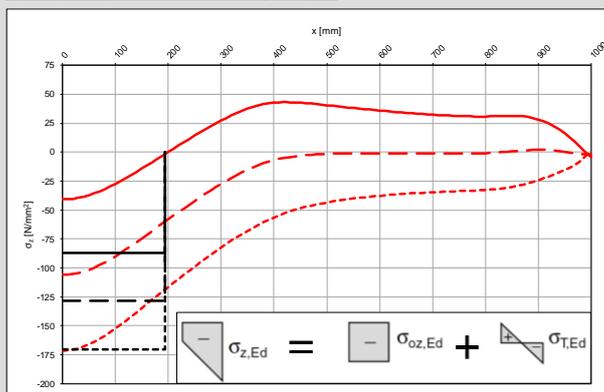
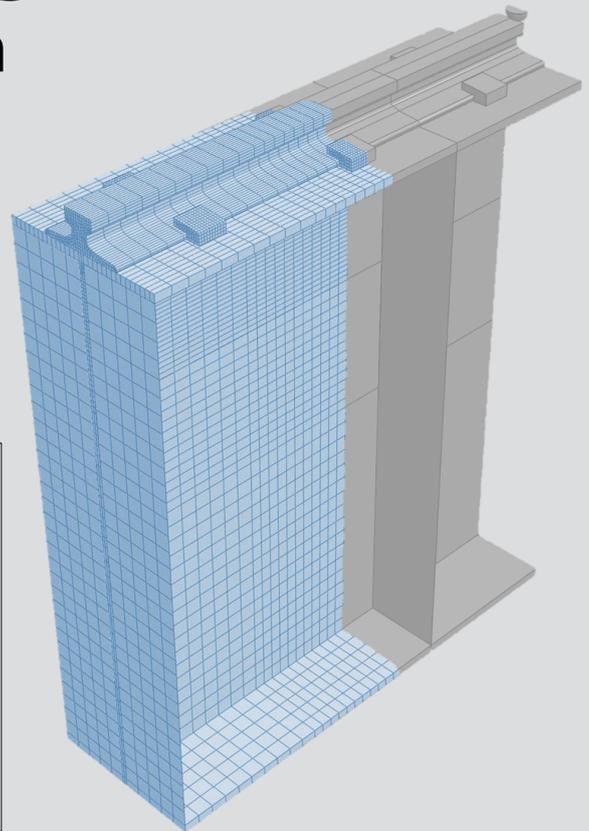
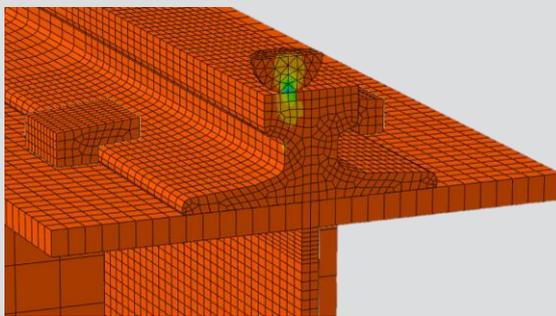


Numerische Parameterstudie zu lokalen Spannungen in Kranbahnträgern



D-5-90/2021

Palzenberger Christian, B.Sc.
 Institut für Stahlbau
 Technische Universität Graz



MASTERARBEIT

NUMERISCHE PARAMETERSTUDIE ZU LOKALEN SPANNUNGEN IN KRANBAHNTRÄGERN

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur (Dipl.-Ing.) / Master of Science (M.Sc.)

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften / Konstruktiver Ingenieurbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften / Institut für Stahlbau

Betreuer:

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

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

Dipl.-Ing. Paul Zauchner, B.Sc.

Verfasser:

Christian Palzenberger, B.Sc.

Graz, September 2021

Eidesstattliche Erklärung

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

Graz, 7. September 2021

Christian Palzenberger

Statutory declaration

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

Graz, 7 September 2021

Christian Palzenberger

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei meinen Betreuern Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Harald Unterweger, Ass.-Prof. Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Markus Kettler und Dipl.-Ing. Paul Zauchner, B.Sc. bedanken, die es mir ermöglichten, die vorliegende Arbeit am Institut für Stahlbau zu verfassen und mich dabei tatkräftig unterstützten. Dank ihrer zahlreichen Hilfestellungen bei Fragen oder Problemen konnten während der Ausarbeitungszeit regelmäßig Fortschritte verzeichnet werden.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meiner gesamten Studienzzeit stets motiviert und mit positiven Worten unterstützt hat. Das entgegenbrachte Vertrauen und die Geduld halfen mir durch diese anstrengende, aber auch spannende Zeit.

Ebenso danke ich meinen Freunden und Studienkollegen dafür, dass sie die gemeinsamen Lernstunden erträglicher gemacht und zu einem lustigen und dennoch lehrreichen Studium beigetragen haben.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Partnerin Michelle bedanken, die auch in schwierigen Zeiten immer für mich da ist und mich stets in allen Lebenslagen unterstützt. Mit viel Geduld und hilfreichen Ratschlägen trug sie auch erheblich dazu bei, dass ich mein Studium erfolgreich abschließen konnte.

Numerische Parameterstudie zu lokalen Spannungen in Kranbahnträgern

Kurzfassung

Die vorliegende Masterarbeit behandelt die lokalen Spannungen in Stegblechen von Kranbahnträgern unter Einwirkung einer exzentrischen Radlast.

Es werden dabei einerseits die durch eine zentrisch angreifende Radlast verursachten lokalen Vertikalspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ (in der Stegebene wirkende Membranspannungen) betrachtet. Andererseits wird auch auf die durch eine seitlich exzentrische Radlast bzw. infolge der Torsionswirkung am Kranbahnträgerobergurt hervorgerufenen Querbiegespannungen im Stegblech $\sigma_{T,Ed}$ eingegangen.

Diese lokalen Spannungen werden im Rahmen einer Parameterstudie an Kranbahnträgern und Kranschienen unterschiedlicher Dimensionen zuerst anhand der aktuell im Eurocode 3, Teil 6 (bzw. ÖNORM EN 1993-6) verankerten Berechnungsmodelle ermittelt. Anschließend folgt eine dreidimensionale Finite Elemente-Berechnung und die Gegenüberstellung der Ergebnisse.

Außerdem werden die Verdrehungen des Kranbahnträgerobergurts (bzw. der Stegoberkante) zufolge exzentrischer Radlast ermittelt und verglichen.

Ziele dieser Arbeit sind, die Einflüsse der Abmessungen der Kranbahnträger und Kranschienen auf die lokalen Spannungen im Steg aufzuzeigen sowie die Berechnungsmodelle nach Eurocode auf ihre Treffsicherheit bei verschiedenen Konfigurationen zu untersuchen und zu bewerten.

Numerical parameter study on local stresses in crane runway girders

Abstract

The present master's thesis deals with the local stresses in web plates of crane runway girders under the impact of an eccentric wheel load.

On the one hand, the local vertical stresses $\sigma_{oz,Ed}$ (membrane stresses acting in the web) caused by a centric wheel load are considered. On the other hand, the transverse bending stresses in the web plate $\sigma_{T,Ed}$ - as a result of the torsion of the crane runway girder's upper flange due to a laterally eccentric wheel load - are discussed.

These local stresses are first determined in a parameter study on crane runway girders and crane rails of different dimensions using the calculation models currently embedded in Eurocode 3, part 6 (respectively ÖNORM EN 1993-6). This is followed by three-dimensional finite element calculations and a comparison of the results.

In addition, the rotations of the crane runway girder's upper flange (or rather the upper edge of the web) due to the eccentric wheel load are determined and compared.

The aim of this work is to show the influences of the dimensions of the crane runway girders and crane rails on the local stresses in the web as well as to check the accuracy of the calculation models contained in the Eurocode for different configurations.

Inhalt

1	Einleitung und Inhalte der Arbeit.....	1
1.1	Allgemeines	1
1.2	Ziele der Arbeit.....	1
1.3	Definition der in der Arbeit verwendeten Variablen und Begriffe	2
1.3.1	Variablen.....	2
1.3.2	Begriffe	4
1.3.3	Abkürzungen.....	4
2	Untersuchte Modelle und gewählte Parameter	5
2.1	Varianten der Modelle M1 - M10	5
2.2	Tabellarische Übersicht über die Modelle.....	8
2.3	Grafische Darstellung der Querschnitte.....	10
3	Spannungsermittlung nach Eurocode EN 1993-6.....	12
3.1	Rechenmodell nach Oxford.....	12
3.2	Rechenmodell im Eurocode EN 1993-6.....	13
3.3	Lokale Spannungen im Steg zufolge Radlast am Obergurt	13
3.3.1	Lokale vertikale Druckspannungen.....	14
3.3.2	Lokale Biegespannungen.....	16
3.4	Befestigung der Kranschiene am Obergurt.....	17
3.5	Ergebnisse der Berechnung nach Eurocode	18
3.5.1	Querschnittswerte Kranbahnträger.....	18
3.5.2	Querschnittswerte Kranschienen.....	19
3.5.3	Maximalwerte der lokalen Spannungen im Steg.....	22
3.5.4	Verlauf der Spannungen und Verdrehungen in Trägerlängsrichtung	25
4	Numerische Berechnung.....	28
4.1	Übersicht Systeme	28
4.2	Eingabe der FE-Modelle in Abaqus.....	29
4.2.1	Bauteile und Assembly.....	29
4.2.2	Randbedingungen und Lasten	30
4.2.3	Kontaktbedingungen	33
4.2.4	Generieren des FE-Netzes.....	34
4.3	Auswertung	36
4.3.1	Ergebnispfade.....	36
4.3.2	Berechnung der Verdrehung	38
5	Vergleich FE-Berechnung - Eurocode	40
5.1	Vergleich auf Spannungsebene	40
5.1.1	Verlauf der lokalen vertikalen Druckspannungen zufolge Radlast	40

5.1.2	Verlauf der lokalen Biegespannungen zufolge exzentrischer Radlast.....	42
5.1.3	Vergleich der Varianten von Modell M1	44
5.1.4	Vergleich der Modelle mit Profilschiene A 55.....	55
5.1.5	Vergleich der Modelle mit Blockschiene 60/30	60
5.2	Vergleich auf Verdrehungsebene	64
5.2.1	Verlauf der Verdrehungen zufolge exzentrischer Radlast.....	64
5.2.2	Vergleich der Varianten von M1	65
5.2.3	Vergleich der Modelle mit Profilschiene A 55.....	72
5.3	Vergleich der lokalen Spannungen und Verdrehungen der Modelle M2 bis M14 - Zusammenfassung	75
6	Zusammenfassung.....	82
6.1	Vergleich FE - EC auf Spannungsebene	82
6.1.1	Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen	82
6.1.2	Vergleich der lokalen Biegespannungen	84
6.1.3	Vergleich der lokalen Membranspannungen	86
6.2	Vergleich FE - EC auf Verdrehungsebene.....	88
6.2.1	Vergleich der Verdrehung des Obergurtes	88
6.2.2	Vergleich der Verdrehung der Stegoberkante.....	90
7	Diskussion und Ausblick.....	91
	Literatur.....	92
	Software.....	92
	Anhang.....	93

1 Einleitung und Inhalte der Arbeit

1.1 Allgemeines

Die Bemessung und Ausführung von Kranbahnträgern wird maßgeblich von den lokalen Spannungen im Stegblech zufolge Radlasten beeinflusst, wobei hier insbesondere das Ermüdungsproblem nahe der Schweißnaht zwischen Steg und Obergurt eine große Rolle spielt [2].

Im Betrieb bewegt sich die Kranbrücke entlang des Kranbahnträgers, weshalb die maximalen lokalen Spannungen grundsätzlich überall entlang der Trägerlängsrichtung in ähnlicher Größenordnung auftreten können. Diese immer wieder auftretende lokale Belastung führt bei mittlerem bis schwerem Kranbetrieb dazu, dass zumeist der Ermüdungsnachweis für die notwendige Stegblechdicke maßgebend wird. Dabei ist es von großer Wichtigkeit, die tatsächlich vorhandenen lokalen Spannungen zu kennen [2].

In der Praxis lässt sich eine gewisse Exzentrizität der Radlast auf den Kranbahnträger durch den Schräglauf der Kranbrücke nicht vermeiden, welche in ihrer Größe im Eurocode bzw. nationalen Anhang definiert ist. Bei genauerer Betrachtung ergibt diese exzentrische Radlast im Stegblech einerseits eine vertikale Druckspannung zufolge zentrischem Radlastanteil, andererseits eine durch Torsion der Kranschiene und des Kranbahnträgerobergurts zufolge exzentrischem Radlastanteil hervorgerufene Biegespannung [2].

Die Auslegung von Kranbahnträgern ist derzeit in der ÖNORM EN 1993-6 bzw. dem Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 6: Kranbahnen [1] geregelt, in Österreich ist dementsprechend zusätzlich der nationale Anhang (ÖNORM B 1993-6) [3] anzuwenden.

Das in der Norm verankerte Modell zur Berechnung der Biegespannungen im Stegblech zufolge exzentrischer Radlasten geht auf die analytische Lösung von Oxford [4], [5] zurück. Darin wird eine gemeinsame Verdrehung von Kranschiene und Kranbahnträgerobergurt angenommen, in der Praxis ist dies jedoch (im Besonderen bei geklemmten Profilschienen) nicht der Fall. Außerdem bleiben Einflüsse der Klemmwirkung der Schienenklemmen und einer elastischen Unterlage zwischen Schiene und Trägerobergurt nicht berücksichtigt.

