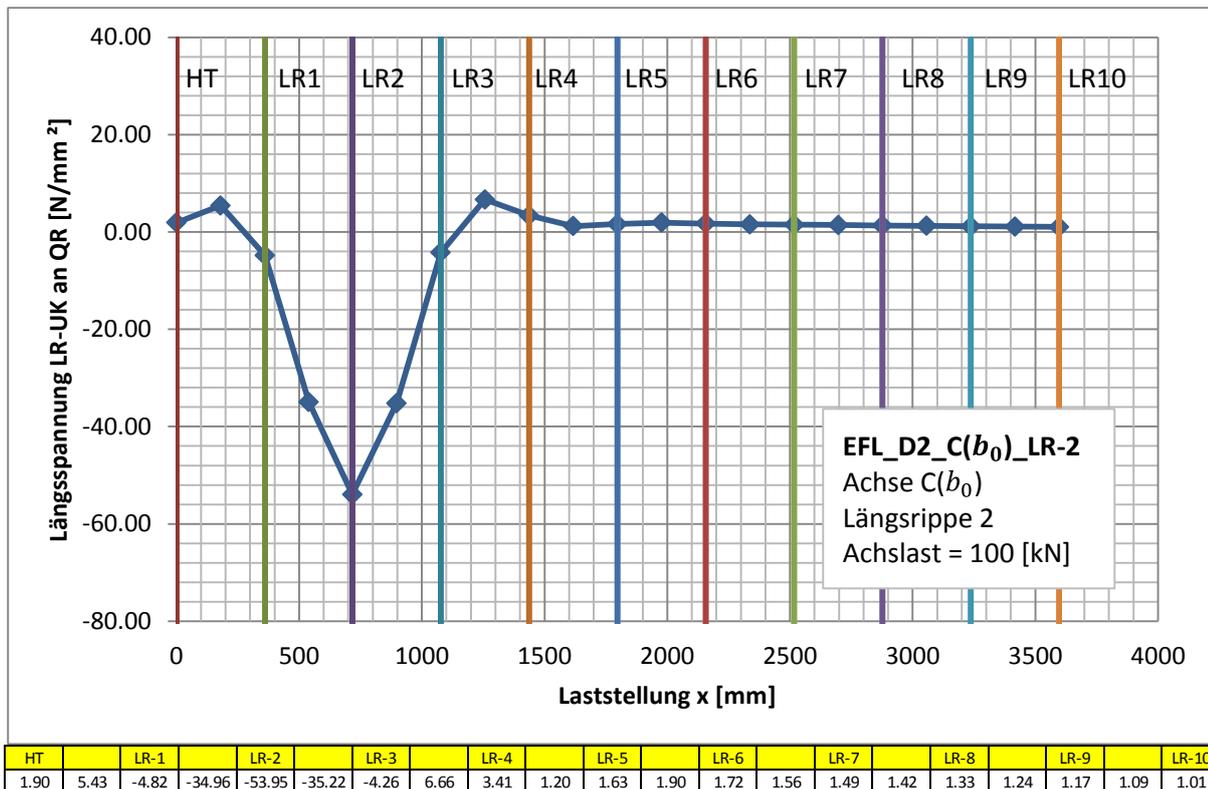
Die maximalen Spannungen in diesem Detailpunkt D1\* treten bei einer mittigen Radlaststellung der Achse C zwischen Längsrippe 7 und Längsrippe 8 auf.

Bei Vergleich der Maximalwerte mit der Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR\_2 (siehe Abbildung 70) ist zu erkennen, dass diese ident sind, was auch zu erwarten ist, da es sich bei diesem Detailbereich um die Deckblechbiegung handelt und ein Einfluss der hohen vertikalen Steifigkeit des Hauptträgers offenbar unbedeutend ist.

Maßgebende Laststellung für Achse C – Detail D1\* bei LR-8:

- LF\_D2\_C( $b_0$ )\_7-8** Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D2\_C(b)\_7-8** Achse C mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

**A 1.5.2.3. Detail D2 bei LR-2**



**Abbildung 72: Einflusslinie EFL\_D2\_C( $b_0$ )\_LR-2**

Auf eine Beschreibung des Detailpunktes D2 wird hier verzichtet, es sei auf das Kapitel A 1.3.3 verwiesen.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.3.2 für die Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben.

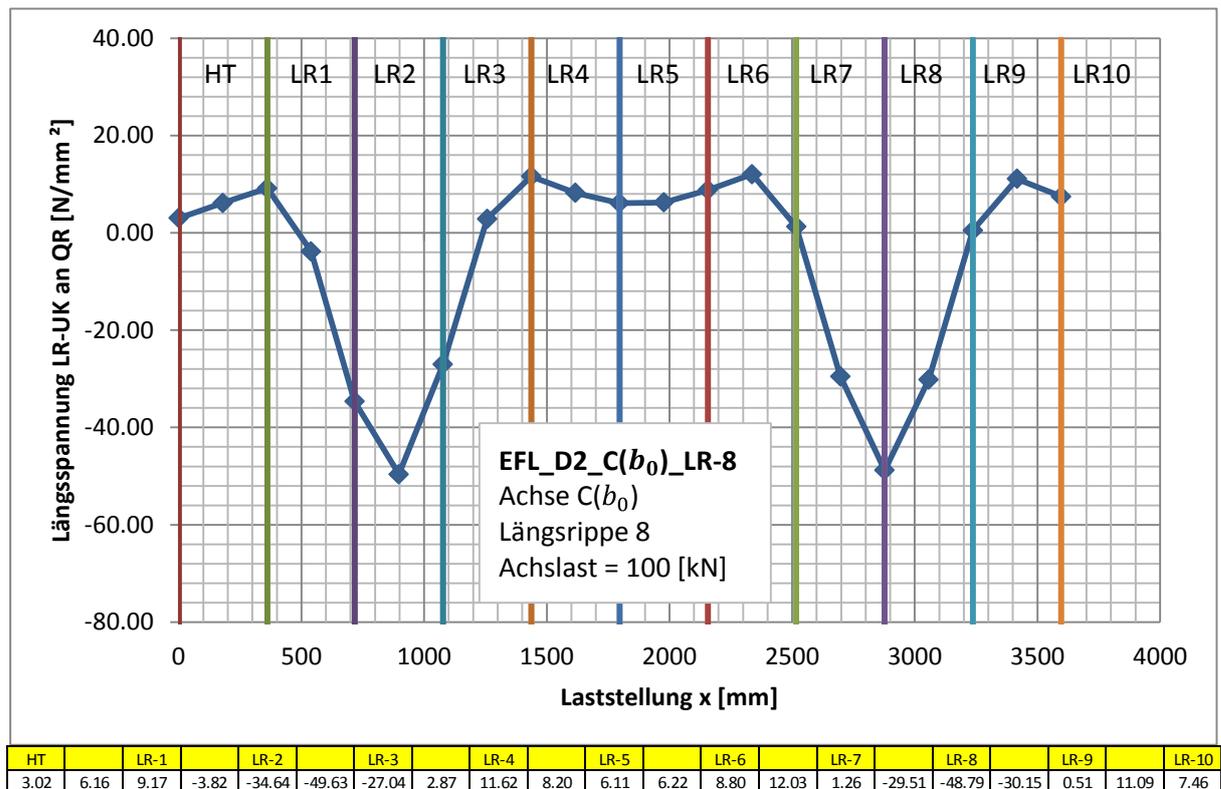
Abbildung 72 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 2 unter der Achslast von 100 [kN] und der Achsgeometrie der Achse C.

Die maximalen Spannungen in diesem Detailpunkt D2 treten bei einer Radlaststellung der Achse C unmittelbar über der Längsrippe auf.

Maßgebende Laststellung für Achse C – Detail D2 bei LR-2:

- LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_2** Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung
- LF\_D2\_C(b)\_2** Achse C mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

**A 1.5.2.4. Detail D2\* bei LR-8**



**Abbildung 73: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-8**

Auf eine Beschreibung des Detailpunktes D2\* wird hier verzichtet, es sei auf das Kapitel A 1.3.4 verwiesen.

Es gelten die Belastungen und die Bezeichnungen der Laststellungen wie in Kapitel A 1.4.3.2 für die Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung durch den Belag angegeben.

Abbildung 73 zeigt die Einflusslinie der Längsrippe 8 unter der Achslast von 100 [kN] und der Achsgeometrie der Achse C.

Die maximalen Spannungen in diesem Detailpunkt D2\* treten bei einer Radlaststellung der Achse C unmittelbar über der Längsrippe auf.

Maßgebende Laststellung für Achse C – Detail D2\* bei LR-8:

- LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_8** Achse C ohne Berücksichtigung einer Lastverteilung  
**LF\_D2\_C(b)\_8** Achse C mit Berücksichtigung einer Lastverteilung

**A 1.5.3. Maßgebende Laststellungen**

Tabelle 2 zeigt eine Zusammenfassung der maßgebenden Laststellungen, welche mittels der aus den einzelnen Spannungsverläufen erhaltenen Einflusslinien aus Kapitel A 1.5 erstellt wurden.

Die in der rechten Spalte angeführten Werte der Normalspannungen der Details wurden der Vollständigkeit halber angegeben. Sie sind jedoch für weitere Analysen mit erweiterten Modellen nicht geeignet, da eine an einem lokalen Modell durchgeführte Diskretisierungsstudie (siehe Kapitel A 2.3) ergab, dass die Spannungen der Details D1 und D1\* sehr stark von der gewählten Netzgeometrie und den dazugehörigen Elementeigenschaften abhängig sind, sodass das FE-Netz von Modell A einer Optimierung unterzogen wurde. (siehe A 1.6)

Die Spannungen der Details D2 und D2\* sind nicht so stark vom gewählten FE-Netz abhängig, jedoch wurden die Spannungen an der Unterkante der Längsrippe abgelesen, was an und für sich eine konservative Methode darstellt, denn laut den Angaben der Praterbrücke ist die Querrippe im unteren Bereich der Längsrippe kreisförmig ausgeschnitten und die Schweißnaht endet ca. 30 [mm] oberhalb der Längsrippenunterkante. In der weiteren Arbeit wurden für Detail D2 und D2\* die Spannungen am Ende der Schweißnaht abgelesen. (x = 30 [mm] von der Längsrippenunterkante)

Lastfall	Detail	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]
LF_D1_B(b <sub>0</sub> )_2	D1	-209.6
LF_D1_B(b)_2		-119.8
LF_D1_C(b <sub>0</sub> )_2-3		-191.0
LF_D1_C(b)_2-3		-134.7
LF_D1_B(b <sub>0</sub> )_8	D1*	-210.9
LF_D1_B(b)_8		-121.4
LF_D1_C(b <sub>0</sub> )_7-8		-191.5
LF_D1_C(b)_7-8		-103.8
LF_D2_B(b <sub>0</sub> )_2	D2	-39.0
LF_D2_B(b)_2		-35.5
LF_D2_C(b <sub>0</sub> )_2		-54.0
LF_D2_C(b)_2		-47.9
LF_D2_B(b <sub>0</sub> )_8	D2*	-33.9
LF_D2_B(b)_8		-30.4
LF_D2_C(b <sub>0</sub> )_8		-48.8
LF_D2_C(b)_8		-42.8

**Tabelle 2: Maßgebende Laststellungen und zugehörige Maximalspannung für die untersuchten Detailpunkte**

## **A 1.6. Optimierung Modell A (ohne Belag)**

### **A 1.6.1. Allgemeines**

Eine an einem kleineren Modell durchgeführte Diskretisierungsstudie (siehe Kapitel A 2.3) ergab, dass die Maximalwerte der Spannungen der Detailpunkte D1 und D1\* sehr stark vom gewählten FE-Netz abhängig sind. Detail D1 und D1\* stellen den Anschluss der Längsrippe an das Deckblech nahe des Hauptträgers sowie im Feldbereich dar, wobei die Normalspannungen des Deckbleches in Brückenquerrichtung an dessen Unterkante abgelesen wurden.

Das Deckblech wurde im Modell als Volumenelemente (Solid) und die Längsrippen als Schalenelemente (Shell) definiert. In einer einfachen statischen Modellierung könnte man das Deckblech als einen Durchlaufträger formulieren, der auf den Längsrippen (starr) gelagert ist. Da diese Längsrippen im FE-Modell nun als Schalenelemente modelliert wurden und diese Elemente im Anschlussbereich zum Deckblech keine Dicke aufweisen, ist das Deckblech auf Kanten gelagert, womit die Auflagerfläche praktisch null ist und dann werden bei Belastung die Biegespannungen sehr groß.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird dann das Modell A (ohne Belag) zu Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) und Modell B-2 (mit Belag, kein Verbund) erweitert, um dann mithilfe der ausgelesenen Spannungen der Detailbereiche einen Vergleich anstellen zu können und eine Beurteilung des laut EN 1991-2 zulässigen Lastausbreitungswinkel von 45° treffen zu können.

Der Belag wurde wie das Deckblech mit Volumenelementen modelliert, da Schalenelemente eine Druckverteilung in Dickenrichtung nicht wiedergeben können. Da diese Volumenelemente eine große Anzahl an Freiheitsgraden produzieren steigt die benötigte Rechenleistung dadurch enorm an und die Zeit der Berechnungen am FE-Modell werden unzumutbar lang.

In Folge dessen wurde eine Diskretisierungsstudie (siehe Kapitel A 2.3) an einem deutlich kleineren, lokalen Modell durchgeführt, wobei die Achsabstände der Längsrippen und Querrrippen, sowie die Blechstärken der Stahlteile übernommen wurden.

Die aus der Diskretisierungsstudie gewonnenen Erkenntnisse wurden am FE-Modell A (ohne Belag) eingearbeitet und so entstand ein Modell mit einem auf die benötigten Ergebnisse optimiertem FE-Netz.

### **A 1.6.2. Optimierung FE-Netz für das Deckblech**

Abbildung 74 zeigt den Bereich des Deckblechs, der für eine Netzverdichtung herangezogen wurde, wobei an Längsrippe 2 und Längsrippe 8 eine weitere lokale Netzverfeinerung durchgeführt wurde, siehe Abbildung 75 und Abbildung 76.

Da nun die für die Detailbereiche maßgebenden Längsrippen bekannt waren, mussten nur mehr Längsrippe 2 und 8 mit den zugehörigen maßgebenden Laststellungen untersucht werden.

Da die maßgebenden Spannungen für die Kerbdetails D1 und D1\* an der Schweißnahtwurzel abgelesen werden dürfen, wurde im Abstand von 7 [mm] links und rechts der Längsrippenachse eine Elementteilung vorgenommen.

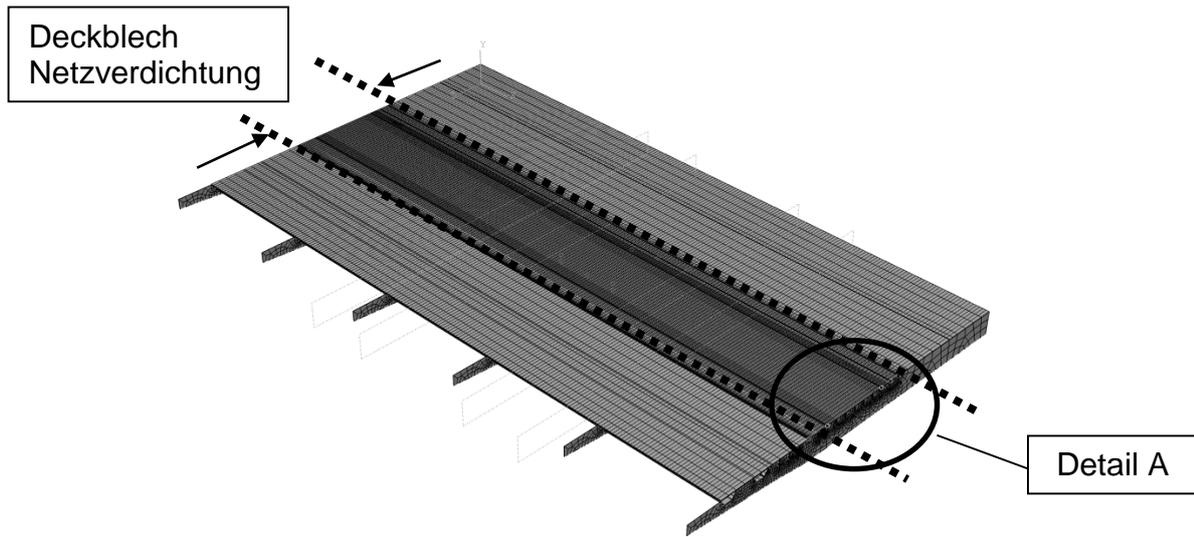


Abbildung 74: Optimierung FE-Netz - Deckblech

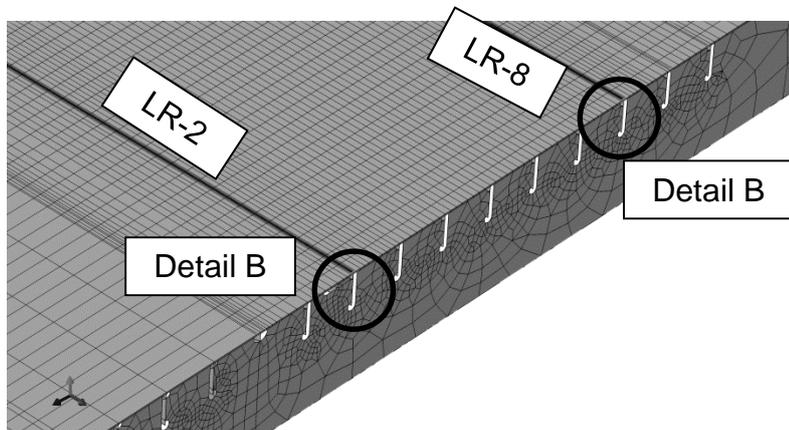


Abbildung 75: Optimierung FE-Netz Deckblech – Detail A

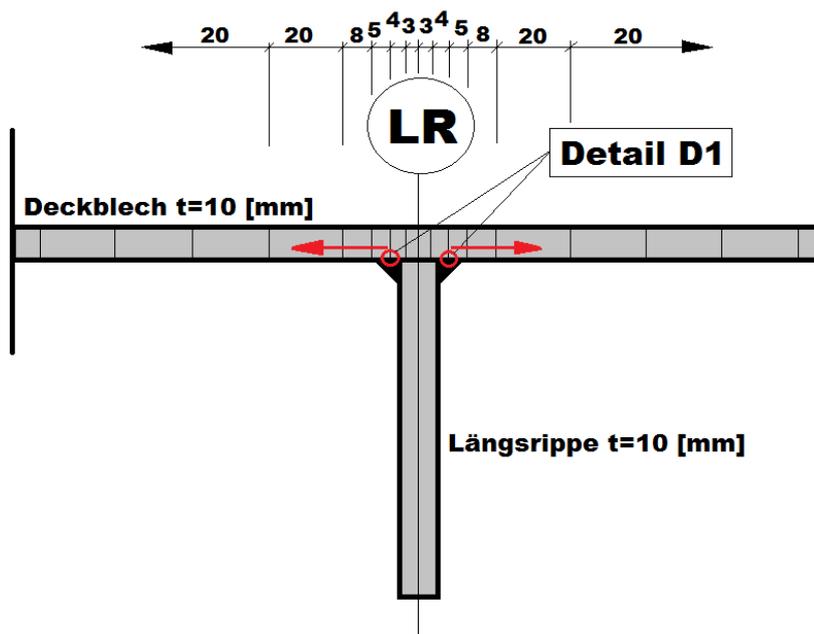


Abbildung 76: Optimierung FE-Netz Deckblech – Detail B

### A 1.6.3. Optimierung FE-Netz für die Längsrippen

Um die bestmöglichen Ergebnisse für die Detailbereiche D2 und D2\* liefern zu können, wurden auch die näher betrachteten Längsrippen 2 und 8 einer Netzverfeinerung unterzogen, da das ursprüngliche Netz der Schalenelemente in der Regel nur zwei Elemente über die gesamte Höhe umfasste. So wurden die Netze der Längsrippe 2 und Längsrippe 8 einer feineren Teilung zugeordnet, sodass diese Teile 4 Schalenelemente über ihre Höhe aufweisen und eine Elementgröße von ca. 50 x 50 [mm] haben.

Abbildung 77 zeigt die maßgebenden Längsrippen 2 und 8, Abbildung 78 zeigt die genauere Netzteilung am Beispiel der LR-2.

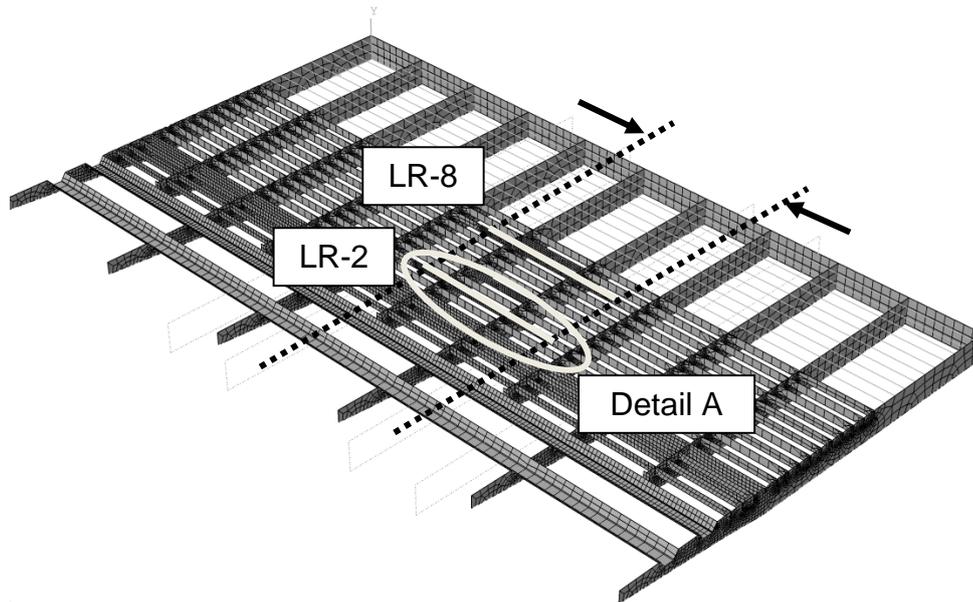


Abbildung 77: Optimierung FE-Netz Längsrippen

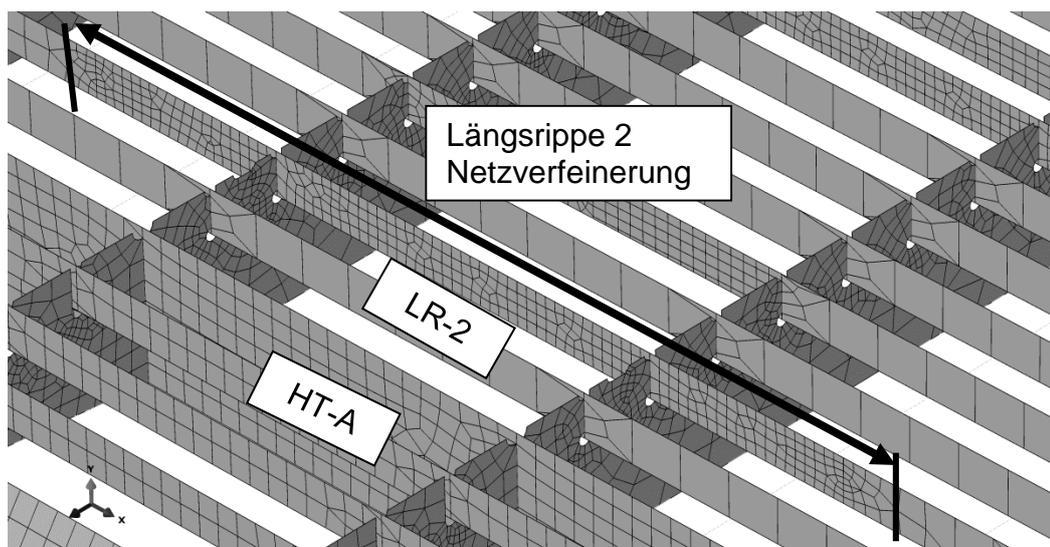


Abbildung 78: Optimierung FE-Netz Längsrippen – Detail A



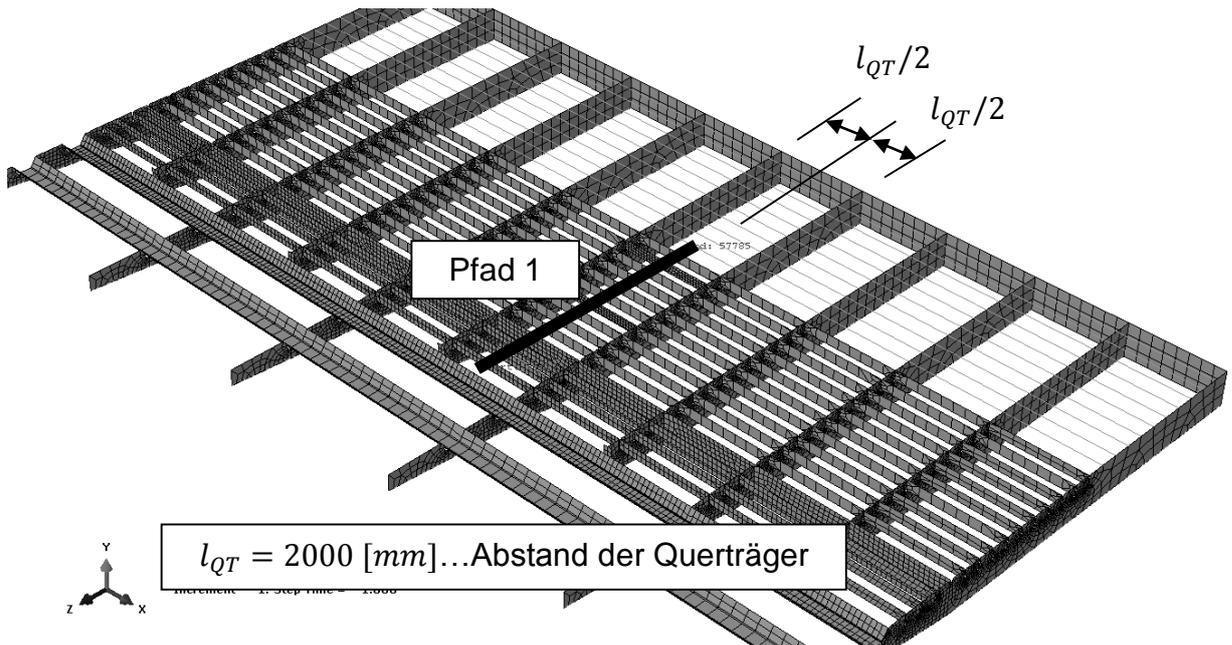


Abbildung 79: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad D1

Abbildung 80 zeigt, an welchen Punkten die Spannungen über den Längsrippen 2 und 8 abgefragt wurden. Die Spannung  $\sigma_{tats}$  ist jene Spannung, die für eine Berechnung der Ermüdungsbeanspruchung maßgebend ist, da es jene ist, welche sich an der Kante der Schweißnaht befindet, wo die größte Kerbwirkung auftritt und es zu einer Überbeanspruchung kommen kann.

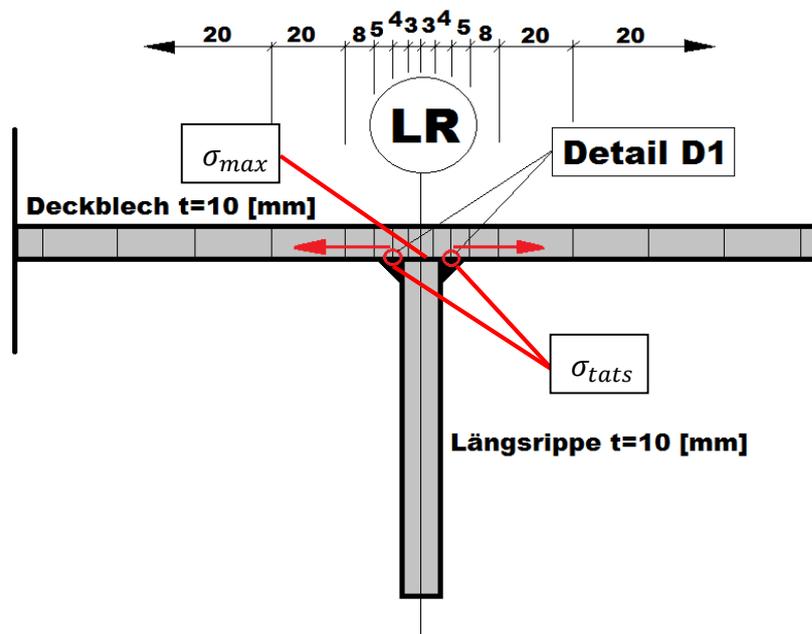
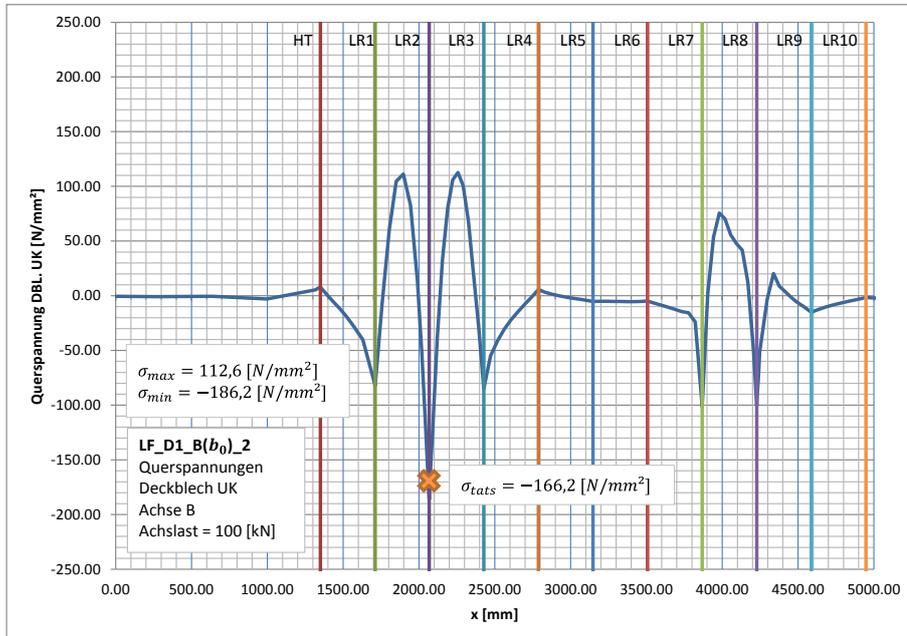


Abbildung 80: Detail D1 – LR 2 und 8: Abgelesene Spannung  $\sigma_{tats}$

**A 1.7.1.1. Achse B(b<sub>0</sub>):**

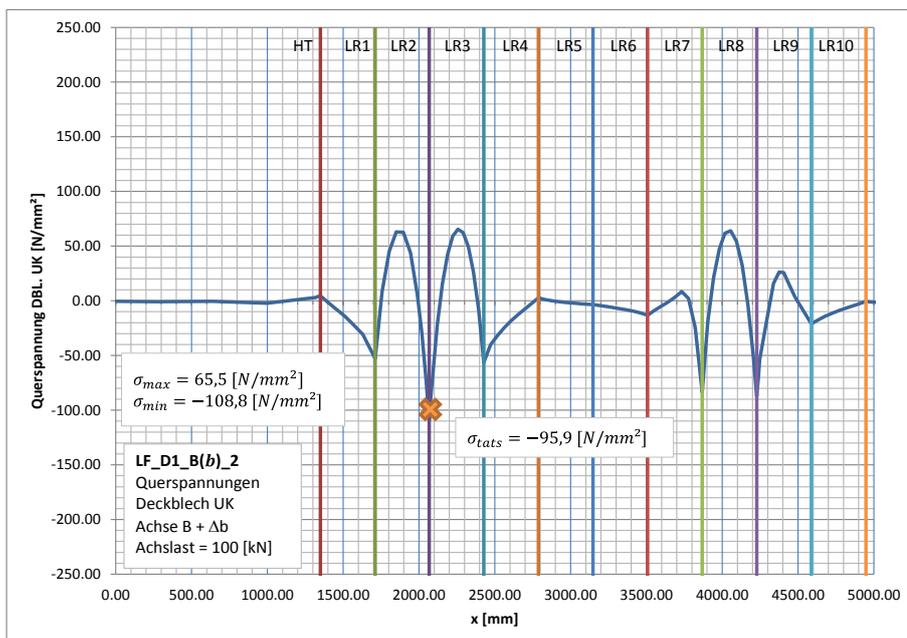
Den Normalspannungsverlauf an der Deckblechunterseite für den maßgebenden Lastfall – ohne lastverteilende Wirkung des Belages – zeigt die Abbildung 81. Der Wert  $\sigma_{tats}$ , im Abstand  $x = 7$  [mm] von der Längsrippenachse, ist zusätzlich eingetragen.



**Abbildung 81: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_2**

**A 1.7.1.2. Achse B(b):**

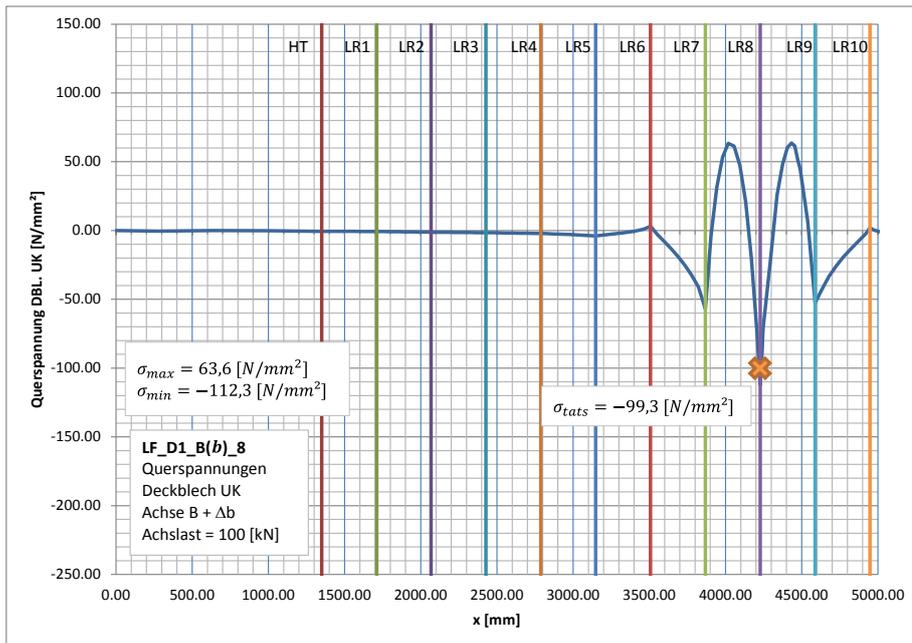
Den Normalspannungsverlauf an der Deckblechunterseite für den maßgebenden Lastfall – mit lastverteilender Wirkung des Belages – zeigt die Abbildung 82. Der Wert  $\sigma_{tats}$ , im Abstand  $x = 7$  [mm] von der Längsrippenachse, ist zusätzlich eingetragen.



**Abbildung 82: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D1\_B(b)\_2**



**A 1.7.2.2. Achse B(b):**



**Abbildung 84: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D1\_B(b)\_8**

### A 1.7.3. Detail D2

Alle Berechnungen wurden mit einer einheitlichen Achslast von  $F = 100$  [kN] durchgeführt.

Maßgebender Lastfall für Achse B:  $LF\_D2\_B(b_0)\_2$   
 $LF\_D2\_B(b)\_2$

Alle Spannungsverläufe für Detail D2 und D2\* wurden entlang desselben Pfades 2, welcher in Abbildung 85 für das optimierte Modell A dargestellt ist, generiert und sind somit direkt miteinander vergleichbar.

Abbildung 86 zeigt, an welchen Punkten der Längsrippen 2 und 8 die Spannungen abgelesen wurden.

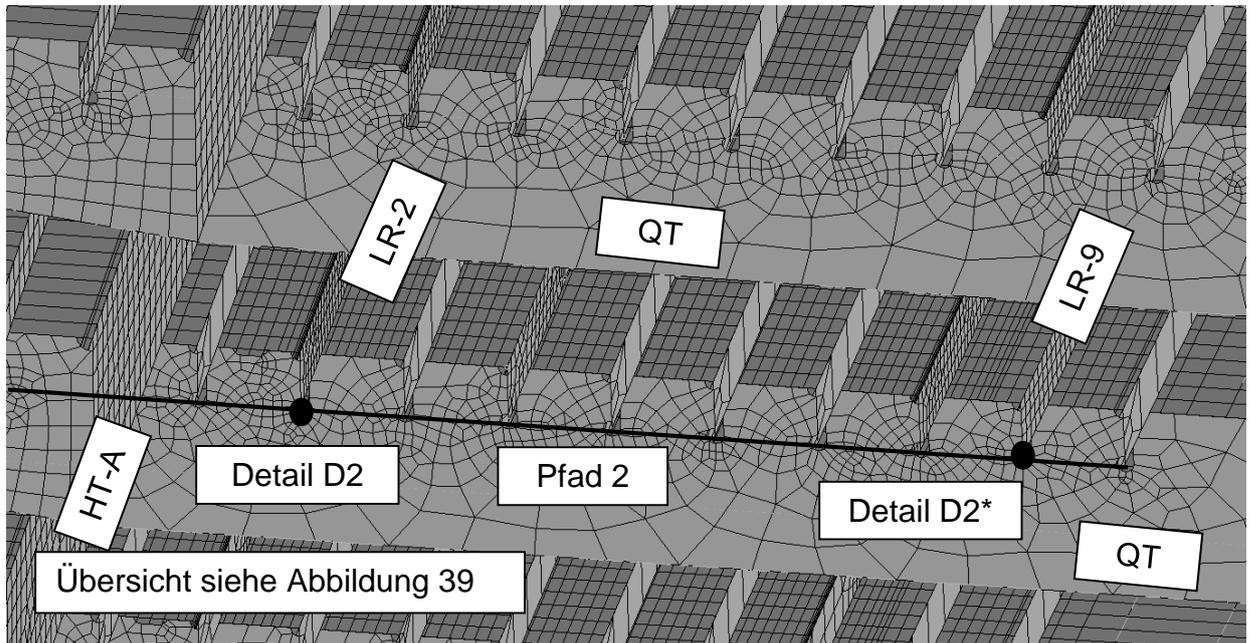


Abbildung 85: Modell A – Darstellung Pfad 2

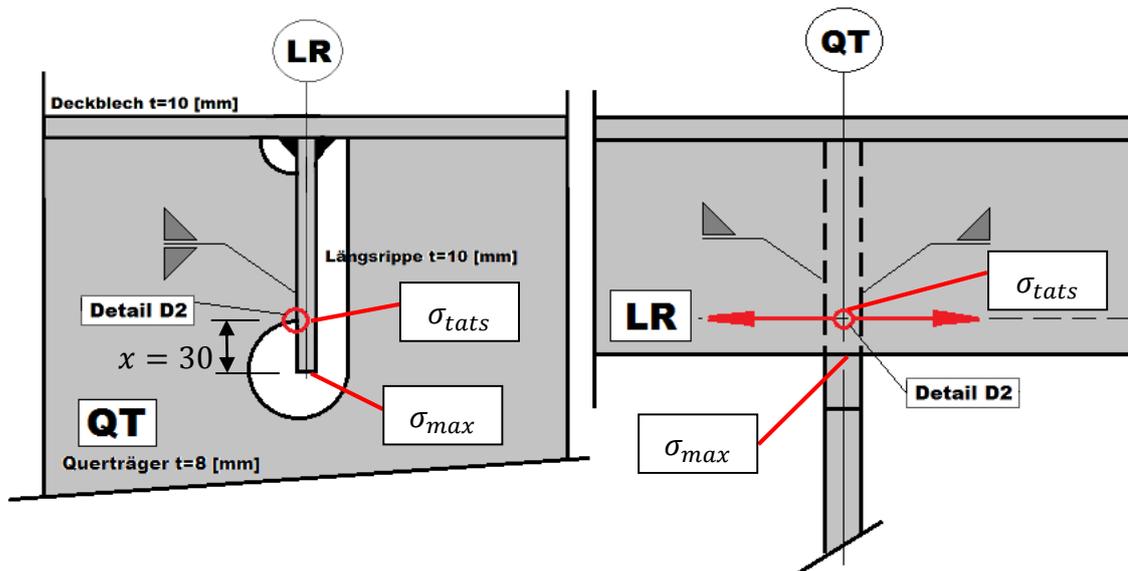
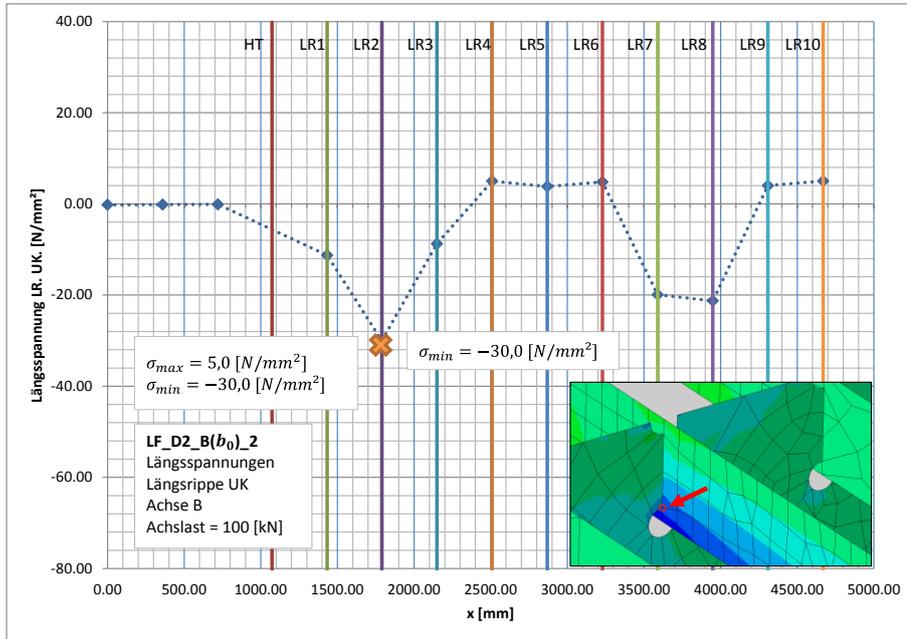


Abbildung 86: Detail D2 – LR 2 und 8: Abgelesene Spannung  $\sigma_{tats}$

**A 1.7.3.1. Achse B(b<sub>0</sub>):**

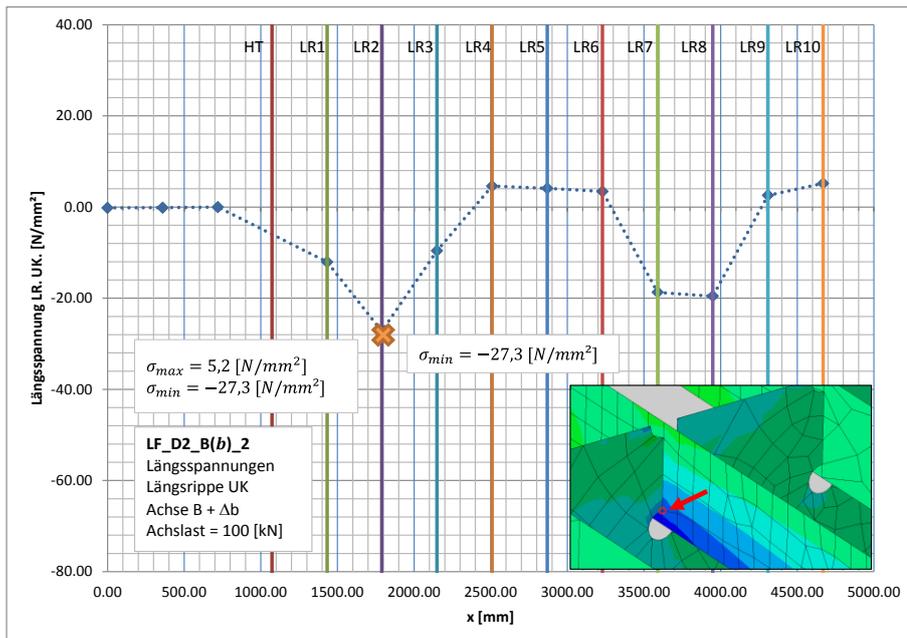
Die Abbildung 87 zeigt die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-2, ohne lastverteilende Wirkung des Belags.



**Abbildung 87: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_2**

**A 1.7.3.2. Achse B(b):**

Die Abbildung 88 zeigt die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-2, mit lastverteilender Wirkung des Belags.



**Abbildung 88: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b)\_2**

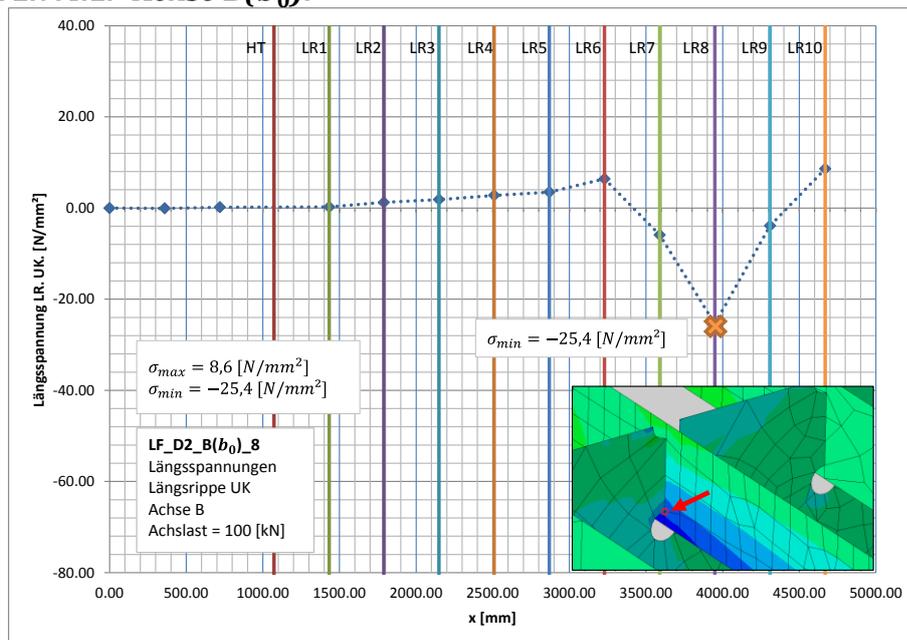
**A 1.7.4. Detail D2\***

Maßgebender Lastfall für Achse B: LF\_D2\_B( $b_0$ )\_8  
LF\_D2\_B( $b$ )\_8

Alle Spannungsverläufe für Detail D2 und D2\* wurden entlang desselben Pfades 2, welcher in Abbildung 85 dargestellt ist, generiert und sind somit direkt miteinander vergleichbar. Abbildung 86 zeigt, an welchen Punkten der Längsrippen 2 und 8 die Spannungen abgelesen wurden.

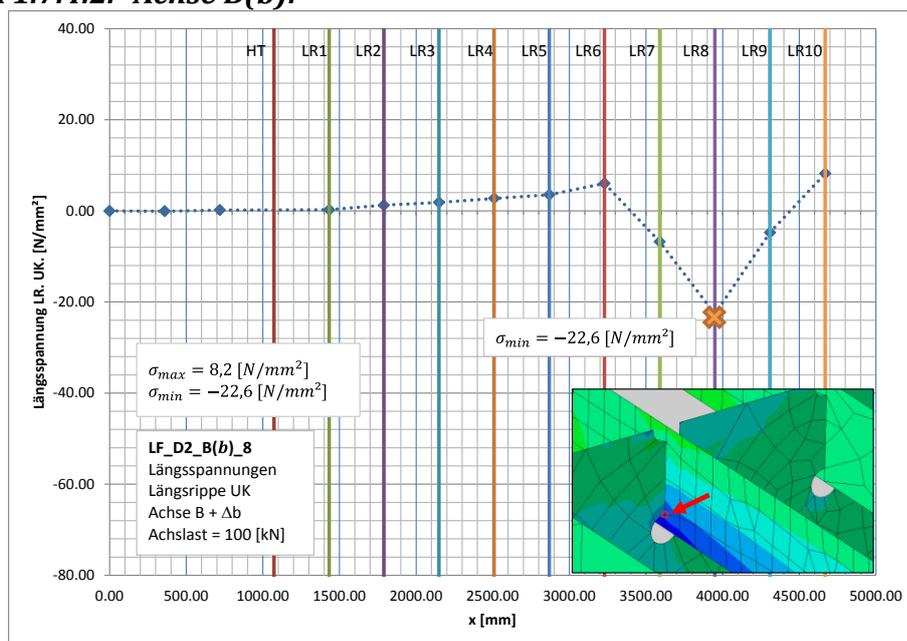
Abbildung 89 und Abbildung 90 zeigen die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-8.

**A 1.7.4.1. Achse B( $b_0$ ):**



**Abbildung 89: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_8**

**A 1.7.4.2. Achse B( $b$ ):**

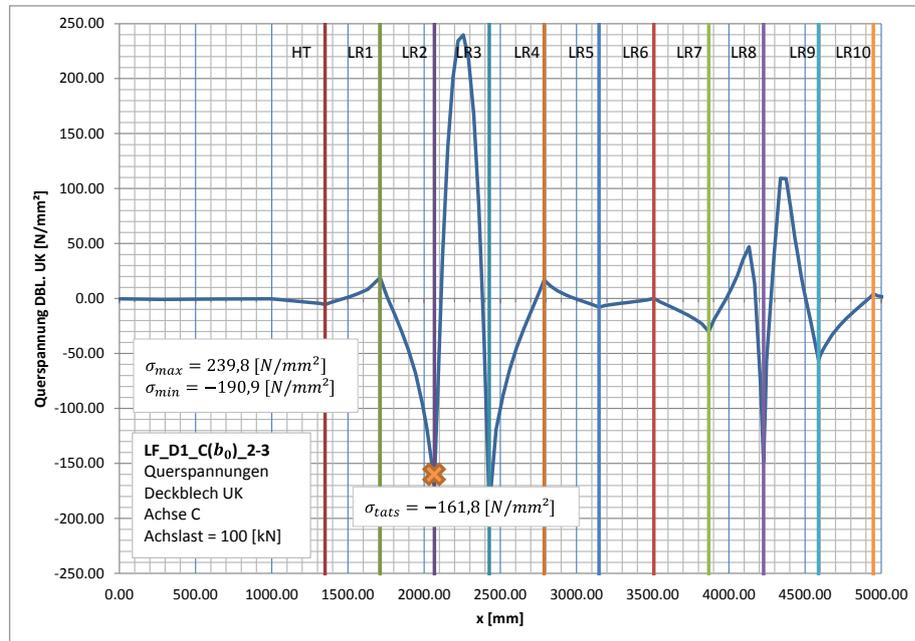


**Abbildung 90: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b$ )\_8**



**A 1.8.1.1. Achse C( $b_0$ )**

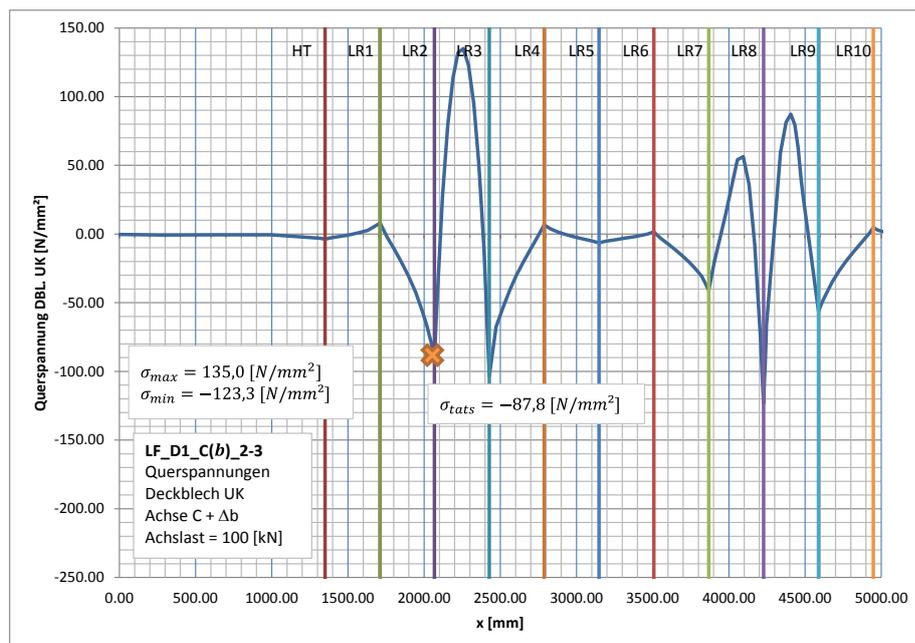
Den Normalspannungsverlauf an der Deckblechunterseite für den maßgebenden Lastfall – ohne lastverteilende Wirkung des Belags – zeigt die Abbildung 91. Der Wert  $\sigma_{tats}$ , im Abstand  $x = 7$  [mm] von der Längsrippenachse, ist zusätzlich eingetragen.



**Abbildung 91: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D2\_B( $b_0$ )\_2-3**

**A 1.8.1.2. Achse C( $b$ )**

Den Normalspannungsverlauf an der Deckblechunterseite für den maßgebenden Lastfall – mit lastverteilender Wirkung des Belags – zeigt die Abbildung 92. Der Wert  $\sigma_{tats}$ , im Abstand  $x = 7$  [mm] von der Längsrippenachse, ist zusätzlich eingetragen.



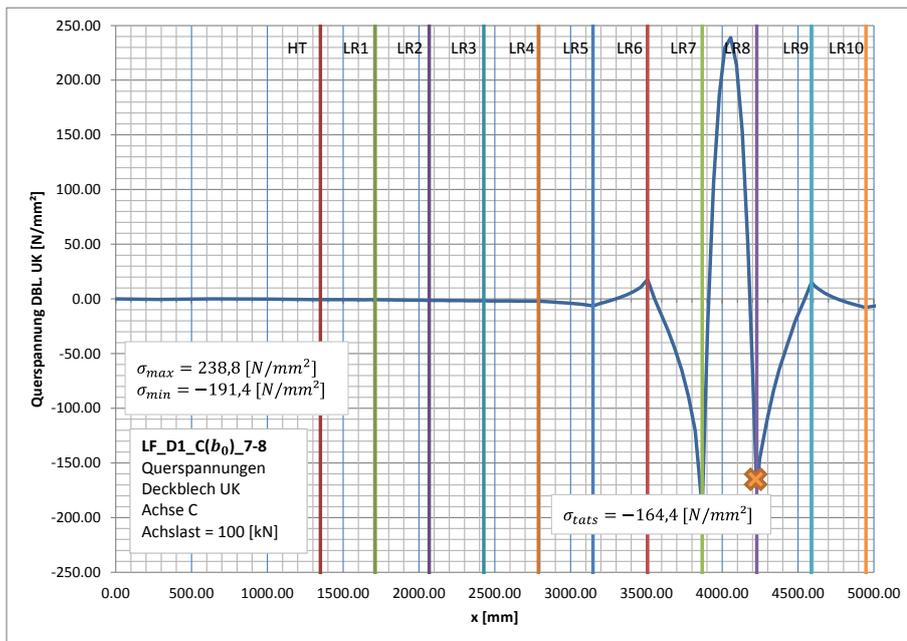
**Abbildung 92: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D2\_B( $b$ )\_2-3**

**A 1.8.2. Detail D1\***

Maßgebender Lastfall für Achse C: LF\_D1\_C((b<sub>0</sub>)\_7-8  
LF\_D1\_C(b)\_7-8

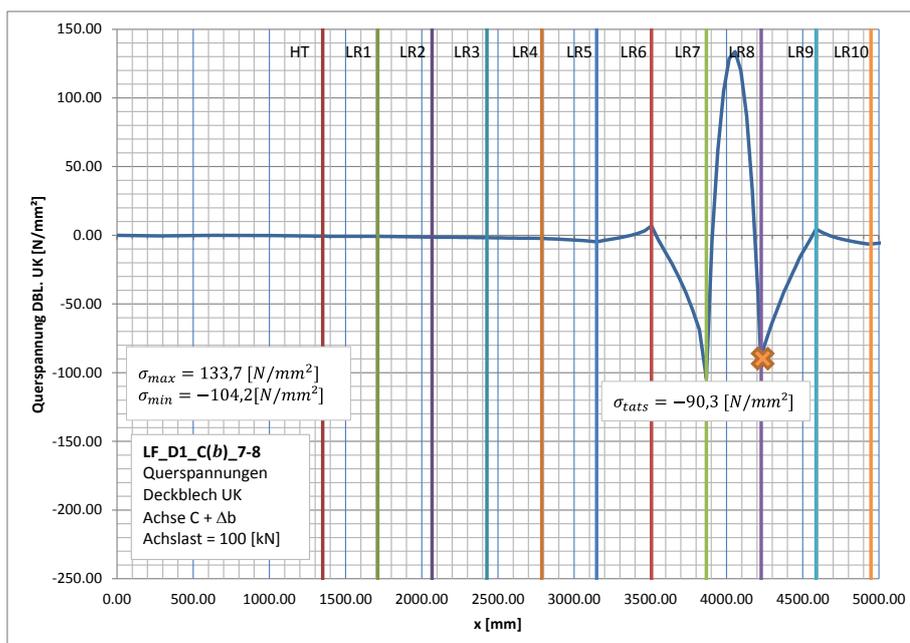
Die Spannungsverläufe an der Deckblechunterseite zeigen Abbildung 93 und Abbildung 94, wobei die Spannung  $\sigma_{tats}$  hervorgehoben ist.

**A 1.8.2.1. Achse C(b<sub>0</sub>)**



**Abbildung 93: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_7-8**

**A 1.8.2.2. Achse C(b)**



**Abbildung 94: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF\_D2\_B(b)\_7-8**

### A 1.8.3. Detail D2

Maßgebender Lastfall für Achse C: LF\_D2\_C( $b_0$ )\_2  
LF\_D2\_C( $b$ )\_2

#### A 1.8.3.1. Achse C( $b_0$ )

Die Abbildung 95 zeigt die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-2, ohne lastverteilende Wirkung des Belags.

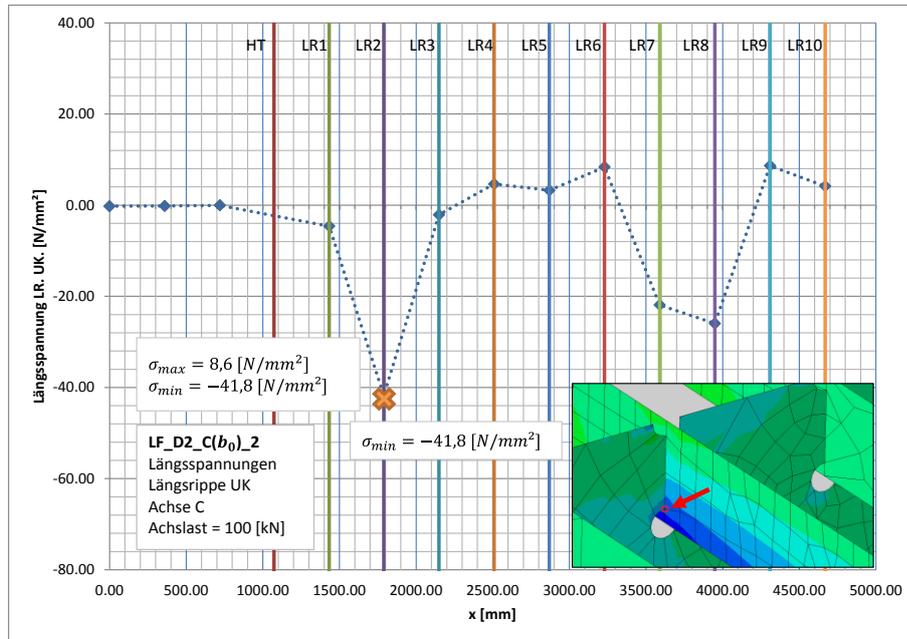


Abbildung 95: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_2

#### A 1.8.3.2. Achse C( $b$ )

Die Abbildung 96 zeigt die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-2, mit lastverteilender Wirkung des Belags.

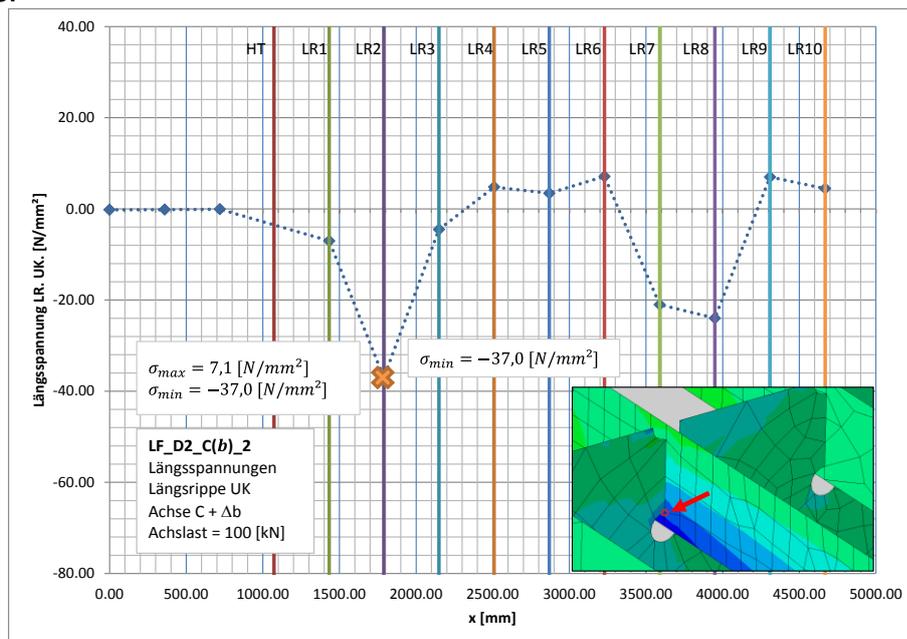


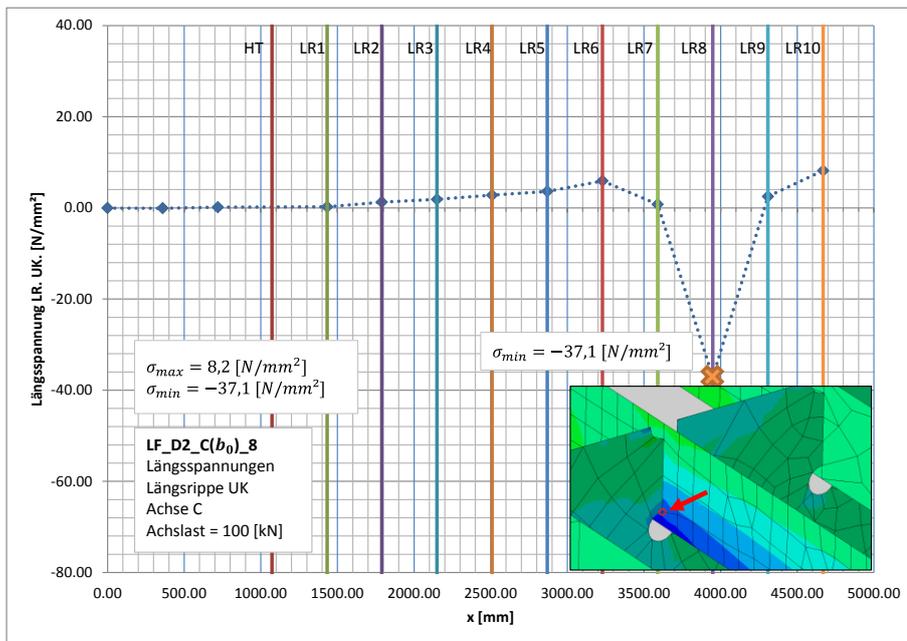
Abbildung 96: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b$ )\_2

**A 1.8.4. Detail D2\***

Maßgebender Lastfall für Achse C: LF\_D2\_C((b<sub>0</sub>)\_8  
LF\_D2\_C(b)\_8

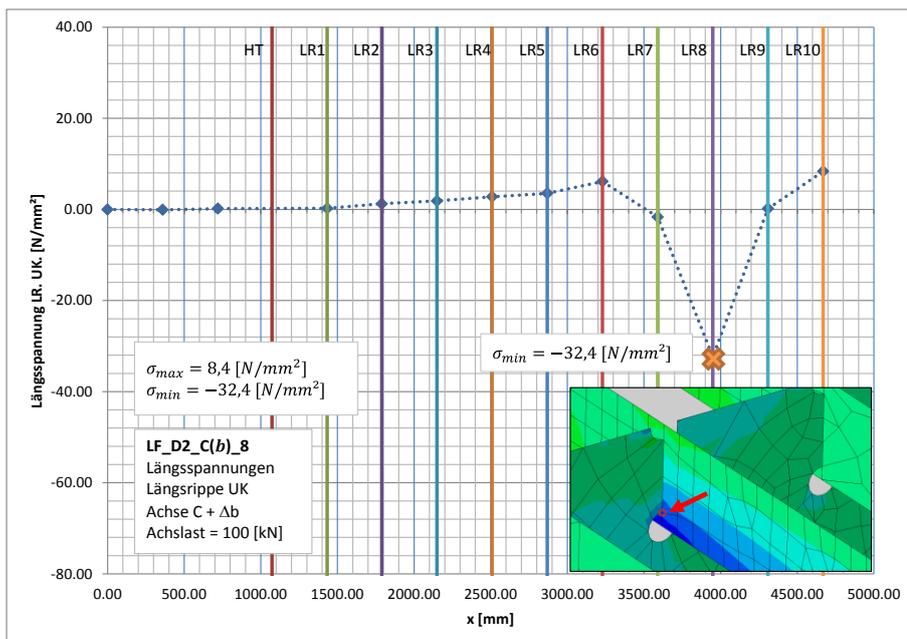
Abbildung 97 und Abbildung 98 zeigen die auftretenden Normalspannungen  $\sigma_{tats}$  in den einzelnen Längsrippen bei der Belastung unmittelbar über LR-8.

**A 1.8.4.1. Achse C(b<sub>0</sub>)**



**Abbildung 97: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_8**

**A 1.8.4.2. Achse C(b)**



**Abbildung 98: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b)\_8**

## A 1.9. Zusammenfassung der Ergebnisse - Modell A

In Tabelle 5 sind alle Ergebnisse, welche in den Kapiteln A 1.7 und A 1.8 präsentiert wurden, zusammengefasst dargestellt.

Es sind dies die Grenzwerte der Spannungen der Detailpunkte für die Achsen B und C, wobei jene Werte mit dem Index ( $b_0$ ) bei der Achsbezeichnung des Lastfalles den oberen Grenzwert darstellen, da hier die Radaufstandsfläche ohne eine Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belags unmittelbar auf das Deckblech aufgebracht wurde.

Werte mit dem Index ( $b$ ) bei der Achsbezeichnung des Lastfalls sind als untere Grenzwerte aufzufassen, da hier die lastverteilende Wirkung des Belages, wie es in EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässig ist, die Radaufstandsfläche um das Maß vergrößert wurde, welches bei einem Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  und einer Belagsdicke von 70 [mm] zustande kommt.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D1 und D1\* siehe Abbildung 80.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D2 und D2\* siehe Abbildung 86.

Modell A	Lastfall	Detail	$\sigma_{tats}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	LF_D1_B( $b_0$ )_2	D1 bei LR-2	-166.2	-186.2
	LF_D1_B( $b$ )_2		-95.9	-108.8
	LF_D1_C( $b_0$ )_2-3		-161.8	-170.1
	LF_D1_C( $b$ )_2-3		-87.8	-93.3
	LF_D1_B( $b_0$ )_8	D1* bei LR-8	-169.2	-189.2
	LF_D1_B( $b$ )_8		-99.3	-112.3
	LF_D1_C( $b_0$ )_7-8		-164.4	-173.0
	LF_D1_C( $b$ )_7-8		-90.3	-95.7
	LF_D2_B( $b_0$ )_2	D2 bei LR-2	-30.0	-42.5
LF_D2_B( $b$ )_2	-27.3		-38.7	
LF_D2_C( $b_0$ )_2	-41.8		-58.8	
LF_D2_C( $b$ )_2	-37.0		-52.3	
LF_D2_B( $b_0$ )_8	D2* bei LR-8	-25.4	-36.6	
LF_D2_B( $b$ )_8		-22.6	-32.8	
LF_D2_C( $b_0$ )_8		-37.1	-52.8	
LF_D2_C( $b$ )_8		-32.4	-46.3	

Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse an Modell A



## A 2. Analyse an lokalen Modellen

### A 2.1. Allgemeines

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit ist es, beurteilen zu können in wie fern der laut EN 1991-2 [1] zulässige Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  infolge der lastverteilenden Wirkung des Belages bei orthotropen Platten der Realität entspricht.

Im Folgenden wird auf die Dissertation von de Jong [5] kurz eingegangen, der behauptet, dass ein Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  keine konservative Annahme sei. Er gibt einen Vorschlag an, welcher eine bessere Annäherung der Erfassung der günstigen Lastausbreitung durch den Belag darstellen soll. (siehe Abbildung 101)

Dies gab uns den Anlass Untersuchungen anzustellen über die Richtigkeit dieser Aussagen, da vor allem das nach de Jong verwendete FE-Modell eines vertikal starr gestützten Deckbleches, wie es in Abbildung 99 dargestellt ist einen wesentlichen Effekt nicht berücksichtigt, so gibt es Grund zur Annahme das es durch Verformungen der orthotropen Platte selbst zu einer besseren Lastausbreitung im Belag kommen kann. Da das von de Jong verwendete Modell nach Abbildung 99 an der Unterseite des modellierten Belages in alle Richtungen gesperrt ist, wird der Effekt der Nachgiebigkeit des Fahrbahndecks nicht erfasst.

Im FE-Modell nach Abbildung 99 wurde der Belag als Asphalt mit einer Dicke von 50 [mm] und einem E-Modul von  $E=50.000$  [MPa] abgebildet, wobei dieser an der Unterseite in alle Richtungen starr gelagert wurde. Gerechnet wurde ein ebener Spannungszustand, mit den Radaufstandsabmessungen eines Rades der Achse B nach EN 1991-2: Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 49) und einer zugehörigen Radlast von 35 [kN], was bei der Radbreite  $b=220$  [mm] und einer Radlänge von  $a=320$  [mm] einer Flächenpressung von  $0,5$  [N/mm<sup>2</sup>] entspricht. Im ebenen Spannungszustand entspricht dies somit einer Linienlast von  $0,5$  [N/mm].

Es wurden mehrere Berechnungen durchgeführt, wobei der E-Modul und die Querdehnzahl des Asphaltes variiert wurden. Bei einer starren Lagerung des Belages bewirkt dies jedoch keine Änderungen der Ergebnisse, wie in Kapitel A 2.4 gezeigt wird.

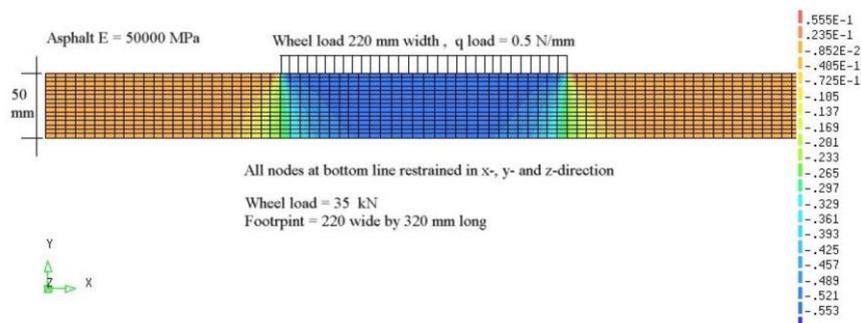


Abbildung 99: FE-Modell nach de Jong [5] – Asphaltbelag auf starr gestütztem Deckblech

Abbildung 100 zeigt die aus dem FE-Modell resultierende Druckverteilung auf den Untergrund, in der zu erkennen ist, dass ein Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  nicht als vereinfachte Annahme in Frage kommt. So entspräche eine trapezförmige Annäherung der Flächenpressung auf die Unterkonstruktion eher der Druckverteilung aus dem FE-Modell.