Daher ist es notwendig, die Treffsicherheit dieses analytischen Modells nach heutigem Stand der Technik mittels dreidimensionalen Finite Elemente-Berechnungen zu überprüfen und auf allfällige Schwachpunkte hinzuweisen.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, im Zuge einer numerischen Parameterstudie verschiedene querausgesteifte Kranbahnträger (d. h. unterschiedliche Querschnittsgeometrien, jeweils geschweißte I-Profile) und Schientypen (zwei untersuchte Profilschienen, eine Blockschiene) numerisch zu untersuchen.

Die Resultate sollen einerseits dazu dienen, im Vergleich mit den derzeit im Eurocode verankerten Berechnungsmodellen deren Qualität bzw. Zuverlässigkeit zu überprüfen und andererseits eventuell nicht erfasste geometrische und konstruktive Einflüsse der Kranschiene bzw. des Kranbahnträgers zu erheben, um damit verbesserte Nachweisformeln zu generieren.

Der Vergleich zwischen den analytischen Modellen nach Eurocode und den numerischen Berechnungen wird dabei auf Spannungs- sowie auf Verdrehungsebene (lokale Verdrehung der Trägerobergurte) geführt.

So werden in der Arbeit die lokalen Spannungen im Stegblech aus den FE-Berechnungen mit jenen der analytischen Lösung gegenübergestellt. Ebenfalls wird der Verlauf der Verdrehung des Obergurts in Trägerlängsrichtung und der daraus resultierende Verlauf der Stegbiegespannungen in Trägerlängsrichtung zwischen den Quersteifen mit den analytischen Verläufen nach Oxford verglichen.

1.3 Definition der in der Arbeit verwendeten Variablen und Begriffe

1.3.1 Variablen

a	...	Abstand der Quersteifen in Trägerlängsrichtung
A_r	...	Querschnittsfläche der Kranschiene
b_{eff}	...	effektive Flanschbreite des Obergurts
b_f	...	Breite des Obergurts (bzw. Flanschbreite)
b_{fr}	...	Breite des Kranschiemenfußes
b_r	...	Breite des Kranschiemenkopfes
e_a	...	Schwerpunktastand der Kranschiene (bezogen auf Oberkante Abnutzungsfläche)
e_{KL}	...	Abstand der Schienenklemmen in Trägerlängsrichtung
η	...	Hilfswert zur Ermittlung der Spannungen bzw. der Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung
E	...	Elastizitätsmodul (E-Modul) des Materials
e_y	...	seitliche Exzentrizität der Radlast
$F_{z,Ed}$	...	Bemessungswert der Radlast
G	...	Schubmodul des Materials
h_r	...	Nennhöhe der Kranschiene
$h_{r,red}$	...	reduzierte Nennhöhe der Kranschiene nach planmäßiger Abnutzung
h_w	...	Höhe des Stegblechs (bzw. Steghöhe, entspricht dem lichten Abstand zwischen den Flanschen)
$I_{f,eff}$	...	Flächenmoment zweiten Grades des Flansches um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}
I_r	...	Flächenmoment zweiten Grades der Kranschiene um die horizontale Schwerlinie der Kranschiene
I_{rf}	...	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts aus Schiene und Flansch mit der effektiven Breite b_{eff}
I_T	...	Summe der Torsionsträgheitsmomente von Kranbahnträgerobergurt u. Kranschiene
$I_{T,f}$	...	Torsionsträgheitsmoment des Kranbahnträgerobergurts
$I_{T,r}$	...	Torsionsträgheitsmoment der Kranschiene
k	...	Schienenkopfbreite der Kranschiene
λ	...	Hilfswert zur Berechnung der Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung
L	...	Länge des Kranbahnträgers (entspricht der Spannweite des Einfeldträgers im statischen System)

l_{eff}	...	effektive Lastausbreitungslänge
$\overline{m_d}$	...	elastische Drehbettung des Obergurts durch biegesteif angeschlossenes Stegblech
μ	...	Reibungskoeffizient
ν	...	Querkontraktionszahl (Poissonzahl) des Materials
$\varphi(x_{EC})$	...	Verlauf der Verdrehung des Trägerquerschnitts in Trägerlängsrichtung nach Eurocode
$\varphi_{v1}(x)$	...	Verlauf der Verdrehung des Obergurts in Trägerlängsrichtung aus FE-Berechnung
$\varphi_{v2}(x)$	...	Verlauf der Verdrehung der Stegoberkante in Trägerlängsrichtung aus FE-Berechnung
φ_x	...	Verdrehung um die x-Achse (Trägerlängsachse)
φ_y	...	Verdrehung um die y-Achse (Horizontalachse des Trägerquerschnitts)
φ_z	...	Verdrehung um die z-Achse (Vertikalachse des Trägerquerschnitts)
$\sigma_{oz,Ed}$	...	lokale vertikale Druckspannung im Steg zufolge zentrischer Radlast (Membranspannung) nach Eurocode
$\sigma_{T,c}$	...	lokale Biegedruckspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastzugewandter Stegseite) aus FE-Berechnung
$\sigma_{T,Ed}$	...	lokale Biegespannungen im Steg zufolge Torsion des Obergurts durch exzentrische Radlast nach Eurocode
$\sigma_{T,Ed}(x_{EC})$	...	Verlauf der lokalen Biegespannungen im Stegblech in Trägerlängsrichtung nach Eurocode
$\sigma_{T,t}$	...	lokale Biegezugspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastabgewandter Stegseite) aus FE-Berechnung
$\sigma_{z,c}$	...	maximale vertikale Druckspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastzugewandter Stegseite, Membran- und Biegeanteil) aus FE-Berechnung
$\sigma_{z,Ed}$	...	lokale vertikale Druckspannungen im Steg zufolge exzentrischer Radlast nach Eurocode (Membran- und Biegeanteil)
$\sigma_{z,Ed,max}$	...	rechnerisch maximale lokale Vertikalspannung im Steg zufolge exzentrischer Radlast nach Eurocode (Membran- und Biegeanteil)
$\sigma_{z,Ed,min}$	...	rechnerisch minimale lokale Vertikalspannung im Steg zufolge exzentrischer Radlast nach Eurocode (Membran- und Biegeanteil)
$\sigma_{z,0,r}$	...	rechnerische Membranspannung als Mittelwert aus $\sigma_{z,c}$ und $\sigma_{z,t}$ (Spannung in der Schwerachse des Stegblechs) aus FE-Berechnung
$\sigma_{z,0,A}$	...	aus FE-Berechnung exportierte Membranspannung (Spannung in der Schwerachse des Stegblechs)
$\sigma_{z,t}$	...	minimale vertikale Druckspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastabgewandter Stegseite, Membran- und Biegeanteil) aus FE-Berechnung
T_{Ed}	...	Torsionsmoment zufolge seitlicher Exzentrizität der Radlast

t_f	...	Dicke des Obergurts (bzw. Flanschdicke)
t	...	Dicke eines Querschnittsteils
t_r	...	Mindestnenndicke der Kranschiene unterhalb der Abnutzungsfläche
t_w	...	Dicke des Stegblechs (bzw. Stegdicke)
u_x	...	Verschiebung in x-Richtung
u_y	...	Verschiebung in y-Richtung
u_z	...	Verschiebung in z-Richtung
$u_{z,c}$	...	Verschiebung eines Knotens auf der lastzugewandten Stegseite in z-Richtung
$u_{z,t}$	...	Verschiebung eines Knotens auf der lastabgewandten Stegseite in z-Richtung
x	...	Pfadlänge (ausgehend vom Lasteinleitungspunkt) aus FE-Berechnung
x_{EC}	...	Pfadlänge (ausgehend von der Quersteife) für die Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung nach Eurocode

1.3.2 Begriffe

Membranspannung

- ... Als Membranspannung werden in dieser Arbeit die vertikalen Normalspannungskomponenten bezeichnet, welche in der Stegblechebene wirken und über die Stegblechdicke konstant sind.

1.3.3 Abkürzungen

EC	...	Eurocode
FE	...	Finite Elemente
M	...	FE-Modell (z. B. M1 = „Finite Elemente-Modell 1“)
QS	...	Querschnitt

2 Untersuchte Modelle und gewählte Parameter

Wie bereits erwähnt, wurden im Zuge dieser Parameterstudie mehrere unterschiedliche Schientypen und Trägergeometrien betrachtet und dabei einzelne Querschnittsabmessungen verändert, um die Einflüsse dieser Dimensionen auf die lokalen Spannungen im Steg aufzuzeigen. Im Detail wurden die Stegblechhöhe h_w und die Flanschdicke t_f variiert, wobei der jeweils andere Parameter gleichzeitig „eingefroren“ (d. h. unverändert belassen) wurde. Insgesamt wurden zehn verschiedene Trägerquerschnitte untersucht (QS 1 bis 10, siehe Abb. 3 bis 5)

Folgende Tab. 1 gibt einen Überblick über die Anzahl der in dieser Arbeit bearbeiteten Finite Elemente-Modelle, wobei für die Konfigurationen mit Profilschienen jeweils acht Varianten untersucht wurden.

Tab. 1: Gesamtanzahl der bearbeiteten FE-Modelle

Schientyp	Modelle je Schientyp	Varianten je Modell	Modelle gesamt
Profilschiene A 100	4 (M1 - M4)	8 (a - h)	$4 \cdot 8 = 32$
Profilschiene A 55	6 (M5 - M10)	8 (a - h)	$6 \cdot 8 = 48$
Blockschiene 60/30	4 (M11 - M14)	1	$4 \cdot 1 = 4$
Σ			84

2.1 Varianten der Modelle M1 - M10

Für die Modelle mit Profilschienen (M1 - M10) wurden mehrere unterschiedliche Varianten der Schienenlagerung (d. h. mit und ohne zusätzlicher elastischer Schienenunterlage) bzw. Schienenbefestigung (d. h. Schienenklemmen mit verschiedenen Abständen, jeweils mit und ohne Spalt) modelliert und berechnet, dabei wurde die Träger- und Schienengeometrie unverändert belassen. Als „Spalt“ ist dabei die vertikale Lücke zwischen den oberen Seitenflächen des Schienenfußes und den „freien Unterseiten“ der Schienenklemmen zu verstehen, da in der Praxis auch kein kraftschlüssiger Kontakt zwischen Schiene und Klemme vorgesehen ist.

In untenstehender Tab. 2 werden sämtliche Varianten und die jeweilige Lagerung bzw. Befestigung der Schiene sowie Größe des Spalts angeführt.

Tab. 2: Übersicht der Varianten der Modelle mit Profilschienen

Variante M..	Lagerung Schiene auf Obergurt	Befestigung Schiene auf Obergurt	Spalt Klemme - Schiene
a	starr	keine	-
b	elastische Unterlage	keine	-
c	starr	Klemmen	1 mm
d	elastische Unterlage	Klemmen	1 mm
e	starr	Klemmen	0 mm
f	starr	Klemmen (durchgehend)	0 mm
g	elastische Unterlage	Klemmen	0 mm
h	elastische Unterlage	Klemmen (durchgehend)	0 mm

Die Abstände der Klemmen wurden mit $e_{KL} = 600 \text{ mm}$ für die Modelle M1 bis M4 bzw. mit $e_{KL} = 300 \text{ mm}$ für die Modelle M5 bis M10 gewählt (jeweils für die Varianten c, d, e und g).

Bei den Varianten f und h der Modelle M1 bis M10 wurden fiktive, durchgehende Klemmen (d. h. durchlaufende Klemmleisten) modelliert, wie in Abb. 2 dargestellt.

Zur besseren Anschaulichkeit sind die genannten Varianten in folgender Abb. 1 schematisch dargestellt und einzeln beschrieben.