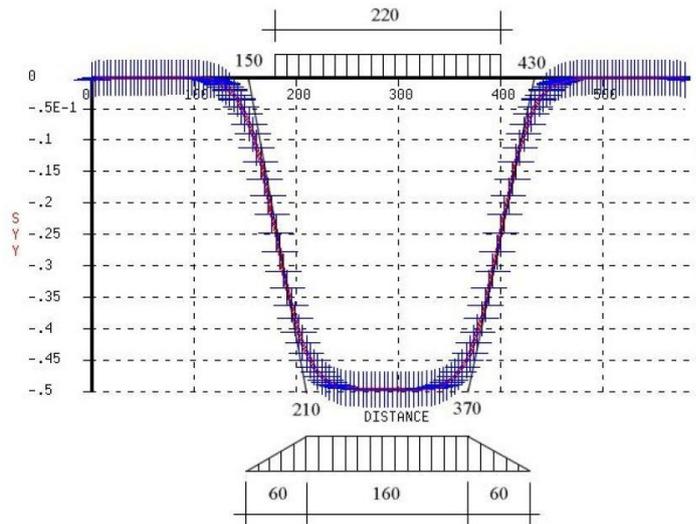


Abbildung 100: Druckverteilung auf Deckblech de Jong [5]

Mithilfe dieser gewonnen Erkenntnisse gab de Jong den Verbesserungsvorschlag, wie er in Abbildung 100 und Abbildung 101 dargestellt wird, was natürlich eine sehr konservative Annahme der Lastverteilung darstellt. Dies erfordert einen höheren Rechenaufwand und auch die an den Kerbstellen der Ermüdungsrechnung maßgebenden Spannungen werden deutlich erhöht, da diese zum größten Teil sehr sensibel auf Änderungen der Abmessungen der Aufstandsflächen der Räder reagieren. (insbesondere Detail D1 – Deckblechbiegung)

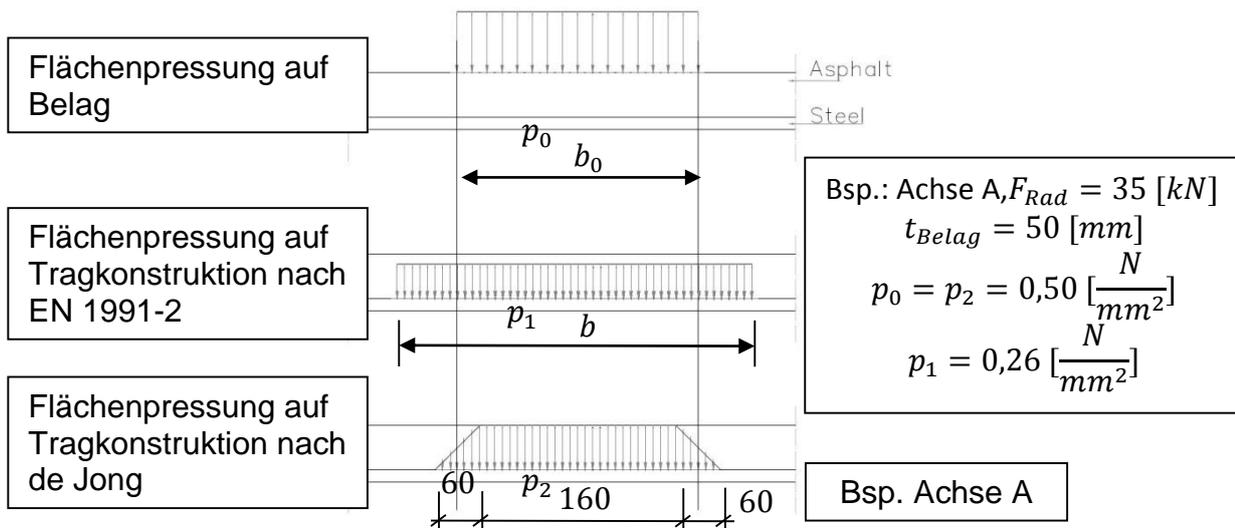


Abbildung 101: Vorschlag für Lastverteilung nach de Jong [5]

## A 2.2. Verbesserte lokale FE-Modelle

Es wurden nun 4 FE-Modelle erstellt, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, um den Effekt einer Nachgiebigkeit des Fahrbahndecks, also des Deckbleches und der Längsrippen, erfassen zu können und ebenfalls einen Vergleich mit dem Modell nach de Jong (siehe Abbildung 99) anstellen zu können.

Es wurden die gleichen geometrischen Abmessungen wie in Modell A verwendet, um direkte Vergleiche machen zu können, vor allem da eine in Kapitel A 2.3 durchgeführte Diskretisierungsstudie Aufschluss über eine optimierte FE-Netzteilung ergab. Die Modellabmessungen sind jedoch deutlich kleiner gewählt.

Die Ergebnisse werden in Kapitel A 2.4 präsentiert.

### A 2.2.1. Lokales Modell L1 – Belag und starres Deckblech

#### A 2.2.1.1. Beschreibung des FE-Modells

Abbildung 102 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

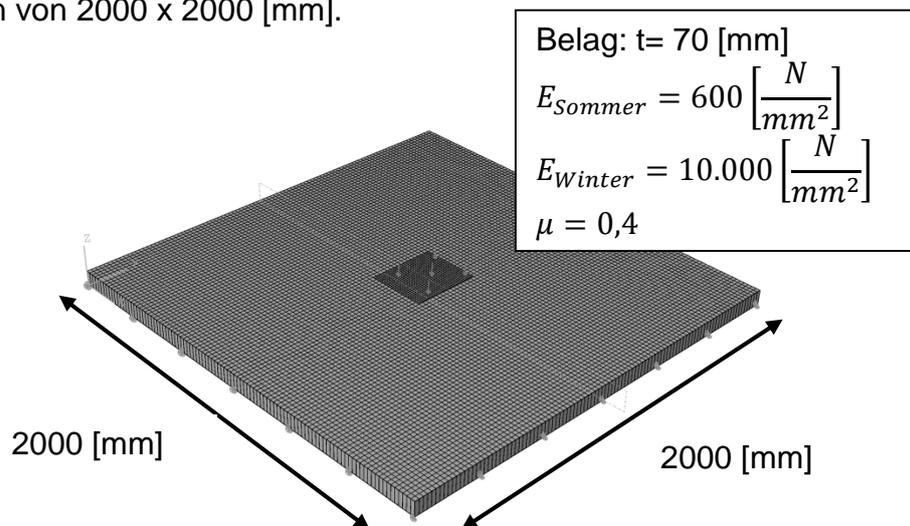


Abbildung 102: Lokales Modell L1: isometrische Ansicht

Es wurden für den Asphalt Elemente mit einem parabolischem Verformungsansatz gewählt, wobei über die Höhe des modellierten Belages von 70 [mm] ein Element modelliert wurde, womit eine laut Kapitel A 2.3 ausreichend genaue Diskretisierung vorhanden ist.

Die Elementgröße in der Ebene beträgt 20 x 20 [mm] und der Belag ist an der unteren Fläche vertikal starr gelagert, somit kann ein Vergleich mit dem FE-Modell nach de Jong [5] (siehe Abbildung 99) durchgeführt werden und im Weiteren wurden die Rechnungen für zwei unterschiedliche E-Module des Asphalts durchgeführt, um zu zeigen, dass deren Änderung bei einer starren Lagerung des Modells keine Änderungen hervorrufen können.

Die Werte der E-Module stammen aus [6].

### A 2.2.1.2. Belastung

Als Belastung für dieses Modell L1 wird ein Einzelrad der Achse C nach EN 1991-2: Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 49) mit einer Radlast von 50 [kN] mittig auf den Belag aufgebracht. (siehe Abbildung 103)

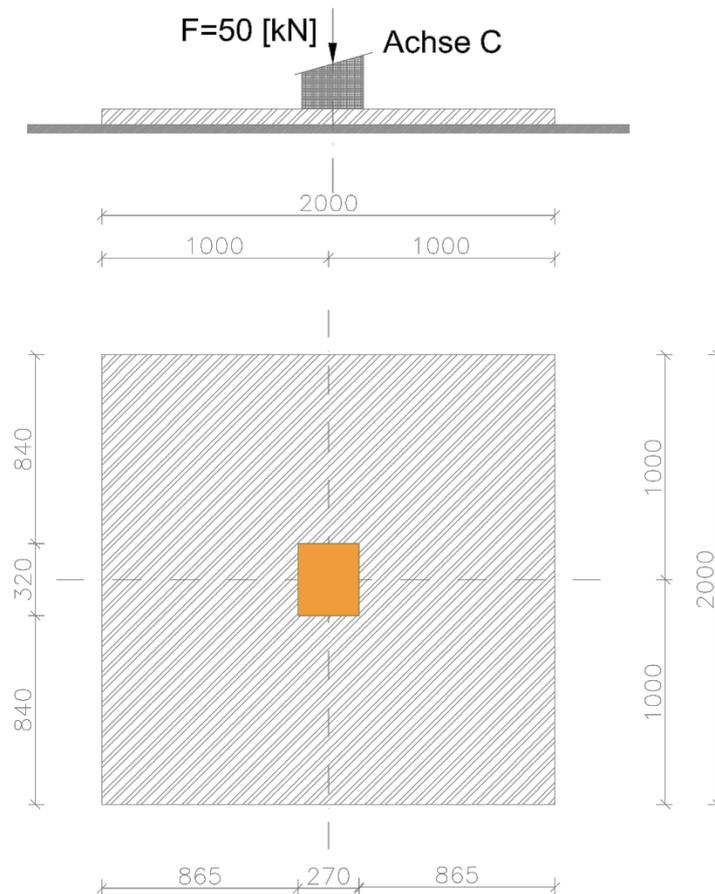


Abbildung 103: Belastung: Achse C( $b_0$ )

### A 2.2.2. Lokales Modell L2 – Fahrbahndeck ohne Belag

#### A 2.2.2.1. Beschreibung des FE-Modells

Abbildung 104 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

Dieses Modell L2 besteht aus dem Deckblech und den Längsrippen, wobei die Längsrippen an ihren beiden Stirnseiten starr gelagert sind, das heißt es wird eine Verformung der Querträger nicht berücksichtigt. Dies ist jedoch eine konservative Modellbildung, da diese Konstruktion durch eine starre Lagerung der Längsrippen steifer wird und damit größere Spannungen zu erwarten sind, als wenn die Längsrippen nachgiebig gelagert wären.

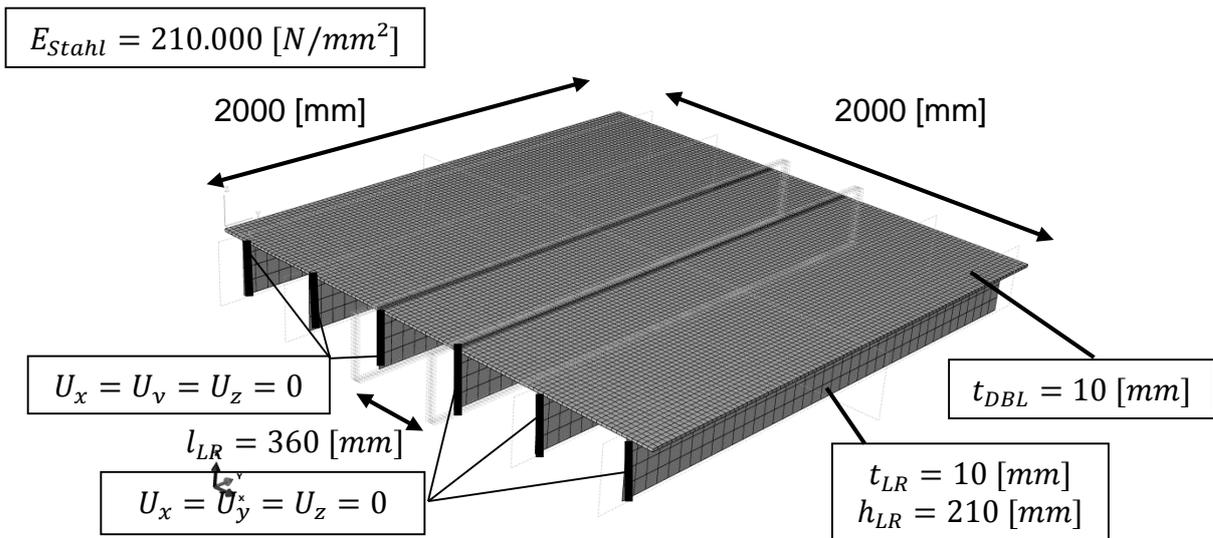


Abbildung 104: Lokales Modell L2 (ohne Belag): isometrische Ansicht

### A 2.2.2.2. Belastung

Als Belastung für dieses Modell wird ein Einzelrad der Achse C und B nach EN 1991-2: Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 49), einmal ohne Berücksichtigung einer Lastausbreitung und ein andermal mit Berücksichtigung einer Lastausbreitung mittig zwischen zwei Längsrippen aufgebracht. (Somit insgesamt 4 Lastfälle, siehe Abbildung 105 und Abbildung 106)

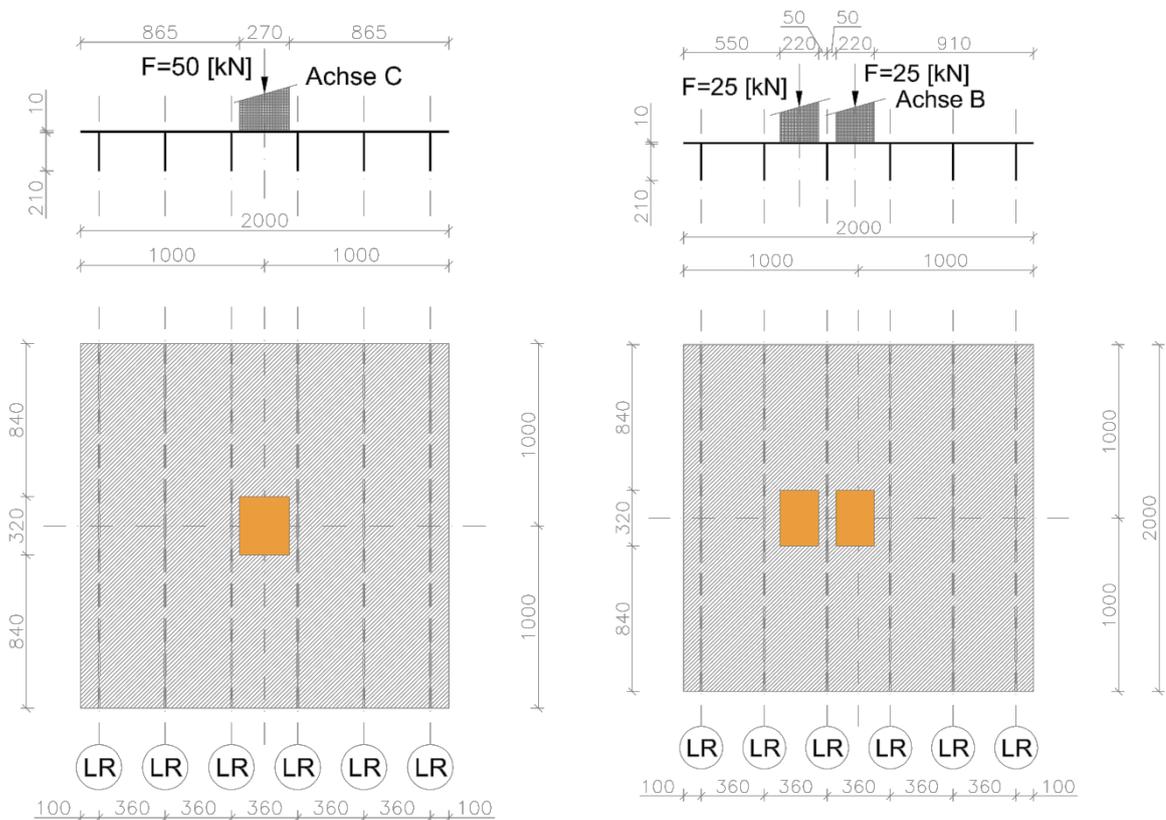


Abbildung 105: Lokales Modell L2 (ohne Belag): Belastung Achse B( $b_0$ ) und Achse C( $b_0$ )

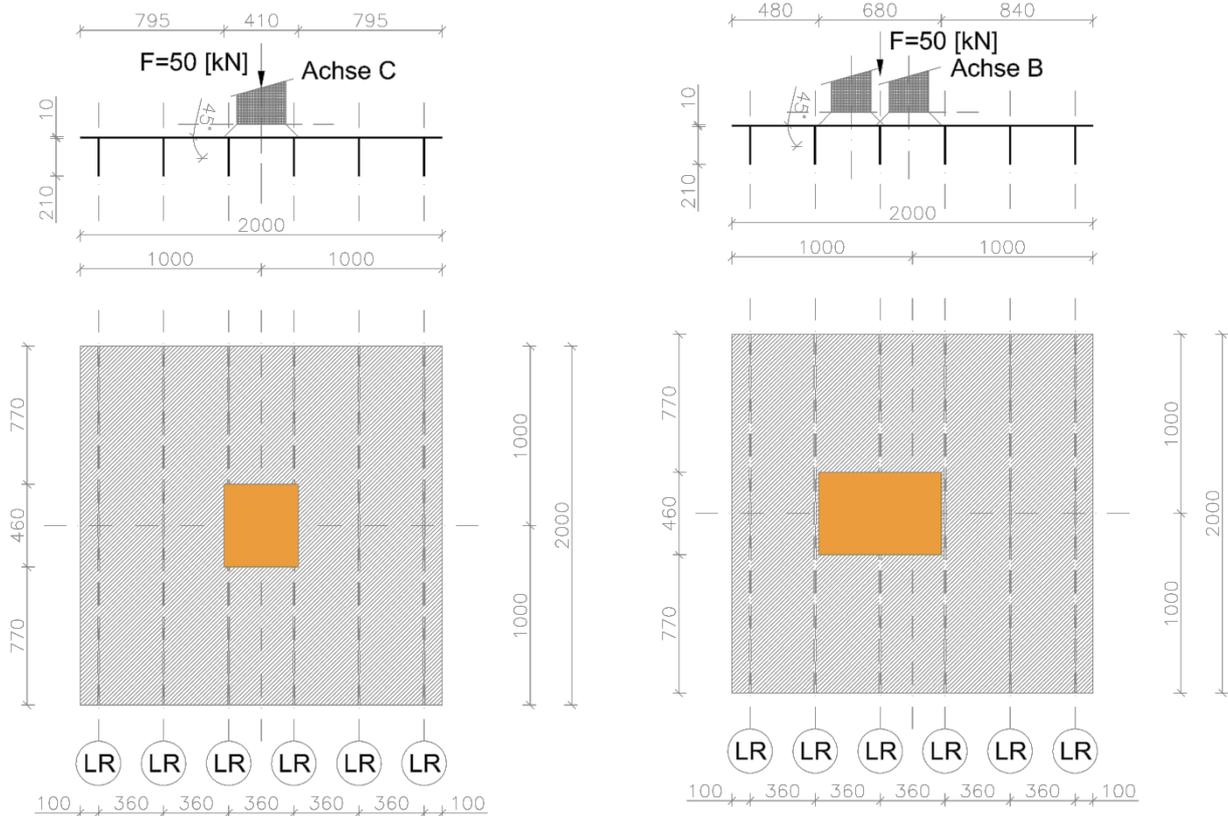


Abbildung 106: Lokales Modell L2 (ohne Belag): Belastung Achse B(b) und Achse C(b)

### A 2.2.3. Lokales Modell L2m – Fahrbahndeck mit Belag/starrer Verbund

#### A 2.2.3.1. Beschreibung des FE-Modells

Abbildung 107 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

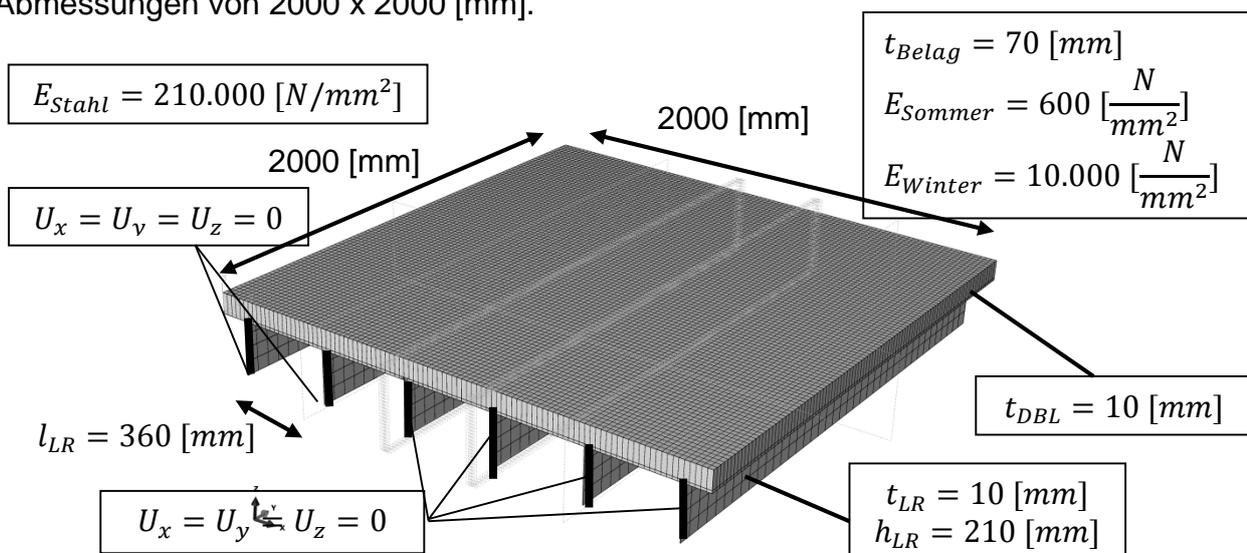


Abbildung 107: Lokales Modell L2m (mit Belag): isometrische Ansicht

Die Lagerung dieses Modells erfolgte, wie bei dem lokalen Modell L2 (ohne Belag) (siehe Kapitel A 2.2.2) schon beschrieben wurde, durch eine starre Lagerung der Längsrippen an deren Stirnseiten. In diesem Modell wurde der Belag mitmodelliert, wobei dieser starr mit dem Deckblech verbunden wurde. Dies wurde mit einem „Tie Constraint“ in Abaqus ausgeführt und stellt somit die Abbildung eines starren Verbundes dar.

Die E-Module des Belages wurden mittels zweier Werte für den Sommer und den Winter variiert ( $E_{Sommer} = 600 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{Winter} = 10.000 \text{ N/mm}^2$ ), um den Einfluss einer sich ändernden Steifigkeit des Belages durch die Umgebungstemperatur darstellen zu können.

### A 2.2.3.2. Belastung

Als Belastung für dieses Modell wird ein Einzelrad der Achse C und B nach EN 1991-2: Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 49) aufgebracht. (Somit insgesamt 2 Lastfälle, siehe Abbildung 108)

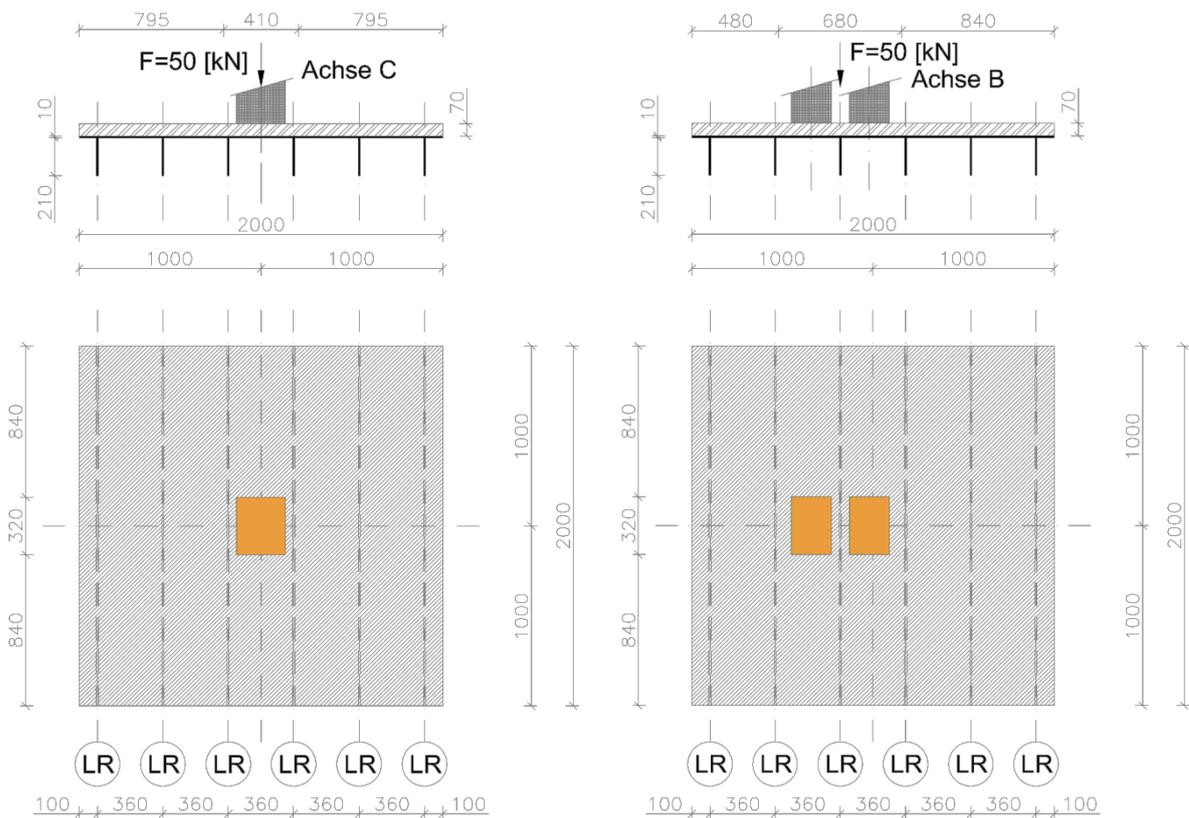


Abbildung 108: Lokales Modell L2m (mit Belag): Belastung Achse B( $b_0$ ) und Achse C( $b_0$ )

## A 2.2.4. Lokales Modell L3m – Fahrbahndeck mit Belag/ohne Verbund

### A 2.2.4.1. Beschreibung des FE-Modells

Abbildung 109 zeigt eine isometrische Ansicht des gewählten FE-Modells mit den Abmessungen von 2000 x 2000 [mm].

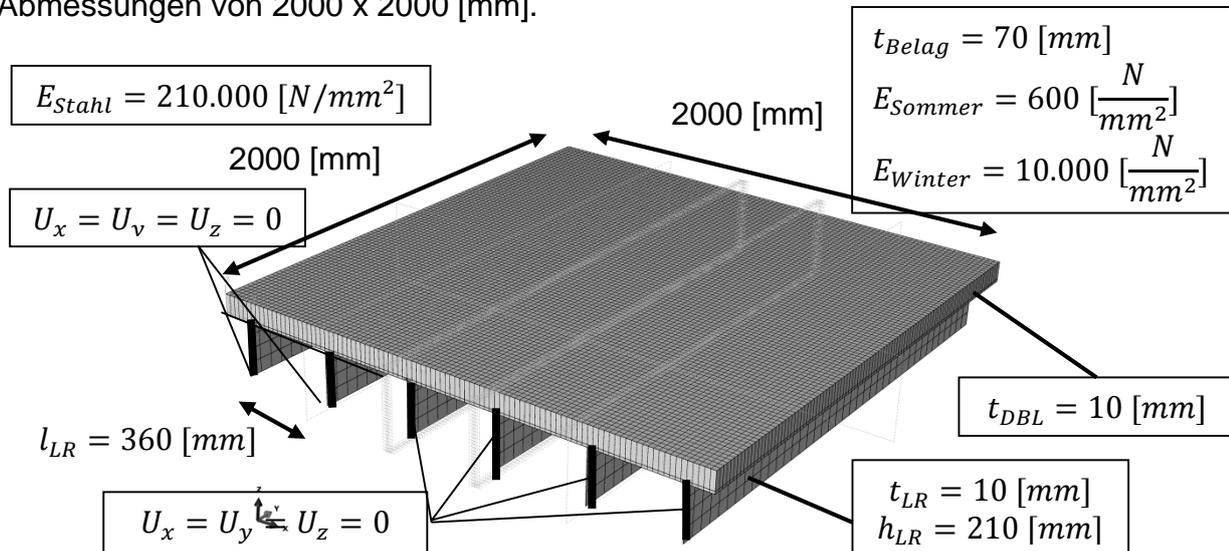


Abbildung 109: Lokales Modell L3m: isometrische Ansicht

Die Lagerung dieses Modells erfolgte, wie bei dem lokalen Modell L2 (ohne Belag) (siehe Kapitel A 2.2.2) schon beschrieben wurde, durch eine starre Lagerung der Längsrippen an deren Stirnseiten. In diesem Modell L3m wurde der Belag modelliert, wobei dieser nun nicht mehr starr mit dem Deckblech verbunden wurde, sondern in horizontaler Ebene keine Verbindung aufweist. Im Abaqus erfolgte dies durch eine Interaktion der beiden Teile mittels „Hard Contact“ in Richtung normal auf die Deckblechebene und „Frictionless“ in tangentialer Richtung zur Deckblechebene. Somit liegt hier kein Verbund zum Deckblech vor. Es wurde wieder eine Variation der E-Module des Belages durchgeführt.

Dieses lokale Modell L3m stellte die Basis für eine in Kapitel A 2.3 durchgeführte Diskretisierungsstudie und gab wichtige Informationen zur Erweiterung des Modells A (ohne Belag) zu Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) und Modell B-2 (mit Belag, kein Verbund).

### A 2.2.4.2. Belastung

Als Belastung für dieses Modell wird ein Einzelrad der Achse C und B nach EN 1991-2: Tabelle 4.8 [1] (siehe Abbildung 49) aufgebracht.

Die Belastung wurde gleich wie bei Modell L2m (mit Belag) aufgebracht, deshalb befindet sich hier keine neue Skizze, es wird auf Abbildung 108 verwiesen.

## A 2.3. Diskretisierungsstudie

Es folge eine ausführliche Analyse verschiedenster FE-Netze, mit dem Ziel ein FE-Netz zu finden, das die gewünschten Ergebnisse gut annähert, aber auch ein zu großer Rechenaufwand vermieden wird, da das lokale Modell L3m im Vergleich mit den lokalen Modellen L1 bis L2 bereits eine deutlich höhere Anzahl an Freiheitsgraden aufweist. Im Weiteren sollte das aus dieser Studie gefundene FE-Netz dann auch bei den Modellen A, B-1 und B-2 Anwendung finden.

Eine Durchführung dieser Studie an den großen Modellen A, B-1 und B-2 war unmöglich, da diese einen zu großen Rechenaufwand benötigten, daher wurde diese Studie an diesen lokalen Modellen durchgeführt.

Einerseits wollte man den Effekt der Lastausbreitung des Belages gut erfassen können, daher wurde Hauptaugenmerk auf die Druckverteilung der Belastung am Deckblech gelegt.

Im Laufe dieser Studie fiel auf, dass die Quernormalspannungen im Deckblech direkt an der Längsrippe bei Variation des FE-Netzes deutlich streuten, was daran lag, dass die Längsrippen als Schalenelemente modelliert wurden und entlang ihrer Verbindungslinie zum Deckblech lediglich eine Kante und keine Fläche aufweisen, wie bei Modellierung mit Volumenelementen. Trotzdem wurden auch in allen lokalen Modellen Schalenelemente für die Längsrippen verwendet.

### A 2.3.1. Lokales Modell L3m: Druckverteilung im Schnitt A-A

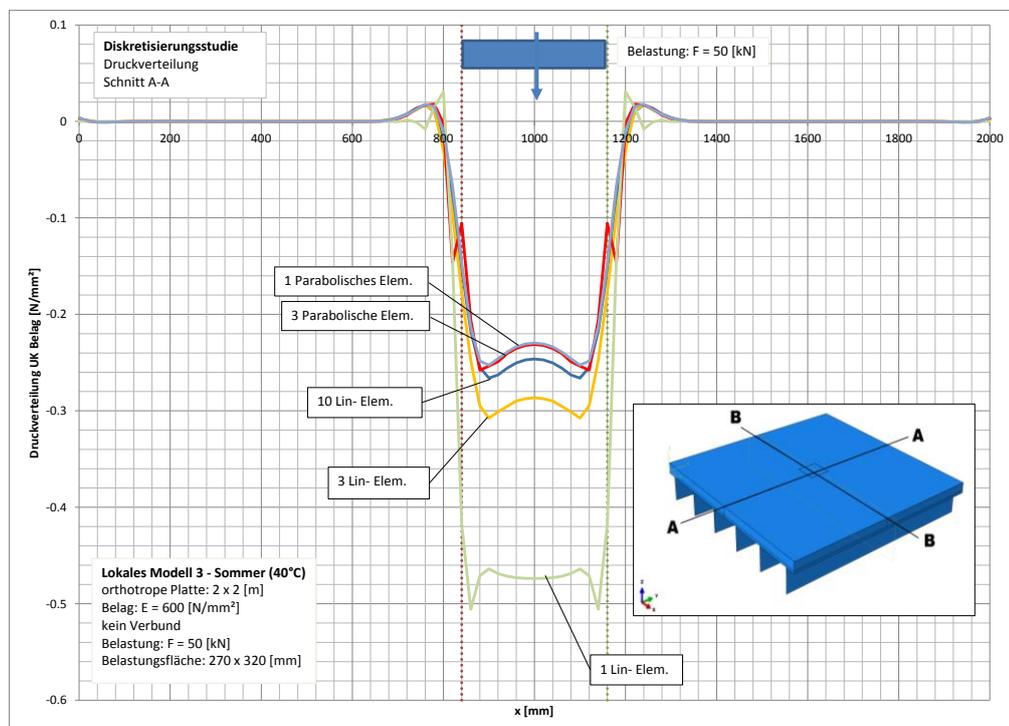


Abbildung 110: Lokales Modell L3m – Druckverteilung vertikal im Schnitt A-A

Abbildung 110 zeigt die vertikalen Druckverteilungen auf das Deckblech im Schnitt A-A, wobei über die Dicke des Belages die Elementteilung, sowie deren Verformungsansatz variiert wurden.

Es zeigt sich, dass 3 Elemente über die Dicke mit einem parabolischen Verformungsansatz die Druckverteilung am besten wiedergeben können. Da jedoch diese Elementteilung eine zu große Rechenleistung erfordert, wurde entschieden für die Modelle B-1 und B-2 nur ein Element über die Belagsdicke zu wählen - mit einem parabolischem Verformungsansatz, da mit dieser Elementteilung die Druckverteilung ähnlich gut angenähert werden kann.

### A 2.3.2. Lokales Modell L3m: Druckverteilung vertikal im Schnitt B-B

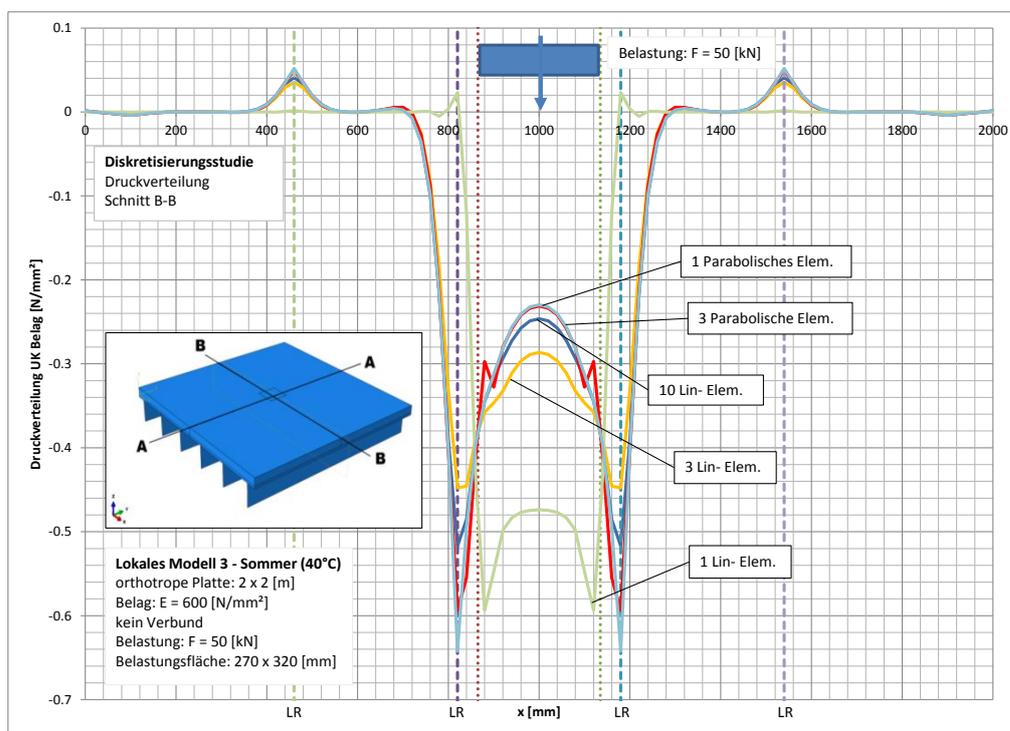


Abbildung 111: Lokales Modell L3m; vertikale Druckverteilung im Schnitt B-B

Abbildung 111 zeigt die Druckverteilungen am Deckblech durch den Schnitt B-B, senkrecht zu den Längsrippen. Ähnlich wie bei Schnitt A-A wird das Ergebnis am besten mit drei Elementen über die Dicke und einem parabolischem Verformungsansatz angenähert, jedoch ist auch hier ein Element über die Dicke mit parabolischem Verformungsansatz gleichwertig.

Bereits aus diesem Diagramm kann eine wesentliche Erkenntnis getroffen werden. So ist die vertikale Druckspannung direkt über den Längsrippen deutlich größer, als in den übrigen Bereichen, da durch die Längsrippen eine deutlich höhere Steifigkeit erreicht wird und diese die Lasten anzieht.

**Fazit:** Optimale Annäherung der vertikalen Druckverteilung auf das Deckblech durch ein Element über die Dicke des Belages mit einem parabolischen Verformungsansatz.

### A 2.3.3. Lokales Modell L3m: Quernormalspannungen an Deckblech UK

#### A 2.3.3.1. Netzverfeinerung in Dickenrichtung

Ähnlich wie zuvor bei der Untersuchung der vertikalen Pressungen wurde auch das am besten geeignete FE-Netz für das Deckblech zur Wiedergabe der Normalspannungen an der Deckblechunterseite gesucht. Dieses sollte die Quernormalspannungen an der Unterkante des Deckbleches möglichst gut annähern können und auch hier sollte eine zu große Elementanzahl vermieden werden, da auch das Deckblech mit Volumenelementen modelliert wurde und zu viele Elemente die Rechenzeit drastisch ansteigen lassen.

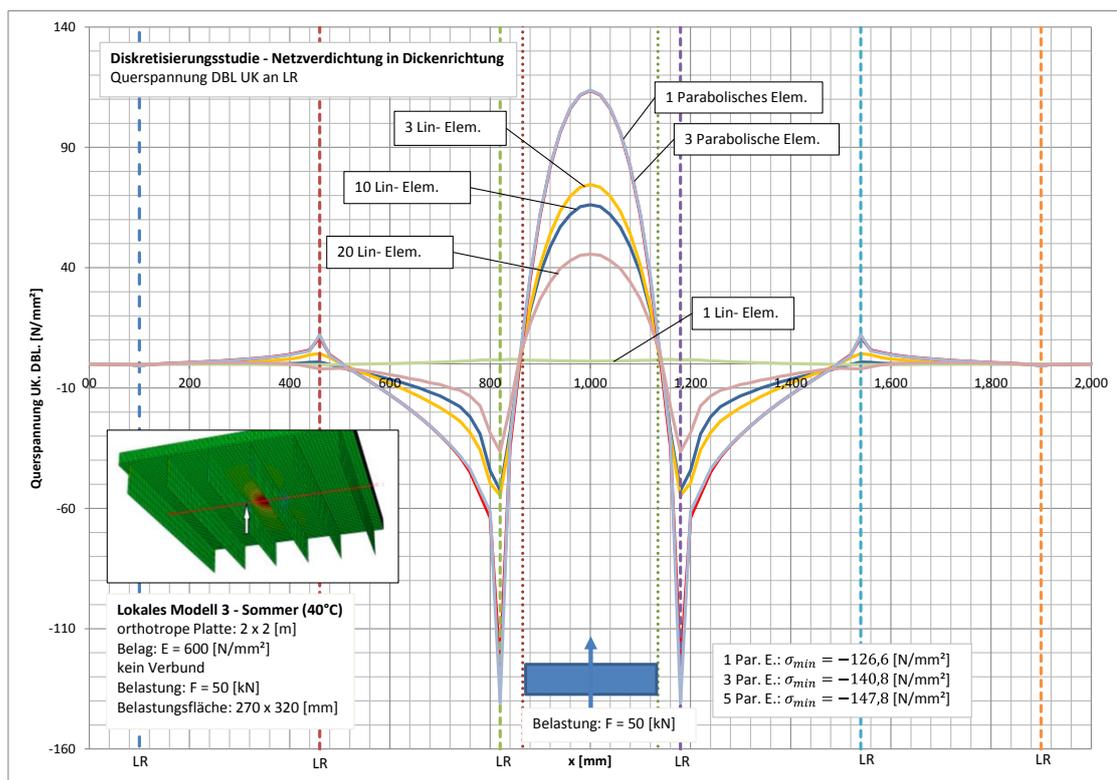


Abbildung 112: Lokales Modell L3m; Einfluss der Netzverfeinerung in Dickenrichtung auf die Normalspannungen im Deckblech

Es wurde, wie in Abbildung 112 dargestellt ist, eine FE-Netz Untersuchung über die Diskretisierung des Deckbleches durchgeführt, wobei nun zu erkennen ist, dass selbst bei einer Elementteilung von 10 Elementen über die Dicke ein linearer Verformungsansatz vollkommen unzureichend ist. Ein parabolischer Verformungsansatz hingegen kann bereits mit einem Element über die Dicke das gewünschte Ergebnis gleichermaßen gut annähern wie mit drei Elementen.

In diesem Diagramm ist außerdem noch gut zu erkennen, dass durch die Extrapolation des parabolischen Ansatzes die Normalspannungen direkt über den Längsrippen extrem ansteigen.

Es war unbedingt erforderlich noch weitere FE-Netz Untersuchungen in der Ebene des Deckbleches anzustellen, da diese offenbar einen deutlich höheren Einfluss auf die Ergebnisse haben.

### A 2.3.3.2. Netzverfeinerung in der Ebene des Deckblechs

Es folgte eine Untersuchung des FE-Netzes in der Ebene des Deckbleches und im Folgenden werden die hierfür gewählten Netzteilungen erklärt.

#### Netz A

Über die gesamte Fläche des Deckbleches wurde ein gleichmäßiges Raster viereckiger Elemente angeordnet, welche alle die gleiche Elementgröße von 20 x 20 [mm] aufweisen und ein parabolischer Verformungsansatz wurde gewählt.

#### Netz B

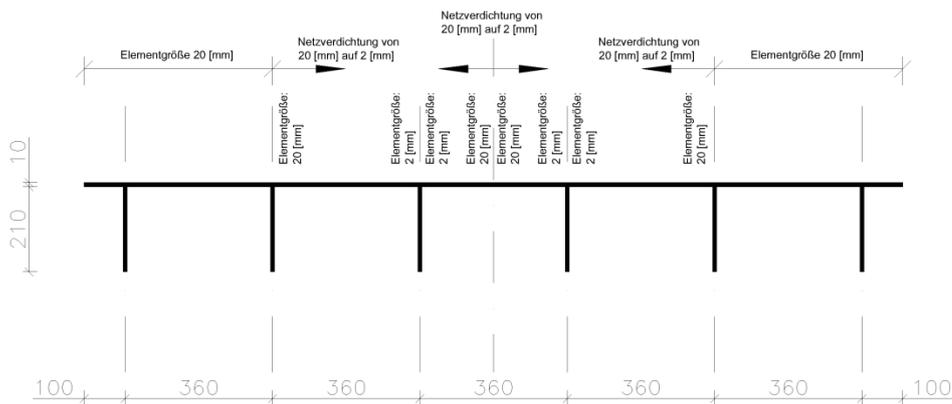


Abbildung 113: Lokales Modell L3m - Netz B

Netz B stellt eine Erweiterung von Netz A dar, da der Grundraster von 20 x 20 [mm] großen viereckigen Elementen übernommen wurde und an den beiden mittleren Längsrippen eine Netzverdichtung durchgeführt wurde wie es in Abbildung 113 dargestellt wird.

#### Netz C

Der Grundraster aus Netz A wurde auch für diese Netzteilung übernommen und an den beiden mittleren Längsrippen (siehe Abbildung 114), wo die Spannungen abgelesen wurden, wurde eine Netzverdichtung durchgeführt wie es in Abbildung 115 dargestellt wird.

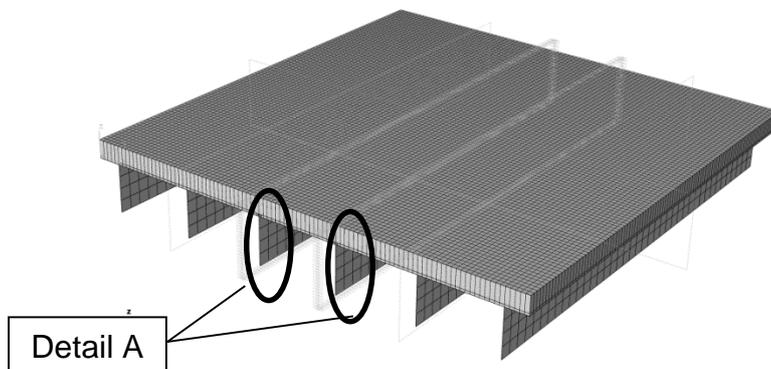


Abbildung 114: Lokales Modell L3m - Netz C: Übersicht

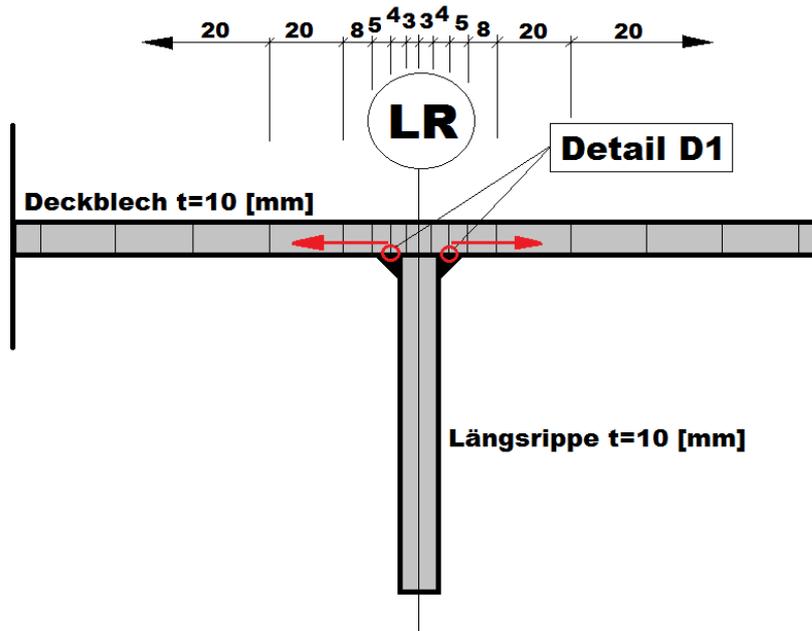


Abbildung 115: Lokales Modell L3m - Netz C: Detail A

Abbildung 116 zeigt die Quernormalspannungen an der Unterkante des Deckbleches mit unterschiedlichen FE-Netzen, wobei diese Kurven sich auf den ersten Blick quasi decken und kaum voneinander abweichen. Erst eine genauere Betrachtung des Bereichs A (siehe Abbildung 117) bringt diese zum Vorschein.

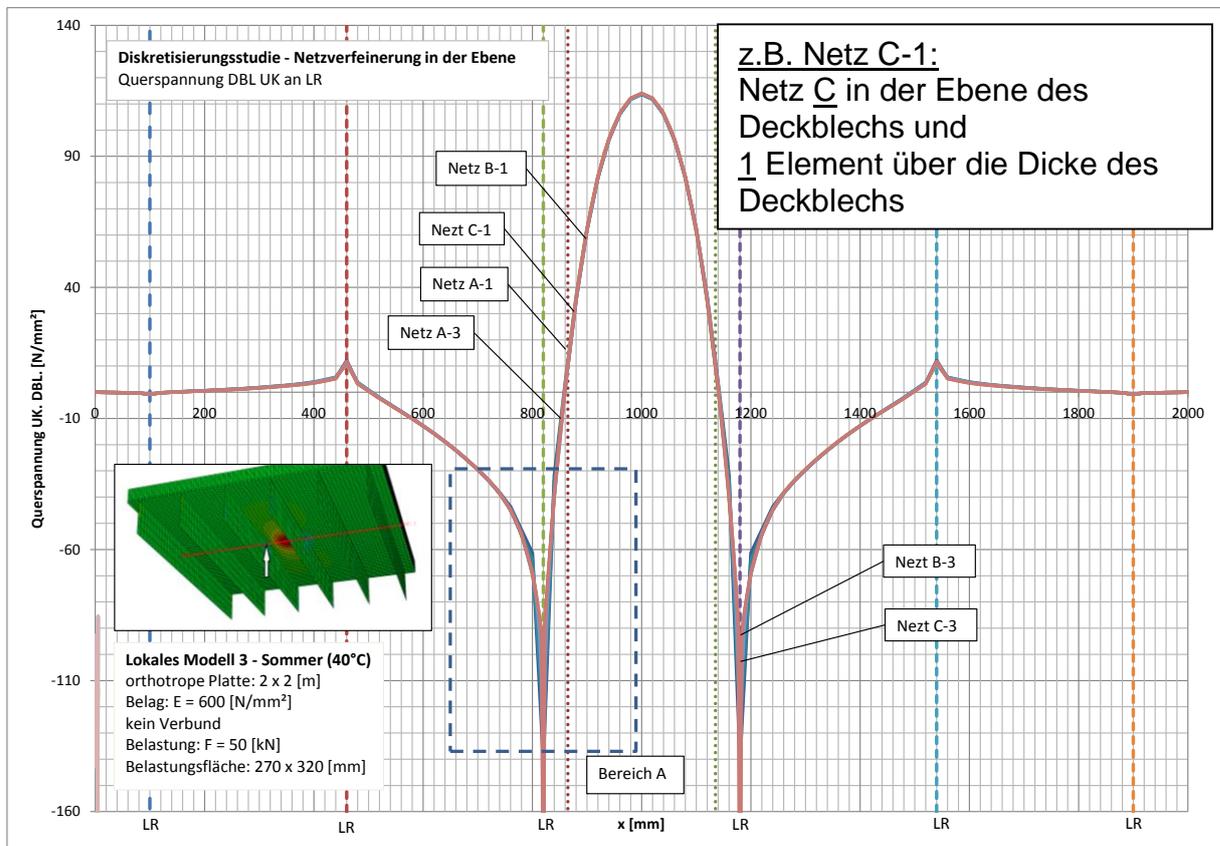
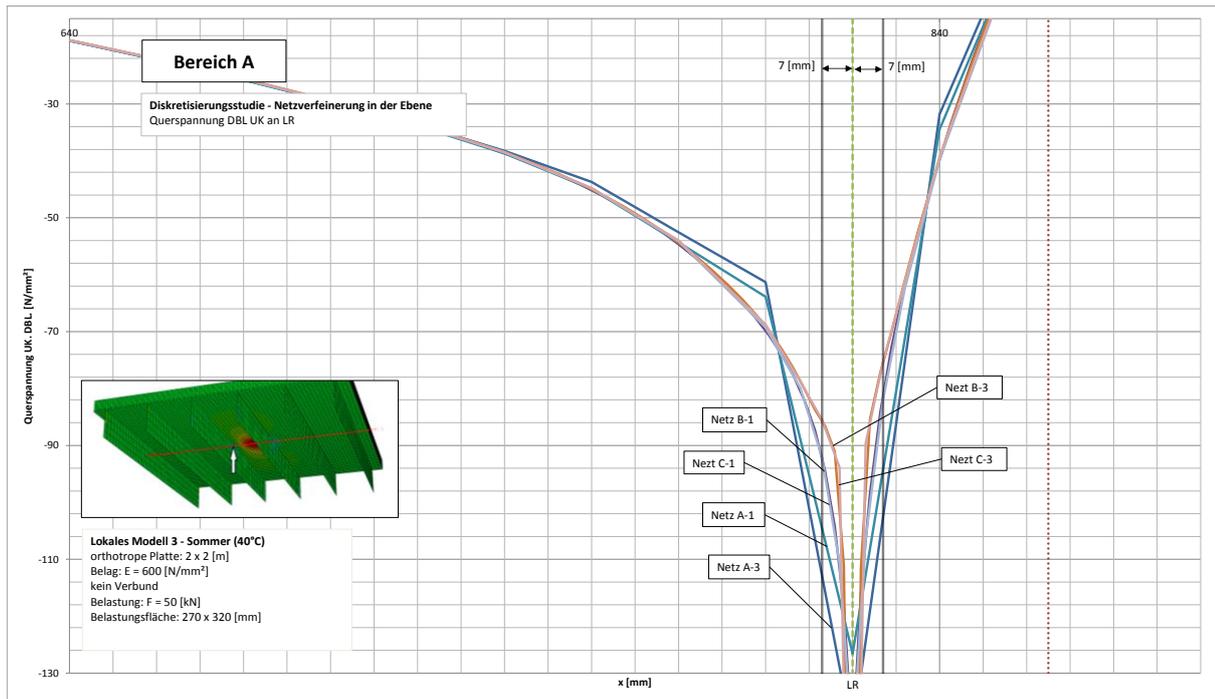


Abbildung 116: Netzverfeinerung in XY – Ebene; Einfluss auf Deckblechspannungen



**Abbildung 117: Netzverfeinerung in XY – Ebene; Einfluss auf Deckblechspannungen**

Anz. El. über Dicke	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Netz A	Netz B	Netz C
1 Element	min $\sigma$	-126.6	-142.8	-143.0
	tats. $\sigma$	-104.7	-92.3	-92.2
	Freiheitsgrade	682.000	860.000	707.000
3 Elemente	min $\sigma$	-140.8	-228.0	-213.3
	tats. $\sigma$	-113.0	-85.7	-85.5
	Freiheitsgrade	927.000	1.308.000	982.000

**Tabelle 6: Vergleich der Quernormalspannungen bezüglich der Diskretisierung**

Die Werte min  $\sigma$  der Tabelle 6 sind jene Spannungswerte direkt an den Längsrippenachsen und die Werte tats.  $\sigma$  sind die Spannungswerte im Abstand von 7 [mm] von der Achse der Längsrippe und wurden bei Netz A und Netz B durch eine lineare Interpolation der benachbarten Werte errechnet. Bei Netz C war keine Interpolation erforderlich, da hier ein Knoten vorhanden war, an dem die Spannungen direkt abgelesen werden konnten.

In Tabelle 6 sind die ausgelesenen Werte zu Abbildung 117 zusammengefasst. Aus diesen Resultaten kann man erkennen, dass das Netz A zu grob ist und eine Netzverfeinerung zwingend erforderlich ist

Drei Elemente über die Dicke liefern womöglich ein genaueres Ergebnis, jedoch bedeutet eine solche Diskretisierung einen hohen Rechenaufwand, wo hingegen ein Element über die Dicke ein ähnliches, sogar konservativeres Ergebnis liefert.

**Fazit:** Optimale Annäherung der Quernormalspannungen an der Unterkante des Deckbleches bei gleichzeitig moderatem Rechenaufwand durch ein Element über die Dicke und Netz C.

## A 2.4. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse aus den Berechnungen an den lokalen Modellen L1 bis L3 zufolge Achslast C präsentiert.

### A 2.4.1. Vertikale Druckverteilung an Belagsunterseite

#### A 2.4.1.1. Sommer (40°C)

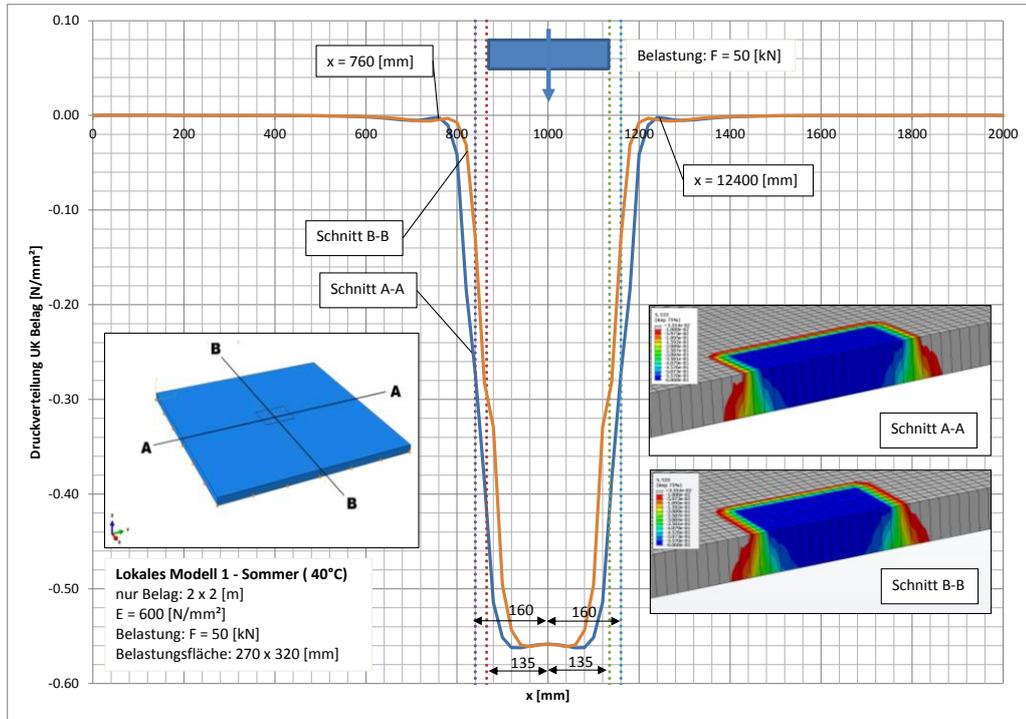


Abbildung 118: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L1 – Sommer (40°C)

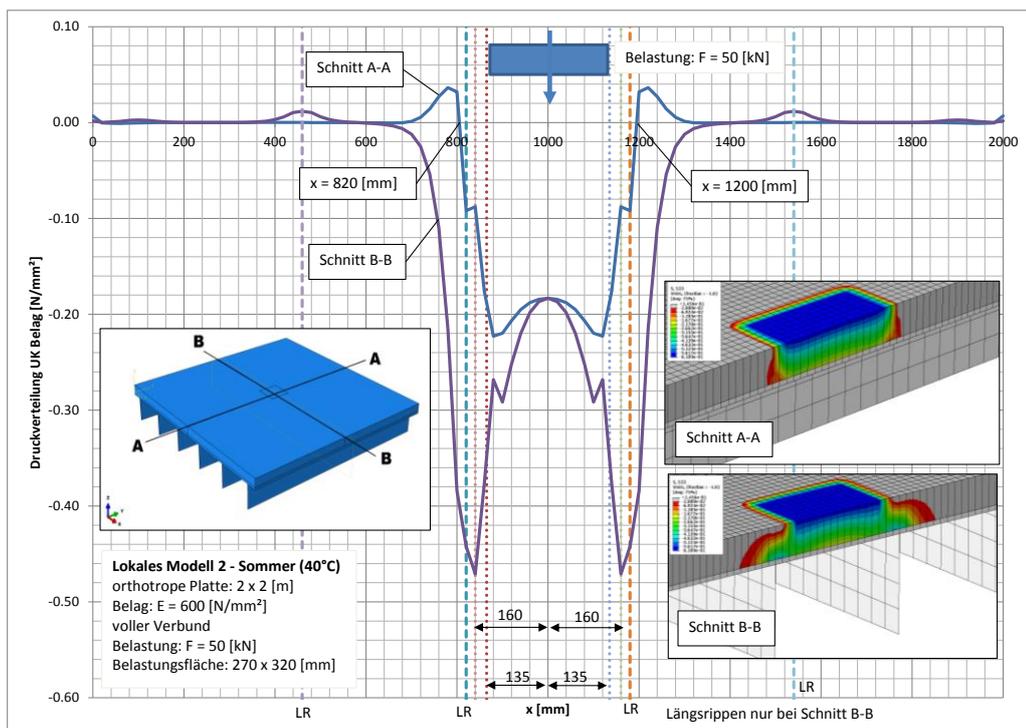


Abbildung 119: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L2m – Sommer (40°C)

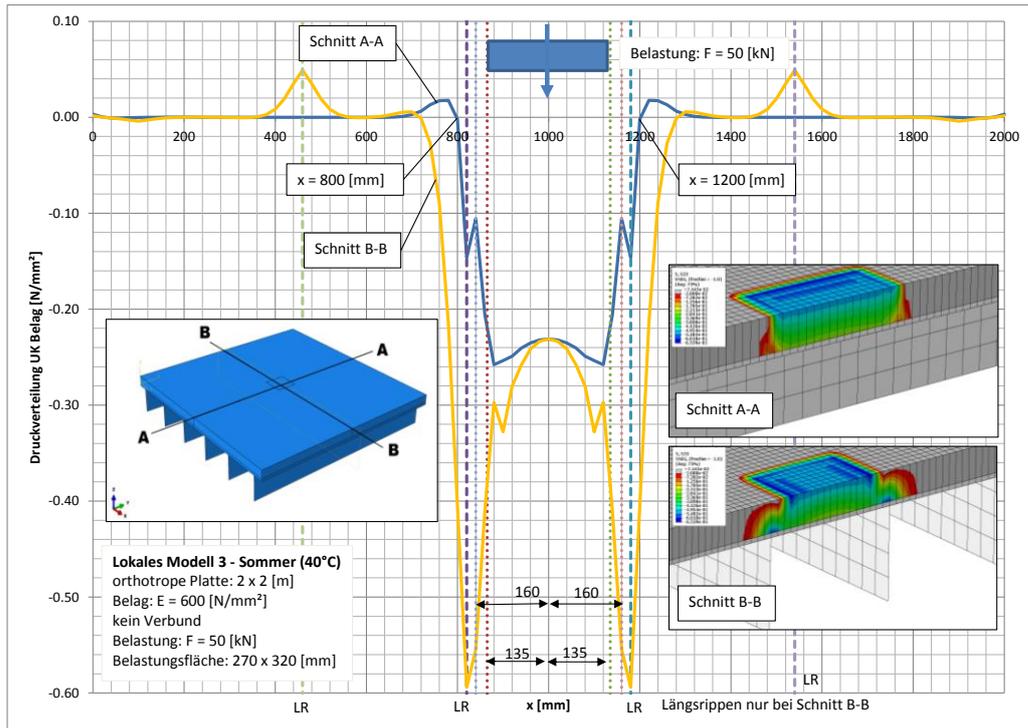


Abbildung 120: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L3m – Sommer (40°C)

A 2.4.1.2. Winter (0°C)

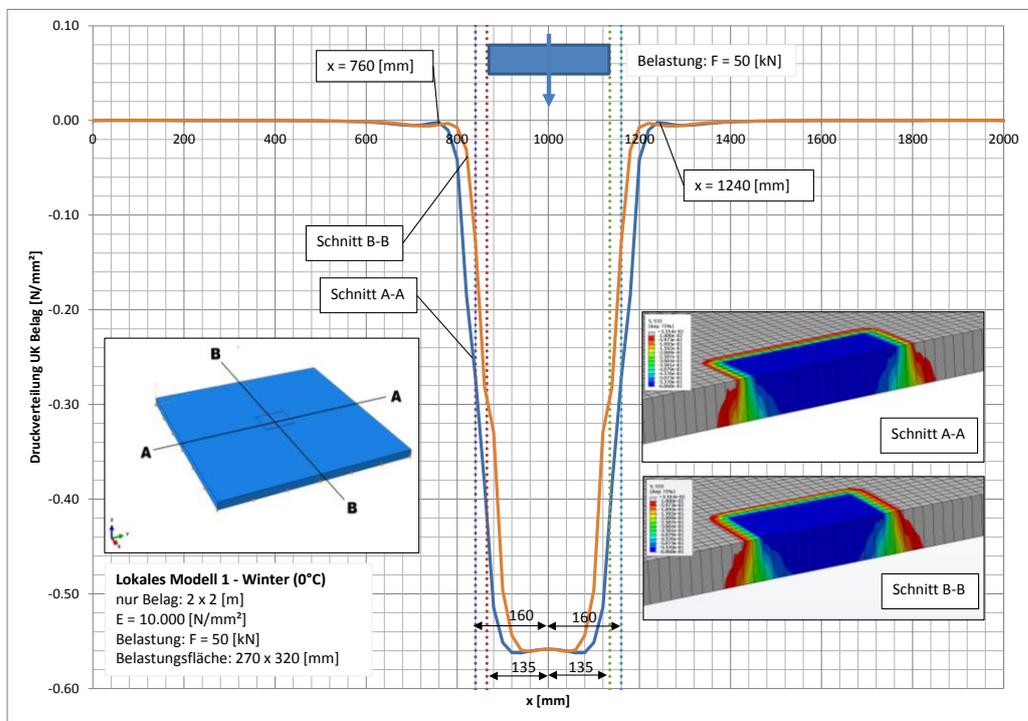


Abbildung 121: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L1 – Winter (0°C)

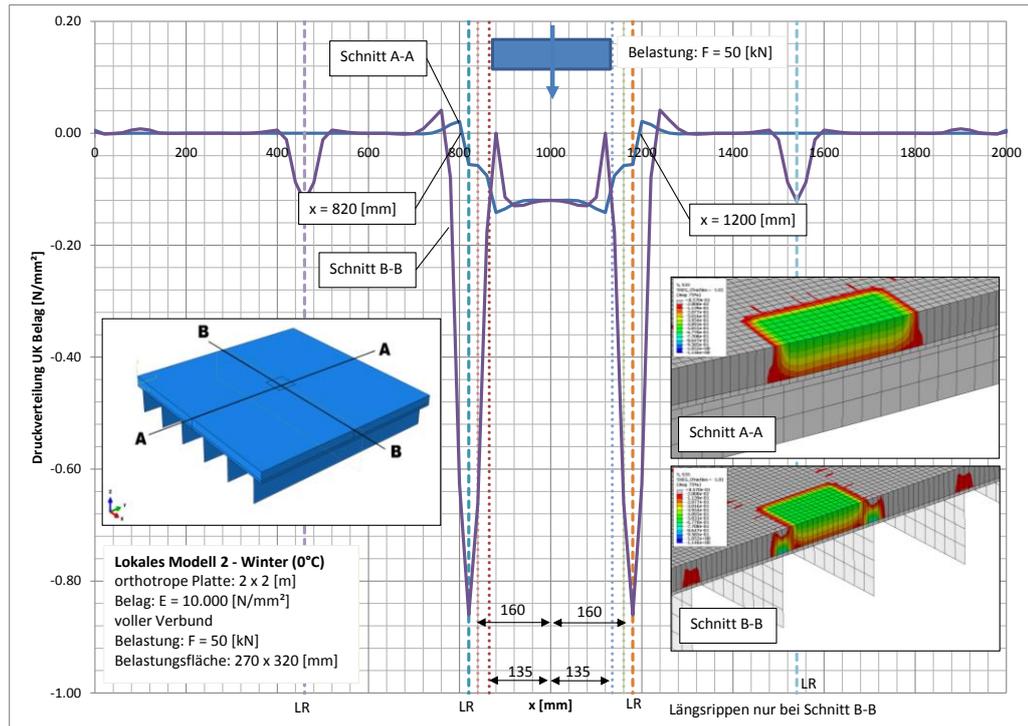


Abbildung 122: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L2m – Winter (0°C)

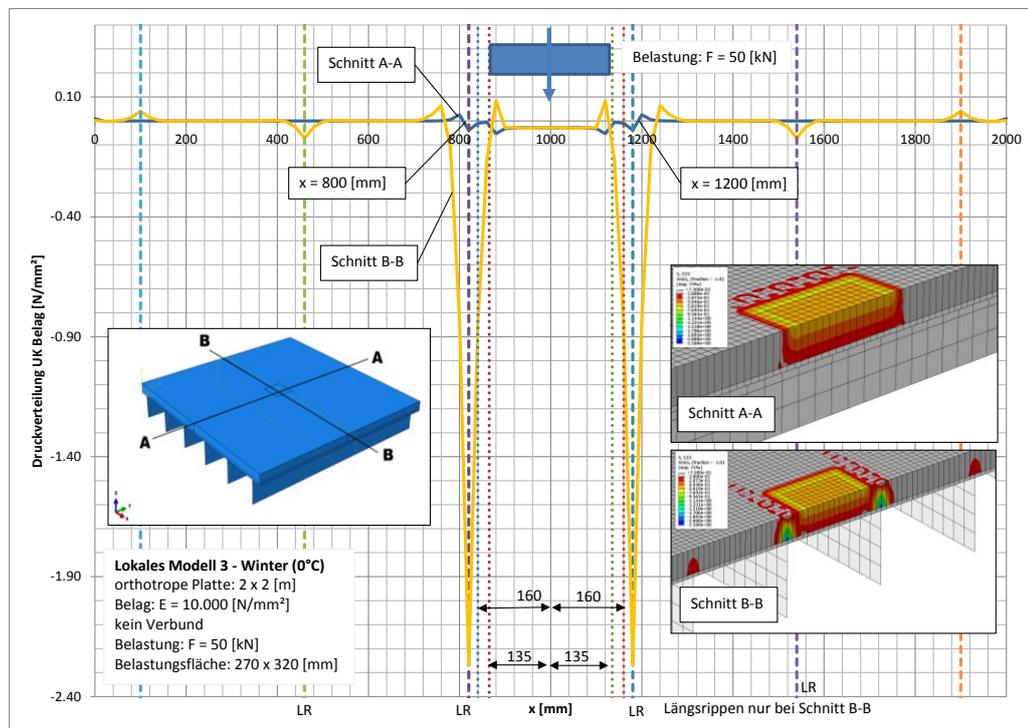


Abbildung 123: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L3m – Winter (0°C)

### ***A 2.4.1.3. Aussage zur Vereinfachung einer Lastausbreitung***

Abbildung 118 zeigt die vertikale Druckverteilung auf das Deckblech, welche durch eine Last ausgeübt wird bei einer starren flächenmäßigen Lagerung des Belages und einem E-Modul des Belages, der dem eines Asphaltbelages im Sommer bei einer Temperatur von +40°C entspricht. Abbildung 121 zeigt die Druckverteilung am gleichen Modell, jedoch mit einem anderen, deutlich höheren E-Modul. Wie erwartet, sind die Kurven durch eine Änderung des E-Moduls unverändert geblieben. Die Druckverteilungen aus den Diagrammen aus Abbildung 118 und Abbildung 121 können mit jenen aus der Dissertation von de Jong [5] (siehe Abbildung 100) verglichen werden. Es liegt das gleiche Ergebnis vor - nur in einer anderen Skalierung.

Bei Betrachtung von Abbildung 119 und Abbildung 122, welche die vertikale Druckverteilung auf das Deckblech im lokalen Modell L2m (mit Belag, voller Verbund) zeigen, kann man erkennen, dass sich die Druckverteilung sehr stark durch den E-Modul verändert und sich die Kurve generell durch den Einfluss einer nachgiebigen Unterkonstruktion deutlich von der einer starren unterscheidet. So wird die Last von den Längsrippen angezogen.

Der Belag versucht im Schnitt B-B Druckstreben wie im Betonbau auszubilden, wobei dies bei höherem E-Modul ausgeprägter stattfindet und daher bei der Berechnung mit dem E-Modul des Belags im Winter die Flächenpressung über den Längsrippen lokal höher ist.

Abbildung 120 und Abbildung 123 zeigen die vertikale Flächenpressung auf das Deckblech aus der Berechnung am lokalen Modell L3m (mit Belag, kein Verbund). Abbildung 120 und Abbildung 123 sind ähnlich den Pressungsverteilungen aus Modell L2m (mit Belag, voller Verbund), auch hier versucht der modellierte Asphalt Druckstreben zu den Längsrippen hin auszubilden.

Vor Allem ist die Nachgiebigkeit der Tragstruktur im Wesentlichen von den geometrischen Abmessungen und den Blechstärken der Stahlteile abhängig, was wiederum die vertikale Druckverteilung stark beeinflusst.

Abschließend kann gesagt werden, dass eine Vereinfachung auf Basis der vertikalen Druckverteilung auf das Deckblech nicht getroffen werden kann, und auch nicht zielführend ist. Es ist erforderlich eine Analyse der Spannungen an den jeweiligen Kerbdetails durchzuführen um einen Lastausbreitungseffekt infolge des Belages erfassen zu können.