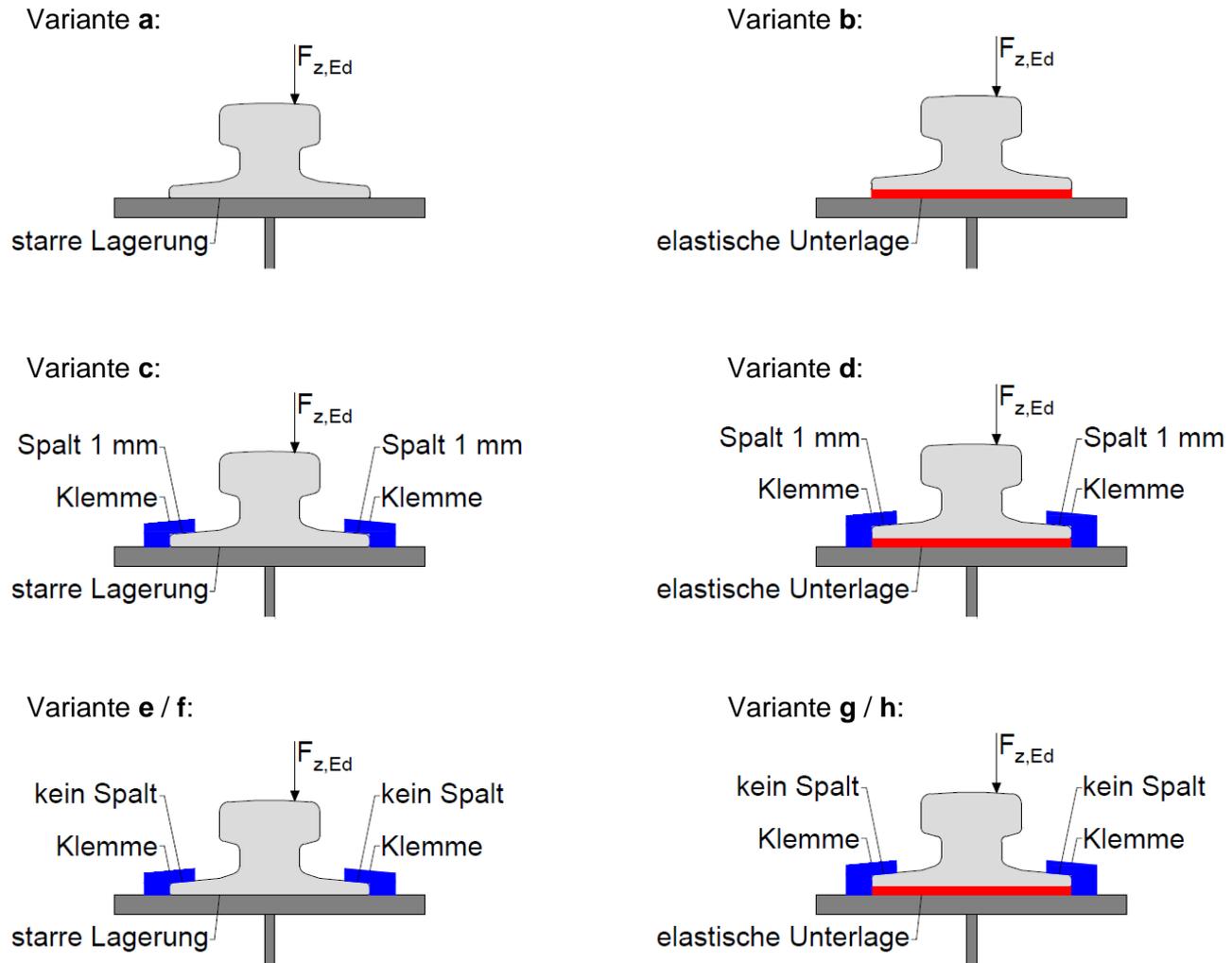


Abb. 1: schematische Darstellung der Varianten der Modelle mit Profilschienen

► *Variante a - starre Lagerung*

Hierbei liegt die Kranschiene ohne zusätzliche Befestigungen und/oder Unterlage auf dem Obergurt durchgehend auf, was einer starren Lagerung entspricht. Dieser Fall kann in der Praxis nur dann auftreten, wenn alle Befestigungen der Kranschiene gleichzeitig versagen bzw. der Spalt zwischen Schiene und Klemme größer ist als die vertikale Relativverformung zwischen Schiene und Obergurt (sehr biegesteife Kranschiene auf eher biegeweichem Kranbahnträger). Daher wird diese Variante in der Arbeit als theoretischer Grenzfall betrachtet.

► *Variante b - elastische Unterlage*

Bei dieser Variante liegt die Kranschiene auf einer elastischen Unterlage auf dem Obergurt durchgehend auf, ohne zusätzlich befestigt zu sein und bildet damit wie Variante a einen theoretischen Grenzfall ab. Die elastische Unterlage ist 6 mm dick und weist eine vertikale Federsteifigkeit von 20 N/mm³ auf.

► *Variante c - diskrete Klemmen, starre Lagerung*

In diesem Fall ist die Kranschiene wie in Variante a starr auf dem Obergurt gelagert und wird durch Klemmen (äquidistant bzw. im Abstand e_{KL} am Flansch befestigt, siehe Abb. 2) gegen Abheben bzw. Verdrehen gehalten, ist dabei aber in Trägerlängsrichtung verschieblich. Zwischen Schiene und Klemmen ist ein vertikaler Spalt von 1 mm vorgesehen, was wie bereits erwähnt der Praxis entspricht (kein kraftschlüssiger Kontakt vorgesehen).

► *Variante d - diskrete Klemmen, elastische Unterlage*

Zusätzlich zu den Klemmen (wie in Variante c) liegt die Kranschiene hier auf einer elastischen Unterlage auf dem Obergurt des Trägers.

► *Variante e - diskrete Klemmen ohne Spalt, starre Lagerung*

Ähnlich der Variante c liegt die Kranschiene starr auf dem Obergurt und ist durch Klemmen an diesem befestigt, mit dem Unterschied, dass sich Schiene und Klemmen berühren (d. h. der Spalt aus Variante c ist hier kraftschlüssig geschlossen).

► *Variante f - durchgehende Klemmung ohne Spalt, starre Lagerung*

Variante f entspricht im Querschnitt der Variante e und unterscheidet sich von dieser durch die durchgehend modellierten Klemmen (d. h. die Klemmen stellen Leisten dar und erstrecken sich über die gesamte Schienenlänge, siehe Abb. 2). Diese fiktive, durchgehende Klemmung dient dazu, ein Abheben des Schienenfußes bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung der Schubnachgiebigkeit vollständig zu verhindern.

► *Variante g / Variante h - diskrete Klemmen ohne Spalt / durchgehende Klemmung ohne Spalt, elastische Unterlage*

Die Varianten g und h entsprechen jeweils den Varianten e und f (Klemmen ohne Spalt), wobei die Schiene zusätzlich auf einer elastischen Unterlage auf dem Obergurt liegt.

Die Varianten e bis h dienen den theoretischen Grenzfallbetrachtungen von Klemmen ohne Spalt bzw. durchgehender Klemmung ohne Spalt.

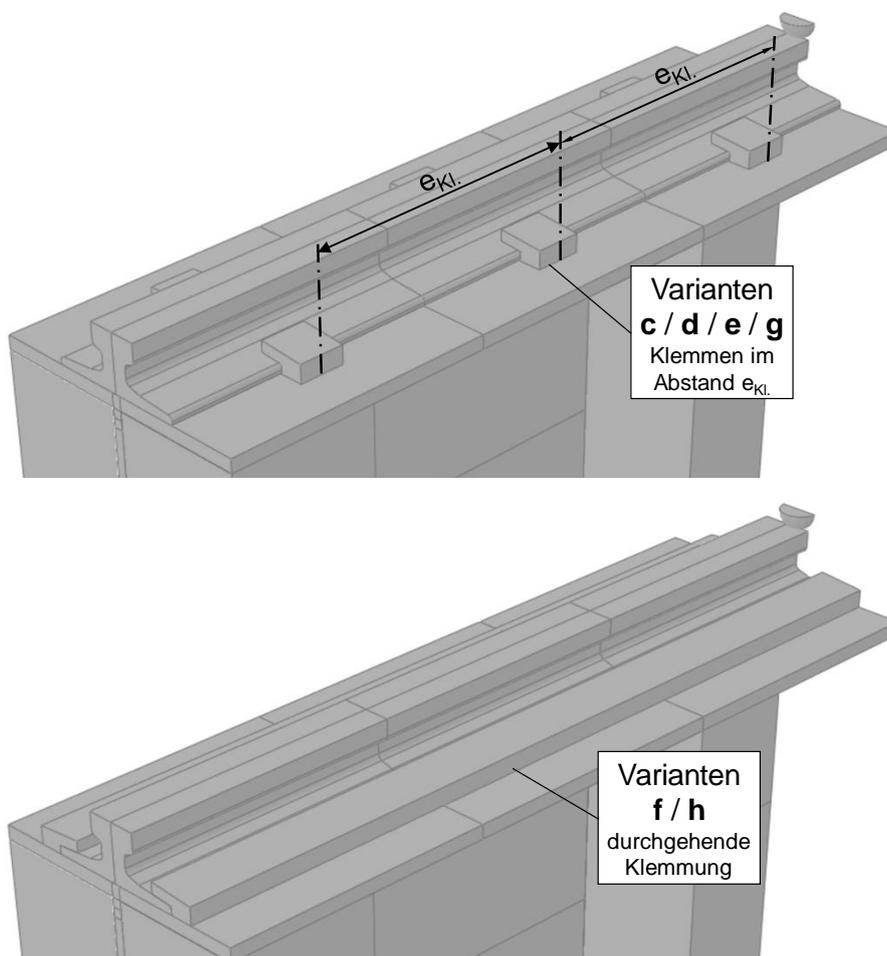


Abb. 2: Vergleich von einzelnen (diskreten) Klemmen im Abstand $e_{kl.}$ (oben) und durchgehender Klemmung (unten)

2.2 Tabellarische Übersicht über die Modelle

Die nachfolgenden Tab. 3 bis 5 geben einen Überblick über sämtliche im Zuge dieser Arbeit betrachteten Modelle bzw. Konfigurationen und deren Parameter.

Tab. 3: Konfigurationen bzw. Parameter der Modelle mit Profilschiene A 100 (Modelle M1 bis M4)

Modell Nr. [-]		QS Nr. [-]	Parameter							e _{Kl.} [mm]	elastische Unterlage	Klemmen
			h _w [mm]	a [mm]	a / h _w [-]	t _f [mm]	t _w [mm]	b _f [mm]	e _{Kl.} [mm]			
Profilschiene A 100	M1	M1a	QS 1	2000	2000	1	20	10	310			
		M1b	QS 1	2000	2000	1	20	10	310		✓	
		M1c	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	600		✓
		M1d	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	600	✓	✓
		M1e	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	600		✓
		M1f	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	0		✓
		M1g	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	600	✓	✓
		M1h	QS 1	2000	2000	1	20	10	310	0	✓	✓
	M2	M2a	QS 2	2000	2000	1	40	10	310			
		M2b	QS 2	2000	2000	1	40	10	310		✓	
		M2c	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	600		✓
		M2d	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	600	✓	✓
		M2e	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	600		✓
		M2f	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	0		✓
		M2g	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	600	✓	✓
		M2h	QS 2	2000	2000	1	40	10	310	0	✓	✓
	M3	M3a	QS 3	1000	2000	2	20	10	310			
		M3b	QS 3	1000	2000	2	20	10	310		✓	
		M3c	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	600		✓
		M3d	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	600	✓	✓
		M3e	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	600		✓
		M3f	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	0		✓
		M3g	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	600	✓	✓
		M3h	QS 3	1000	2000	2	20	10	310	0	✓	✓
	M4	M4a	QS 4	1000	2000	2	40	10	310			
		M4b	QS 4	1000	2000	2	40	10	310		✓	
		M4c	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	600		✓
		M4d	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	600	✓	✓
		M4e	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	600		✓
		M4f	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	0		✓
		M4g	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	600	✓	✓
		M4h	QS 4	1000	2000	2	40	10	310	0	✓	✓

Tab. 4: Konfigurationen bzw. Parameter der Modelle mit Profilschiene A 55 (Modelle M5 bis M10)

Modell Nr. [-]		QS Nr. [-]	Parameter							e _{Kl.} [mm]	elastische Unterlage	Klemmen
			h _w [mm]	a [mm]	a / h _w [-]	t _f [mm]	t _w [mm]	b _f [mm]				
Profilschiene A 55	M5	M5a	QS 5	300	600	2	15	10	300			
		M5b	QS 5	300	600	2	15	10	300		✓	
		M5c	QS 5	300	600	2	15	10	300	300		✓
		M5d	QS 5	300	600	2	15	10	300	300	✓	✓
		M5e	QS 5	300	600	2	15	10	300	300		✓
		M5f	QS 5	300	600	2	15	10	300	0		✓
		M5g	QS 5	300	600	2	15	10	300	300	✓	✓
		M5h	QS 5	300	600	2	15	10	300	0	✓	✓
	M6	M6a	QS 6	600	600	1	15	10	300			
		M6b	QS 6	600	600	1	15	10	300		✓	
		M6c	QS 6	600	600	1	15	10	300	300		✓
		M6d	QS 6	600	600	1	15	10	300	300	✓	✓
		M6e	QS 6	600	600	1	15	10	300	300		✓
		M6f	QS 6	600	600	1	15	10	300	0		✓
		M6g	QS 6	600	600	1	15	10	300	300	✓	✓
		M6h	QS 6	600	600	1	15	10	300	0	✓	✓
	M7	M7a	QS 7	300	600	2	25	10	300			
		M7b	QS 7	300	600	2	25	10	300		✓	
		M7c	QS 7	300	600	2	25	10	300	300		✓
		M7d	QS 7	300	600	2	25	10	300	300	✓	✓
		M7e	QS 7	300	600	2	25	10	300	300		✓
		M7f	QS 7	300	600	2	25	10	300	0		✓
		M7g	QS 7	300	600	2	25	10	300	300	✓	✓
		M7h	QS 7	300	600	2	25	10	300	0	✓	✓
	M8	M8a	QS 8	600	600	1	25	10	300			
		M8b	QS 8	600	600	1	25	10	300		✓	
		M8c	QS 8	600	600	1	25	10	300	300		✓
		M8d	QS 8	600	600	1	25	10	300	300	✓	✓
		M8e	QS 8	600	600	1	25	10	300	300		✓
		M8f	QS 8	600	600	1	25	10	300	0		✓
		M8g	QS 8	600	600	1	25	10	300	300	✓	✓
		M8h	QS 8	600	600	1	25	10	300	0	✓	✓
M9	M9a	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300				
	M9b	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300		✓		
	M9c	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	300		✓	
	M9d	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	300	✓	✓	
	M9e	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	300		✓	
	M9f	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	0		✓	
	M9g	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	300	✓	✓	
	M9h	QS 9	1000	600	0,6	15	10	300	0	✓	✓	
M10	M10a	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300				
	M10b	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300		✓		
	M10c	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	300		✓	
	M10d	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	300	✓	✓	
	M10e	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	300		✓	
	M10f	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	0		✓	
	M10g	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	300	✓	✓	
	M10h	QS 10	1000	600	0,6	25	10	300	0	✓	✓	

Tab. 5: Konfigurationen bzw. Parameter der Modelle mit Blockschiene 60/30 (Modelle M11 bis M14)

		Parameter						
Modell Nr.	QS Nr.	h_w	a	a / h_w	t_f	t_w	b_f	
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	
Block-schiene 60/30	M11	QS 5	300	600	2	15	10	300
	M12	QS 6	600	600	1	15	10	300
	M13	QS 7	300	600	2	25	10	300
	M14	QS 8	600	600	1	25	10	300

2.3 Grafische Darstellung der Querschnitte

In den folgenden Abb. 3 bis 5 sind die jeweiligen Querschnitte der bereits tabellarisch beschriebenen Modelle bzw. Konfigurationen zur besseren Anschaulichkeit grafisch dargestellt.

► Querschnitte der Modelle M1 bis M4 mit Profilschiene A 100

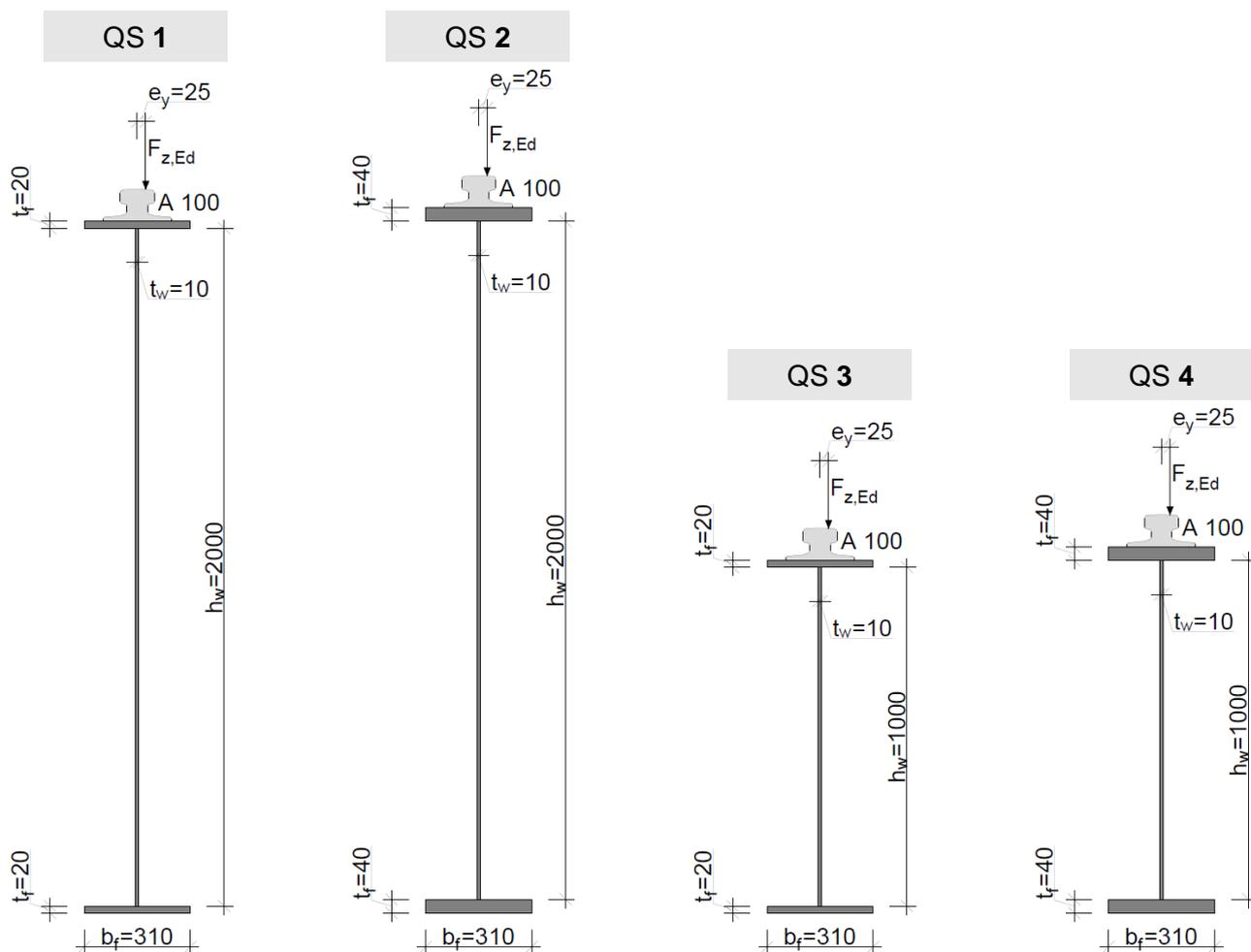


Abb. 3: Querschnitte QS 1 bis QS 4 mit Profilschiene A 100

► Querschnitte der Modelle M5 bis M10 mit Profilschiene A 55

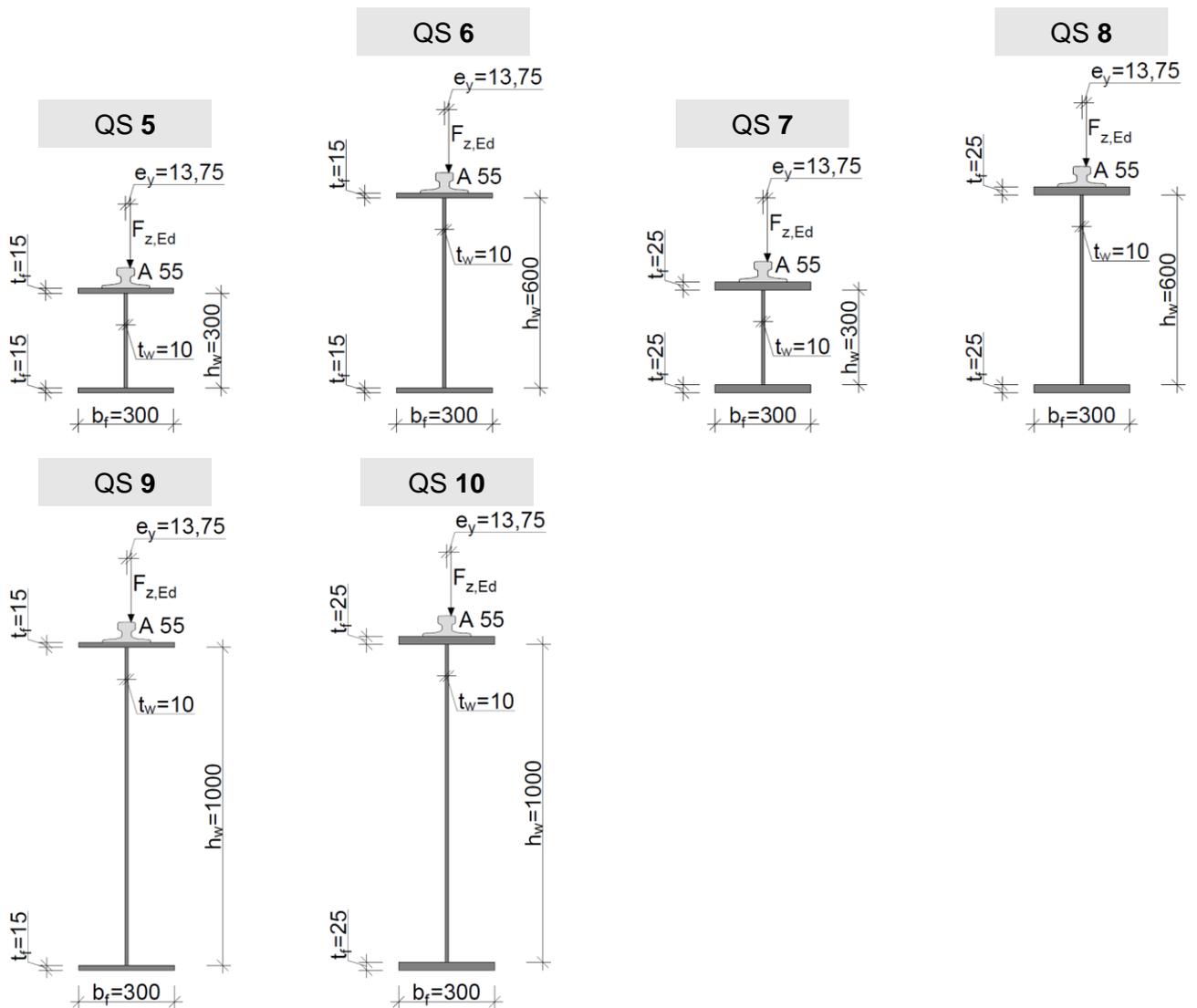


Abb. 4: Querschnitte QS 5 bis QS 10 mit Profilschiene A 55

► Querschnitte der Modelle M11 bis M14 mit Blockschiene 60/30

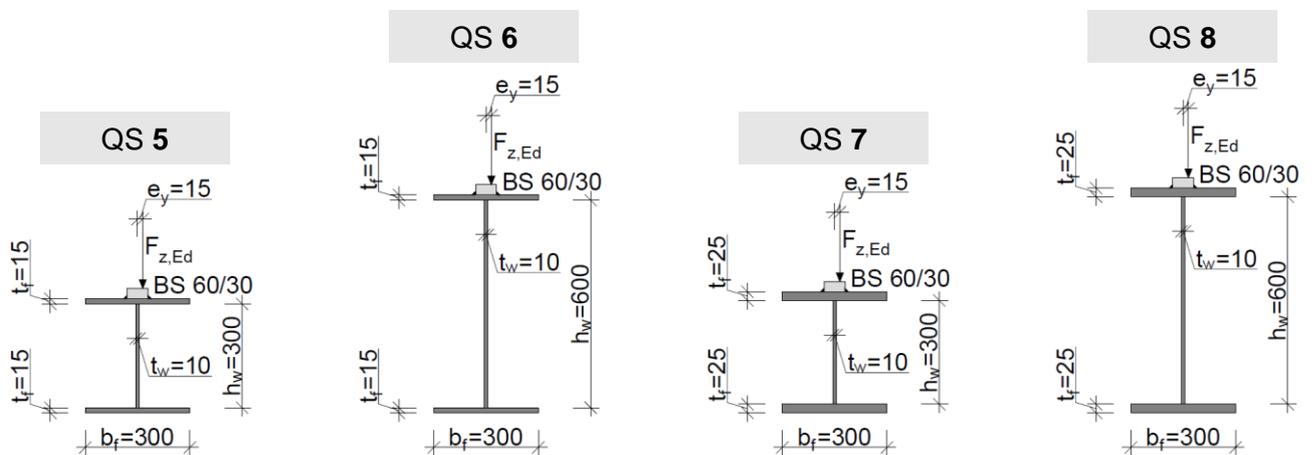


Abb. 5: Querschnitte QS 5 bis QS 8 mit Blockschiene 60/30

3 Spannungsermittlung nach Eurocode EN 1993-6

3.1 Rechenmodell nach Oxfort

Wie J. Oxfort im Jahr 1981 beschrieben hat [5], führen exzentrisch auf den Schienenkopf einwirkende Radlasten bei üblicher direkter Lagerung der Kranschiene auf dem Obergurt des Kranbahnträgers zu Verdrehungen des Flansches und des daran angeschlossenen oberen Stegblechrandes (siehe Abb. 6).

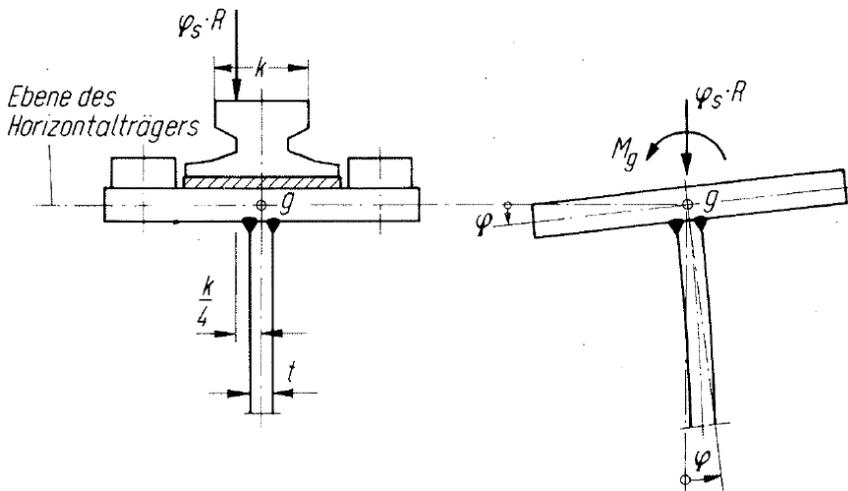


Abb. 6: exzentrisch belastete Kranschiene auf dem Obergurt des Kranbahnträgers ([5], Bild 1.)