**A 2.4.1.4. Quernormalspannungen an der Deckblechunterseite**

Da eine Analyse der vertikalen Flächenpressung auf das Deckblech zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führte, wurde beschlossen die Beurteilung der Lastausbreitung des Belages anhand der auftretenden Spannungen am Kerbdetail durchzuführen.

Am sensibelsten reagiert das Detail D1 (siehe Kapitel A 1.3.1) – Deckblechbiegung beim Längsrippenanschluss - auf eine Änderung der Geometrie der Radaufstandsfläche und daher werden in Tabelle 7 diese Spannungswerte aus den Berechnungen der lokalen Modelle L1 bis L3 dargestellt.

An der Stelle  $x=820$  [mm] befindet sich im Modell eine Längsrippe, daher folgen die hier größten Spannungswerte  $\sigma_{max}$ . Die an der Stelle  $x=813$  [mm] befindlichen Spannungen sind jene im Abstand von 7 [mm] von der Achse der Längsrippe und dürfen für eine Ermüdungsrechnung herangezogen werden ( $\sigma_{tats}$ ), da diese der Spannung an der Schweißnaht entsprechen.

<b>Quernormalspannungen Deckblechunterkante</b>						
<b>Modell ohne Belag</b>			<b>Modell mit Belag</b>			
	LF b(0)	LF b(0)+ΔB	voller Verb. Som.	voller Verb. Win.	ohne Verb. Som.	ohne Verb. Win.
x [mm]	$\sigma$ [N/mm <sup>2</sup> ]					
813.0	-160.2	-88.1	-62.9	-6.7	-92.2	-16.4
820.0	-209.2	-122.6	-108.1	-36.5	-143.0	-60.2

**Tabelle 7: Vergleich der Quernormalspannungen im Deckblech -  $\sigma_{max}$  und  $\sigma_{tats}$  (Achse C)**

In Abbildung 124 ist eine grafische Darstellung der Werte aus Tabelle 7 zu finden, wobei hier nur die Spannungen an der Stelle  $x=813$  [mm] dargestellt wurden. Die Spannungen ermittelten sich unter der Belastung der Achse C.

Abbildung 125 zeigt eine grafische Darstellung der Quernormalspannungen an der Deckblechunterkante unter der Belastung der Achse B.

Anhand dieser Grafiken lässt sich der Schluss ziehen, dass die laut EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässige Vereinfachung der lastausbreitenden Wirkung des Belages durch einen Ausbreitungswinkel von 45° eine gute und konservative Annäherung ist.

Um dies bestätigen zu können ist im Weiteren eine Untersuchung dieser Quernormalspannungen an den großen Modellen A, B-1 und B-2 erforderlich.

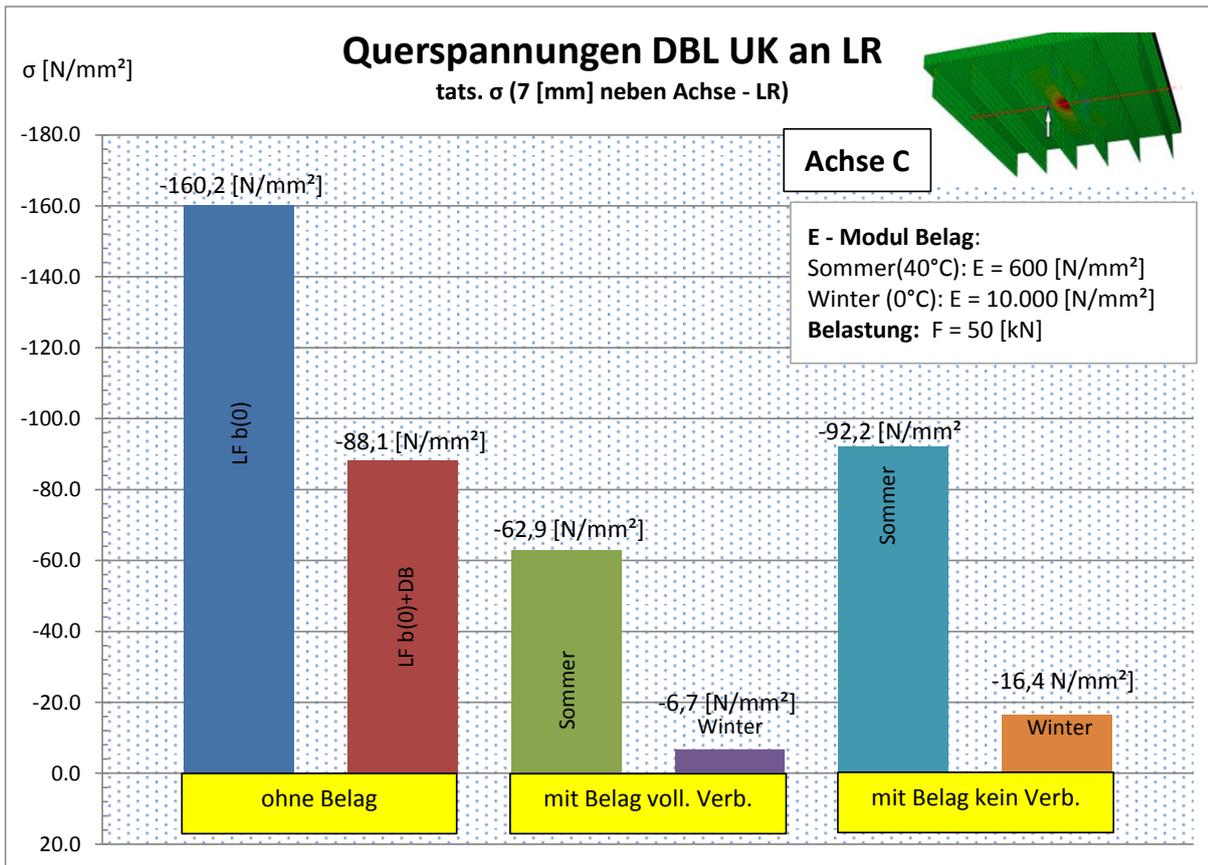


Abbildung 124: Quernormalspannungen  $\sigma_{tats}$  an der Deckblechunterseite – Achse C

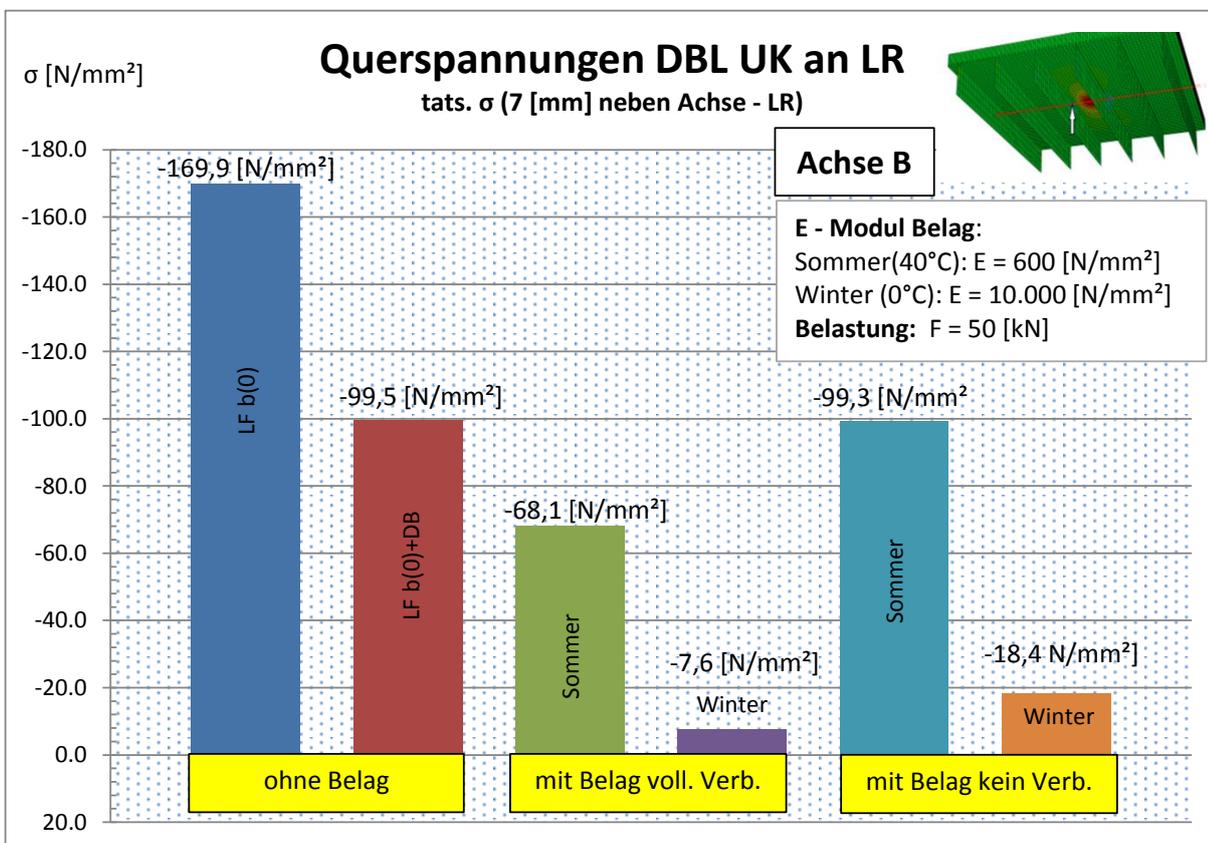


Abbildung 125: Quernormalspannungen  $\sigma_{tats}$  an der Deckblechunterseite – Achse B

## A 3. Analyse Modell B – Fahrbahndeck mit Belag

### A 3.1. Allgemeines

Um eine Aussage über die vereinfachte Annahme eines Lastausbreitungswinkels von  $45^\circ$  laut EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] machen zu können, waren noch Berechnungen an weiterführenden Modellen des großen Modells A (ohne Belag) notwendig, um die daraus resultierenden Ergebnisse mit den Grenzwerten aus Tabelle 5 (siehe Kapitel A 1.9) – ohne Mitwirkung des Belags - vergleichen zu können.

Ziel war es, zwei weitere Modelle zu generieren, in dem Modell A (ohne Belag) um die Mitwirkung des Belags ergänzt wurde, an dem dann die selben Achsen (Achse B und Achse C) als Belastung angesetzt wurden.

Ein Problem war es zutreffende Daten über den E-Modul eines Asphaltbelages zu finden, da dieser Materialkennwert bei Asphalt so stark von der Temperatur abhängig ist, so hat dieser im Sommer bei einer Temperatur von  $+40^\circ\text{C}$  nur ca.  $600 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  und im Winter bei einer Temperatur von  $0^\circ\text{C}$  steigt der E-Modul um mehr als das 10-fache auf ca.  $10.000 \text{ [N/mm}^2\text{]}$  an. Die Daten der E-Module wurden [6] entnommen und eine Grafik daraus wird in Abbildung 126 dargestellt.

T [°C]	-20	-10	0	+10	+20	+30	+40	+50
E [kN/cm <sup>2</sup> ]	1500-	1000-	600-	350-	170-	70-	25-	6-
(E <sub>min</sub> -E <sub>max</sub> )	2500	2000	1400	900	500	250	100	30
B=E <sub>max</sub> /E <sub>min</sub>	1,67	2,00	2,33	2,57	2,94	3,57	4,00	5,00

Abbildung 126: Wahrscheinliche Belags E-Module bei unterschiedlichen Temperaturen (aus [6])

Da ein größerer E-Modul des Belages sich günstig auf das Tragverhalten der orthotropen Platte auswirken würde, wurde der Wert des E-Moduls bei einer Temperatur von  $+40^\circ\text{C}$  für weitere Berechnungen an den Modellen B-1 und B-2 herangezogen. Es wurde einfach der Mittelwert der Grenzwerte der Tabelle aus Abbildung 126 gebildet ( $0,5 * (250 + 1000) \approx 600$ ).

Wie schon die Berechnungen an den lokalen Modellen zeigte (siehe Abbildung 124), liefert die Modellierung eines Belags mit niedrigerem E-Modul, wie er im Sommer bei hohen Temperaturen auftritt, wesentlich höhere Spannungen am Fahrbahndeck.

Da auch über die Verbundwirkung des Belages und der Stahlkonstruktion keine ausreichenden Daten bekannt waren, wurde einfach eine Grenzwertanalyse gestartet indem das Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) den Fall eines vollkommenen Verbundes darstellt und das Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund) den Fall eines „lose aufliegenden Belags“ darstellt. Die Wirklichkeit liegt irgendwo zwischen diesen beiden Fällen, dennoch reicht dies für einen Vergleich mit den Ergebnissen aus Modell A (ohne Belag) vollkommen, da man wie schon in Abbildung 124 und Abbildung 125 zu sehen ist sehr gut erkennen kann, in welchem Bereich sich die Annäherung des Eurocodes befindet.

### A 3.1.1. Modell B-1; mit Belag/voller Verbund

Das Modell A (ohne Belag) wurde wie Abbildung 127 zeigt erweitert. Es wurde im Einflussbereich von 4 [m] beidseitig der Achse A, an der die Belastung aufgebracht wurde und die Spannungen für Detail D1 und D1\* abgelesen wurden, der Belag mit einer Dicke von 70 [mm] mitmodelliert.

Auf eine detaillierte Beschreibung des bereits vorhandenen Modells wird verzichtet und es sei hierfür auf das Kapitel A 1.2 und A 1.6 verwiesen, wo das Modell A und eine darauffolgend durchgeführte Optimierung beschrieben werden.

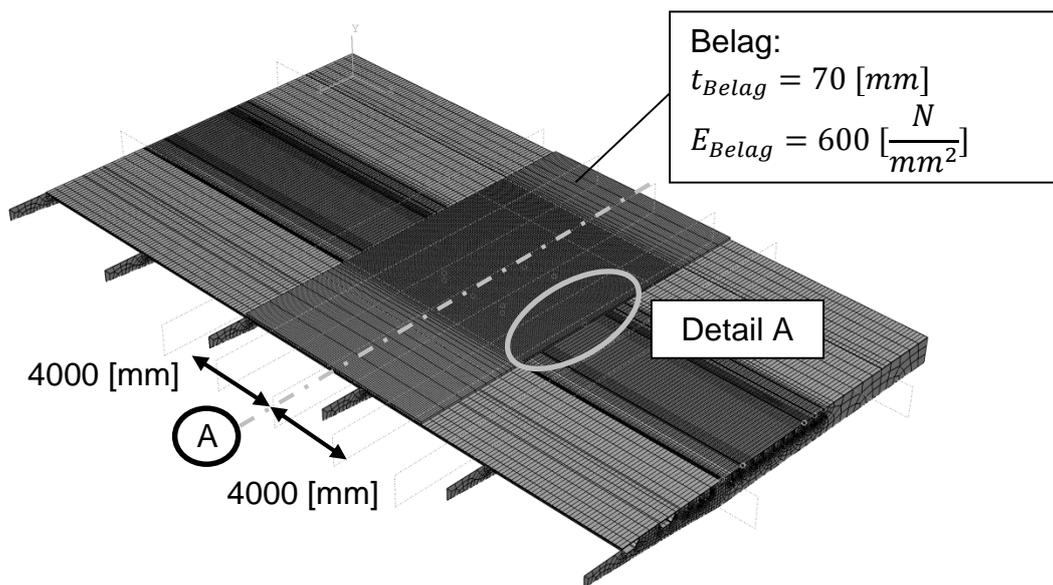


Abbildung 127: Modell B-1; mit Belag/voller Verbund: isometrische Ansicht

Es wurde, wie in Abbildung 128 dargestellt wird, eine Elementgröße von 50 x 50 [mm] im Bereich der Längsrippen gewählt, wobei nur ein Element mit einem parabolischem Verformungsansatz über die gesamte Höhe des Belages gewählt wurde, da dies infolge einer in Kapitel A 2.3 ausführlich durchgeführten Diskretisierungsstudie die optimale Diskretisierung für diesen Teil hinsichtlich seiner zu erwartenden Eigenschaften ist. Zu den Rändern des Modells hin nimmt die Feinheit der Netzgeometrie kontinuierlich ab und weist eine ähnlich grobe Netzteilung auf wie das Deckblech in diesen Bereichen, was sinnvoll ist, da in den Randbereichen keine Ergebnisse abgefragt wurden und die benötigte Rechenzeit dadurch günstig beeinflusst wurde.

Der volle Verbund des Belages mit dem Deckblech wurde in Abaqus mit dem „Constraint Tie“ durchgeführt, wobei die obere Fläche des Deckbleches als Master Surface definiert wurde. Das entspricht einem Gleichsetzen aller Freiheitsgrade der Oberkante des Deckblechs mit den entsprechenden Freiheitsgraden der Unterkante des Belags.

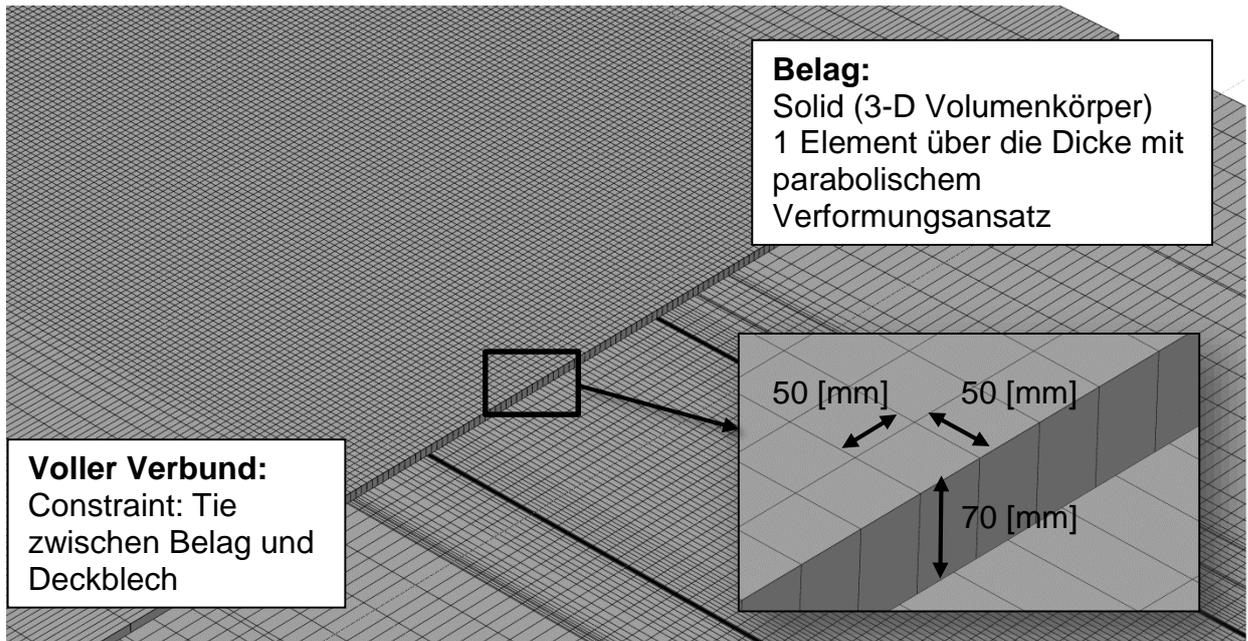


Abbildung 128: Modell B-1: isometrische Ansicht – Detail A

### A 3.1.2. Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund

Zur Beschreibung dieses Modells B-2 wird auf Abbildung 127 und Abbildung 128 verwiesen, da an den geometrischen Abmessungen und den FE-Netzen der Teile nichts verändert wurde.

Dieses Modell sollte den Grenzfall eines losen Aufliegens des Belages auf das Deckblech darstellen und so sollte kein Verbund zwischen den beiden Bestandteilen des FE-Modells (Asphaltbelag bzw. Deckblech) bestehen. Somit wurde der in Modell B-1 erstellte Constraint unterdrückt und es wurde eine Interaktion zwischen den beiden Teilen erstellt.

Die Interaktionseigenschaften zwischen dem Belag und dem Deckblech wurden in normaler Richtung auf das Deckblech als „Hard Contact“ und in tangentialer Richtung als „Frictionless“ definiert.

Durch die Definition der Interaktionseigenschaft eines reibungslosen Aufliegens des Belages auf das Deckblech war der Belag nunmehr nicht an das Gesamtmodell gekoppelt und konnte sich in der horizontalen Ebene frei bewegen, daher mussten die Verschiebungen des Belages in X- und Z-Richtung durch eine geeignete Wahl an Lagern verhindert werden.

Um ein freies Gleiten des Belages in X- und Z-Richtung zu verhindern wurden nun an den äußeren Flächen des Belages, wie in Abbildung 129 dargestellt, Lager eingeführt, welche mit den jeweilig zugehörigen Symmetriebedingungen versehen wurden. Die beidseitige Lagerung  $U_x$  führte jedoch zu keinen ungewollten Zwangskräften in den Lagerstäben.

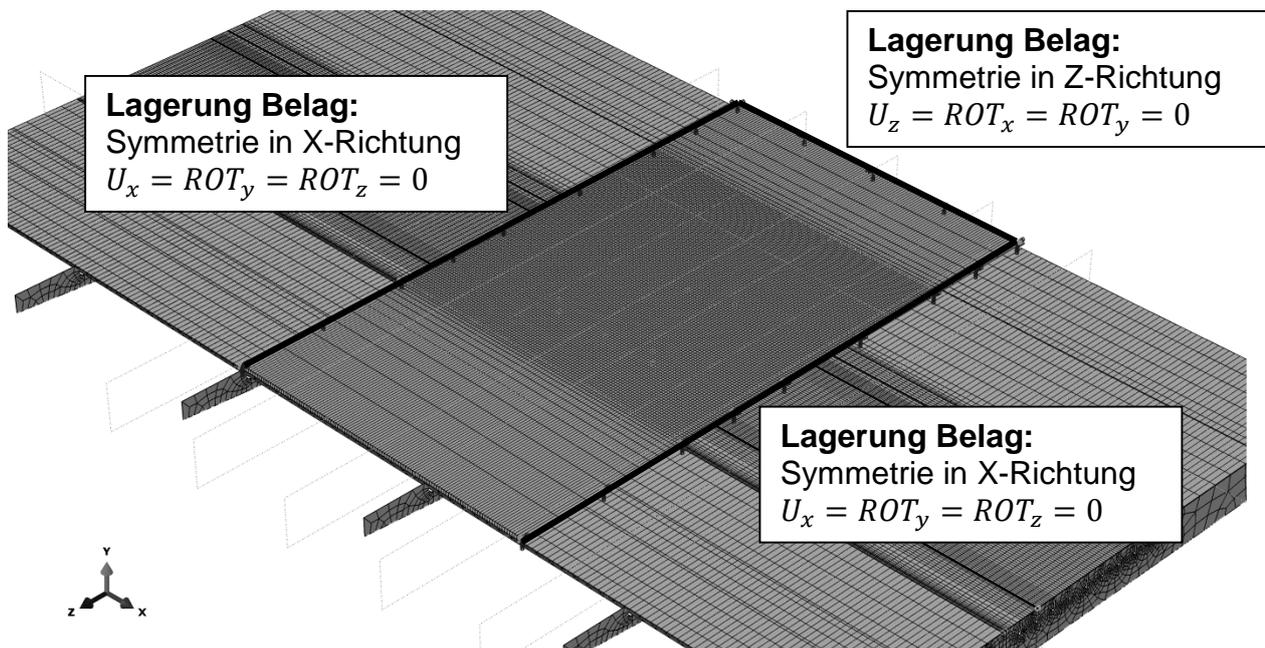


Abbildung 129: Modell B-2: isometrische Ansicht – Lagerung Belag

### A 3.2. Belastung

Für beide Modelle wurden gleichermaßen dieselben Lastfälle (ähnlich wie bei Modell A) angesetzt, so wurden die Achse B( $b_0$ ) und die Achse C( $b_0$ ) an den maßgebenden Lastpositionen an der Oberseite des Belags angesetzt.

#### A 3.2.1. Achse B( $b_0$ )

In Tabelle 8 sind die Lastfälle der Achse B aufgelistet, die auf die Modelle B-1 und B-2 aufgebracht wurden.

Eine detaillierte Darstellung und Beschreibung der Laststellungen befindet sich in Kapitel A 1.4, hier werden nur die definierten Lastfallbezeichnungen verwendet.

Lastfall	Detail
LF_D1_B( $b_0$ )_2	D1
LF_D1_B( $b_0$ )_8	D1*
LF_D2_B( $b_0$ )_2	D2
LF_D2_B( $b_0$ )_8	D2*

Tabelle 8: Maßgebende Laststellungen für Modell B-1 & B-2 infolge Achse B

### A 3.2.2. Achse C( $b_0$ )

In Tabelle 9 sind die Lastfälle der Achse C aufgelistet, die auf die Modelle B-1 und B-2 aufgebracht wurden.

Eine detaillierte Darstellung und Beschreibung der Laststellungen befindet sich in Kapitel A 1.4, hier werden nur die definierten Lastfallbezeichnungen verwendet.

Lastfall	Detail
LF_D1_C( $b_0$ )_2-3	D1
LF_D1_C( $b_0$ )_7-8	D1*
LF_D2_C( $b_0$ )_2	D2
LF_D2_C( $b_0$ )_8	D2*

Tabelle 9: Maßgebende Laststellungen für Modell B-1 & B-2 infolge Achse C

### A 3.3. Detailbereiche

Es wurden bei den Modellen B-1 und B-2 die gleichen Detailbereich wie bei Modell A untersucht, deshalb wird auf eine genaue Beschreibung verzichtet und auf das Kapitel A 1.3 verwiesen.

- **D1:** Quernormalspannungen an Deckblechunterkante im Abstand von 7 [mm] von der Achse der Längsrippe 2 (siehe Abbildung 130)
- **D1\*:** Quernormalspannungen an Deckblechunterkante im Abstand von 7 [mm] von der Achse der Längsrippe 8 (siehe Abbildung 130)
- **D2:** Längsnormalspannungen in der Längsrippe am unteren Ende der Schweißnaht des Anschlusses der Längsrippe 2 an den Querträger (siehe Abbildung 131)
- **D2\*:** Längsnormalspannungen in der Längsrippe am unteren Ende der Schweißnaht des Anschlusses der Längsrippe 8 an den Querträger (siehe Abbildung 131)

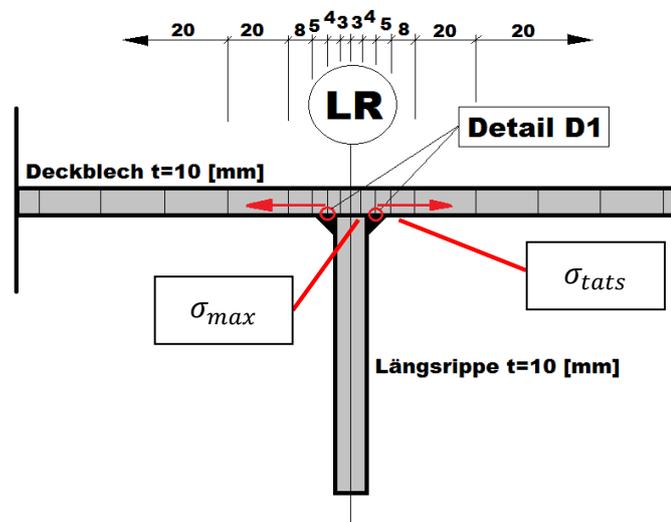


Abbildung 130: Spannungen für Detail D1 und D1\*

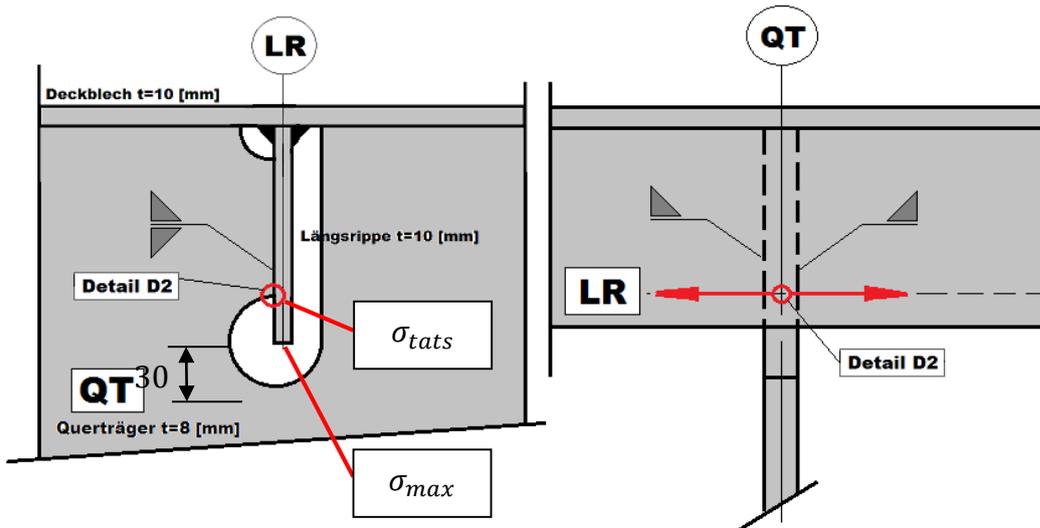


Abbildung 131: Maßgebende Spannungen für Detail D2 und D2\*

### A 3.4. Ergebnisse infolge Belastung Achse B (mit Belag)

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen an den Modellen B-1 (mit Belag, voller Verbund) und B-2 (mit Belag, ohne Verbund) präsentiert. Die folgenden Diagramme in Abbildung 132 bis Abbildung 139 sind Spannungsverläufe entlang der Pfade der jeweiligen Detailbereiche (siehe Kapitel A 1.3) für die Belastung infolge Achse B ( $b_0$ ). Abbildung 132, Abbildung 133, Abbildung 136 und Abbildung 137 zeigen den Spannungsverlauf an der Deckblechunterseite. Abbildung 134, Abbildung 135, Abbildung 138 und Abbildung 139 zeigen die Normalspannung an den einzelnen Längsrippen.

#### A 3.4.1. Modell B-1; mit Belag/voller Verbund

##### A 3.4.1.1. Detail D1

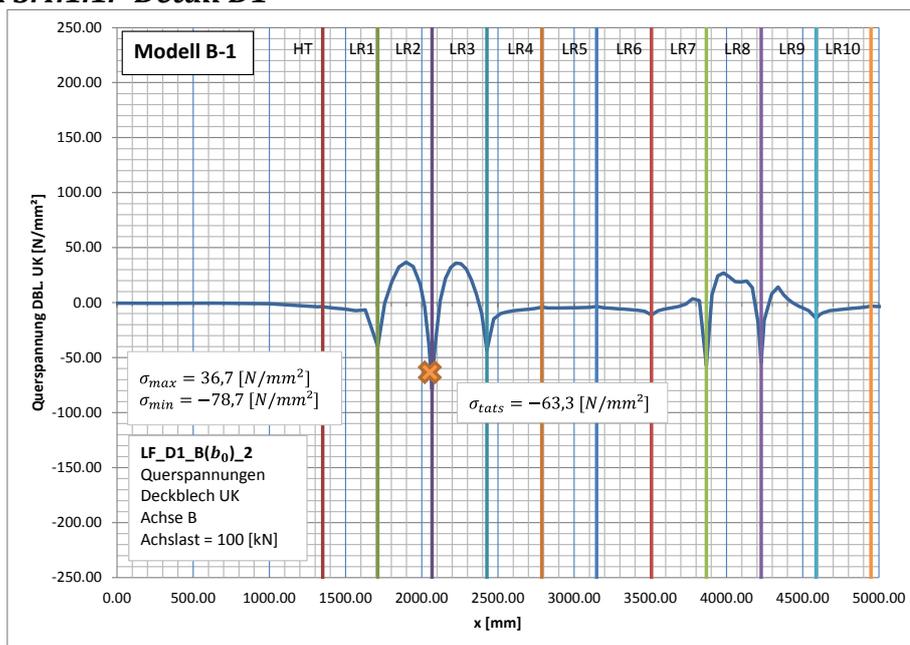


Abbildung 132: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF\_D1\_B( $b_0$ )\_2

**A 3.4.1.2. Detail D1\***

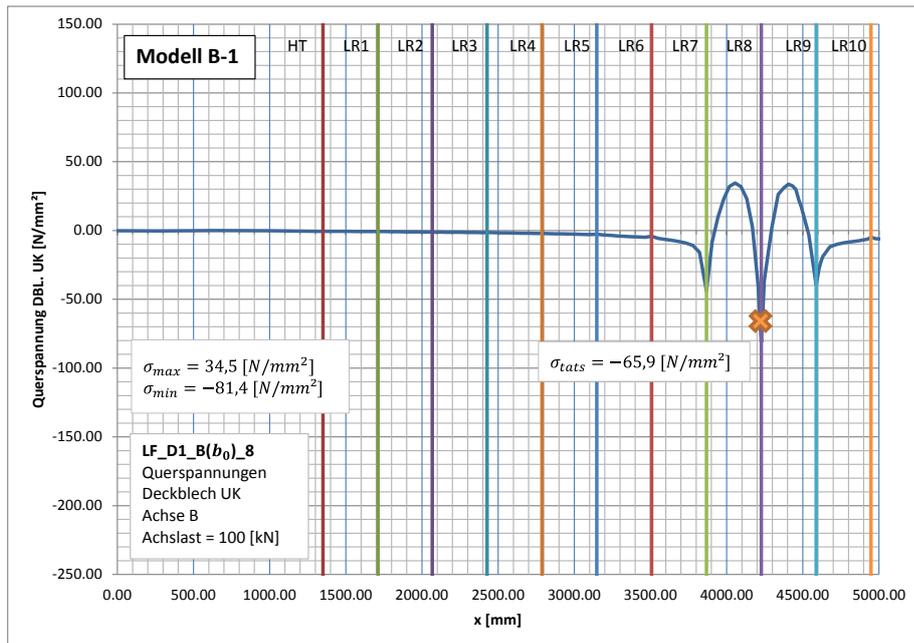


Abbildung 133: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_8

**A 3.4.1.3. Detail D2**

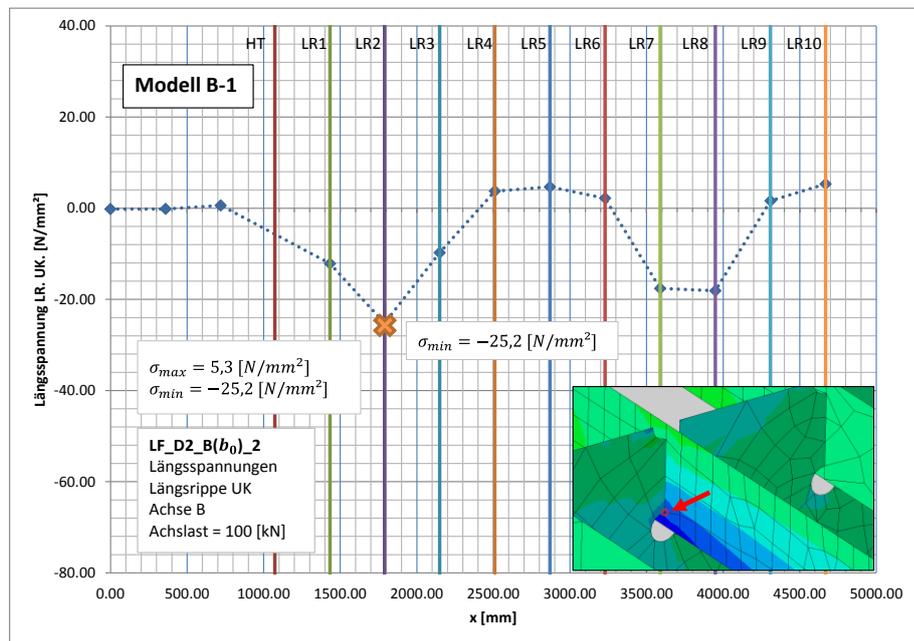


Abbildung 134: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_2

**A 3.4.1.4. Detail D2\***

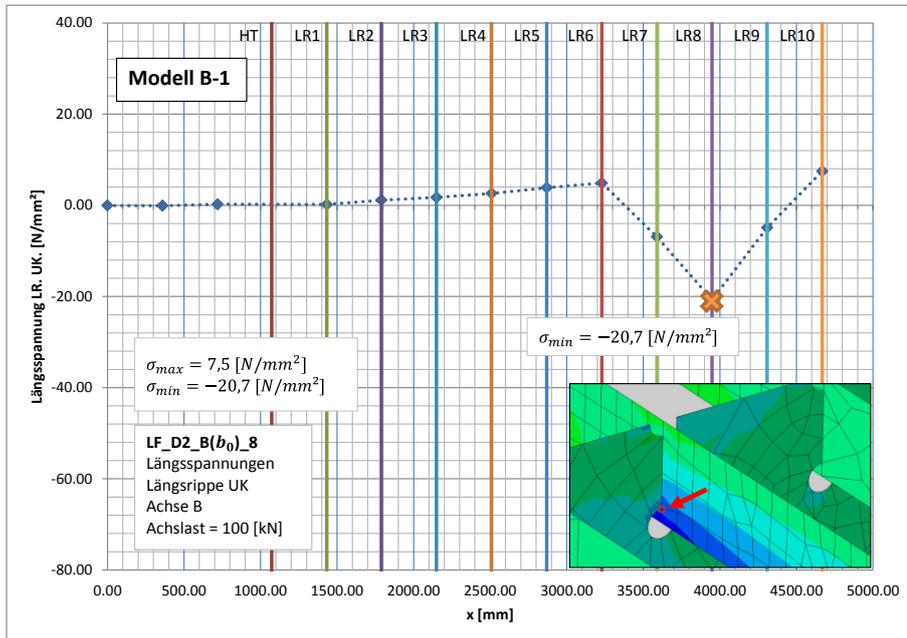


Abbildung 135: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_8

**A 3.4.2. Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund**

**A 3.4.2.1. Detail D1**

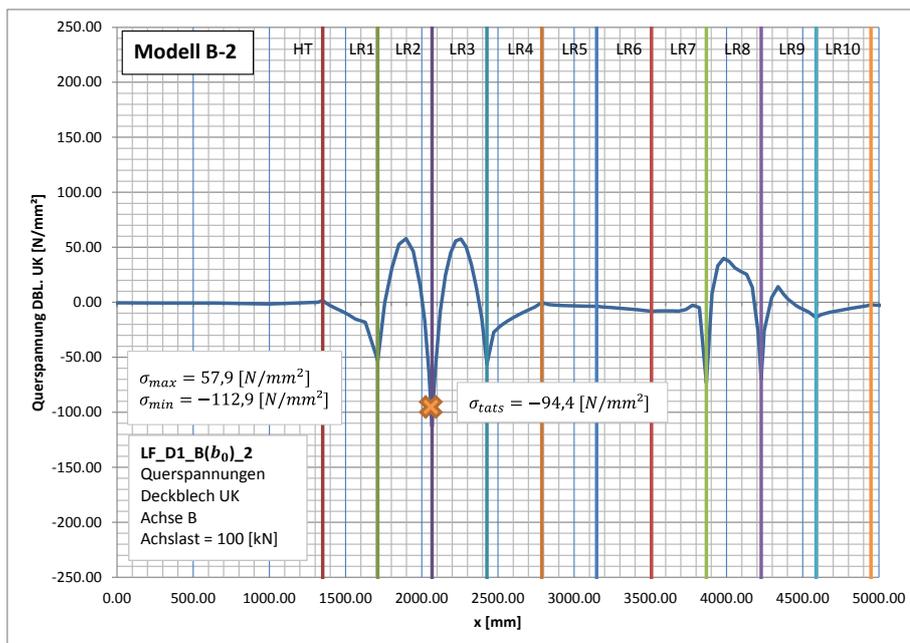


Abbildung 136: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_2

**A 3.4.2.2. Detail D1\***

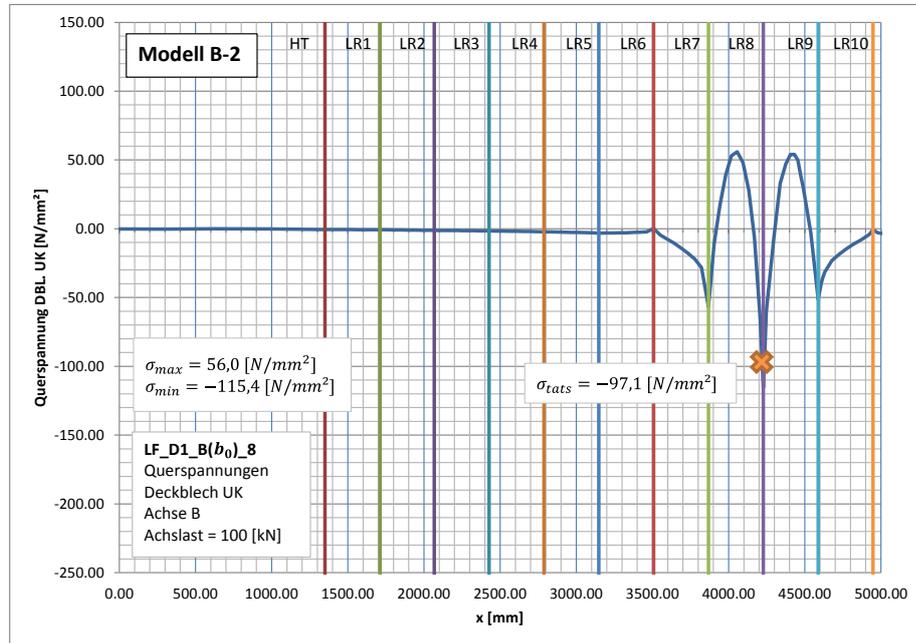


Abbildung 137: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_8

**A 3.4.2.3. Detail D2**

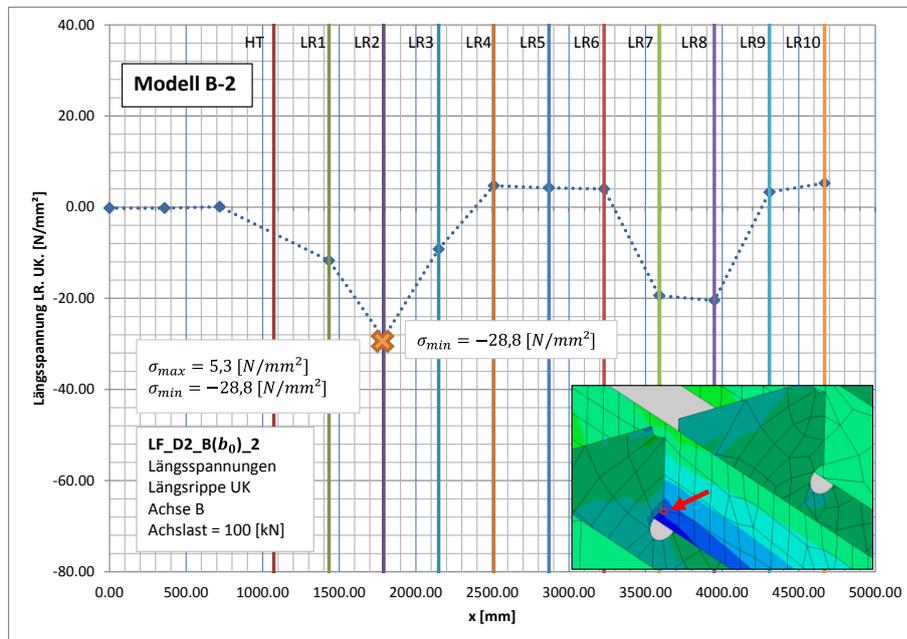


Abbildung 138: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_2

### A 3.4.2.4. Detail D2\*

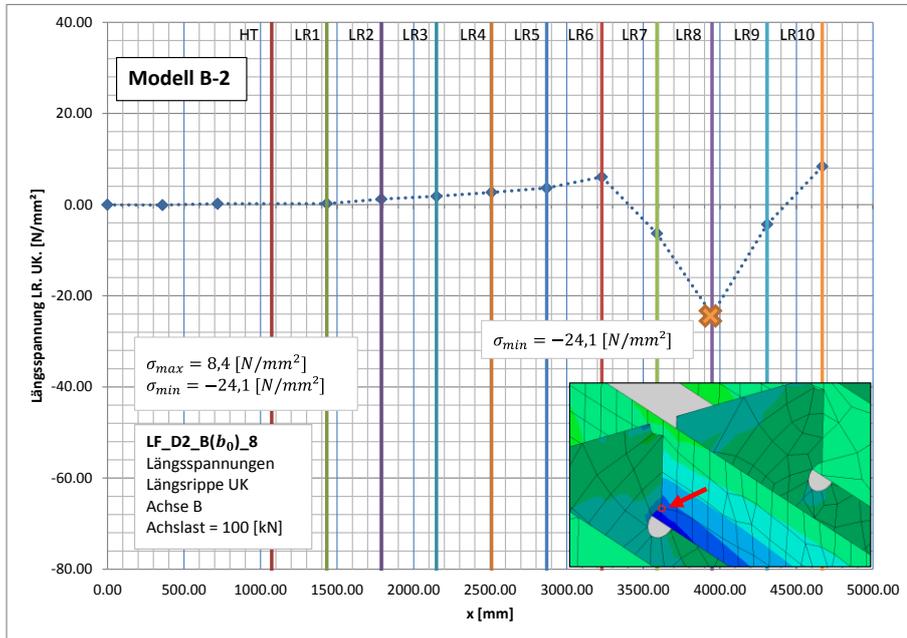


Abbildung 139: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_8

## A 3.5. Ergebnisse infolge Belastung Achse C

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen an den Modellen B-1 (mit Belag, voller Verbund) und B-2 (mit Belag, ohne Verbund) präsentiert. Die folgenden Diagramme in Abbildung 140 bis Abbildung 147 sind Spannungsverläufe entlang der Pfade der jeweiligen Detailbereiche (siehe Kapitel A 1.3) für die Achse C(b<sub>0</sub>). Abbildung 140, Abbildung 141, Abbildung 144 und Abbildung 145 zeigen den Spannungsverlauf an der Deckblechunterseite. Abbildung 142, Abbildung 143, Abbildung 146 und Abbildung 147 zeigen die Normalspannungen an den einzelnen Längsrippen.

A 3.5.1. Modell B-1; mit Belag/voller Verbund

A 3.5.1.1. Detail D1

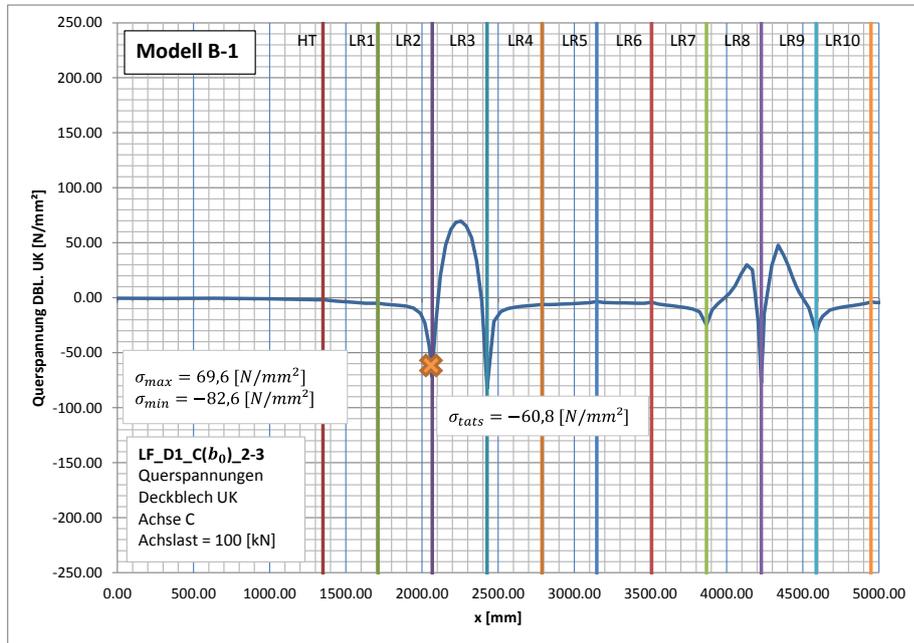


Abbildung 140: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_2-3

A 3.5.1.2. Detail D1\*

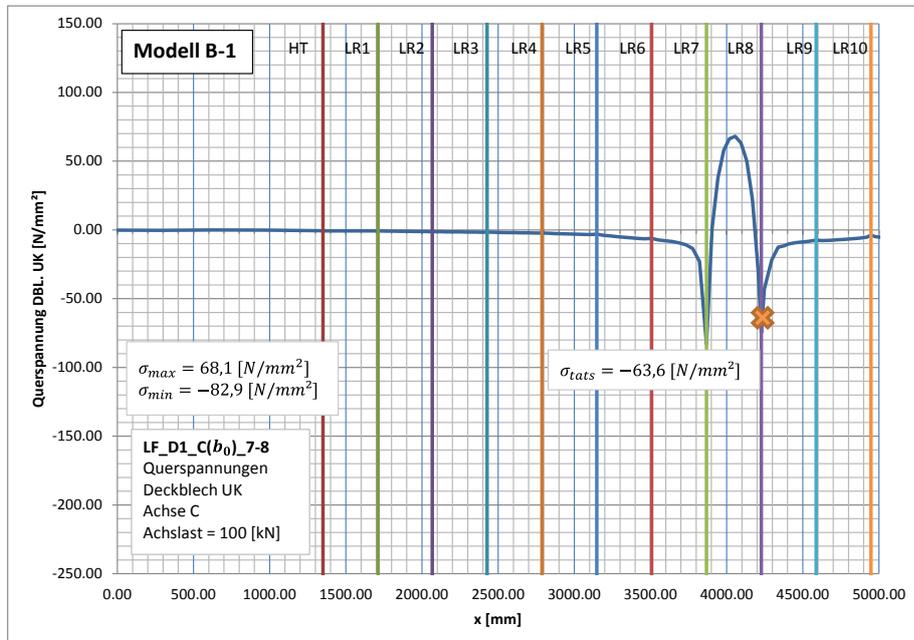


Abbildung 141: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_7-8

**A 3.5.1.3. Detail D2**

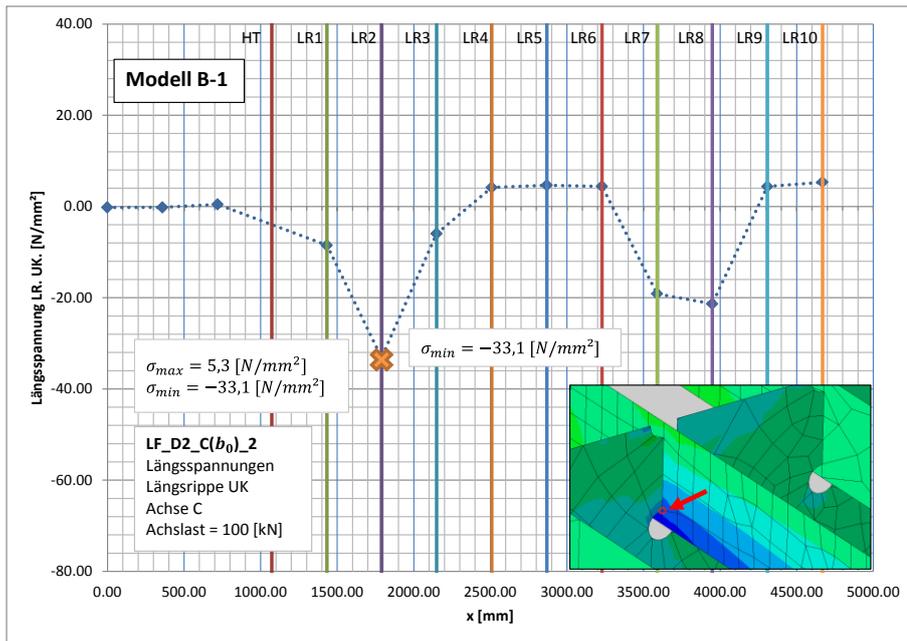


Abbildung 142: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_2

**A 3.5.1.4. Detail D2\***

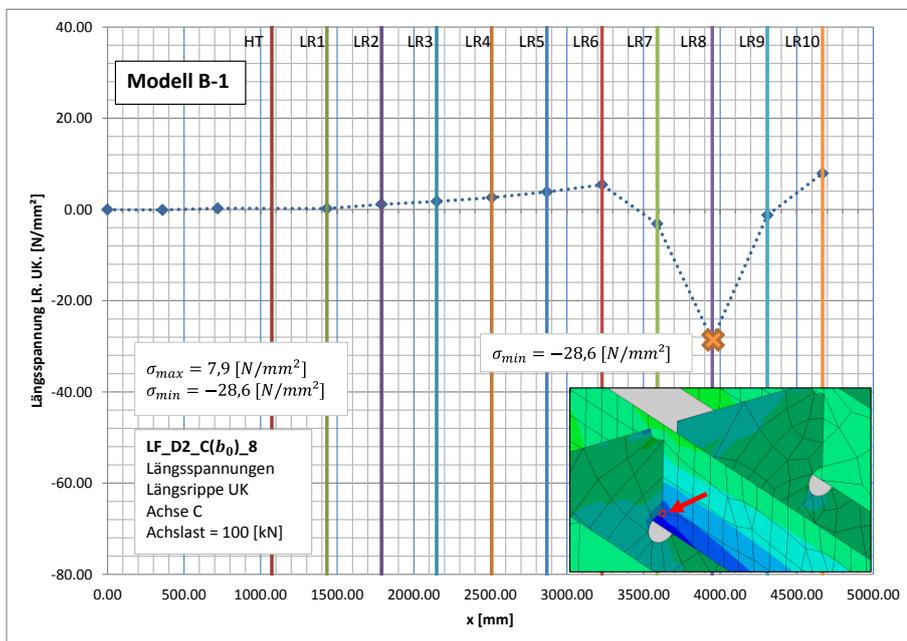
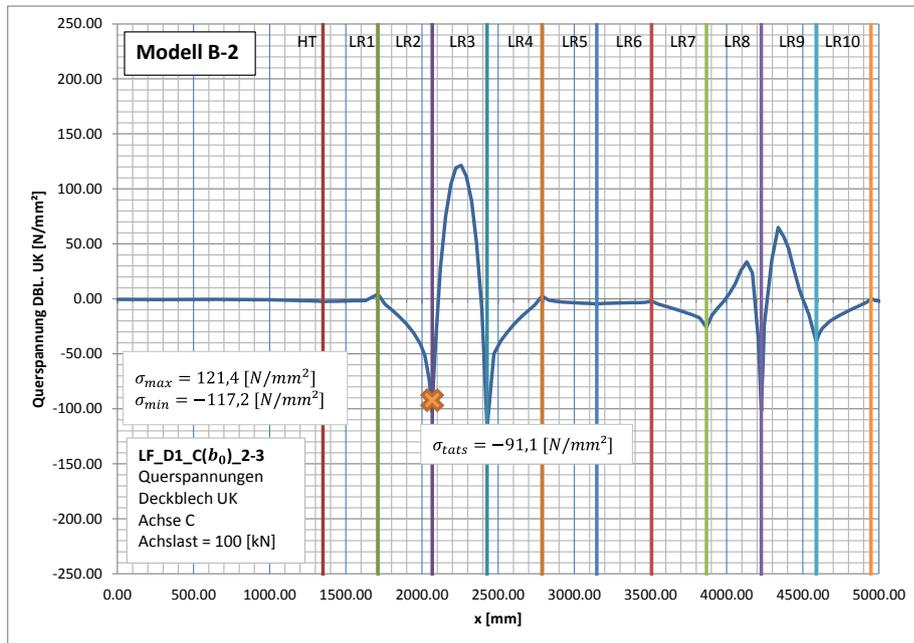


Abbildung 143: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_8

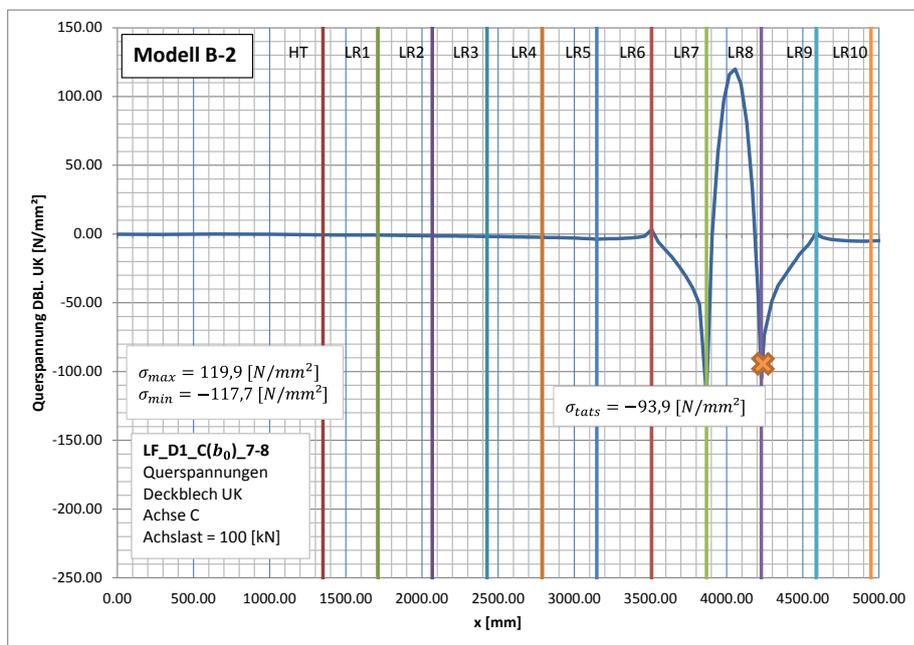
**A 3.5.2. Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund**

**A 3.5.2.1. Detail D1**



**Abbildung 144: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_2-3**

**A 3.5.2.2. Detail D1\***



**Abbildung 145: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_7-8**

A 3.5.2.3. Detail D2

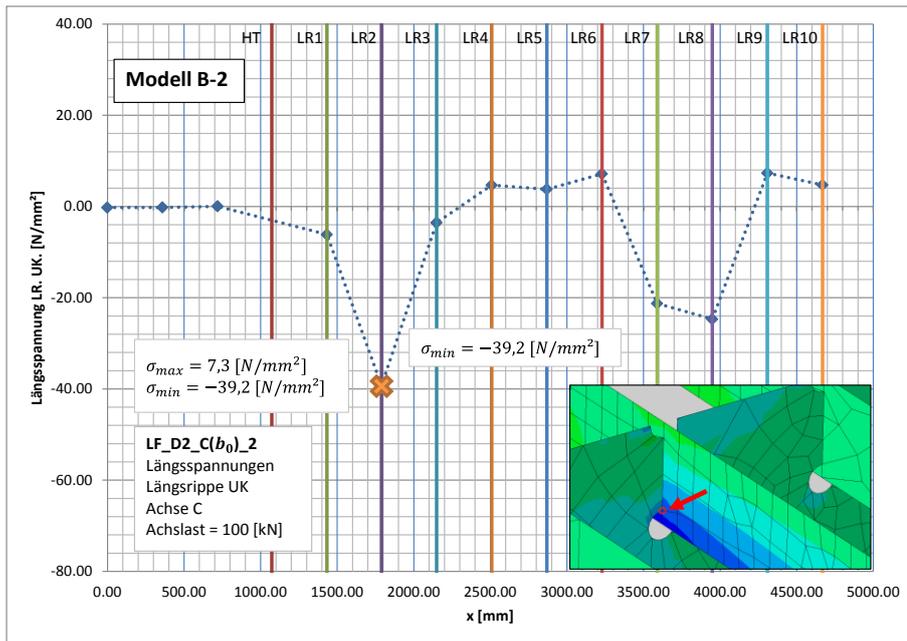


Abbildung 146: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_2

A 3.5.2.4. Detail D2\*

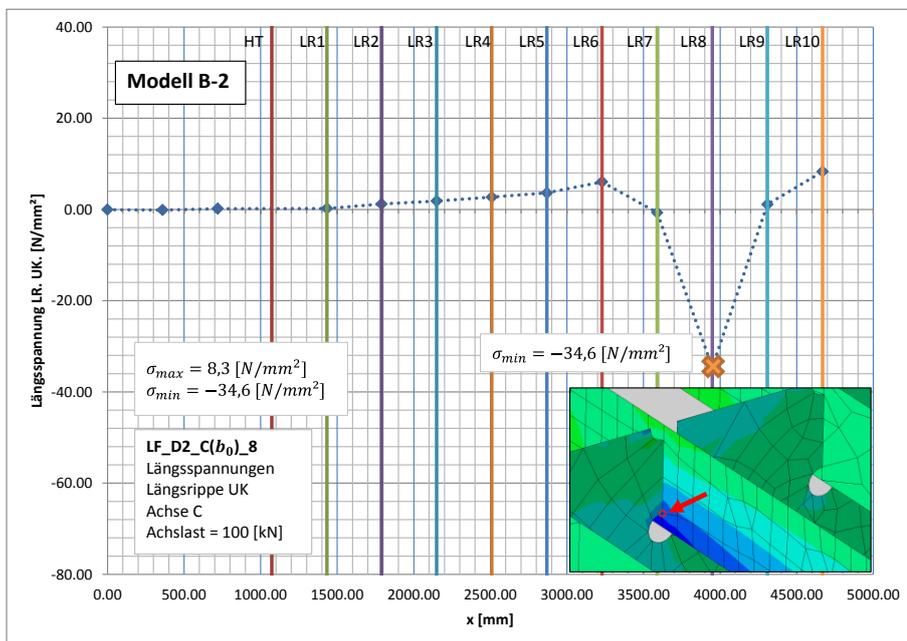


Abbildung 147: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_8

### A 3.6. Zusammenfassung der Ergebnisse

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Berechnungen an den Modellen B-1 und B-2 tabellarisch zusammengefasst.

#### A 3.6.1. Modell B-1; mit Belag/voller Verbund

In Tabelle 10 sind die Spannungen der untersuchten Detailbereiche für die Lastfälle der Achsen B und C am Modell B-1 zusammengefasst.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D1 und D1\* siehe Abbildung 130.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D2 und D2\* siehe Abbildung 131.

Modell B-1	Lastfall	Detail	$\sigma_{tats}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	LF_D1_B( $b_0$ )_2	D1	-63.3	-78.7
	LF_D1_C( $b_0$ )_2-3	D1	-60.8	-72.0
	LF_D1_B( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D1*	-65.9	-81.4
	LF_D1_C( $b_0$ )_7-8	D1*	-63.6	-74.8
	LF_D2_B( $b_0$ ) <sub>2</sub>	D2	-25.2	-35.9
	LF_D2_C( $b_0$ )_2	D2	-33.1	-46.8
	LF_D2_B( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D2*	-20.7	-30.0
	LF_D2_C( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D2*	-28.6	-41.0

Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse Modell B-1

#### A 3.6.2. Modell B-2; mit Belag/ohne Verbund

In Tabelle 11 sind die Spannungen der untersuchten Detailbereiche für die Lastfälle der Achsen B und C am Modell B-2 zusammengefasst.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D1 und D1\* siehe Abbildung 130.

Definition für  $\sigma_{tats}$  und  $\sigma_{min}$  bei Detail D2 und D2\* siehe Abbildung 131.

Modell B-2	Lastfall	Detail	$\sigma_{tats}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\sigma_{min}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
	LF_D1_B( $b_0$ )_2	D1	-94.4	-112.9
	LF_D1_C( $b_0$ )_2-3	D1	-91.1	-102.5
	LF_D1_B( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D1*	-97.1	-115.4
	LF_D1_C( $b_0$ )_7-8	D1*	-93.9	-105.2
	LF_D2_B( $b_0$ )_2	D2	-28.8	-40.7
	LF_D2_C( $b_0$ )_2	D2	-39.2	-55.3
	LF_D2_B( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D2*	-24.1	-34.8
	LF_D2_C( $b_0$ ) <sub>8</sub>	D2*	-34.6	-49.3

Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse Modell B-2



## A 4. Ergebnisvergleich: Modell A – Modell B – lokale Modelle

Nach Ende aller an Modell A (ohne Belag), Modell B-1 (mit Belag, voller Verbund) und Modell B-2 (mit Belag, ohne Verbund) durchgeführten Berechnungen wurden die Ergebnisse der einzelnen Detailbereiche miteinander verglichen, um eine Beurteilung über eine reale lastverteilende Wirkung des Belages treffen zu können.

In Abschnitt A 4.1 werden die Spannungen der Detailbereiche D1 (bzw. D1\*) und D2 (bzw. D2\*) unter der Last der Achse B miteinander verglichen.

Detail D1 stellt, wie in Kapitel A 1.3.1 beschrieben wird, jenes Kerbdetail dar, das sich am Anschluss der Längsrippe an das Deckblech befindet, wobei die Quernormalspannungen des Deckbleches an dessen Unterkante im Abstand von  $x = 7 [mm]$  zur Längsrippenachse abgelesen wurden.

Wie Abbildung 148 sehr gut erkennen lässt, ist dieser Detailpunkt sehr stark von einer Änderung der Geometrie der Radaufstandsflächen bei einer Berücksichtigung der Lastausbreitung betroffen, da sich die Spannungen ungefähr um den Faktor 1,7 voneinander unterscheiden.

Abbildung 148 lässt erkennen, dass die laut EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässige Lastausbreitung im Belag von  $45^\circ$  eine zutreffende Näherung darstellt, da die an Modell A ermittelten Spannungswerte, die mit der Achse B( $b_0$ ) errechnet wurden, sehr gut mit jenen Spannungswerten aus Modell B-2 übereinstimmen (für Sommer – Winter sogar noch Reserven).

Wie in Abbildung 149 gut erkennen lässt, ist Detailpunkt D2, wie er in Kapitel A 1.3.3 beschrieben wird bei weitem nicht so stark von einer Änderung der geometrischen Abmessungen der Radaufstandsflächen betroffen, da sich die Spannungen in dem Detailpunkt nicht stark voneinander unterscheiden.

Auch hier stellt die Näherung mit einem Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  eine durchaus zutreffende Möglichkeit dar, die reale günstige Wirkung des Belages zu erfassen. Auch hier sind die an Modell A ermittelten Spannungswerte infolge der Achse B( $b$ ) den Werten aus Modell B-2 sehr ähnlich (für Sommer – Winter sogar noch Reserven).

Die Ergebnisse der Berechnungen an den Detailpunkten D1 und D2 infolge der Achse C führten, wie in den beiden Grafiken Abbildung 150 und Abbildung 151 zu sehen ist, zu ähnlichen Schlussfolgerungen über die Lastverteilung des Belages wie zuvor an den Spannungswerten infolge Achse B erklärt wurde.

### **Fazit:**

Der laut EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] zulässige Lastausbreitungswinkel von  $45^\circ$  über die Höhe des Belages stellt eine ausreichend genaue und vor allem einfache Annäherung dar, die günstige lastverteilende Wirkung des Belages auf orthotropen Platten im Straßenbau berücksichtigen zu können.

## A 4.1. Belastung infolge Achse B

### A 4.1.1. Detail D1 bzw. D1\* - Deckblechbiegung

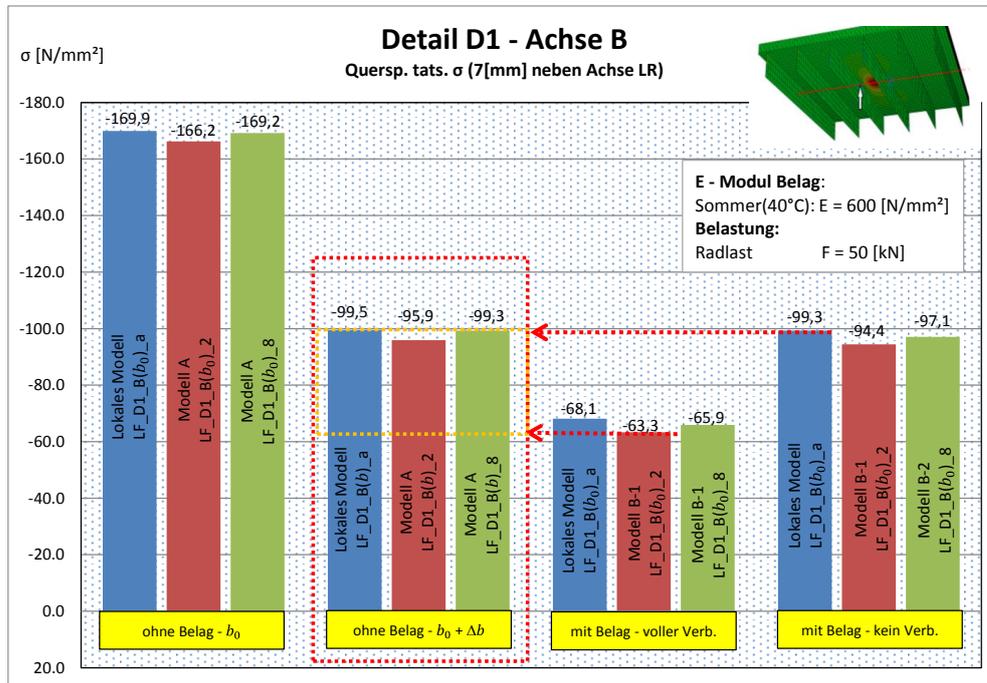


Abbildung 148: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse B – Detail D1 bzw. D1\*

### A 4.1.2. Detail D2 bzw. D2\* - Anschluss Längsrippe/Querrippe

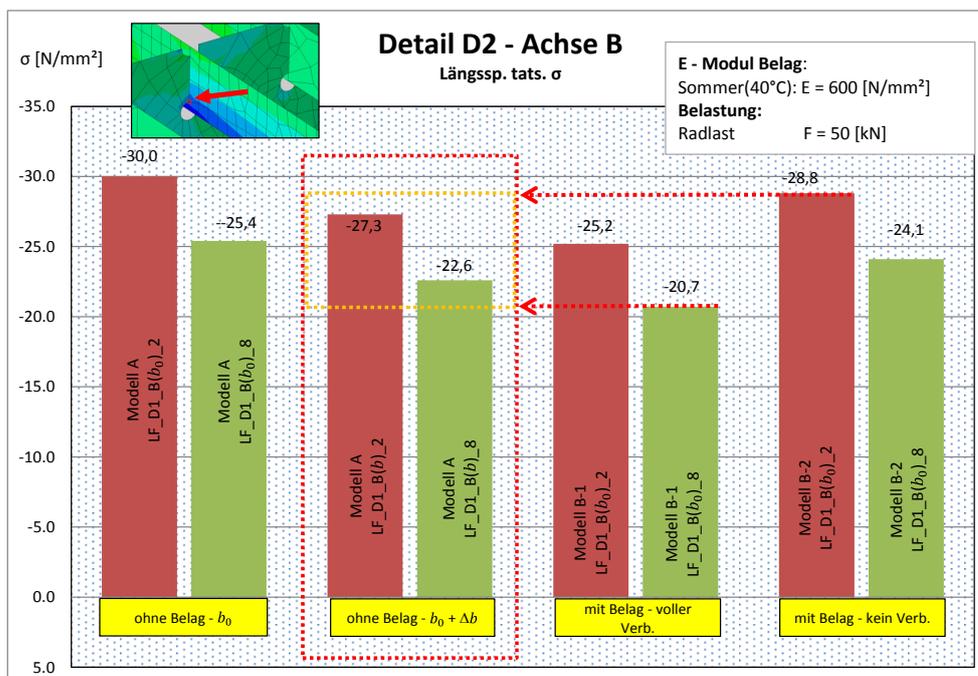


Abbildung 149: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse B – Detail D2 bzw. D2\*

## A 4.2. Belastung infolge Achse C

### A 4.2.1. Detail D1 bzw. D1\* - Deckblechbiegung

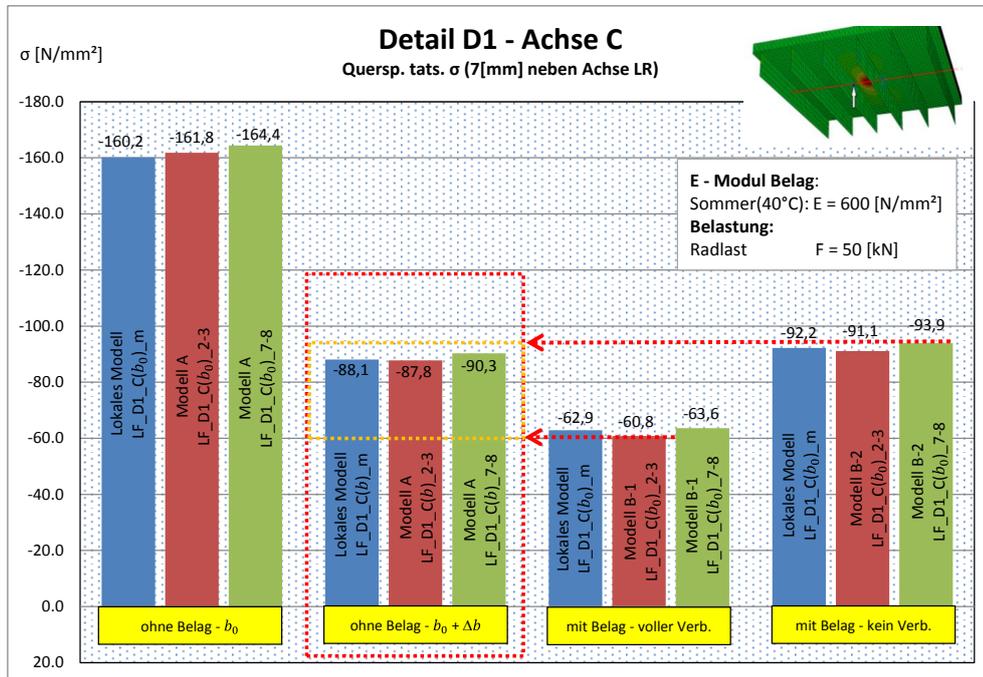


Abbildung 150: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse C – Detail D1 bzw. D1\*

### A 4.2.2. Detail D2 bzw. D2\* - Anschluss Längsrippe/Querrippe

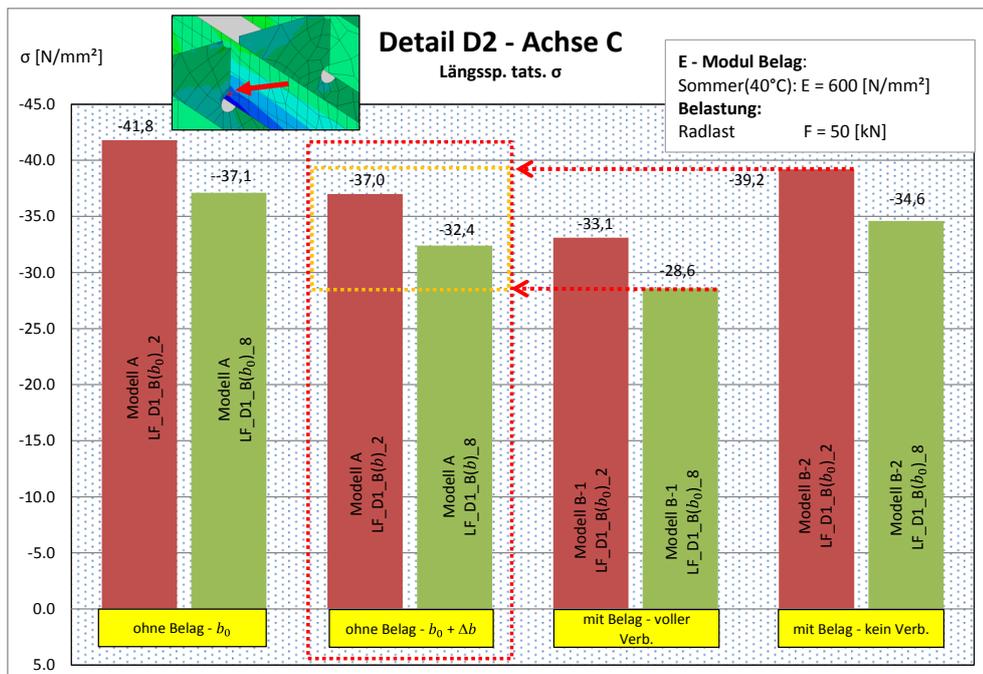


Abbildung 151: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse C – Detail D2 bzw. D2\*



## A 5. Schädigungsanalyse einiger Kerbdetails

### A 5.1. Allgemeines

In diesem Abschnitt wurden einige maßgebende Kerbdetails einer orthotropen Platte untersucht. Dies geschah auf Basis einiger Daten der Berechnung der Restlebensdauer der Praterbrücke, welche das Institut für Stahlbau im Auftrag der Asfinag Bau Management GmbH durchführte [3]. Die in dieser Arbeit präsentierten Detailpunkte P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 wurden vom Institut ausführlich untersucht und mit Ergebnissen von Dehnungsmessungen verglichen, welche an einigen maßgebenden Stellen der Praterbrücke angebracht wurden. Diese untersuchten Detailpunkte waren speziell auf die Ermüdungsschädigungen der Praterbrücke und deren Eigenheiten, bezüglich ihrer Konstruktion abgestimmt, da an der Brücke bereits einmal eine Sanierung durchgeführt wurde, in dem Blechlamellen auf die obere Seite des Deckbleches aufgeschweißt wurden. Zusätzlich erfolgte noch eine Fahrbahnverbreiterung (außenseitige Fahrspurverbreiterung von einer Fahrspur pro Richtungsfahrbahn) und zeitgleich der Versatz des Geh- und Radweges an die Unterseite der Brücke.

Im Sinne dieser Diplomarbeit wurden die in Kapitel A 1.3 beschriebenen maßgebenden Detailpunkte ebenfalls derselben Untersuchung der Ermüdung unterzogen. Dafür wurden die bereits vorhandenen Ergebnis-Daten von Abaqus übernommen, welche eine Überfahrt der Achsen A, B und C an den vorhandenen Fahrspuren der Brücke simulierte. Der Ort der maßgebenden Punkte für D1 und D2 richtete sich nach der Lage der vorhandenen Fahrspuren. Die Kerbdetailpunkte wurden so gewählt, dass an diesen Punkten infolge der Einwirkungen die maximalen Spannungswechsel zu erwarten sind. Die Spannungen an den maßgebenden Punkten der Details D1 und D2 wurden in den Ergebnis-Dateien ausgelesen. Es wurden mithilfe dieser Spannungswerte Einflusslinien der Einzelachsen generiert, woraus dann wiederum die auftretenden Spannungsspiele bei der Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen (siehe Abbildung 152) erstellt wurden. Die Verkehrsdaten stammen aus der vom Institut durchgeführten Restlebensdauerberechnung [3] und wurden ebenfalls für diese Arbeit übernommen. So können diese untersuchten Detailpunkte D1 und D2 im Allgemeinen bei einer orthotropen Platte mit offenen Längsrippen aus dieser Zeit (Baujahr ~1970) als zwei der wesentlichen Kerbdetails angesehen werden, wobei natürlich beachtet werden muss, dass die auftretenden Spannungen in diesen Punkten doch sehr stark von der Geometrie der orthotropen Platte abhängig sind.

In den nachfolgenden Abschnitten wurden die Details D1 und D2 einer Analyse der durch den Schwerlastverkehr auftretenden Ermüdungsschädigungen mithilfe der vorhanden Verkehrsdaten nach Abbildung 152 unterzogen.

Die Ergebnisse der Berechnungen von Punkt P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 werden in Abschnitt A 5.4 präsentiert.

In Abschnitt A 5.5 befindet sich eine Zusammenfassung aller ermittelten Daten der Kerbdetails. Es wurde versucht Schlussfolgerungen zu ziehen, hinsichtlich der Schädigungen der einzelnen Fahrzeugtypen und deren zugehörigen Achstypen

(prozentueller Anteil der Schädigung bezüglich einer gewissen definierten Überfahrt an Fahrzeugen).

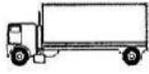
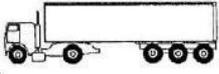
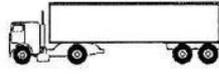
Typ	Schwerfahrzeug	Achsabstand [m]	$G_{ges}^*$ [kN]	Achslasten $A_i^*$ [kN]	Reifenart
T1		4,5	142	49,7 92,3	A B
T2		4,20 1,30	273	61,6 105,7 105,7	A B B
T3		3,20 5,20 1,30 1,30	360	51,4 110,2 66,1 66,1 66,1	A B C C C
T4		3,40 6,00 1,80	290	52,1 104,1 66,9 66,9	A B B B
T5		4,80 3,60 4,40 1,30	321	49,9 92,7 64,2 57,1 57,1	A B C C C

Abbildung 152: Verkehrssimulation durch angepasstes LM4 nach EN 1991-2 (aus [3])

## A 5.2. Ermittlung der Schädigungen für Detail D1

### A 5.2.1. Beschreibung Detail D1

D1 ist der Anschluss der Längsrippe an das Deckblech, wobei die Normalspannungen an der Deckblechunterseite in Brückenquerrichtung an der Stelle des Schweißnahtansatzes maßgebend sind.

Zunächst musste eine Stelle an der Praterbrücke gewählt werden an der die maximalen Spannungen für dieses Kerbdetail zu erwarten sind. Dies geschah unter Berücksichtigung der vorhandenen Fahrspuren und es wurde jener Punkt gewählt, der nach den in A 1.5 angestellten Untersuchungen der maßgebenden Laststellungen, diesen Anforderungen am besten entsprach.

Folgende Abbildungen zeigen die Spurführungsgeometrie und die zugehörigen Lastaufstandsflächen der Achsarten A, B und C mit einer Berücksichtigung einer lastverteilenden Wirkung des Belages durch einen Lastausbreitungswinkel von 45°.

Achsart A: Abbildung 153  
 Achsart B: Abbildung 154  
 Achsart C: Abbildung 155

In diesen Abbildungen sind bereits die für die Schädigungsanalyse maßgebenden Bereiche der Details D1 und D2 eingetragen.

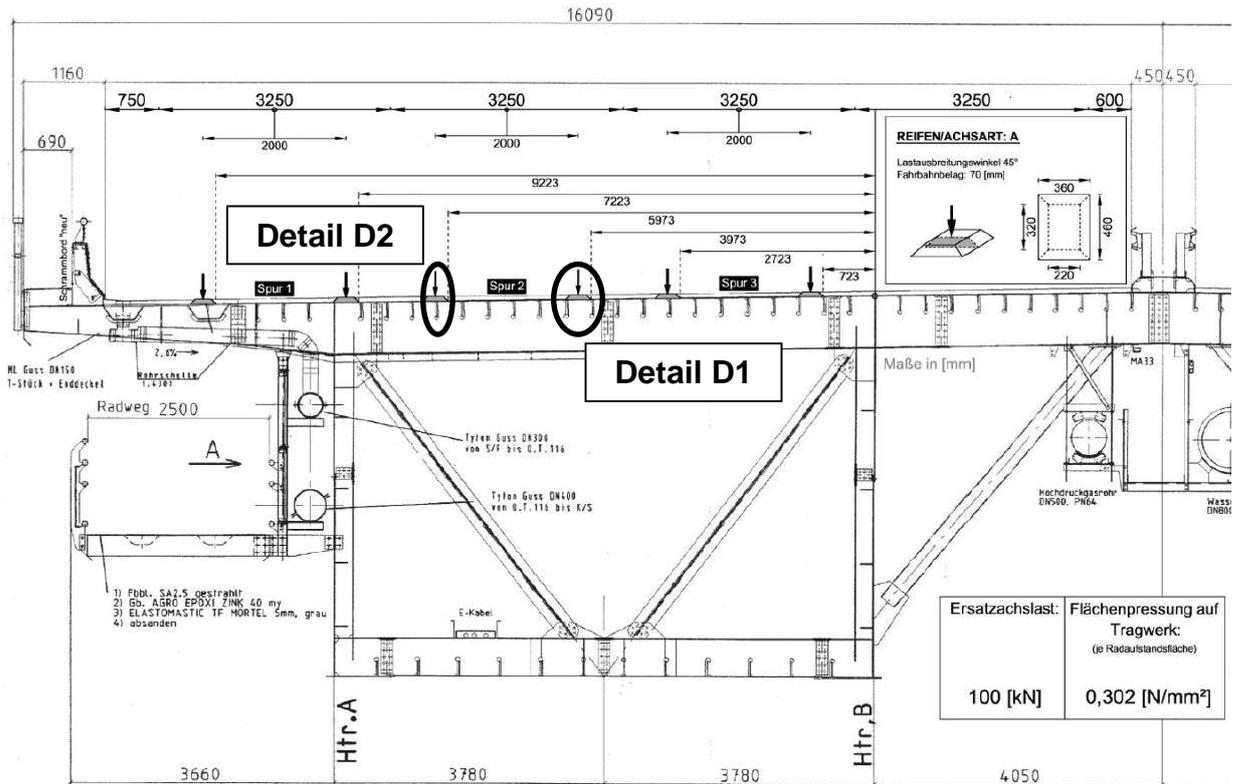


Abbildung 153: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart A

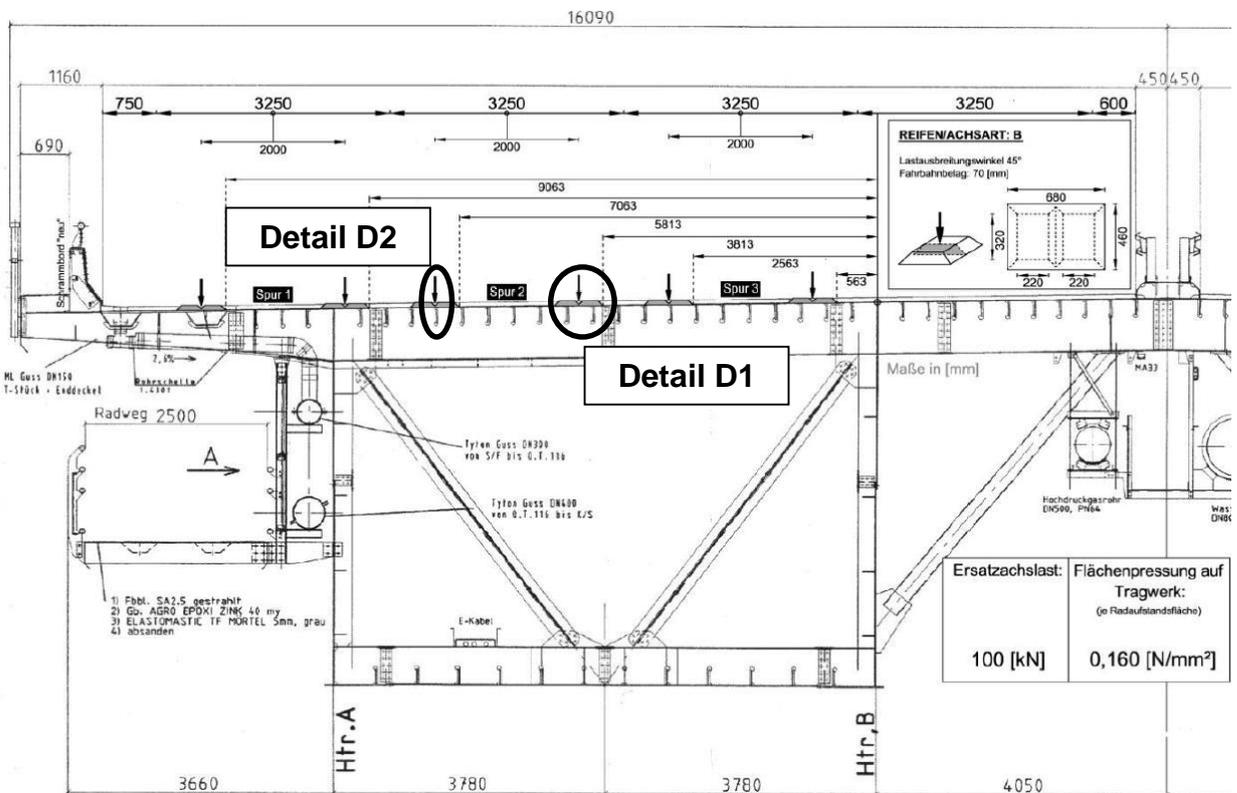
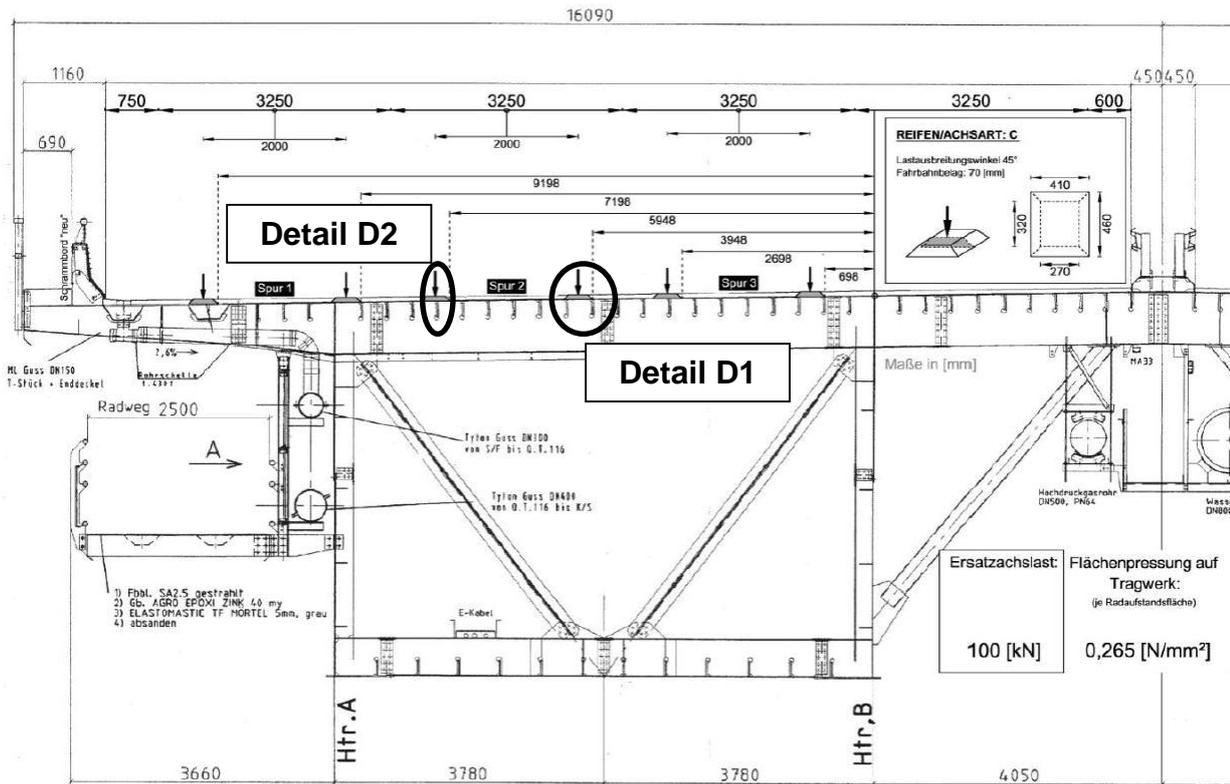
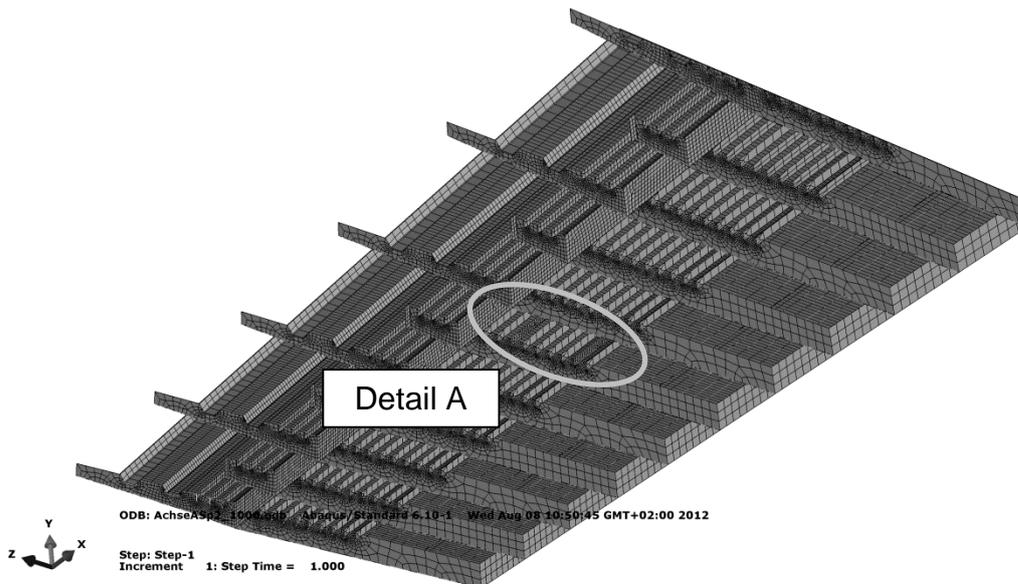


Abbildung 154: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart B



**Abbildung 155: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart C**

Es folgt nun eine genauere Beschreibung der Lage des Detailpunkts D1. In Abbildung 156 ist eine Übersicht des FE-Modells dargestellt, worin auf den Bereich Detail A (siehe Abbildung 157) verwiesen wird, in dem die genaue Lage der Ablesepunkte der Spannungen gezeigt wird.



**Abbildung 156: Praterbrücke - Übersicht FE-Modell (Ansicht von unten)**

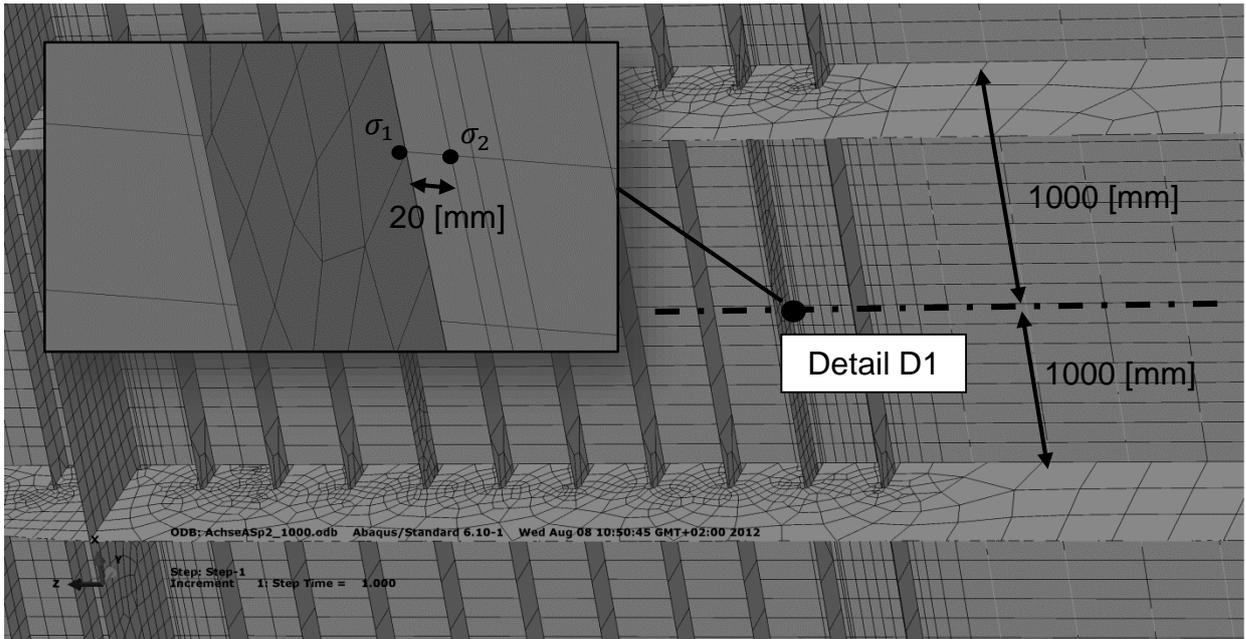


Abbildung 157: Praterbrücke – FE-Modell: Detail A

Da die Quernormalspannungen an der Deckblechunterkante direkt an dem Anschluss der Längsrippe aufgrund der Diskretisierung der Teile deutlich zu hohe Werte aufweisen (siehe Kapitel A 2.3.3) wurden die Spannungen an zwei benachbarten Stellen ( $\sigma_1$  &  $\sigma_2$  siehe Abbildung 157) abgelesen. Der gewünschte Wert, welcher sich im Abstand von 7 [mm] neben der Achse der Längsrippe 9 befindet wurde interpoliert.

### A 5.2.2. Einflusslinien der Einzelachsen

In diesem Abschnitt werden die Einflusslinien der Achsen A, B und C für dieses Detail D1 gezeigt, wobei diese mit einer einheitlichen Achslast von 100 [kN] ermittelt wurden.

#### A 5.2.2.1. Achse A

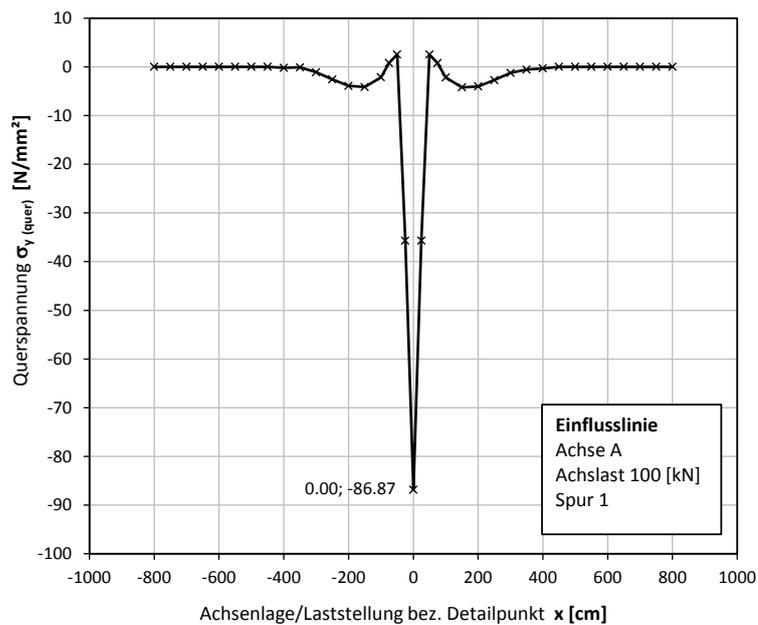
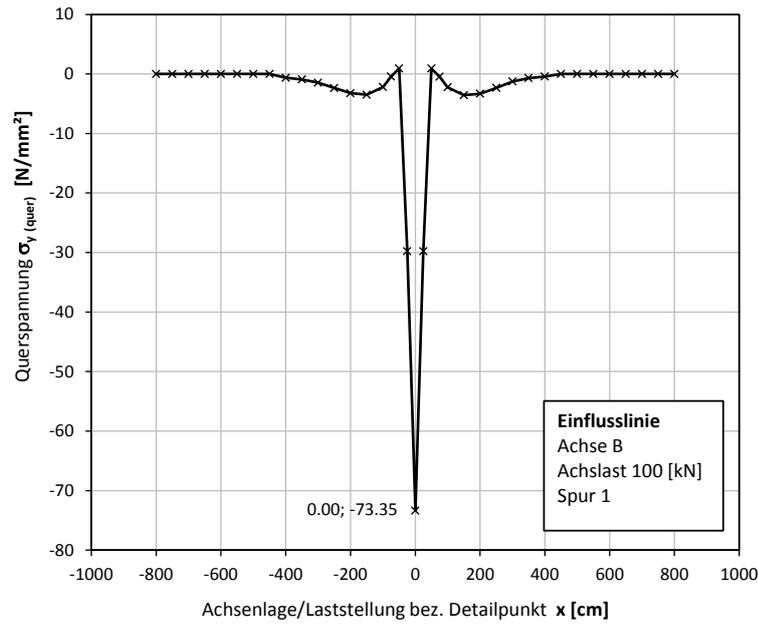


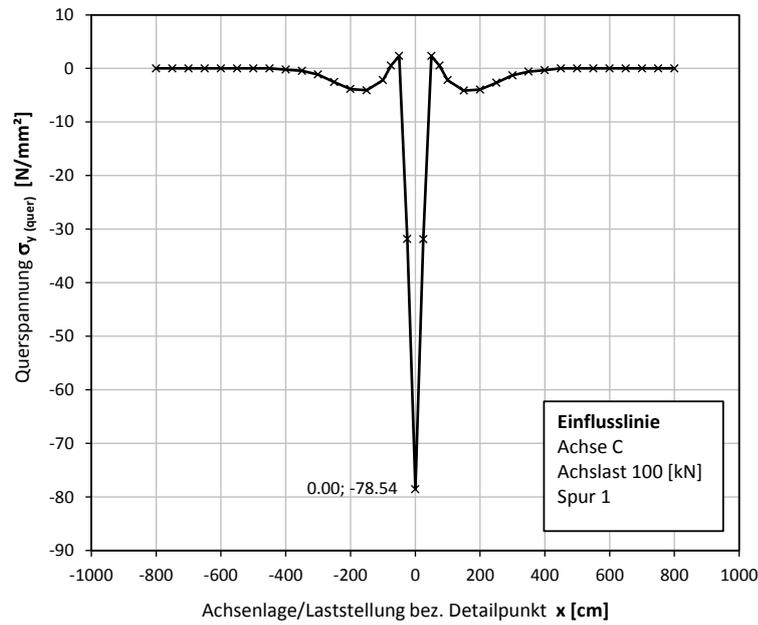
Abbildung 158: Einflusslinie Detail D1 – Achse A

**A 5.2.2.2. Achse B**



**Abbildung 159: Einflusslinie Detail D1 – Achse B**

**A 5.2.2.3. Achse C**



**Abbildung 160: Einflusslinie Detail D1 – Achse C**

### A 5.2.3. Spannungsverläufe bei Überfahrt der Fahrzeugtypen T1 bis T5

Es folgte ein Zusammenführen der Einzeleinflusslinien bezüglich der Randbedingungen nach Abbildung 152, mit den jeweiligen Achsarten, deren zugehörigen Achsabständen und die auf jede Achse unterschiedlich angreifende Kraft.

Daraus lassen sich die Spannungsverläufe bei Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen ermitteln, die in Abbildung 161 bis Abbildung 165 dargestellt sind.

Die dabei auftretenden Spannungsspiele wurden anschließend mittels der Rainflow-Methode ausgezählt und ein Lastkollektiv (für eine Überfahrt von insgesamt 13061 Lastkraftwagen) erstellt (siehe Abschnitt A 5.2.4).

#### A 5.2.3.1. Typ T1

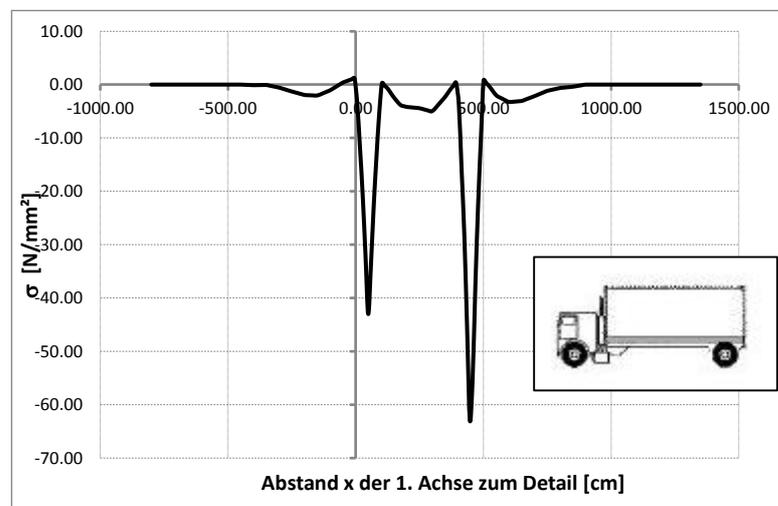


Abbildung 161: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T1

#### A 5.2.3.2. Typ T2

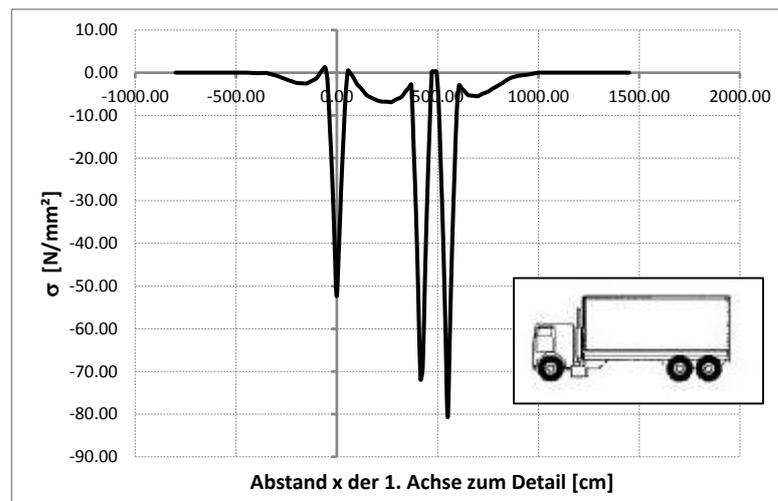
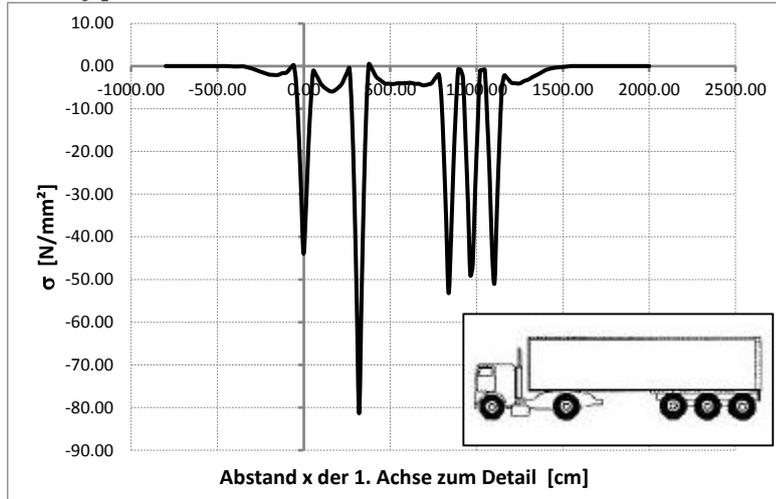


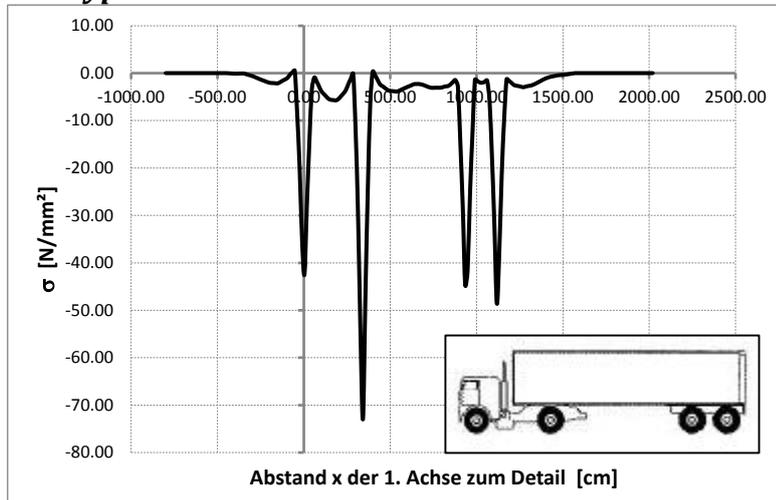
Abbildung 162: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T2

**A 5.2.3.3. Typ T3**



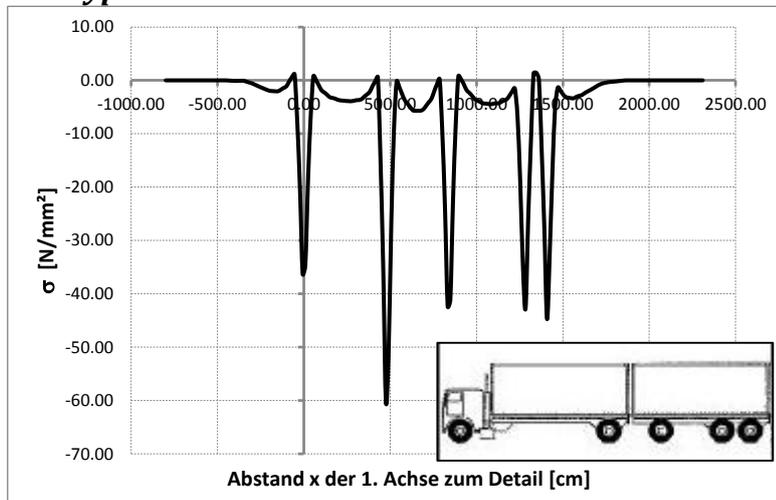
**Abbildung 163: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T3**

**A 5.2.3.4. Typ T4**



**Abbildung 164: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T4**

**A 5.2.3.5. Typ T5**



**Abbildung 165: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T5**

### A 5.2.4. Lastkollektiv

Unter Verwendung der in Kapitel A 5.2.3 dargestellten Spannungsverläufe und der daraus ausgezählten Spannungsspiele aus den Überfahrten der einzelnen Fahrzeugtypen (für je eine Überfahrt) wurde nun ein Lastkollektiv für eine Überfahrt von insgesamt 13061 LKW ermittelt (Anzahl entsprechend Gesamtschwerfahrzeuge innerhalb der Gesamtperiode der Dehnungsmessungen), wobei der Typenverteilungsschlüssel analog der Berechnung der Restlebensdauer der Praterbrücke des Institutes für Stahlbau [3] übernommen wurde, da später Vergleiche mit den prozentuellen Anteilen der Schädigungen angestellt werden sollten. Der für dieses Detail gewählte Typenverteilungsschlüssel für die Spur 2 der Praterbrücke wird in Tabelle 12 dargestellt.

Fahrzeugtyp	n	[%]
T1	3265.25	25%
T2	1959.15	15%
T3	3604.84	28%
T4	1097.12	8%
T5	3134.64	24%
Summe	13061	100%

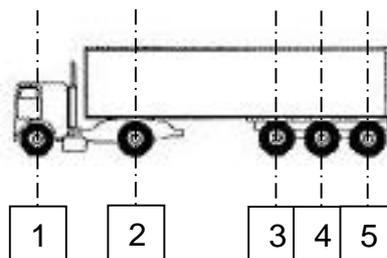
Tabelle 12: Typenaufteilungsschlüssel für Spur 2 – Detail D1

Der für dieses Detail vorliegende Kerbfall erlaubt eine zulässige Ermüdungsfestigkeit von  $\Delta\sigma_c = 80 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  bei einer Anzahl von  $2 \times 10^6$  Lastwechsel.

Die Berechnung ergibt eine schadensäquivalente einwirkende Spannungsschwingbreite von  $\Delta\sigma_e = 85,1 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  bezogen auf 1 LKW Überfahrt (daher auch  $n_e = 13.061$  Lastspiele für  $\Delta\sigma_e$ ), wie in Abbildung 166 dargestellt. Dabei wird die teilschädigende Wirkung der Spannungsspiele unter der Dauerfestigkeit ( $\Delta\sigma_{DF} \sim 59 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ ) mitberücksichtigt. Für eine spätere Analyse der Schädigungen der einzelnen Fahrzeugtypen wurden bereits in dieser Abbildung die Kollektivanteile der einzelnen Typen und deren Achsen miteingetragen.

Erläuterung der Bezeichnung der Kollektivanteile der einzelnen Typen und deren Achsen:

z.B.: T3-2-B  $\longrightarrow$  Typ 3, Achse 2, Achsart B



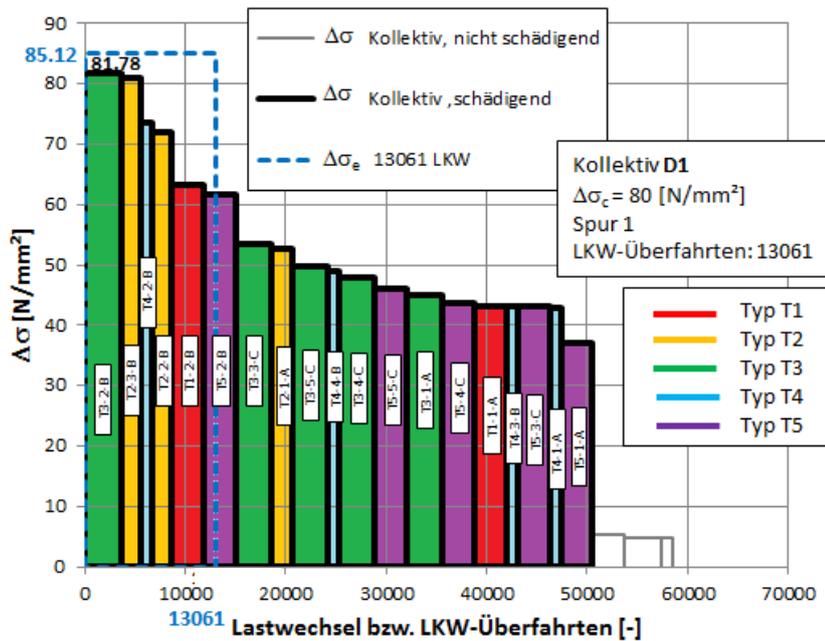


Abbildung 166: Schädigungswirksames Lastkollektiv für Punkt D1

## A 5.3. Ermittlung der Schädigung für Detail D2

### A 5.3.1. Beschreibung Detail D2

D2 ist der Anschluss der Längsrippe an den Querträger, wobei die Spannungen am Ende der Schweißnaht abgelesen werden ( $x = 30 \text{ mm}$  von der Längsrippenunterkante), da diese für eine Berechnung der Ermüdung maßgebend sind.

Wie schon bei Detail D1 wurden die Berechnungen am Punkt D2 analog durchgeführt. So musste auch hier zunächst ein maßgebender Punkt am Modell der Praterbrücke gefunden werden, der infolge der Einwirkungen der LKW auf ihren Fahrspuren, die maximalsten Spannungen liefert.

Dies geschah wieder unter Berücksichtigung der in Kapitel A 1.5 untersuchten maßgebenden Laststellung für den betrachteten Detailbereich.

In den angeführten Abbildungen sind bereits die für die Schädigungsanalyse maßgebenden Bereiche des Details D2 eingetragen.

Achsart A: Abbildung 153  
 Achsart B: Abbildung 154  
 Achsart C: Abbildung 155

Es folgt nun eine genauere Beschreibung der Lage von Detailpunkt D2. In Abbildung 167 wird eine Übersicht des FE-Modells dargestellt, worin auf den Bereich Detail A (siehe Abbildung 168) verwiesen wird, in dem die genaue Lage des Ablesepunktes der Spannungen gezeigt wird.

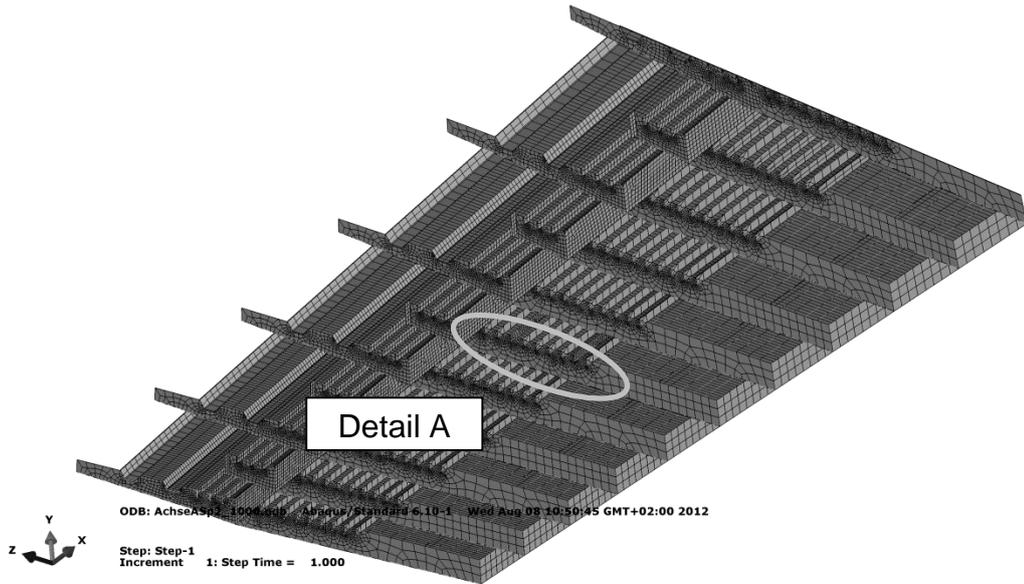


Abbildung 167: Praterbrücke - Übersicht FE-Modell (Ansicht von unten)

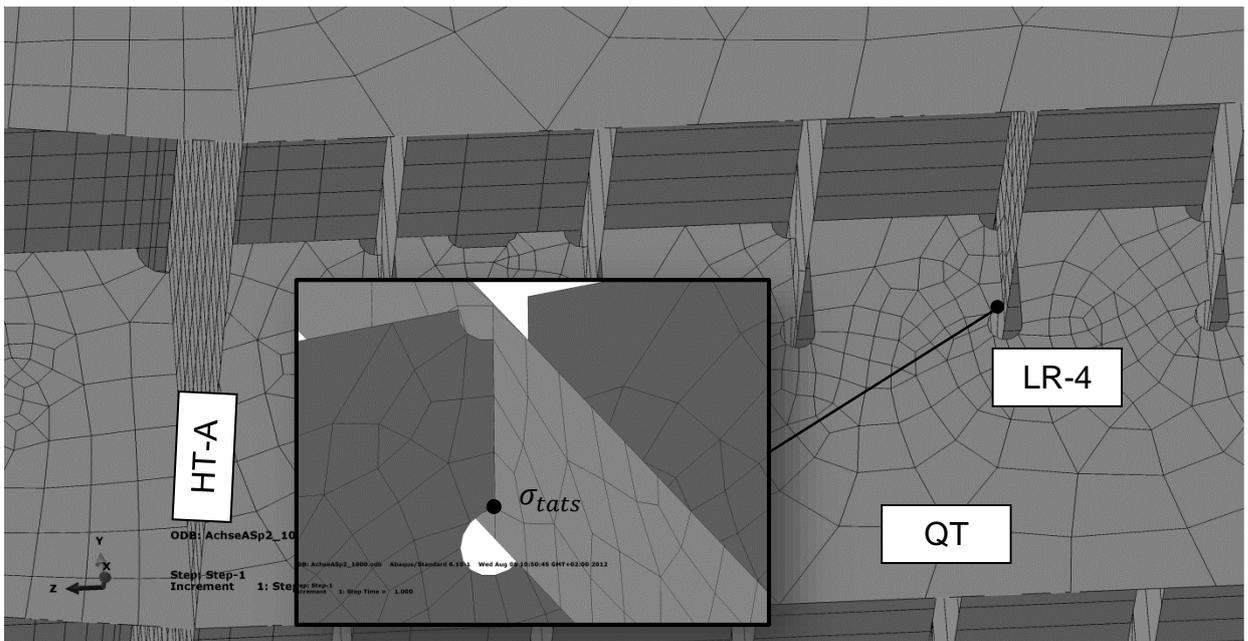
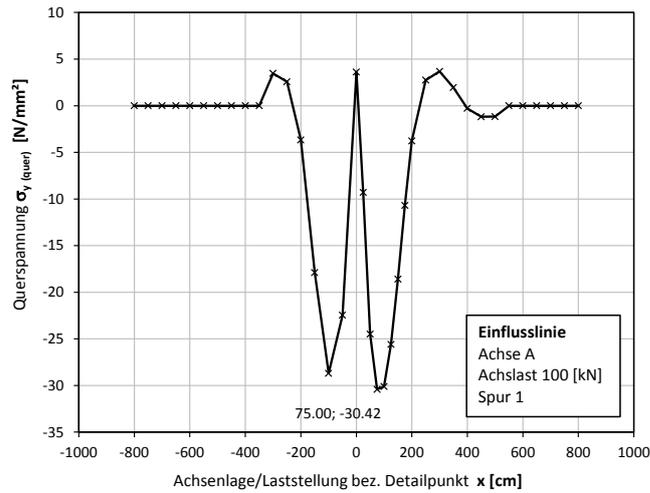


Abbildung 168: Praterbrücke – FE-Modell: Detail A

### A 5.3.2. Einflusslinien der Einzelachsen

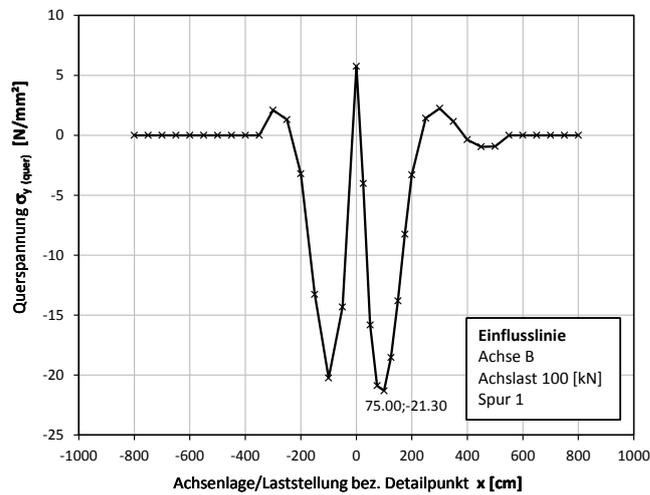
In diesem Abschnitt werden die Einflusslinien der Achsen A, B und C für dieses Detail gezeigt, wobei diese mit einer einheitlichen Achslast von 100 [kN] ermittelt wurden.

**A 5.3.2.1. Achse A**



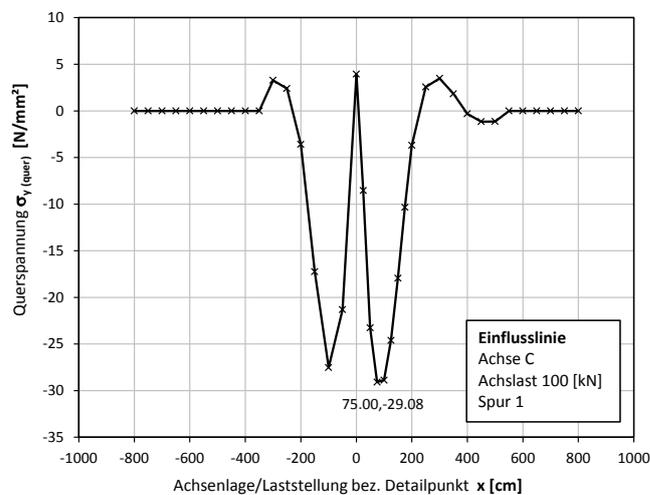
**Abbildung 169: Einflusslinie Detail D2 – Achse A**

**A 5.3.2.2. Achse B**



**Abbildung 170: Einflusslinie Detail D2 – Achse B**

**A 5.3.2.3. Achse C**



**Abbildung 171: Einflusslinie Detail D2 – Achse C**

### A 5.3.3. Spannungsverläufe bei Überfahrt der Fahrzeugtypen T1 bis T5

Es folgte ein Zusammenführen der Einzeleinflusslinien bezüglich der Randbedingungen nach Abbildung 152, mit den jeweiligen Achsarten, deren zugehörigen Achsabständen und die auf jede Achse unterschiedlich angreifende Kraft.

Daraus lassen sich die Spannungsverläufe bei Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen ermitteln, die in Abbildung 172 bis Abbildung 176 dargestellt sind.

Die dabei auftretenden Spannungsspiele wurden ausschließlich mittels der Rainflow-Methode ausgezählt und ein Lastkollektiv (für eine Überfahrt von insgesamt 13061 Lastkraftwagen) erstellt (siehe Abschnitt A 5.3.4).

#### A 5.3.3.1. Typ T1

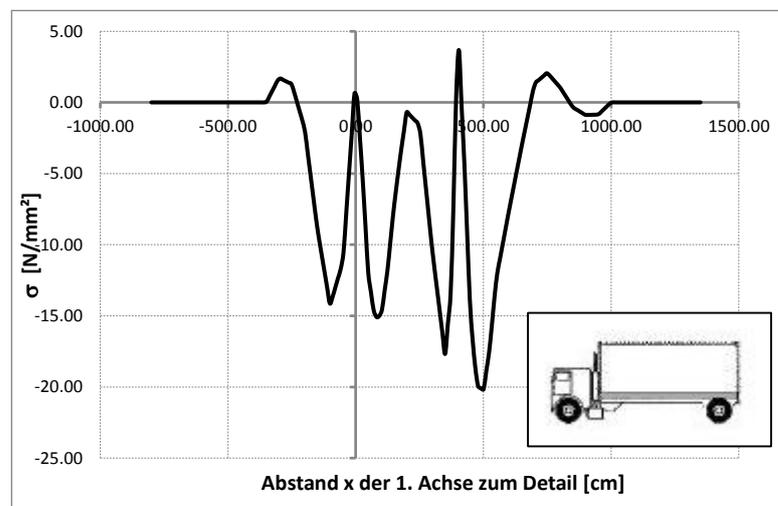


Abbildung 172: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T1

#### A 5.3.3.2. Typ T2

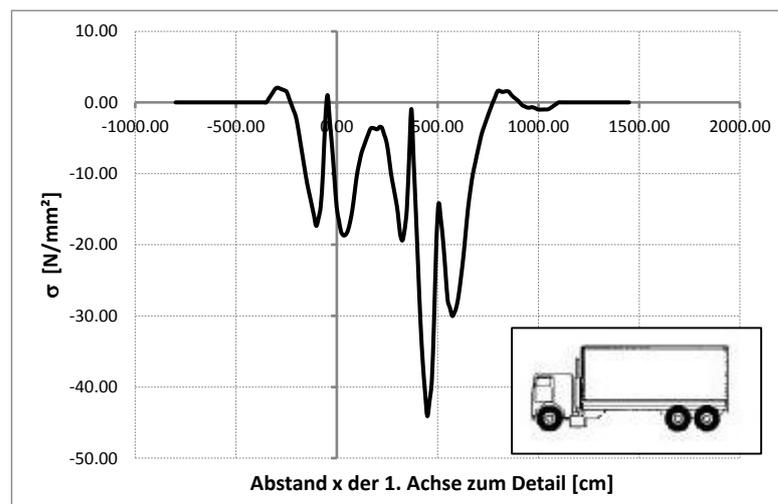
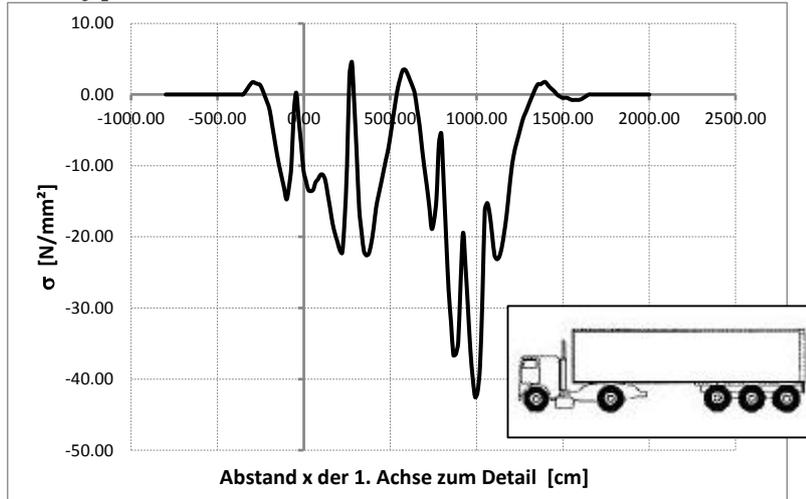


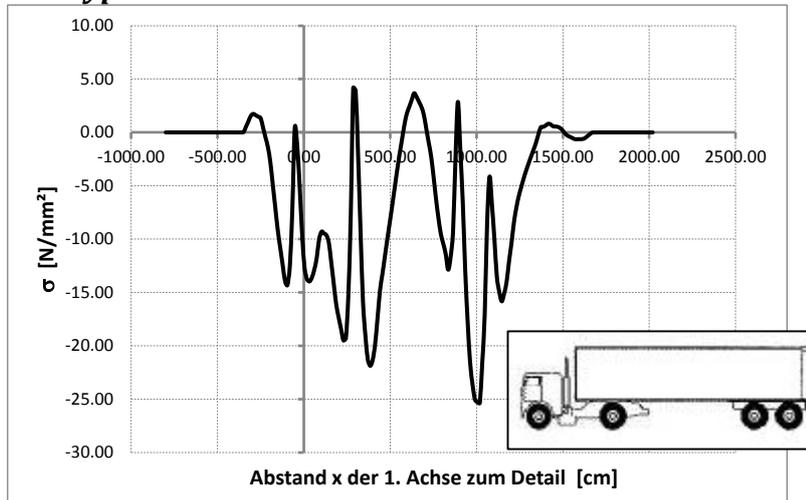
Abbildung 173: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T2

**A 5.3.3.3. Typ T3**



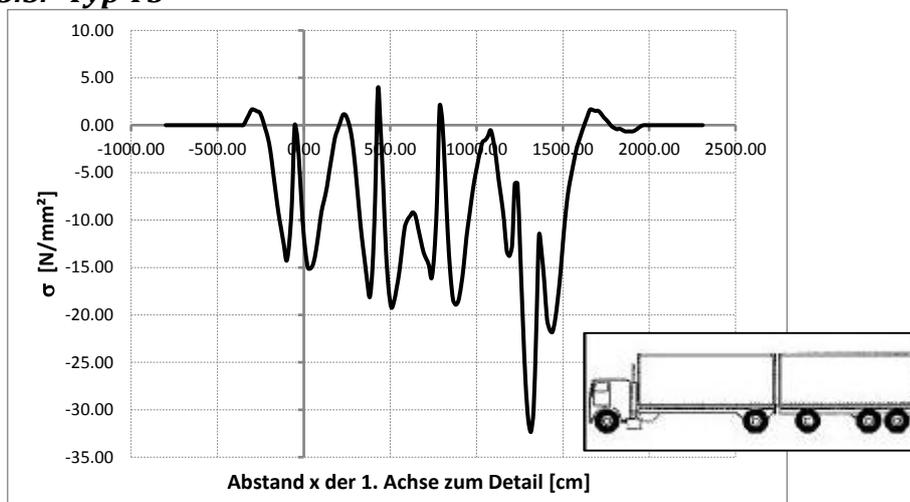
**Abbildung 174: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T3**

**A 5.3.3.4. Typ T4**



**Abbildung 175: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T4**

**A 5.3.3.5. Typ T5**



**Abbildung 176: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T5**

### A 5.3.4. Lastkollektiv

Unter Verwendung der in Kapitel A 5.3.3 dargestellten Spannungsverläufe und der daraus ausgezählten Spannungsspiele aus den Überfahrten der einzelnen Fahrzeugtypen (für je eine Überfahrt) wurde nun ein Lastkollektiv für eine Überfahrt von insgesamt 13061 LKW`s durchgeführt, wobei Typenverteilungsschlüssel analog der Berechnung der Restlebensdauer der Praterbrücke des Institutes für Stahlbau übernommen wurde, da später Vergleiche mit den prozentuellen Anteilen der Schädigungen angestellt werden sollten.

Der für dieses Detail gewählte Typenverteilungsschlüssel für die Spur 2 der Praterbrücke wird in Tabelle 13 dargestellt.

Fahrzeugtyp	n	[%]
T1	3265.25	25%
T2	1959.15	15%
T3	3604.84	28%
T4	1097.12	8%
T5	3134.64	24%
Summe	13061	100%

Tabelle 13: Typenaufteilungsschlüssel für Spur 2 – Detail D2

Der für dieses Detail vorliegende Kerbfall erlaubt eine zulässige Ermüdungsfestigkeit von  $\Delta\sigma_c = 80 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$  bei einer Anzahl von  $2 \times 10^6$  Lastwechsel.

Die Berechnung ergibt eine schadensäquivalente einwirkende Spannungsschwingbreite von nur  $\Delta\sigma_e = 31,5 \left[ \frac{N}{mm^2} \right]$ , wie in Abbildung 177 dargestellt, bedingt durch die nur teilschädigende Wirkung der Spannungsspiele unter der Dauerfestigkeit ( $\Delta\sigma_{DF} \sim 59$ ). Lediglich die Typen T2- T3 und T5 verursachen eine schädigende Wirkung an diesem Kerbdetail. Für eine spätere Analyse der Schädigungen der einzelnen Fahrzeugtypen wurden bereits in dieser Abbildung die Kollektivanteile der einzelnen Typen und deren Achsen miteingetragen.

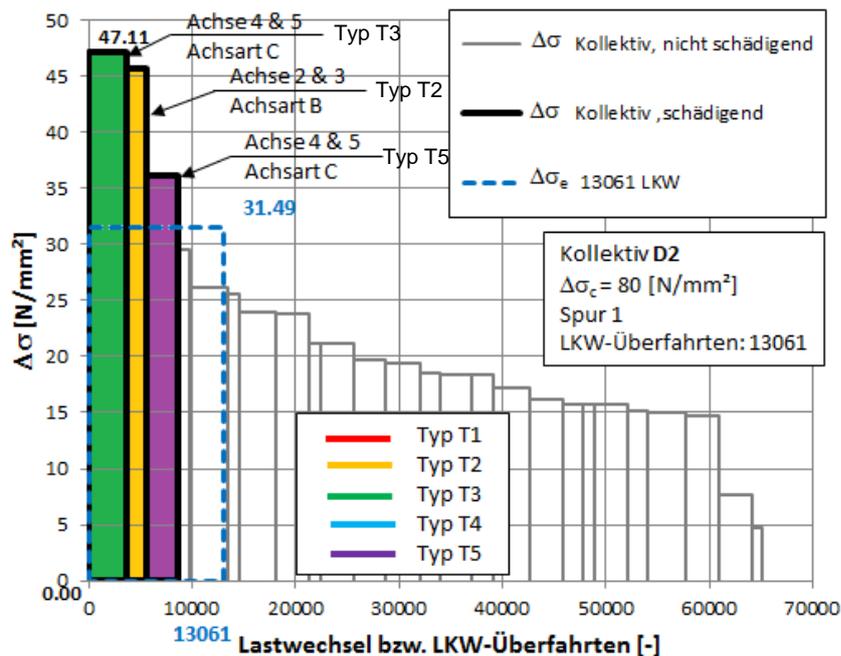


Abbildung 177: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt D2



### A 5.4.3. Punkt P2

Abbildung 179 zeigt die Lage des Punktes P2, dieser befindet sich mittig zwischen zwei verlängerten Querrippen an der Unterseite der trapezförmigen Längsrippe der Fahrspurverbreiterung.

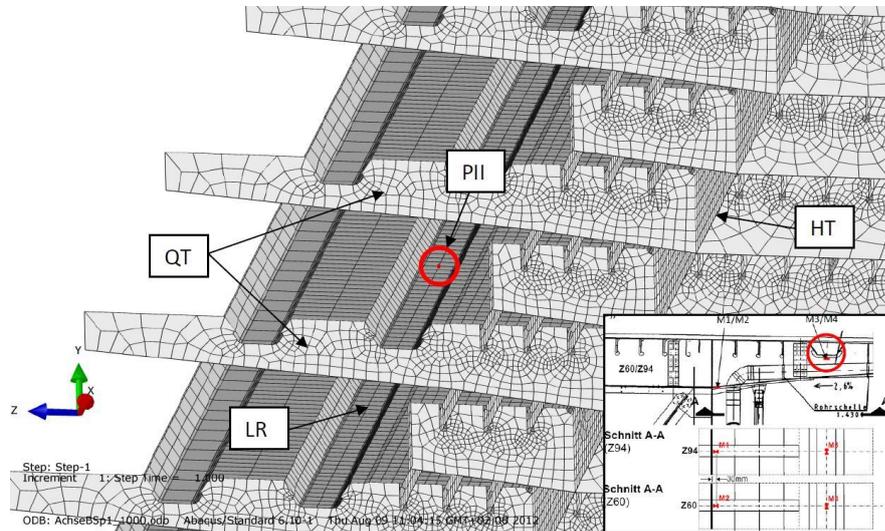


Abbildung 179: Darstellung Kerbdetail Punkt P2 (aus [3])

Auf eine Darstellung der Berechnung wird hier verzichtet, für genauere Informationen sei auf den Bericht der Restlebensdauerberechnung verwiesen.

Laut den Berechnungen an diesem Punkt gab es für dieses Detail keinen einzigen ermüdungswirksamen Spannungswechsel infolge der insgesamt 13061 LKW-Überfahrten.

### A 5.4.4. Punkt P3a

Wie in Abbildung 180 dargestellt ist, befindet sich der Punkt P3a im Feldbereich der Längsrippe - 10 [mm] von der Unterkante der Längsrippe 4 entfernt.

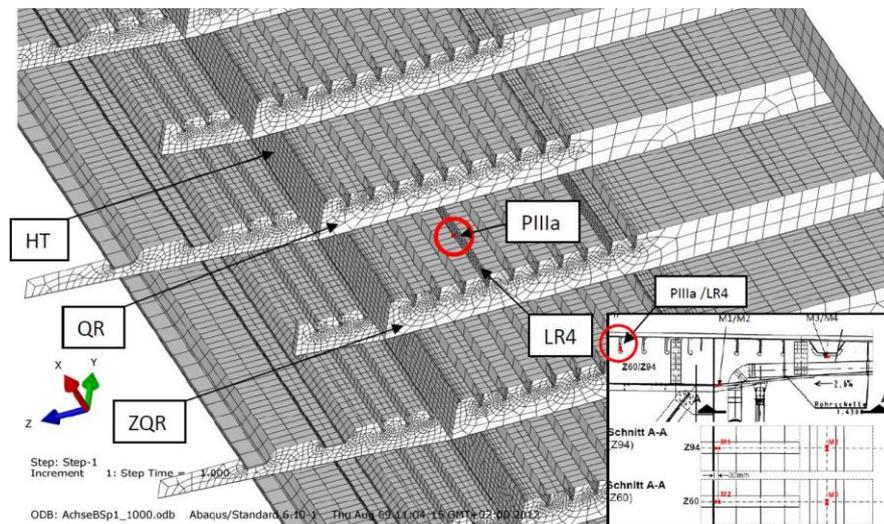


Abbildung 180: Darstellung Kerbdetail Punkt P3a (aus [3])

Auf eine Darstellung der Berechnung wurde in dieser Arbeit verzichtet, für genauere Informationen sei auf den Bericht der Restlebensdauerberechnung verwiesen.

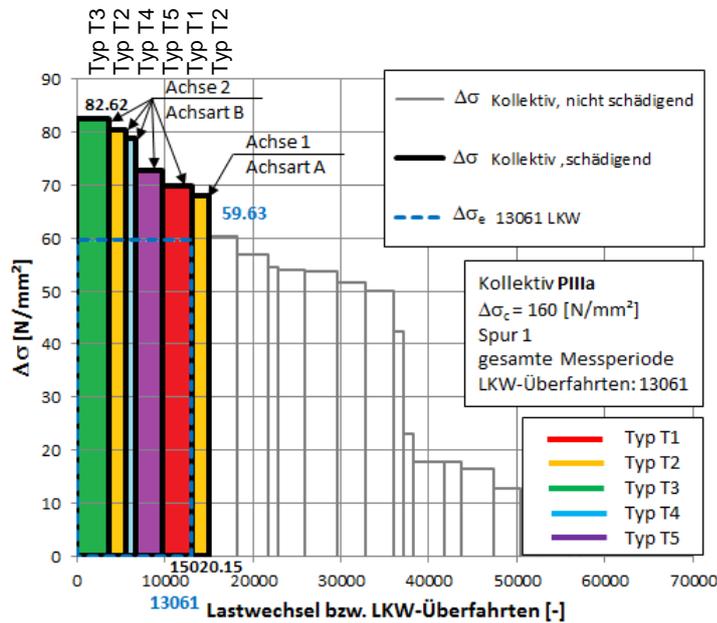


Abbildung 181: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P3a

Abbildung 181 zeigt das ermittelte Lastkollektiv für Punkt P3a, worin jene Fahrzeugtypen farblich markiert sind, die eine Schädigung in diesem Detailpunkt hervorrufen.

Aus diesem Diagramm ist zu erkennen, dass alle fünf Typen an dieser Stelle eine schädigende Wirkung auf diesen Punkt ausüben, wobei unter genauerer Betrachtung auffällig ist, dass hier bei allen Typen immer die Achse 2 mit der zugehörigen Achsart B maßgebend ist. Die Achse 2 ist bei allen Fahrzeugtypen die Antriebsachse, welche eine Doppelbereifung aufweist und auch die größte Achslast aufweist.

#### A 5.4.5. Punkt P3b

Punkt P3b befindet sich an der Längsrippe 9, wieder 10 [mm] oberhalb der Unterkante der Rippe und mittig zwischen 2 Querträgern, wie es in Abbildung 182 dargestellt wird.

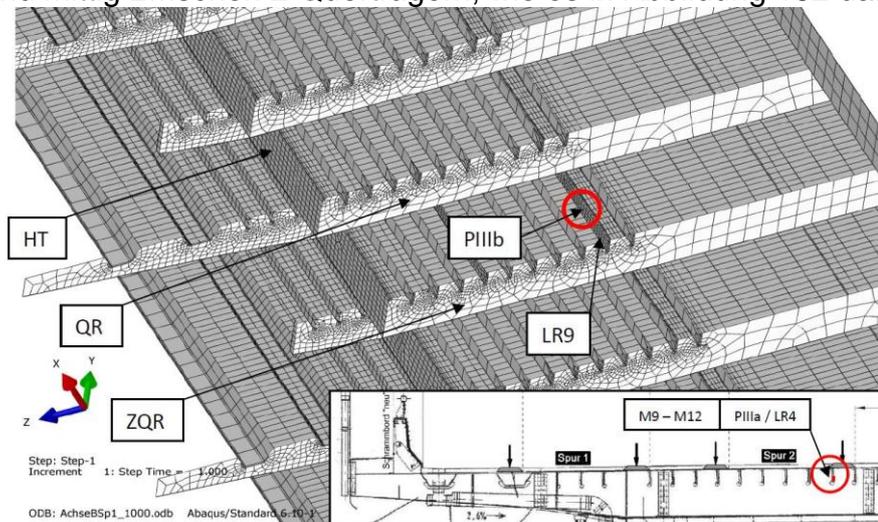


Abbildung 182: Darstellung Kerbdetail Punkt P3b (aus [3])

Auf eine Darstellung der Berechnung wurde in dieser Arbeit verzichtet, für genauere Informationen sei auf den Bericht der Restlebensdauerberechnung verwiesen.

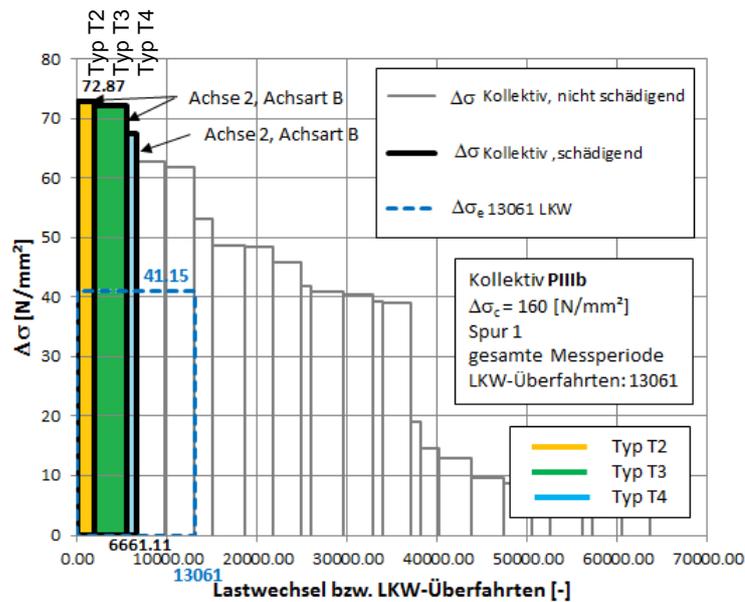


Abbildung 183: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P3b

Abbildung 183 zeigt das ermittelte Lastkollektiv für Punkt P3b, worin die Fahrzeugtypen farblich markiert sind, die eine Schädigung in diesem Detailpunkt hervorrufen.

Diesem Diagramm ist zu entnehmen, dass lediglich drei Typen eine schädigende Wirkung bei insgesamt 13061 LKW Überfahrten aller Typen, verursachen, wobei wie auch bei Detailpunkt P3a die Achse 2 der Fahrzeuge mit der zugehörigen Achsart B diese Schäden verursachen.

#### A 5.4.6. Punkt P5

Punkt P5 befindet sich, wie Abbildung 184 zeigt, mittig zwischen den Querträgern an der Unterseite des Deckblechs im Abstand von 30 [mm] vom Hauptträger A entfernt.