Einerseits führt die Verdrehung zu einer Verformung des Stegblechs aus seiner Ebene (darauf wird in dieser Arbeit nicht eingegangen), andererseits ergibt das vom Obergurt auf den Stegblechrand übertragene Torsionsmoment Querbiegespannungen $\sigma_{T,Ed}$ (siehe Abb. 8). Diese wirken zusätzlich zu den Druckspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ (siehe Abb. 8) und können bei wiederkehrender Beanspruchung zu einem Ermüdungsversagen der Schweißverbindung zwischen Flansch und Stegblech führen ([5], Kapitel 1.)

Bei der Bemessung muss daher die Biegespannung, welche durch eine exzentrische Einleitung der Radlast von $\pm 1/4$ der Schienenkopfbreite k hervorgerufen wird, berücksichtigt werden ([5], Kapitel 1.).

Eine analytische Lösung zur Bestimmung der Biegespannungen am oberen Stegblechrand hat Oxfort bereits im Jahr 1963 abgeleitet [4]. Auf den praxisrelevanten Fall einer exzentrischen Radlast, die in der Mitte zwischen zwei Quersteifen angreift, wird nun näher eingegangen (dieser Fall entspricht auch den in dieser Arbeit bearbeiteten Modellen und Radlaststellungen).

Das Rechenmodell, welches nach wie vor im Eurocode verankert ist, basiert auf folgendem (in Abb. 7 dargestelltem) statischen System:

Der Obergurt (bzw. der obere Flansch) des Kranbahnträgers und die Kranschiene wirken als ein gemeinsamer Torsionsstab, welcher als Einfeldträger der Länge $L = a$ (entspricht dem Abstand der Quersteifen in Trägerlängsrichtung) abgebildet wird. Dabei greift in Feldmitte - dies ist die Stelle der Radlast - das Torsionsmoment T_{Ed} an. An den Enden wird von einer Gabellagerung ausgegangen, außerdem wird die biegesteife Verbindung zwischen Flansch und Stegblech über eine elastische Drehbettung $\overline{m_d}$ berücksichtigt.

Für die Lösung der Differentialgleichung wurde die Annahme getroffen, dass sowohl das vom Torsionsstab in das Stegblech eingeleitete Linientorsionsmoment $m(x)$ als auch die Verdrehung des Obergurtes $\varphi(x)$ dem qualitativen Verlauf einer Sinushalbwellen entsprechen.

Theoretical model:

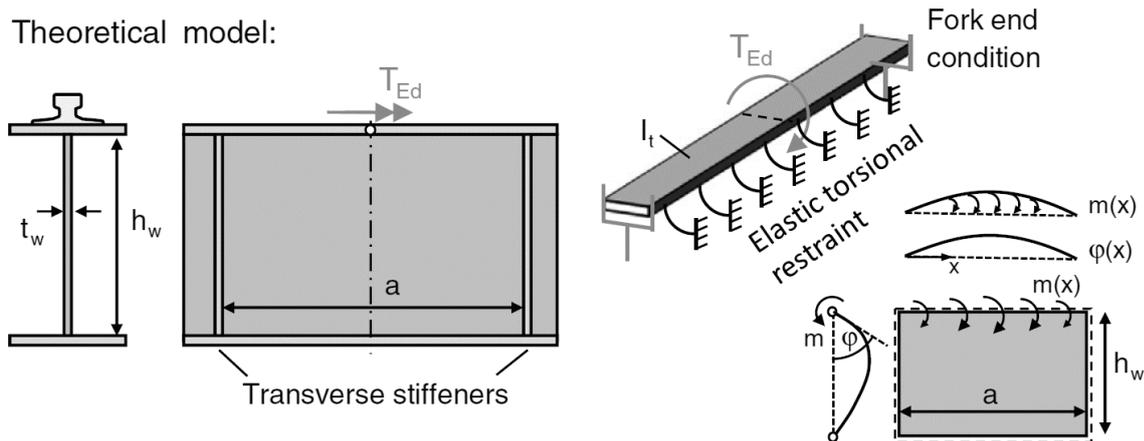


Abb. 7: statisches System des Rechenmodells nach Oxfort (aus [6], Fig. 4)

3.2 Rechenmodell im Eurocode EN 1993-6

Die Auslegung von Kranbahnträgern ist derzeit in der ÖNORM EN 1993-6 bzw. dem Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 6: Kranbahnen [1] geregelt, in Österreich ist dementsprechend zusätzlich der nationale Anhang (ÖNORM B 1993-6) [3] anzuwenden.

In dieser Arbeit werden ausschließlich Brückenlaufkrane, welche den Kranbahnträger von oben belasten ([1], Kapitel 1.1 (3) a)), behandelt. Dabei werden nur vertikale Lasten (lokale Radlasten) angesetzt; dynamische Horizontallasten in Längs- und / oder Querrichtung (ergeben sich aus dem Kranbetrieb) werden nicht berücksichtigt ([1], Kapitel 1.5.1), da gemäß Eurocode nur vertikale Lasten als ermüdungswirksam zu betrachten sind.

Grundsätzlich sieht der Eurocode eine Vielzahl an anzusetzenden Beanspruchungen aus Kranlasten vor ([1], Kapitel 5.6.1), in der vorliegenden Arbeit wird nur auf die lokalen vertikalen Spannungen infolge einer einzigen vertikalen Radlast eingegangen ([1], Kapitel 5.6.1 (2)).

3.3 Lokale Spannungen im Steg zufolge Radlast am Obergurt

Die exzentrische Radlast lässt sich in einen Anteil der allein wirkenden (zentrisch angreifenden) vertikalen Radlast $F_{z,Ed}$ und einen Anteil des allein wirkenden Torsionsmoments (zufolge exzentrischer Radlast) T_{Ed} aufteilen, da von alleinigen elastischen Spannungen ausgegangen werden kann.

Dementsprechend ergibt sich der resultierende Verlauf der vertikalen Spannungen $\sigma_{z,Ed}$ aus einer Spannungskomponente an vertikalen Druckspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ zufolge zentrischem Radlastanteil sowie einer Spannungskomponente an Biegespannungen $\sigma_{T,Ed}$ zufolge Torsion des Obergurts durch exzentrischen Radlastanteil, wie in Abb. 8 dargestellt.

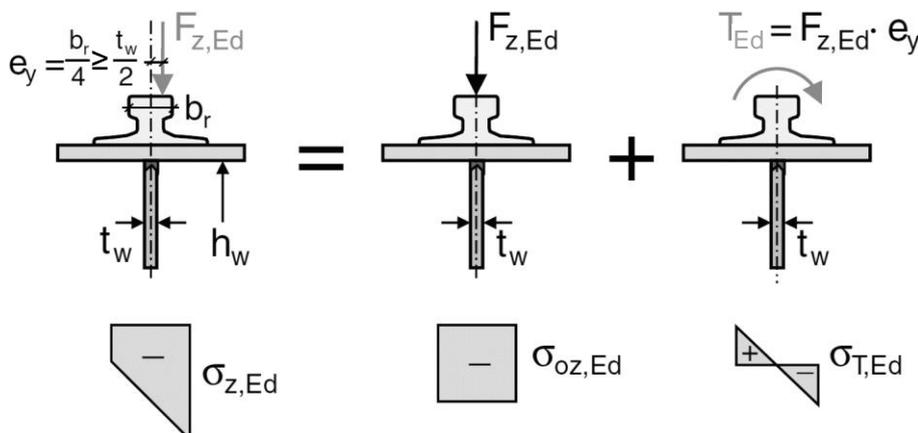


Abb. 8: Aufteilung der resultierenden Vertikalspannung in Druck- und Biegespannungskomponente ([6], Fig. 3)

3.3.1 Lokale vertikale Druckspannungen

Die lokalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ im Steg infolge Radlast (bzw. zentrischem Radlastanteil) am Obergurt werden nach Gl. (1) wie folgt ermittelt ([1], Kapitel 5.7.1 (1)):

$$\sigma_{oz,Ed} = \frac{F_{z,Ed}}{l_{eff} \cdot t_w} \quad \text{Gl. (1)}$$

mit:

- $F_{z,Ed}$... Bemessungswert der Radlast
 l_{eff} ... effektive Lastausbreitungslänge
 t_w ... Dicke des Stegblechs

Diese vertikale Druckspannung wird vereinfacht gleichmäßig über die effektive Lastausbreitungslänge l_{eff} verteilt angenommen (siehe Abb. 9), welche im Allgemeinen unter Berücksichtigung der Kranschieneabnutzung ermittelt wird (siehe Tab. 6) ([1], Kapitel 5.7.1 (2)).

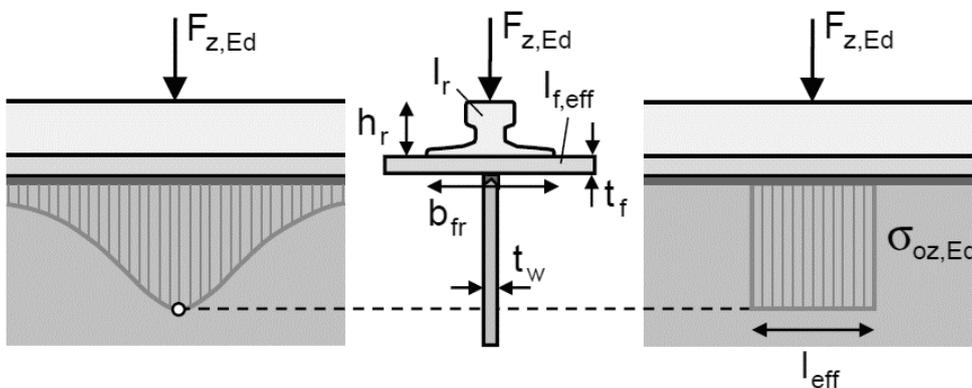


Abb. 9: Vergleich des realen (links) u. vereinfachten Verlaufs (rechts) der lokalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ ([6], Fig. 1)

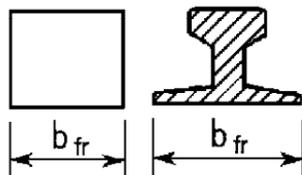
Der Eurocode unterscheidet bei der Berechnung von l_{eff} folgende drei Fälle der Befestigung bzw. Lagerung der Kranschiene am bzw. auf dem oberen Flansch des Kranbahnträgers (siehe Tab. 6):

- ▶ Der Fall (a) beschreibt eine schubstarre Befestigung der Kranschiene am Flansch, wie es in dieser Arbeit bei den FE-Modellen mit Blockschiene (M11 bis M14) der Fall ist. Die Blockschiene ist durch durchlaufende Schweißnähte schubstarr mit dem Obergurt verbunden, weshalb sie bei der Berechnung der Querschnittswerte unter Einbeziehung der Schienenkopfabnutzung berücksichtigt werden darf.
- ▶ Der Fall (b) wird den Varianten a, c, e und f der Modelle M1 bis M10 zugeschrieben, hier ist die Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt und ist starr auf diesem gelagert (d. h. ohne elastische Unterlage).
- ▶ Der Fall (c) liegt vor, wenn die Kranschiene auf einer elastischen Unterlage auf dem Kranbahnträgerobergurt aufliegt. Dies ist in der Arbeit bei den Varianten b, d, g und h der Modelle M1 bis M10 der Fall.

Tab. 6: Berechnung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} ([1], Tabelle 5.1)

Fall	Beschreibung	Effektive Lastausbreitungslänge l_{eff}
(a)	Kranschiene schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [I_{rf} / t_w]^{1/3}$
(b)	Kranschiene nicht schubstarr am Flansch befestigt	$l_{eff} = 3,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
(c)	Kranschiene auf einer mind. 6mm dicken nachgiebigen Elastomerunterlage	$l_{eff} = 4,25 [(I_r + I_{f,eff}) / t_w]^{1/3}$
$I_{f,eff}$	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
I_r	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie der Schiene	
I_{rf}	Flächenmoment zweiten Grades um die horizontale Schwerlinie des zusammengesetzten Querschnitts einschließlich der Schiene und des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff}	
t_w	Stegdicke	
$b_{eff} = b_{fr} + h_r + t_f$ aber $b_{eff} \leq b$ Dabei ist b die Gesamtbreite des Obergurtes; b_{fr} die Breite des Schienenfußes, siehe Bild 5.2; h_r die Schienenhöhe, siehe Bild 5.1; t_f die Flanschdicke.		
ANMERKUNG Der Verschleiß der Kranschiene wird bei der Bestimmung von I_r , I_{rf} und h_r berücksichtigt, siehe 5.6.2(2) und 5.6.2(3).		

Die in die Berechnung einfließende Breite des Schienenfußes b_{fr} ist für Block- und Profilschienen wie in Abb. 10 dargestellt definiert.


 Abb. 10: Breite des Schienenfußes b_{fr} von Block- (links) und Profilschienen (rechts) ([1], Bild 5.2)

Ausgehend von der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} an der Unterkante des Obergurtes, kann für jede Radlast ein Lastausbreitungswinkel von 45° angenommen werden (siehe Abb. 11), womit sich die lokale vertikale Druckspannung in beliebigen horizontalen Schnitten des Steges berechnen lässt ([1], Kapitel 5.7.1 (4)).