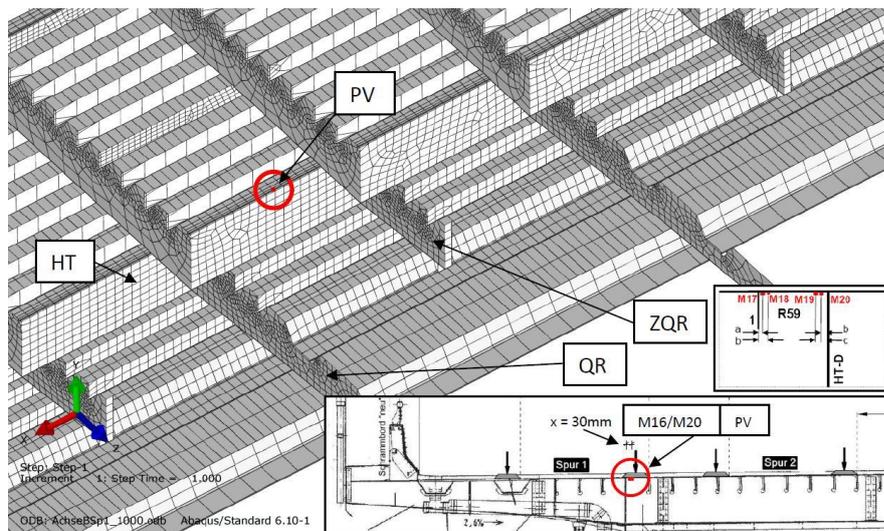


Abbildung 184: Darstellung Kerbdetail Punkt P5 (aus [3])

Auf eine Darstellung der Berechnung wurde in dieser Arbeit verzichtet, für genauere Informationen sei auf den Bericht der Restlebensdauerberechnung verwiesen.

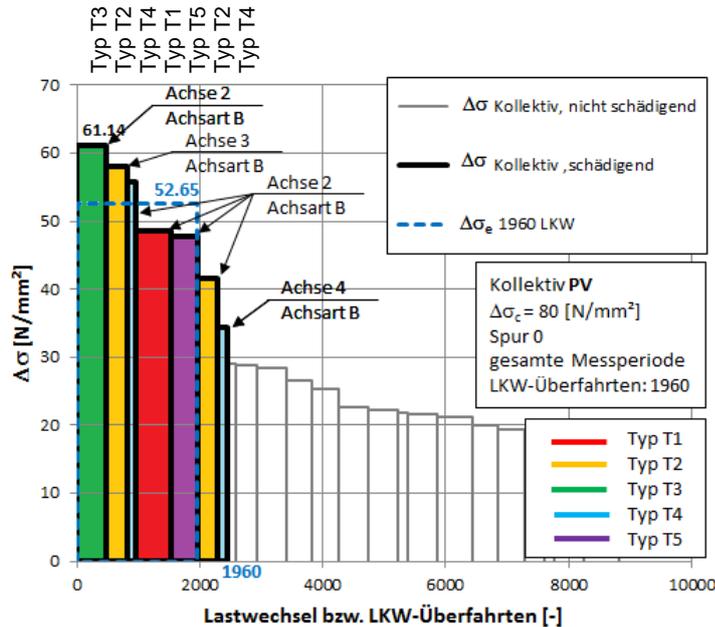


Abbildung 185: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P5

Abbildung 185 zeigt das ermittelte Lastkollektiv für Punkt P5, worin die Fahrzeugtypen farbig markiert sind, die eine Schädigung in diesem Detailpunkt hervorrufen. Das Belastungskollektiv bezieht sich für diesen Detailpunkt auf die Spur 1, daher bezieht sich der schadensäquivalente einwirkende Spannungswechsel auf eine Gesamtanzahl an LKW Überfahrten von 1960 LKW. Aus diesem Diagramm ist erkenntlich, dass alle fünf für die Berechnung angesetzt Fahrzeugtypen eine schädigende Wirkung auf den Detailpunkt P5 ausüben.

#### A 5.4.7. Punkt P7

Punkt P7 befindet sich in der Mitte zwischen zwei Querträgern an der Unterseite des Deckbleches im Abstand von 30 [mm] entfernt von Längsrippe 9.

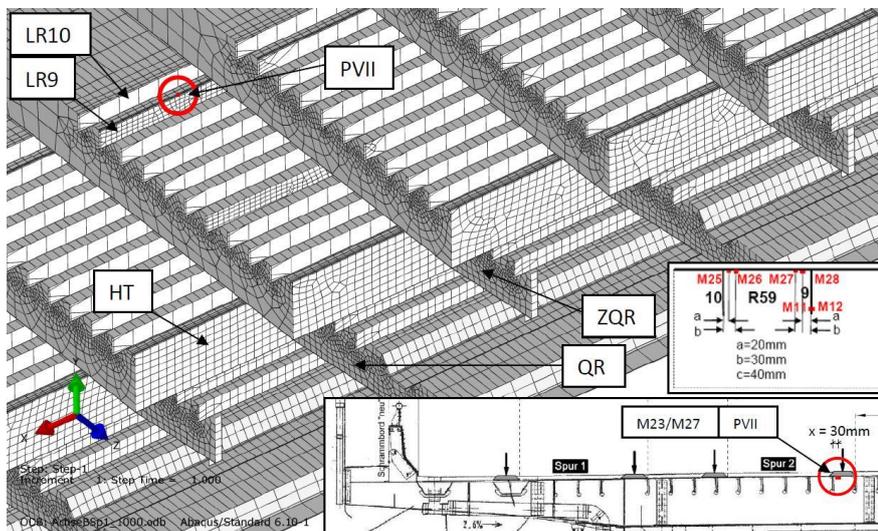


Abbildung 186: Darstellung Kerbdetail Punkt P7 (aus [3])

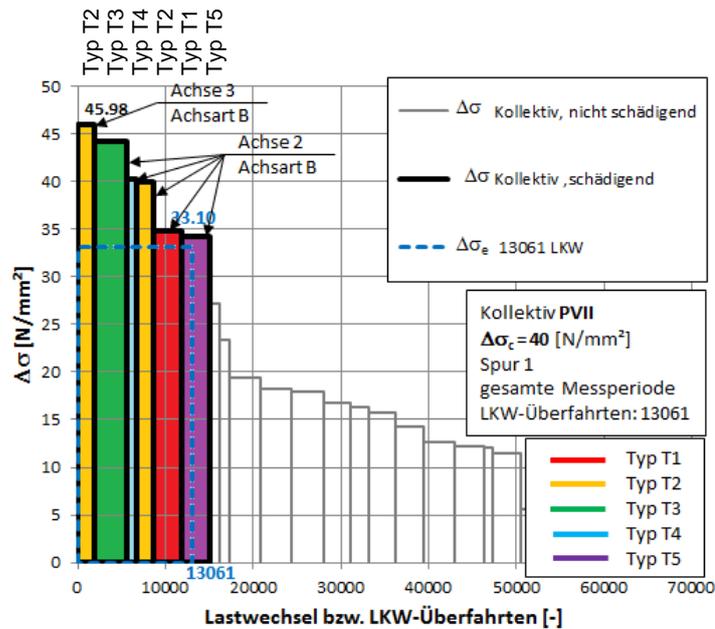


Abbildung 187: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P7

Abbildung 187 zeigt das ermittelte Lastkollektiv für Punkt P7, worin die Fahrzeugtypen farbig markiert sind, die eine Schädigung in diesem Detailpunkt hervorrufen.

Aus diesem Diagramm ist erkenntlich, dass alle fünf für die Berechnung angesetztten Fahrzeugtypen eine schädigende Wirkung auf den Detailpunkt P5 ausüben, wobei hauptsächlich die Achse 2 aller Fahrzeugtypen den maßgebenden Anteil der Schädigung ausübt. Achse 2 mit der zugehörigen Achsart B entspricht der Antriebsachse der Fahrzeuge und weist eine Doppelbereifung auf.

## A 5.5. Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen

In diesem Abschnitt wurden die Berechnungsergebnisse aus den Kapiteln A 5.2, A 5.3 und A 5.4 tabellarisch zusammengefasst, damit man eine bessere Übersicht über die schädigende Wirkung der einzelnen Fahrzeugtypen bekommt und so eventuell Fahrzeugtypen, die keine oder nur geringe Ermüdungsschädigung verursachen, ausschließen kann und somit die Führung eines Ermüdungsnachweises etwas an Umfang abnimmt.

### A 5.5.1. Punkte P1 bis P7

Zuerst wurde der Schädigungsanteil der einzelnen Achsen bzw. Fahrzeugtypen, als Prozentsatz der gesamten Ermüdungsschädigung (Anwendung der Palmgreen/Miner Schädigungshypothese unter Berücksichtigung der teilschädigenden Wirkung der Dauerfestigkeit) für die einzelnen untersuchten Detailpunkte P1, P2, P3a, P3b, P5 und P7 ermittelt. Die Ergebnisse zeigt die Tabelle 14. Einzelne Achsen bzw. Fahrzeugtypen weisen überhaupt keine Schädigungsanteile auf, da deren maximale Spannungsspiele  $\Delta\sigma_i$  unter dem Schädigungslimit  $\Delta\sigma_L$  liegen ( $\Delta\sigma_L \approx 0,55 \cdot \Delta\sigma_{\text{Dauerfestigkeit}}$  laut EN 1993-1-9 [2])

[%]	Typ T1		Typ T2			Typ T3					Typ T4				Typ T5				
Achse	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P3a	0	14	7	17	0	0	36	0	0	0	0	9	0	0	0	17	0	0	0
	14		24			36					9				17				
P3b	0	0	0	32	0	0	56	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0
	0		32			56					12				0				
P5	0	15	0	4	22	0	39	0	0	0	0	8	0	1	0	11	0	0	0
	15		26			39					9				11				
P7	0	10	0	12	24	0	37	0	0	0	0	7	0	0	0	9	0	0	0
	10		37			37					7				9				

Tabelle 14: Schädigungsanteile in [%] der einzelnen Achslasten bzw. Fahrzeugtypen für die untersuchten Detailpunkte

Die Aussage der Tabelle 14 ist jedoch beschränkt, da die Anteile der einzelnen Fahrzeugtypen differieren (vgl. Tabelle 13: Typenaufteilungsschlüssel), sodass die Schädigung von Fahrzeugtypen, die häufiger auftreten überschätzt wird. Daher erfolgte eine ergänzende zutreffende Schädigungsrechnung, in dem der Schädigungsanteil aus 1 Fahrzeugüberfahrt jedes Fahrzeugtyps errechnet wurde und dann auf die fiktive Überfahrt von 2 Mio. Fahrzeugen dieses Typs hochgerechnet wurde. Die Ergebnisse zeigt die Tabelle 15. Nun ist die Schädigungswirkung des einzelnen Fahrzeugtyps direkt erkennbar. Eine Schädigung von 100% für einen Fahrzeugtyp bedeutet, dass nach Überfahrt von 2 Mio. dieser Fahrzeuge die Ermüdungstragfähigkeit erreicht ist (100% Ausnutzung des Ermüdungsnachweises).

## Schädigungsanalyse einiger Kerbdetails

Ermüdungsschädigung [%] bei 2 Mio. Überfahrten jedes Typs alleine																			
	Typ T1		Typ T2			Typ T3					Typ T4				Typ T5				
Achse	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P3a	0	3	3	6	0	0	7	0	0	0	0	5	0	0	0	4	0	0	0
	3		9			7					5				4				
P3b	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	0		4			3					2				0				
P5	0	15	0	7	37	0	45	0	0	0	0	31	0	3	0	14	0	0	0
	15		44			45					34				14				
P7	0	3	0	6	12	0	10	0	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0
	3		18			10					6				3				

**Tabelle 15: Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen der Detailpunkte P1 bis P7**

### A 5.5.1. Punkte P1 bis P7, D1 und D2

Dieselbe Schädigungsberechnung wurde an den Detailpunkten D1 und D2 durchgeführt und Tabelle 15 wurde mit diesen Werten erweitert, sodass Tabelle 16 entstand.

Ermüdungsschädigung [%] bei 2 Mio. Überfahrten jedes Typs alleine																			
	Typ T1		Typ T2			Typ T3					Typ T4				Typ T5				
Achse	1	2	1	2	3	1	2	3	4	5	1	2	3	4	1	2	3	4	5
P1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0		0			0					0				0				
P3a	0	3	3	6	0	0	7	0	0	0	0	5	0	0	0	4	0	0	0
	3		9			7					5				4				
P3b	0	0	0	4	0	0	3	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0
	0		4			3					2				0				
P5	0	15	0	7	37	0	45	0	0	0	0	31	0	3	0	14	0	0	0
	15		44			45					34				14				
P7	0	3	0	6	12	0	10	0	0	0	0	6	0	0	0	3	0	0	0
	3		18			10					6				3				
D1	9	49	23	73	104	10	107	25	14	17	8	77	9	16	4	46	8	9	12
	58		200			173					110				79				
D2	0	0	0	6	6	0	0	0	7	7	0	0	0	0	0	0	0	2	2
	0		12			14					0				4				

**Tabelle 16: Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen der Detailpunkte P1 - P7, D1 & D2**

Da jeder Fahrzeugtyp an mindestens vier betrachteten Detailpunkten eine Schädigung hervorruft ist es nicht möglich einen dieser Typen auf Basis dieser Daten aus der Ermüdungsberechnung auszuschließen. Gut zu erkennen ist, dass die Achse 2 mit der Achsart B (Doppelbereifung) den größten Schädigungsanteil an allen betrachteten Detailpunkten verursacht, auch bedingt durch die hohe Achslast.

## A 6. Spannungsverläufe & Einflusslinien für Modell A (ohne Belag)

In diesem Abschnitt sind alle Berechnungsergebnisse aus den Simulationen an Modell A dargestellt.

### A 6.1. Detail D1

#### A 6.1.1. Spannungsverläufe entlang des Pfades 1

##### A 6.1.1.1. Achse B( $b_0$ ):

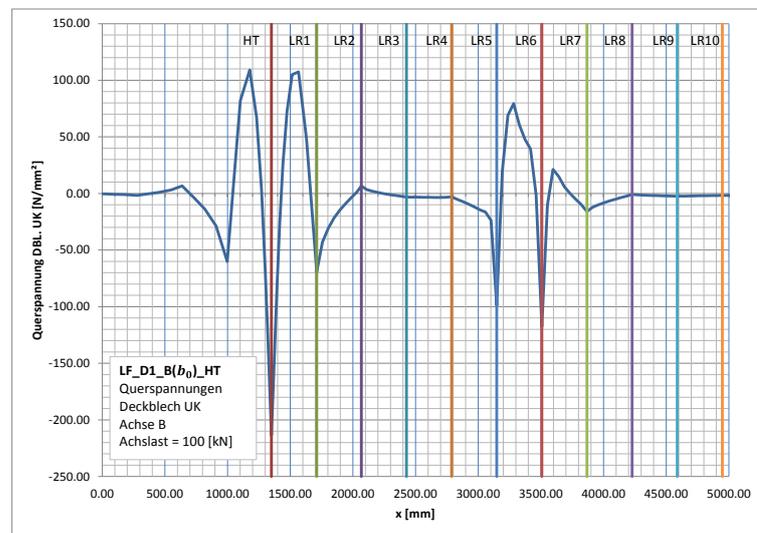


Abbildung 188: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_HT

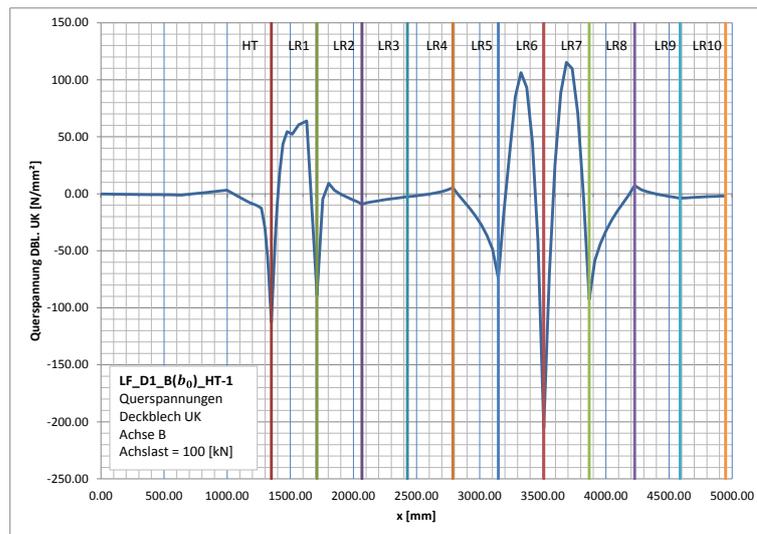


Abbildung 189: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_HT-1

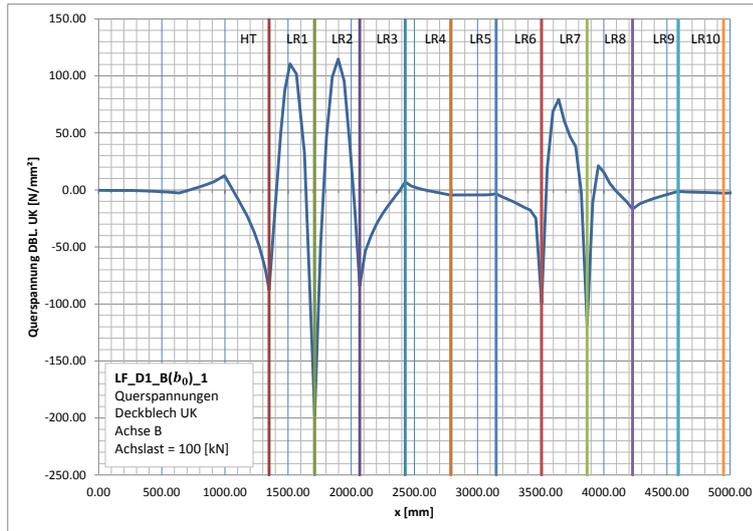


Abbildung 190: Spannungsverlauf LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_1

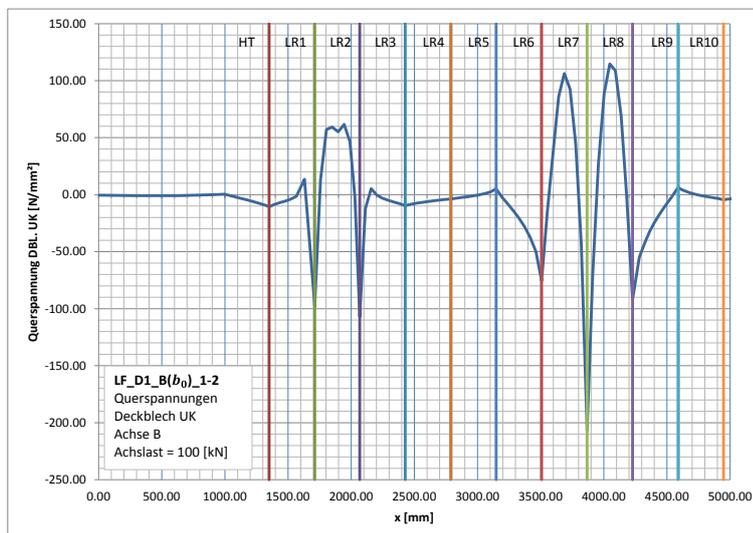


Abbildung 191: Spannungsverlauf LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_1-2

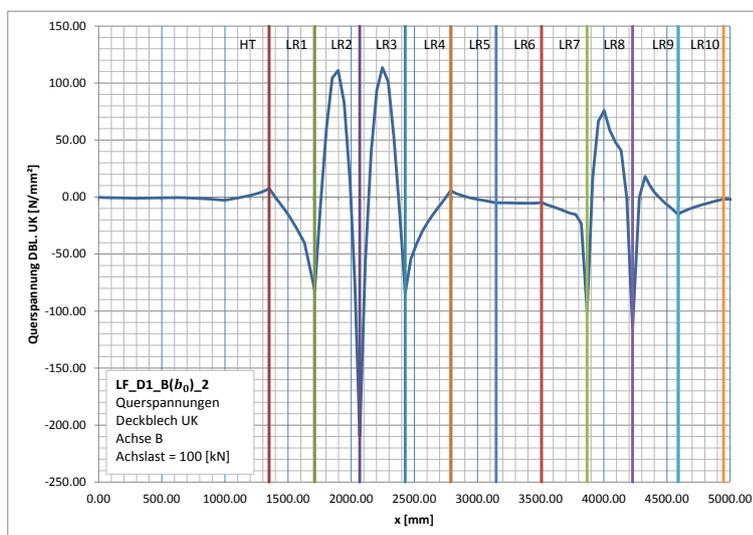


Abbildung 192: Spannungsverlauf LF\_D1\_B(b<sub>0</sub>)\_2

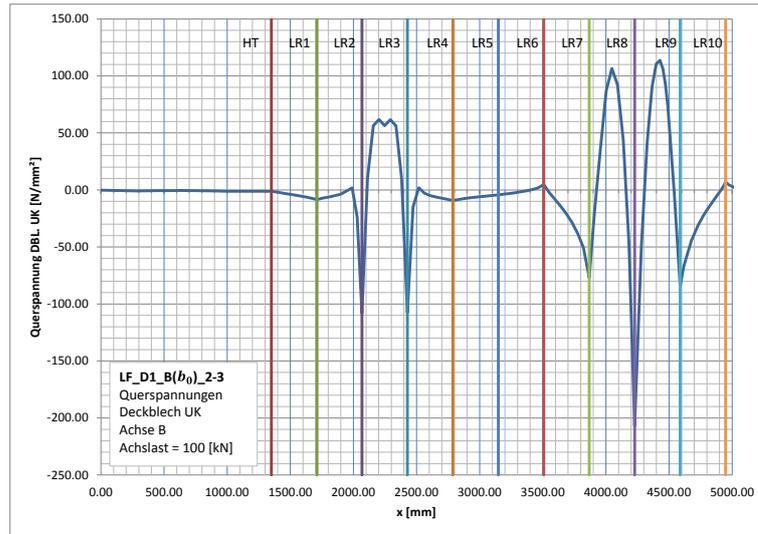


Abbildung 193: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_2-3

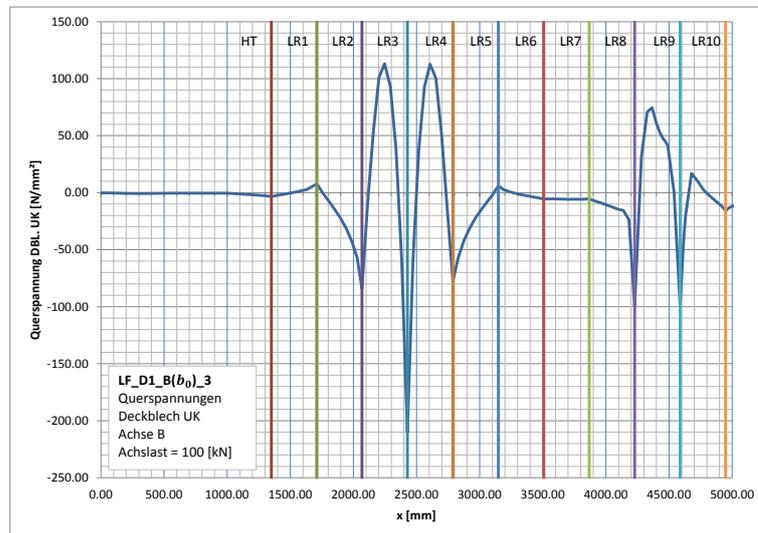


Abbildung 194: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_3

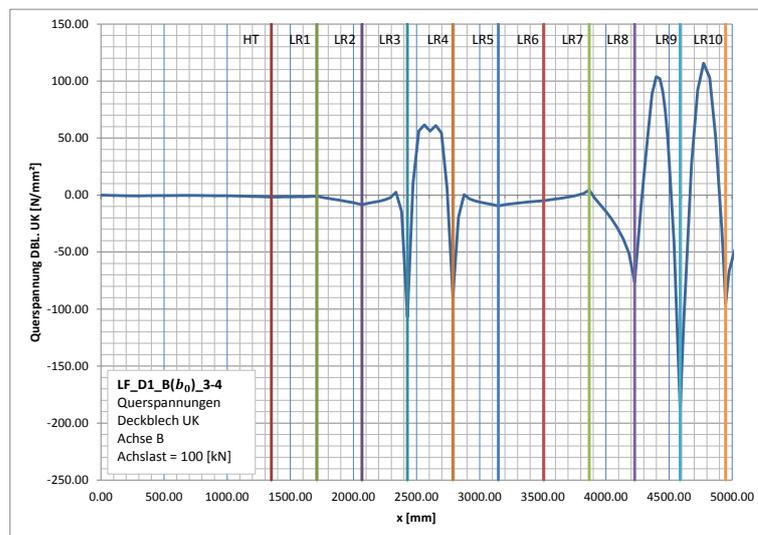


Abbildung 195: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_3-4

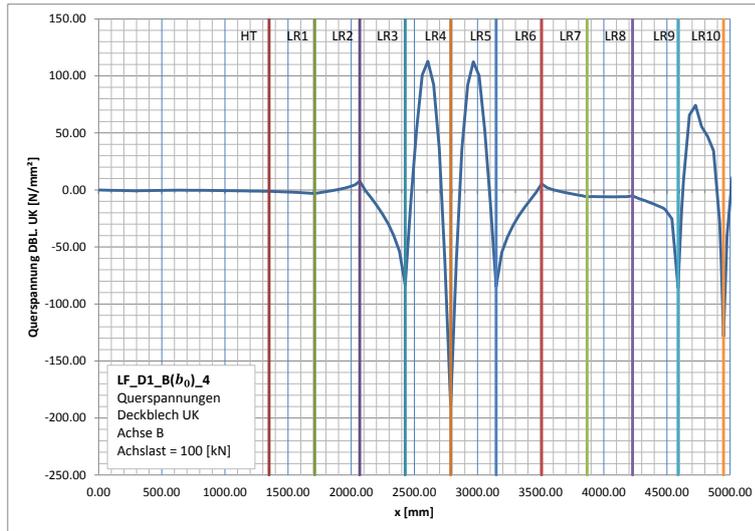


Abbildung 196: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_4

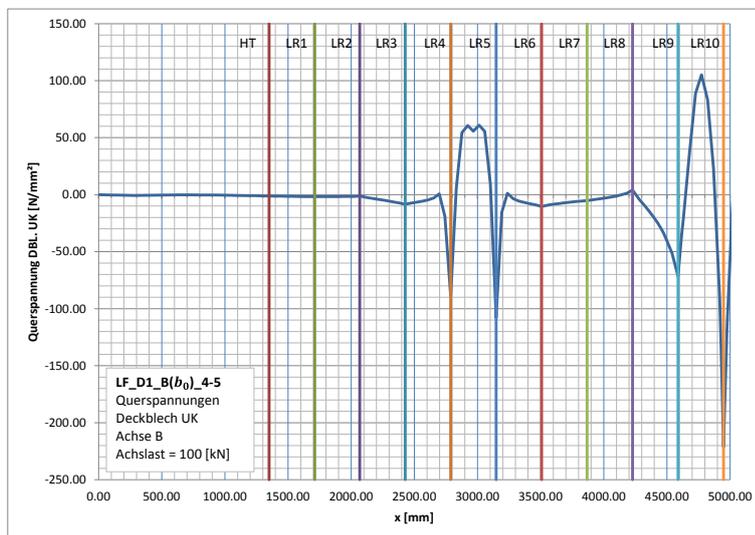


Abbildung 197: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_4-5

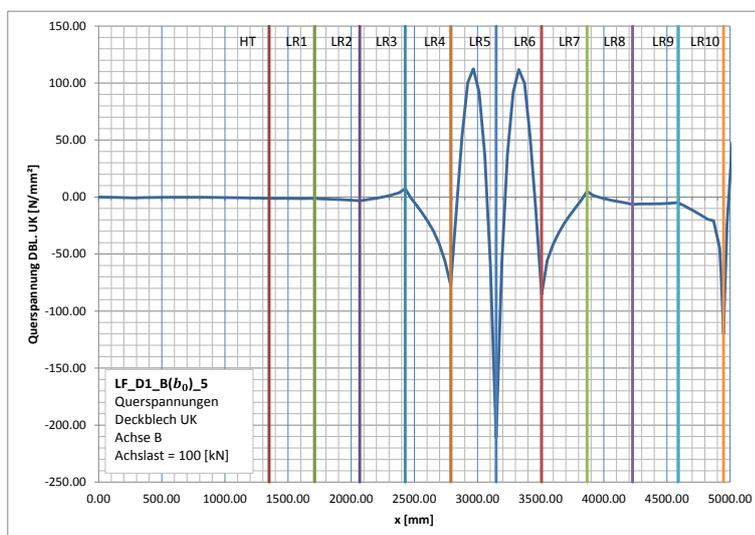


Abbildung 198: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_5

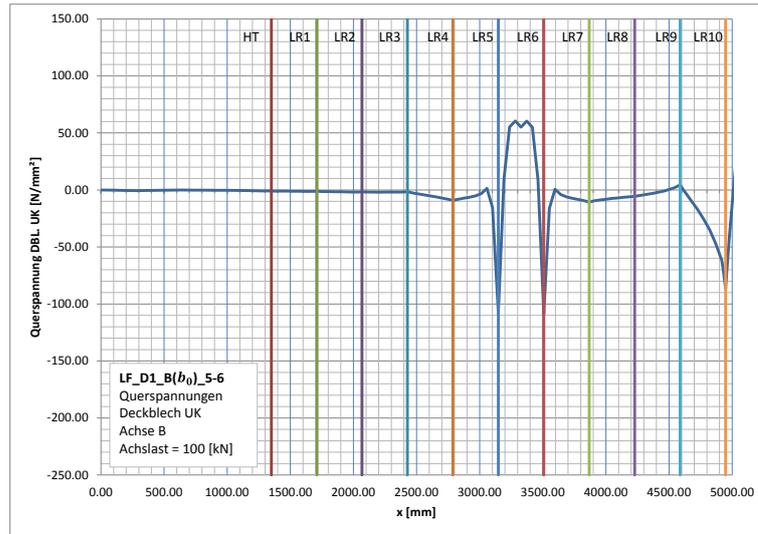


Abbildung 199: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_5-6

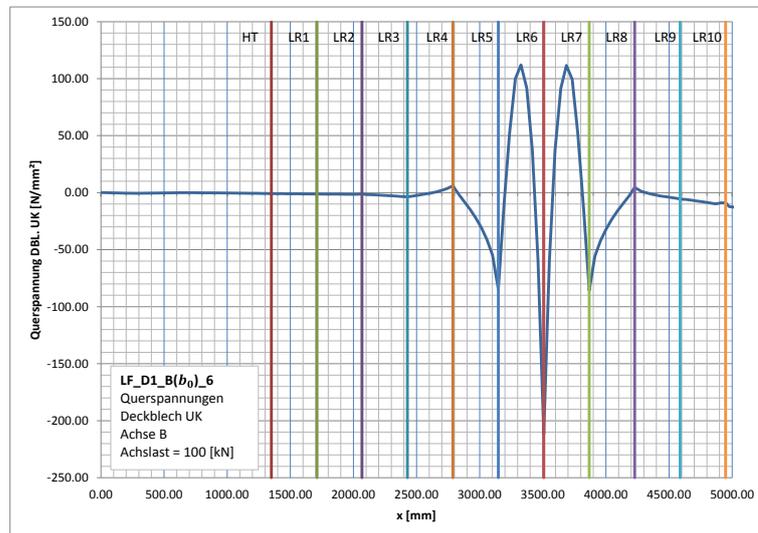


Abbildung 200: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_6

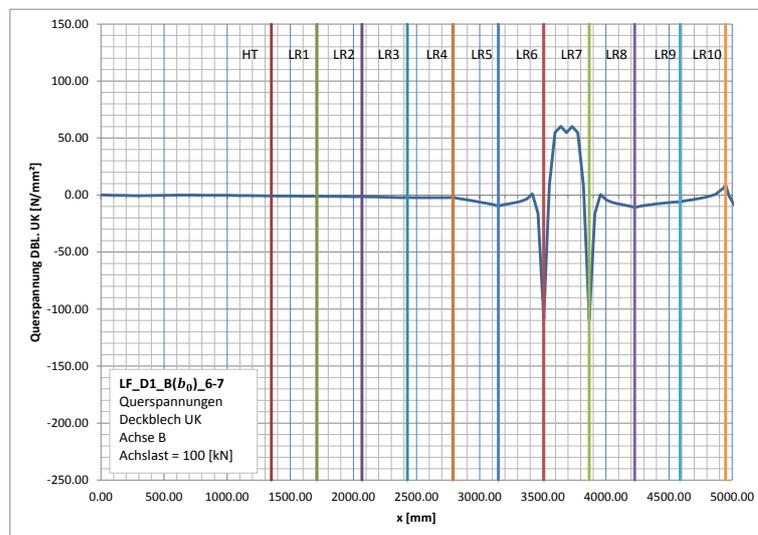


Abbildung 201: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_6-7

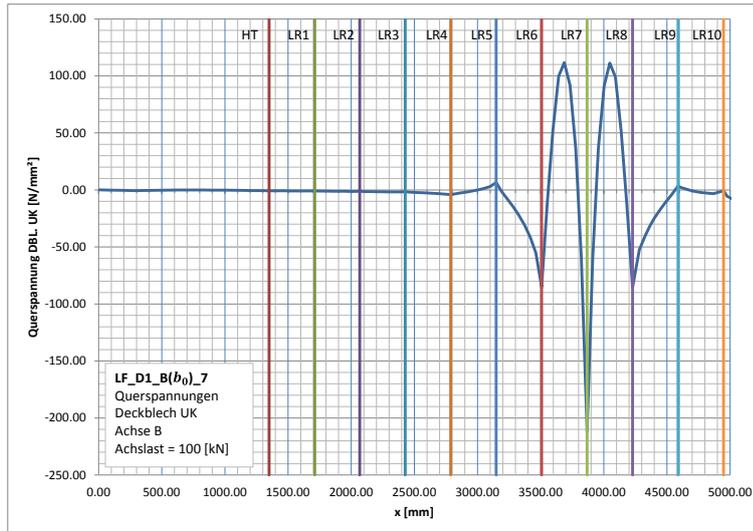


Abbildung 202: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_7

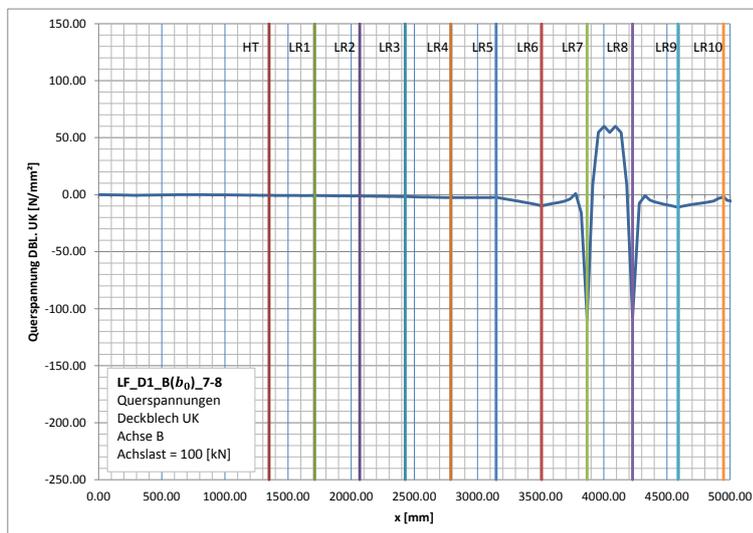


Abbildung 203: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_7-8

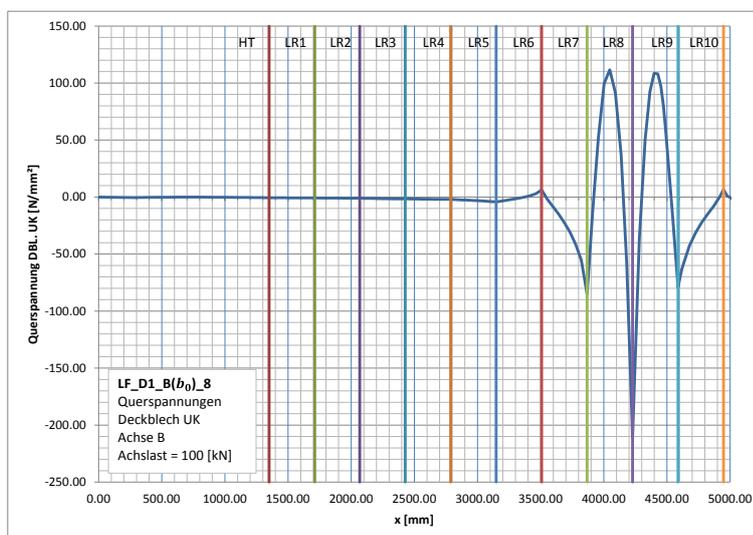


Abbildung 204: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_8

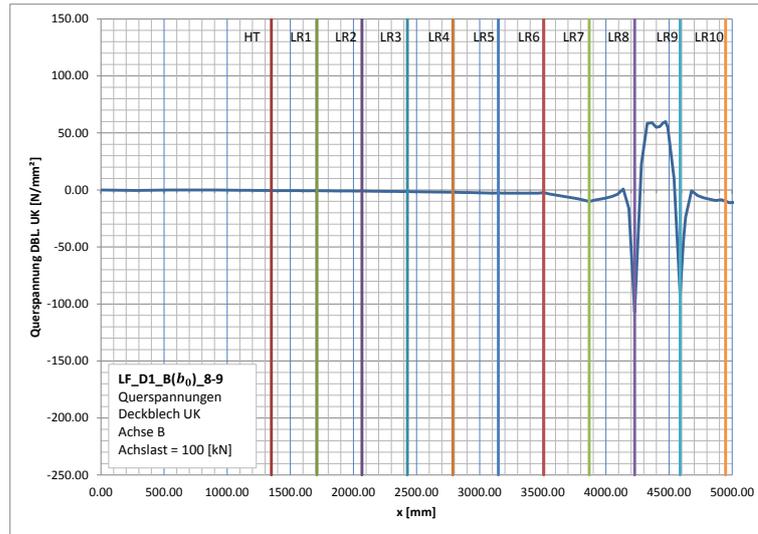


Abbildung 205: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_8-9

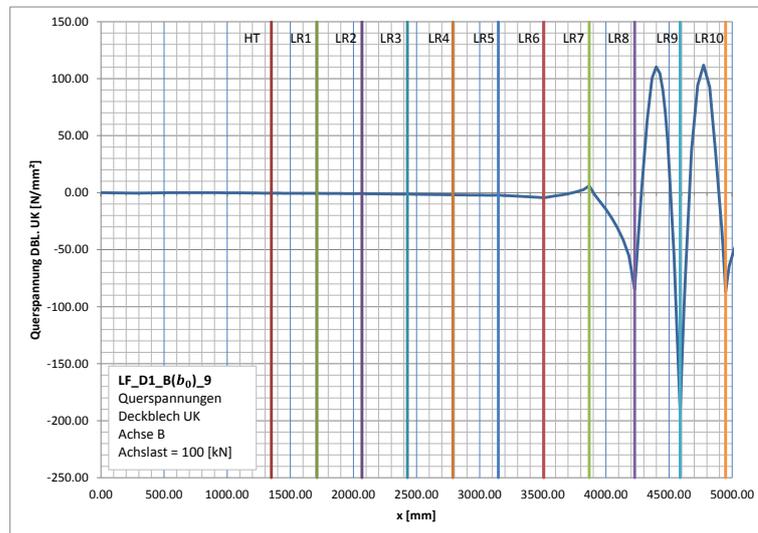


Abbildung 206: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_9

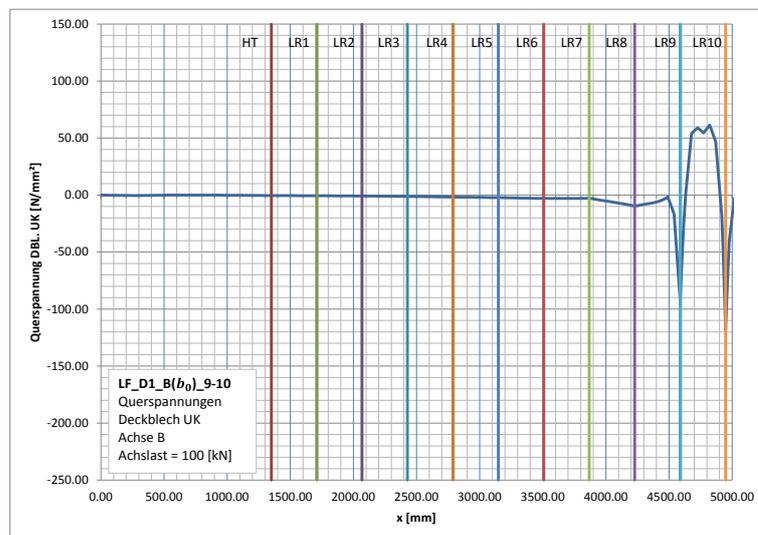


Abbildung 207: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_9-10

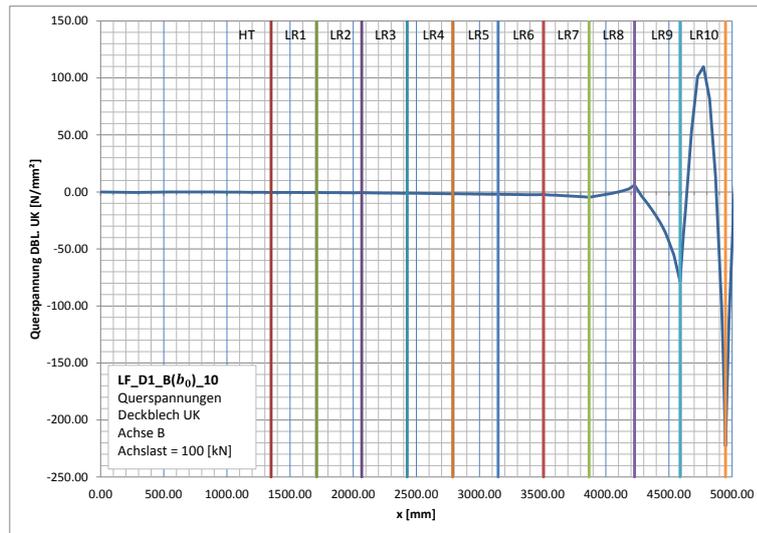


Abbildung 208: Spannungsverlauf LF\_D1\_B( $b_0$ )\_10

A 6.1.1.2. Achse B(b)

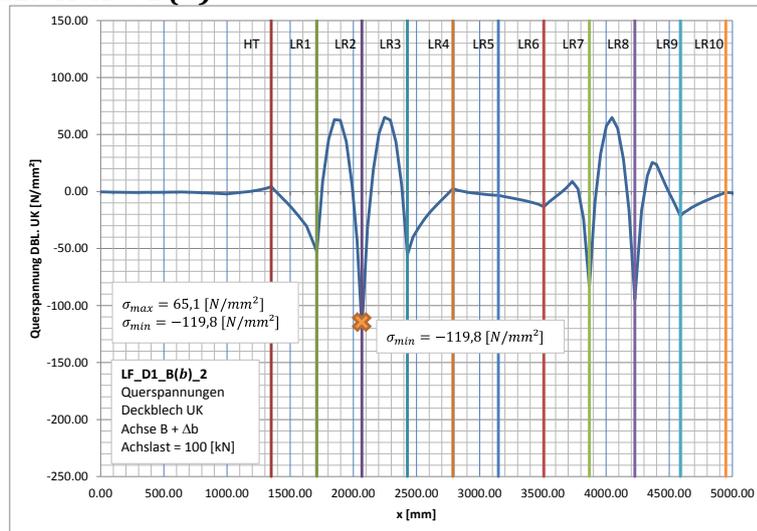


Abbildung 209: Spannungsverlauf LF\_D1\_B(b)\_2

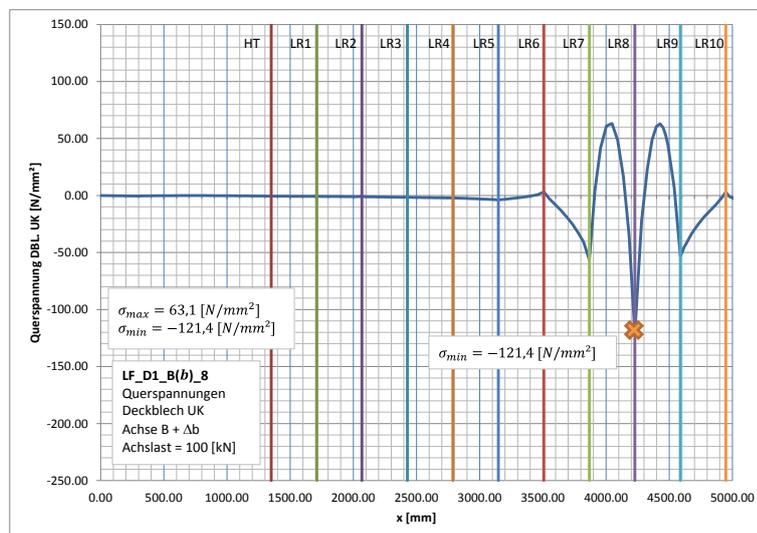
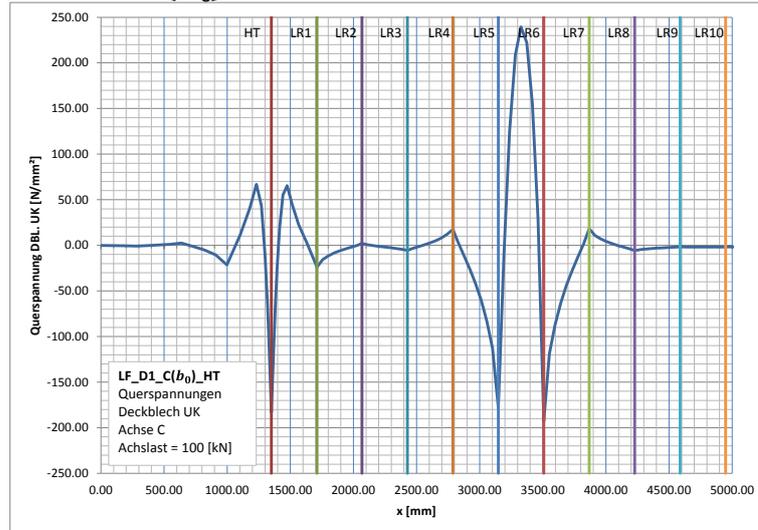
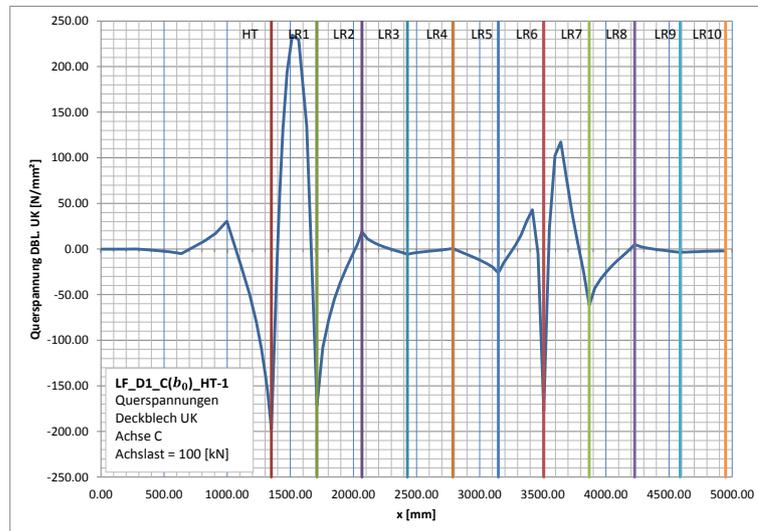


Abbildung 210: Spannungsverlauf LF\_D1\_B(b)\_8

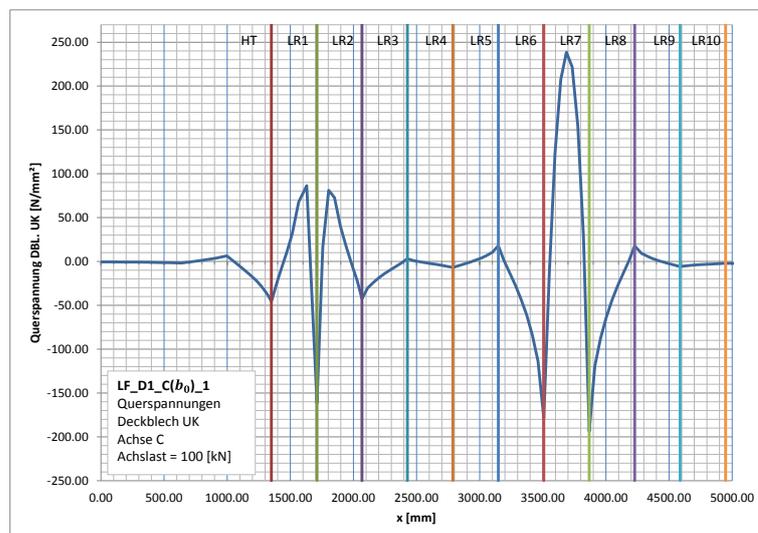
**A 6.1.1.3. Achse C( $b_0$ ):**



**Abbildung 211: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_HT**



**Abbildung 212: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_HT-1**



**Abbildung 213: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_1**

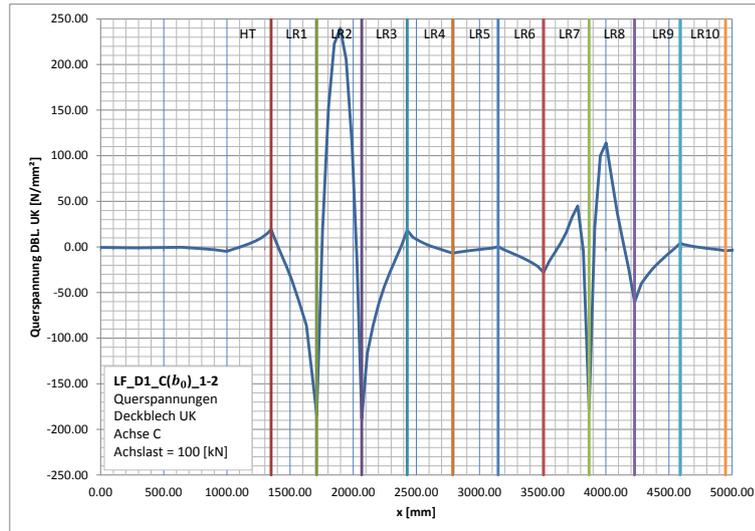


Abbildung 214: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_1-2

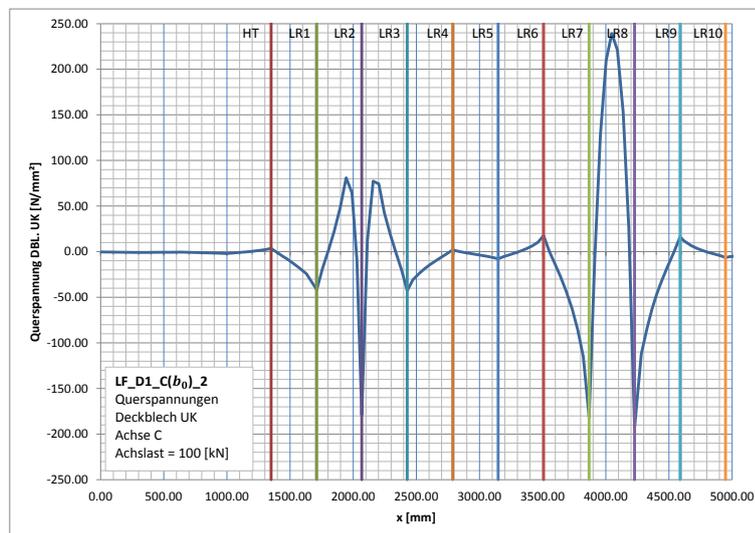


Abbildung 215: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_2

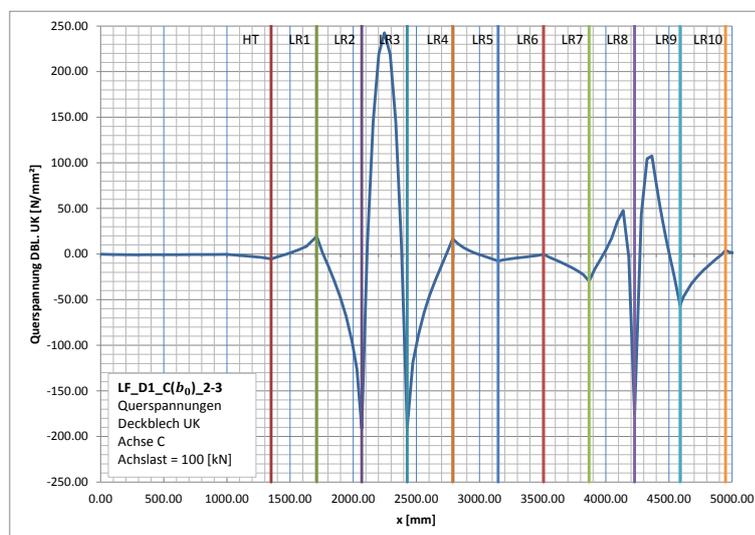


Abbildung 216: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_2-3

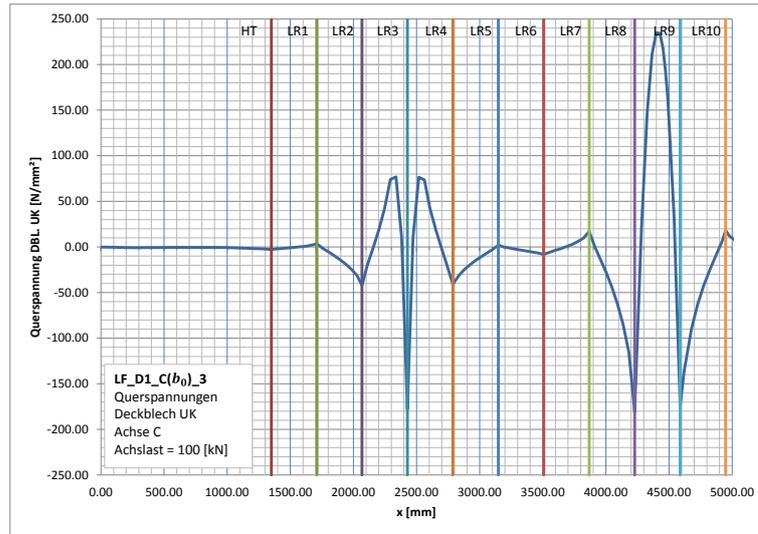


Abbildung 217: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_3

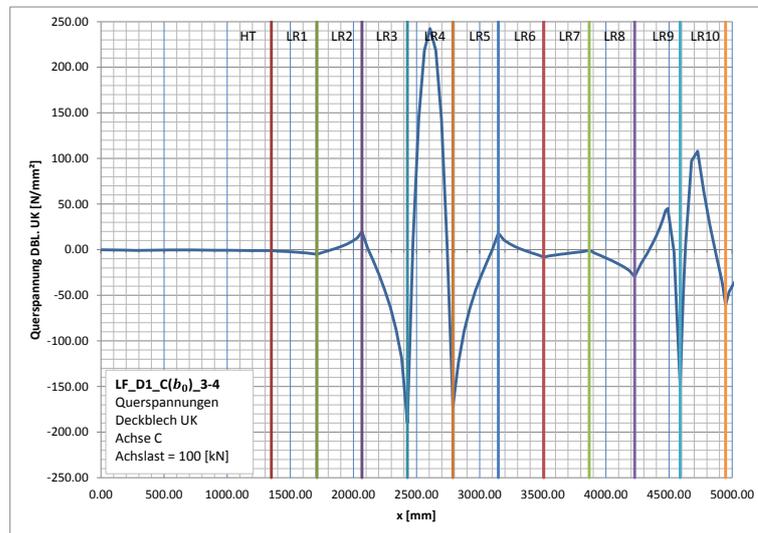


Abbildung 218: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_3-4

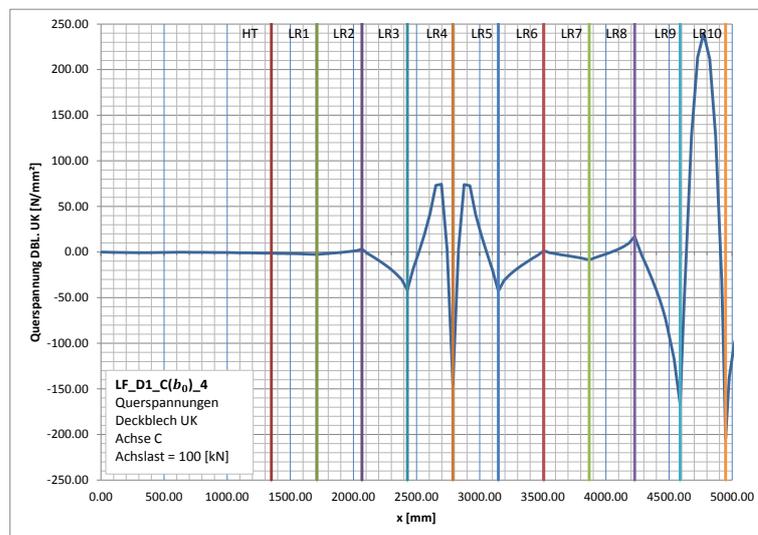


Abbildung 219: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_4

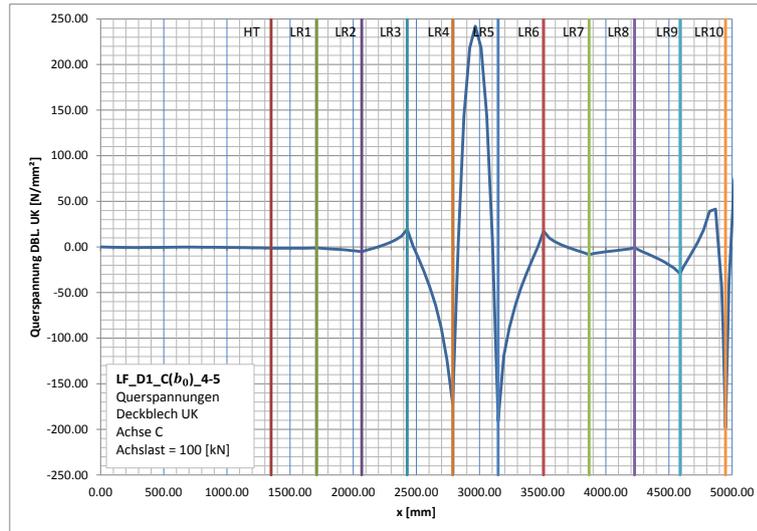


Abbildung 220: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_4-5

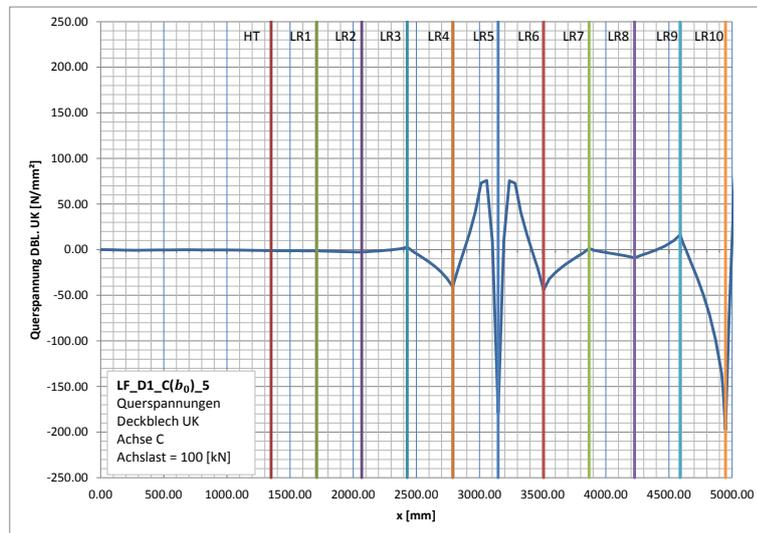


Abbildung 221: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_5

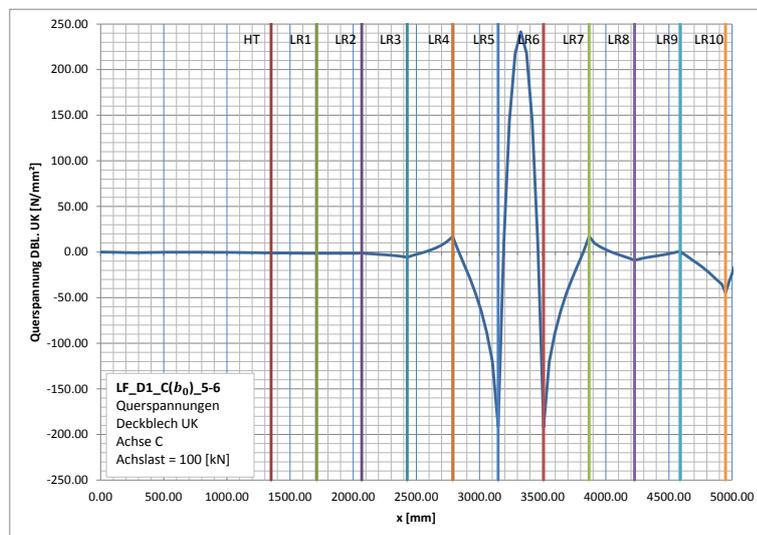


Abbildung 222: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_5-6

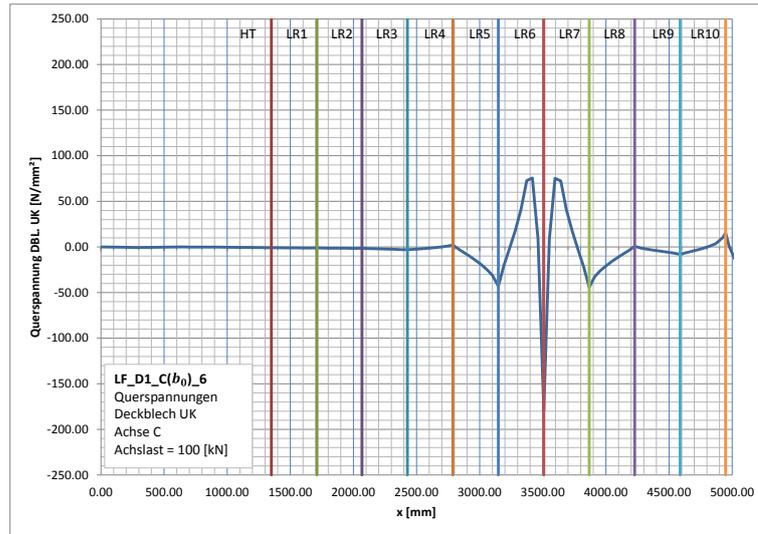


Abbildung 223: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_6

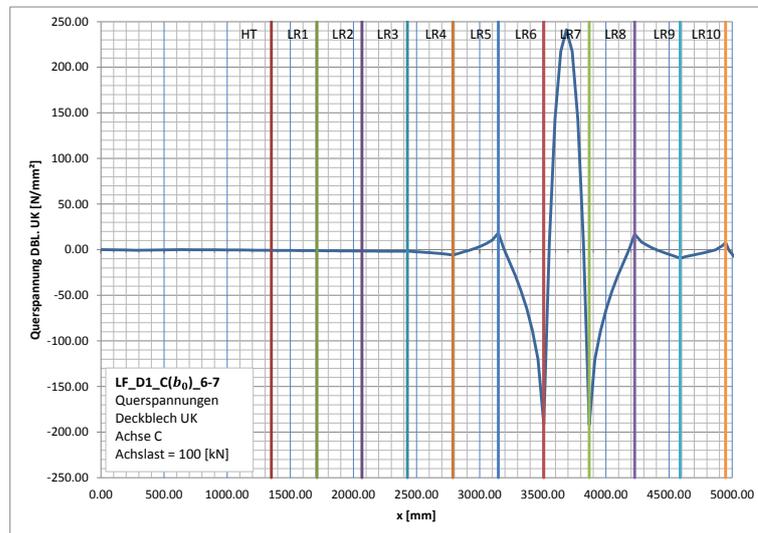


Abbildung 224: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_6-7

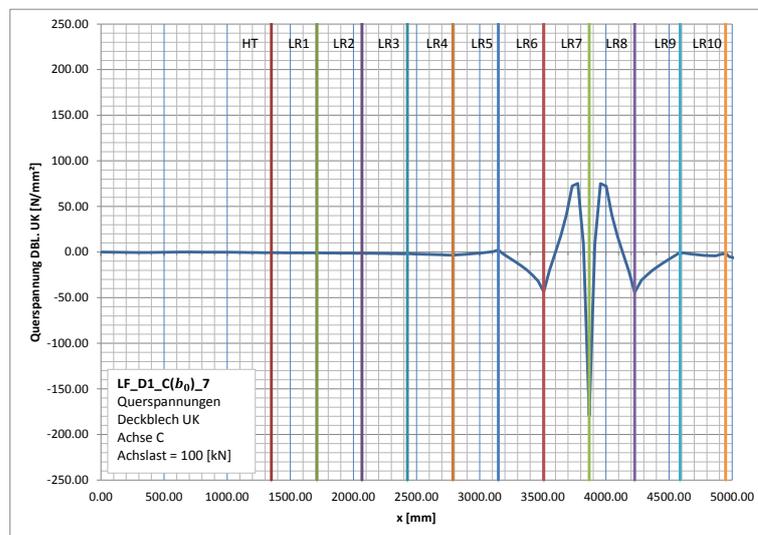


Abbildung 225: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_7

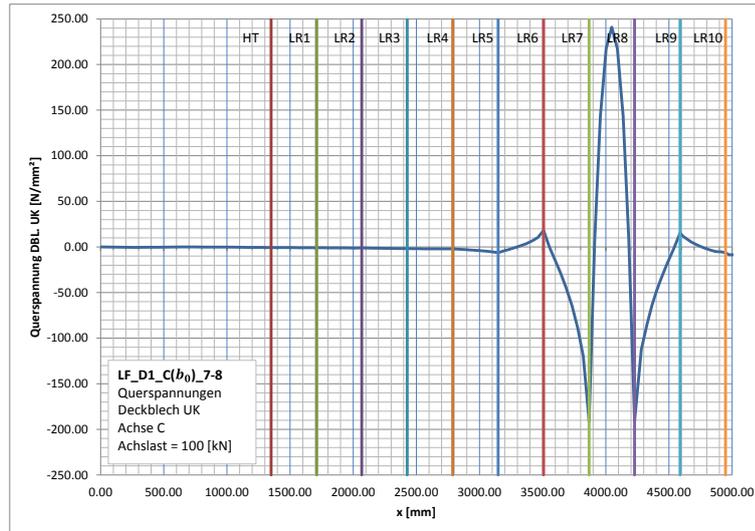


Abbildung 226: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_7-8

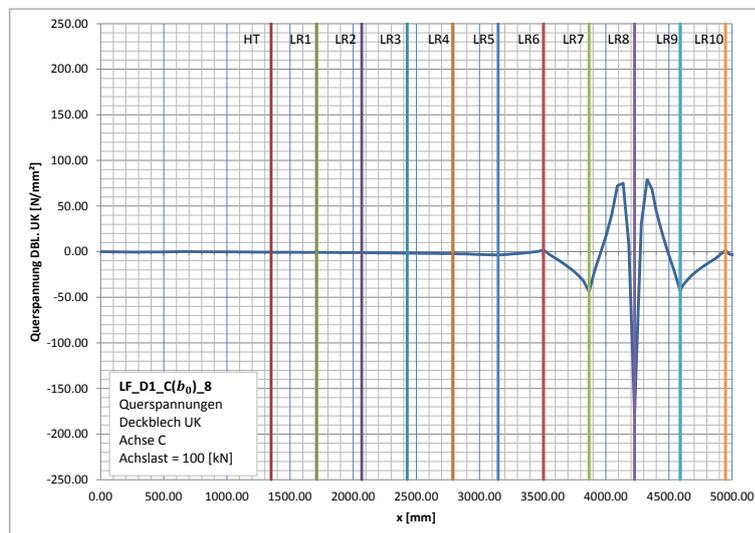


Abbildung 227: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_8

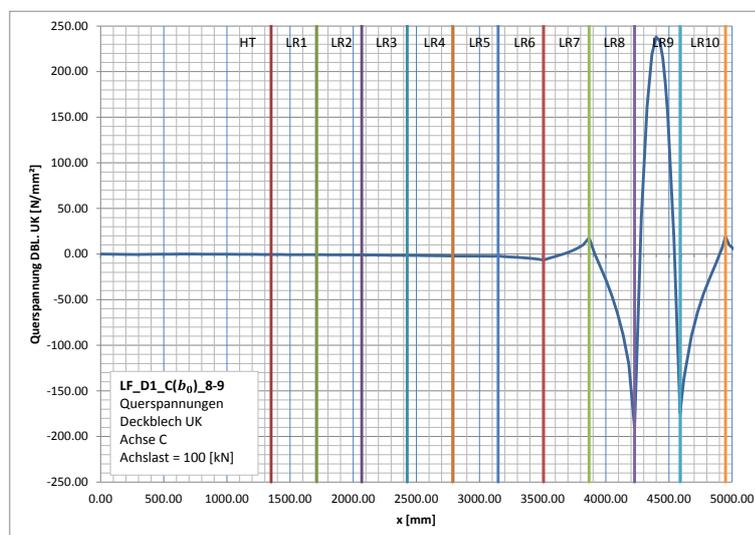


Abbildung 228: Spannungsverlauf LF\_D1\_C( $b_0$ )\_8-9

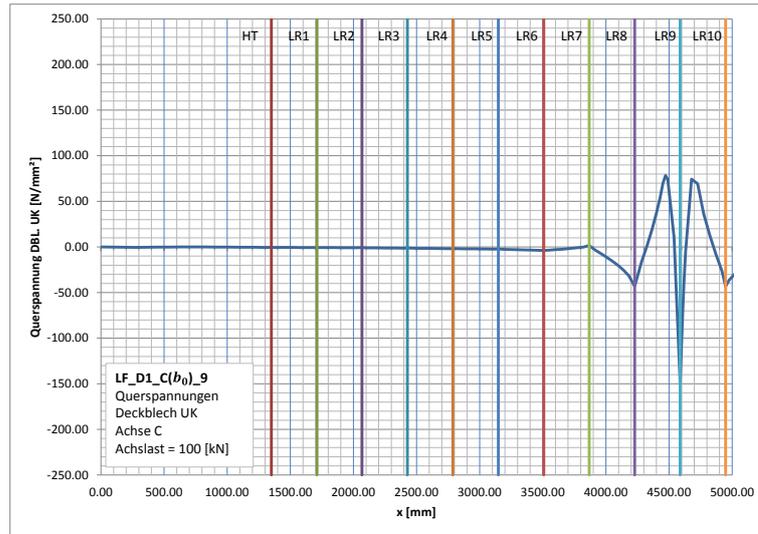


Abbildung 229: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_9

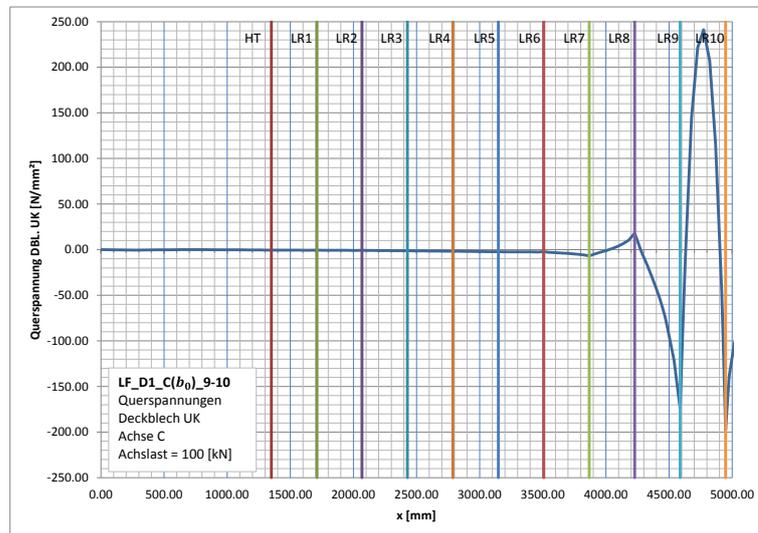


Abbildung 230: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_9-10

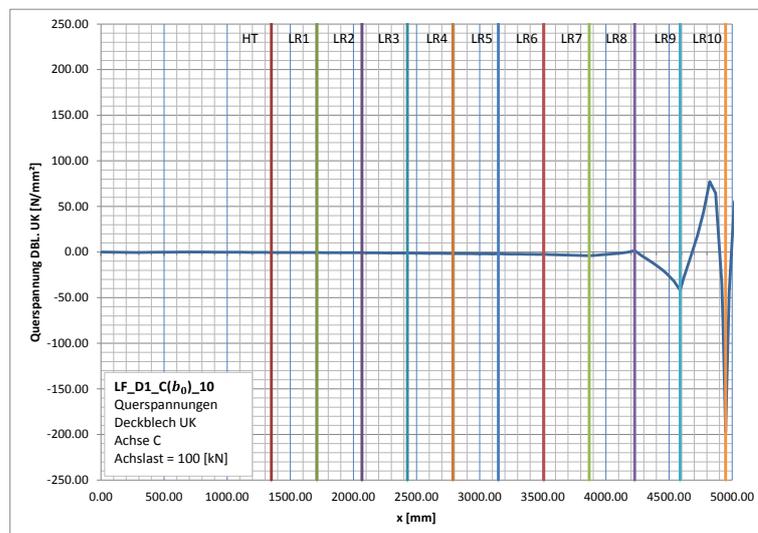
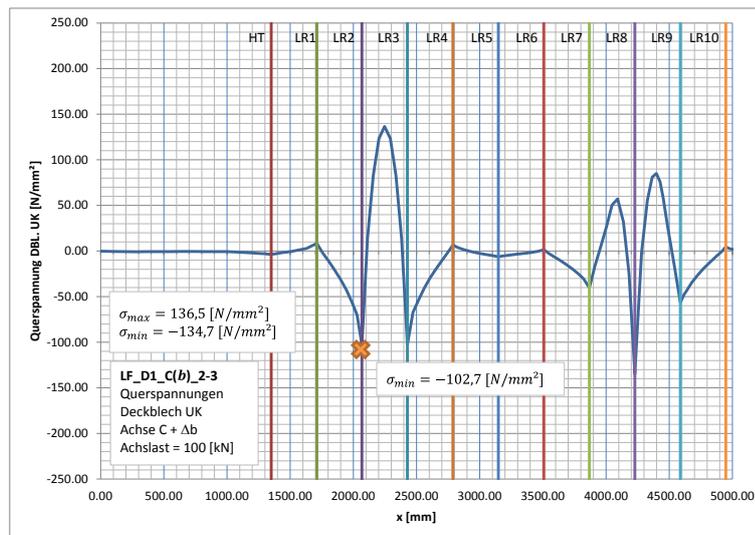
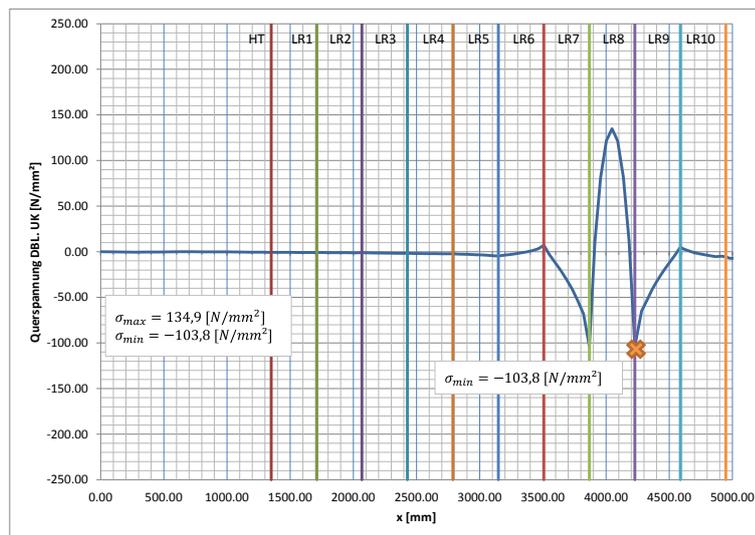