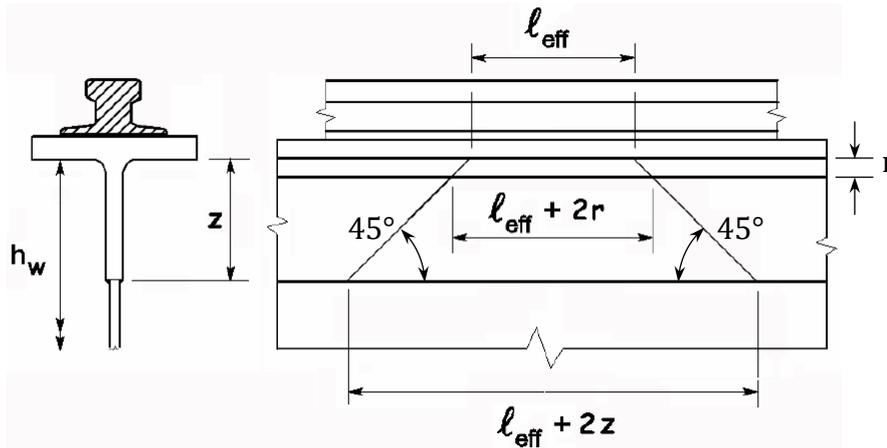


Abb. 11: Ausbreitung der effektiven Lastausbreitungslänge l_{eff} unter einem Winkel von 45° im Trägersteg ([1], Bild 5.3)

In den nachfolgend angeführten FE-Berechnungen wurden die Spannungen in einem horizontalen, 10 mm unterhalb der Unterkante des Obergurts gelegenen Schnitt ausgelesen. Dies ist erforderlich, um den Einfluss möglicher numerischer Fehler bei der Spannungsberechnung am FE-Modell abzumindern.

Der Einfachheit halber wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, die Spannungen nach Eurocode (diese werden bei geschweißten Trägern, $r = 0$ in Abb. 11, an der Flanschunterkante berechnet) wie oben angeführt auf diesen 10 mm unterhalb der Flanschunterkante gelegenen Horizontalschnitt (d. h. bei $z = 10 \text{ mm}$ in Abb. 11) umzurechnen.

Falls die gesamte Lastausbreitungslänge l_{eff} den Abstand der Mittelpunkte zweier benachbarter Räder x_w überschreitet, so sind die jeweiligen Spannungen beider Radlasten entsprechend zu überlagern ([1], Kapitel 5.7.1 (3), (4)). Dies ist bei üblichen Brückenkränen nicht der Fall. Da in dieser Arbeit nur mit einer einzelnen Radlast gerechnet wird, ist dieser Umstand nicht weiter relevant.

3.3.2 Lokale Biegespannungen

Für querausgesteifte Stegbleche werden die lokalen Biegespannungen im Steg $\sigma_{T,Ed}$ zufolge einem durch die seitliche Exzentrizität der Radlast verursachten Torsionsmoment nach Gl. (2) bestimmt ([1], Kapitel 5.7.3 (1)):

$$\sigma_{T,Ed} = \frac{6 \cdot T_{Ed}}{a \cdot t_w^2} \cdot \eta \cdot \tanh(\eta) \quad \text{Gl. (2)}$$

mit:

$$\eta = \left[\frac{0,75 \cdot a \cdot t_w^3}{I_T} \cdot \frac{\sinh^2\left(\pi \cdot \frac{h_w}{a}\right)}{\sinh\left(2\pi \cdot \frac{h_w}{a}\right) - 2\pi \cdot \frac{h_w}{a}} \right]^{0,5} \quad \text{Gl. (3)}$$

und:

a ... Abstand der Quersteifen in Trägerlängsrichtung

η ... Hilfwert zur Berechnung der maximalen Spannungen an der Stelle $x = \frac{a}{2}$
(Berechnung nach Gl. (3))

h_w ... Gesamthöhe des Steges (lichter Abstand zwischen den Flanschen)

I_T	...	Summe der Torsionsträgheitsmomente von Kranbahnträgerobergurt und Kranschiene
T_{Ed}	...	Torsionsmoment zufolge seitlicher Exzentrizität der Radlast, nach Gl. (4)
t_w	...	Dicke des Stegblechs

Das durch die seitliche Exzentrizität der Radlast (siehe Abb. 12) hervorgerufene Torsionsmoment T_{Ed} wird entsprechend Gl. (4) ermittelt ([1], Kapitel 5.7.3 (2)):

$$T_{Ed} = F_{z,Ed} \cdot e_y \quad \text{Gl. (4)}$$

mit:

e_y ... Exzentrizität der Radlast (lt. EN 1991-3, Kapitel 2.5.2.1 (2))

wobei gilt: $e_y \geq 0,5 \cdot t_w$

$F_{z,Ed}$... Bemessungswert der Radlast

t_w ... Dicke des Stegblechs

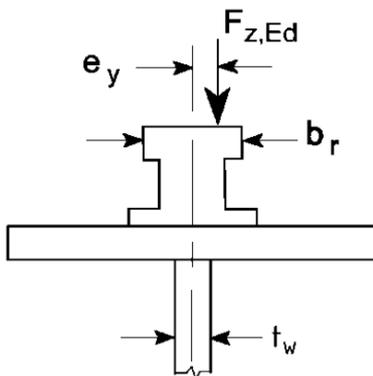


Abb. 12: Torsion des Obergurts zufolge exzentrischer Radlast ([1], Bild 5.5)

Die seitliche Exzentrizität der Radlast zur Schienenachse e_y sollte als ein Bruchteil der Schienenkopfbreite b_r angenommen werden (siehe Abb. 12). Der Eurocode empfiehlt die Exzentrizität mit $e_y = 0,25 \cdot b_r$, im nationalen Anhang wird dieser Wert übernommen ([3], Kapitel 2.5.2.1 (2)).

Für die Verbindungen zwischen Steg und Ober- bzw. Untergurt des Kranbahnträgers sollten keine unterbrochenen Kehlnähte verwendet werden, wenn diese durch lokale Spannungen zufolge Radlasten belastet werden ([1], Kapitel 8.2 (3)).

Die Bemessung bzw. Auslegung der Schweißverbindungen des Kranbahnträgers ist jedoch nicht Teil dieser Arbeit, weshalb vereinfacht von einer voll durchgeschweißten Naht ausgegangen wird.

3.4 Befestigung der Kranschiene am Obergurt

Die auf den Obergurt geschweißte Blockschiene (Modelle M11 bis M14) darf als starr befestigt und damit - wie schon erwähnt - als Teil des Querschnitts des Kranbahnträgers betrachtet werden, wenn eine entsprechende Abnutzung berücksichtigt wird ([1], Kapitel 8.5.2 (1), (2)).

Im Allgemeinen müssen starre Schienenbefestigungen die zwischen Schiene und Kranbahnträger entstehenden Längskräfte sowie die zufolge Radlasteinleitung auf die Schiene wirkenden Seitenkräfte aufnehmen können ([1], Kapitel 8.5.2 (3)).

Bei den Varianten c bis h der Modelle M1 bis M10 wurden Klemmen zur Schienenbefestigung angesetzt, welche in der Regel als bewegliche Befestigungen zu klassifizieren sind ([1], Kapitel 8.5.3 (1)) und mit geeigneten Elastomerunterlagen zwischen Schiene und Obergurt kombiniert verwendet werden können ([1], Kapitel 8.5.3 (3)).

Diese beweglichen Befestigungen sind so zu bemessen, dass sie auf die Schiene wirkende Seitenkräfte zufolge Radlasteinleitung sowie allfällige auftretende vertikale Zugkräfte bei Abheben der Schiene aufnehmen können.

Da der Fokus in dieser Arbeit ausschließlich auf den vertikalen (und nicht auf den horizontalen) Einwirkungen liegt, wurden die Abmessungen der Schienenbefestigungen vereinfacht entsprechend der jeweiligen Schienen- und Trägergeometrien abgeschätzt und nicht genauer bemessen.

3.5 Ergebnisse der Berechnung nach Eurocode

In diesem Abschnitt werden die verwendeten Querschnittswerte sämtlicher betrachteter Kranbahnträger und Kranschienen tabellarisch aufgelistet bzw. auf deren Ermittlung eingegangen. Anschließend folgen Auflistungen für die anhand des EC-Modells berechneten Maximalwerte der Spannungen im Stegblech.

3.5.1 Querschnittswerte Kranbahnträger

Nachfolgende Tab. 7 zeigt die Querschnittswerte der in dieser Arbeit bearbeiteten Querschnitte von Kranbahnträgern. Welcher Querschnitt dabei in welchem FE-Modell verwendet wird, kann den Tab. 3 bis 5 entnommen werden.

Das Torsionsträgheitsmoment des Obergurts $I_{T,f}$ und das Flächenträgheitsmoment $I_{f,eff}$ des Flansches mit der effektiven Breite b_{eff} werden (für Rechteck-QS) nach Gl. (5) und Gl. (6) ermittelt.

Für die Querschnitte 5 bis 8 (bzw. für die aus Blockschiene und Obergurt zusammengesetzten Querschnitte der Modelle M11 bis M14) wird anstelle von $I_{f,eff}$ das entsprechende Flächenträgheitsmoment I_{rf} des Obergurts mit der effektiven Breite b_{eff} und der Blockschiene berechnet (Berechnung mit Schienenabnutzung, siehe Tab. 10).

$$I_{T,f} = \frac{b_f \cdot t_f^3}{3} \quad \text{Gl. (5)}$$

$$I_{f,eff} = \frac{b_{eff} \cdot t_f^3}{12} \quad \text{Gl. (6)}$$

mit:

- b_{eff} ... effektive Flanschbreite des Obergurts
- b_f ... Breite des Obergurts (bzw. Flanschbreite)
- t_f ... Dicke des Obergurts (bzw. Flanschdicke)

Tab. 7: relevante Querschnittswerte der in dieser Arbeit betrachteten Kranbahnträger

Querschnittswerte Kranbahnträger

Modell Nr. [-]	QS Nr. [-]	$I_{T,f}$ [cm ⁴]	b_{eff} [mm]	$I_{f,eff}$ [cm ⁴]
M1	QS 1	82,67	310,0	20,67
M2	QS 2	661,33	310,0	165,33
M3	QS 3	82,67	310,0	20,67
M4	QS 4	661,33	310,0	165,33
M5	QS 5	33,75	226,8	6,38
M6	QS 6	33,75	226,8	6,38
M7	QS 7	156,25	236,8	30,83
M8	QS 8	156,25	236,8	30,83
M9	QS 9	33,75	226,8	6,38
M10	QS 10	156,25	236,8	30,83

Modell Nr. [-]	QS Nr. [-]	$I_{T,f}$ [cm ⁴]	b_{eff} [mm]	I_{rf} [cm ⁴]
M11	QS 5	33,75	101,3	44,78
M12	QS 6	33,75	101,3	44,78
M13	QS 7	156,25	111,3	89,56
M14	QS 8	156,25	111,3	89,56

3.5.2 Querschnittswerte Kranschiene

Für die Modelle M11 bis M14 ist die Kranschiene (in diesem Fall eine Blockschiene) mittels Schweißnähten schubstarr mit dem Obergurt verbunden, weshalb sie bei der Ermittlung des Querschnittswiderstands als Querschnittsteil berücksichtigt werden darf.

Dabei sind die Schweißnähte so zu bemessen, dass sie sowohl die durch Biegung infolge vertikaler und horizontaler Lasten hervorgerufenen Längsschubkräfte als auch Kräfte infolge horizontaler Kranlasten aufnehmen können ([1], Kapitel 5.6.2 (1)).

Wenn die Kranschiene als statisch mitwirkendes Bauteil bzw. Querschnittsteil berücksichtigt werden soll, muss aus Gründen der Sicherheit der Verschleiß des Schienenkopfes durch eine entsprechende Abnutzung (siehe Abb. 13) in die Berechnung miteinbezogen werden [7]. Die Abb. 13 gilt sinngemäß auch für Blockschiene (d. h. in dieser Arbeit für die Modelle M11 bis M14).

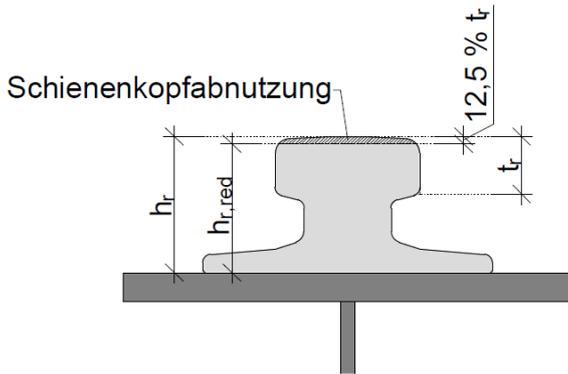


Abb. 13: reduzierte Nennhöhe der Schiene (mit 12,5 % Schienenkopfabnutzung, nach [1] bei Ermüdungsnachweisen)

Um bei der Berechnung der Querschnittswerte die Kranschiene abnutzung zu berücksichtigen, wird eine reduzierte Nennhöhe der Kranschiene herangezogen. Im Allgemeinen beträgt die Abminderung 25 % der Mindestnennhöhe t_r unterhalb der Abnutzungsfläche, es können jedoch im Wartungsplan anderweitige Vorgaben gegeben sein ([1], Kapitel 5.6.2 (2)).

Da es sich bei der vorliegenden Problemstellung der lokalen Spannungen zufolge einer Radlast um ein Ermüdungsproblem (maßgebender Querschnitt wird über die Zeit immer wieder durch die Einwirkung belastet) handelt, muss nur die Hälfte dieser Abminderung, d. h. 12,5 % von t_r , angesetzt werden ([1], Kapitel 5.6.2 (3)).