Abbildung 231: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_10

**A 6.1.1.4. Achse C(b)**



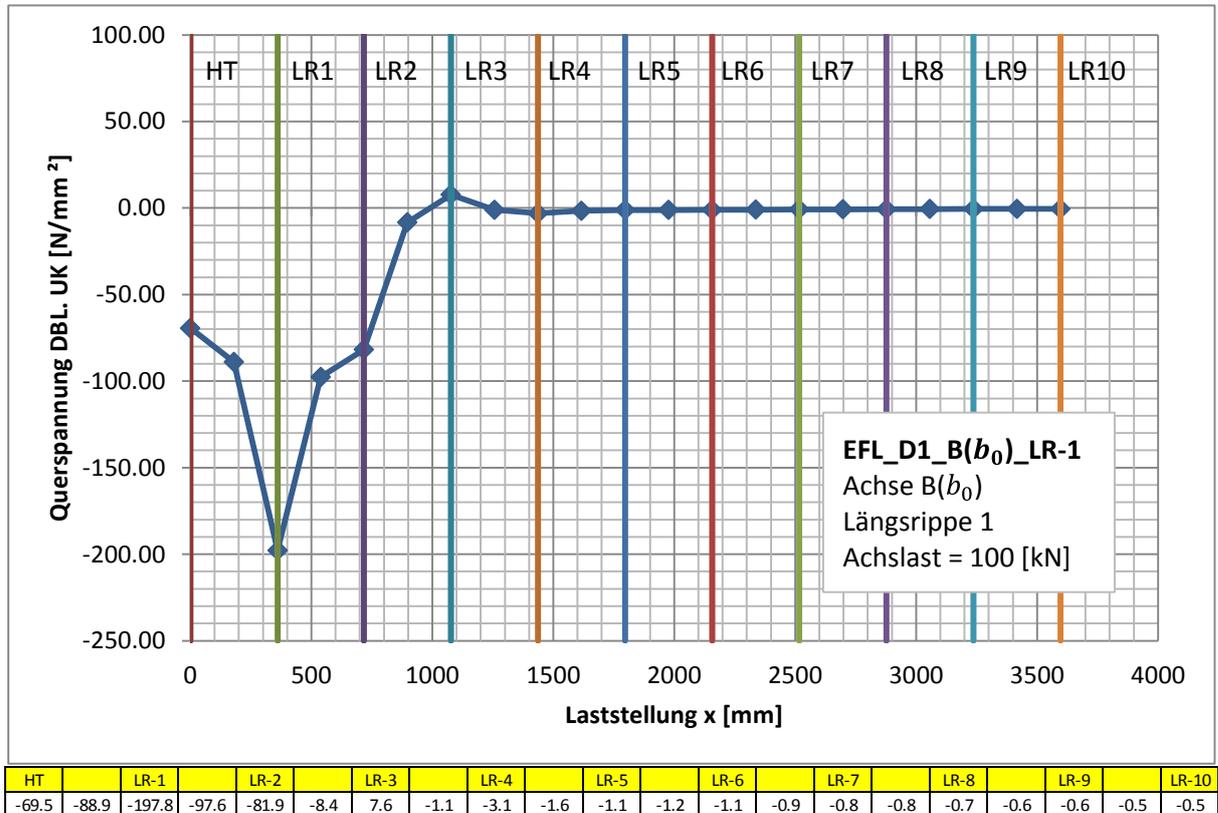
**Abbildung 232: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b)\_2-3**



**Abbildung 233: Spannungsverlauf LF\_D1\_C(b)\_7-8**

**A 6.1.2. Einflusslinien**

**A 6.1.2.1. Achse B( $b_0$ ):**



**Abbildung 234: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-1**

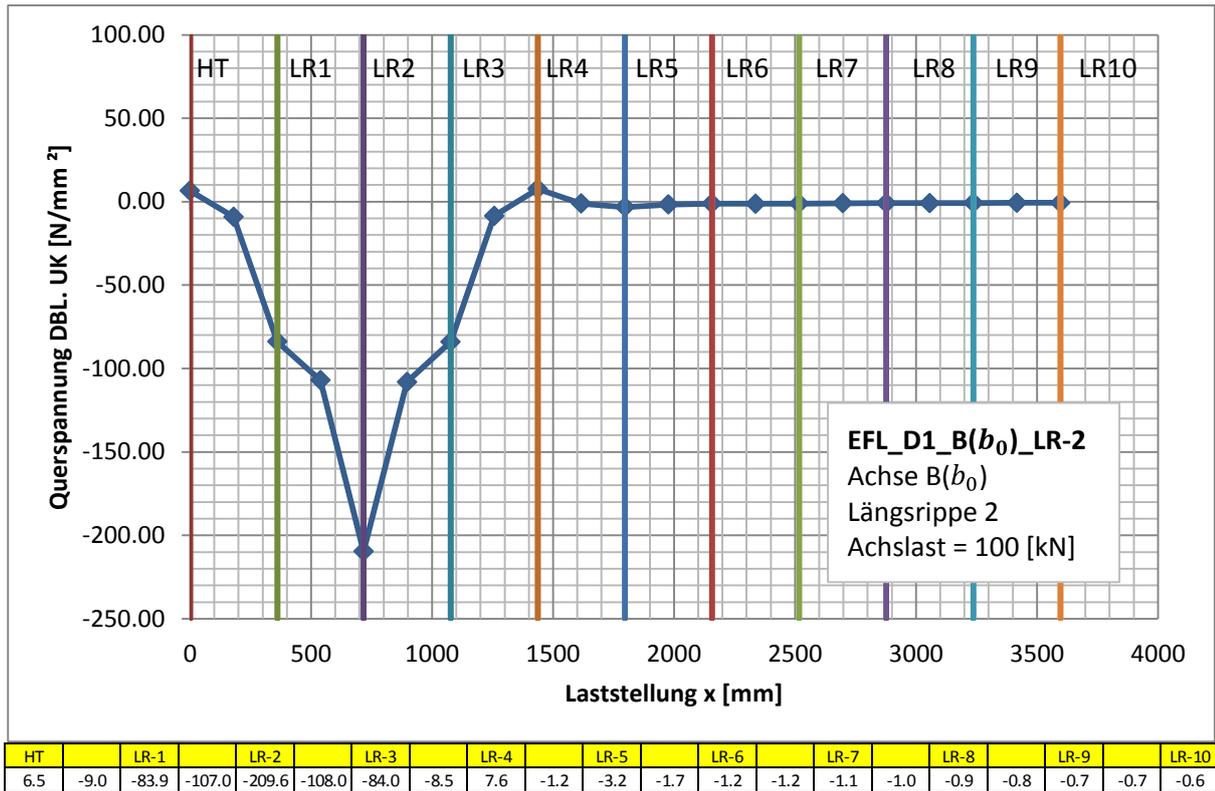


Abbildung 235: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-2

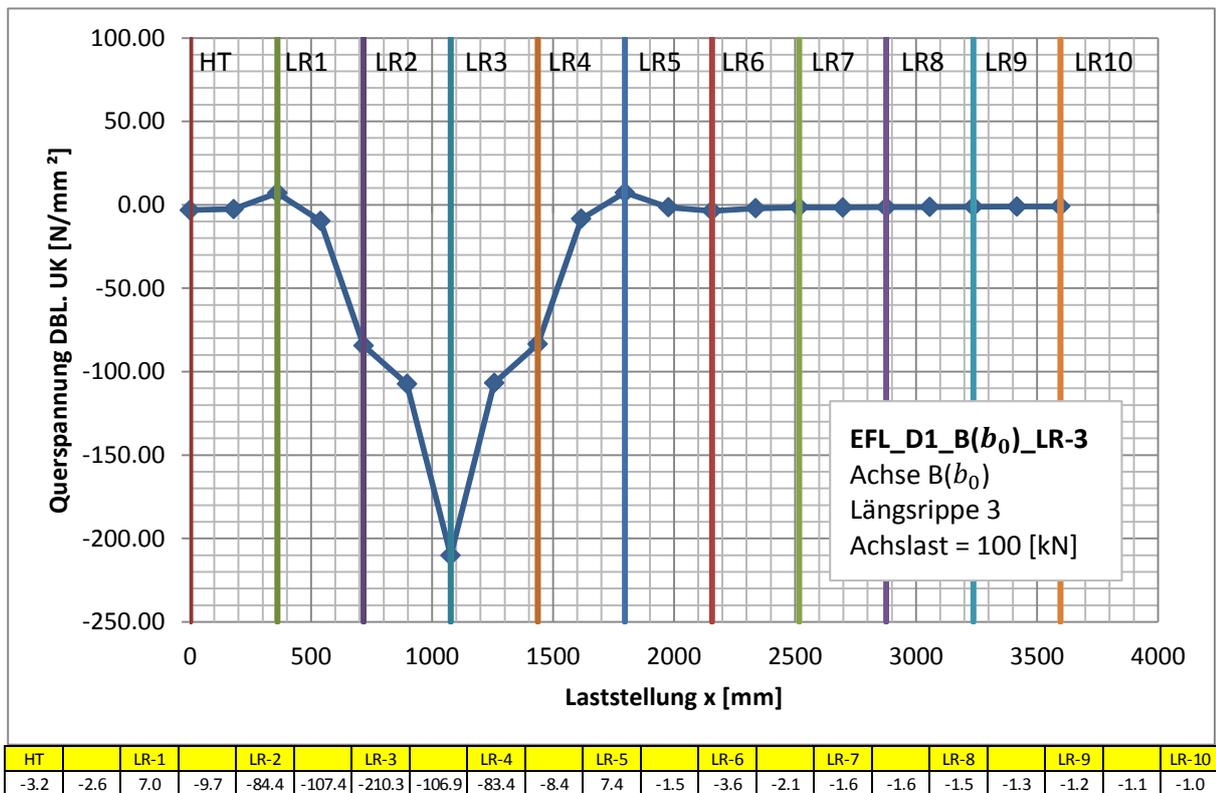


Abbildung 236: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-3

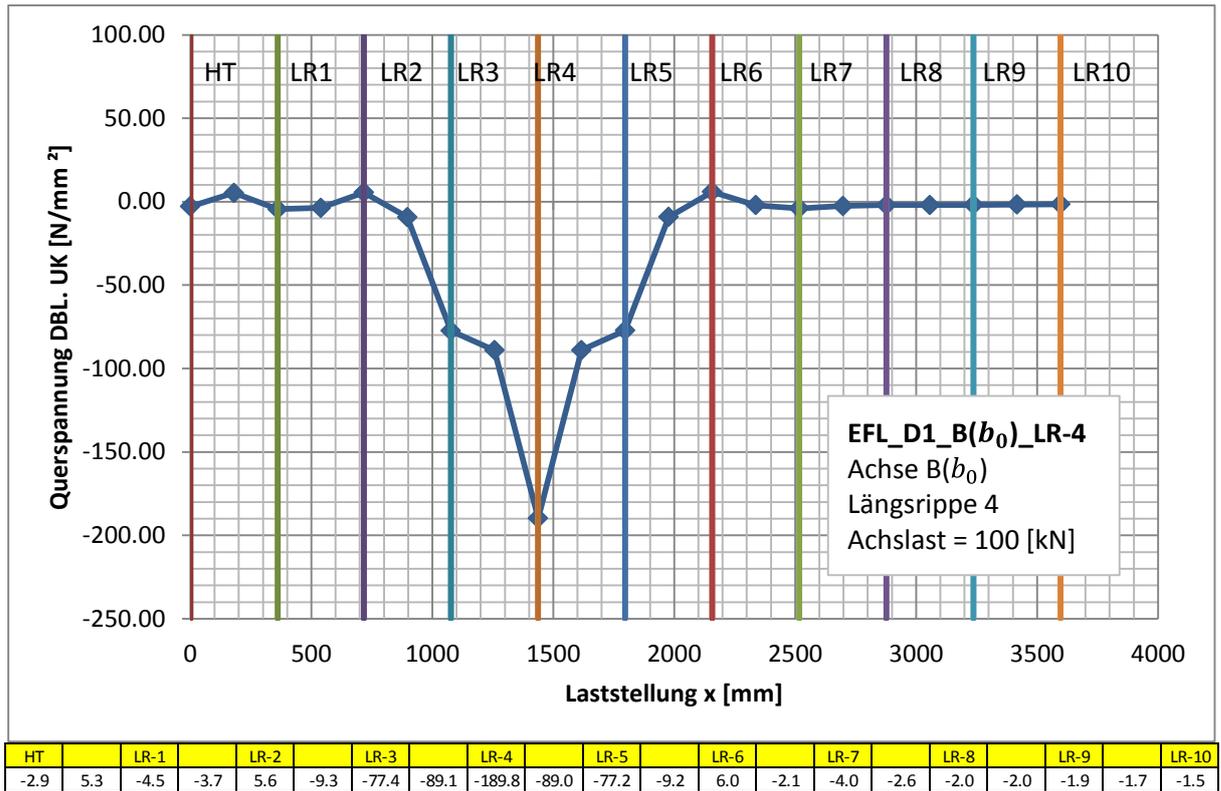


Abbildung 237: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-4

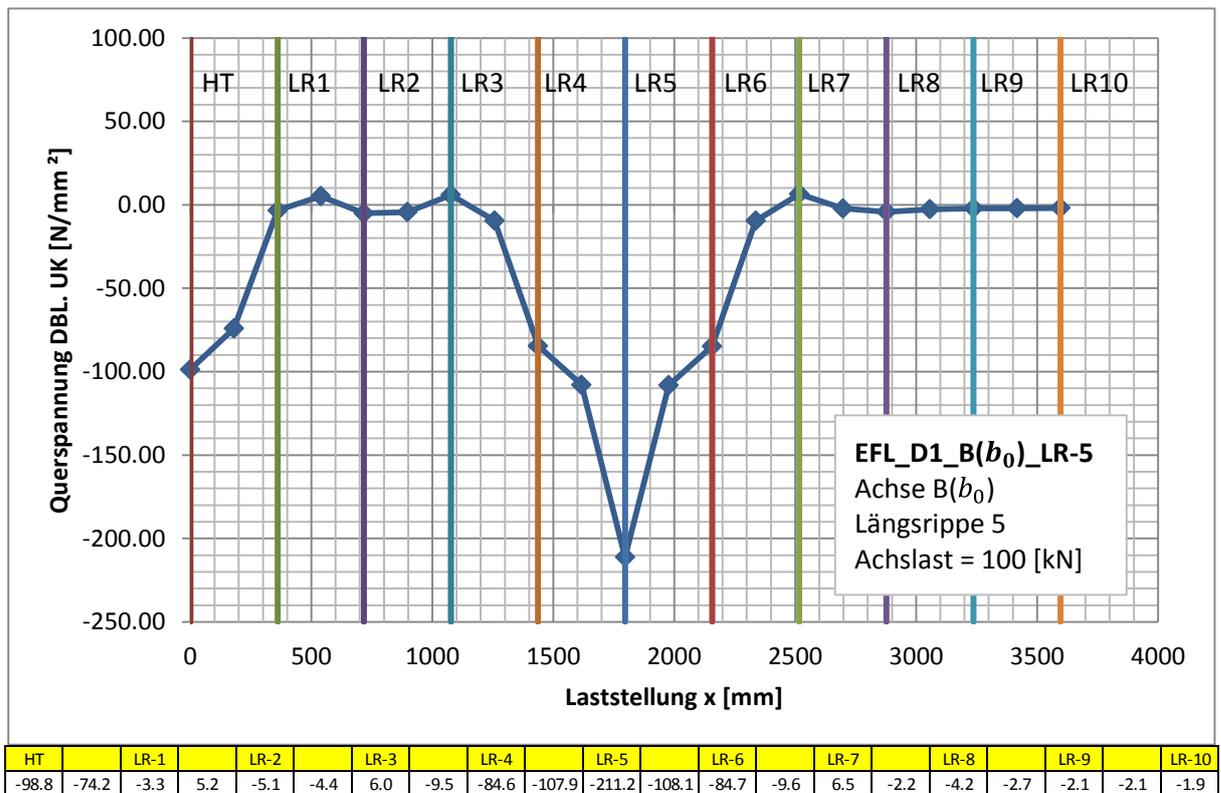


Abbildung 238: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-5

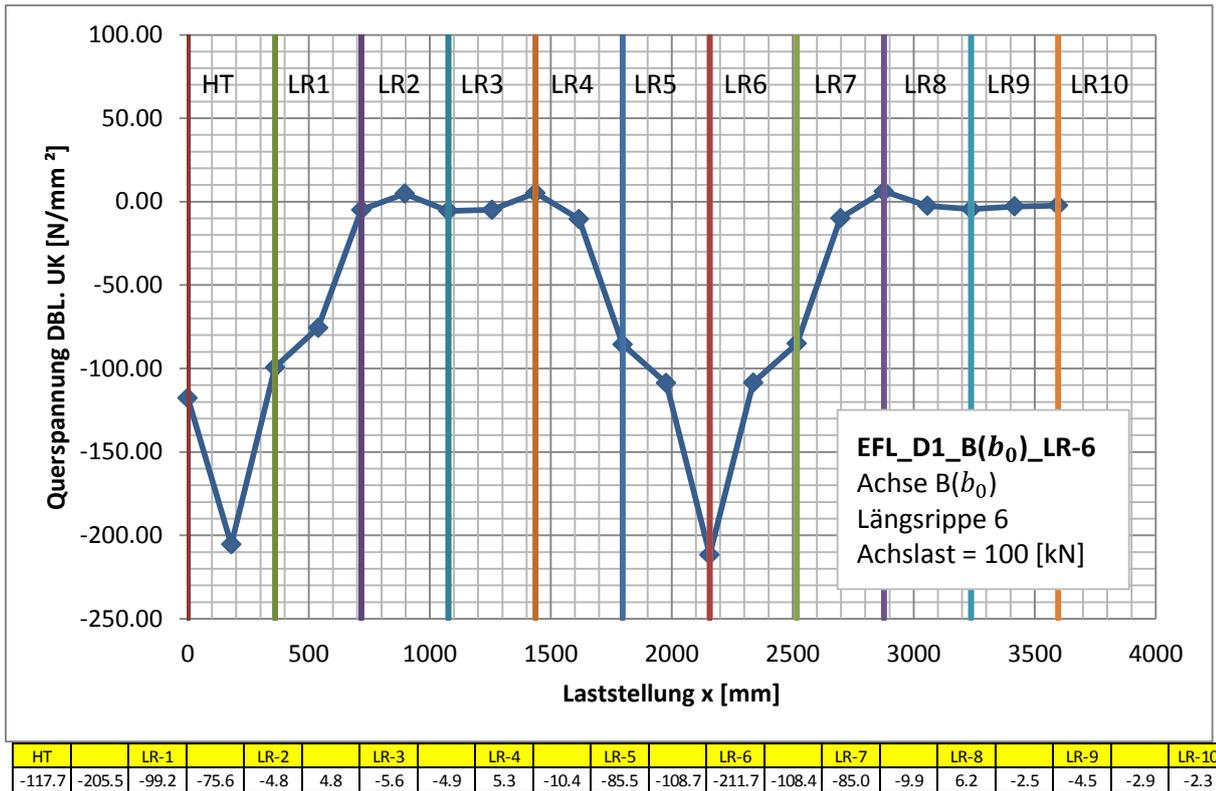


Abbildung 239: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-6

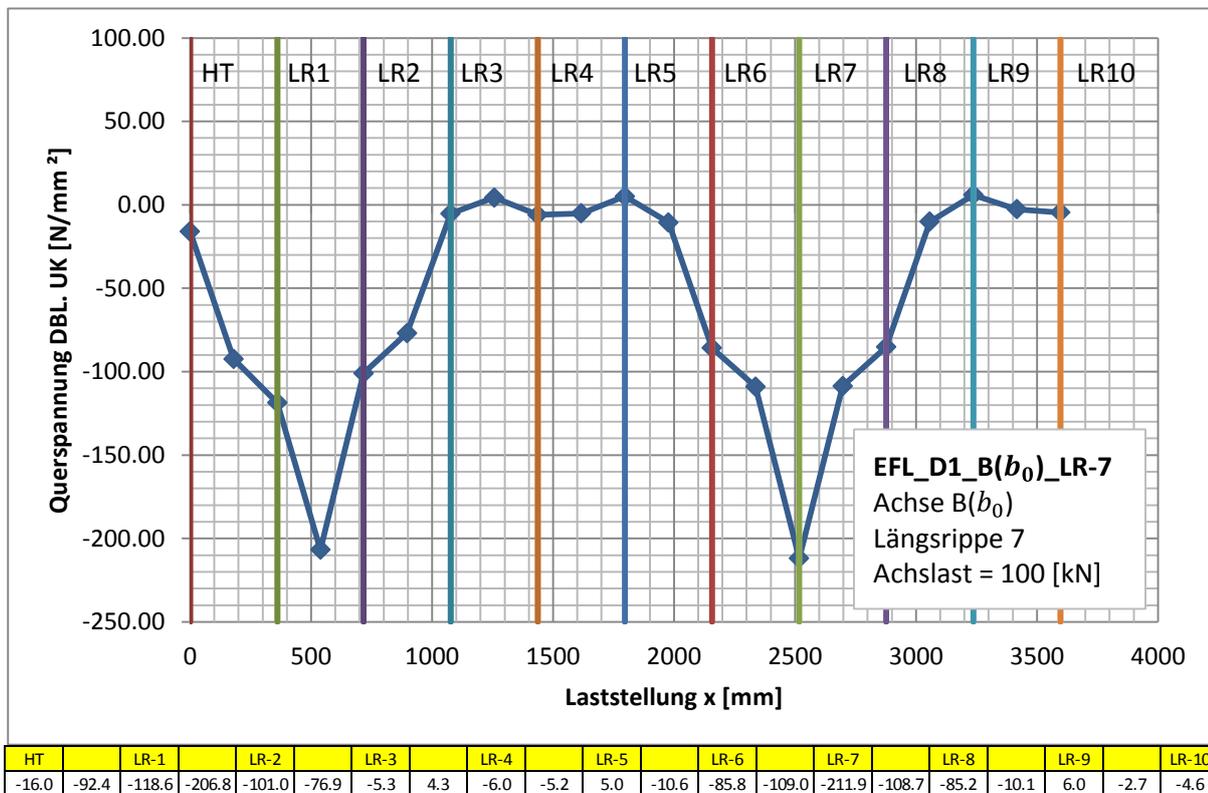


Abbildung 240: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-7

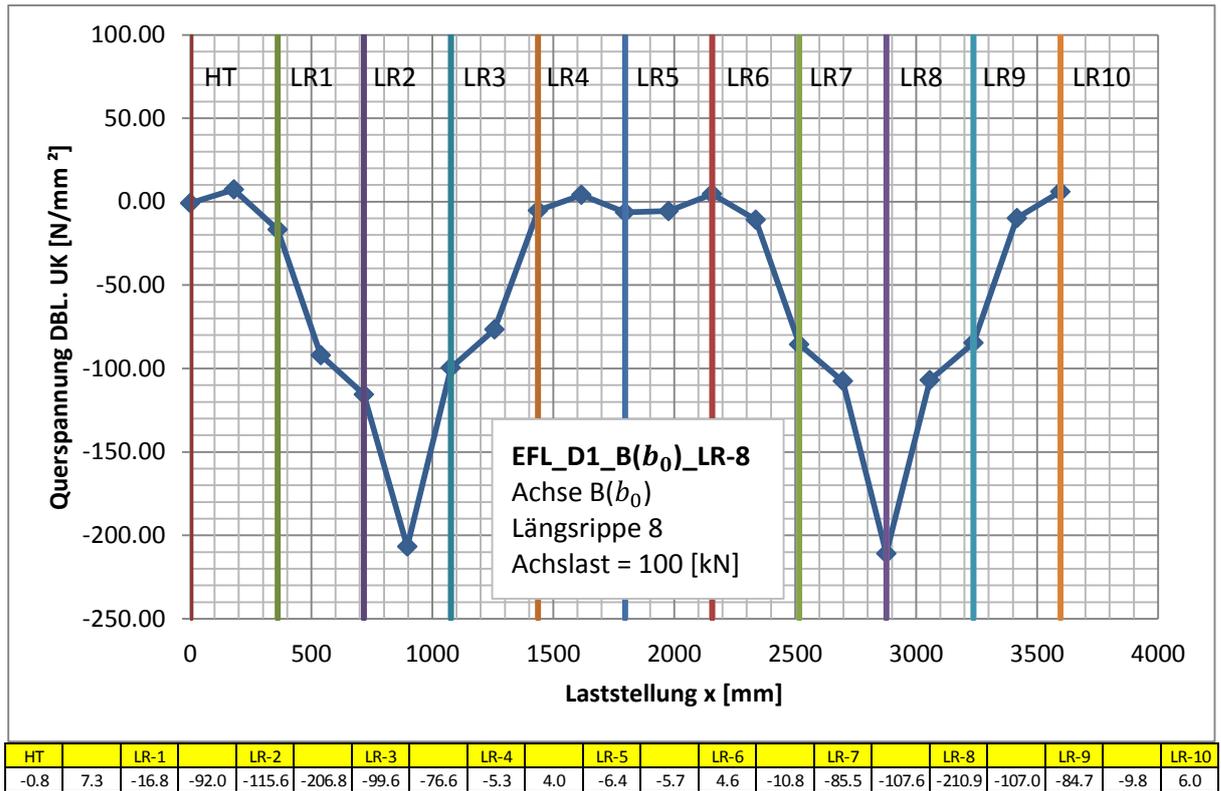


Abbildung 241: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-8

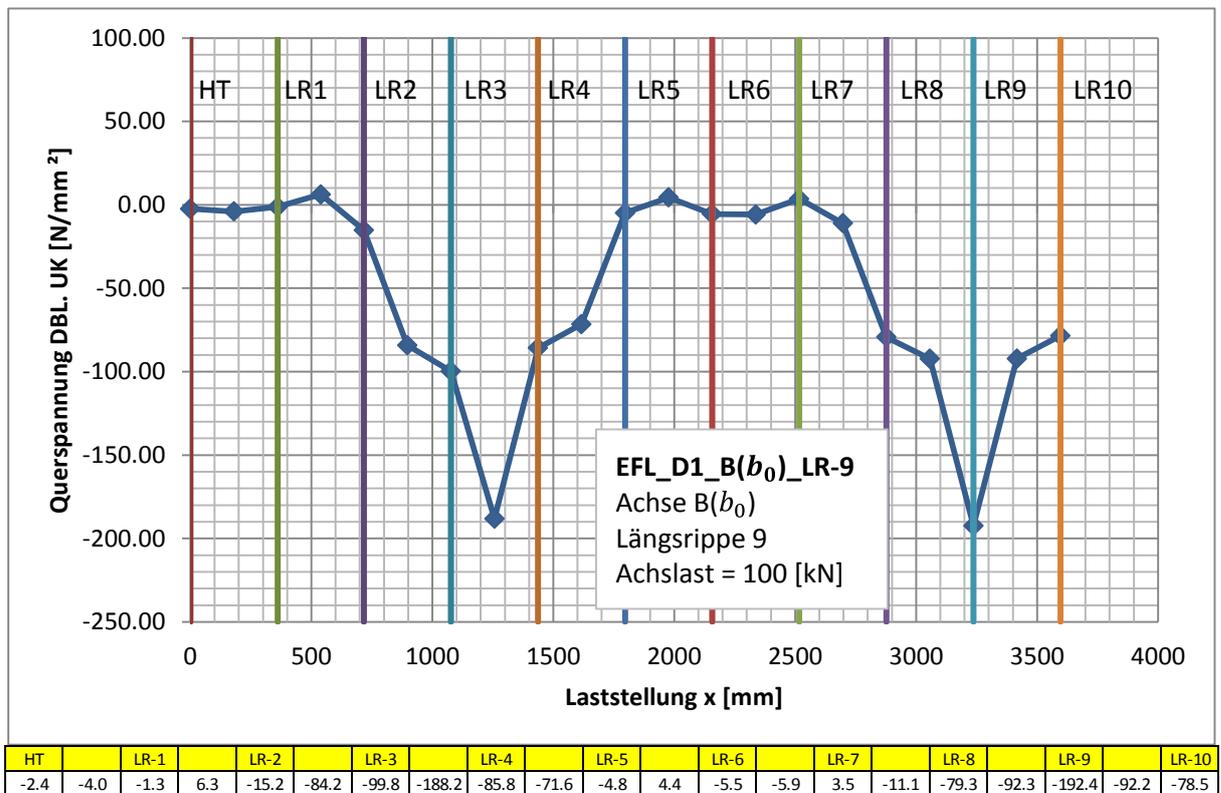


Abbildung 242: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-9

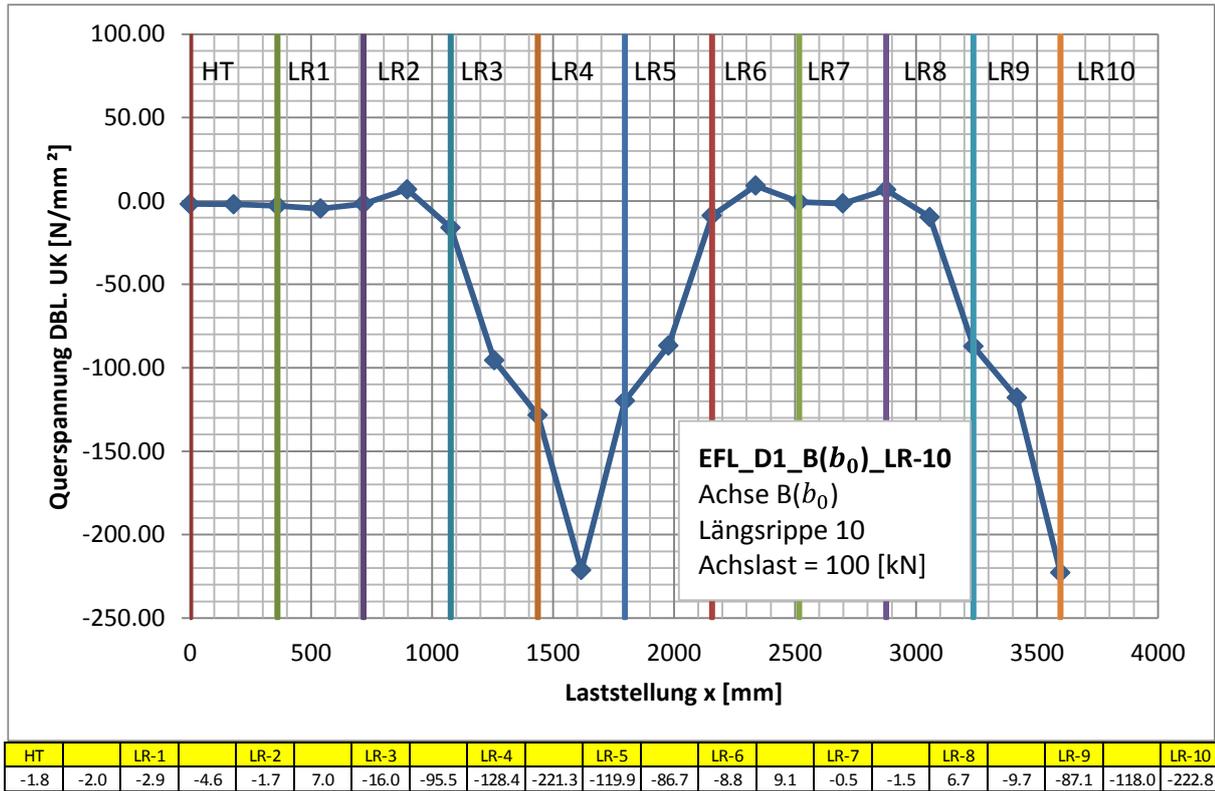


Abbildung 243: Einflusslinie EFL\_D1\_B( $b_0$ )\_LR-10

A 6.1.2.2. Achse C( $b_0$ ):

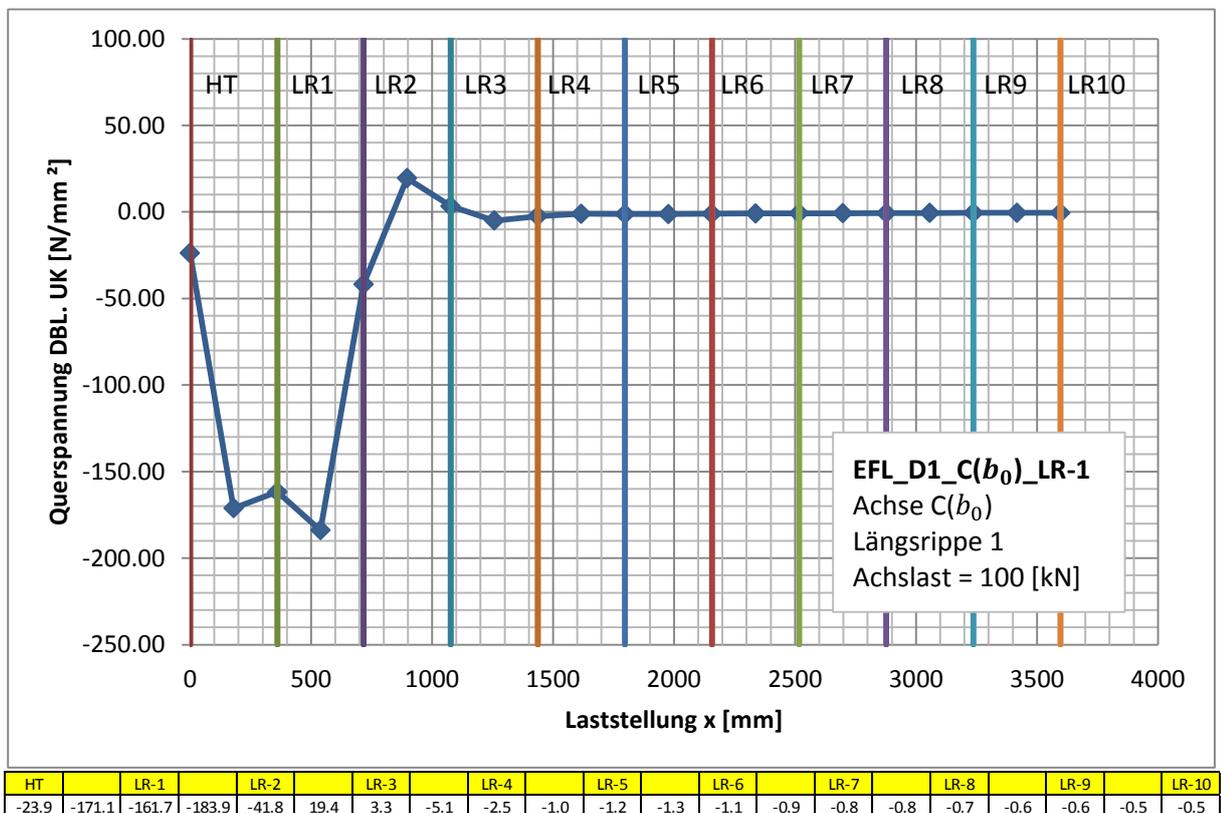


Abbildung 244: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-1

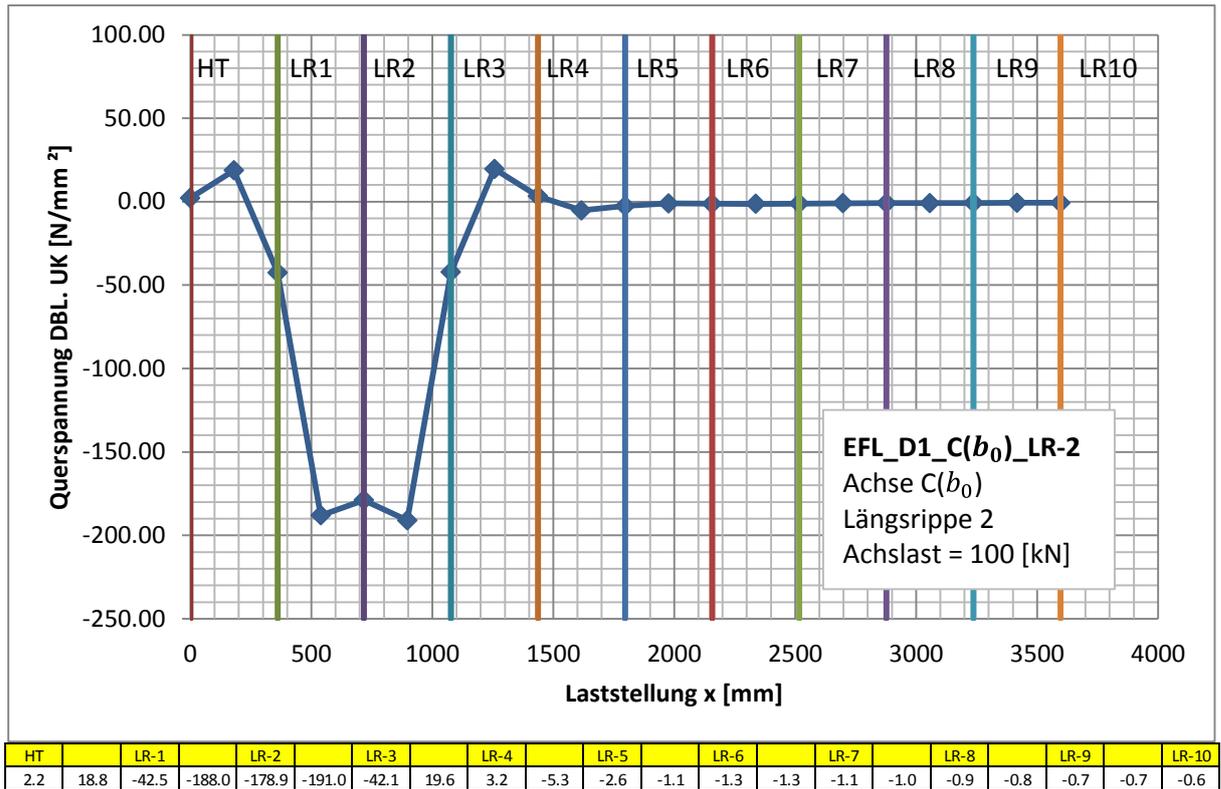


Abbildung 245: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-2

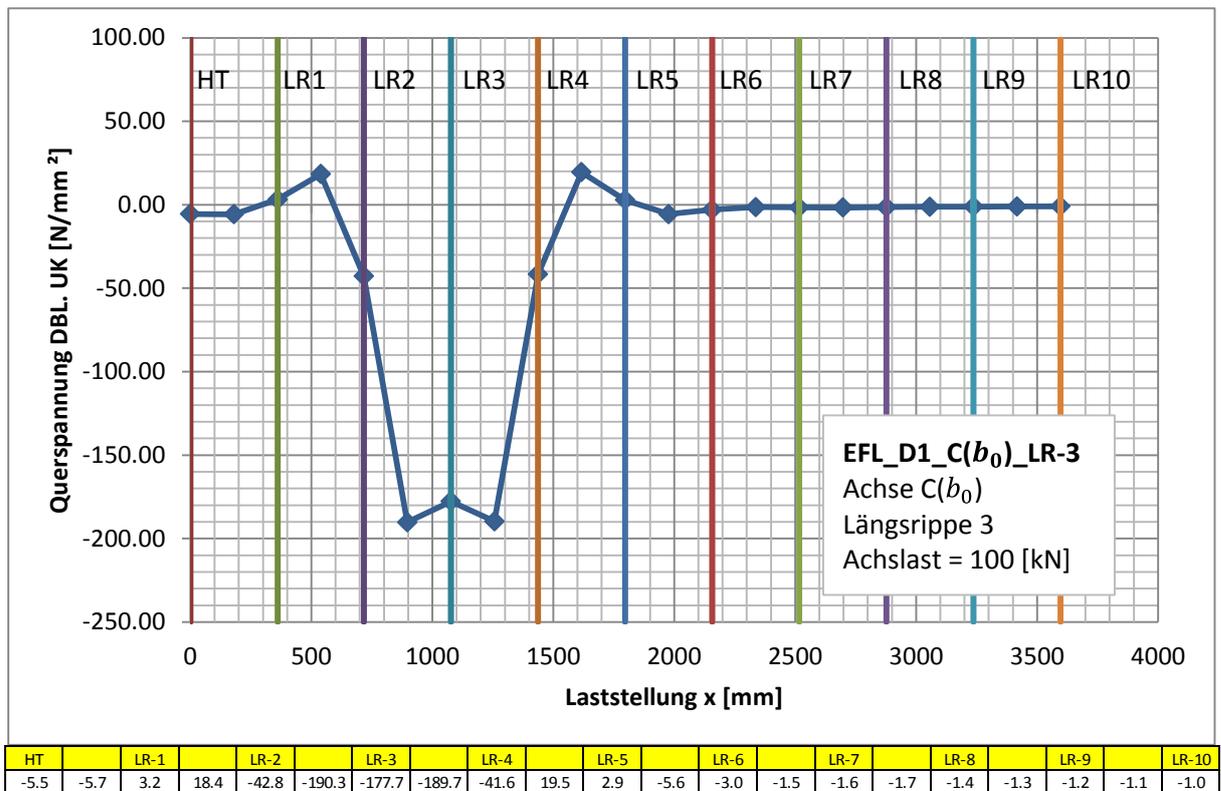


Abbildung 246: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-3

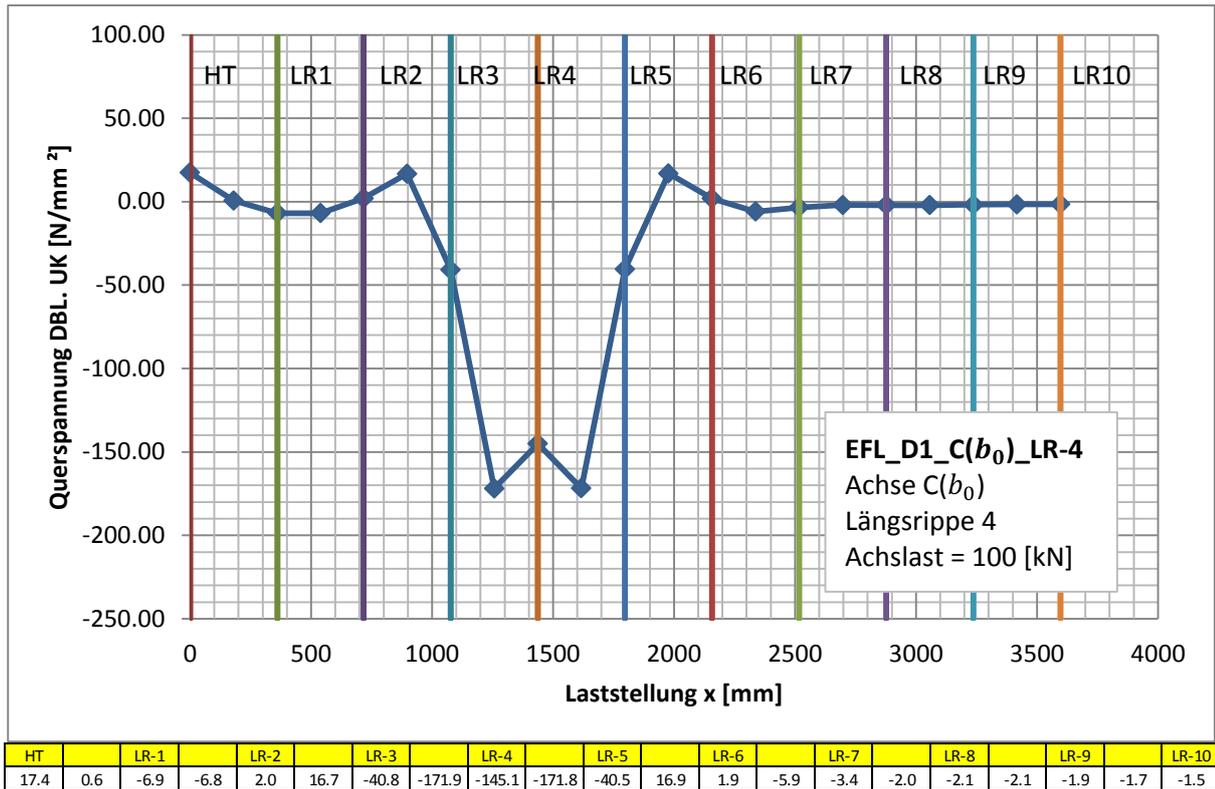


Abbildung 247: Einflusslinie EFL\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-4

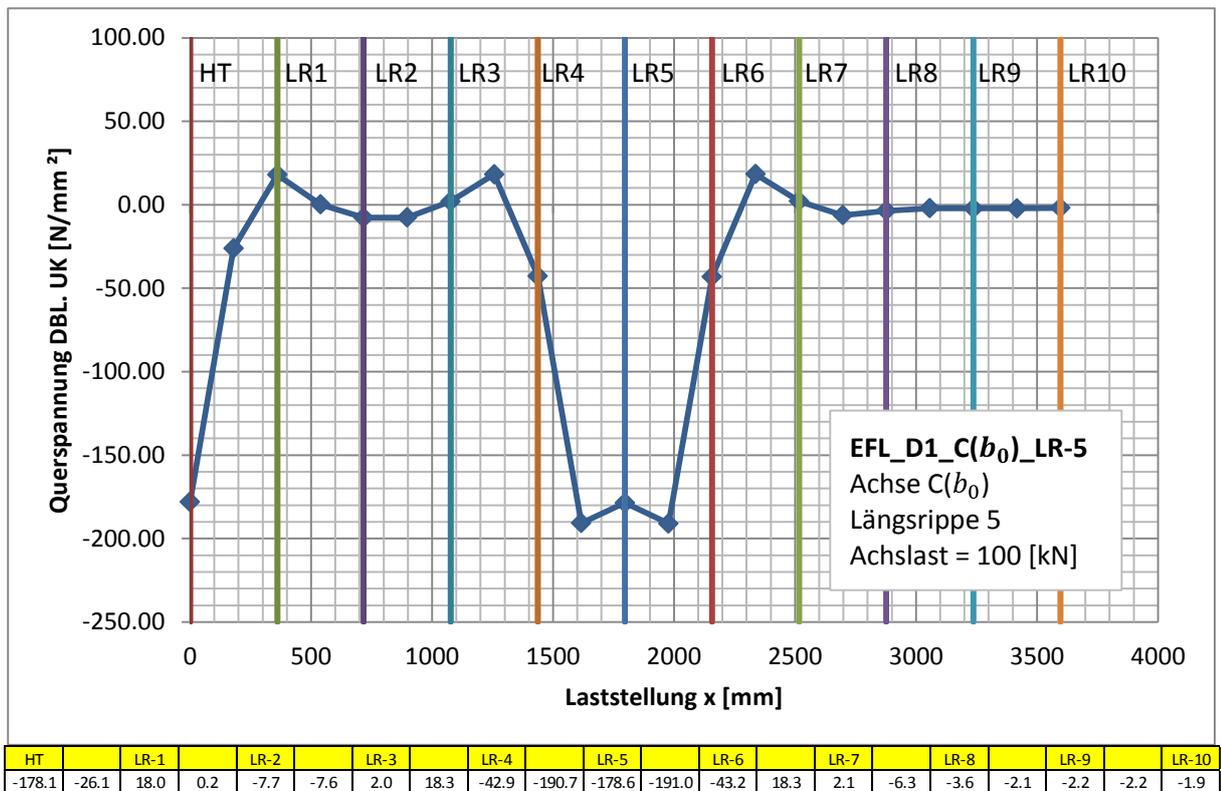


Abbildung 248: Einflusslinie EFL\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-5

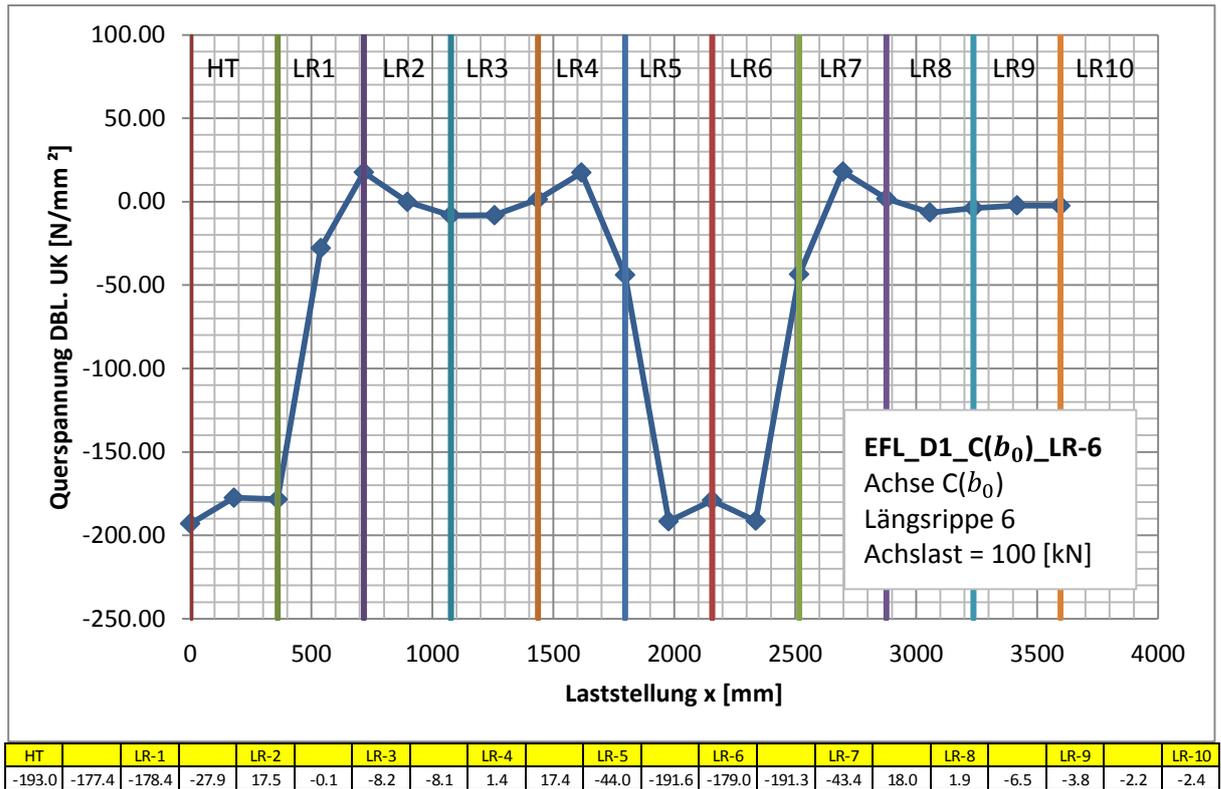


Abbildung 249: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-6

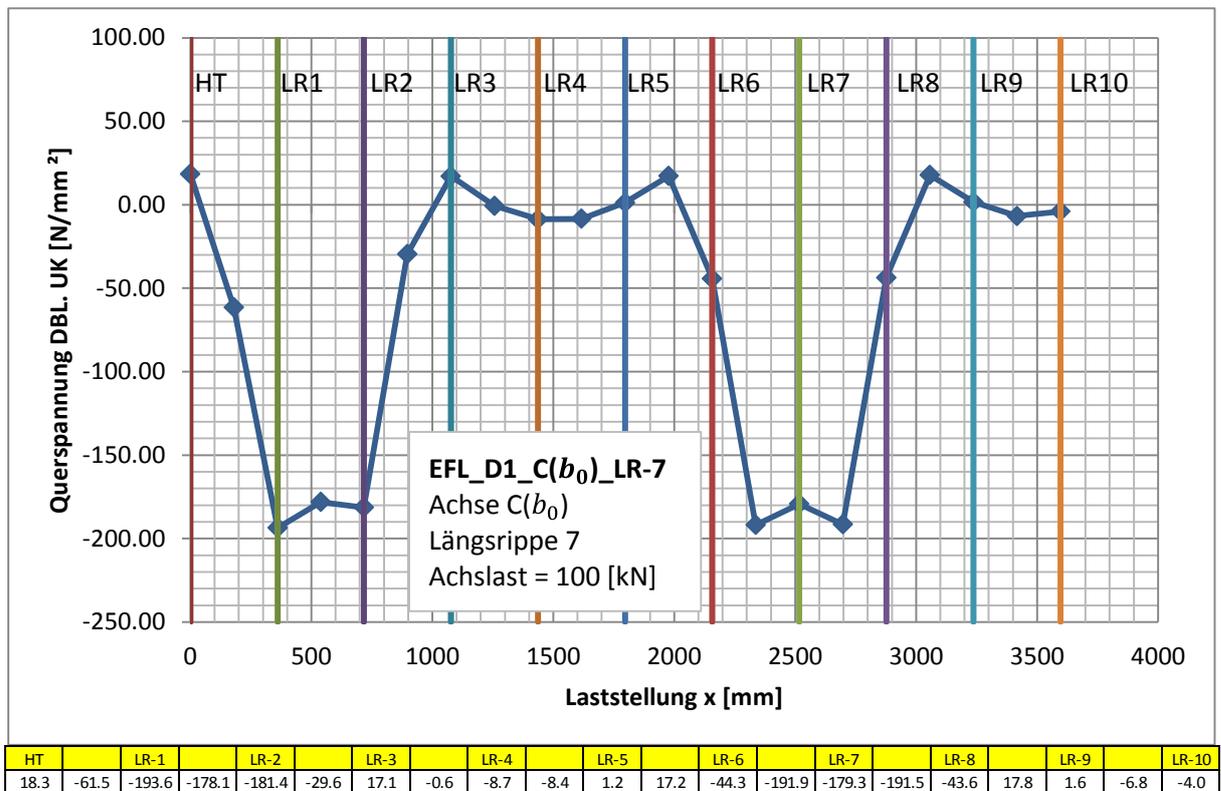


Abbildung 250: Einflusslinie EFL\_D1\_C( $b_0$ )\_LR-7

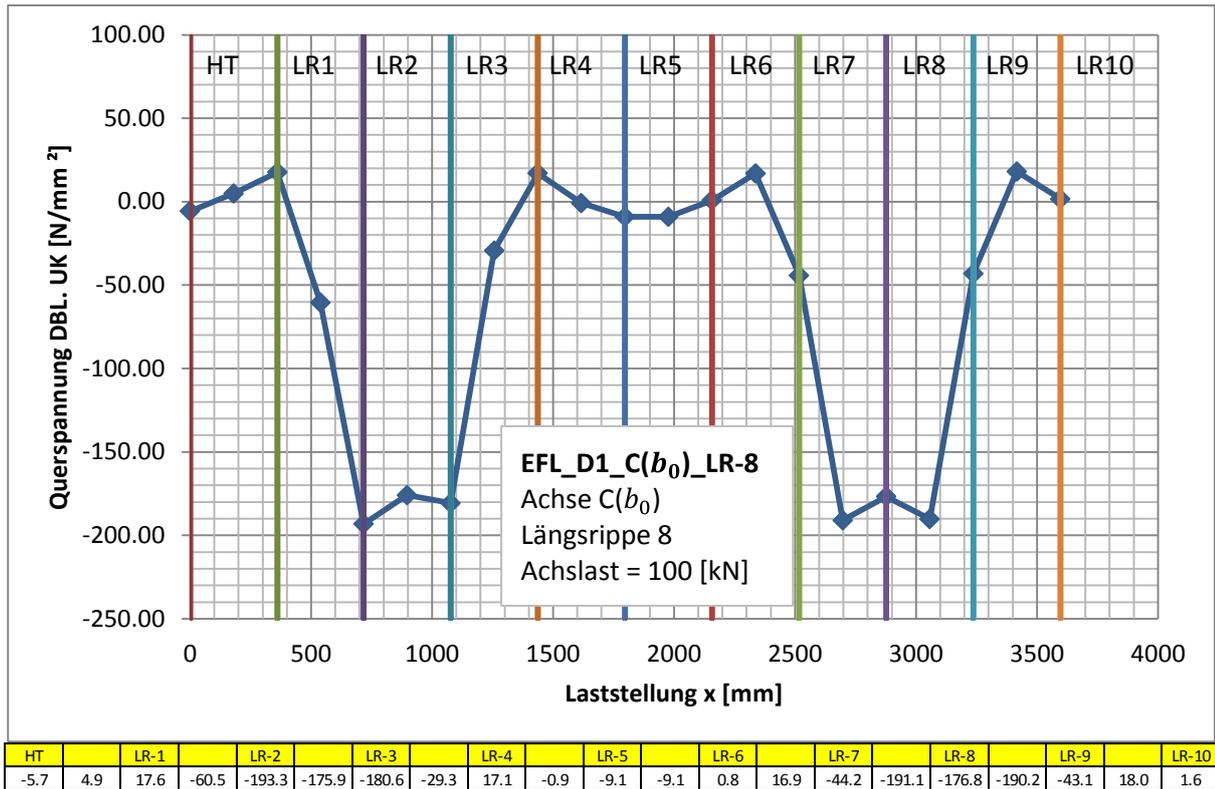


Abbildung 251: Einflusslinie EFL\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-8

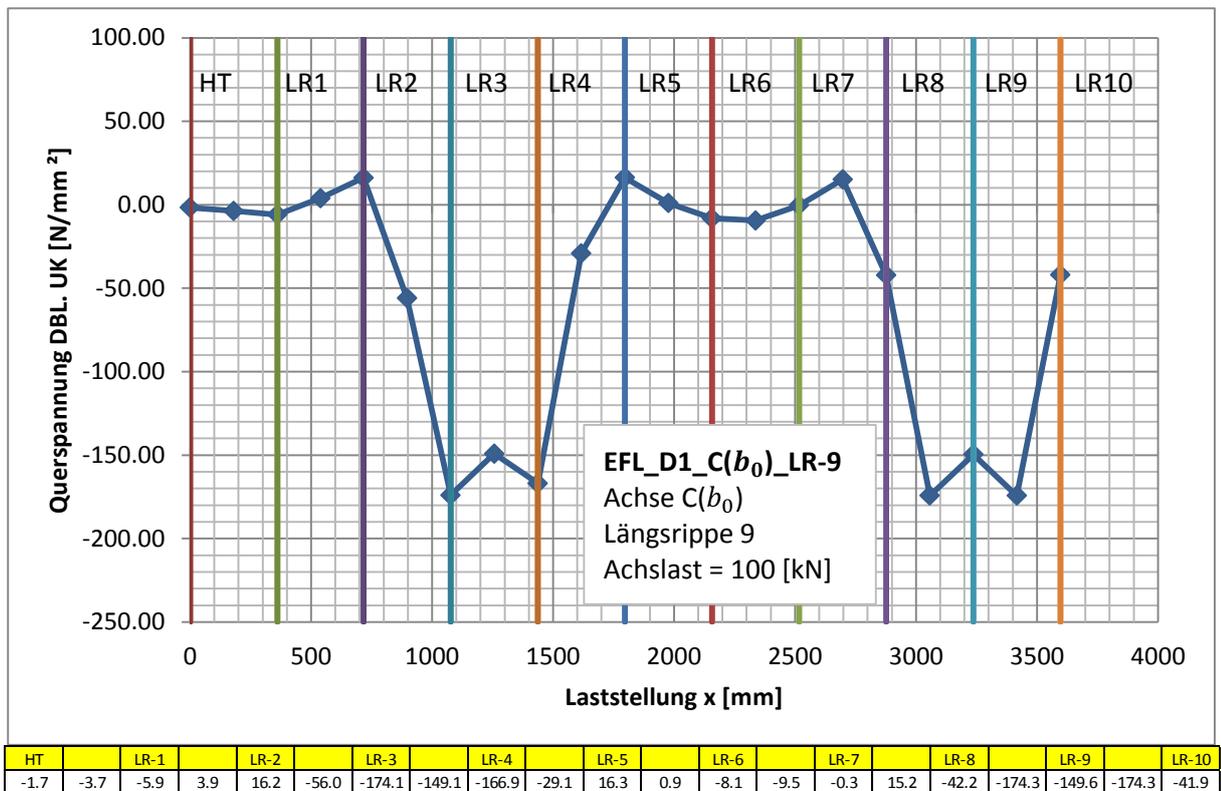


Abbildung 252: Einflusslinie EFL\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-9

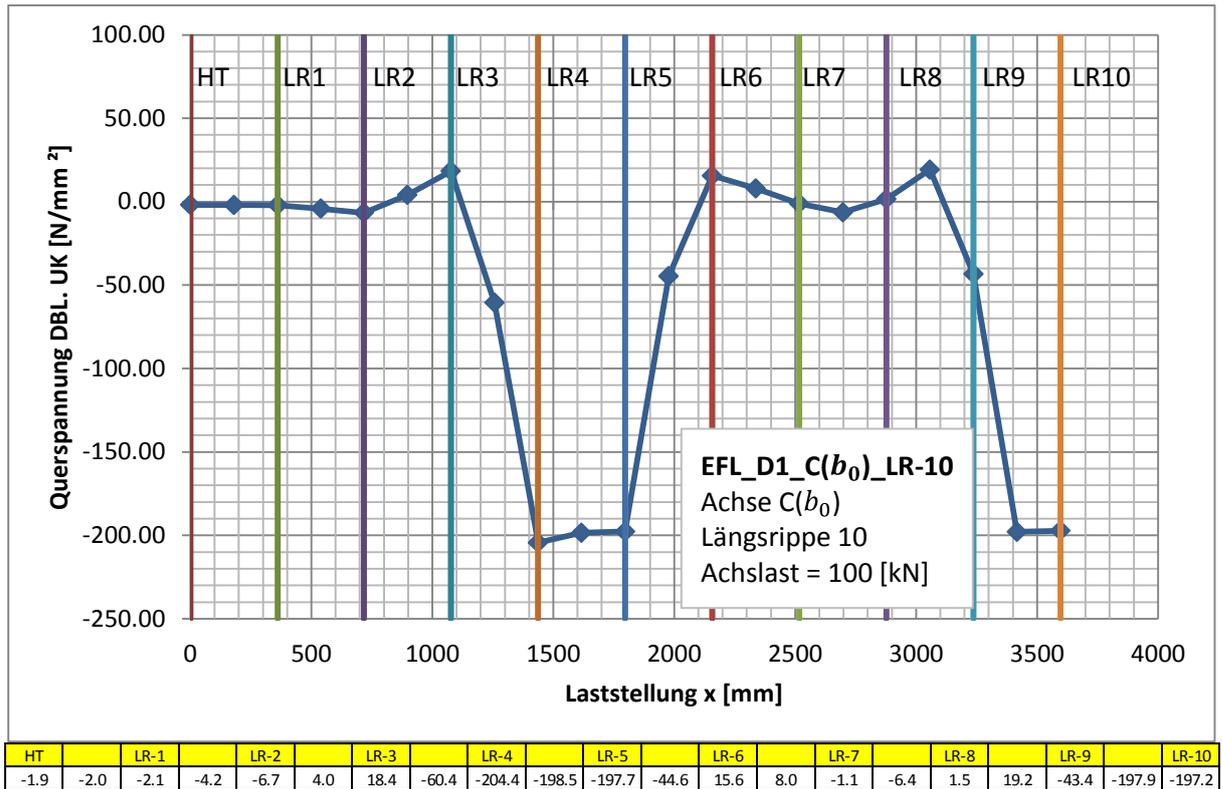


Abbildung 253: Einflusslinie EFL\_D1\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-10

## A 6.2. Detail D2

### A 6.2.1. Spannungsverläufe entlang des Pfades 2

#### A 6.2.1.1. Achse B( $b_0$ ):

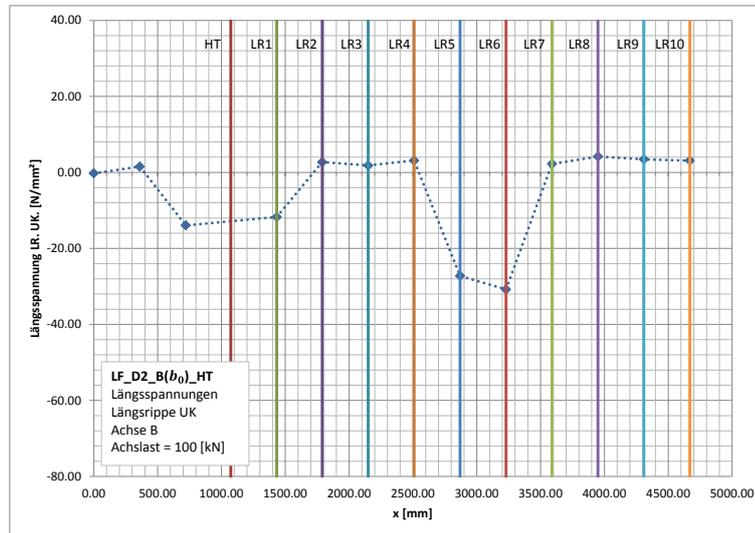


Abbildung 254: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_HT

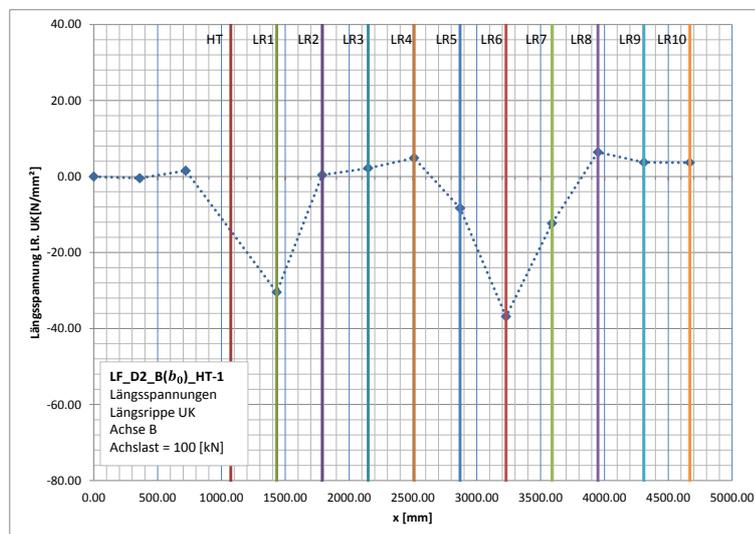


Abbildung 255: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_HT-1

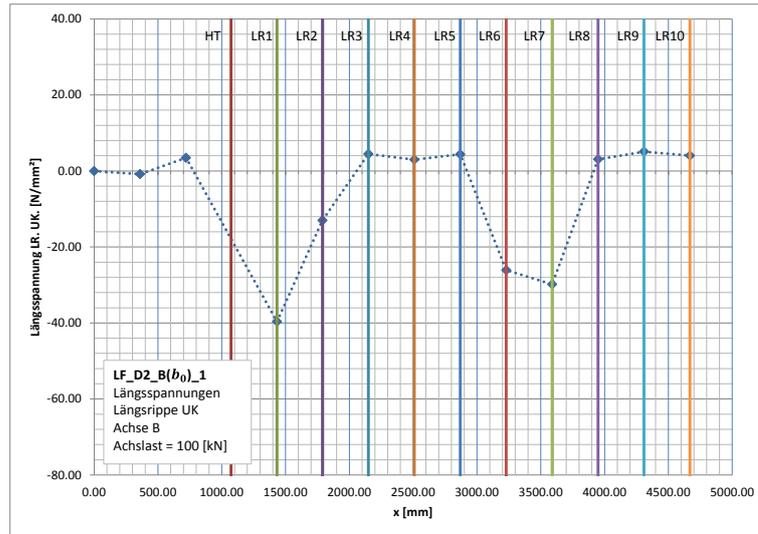


Abbildung 256: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_1

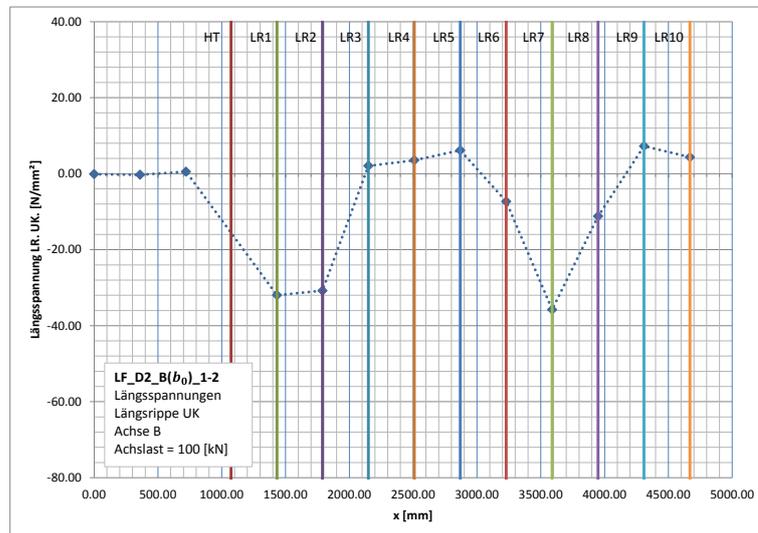


Abbildung 257: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_1-2

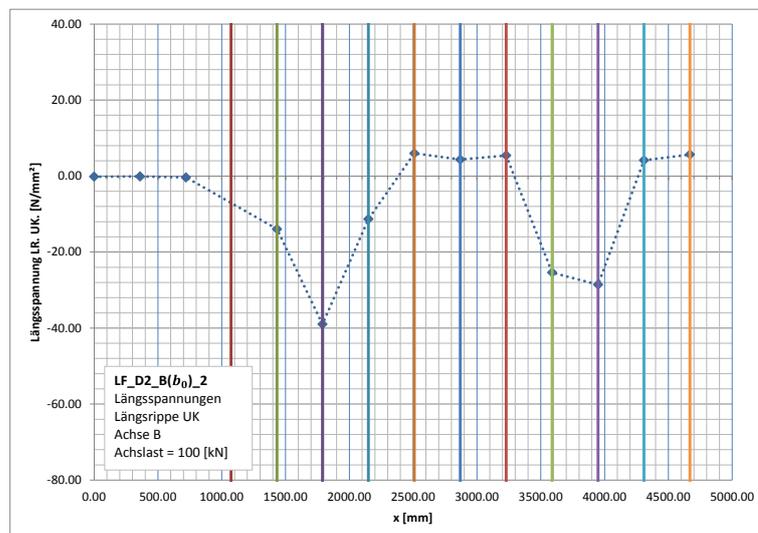


Abbildung 258: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_2

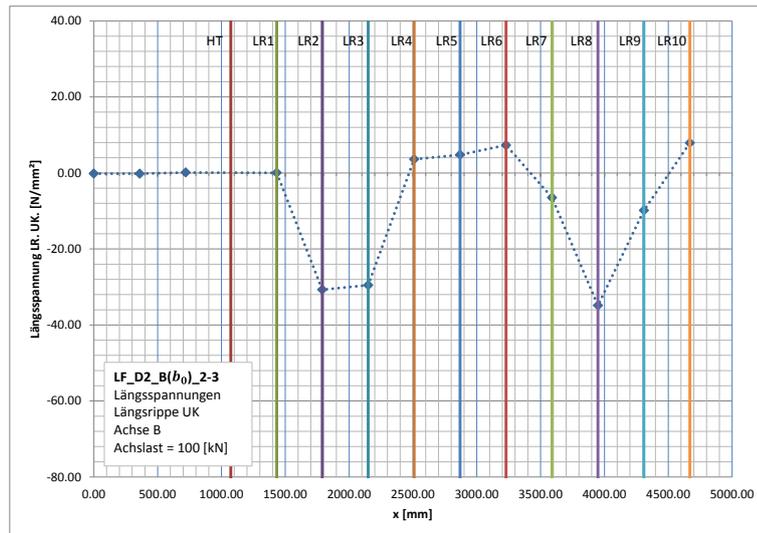


Abbildung 259: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_2-3

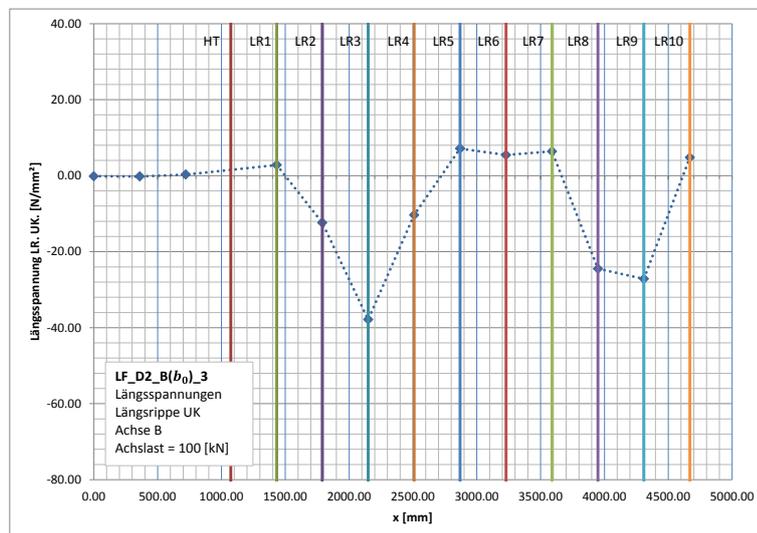


Abbildung 260: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_3

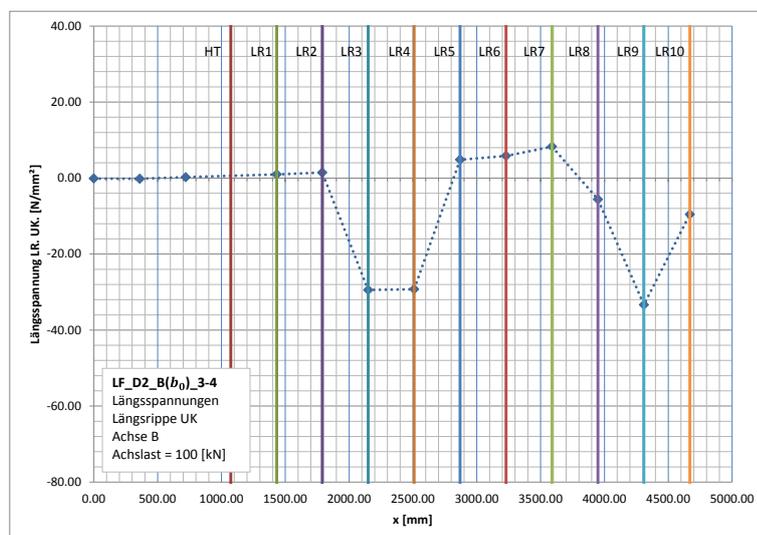


Abbildung 261: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_3-4

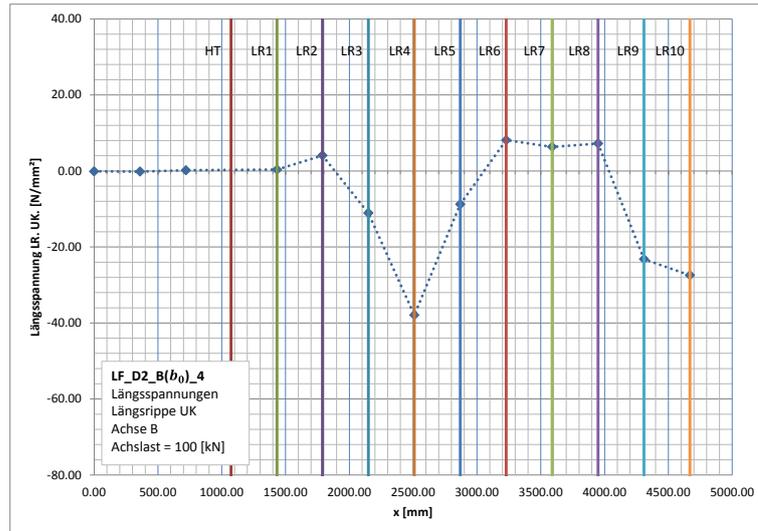


Abbildung 262: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_4

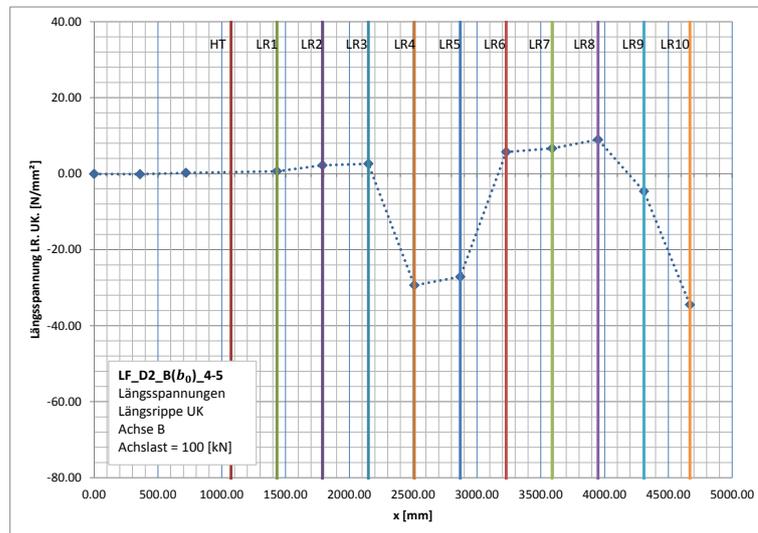


Abbildung 263: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_4-5

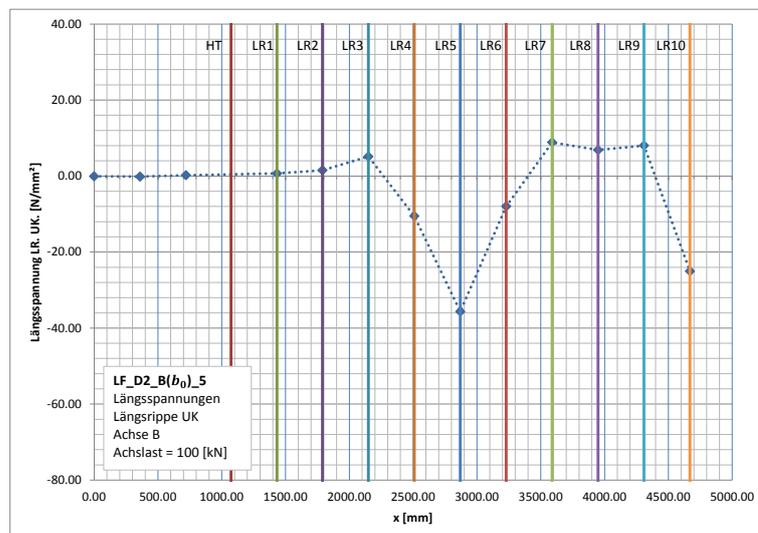


Abbildung 264: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_5

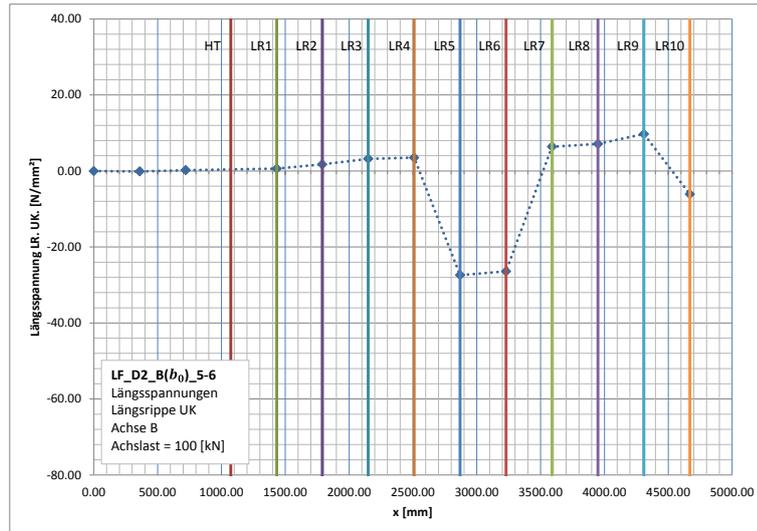


Abbildung 265: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_5-6

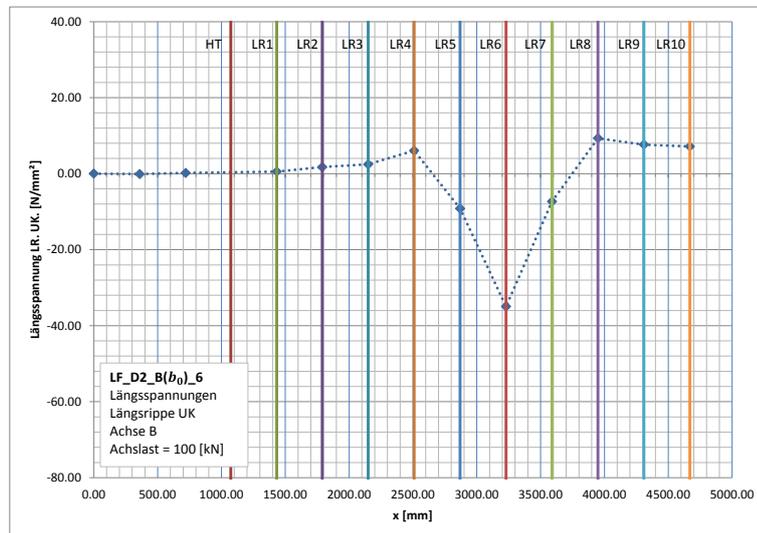


Abbildung 266: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_6

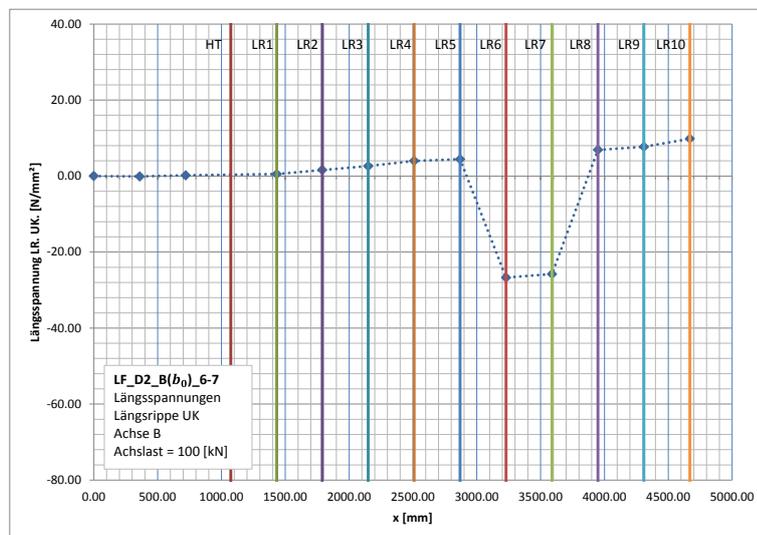


Abbildung 267: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_6-7

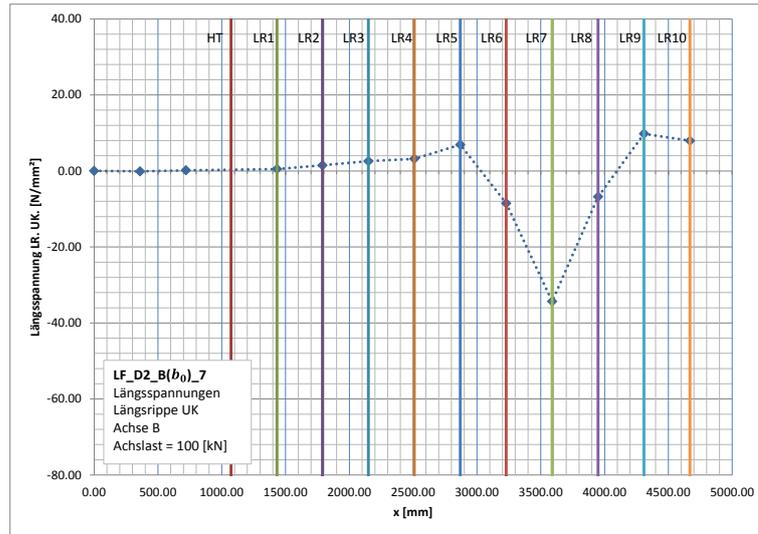


Abbildung 268: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_7

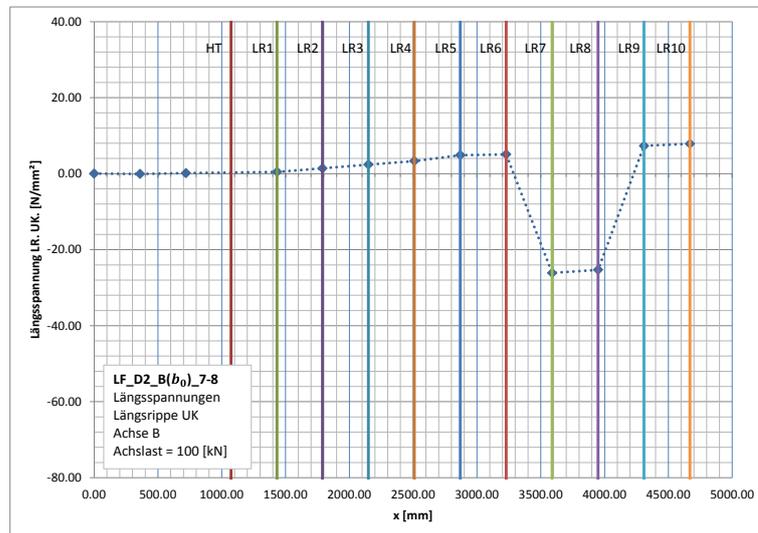


Abbildung 269: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_7-8

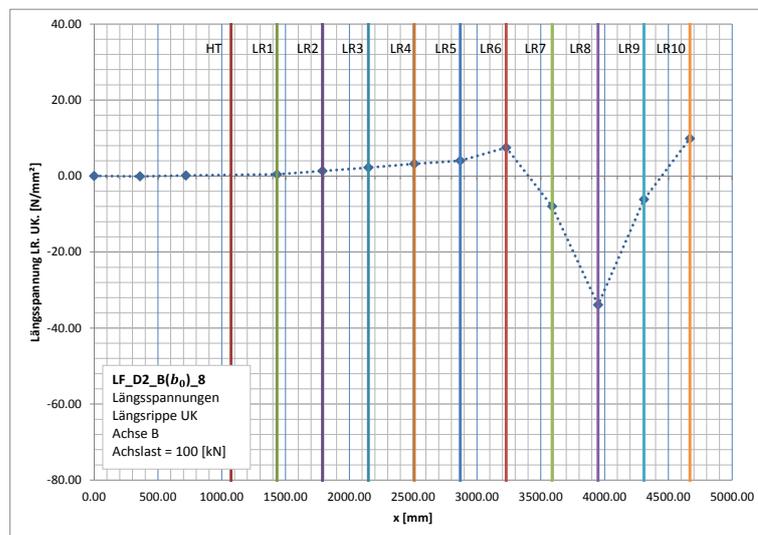


Abbildung 270: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_8

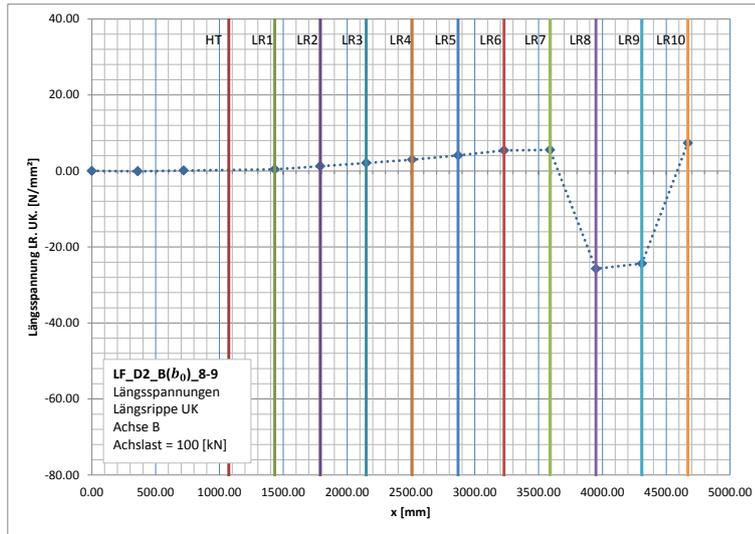


Abbildung 271: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_8-9

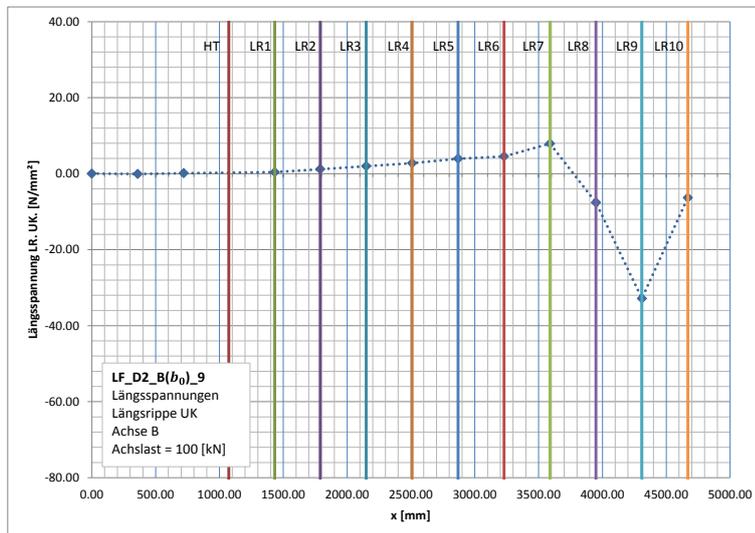


Abbildung 272: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_9

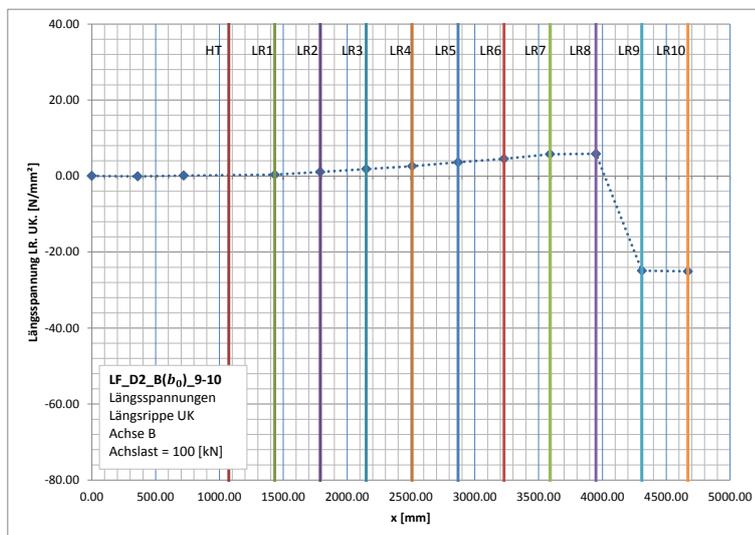


Abbildung 273: Spannungsverlauf LF\_D2\_B( $b_0$ )\_9-10

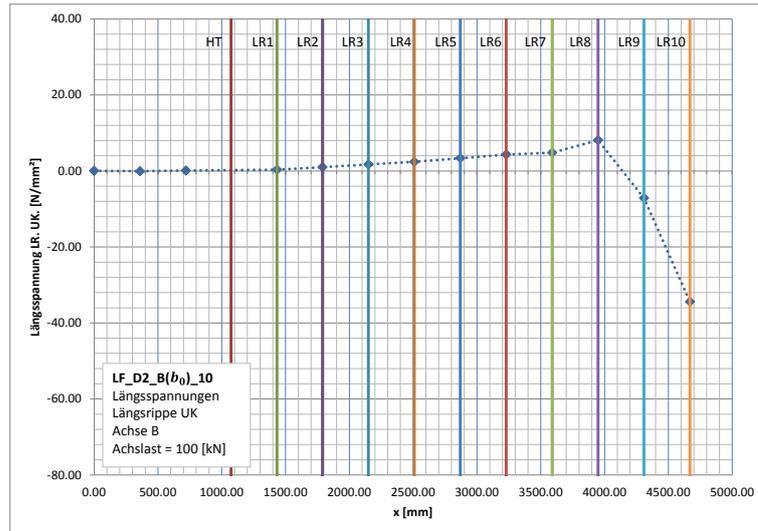


Abbildung 274: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b<sub>0</sub>)\_10

A 6.2.1.2. Achse B(b)

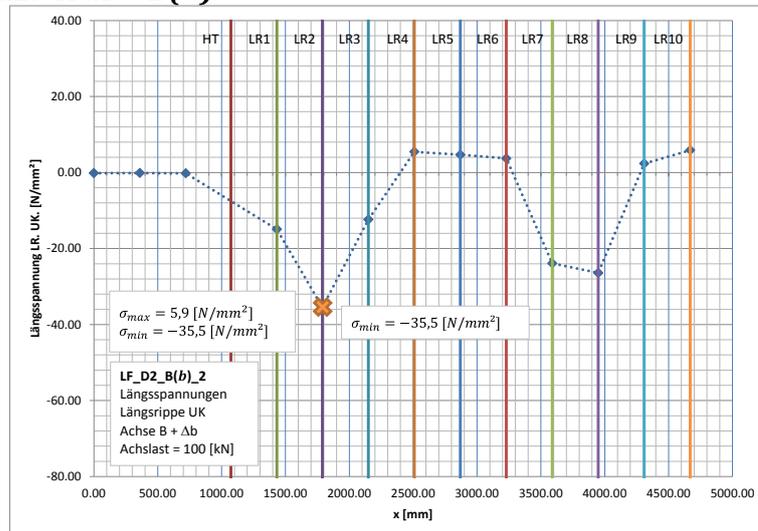


Abbildung 275: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b)\_2

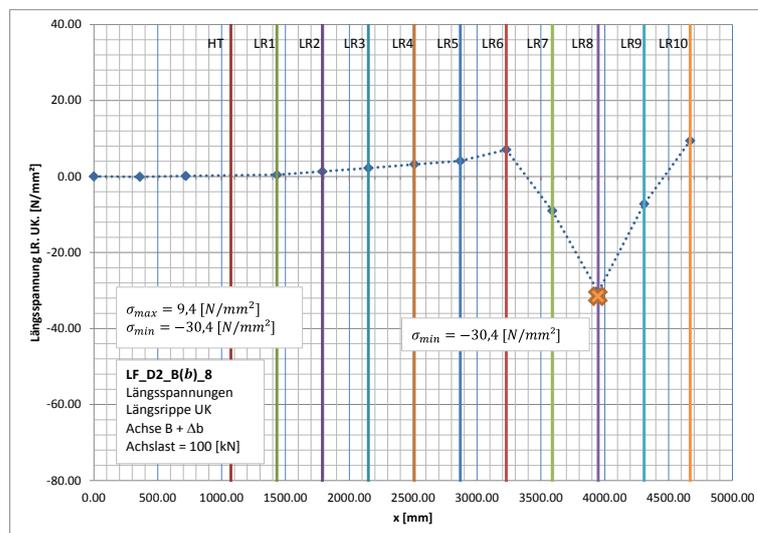


Abbildung 276: Spannungsverlauf LF\_D2\_B(b)\_8

A 6.2.1.3. Achse C( $b_0$ ):

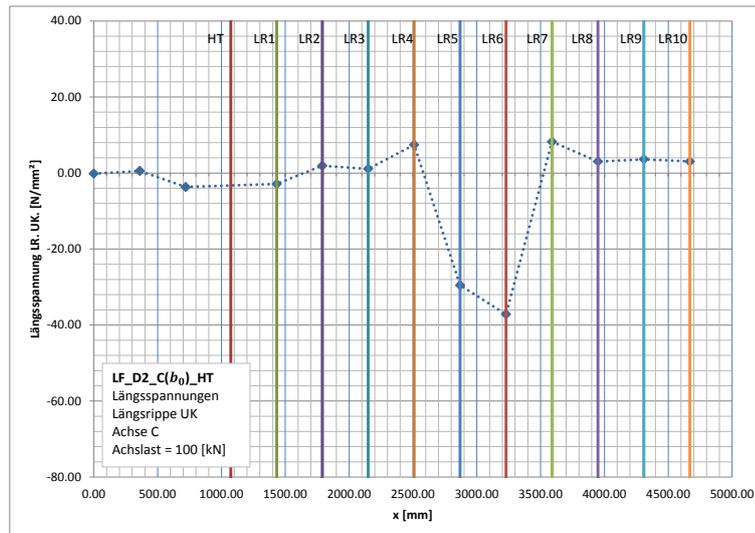


Abbildung 277: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_HT

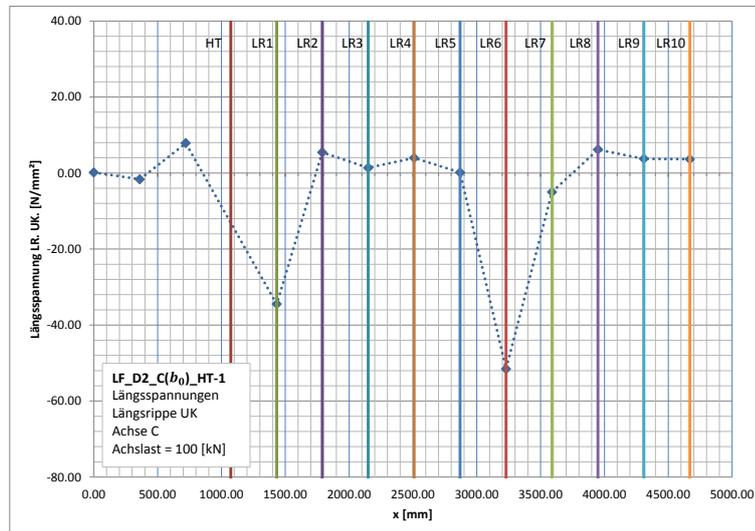


Abbildung 278: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_HT-1

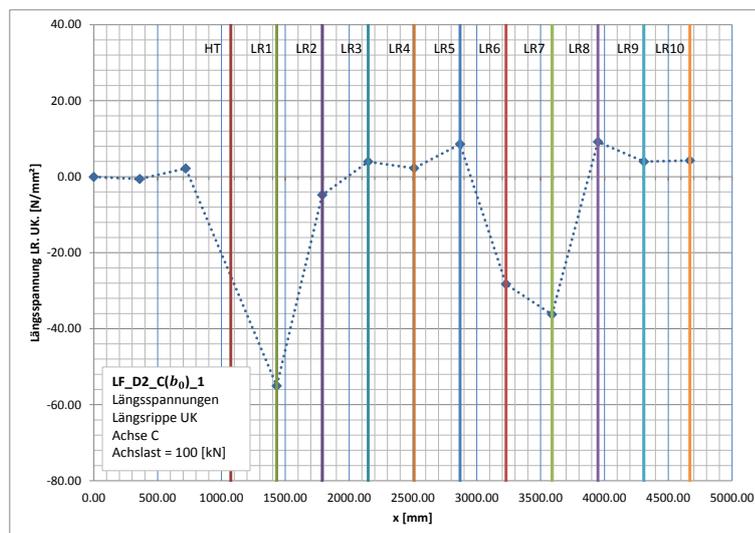


Abbildung 279: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_1

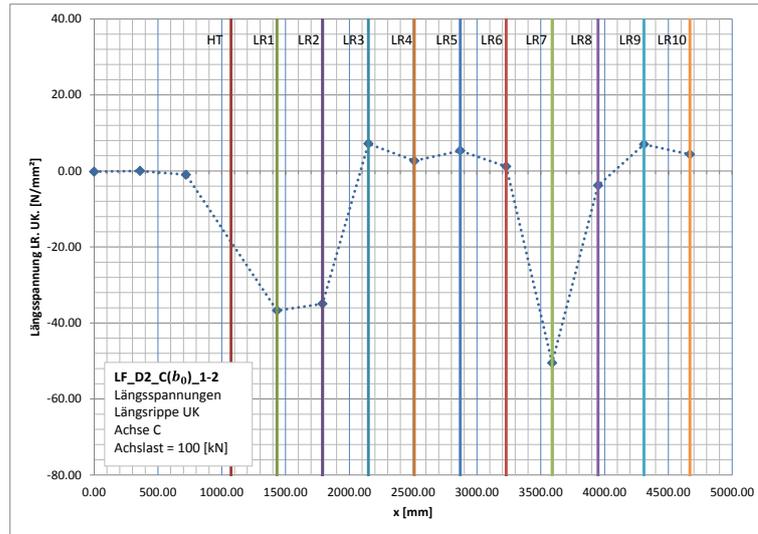


Abbildung 280: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_1-2

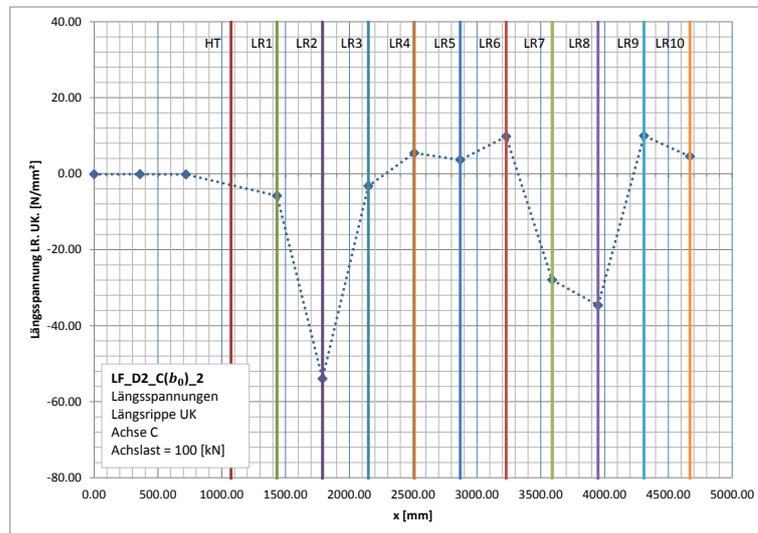


Abbildung 281: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_2

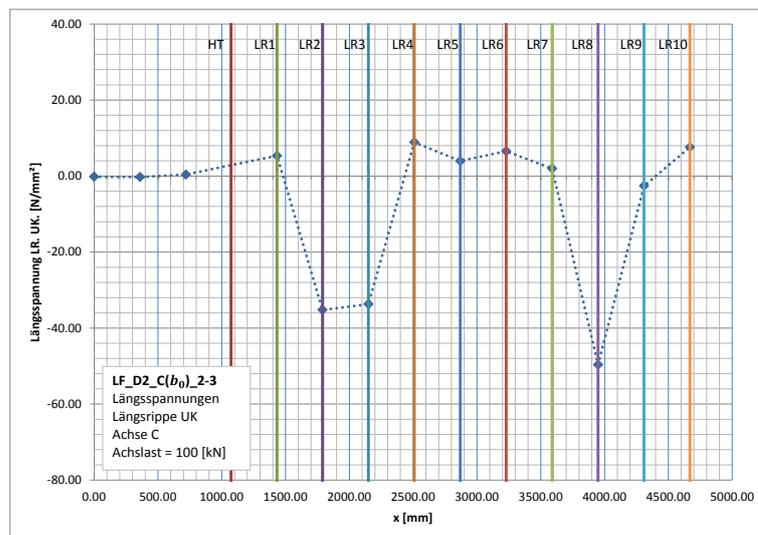


Abbildung 282: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_2-3

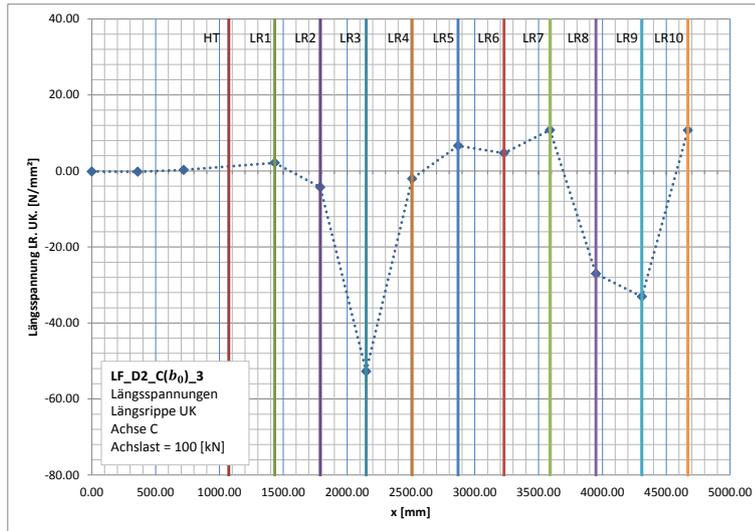


Abbildung 283: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_3

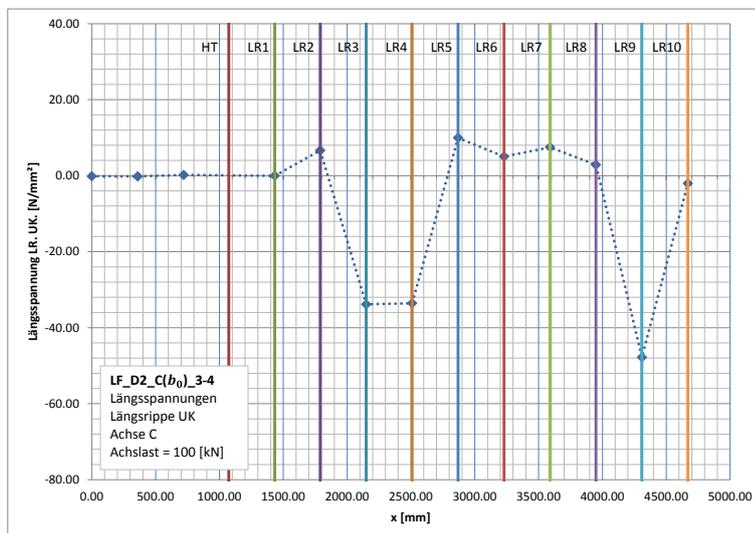


Abbildung 284: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_3-4

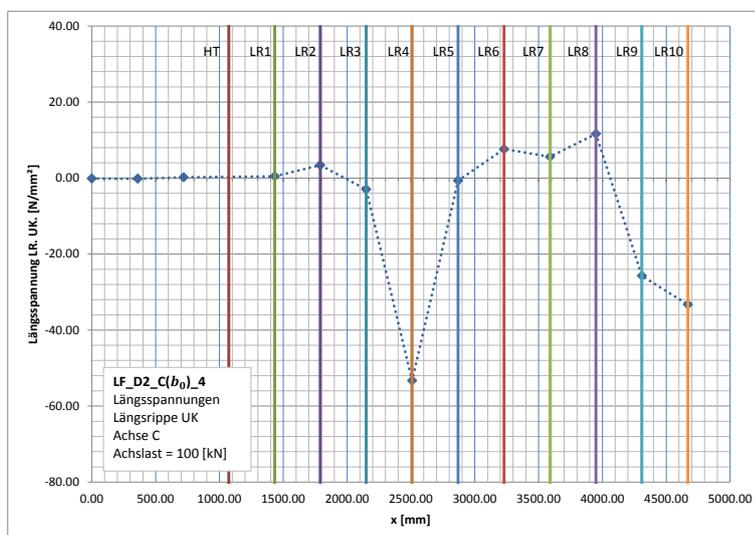


Abbildung 285: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_4

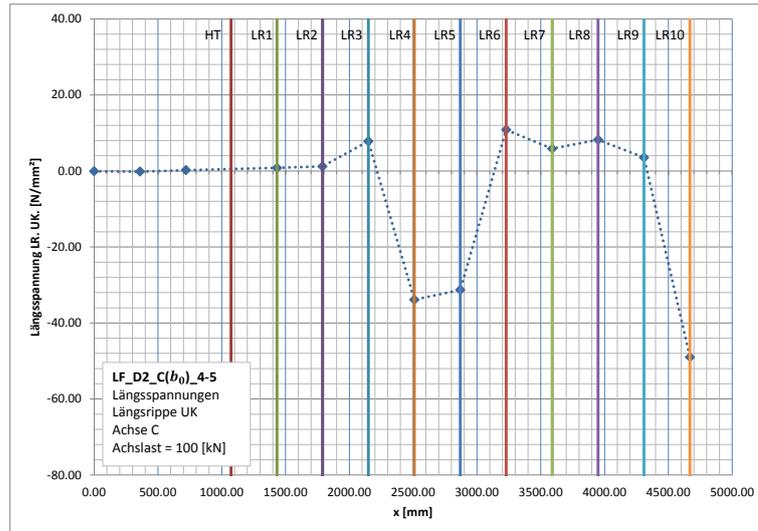


Abbildung 286: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_4-5

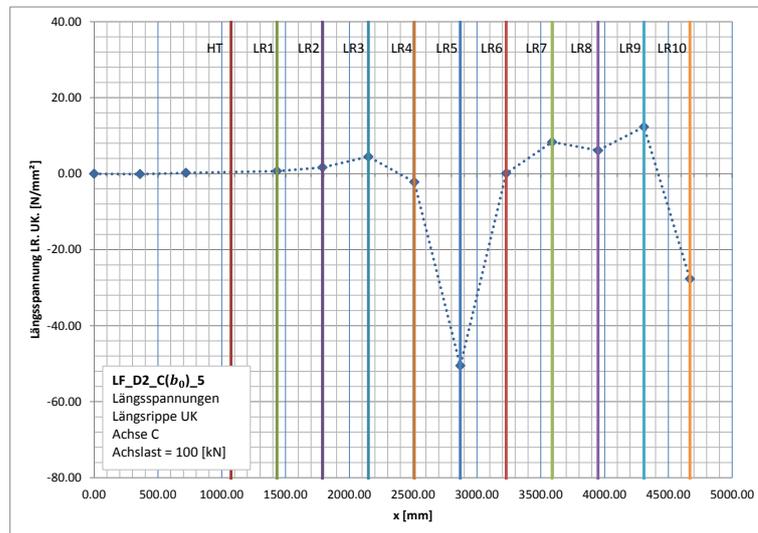


Abbildung 287: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_5

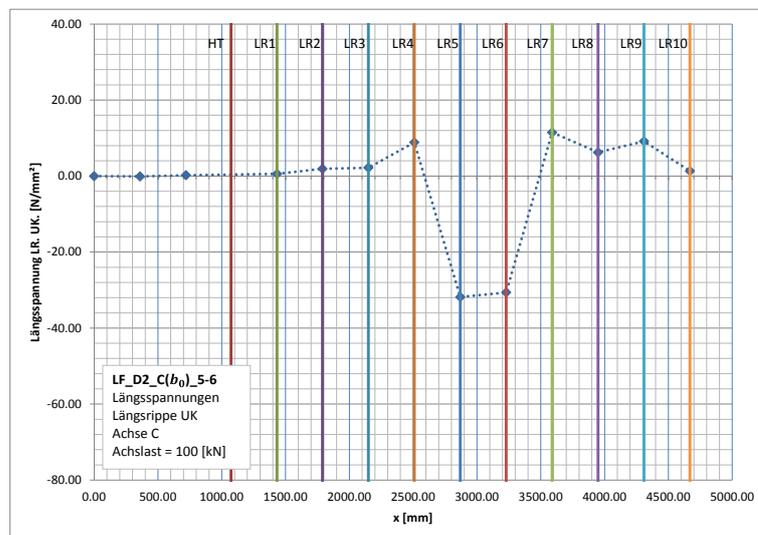


Abbildung 288: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_5-6

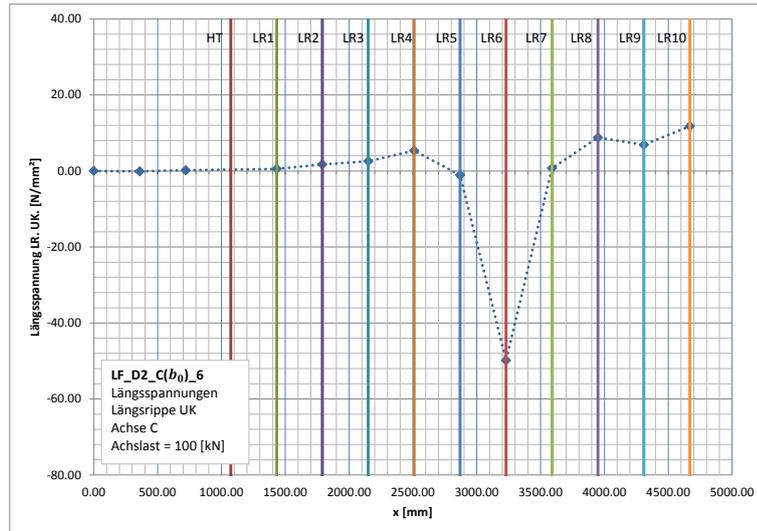


Abbildung 289: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_6

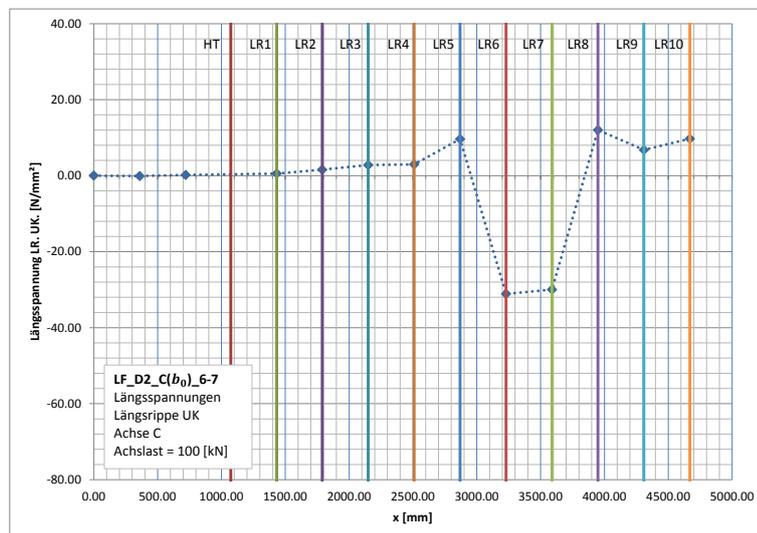


Abbildung 290: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_6-7

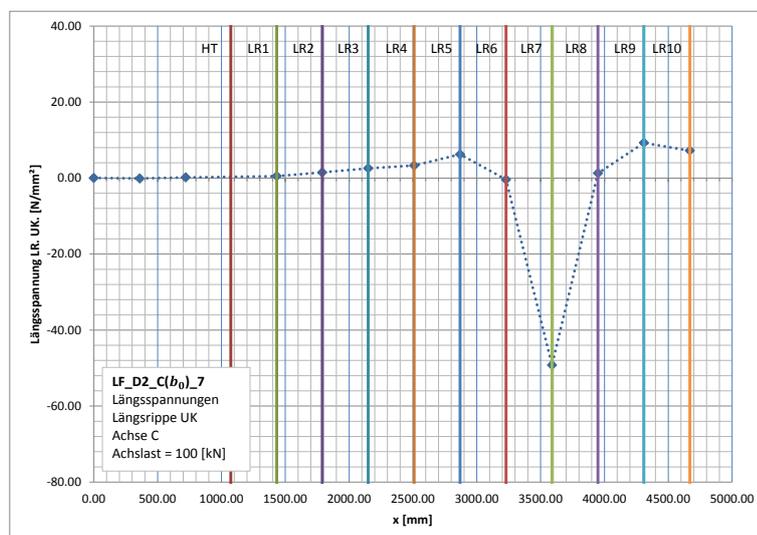


Abbildung 291: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_7

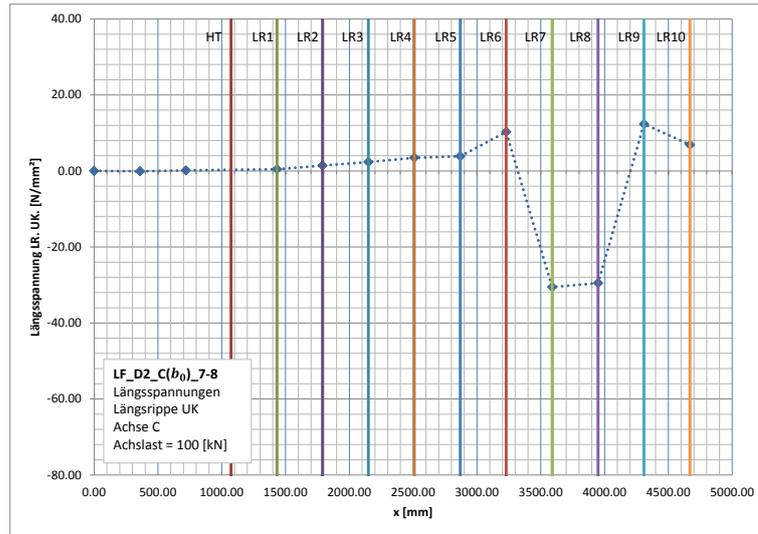


Abbildung 292: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_7-8

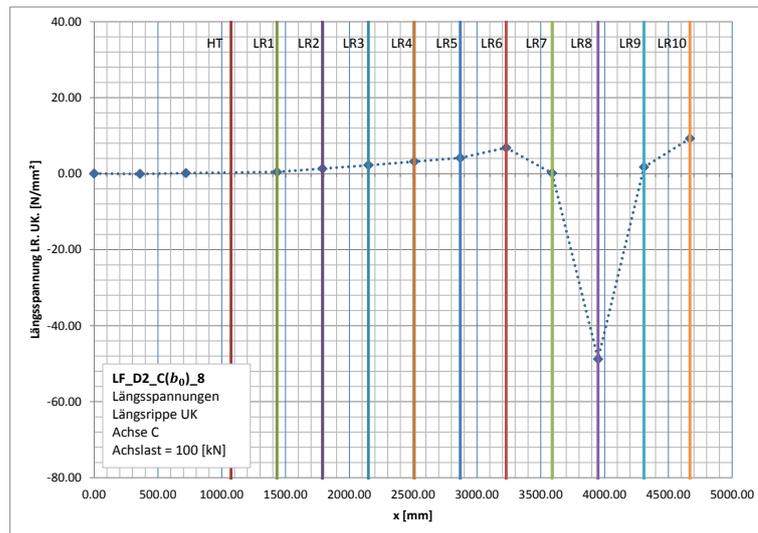


Abbildung 293: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_8

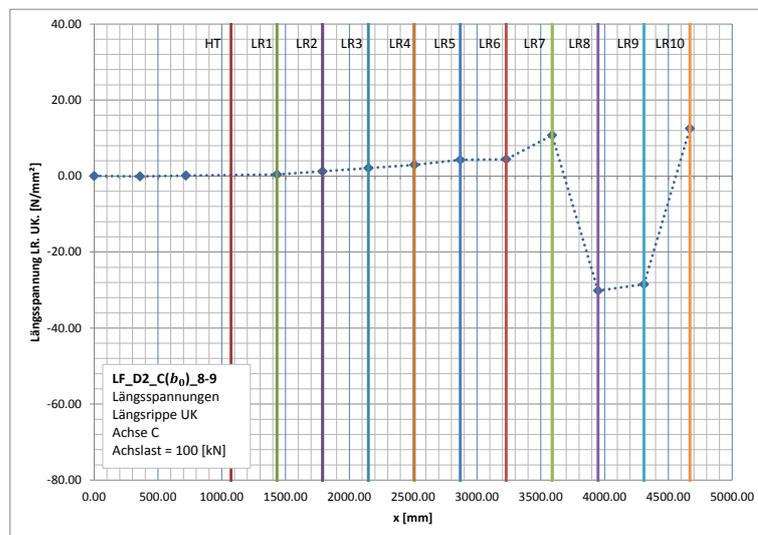


Abbildung 294: Spannungsverlauf LF\_D2\_C( $b_0$ )\_8-9

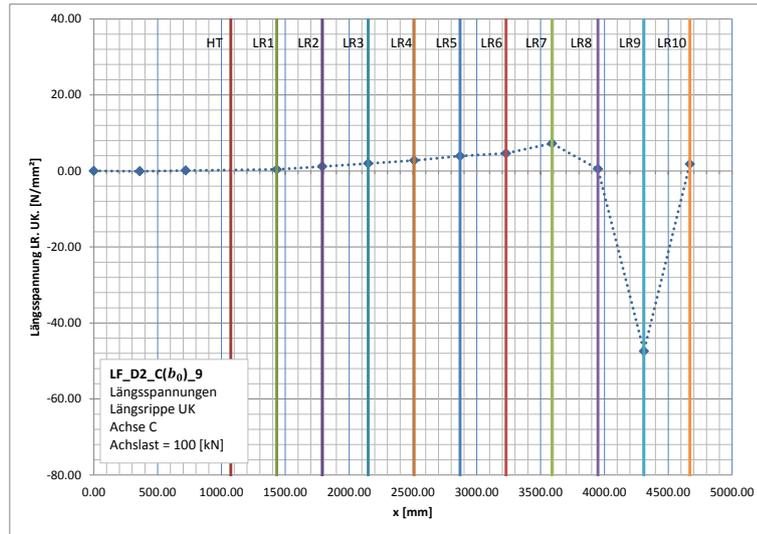


Abbildung 295: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_9

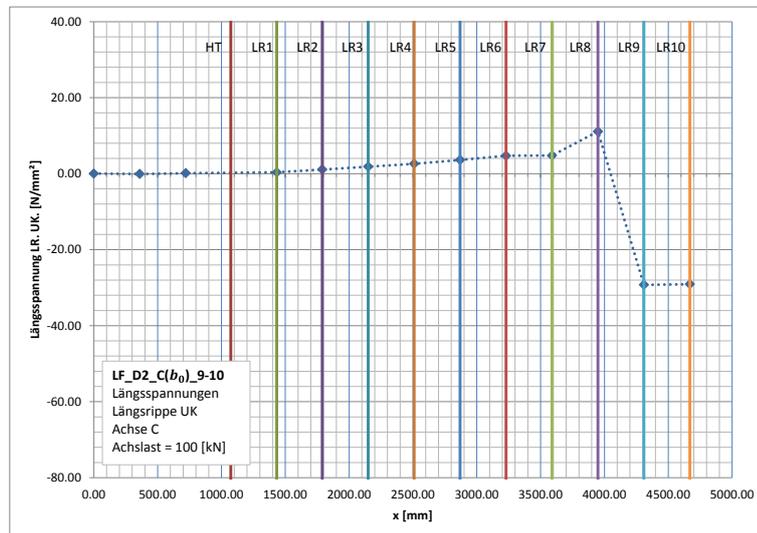


Abbildung 296: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_9-10

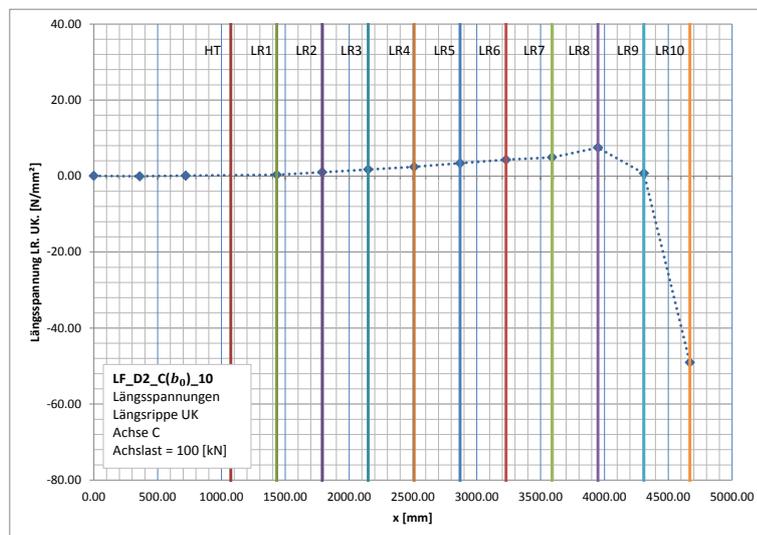


Abbildung 297: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_10

A 6.2.1.4. Achse C(b)

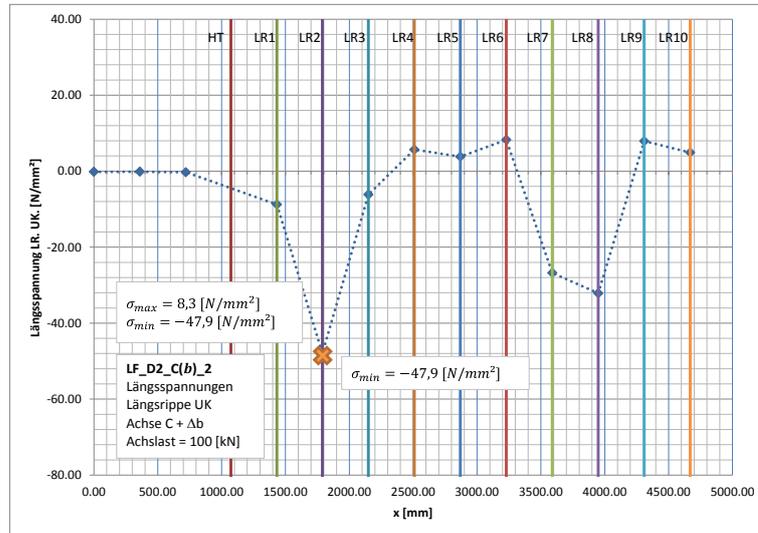


Abbildung 298: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b)\_2

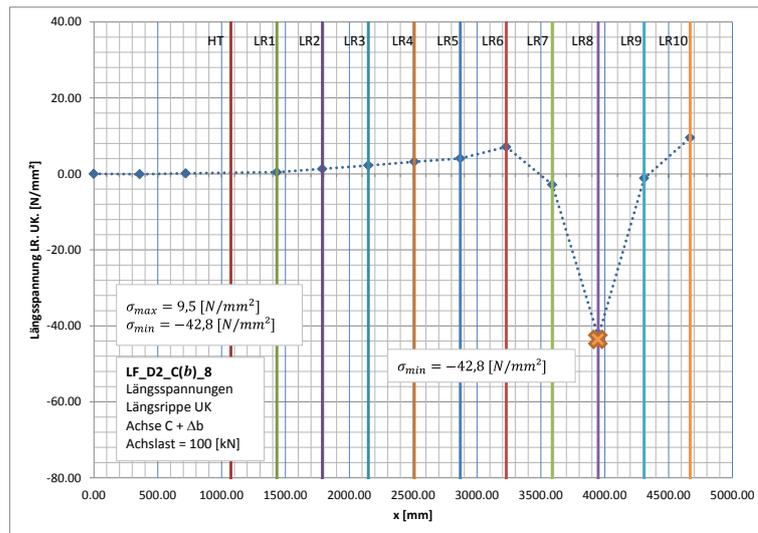
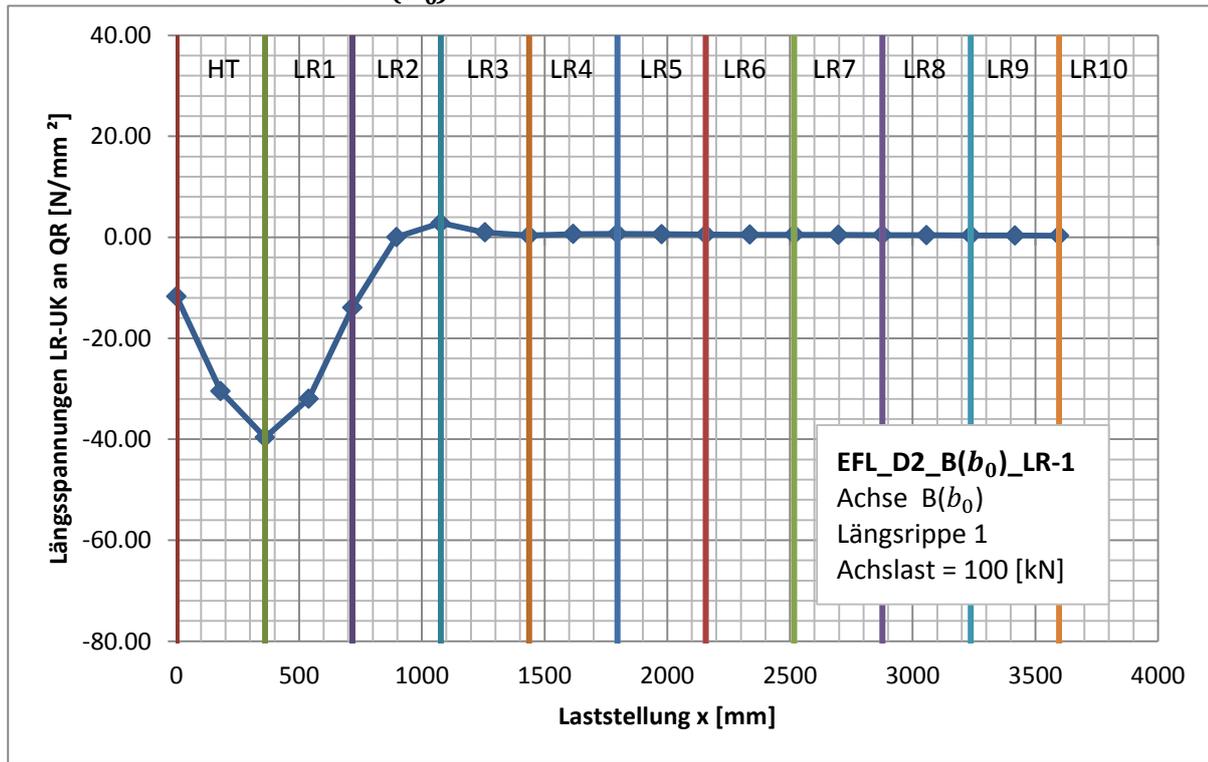


Abbildung 299: Spannungsverlauf LF\_D2\_C(b)\_8

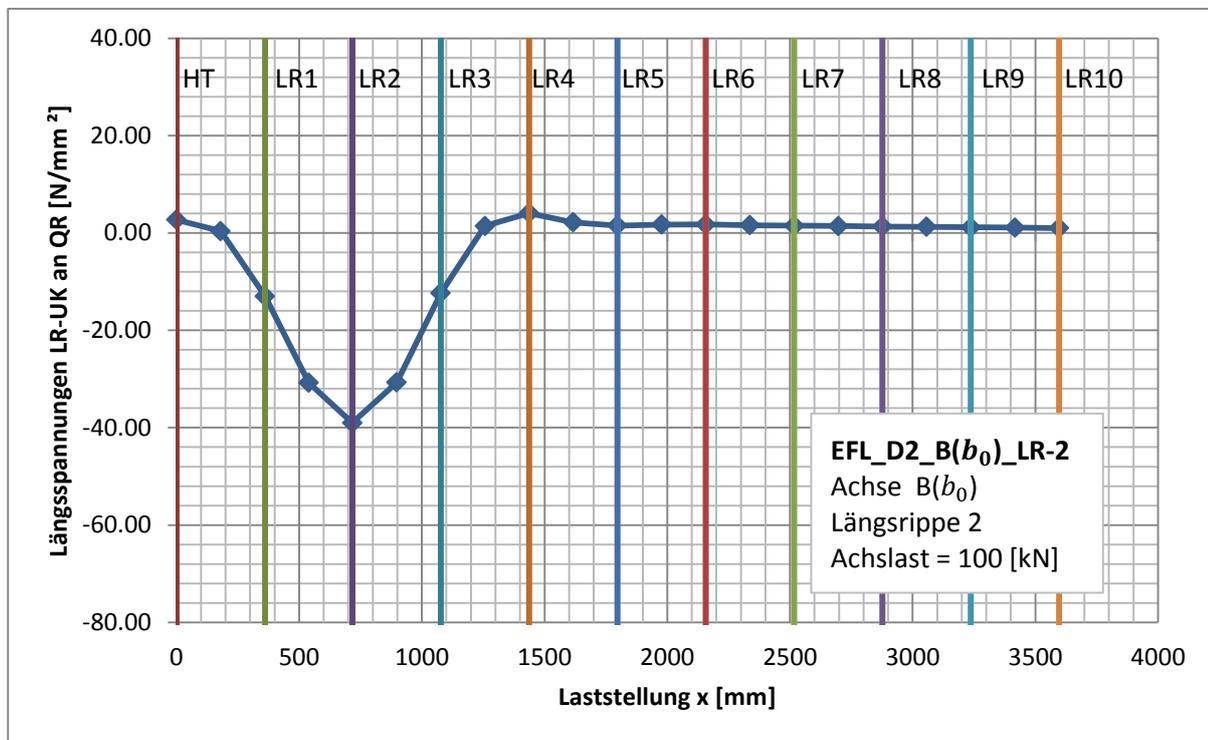
**A 6.2.2. Einflusslinien**

**A 6.2.2.1. Achse B( $b_0$ ):**



HT	LR-1	LR-2	LR-3	LR-4	LR-5	LR-6	LR-7	LR-8	LR-9	LR-10										
-11.73	-30.46	-39.65	-31.98	-13.95	0.05	2.81	0.97	0.35	0.63	0.69	0.60	0.55	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.39	0.36	0.34

**Abbildung 300: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-1**



HT	LR-1	LR-2	LR-3	LR-4	LR-5	LR-6	LR-7	LR-8	LR-9	LR-10										
2.70	0.39	-13.00	-30.78	-38.99	-30.71	-12.35	1.44	4.07	2.19	1.52	1.73	1.74	1.59	1.49	1.41	1.33	1.25	1.17	1.09	1.01