Damit ergibt sich die reduzierte Nennhöhe der Schiene (siehe Abb. 13) für 12,5 % Abnutzung entsprechend Gl. (7) wie folgt:

$$h_{r,red} = h_r - 0,125 \cdot t_r \tag{7}$$

Die in dieser Arbeit herangezogenen Abmessungen und Querschnittswerte der Kranschiene wurden von Kraus und Mämpel in [7] zusammengestellt und sind nachfolgend auszugsweise abgebildet. In diesem Beitrag wurden für die Anwendung der EN 1993-6 in Wissenschaft und Praxis relevante bzw. hilfreiche Werte von neuen und abgenutzten Kranschiene berechnet und angeführt.

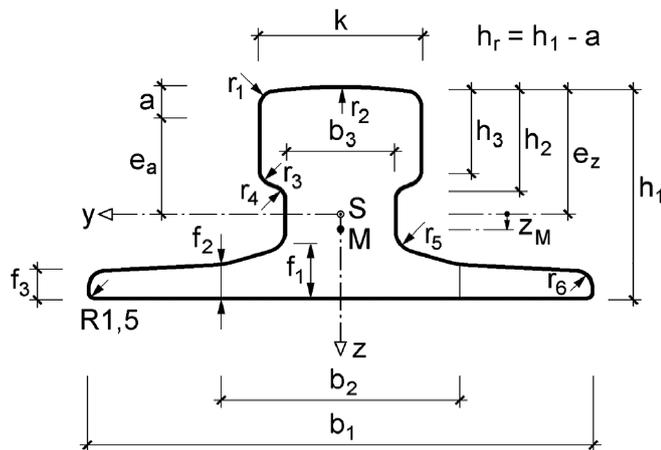


Abb. 14: Abmessungen von Kranschiene der Form A nach DIN 536, Blatt 1 ([6], Tabelle 1)

In Abb. 14 sind sämtliche Querschnittsabmessungen einer Profilschiene (Form A) definiert, die jeweiligen Dimensionen und weitere Querschnittswerte können den Tab. 8 und 9 entnommen werden (die in dieser Arbeit verwendeten Werte sind grau hinterlegt).

Tab. 8: Abmessungen von Kranschiene der Form A nach DIN 536, Blatt 1 ([7], Tabelle 1)

Profil	Abmessungen															
	k	b ₁	b ₂	b ₃	f ₁	f ₂	f ₃	h ₁	h ₂	h ₃	r ₁	r ₂	r ₃	r ₄	r ₅	r ₆
	mm	mm			mm			mm			mm					
A 45	45	125	54	24	14,5	11	8	55	24	20	4	400	3	4	5	4
A 55	55	150	66	31	17,5	12,5	9	65	28,5	25	5	400	5	5	6	5
A 65	65	175	78	38	20	14	10	75	34	30	6	400	5	5	6	5
A 75	75	200	90	45	22	15,4	11	85	39,5	35	8	500	6	6	8	6
A 100	100	200	100	60	23	16,5	12	95	45,5	40	10	500	6	6	8	6
A 120	120	220	120	72	30	20	14	105	55,5	47,5	10	600	6	10	10	6
A 150	150	220	-	80	31,5	-	14	150	64,5	50	10	800	10	30	30	6

Tab. 9: Querschnittswerte von Kranschiene der Form A (12,5 % Abnutzung) nach DIN 536, Blatt 1 ([7], Tabelle 2)

Profil	12,5 % Abnutzung										
	a	h _r	A	Masse	e _a	z _M	I _y	W _y	I _z	W _z	I _T
	mm	mm	cm ²	kg/m	cm	cm	cm ⁴	cm ³	cm ⁴	cm ³	cm ⁴
A 45	2,5	52,5	27,12	21,29	3,202	0,821	78,29	24,45	166,6	26,66	34,72
A 55	3,2	61,8	38,86	30,50	3,743	0,914	155,0	41,40	331,5	44,21	77,94
A 65	3,8	71,2	52,67	41,35	4,276	1,022	276,3	64,62	598,9	68,44	152,0
A 75	4,4	80,6	68,47	53,75	4,810	1,134	459,0	95,42	994,7	99,47	271,3
A 100	5,0	90,0	90,06	70,70	5,023	0,904	743,5	148,0	1301	130,1	580,6
A 120	6,0	99,0	120,7	94,8	5,470	0,656	1165	213,0	2258	205,3	1121
A 150	6,3	143,7	183,7	144,2	7,440	0,735	3891	523,0	3475	315,9	2667

Die in Tab. 10 enthaltenen Werte für die Profilschiene A 100 und A 55 wurden von Tab. 8 und 9 bzw. aus [7] übernommen. Die Querschnittswerte der Blockschiene wurden wie für die Querschnittsteile der Kranbahnträger und mittels der Gl. (5) und (6) bzw. unter Berücksichtigung der Kranschieneabnutzung nach Gl. (7) bestimmt.

Tab. 10: relevante Querschnittswerte der in dieser Arbeit verwendeten Kranschiene

Querschnittswerte Kranschiene								
Querschnitt Profilschiene A 100								
b _{fr}	h _r	t _r	h _{r,red}	k	A _r	e _a	I _r	I _{T,r}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁴]
200	95	40	90	100	90,06	50,2	743,50	580,60
Querschnitt Profilschiene A 55								
b _{fr}	h _r	t _r	h _{r,red}	k	A _r	e _a	I _r	I _{T,r}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁴]
150	65	25	61,8	55	38,86	37,4	155,00	77,94
Querschnitt Blockschiene 60/30								
b _{fr}	h _r	t _r	h _{r,red}	k	A _r	e _a	I _r	I _{T,r}
[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[cm ²]	[mm]	[cm ⁴]	[cm ⁴]
60	30	30	26,3	60	15,75	13,1	9,04	36,18

3.5.3 Maximalwerte der lokalen Spannungen im Steg

Für die Berechnung der lokalen Spannungen in dieser Arbeit wurde eine vertikale Radlast (d. h. Einzellast in z-Richtung) von 500 kN angenommen (siehe Tab. 11).

Tab. 11: in dieser Arbeit angesetzte Radlast

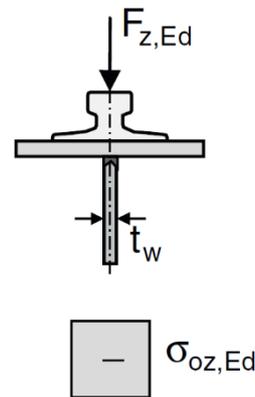
Radlast	$F_{z,Ed}$	500	[kN]
---------	------------	-----	------

► Lokale vertikale Druckspannungen zufolge zentrischer Radlast

In Tab. 12 sind die Ergebnisse der lokalen vertikalen Druckspannungen zufolge zentrischer Radlast nach Gl. (1) für alle in dieser Arbeit betrachteten Modelle aufgelistet.

Tab. 12: Berechnung der lokalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{oz,Ed}$ nach EN 1993-6

Lokale vertikale Druckspannungen zufolge zentrischer Radlast						
Modell Nr. [-]	a [mm]	t_w [mm]	b_{eff} [mm]	$I_{f,eff}$ [cm ⁴]	I_{eff} [mm]	$\sigma_{oz,Ed}$ [N/mm ²]
M1a/c/e/f	2000	10	310,0	20,67	297,1	-168,3
M2a/c/e/f	2000	10	310,0	165,33	314,8	-158,8
M3a/c/e/f	2000	10	310,0	20,67	297,1	-168,3
M4a/c/e/f	2000	10	310,0	165,33	314,8	-158,8
M5a/c/e/f	600	10	226,8	6,38	176,9	-282,6
M6a/c/e/f	600	10	226,8	6,38	176,9	-282,6
M7a/c/e/f	600	10	236,8	30,83	185,5	-269,6
M8a/c/e/f	600	10	236,8	30,83	185,5	-269,6
M9a/c/e/f	600	10	226,8	6,38	176,9	-282,6
M10a/c/e/f	600	10	236,8	30,83	185,5	-269,6
Fall (b) nicht schubstarr						
M1b/d/g/h	2000	10	310,0	20,67	388,6	-128,7
M2b/d/g/h	2000	10	310,0	165,33	411,7	-121,5
M3b/d/g/h	2000	10	310,0	20,67	388,6	-128,7
M4b/d/g/h	2000	10	310,0	165,33	411,7	-121,5
M5b/d/g/h	600	10	226,8	6,38	231,4	-216,1
M6b/d/g/h	600	10	226,8	6,38	231,4	-216,1
M7b/d/g/h	600	10	236,8	30,83	242,5	-206,2
M8b/d/g/h	600	10	236,8	30,83	242,5	-206,2
M9b/d/g/h	600	10	226,8	6,38	231,4	-216,1
M10b/d/g/h	600	10	236,8	30,83	242,5	-206,2
Fall (c) elastische Unterlage, nicht schubstarr						
Modell Nr. [-]	a [mm]	t_w [mm]	b_{eff} [mm]	I_{rf} [cm ⁴]	I_{eff} [mm]	$\sigma_{oz,Ed}$ [N/mm ²]
M11	600	10	101,3	44,78	115,4	-433,2
M12	600	10	101,3	44,78	115,4	-433,2
M13	600	10	111,3	89,56	145,4	-343,9
M14	600	10	111,3	89,56	145,4	-343,9
Fall (a) schubstarr						



Wie bereits erwähnt, unterscheidet der Eurocode bei der Ermittlung der effektiven Lastausbreitungslänge in drei Fälle der Schienenlagerung bzw. -befestigung (siehe Tab. 6).

Der Fall (a) trifft in der Arbeit auf die Modelle mit Blockschiene zu, die Fälle (b) bzw. (c) auf die Modelle mit Profilschienen und ohne (d. h. starre Lagerung) bzw. mit elastischer Unterlage.

Es kann festgestellt werden, dass sich bei den Modellen M1 bis M10 für die Varianten ohne elastische Unterlage (a, c, e und f) eine kürzere effektive Lastausbreitungslänge und daraus folgend eine betragsmäßig höhere vertikale Druckspannung ergibt als bei den Varianten mit elastischer Unterlage (b, d, g und h).

Im Gegensatz zu ihrer Lagerung (schubstarr / nicht schubstarr / elastisch) wird die Befestigung der Schiene auf dem Kranbahnträger im Eurocode bei den lokalen vertikalen Druckspannungen nicht berücksichtigt, d. h. die Ergebnisse sind z. B. für die Variante a (starre Lagerung ohne Klemmen) ident mit jenen der Variante c (starre Lagerung mit Klemmen), Variante e (Klemmen ohne Spalt) und Variante f (durchgehende Klemmung). Das bedeutet, dass weder die Klemmwirkung berücksichtigt wird noch die konstruktive Ausführung der Klemmen einen Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Von den in der Arbeit betrachteten geometrischen Parametern hat nur die Flanschdicke auf die vertikalen Druckspannungen nach Eurocode einen bemerkbaren Einfluss, da diese in die effektive Flanscbreite (somit auch in das Flächenträgheitsmoment des Flansches) und in weiterer Folge in die effektive Lastausbreitungslänge einfließt. Dies ist dadurch erkennbar, dass die Spannungen von Modellen mit dickeren Flanschen im Vergleich zu jenen mit dünneren Flanschen geringer sind.

Vergleicht man beispielsweise die Modelle M1 und M2, so ist die lokale vertikale Druckspannung in beiden Fällen (b) und (c) (bzw. dementsprechend bei den Varianten a, c, e und f mit starrer Lagerung sowie bei den Varianten b, d, g und h mit elastischer Unterlage) beim Modell M2 betragsmäßig kleiner als beim Modell M1 (dargestellt sind nachfolgend nur Spannungen für Fall (b) bzw. der Varianten mit starrer Unterlage):

- ▶ M1: $t_f = 20 \text{ mm}$ $\sigma_{oz,Ed} = -168,3 \text{ N/mm}^2$ $h_w = 2000 \text{ mm}$
- ▶ M2: $t_f = 40 \text{ mm}$ $\sigma_{oz,Ed} = -158,8 \text{ N/mm}^2$ $h_w = 2000 \text{ mm}$

Im Gegensatz dazu ändert eine andere Steghöhe nichts an den lokalen vertikalen Druckspannungen. So zum Beispiel beim Vergleich der Modelle M1 und M3 für Fall (b), d. h. für Varianten mit starrer Unterlage:

- ▶ M1: $h_w = 2000 \text{ mm}$ $\sigma_{oz,Ed} = -168,3 \text{ N/mm}^2$ $t_f = 20 \text{ mm}$
- ▶ M3: $h_w = 1000 \text{ mm}$ $\sigma_{oz,Ed} = -168,3 \text{ N/mm}^2$ $t_f = 20 \text{ mm}$

Der jeweils andere Parameter (t_f bzw. h_w) ist bei diesen Vergleichen bei beiden untersuchten Modellen gleich (in grauer Schrift vermerkt).

▶ Lokale Biegespannungen zufolge exzentrischer Radlast

Die in Tab. 13 aufgelisteten Maximalwerte der durch Torsion des Obergurts infolge exzentrischer Radlast hervorgerufenen lokalen Biegespannungen wurden nach Gl. (3) ermittelt.