**Abbildung 301: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-2**

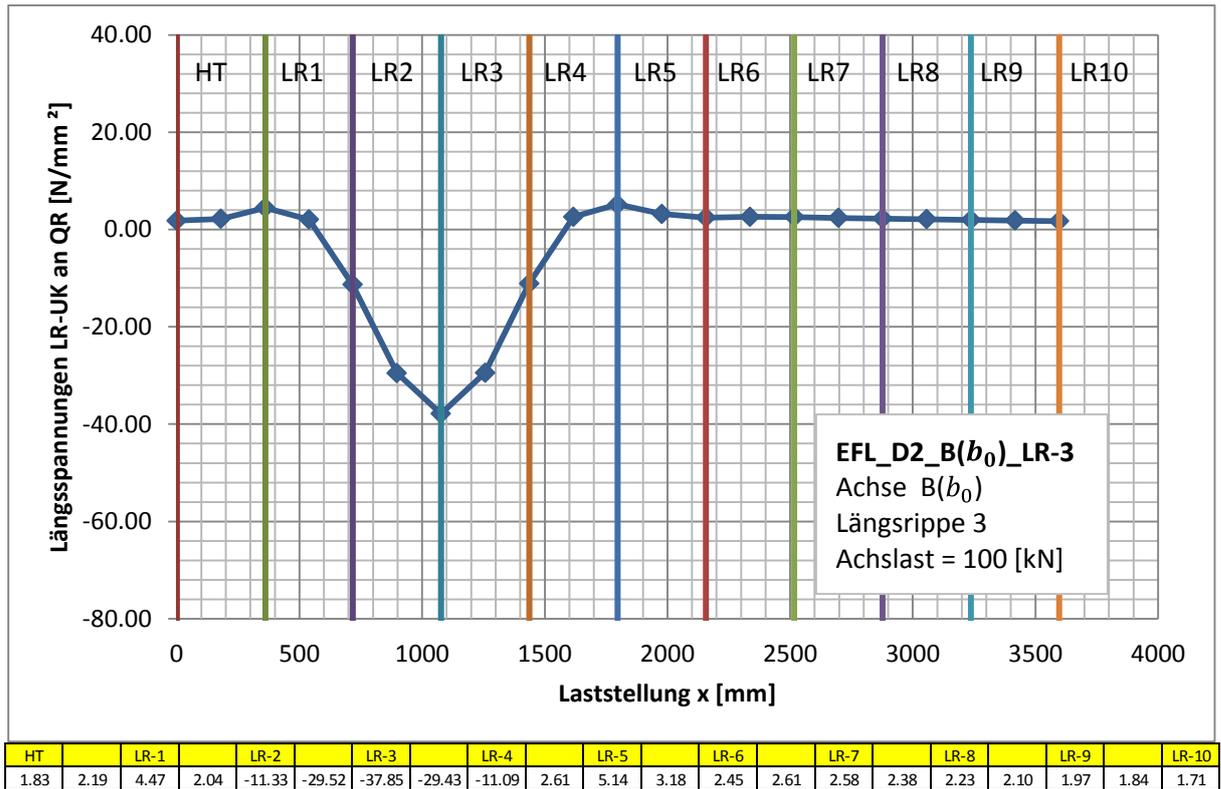


Abbildung 302: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-3

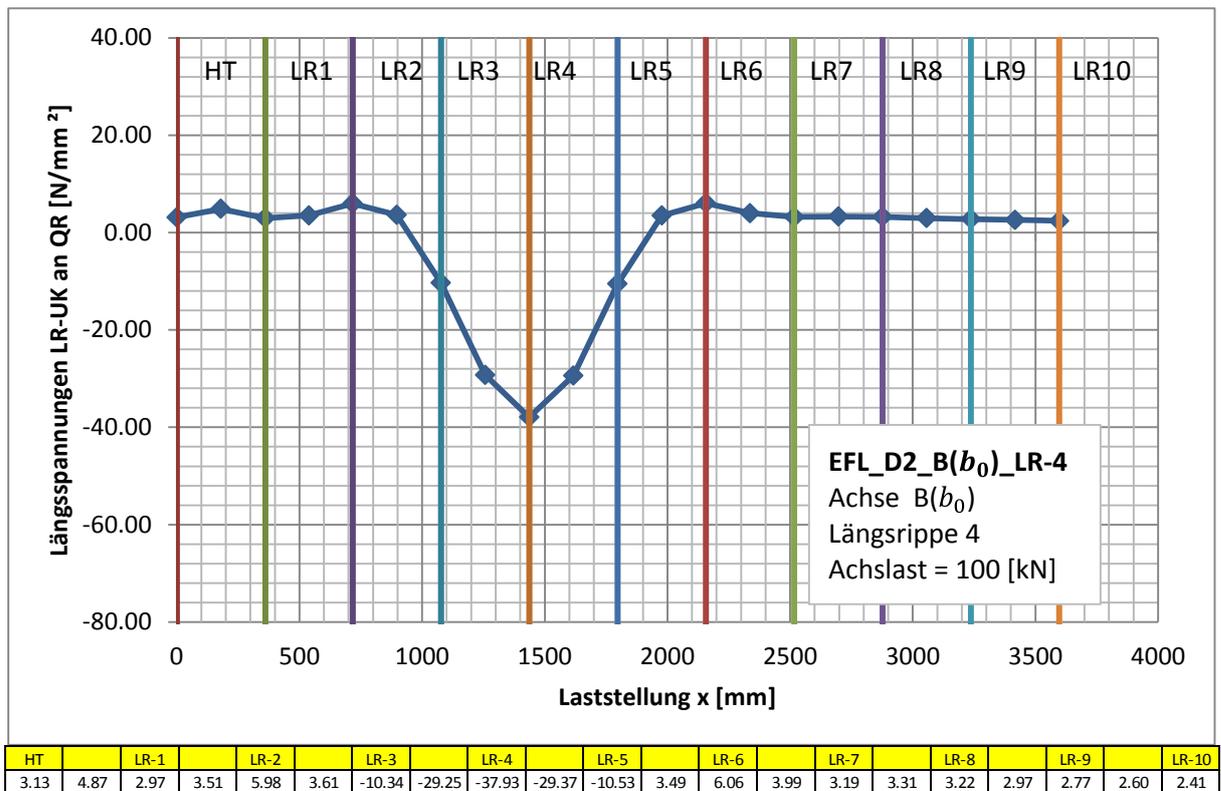


Abbildung 303: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-4

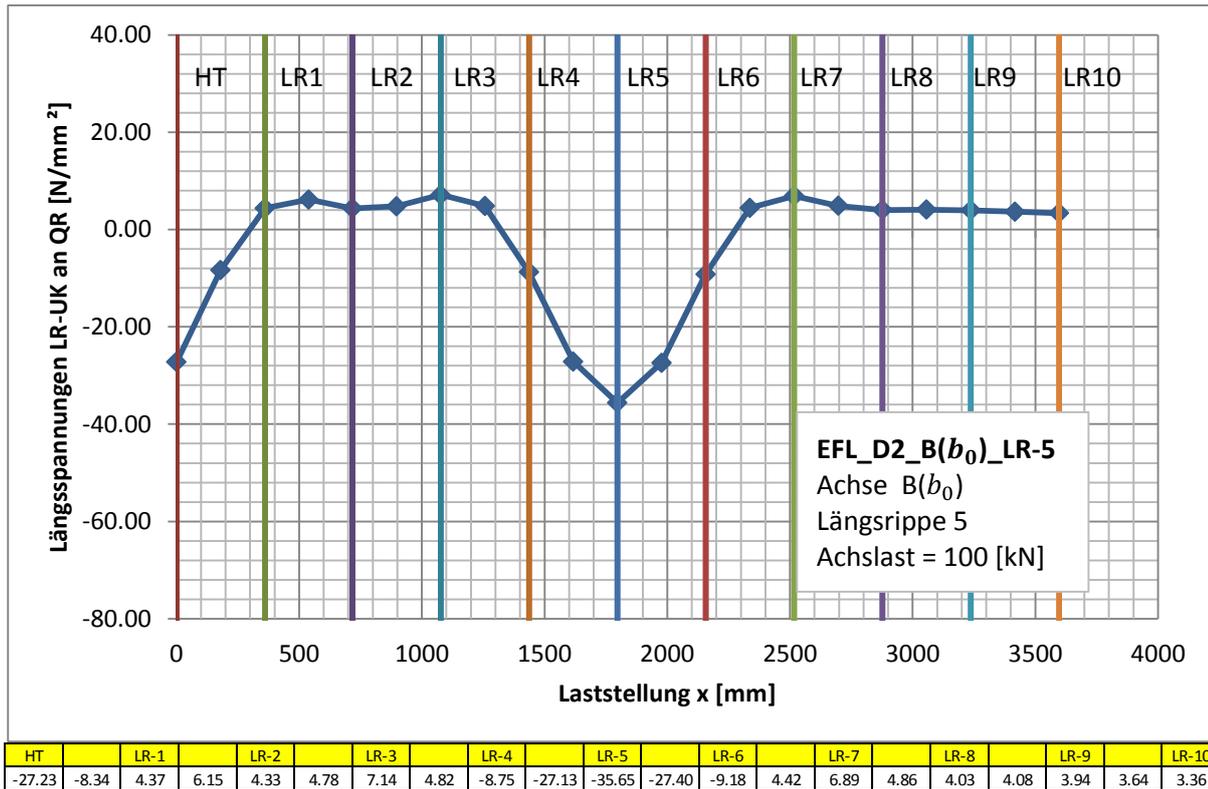


Abbildung 304: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-5

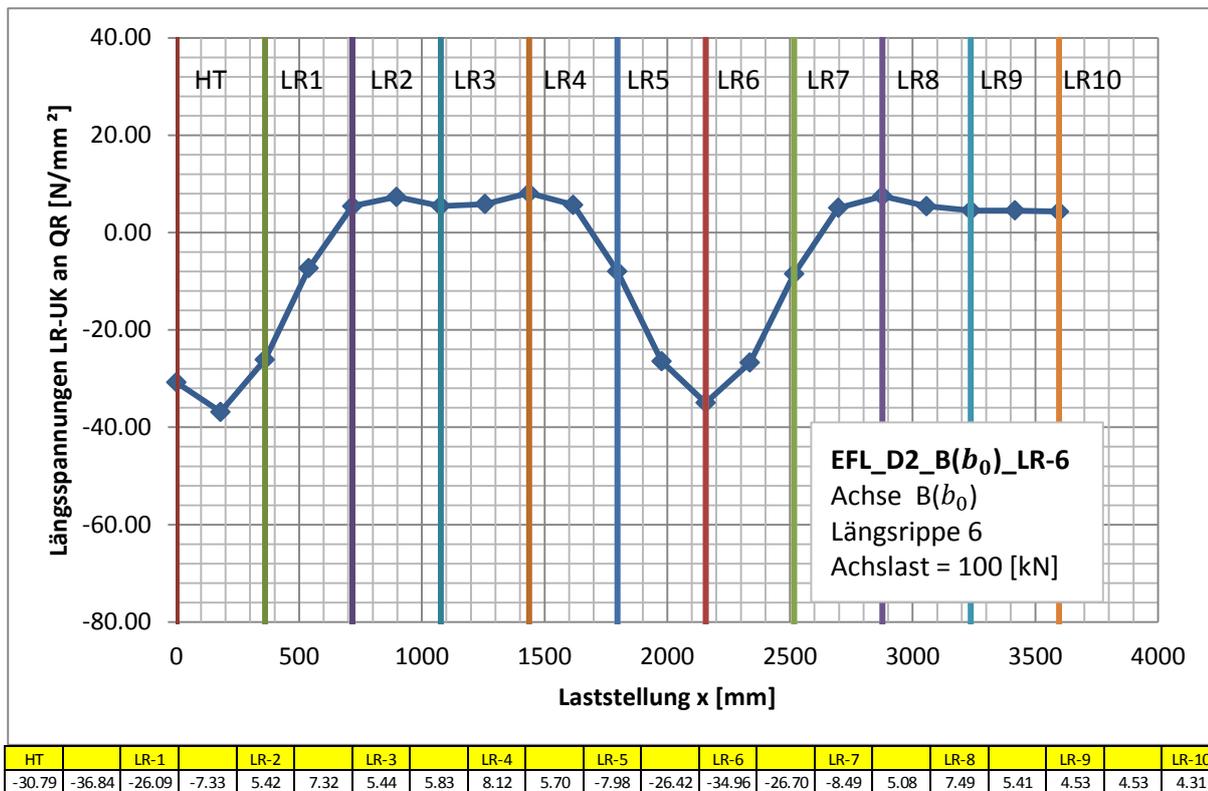


Abbildung 305: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-6

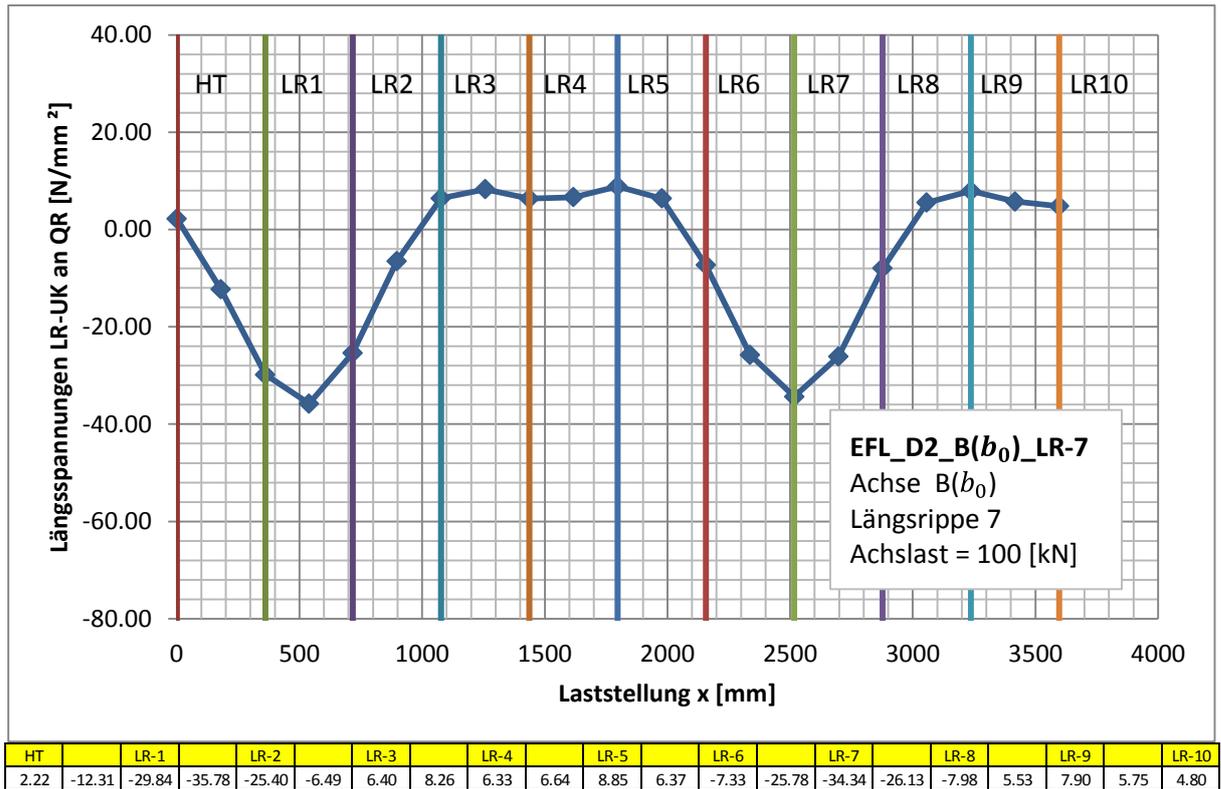


Abbildung 306: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-7

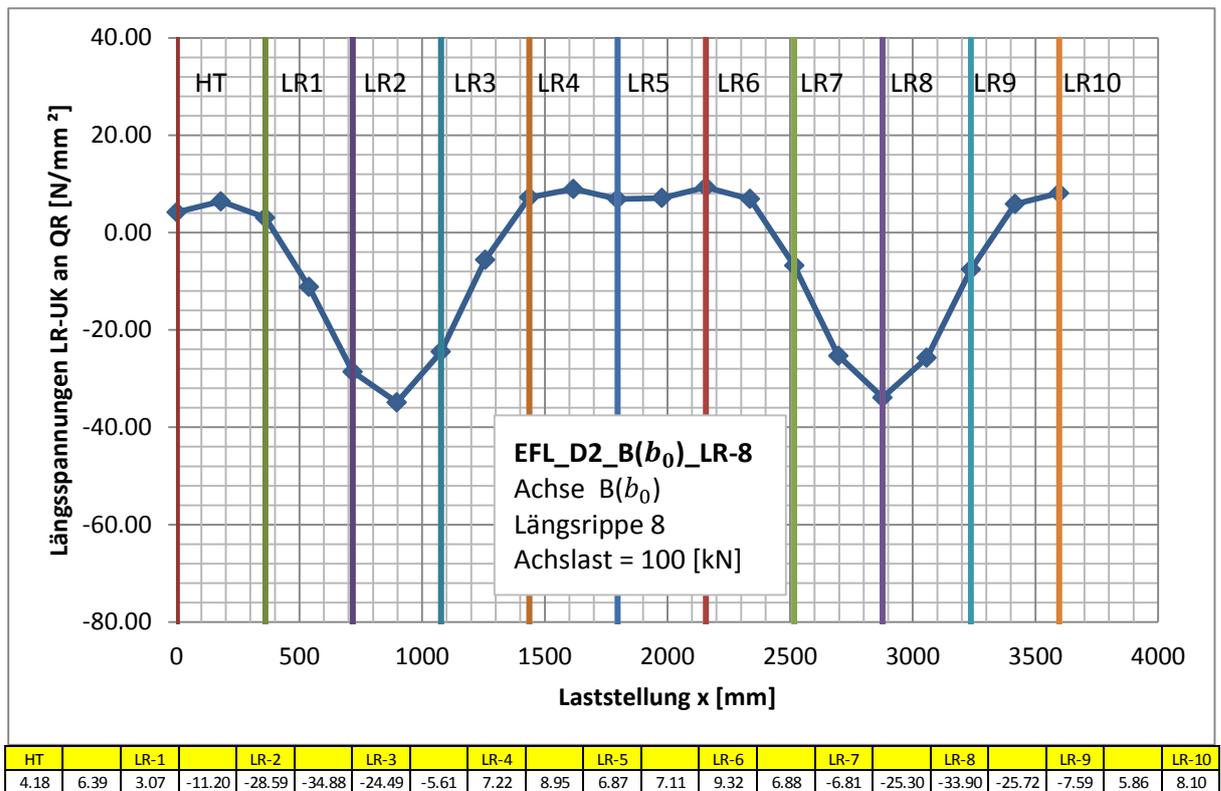


Abbildung 307: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-8

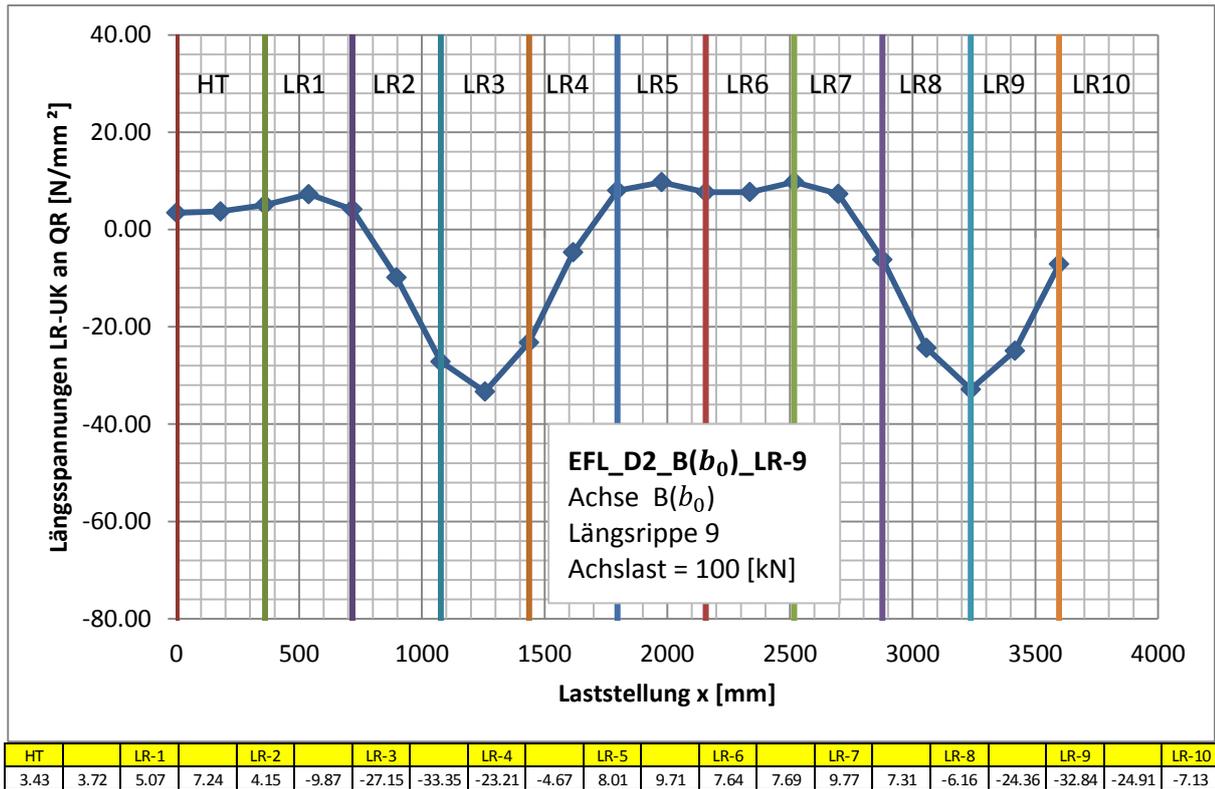


Abbildung 308: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-9

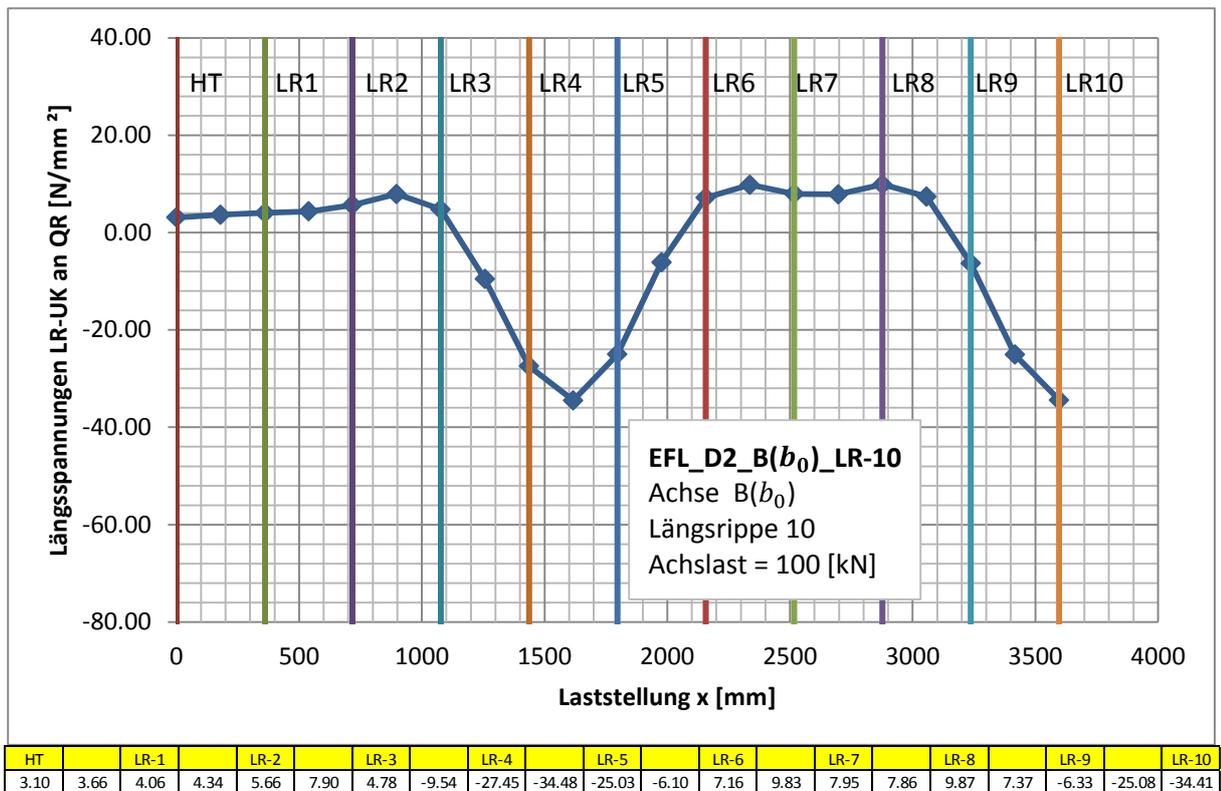
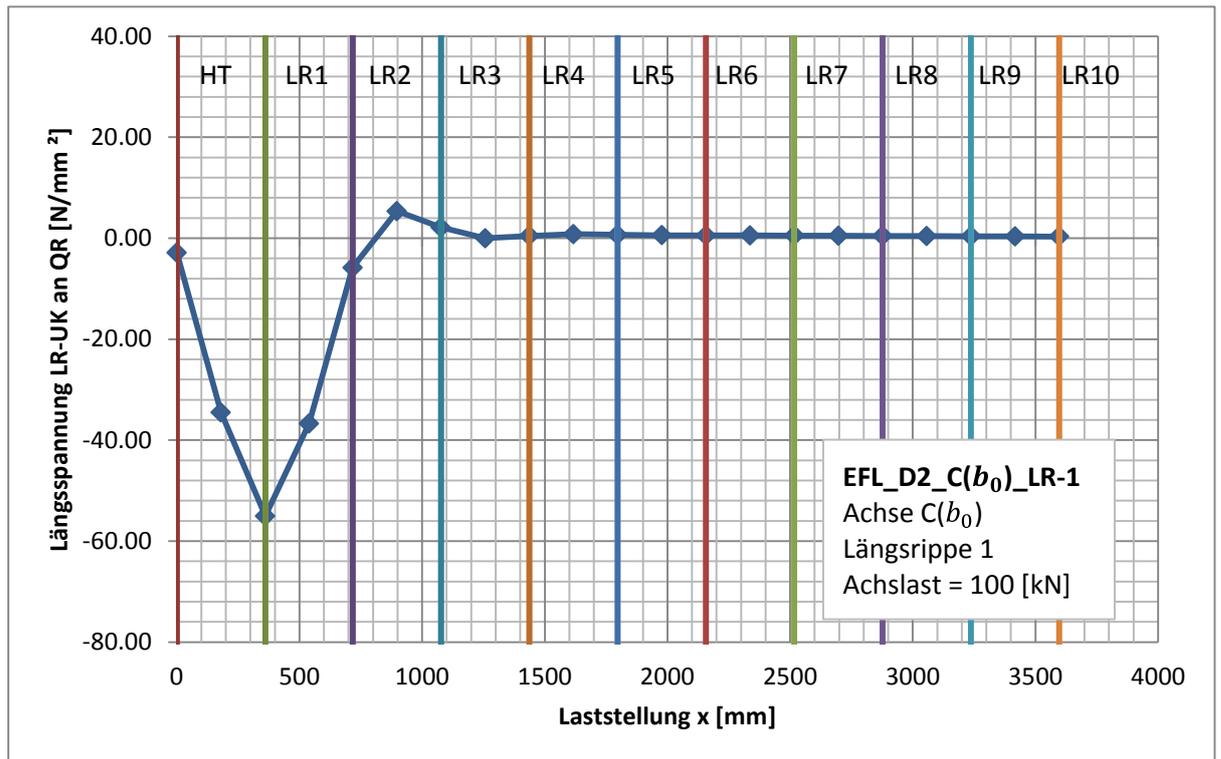


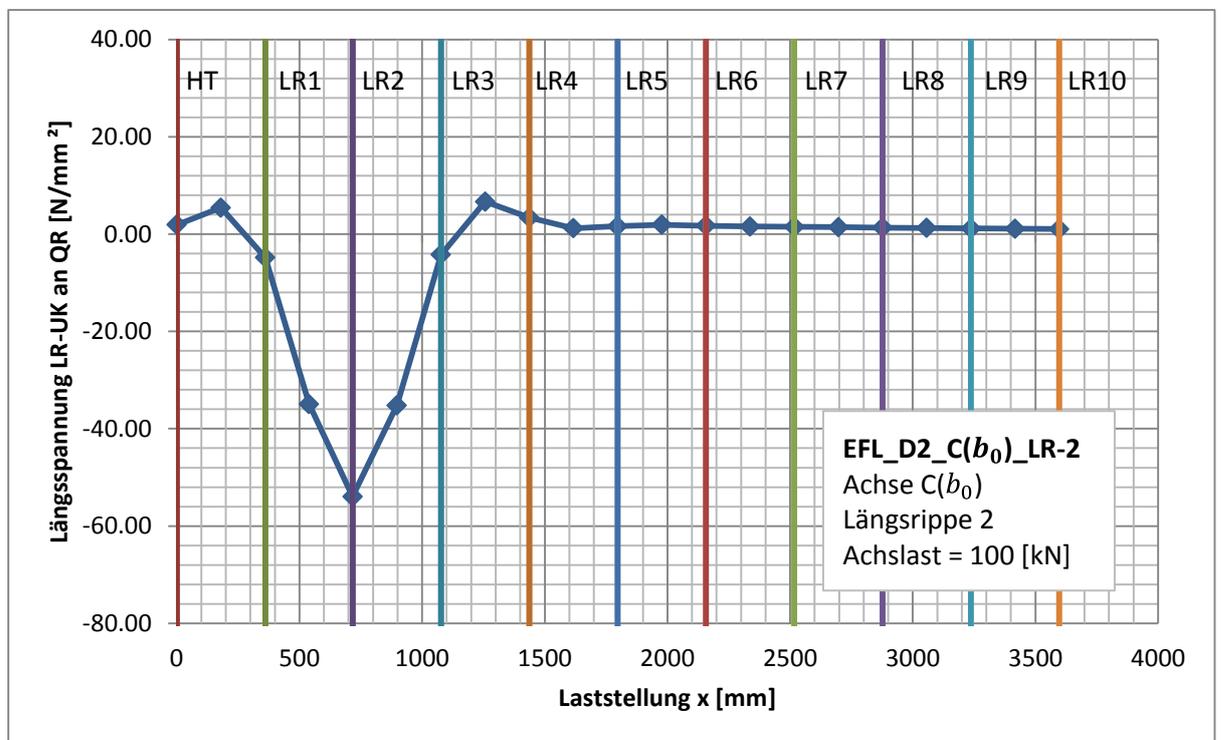
Abbildung 309: Einflusslinie EFL\_D2\_B( $b_0$ )\_LR-10

A 6.2.2.2. Achse C( $b_0$ ):



HT	LR-1	LR-2	LR-3	LR-4	LR-5	LR-6	LR-7	LR-8	LR-9	LR-10										
-2.89	-34.50	-55.04	-36.72	-5.82	5.35	2.13	-0.04	0.46	0.81	0.67	0.57	0.55	0.53	0.50	0.47	0.44	0.41	0.39	0.36	0.34

Abbildung 310: Einflusslinie EFL\_D2\_C( $b_0$ )\_LR-1



HT	LR-1	LR-2	LR-3	LR-4	LR-5	LR-6	LR-7	LR-8	LR-9	LR-10										
1.90	5.43	-4.82	-34.96	-53.95	-35.22	-4.26	6.66	3.41	1.20	1.63	1.90	1.72	1.56	1.49	1.42	1.33	1.24	1.17	1.09	1.01

Abbildung 311: Einflusslinie EFL\_D2\_C( $b_0$ )\_LR-2

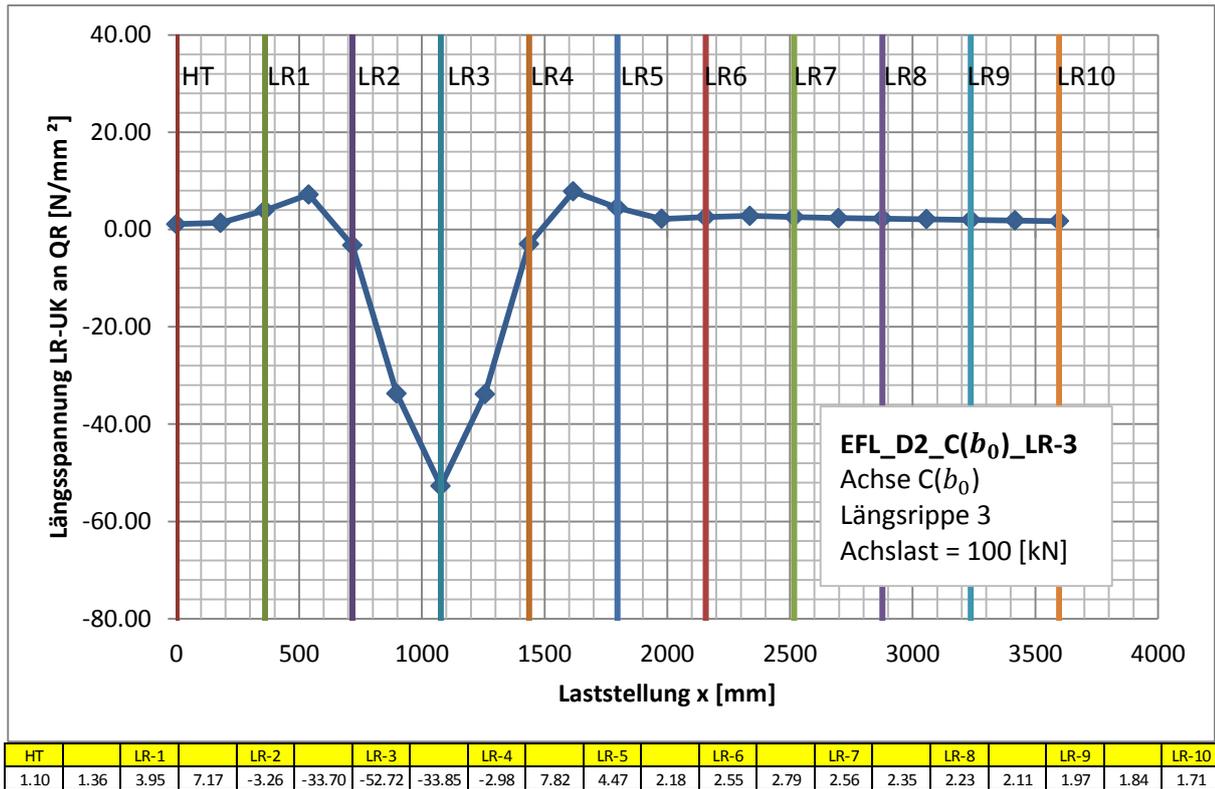


Abbildung 312: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-3

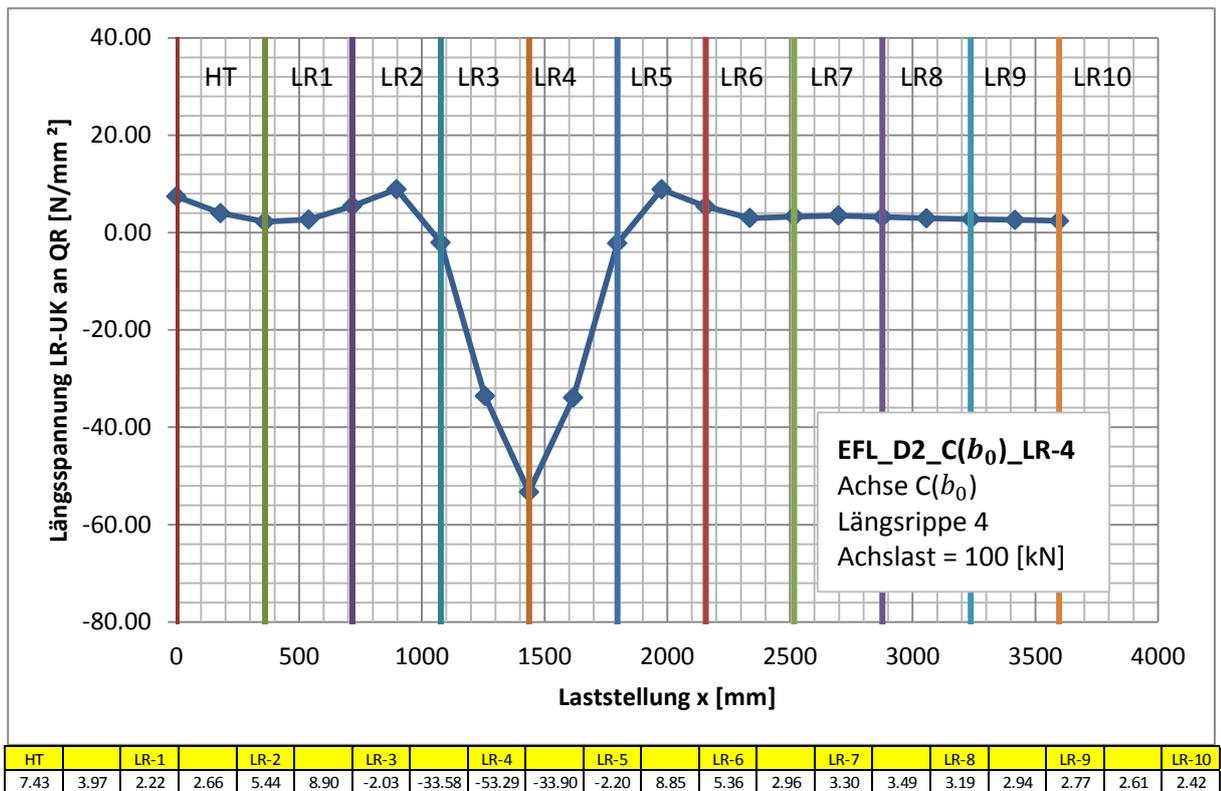


Abbildung 313: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-4

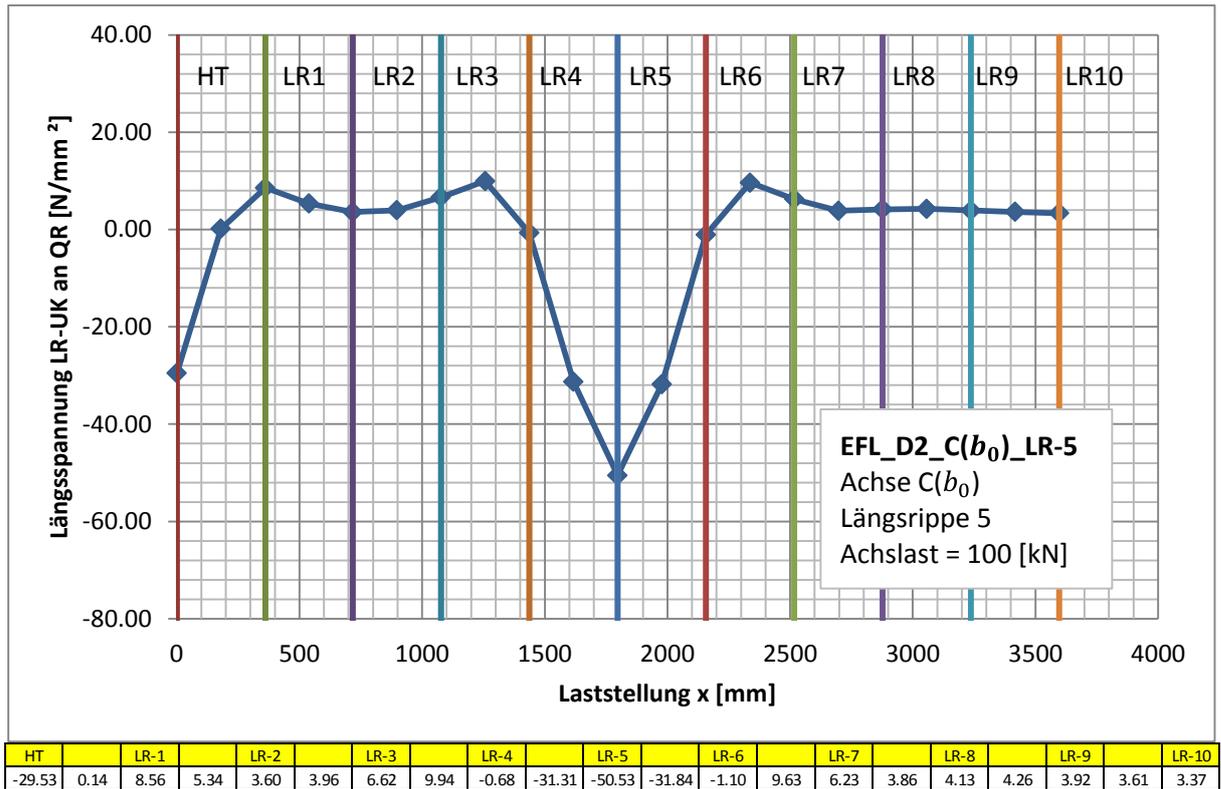


Abbildung 314: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-5

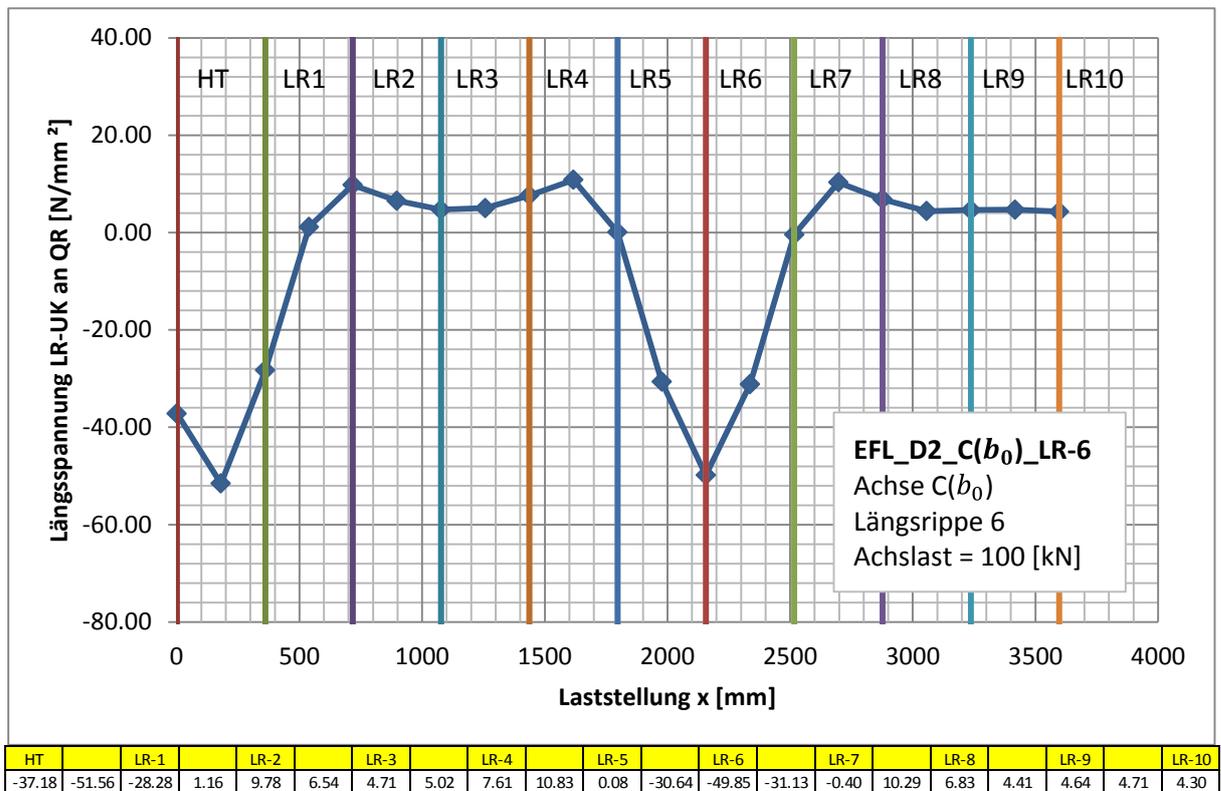


Abbildung 315: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-6

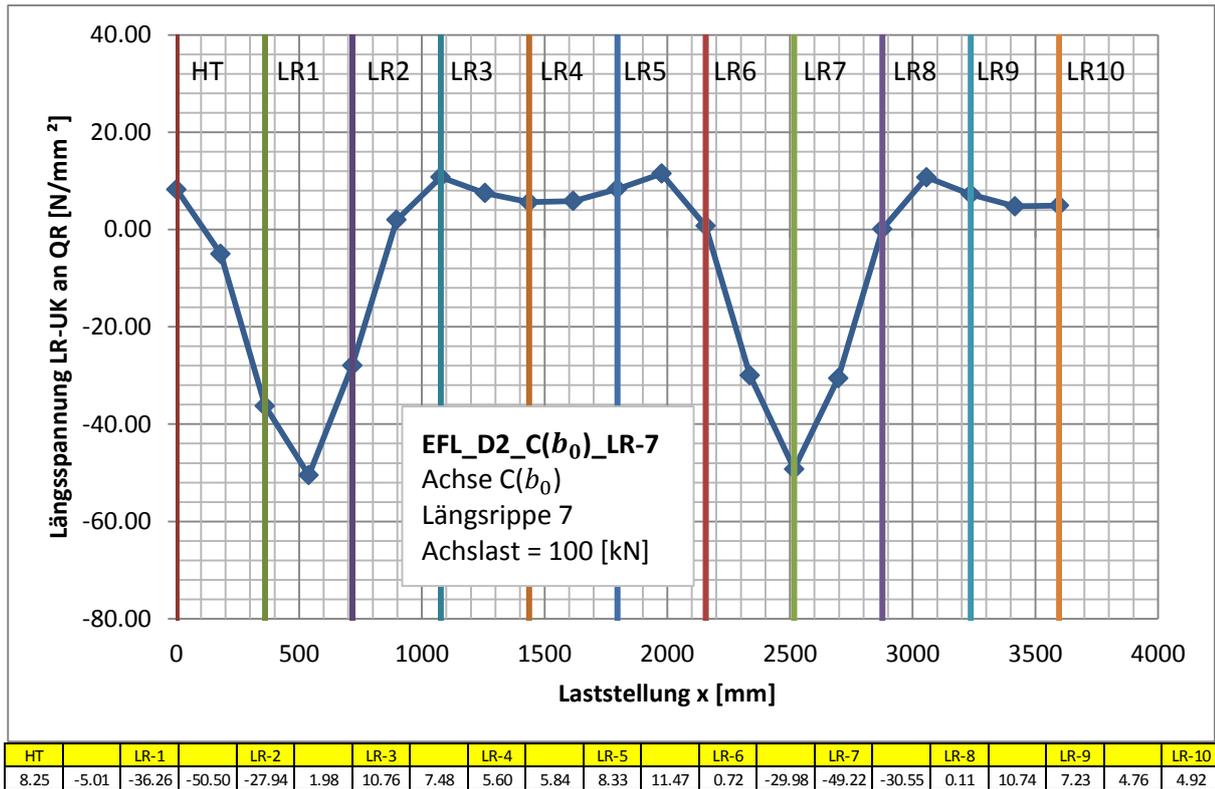


Abbildung 316: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-7

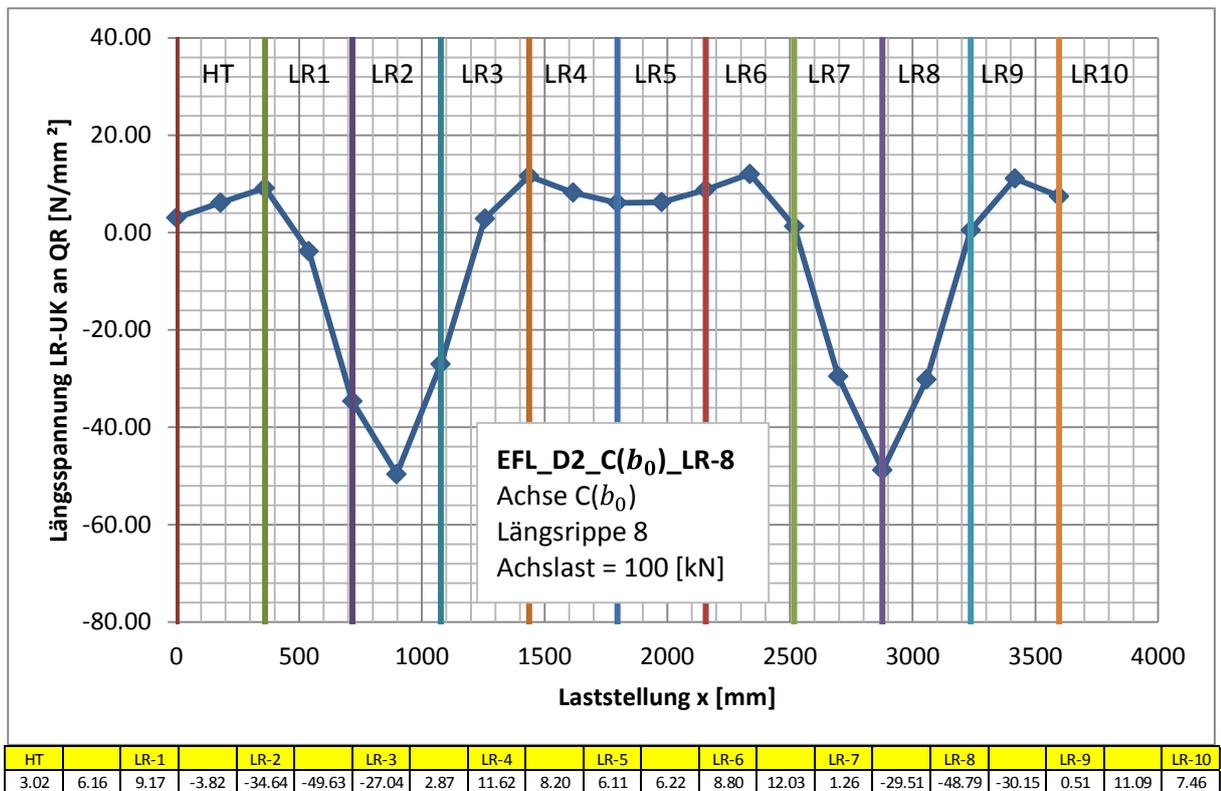


Abbildung 317: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-8

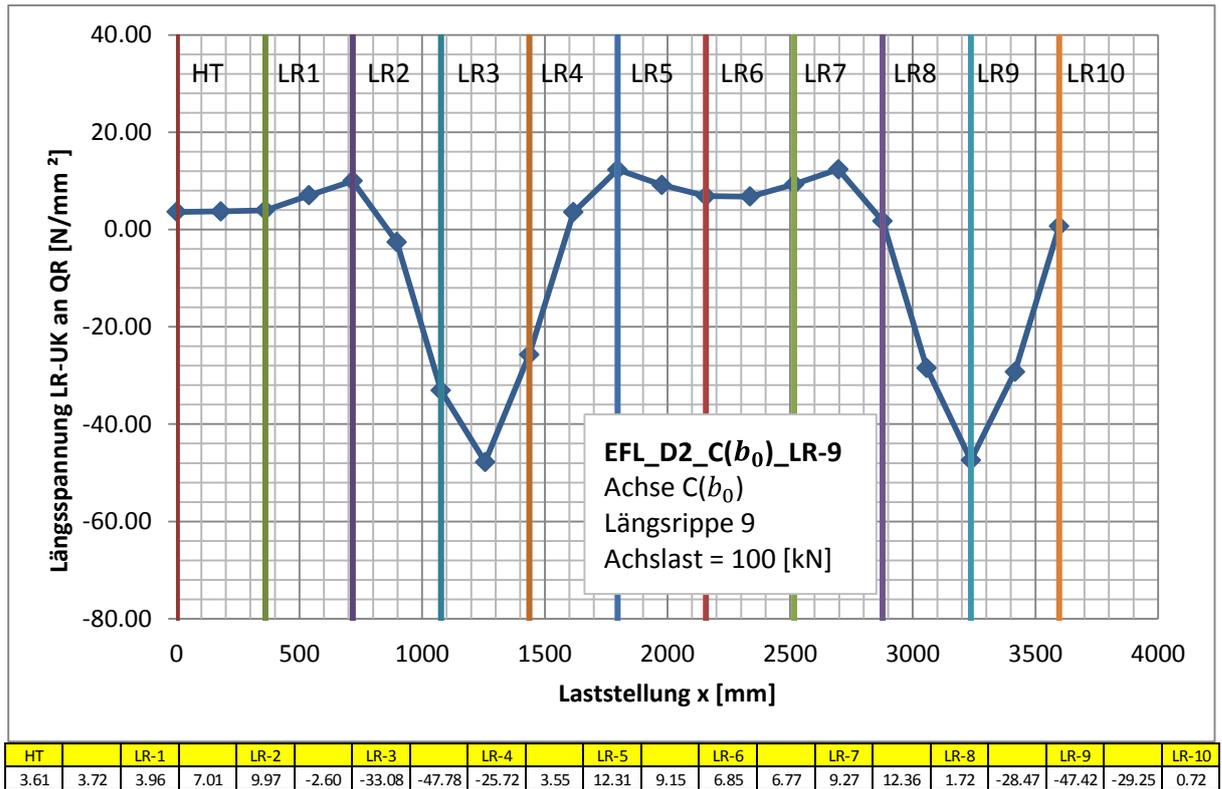


Abbildung 318: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-9

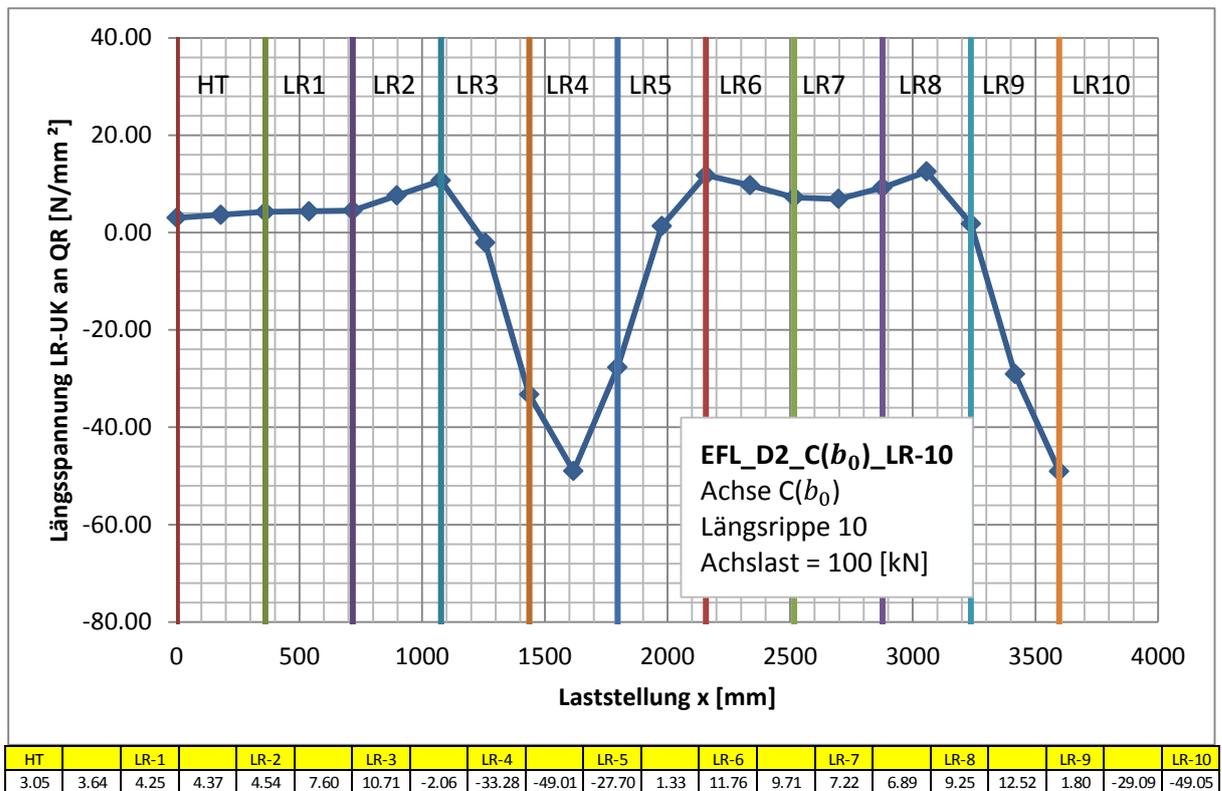


Abbildung 319: Einflusslinie EFL\_D2\_C(b<sub>0</sub>)\_LR-10



## A 7. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ermüdungs- LM4 - Gruppe von Ersatzfahrzeugen nach EN 1991-2: 4.6.5 – Tab.4.7 .....	3
Abbildung 2: Definition der Achsarten nach EN 1991-2: 4.6.5 – Tab.4.8 [1] .....	4
Abbildung 3: Lastausbreitungswinkel für lokale Radlasten nach EN 1991-2: 4.3.6 (3). 4	
Abbildung 4: Achsart C mit lastverteilender Wirkung des Belags für Belagsdicke $t_{Bel} = 70 [mm]$ .....	5
Abbildung 5: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag) .....	6
Abbildung 6: Vorschlag für Lastverteilung nach de Jong [5] .....	7
Abbildung 7: Detail D1 .....	11
Abbildung 8: Maßgebende Lage der Detailpunkte D1 und D1* .....	11
Abbildung 9: Untersuchtes Detail D2 .....	12
Abbildung 10: Maßgebende Lage der Detailpunkte D2 und D2* .....	12
Abbildung 11: Laststellungen (linkes Rad der Achse) in Querrichtung der Brücke – Schnitt A-A .....	13
Abbildung 12: Lastausbreitungswinkel nach EN 1991-2: 4.3.6 (3) [1] .....	14
Abbildung 13: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag) .....	15
Abbildung 14: Modell B-1: isometrische Ansicht - Übersicht .....	16
Abbildung 15: Modell B-2: isometrische Ansicht – Lagerung Belag .....	16
Abbildung 16: Lokales Modell L1: isometrische Ansicht .....	17
Abbildung 17: Lokales Modell L2 (ohne Belag): isometrische Ansicht .....	18
Abbildung 18: Lokales Modell L2m (mit Belag): isometrische Ansicht .....	18
Abbildung 19: Lokales Modell L3m: isometrische Ansicht .....	19
Abbildung 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse B – Detail D1 bei LR-2 & D1* bei LR-8 .....	21
Abbildung 21: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse B – Detail D2 bei LR-2 & D2* bei LR-8 .....	22
Abbildung 22: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse C – Detail D1 bei LR-2 & D1* bei LR-8 .....	23
Abbildung 23: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Überfahrt Achse C – Detail D2 bei LR-2 & D2* bei LR-8 .....	23
Abbildung 24: Isometrische Ansicht Modell A (ohne Belag) .....	1-3
Abbildung 25: Querschnitt A-A - Modell A (ohne Belag) .....	1-3
Abbildung 26: Isometrische Ansicht Modell A - Deckblech .....	1-4
Abbildung 27: Isometrische Ansicht Modell A - Hauptträger .....	1-5
Abbildung 28: Isometrische Ansicht Modell A - Querträger .....	1-5
Abbildung 29: Anschluss Längsrippe an Querrippe Bereich - A .....	1-6
Abbildung 30: Anschluss Längsrippe an Querrippe Bereich - B .....	1-6
Abbildung 31: Diskretisierung des Deckbleches .....	1-7
Abbildung 32: Diskretisierung des Deckbleches – Detail A .....	1-8
Abbildung 33: Diskretisierung des Hauptträgers – Übersicht .....	1-8
Abbildung 34: Diskretisierung des Hauptträgers – Detail B .....	1-8
Abbildung 35: Diskretisierung der Längsrippen – Bereich B .....	1-9
Abbildung 36: Modell A – Detail D1 .....	1-10
Abbildung 37: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad 1 .....	1-11
Abbildung 38: Einflusslinie in Brückenlängsrichtung Detail D1 bei LR-9 – Überfahrt Achse B .....	1-11
Abbildung 39: Modell A - Übersicht: Ansicht von unten .....	1-12
Abbildung 40: Modell A – Detail A .....	1-12

Abbildung 41: Modell A – Detail D1*	1-13
Abbildung 42: Modell A – Detail A	1-13
Abbildung 43: Modell A – Detail D2	1-14
Abbildung 44: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad 2	1-14
Abbildung 45: Einflusslinie in Brückenlängsrichtung Detail D2 bei LR-4 – Überfahrt Achse B	1-15
Abbildung 46: Modell A – Detail A	1-15
Abbildung 47: Modell A – Detail D2*	1-16
Abbildung 48: Modell A – Detail A	1-16
Abbildung 49: EN 1991-2: Tabelle 4.8 – Definition der Radaufstandsflächen u. Radabstände	1-17
Abbildung 50: Laststellungen in Querrichtung der Brücke - Übersicht	1-18
Abbildung 51: Laststellungen in Querrichtung der Brücke – Schnitt A-A	1-18
Abbildung 52: Lastausbreitungswinkel nach EN 1991-2: 4.3.6 (3)	1-19
Abbildung 53: Achsart B ohne lastverteilende Wirkung des Belags	1-19
Abbildung 54: Achsart B mit lastverteilender Wirkung des Belags	1-20
Abbildung 55: Achsart C ohne lastverteilende Wirkung des Belags	1-20
Abbildung 56: Achsart C mit lastverteilender Wirkung des Belags	1-21
Abbildung 57: Laststellung Achsart B( <b>b0</b> ) für Detail D1	1-22
Abbildung 58: Laststellung Achsart B( <b>b</b> ) für Detail D1	1-23
Abbildung 59: Laststellung Achsart C( <b>b0</b> ) für Detail D1	1-24
Abbildung 60: Laststellung Achsart C( <b>b</b> ) für Detail D1	1-25
Abbildung 61: Laststellung Achsart B( <b>b0</b> ) für Detail D2	1-26
Abbildung 62: Laststellung Achsart B( <b>b</b> ) für Detail D2	1-27
Abbildung 63: Laststellung Achsart C( <b>b0</b> ) für Detail D2	1-28
Abbildung 64: Laststellung Achsart C( <b>b</b> ) für Detail D2	1-29
Abbildung 65: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-2	1-30
Abbildung 66: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-8	1-31
Abbildung 67: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-2	1-32
Abbildung 68: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-8	1-33
Abbildung 69: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-2	1-34
Abbildung 70: maßgebende Laststellungen (Achse B & C) für Detail D1 und D1*	1-35
Abbildung 71: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-8	1-35
Abbildung 72: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-2	1-36
Abbildung 73: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-8	1-37
Abbildung 74: Optimierung FE-Netz - Deckblech	1-40
Abbildung 75: Optimierung FE-Netz Deckblech – Detail A	1-40
Abbildung 76: Optimierung FE-Netz Deckblech – Detail B	1-40
Abbildung 77: Optimierung FE-Netz Längsrippen	1-41
Abbildung 78: Optimierung FE-Netz Längsrippen – Detail A	1-41
Abbildung 79: Modell A - Übersicht: Ansicht von oben, Darstellung Pfad D1	1-43
Abbildung 80: Detail D1 – LR 2 und 8: Abgelesene Spannung $\sigma_{tats}$	1-43
Abbildung 81: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D1_B( <b>b0</b> )_2	1-44
Abbildung 82: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D1_B( <b>b</b> )_2	1-44
Abbildung 83: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D1_B( <b>b0</b> )_8	1-45
Abbildung 84: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D1_B( <b>b</b> )_8	1-46
Abbildung 85: Modell A – Darstellung Pfad 2	1-47
Abbildung 86: Detail D2 – LR 2 und 8: Abgelesene Spannung $\sigma_{tats}$	1-47
Abbildung 87: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_2	1-48
Abbildung 88: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_2	1-48

Abbildung 89: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_8 .....	1-49
Abbildung 90: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_8 .....	1-49
Abbildung 91: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D2_B( <b>b0</b> )_2-3 .....	1-51
Abbildung 92: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D2_B( <b>b</b> )_2-3 .....	1-51
Abbildung 93: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D2_B( <b>b0</b> )_7-8 .....	1-52
Abbildung 94: Spannungsverlauf an Deckblechunterseite LF_D2_B( <b>b</b> )_7-8 .....	1-52
Abbildung 95: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_2 .....	1-53
Abbildung 96: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_2 .....	1-53
Abbildung 97: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_8 .....	1-54
Abbildung 98: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_8 .....	1-54
Abbildung 99: FE-Modell nach de Jong [5] – Asphaltbelag auf starr gestütztem Deckblech .....	2-1
Abbildung 100: Druckverteilung auf Deckblech de Jong [5] .....	2-2
Abbildung 101: Vorschlag für Lastverteilung nach de Jong [5] .....	2-2
Abbildung 102: Lokales Modell L1: isometrische Ansicht .....	2-3
Abbildung 103: Belastung: Achse C( <b>b0</b> ) .....	2-4
Abbildung 104: Lokales Modell L2 (ohne Belag): isometrische Ansicht .....	2-5
Abbildung 105: Lokales Modell L2 (ohne Belag): Belastung Achse B( <b>b0</b> ) und Achse C( <b>b0</b> ) .....	2-5
Abbildung 106: Lokales Modell L2 (ohne Belag): Belastung Achse B( <b>b</b> ) und Achse C( <b>b</b> ) .....	2-6
Abbildung 107: Lokales Modell L2m (mit Belag): isometrische Ansicht .....	2-6
Abbildung 108: Lokales Modell L2m (mit Belag): Belastung Achse B( <b>b0</b> ) und Achse C( <b>b0</b> ) .....	2-7
Abbildung 109: Lokales Modell L3m: isometrische Ansicht .....	2-8
Abbildung 110: Lokales Modell L3m – Druckverteilung vertikal im Schnitt A-A .....	2-9
Abbildung 111: Lokales Modell L3m; vertikale Druckverteilung im Schnitt B-B .....	2-10
Abbildung 112: Lokales Modell L3m; Einfluss der Netzverfeinerung in Dickenrichtung auf die Normalspannungen im Deckblech .....	2-11
Abbildung 113: Lokales Modell L3m - Netz B .....	2-12
Abbildung 114: Lokales Modell L3m - Netz C: Übersicht .....	2-12
Abbildung 115: Lokales Modell L3m - Netz C: Detail A .....	2-13
Abbildung 116: Netzverfeinerung in XY – Ebene; Einfluss auf Deckblechspannungen .....	2-13
Abbildung 117: Netzverfeinerung in XY – Ebene; Einfluss auf Deckblechspannungen .....	2-14
Abbildung 118: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L1 – Sommer (40°C) .....	2-15
Abbildung 119: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L2m – Sommer (40°C) .....	2-15
Abbildung 120: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L3m – Sommer (40°C) .....	2-16
Abbildung 121: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L1 – Winter (0°C) .....	2-16
Abbildung 122: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L2m – Winter (0°C) .....	2-17
Abbildung 123: Vertikale Druckverteilung UK. Belag; Lokales Modell L3m – Winter (0°C) .....	2-17
Abbildung 124: Quernormalspannungen $\sigma_{tats}$ an der Deckblechunterseite – Achse C .....	2-20

Abbildung 125: Quernormalspannungen $\sigma_{tats}$ an der Deckblechunterseite – Achse B	2-20
Abbildung 126: Wahrscheinliche Belags E-Module bei unterschiedlichen Temperaturen (aus [6])	3-1
Abbildung 127: Modell B-1; mit Belag/voller Verbund: isometrische Ansicht	3-2
Abbildung 128: Modell B-1: isometrische Ansicht – Detail A	3-3
Abbildung 129: Modell B-2: isometrische Ansicht – Lagerung Belag	3-4
Abbildung 130: Spannungen für Detail D1 und D1*	3-5
Abbildung 131: Maßgebende Spannungen für Detail D2 und D2*	3-6
Abbildung 132: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF_D1_B( <b>b0</b> )_2	3-6
Abbildung 133: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF_D1_B( <b>b0</b> )_8	3-7
Abbildung 134: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF_D2_B( <b>b0</b> )_2	3-7
Abbildung 135: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF_D2_B( <b>b0</b> )_8	3-8
Abbildung 136: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF_D1_B( <b>b0</b> )_2	3-8
Abbildung 137: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse B - LF_D1_B( <b>b0</b> )_8	3-9
Abbildung 138: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF_D2_B( <b>b0</b> )_2	3-9
Abbildung 139: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse B - LF_D2_B( <b>b0</b> )_8	3-10
Abbildung 140: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF_D1_C( <b>b0</b> )_2	3-11
Abbildung 141: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF_D1_C( <b>b0</b> )_7-8	3-11
Abbildung 142: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF_D2_C( <b>b0</b> )_2	3-12
Abbildung 143: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF_D2_C( <b>b0</b> )_8	3-12
Abbildung 144: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF_D1_C( <b>b0</b> )_2	3-13
Abbildung 145: Spannungsverlauf am Deckblech infolge Achse C - LF_D1_C( <b>b0</b> )_7-8	3-13
Abbildung 146: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF_D2_C( <b>b0</b> )_2	3-14
Abbildung 147: Spannungsverlauf an den Längsrippen infolge Achse C - LF_D2_C( <b>b0</b> )_8	3-14
Abbildung 148: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse B – Detail D1 bzw. D1*	4-2
Abbildung 149: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse B – Detail D2 bzw. D2*	4-2
Abbildung 150: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse C – Detail D1 bzw. D1*	4-3
Abbildung 151: Gegenüberstellung der Ergebnisse: Achse C – Detail D2 bzw. D2*	4-3
Abbildung 152: Verkehrssimulation durch angepasstes LM4 nach EN 1991-2 (aus [3])	5-2
Abbildung 153: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart A	5-3
Abbildung 154: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart B	5-3
Abbildung 155: Spurführungsgeometrie und Lastaufstandsfläche Reifen/Achsart C	5-4

Abbildung 156: Praterbrücke - Übersicht FE-Modell (Ansicht von unten).....	5-4
Abbildung 157: Praterbrücke – FE-Modell: Detail A .....	5-5
Abbildung 158: Einflusslinie Detail D1 – Achse A.....	5-5
Abbildung 159: Einflusslinie Detail D1 – Achse B.....	5-6
Abbildung 160: Einflusslinie Detail D1 – Achse C .....	5-6
Abbildung 161: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T1 .....	5-7
Abbildung 162: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T2 .....	5-7
Abbildung 163: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T3 .....	5-8
Abbildung 164: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T4 .....	5-8
Abbildung 165: Spannungsverlauf im Detail D1 – Überfahrt Fahrzeug Typ T5 .....	5-8
Abbildung 166: Schädigungswirksames Lastkollektiv für Punkt D1.....	5-10
Abbildung 167: Praterbrücke - Übersicht FE-Modell (Ansicht von unten).....	5-11
Abbildung 168: Praterbrücke – FE-Modell: Detail A .....	5-11
Abbildung 169: Einflusslinie Detail D2 – Achse A.....	5-12
Abbildung 170: Einflusslinie Detail D2 – Achse B.....	5-12
Abbildung 171: Einflusslinie Detail D2 – Achse C .....	5-12
Abbildung 172: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T1 .....	5-13
Abbildung 173: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T2 .....	5-13
Abbildung 174: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T3 .....	5-14
Abbildung 175: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T4 .....	5-14
Abbildung 176: Spannungsverlauf im Detail D2 – Überfahrt Fahrzeug Typ T5 .....	5-14
Abbildung 177: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt D2.....	5-15
Abbildung 178: Darstellung Kerbdetail Punkt P1 (aus [3]).....	5-16
Abbildung 179: Darstellung Kerbdetail Punkt P2 (aus [3]).....	5-17
Abbildung 180: Darstellung Kerbdetail Punkt P3a (aus [3]).....	5-17
Abbildung 181: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P3a.....	5-18
Abbildung 182: Darstellung Kerbdetail Punkt P3b (aus [3]).....	5-18
Abbildung 183: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P3b.....	5-19
Abbildung 184: Darstellung Kerbdetail Punkt P5 (aus [3]).....	5-19
Abbildung 185: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P5.....	5-20
Abbildung 186: Darstellung Kerbdetail Punkt P7 (aus [3]).....	5-20
Abbildung 187: Schädigungswirksames Lastkollektiv Punkt P7 .....	5-21
Abbildung 188: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_HT .....	6-1
Abbildung 189: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_HT-1 .....	6-1
Abbildung 190: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_1 .....	6-2
Abbildung 191: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_1-2.....	6-2
Abbildung 192: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_2.....	6-2
Abbildung 193: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_2-3.....	6-3
Abbildung 194: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_3.....	6-3
Abbildung 195: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_3-4.....	6-3
Abbildung 196: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_4.....	6-4
Abbildung 197: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_4-5.....	6-4
Abbildung 198: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_5.....	6-4
Abbildung 199: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_5-6.....	6-5
Abbildung 200: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_6.....	6-5
Abbildung 201: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_6-7.....	6-5
Abbildung 202: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_7.....	6-6
Abbildung 203: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_7-8.....	6-6
Abbildung 204: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_8.....	6-6
Abbildung 205: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_8-9.....	6-7

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 206: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_9.....	6-7
Abbildung 207: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_9-10.....	6-7
Abbildung 208: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b0</b> )_10.....	6-8
Abbildung 209: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b</b> )_2.....	6-8
Abbildung 210: Spannungsverlauf LF_D1_B( <b>b</b> )_8.....	6-8
Abbildung 211: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_HT.....	6-9
Abbildung 212: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_HT-1.....	6-9
Abbildung 213: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_1.....	6-9
Abbildung 214: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_1-2.....	6-10
Abbildung 215: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_2.....	6-10
Abbildung 216: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_2-3.....	6-10
Abbildung 217: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_3.....	6-11
Abbildung 218: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_3-4.....	6-11
Abbildung 219: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_4.....	6-11
Abbildung 220: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_4-5.....	6-12
Abbildung 221: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_5.....	6-12
Abbildung 222: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_5-6.....	6-12
Abbildung 223: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_6.....	6-13
Abbildung 224: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_6-7.....	6-13
Abbildung 225: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_7.....	6-13
Abbildung 226: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_7-8.....	6-14
Abbildung 227: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_8.....	6-14
Abbildung 228: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_8-9.....	6-14
Abbildung 229: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_9.....	6-15
Abbildung 230: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_9-10.....	6-15
Abbildung 231: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b0</b> )_10.....	6-15
Abbildung 232: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b</b> )_2-3.....	6-16
Abbildung 233: Spannungsverlauf LF_D1_C( <b>b</b> )_7-8.....	6-16
Abbildung 234: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-1.....	6-17
Abbildung 235: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-2.....	6-18
Abbildung 236: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-3.....	6-18
Abbildung 237: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-4.....	6-19
Abbildung 238: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-5.....	6-19
Abbildung 239: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-6.....	6-20
Abbildung 240: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-7.....	6-20
Abbildung 241: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-8.....	6-21
Abbildung 242: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-9.....	6-21
Abbildung 243: Einflusslinie EFL_D1_B( <b>b0</b> )_LR-10.....	6-22
Abbildung 244: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-1.....	6-22
Abbildung 245: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-2.....	6-23
Abbildung 246: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-3.....	6-23
Abbildung 247: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-4.....	6-24
Abbildung 248: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-5.....	6-24
Abbildung 249: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-6.....	6-25
Abbildung 250: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-7.....	6-25
Abbildung 251: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-8.....	6-26
Abbildung 252: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-9.....	6-26
Abbildung 253: Einflusslinie EFL_D1_C( <b>b0</b> )_LR-10.....	6-27
Abbildung 254: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_HT.....	6-28
Abbildung 255: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_HT-1.....	6-28

Abbildung 256: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_1	6-29
Abbildung 257: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_1-2	6-29
Abbildung 258: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_2	6-29
Abbildung 259: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_2-3	6-30
Abbildung 260: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_3	6-30
Abbildung 261: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_3-4	6-30
Abbildung 262: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_4	6-31
Abbildung 263: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_4-5	6-31
Abbildung 264: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_5	6-31
Abbildung 265: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_5-6	6-32
Abbildung 266: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_6	6-32
Abbildung 267: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_6-7	6-32
Abbildung 268: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_7	6-33
Abbildung 269: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_7-8	6-33
Abbildung 270: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_8	6-33
Abbildung 271: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_8-9	6-34
Abbildung 272: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_9	6-34
Abbildung 273: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_9-10	6-34
Abbildung 274: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b0</b> )_10	6-35
Abbildung 275: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_2	6-35
Abbildung 276: Spannungsverlauf LF_D2_B( <b>b</b> )_8	6-35
Abbildung 277: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_HT	6-36
Abbildung 278: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_HT-1	6-36
Abbildung 279: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_1	6-36
Abbildung 280: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_1-2	6-37
Abbildung 281: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_2	6-37
Abbildung 282: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_2-3	6-37
Abbildung 283: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_3	6-38
Abbildung 284: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_3-4	6-38
Abbildung 285: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_4	6-38
Abbildung 286: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_4-5	6-39
Abbildung 287: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_5	6-39
Abbildung 288: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_5-6	6-39
Abbildung 289: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_6	6-40
Abbildung 290: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_6-7	6-40
Abbildung 291: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_7	6-40
Abbildung 292: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_7-8	6-41
Abbildung 293: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_8	6-41
Abbildung 294: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_8-9	6-41
Abbildung 295: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_9	6-42
Abbildung 296: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_9-10	6-42
Abbildung 297: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b0</b> )_10	6-42
Abbildung 298: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b</b> )_2	6-43
Abbildung 299: Spannungsverlauf LF_D2_C( <b>b</b> )_8	6-43
Abbildung 300: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-1	6-44
Abbildung 301: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-2	6-44
Abbildung 302: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-3	6-45
Abbildung 303: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-4	6-45
Abbildung 304: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-5	6-46
Abbildung 305: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-6	6-46

Abbildung 306: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-7.....	6-47
Abbildung 307: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-8.....	6-47
Abbildung 308: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-9.....	6-48
Abbildung 309: Einflusslinie EFL_D2_B( <b>b0</b> )_LR-10.....	6-48
Abbildung 310: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-1.....	6-49
Abbildung 311: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-2.....	6-49
Abbildung 312: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-3.....	6-50
Abbildung 313: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-4.....	6-50
Abbildung 314: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-5.....	6-51
Abbildung 315: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-6.....	6-51
Abbildung 316: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-7.....	6-52
Abbildung 317: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-8.....	6-52
Abbildung 318: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-9.....	6-53
Abbildung 319: Einflusslinie EFL_D2_C( <b>b0</b> )_LR-10.....	6-53

## A 8. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Schädigungen der Kerbdetails P1 bis P7, D1 und D2 bei Überfahrt der einzelnen Fahrzeugtypen.....	24
Tabelle 2: Maßgebende Laststellungen und zugehörige Maximalspannung für die untersuchten Detailpunkte.....	1-38
Tabelle 3: Maßgebende Laststellungen für Achse B der untersuchten Detailpunkte ..	1-42
Tabelle 4: Maßgebende Laststellungen für Achse C der untersuchten Detailpunkte ..	1-50
Tabelle 5: Zusammenfassung der Ergebnisse an Modell A .....	1-55
Tabelle 6: Vergleich der Quernormalspannungen bezüglich der Diskretisierung ....	2-14
Tabelle 7: Vergleich der Quernormalspannungen im Deckblech - $\sigma_{max}$ und $\sigma_{tats}$ (Achse C) .....	2-19
Tabelle 8: Maßgebende Laststellungen für Modell B-1 & B-2 infolge Achse B .....	3-4
Tabelle 9: Maßgebende Laststellungen für Modell B-1 & B-2 infolge Achse C .....	3-5
Tabelle 10: Zusammenfassung der Ergebnisse Modell B-1 .....	3-15
Tabelle 11: Zusammenfassung der Ergebnisse Modell B-2 .....	3-15
Tabelle 12: Typenaufteilungsschlüssel für Spur 2 – Detail D1 .....	5-9
Tabelle 13: Typenaufteilungsschlüssel für Spur 2 – Detail D2 .....	5-15
Tabelle 14: Schädigungsanteile in [%] der einzelnen Achslasten bzw. Fahrzeugtypen für die untersuchten Detailpunkte.....	5-22
Tabelle 15: Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen der Detailpunkte P1 bis P7.....	5-23
Tabelle 16: Zusammenfassung der Ermüdungsschädigungen der Detailpunkte P1 - P7, D1 & D2 .....	5-23



## A 9. Literaturnachweis

- **Normen**

- [1] ÖNORM EN 1991-2, Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke, Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken, 01.08.2004, Österreichisches Normungsinstitut
- [2] ÖNORM EN 1993-1-9, Eurocode 3 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 1-9: Ermüdung, 01.11.2005, Österreichisches Normungsinstitut

- **Bücher/Skripten/Diplomarbeiten/Berichte**

- [3] Unterweger Harald, Stering Wilfried, A-23 Praterbrücke, B0214/2 Stromtragwerk, Dehnungsmessungen am Fahrbahndeck unter fließendem Verkehr – Basiskonzept und Ausschreibungsgrundlagen, Vergleich der Messungen mit numerischen Berechnungen und Auswirkungen auf die Restlebensdauer, Institut für Stahlbau, TU Graz, Dezember 2012
- [4] Unterweger Harald, Taras Andreas, A-23 Praterbrücke, B0214/2 Stromtragwerk, Lebensdauerberechnung für das Fahrbahndeck infolge der lokalen Schwerverkehrsbelastung, Institut für Stahlbau, TU Graz, März 2012
- [5] Foppe Bouk Peter DE JONG, Renovation techniques for fatigue cracked orthotropic steel bridge decks, 09.01.2007
- [6] Gerhard Sedlacek, Hans Eisel, Wolfgang Hensen, Bertram Kühn, Michael Paschen, Leitfaden zum DIN Fachbericht 103, Stahlbrücken, Ausgabe März 2003, ISBN: 3-433-01689-5

- **Software**

- [7] ABAQUS, Standard 6.10-1