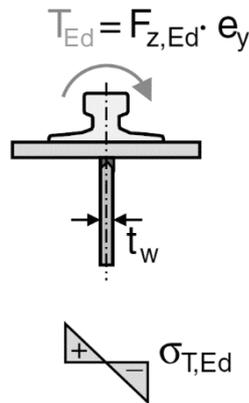
Hier macht der Eurocode keinen Unterschied zwischen den verschiedenen Varianten der Modelle in dieser Arbeit, was bedeutet, dass die Lagerung und Befestigung der Schiene auf dem Flansch überhaupt nicht berücksichtigt werden.

Da in die Berechnung sowohl die Steghöhe (im Hilfwert η enthalten) als auch die Flanschdicke (im Torsionsträgheitsmoment von Schiene und Obergurt I_T enthalten) nicht direkt einfließen, ist deren

jeweiliger Einfluss auf die Ergebnisse nicht ersichtlich. Das zeigt sich in Tab. 13 dadurch, dass sich für jedes Modell (und damit für jede unterschiedliche Trägergeometrie) eine andere Biegespannung ergibt.

Tab. 13: Berechnung der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,Ed}$ nach EN 1993-6

Lokale Biegespannungen zufolge exzentrischer Radlast					
Modell Nr.	η	I_T	e_y	T_{Ed}	$\sigma_{T,Ed}$
[-]	[-]	[cm ⁴]	[mm]	[kNm]	[N/mm ²]
M1	0,3397	663,27	25,0	1250,0	-41,7
M2	0,2482	1241,93	25,0	1250,0	-22,6
M3	0,3774	663,27	25,0	1250,0	-51,0
M4	0,2758	1241,93	25,0	1250,0	-27,8
M5	0,5038	111,69	13,8	687,5	-161,1
M6	0,4533	111,69	13,8	687,5	-132,4
M7	0,3479	234,19	13,8	687,5	-80,0
M8	0,3131	234,19	13,8	687,5	-65,3
M9	0,4490	111,69	13,8	687,5	-130,0
M10	0,3100	234,19	13,8	687,5	-64,0
M11	0,6367	69,93	15,0	750,0	-268,7
M12	0,5730	69,93	15,0	750,0	-222,4
M13	0,3838	192,43	15,0	750,0	-105,4
M14	0,3454	192,43	15,0	750,0	-86,1



► Maximale und minimale lokale vertikale Spannungen im Steg

Nachfolgende Tab. 14 listet erneut die bereits gezeigten Spannungskomponenten aus zentrischem und exzentrischem Radlastanteil auf, sowie zusätzlich die daraus resultierenden maximalen und minimalen lokalen Vertikalspannungen (Berechnung entsprechend den Gl. (8) und (9)) im Stegblech.

$$\sigma_{z,Ed,max} = -(|\sigma_{oz,Ed}| - |\sigma_{T,Ed}|) \quad \text{Gl. (8)}$$

$$\sigma_{z,Ed,min} = -(|\sigma_{oz,Ed}| + |\sigma_{T,Ed}|) \quad \text{Gl. (9)}$$

mit:

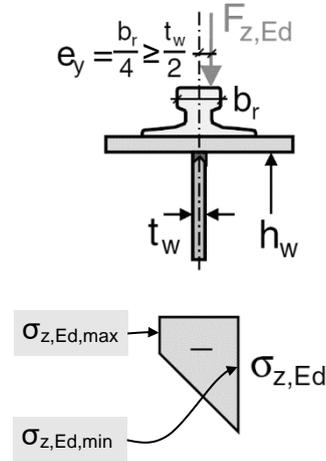
$\sigma_{oz,Ed}$... lokale vertikale Druckspannung im Steg zufolge zentrischer Radlast (Membranspannung)

$\sigma_{T,Ed}$... lokale Biegespannungen im Steg zufolge Torsion des Obergurts durch exzentrische Radlast

Bei den vertikalen Spannungen am Lastangriffspunkt bzw. unter der Radlast handelt es sich um Druckspannungen (d. h. die Ergebniswerte besitzen ein negatives Vorzeichen). Daher ist in Tab. 14 die maximale Vertikalspannung $\sigma_{z,Ed,max}$ als die betragsmäßig kleinere Spannung (auf der lastabgewandten Stegseite), die minimale Vertikalspannung $\sigma_{z,Ed,min}$ dagegen als die betragsmäßig größere Spannung (auf der lastzugewandten Stegseite) definiert.

Tab. 14: resultierende maximale und minimale Vertikalspannungen im Stegblech $\sigma_{z,Ed}$

Lokale vertikale Spannungen im Steg zufolge Radlast am Obergurt					
Modell Nr. [-]	$\sigma_{oz,Ed}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,Ed}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,Ed,max}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,Ed,min}$ [N/mm ²]	
M1a/c/e/f	-168,3	-41,7	-126,6	-209,9	Fall (b) nicht schubstarr
M2a/c/e/f	-158,8	-22,6	-136,2	-181,5	
M3a/c/e/f	-168,3	-51,0	-117,3	-219,3	
M4a/c/e/f	-158,8	-27,8	-131,0	-186,7	
M5a/c/e/f	-282,6	-161,1	-121,5	-443,7	
M6a/c/e/f	-282,6	-132,4	-150,2	-414,9	
M7a/c/e/f	-269,6	-80,0	-189,6	-349,6	
M8a/c/e/f	-269,6	-65,3	-204,3	-334,9	
M9a/c/e/f	-282,6	-130,0	-152,6	-412,5	
M10a/c/e/f	-269,6	-64,0	-205,5	-333,6	
M1b/d/g/h	-128,7	-41,7	-87,0	-170,4	Fall (c) elastische Unterlage
M2b/d/g/h	-121,5	-22,6	-98,8	-144,1	
M3b/d/g/h	-128,7	-51,0	-77,7	-179,7	
M4b/d/g/h	-121,5	-27,8	-93,6	-149,3	
M5b/d/g/h	-216,1	-161,1	-55,0	-377,2	
M6b/d/g/h	-216,1	-132,4	-83,7	-348,4	
M7b/d/g/h	-206,2	-80,0	-126,1	-286,2	
M8b/d/g/h	-206,2	-65,3	-140,9	-271,4	
M9b/d/g/h	-216,1	-130,0	-86,1	-346,0	
M10b/d/g/h	-206,2	-64,0	-142,1	-270,2	
M11	-433,2	-268,7	-164,5	-701,9	Fall (a) schubstarr
M12	-433,2	-222,4	-210,8	-655,6	
M13	-343,9	-105,4	-238,5	-449,2	
M14	-343,9	-86,1	-257,8	-429,9	



3.5.4 Verlauf der Spannungen und Verdrehungen in Trägerlängsrichtung

Die bereitgestellten Ergebnisse der Spannungen nach Eurocode sind nur Maximalwerte am Punkt der Lasteinleitung, in dieser Arbeit wird allerdings auch der Spannungs- und Verdrehungsverlauf bis zur Quersteife untersucht.

Für den analytischen Verlauf der Verdrehungen $\varphi(x_{EC})$ und Biegespannungen $\sigma_{T,Ed}(x_{EC})$ über die Trägerlänge stehen die Gl. (13) und (14) zur Verfügung, die auf Oxfort (bzw. auf die entsprechenden Differentialgleichungen zurückgehen. Zur Lösung der homogenen Differentialgleichung betrachtete Oxfort folgenden Ausdruck (bzw. Gl. (10)) als annähernd konstant ([4], Kapitel 2.1.):

$$\lambda^2 = \frac{\bar{m}_d}{G \cdot I_T} \quad \text{Gl. (10)}$$

In dieser Arbeit wurde λ , der Hilfwert zur Ermittlung der Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung, nach Gl. (11) berechnet (in dieser Arbeit verwendete Werte siehe Tab. 16):

$$\lambda = \sqrt{\frac{2\pi \cdot t_w^3}{3a \cdot I_T \cdot (1-\nu)} \cdot \frac{\sinh^2\left(\pi \cdot \frac{h_w}{a}\right)}{\sinh\left(2\pi \cdot \frac{h_w}{a}\right) - 2\pi \cdot \frac{h_w}{a}}} \quad \text{Gl. (11)}$$

Mithilfe dieses Hilfwerts λ lässt sich nach Gl. (12) die elastische Drehbettung des Obergurts durch das biegesteif angeschlossene Stegblech wie folgt ermitteln (in dieser Arbeit verwendete Werte siehe Tab. 16):

Gl. (12)

$$\overline{m}_d = \lambda^2 \cdot G \cdot I_T$$

Anschließend werden die - mithilfe der in Tab. 15 und 16 gegebenen Parameter und Hilfwerte - ermittelten Ergebnisverläufe mit den in dieser Arbeit numerisch berechneten Spannungs- und Verdrehungsverläufen gegenübergestellt und verglichen.

Tab. 15: Materialkennwerte für die Berechnung der Spannungs- und Verdrehungsverläufe

Querkontraktionszahl	ν	0,3	[-]
Schubmodul	G	81000	[N/mm ²]

► Verlauf der Verdrehung des Querschnitts in Trägerlängsrichtung

$$\varphi(x_{EC}) = \frac{T_{Ed}}{2\lambda \cdot GI_T} \cdot \frac{\sinh(\lambda \cdot x_{EC})}{\cosh\left(\lambda \cdot \frac{a}{2}\right)} \quad \text{Gl. (13)}$$

► Verlauf der lokalen Biegespannungen in Trägerlängsrichtung

$$\sigma_{T,Ed}(x_{EC}) = \varphi(x_{EC}) \cdot \overline{m}_d \cdot \frac{6}{t_w^2} = T_{Ed} \cdot \frac{6}{t_w^2} \cdot \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{\sinh(\lambda \cdot x_{EC})}{\cosh\left(\lambda \cdot \frac{a}{2}\right)} \quad \text{Gl. (14)}$$

mit:

- a ... Abstand der Quersteifen in Trägerlängsrichtung
- G ... Schubmodul des Materials
- h_w ... Höhe des Stegblechs (bzw. Steghöhe, entspricht dem lichten Abstand zwischen den Flanschen)
- I_T ... Summe der Torsionsträgheitsmomente von Kranbahnträgerobergurt u. Kranschiene
- λ ... Hilfwert zur Berechnung der Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung (Berechnung nach Gl. (11))
- \overline{m}_d ... elastische Drehbettung des Obergurts durch biegesteif angeschlossenes Stegblech (Berechnung nach Gl. (12))
- ν ... Querkontraktionszahl (Poissonzahl) des Materials
- T_{Ed} ... Torsionsmoment zufolge seitlicher Exzentrizität der Radlast (Berechnung nach Gl. (4))
- t_w ... Dicke des Stegblechs (bzw. Stegdicke)
- x_{EC} ... Pfadlänge (ausgehend von der Quersteife) für die Spannungs- und Verdrehungsverläufe in Trägerlängsrichtung nach Eurocode

Die Pfadlänge x_{EC} für diese analytischen Spannungs- und Verdrehungsverläufe nach Eurocode unterscheidet sich von der Pfadlänge x aus der FE-Berechnung vom „Ausgangspunkt“. Während die Pfadlänge x_{EC} von der nächstgelegenen Quersteife ausgehend definiert ist, wird die Pfadlänge x aus der FE-Berechnung vom Lasteinleitungspunkt in Feldmitte aus abgelesen.

Daraus ergeben sich in dieser Arbeit folgende Stellen, zwischen welchen die unterschiedlichen Pfadlängen definiert sind:

Stelle	Lasteinleitung	Quersteife
▶ FE	$x = 0$	$x = a/2$ [mm]
▶ EC	$x_{EC} = a/2$ [mm]	$x_{EC} = 0$

Der in der Arbeit untersuchte Bereich erstreckt sich dabei von der Stelle der Lasteinleitung in Feldmitte bis zur nächstgelegenen Quersteife (bzw. umgekehrt, der Abstand dazwischen entspricht der Hälfte des Quersteifenabstands in Trägerlängsrichtung a , d. h. $a/2$).

Tab. 16: Parameter und Hilfwerte für die Berechnung der Spannungs- und Verdrehungsverläufe

Modell Nr. [-]	a [mm]	t_w [mm]	h_w [mm]	I_T [cm ⁴]	$\lambda \cdot a$ [mm]	T_{Ed} [kNcm]	\bar{m}_d [Nmm ²]
M1	2000	10	2000	663,27	0,67839	1250,0	61813
M2	2000	10	2000	1241,93	0,49577	1250,0	61813
M3	2000	10	1000	663,27	0,75388	1250,0	76333
M4	2000	10	1000	1241,93	0,55093	1250,0	76333
M5	600	10	300	111,69	1,00623	687,5	254444
M6	600	10	600	111,69	0,90548	687,5	206042
M7	600	10	300	234,19	0,69490	687,5	254444
M8	600	10	600	234,19	0,62532	687,5	206042
M9	600	10	1000	111,69	0,89671	687,5	202068
M10	600	10	1000	234,19	0,61926	687,5	202068
M11	600	10	300	69,93	1,27170	750,0	254444
M12	600	10	600	69,93	1,14437	750,0	206042
M13	600	10	300	192,43	0,76661	750,0	254444
M14	600	10	600	192,43	0,68985	750,0	206042

4 Numerische Berechnung

Sämtliche numerischen Berechnungen in dieser Arbeit wurden mithilfe der Finite Elemente-Software „Abaqus/CAE 2017“ ([8], im Folgenden kurz als „Abaqus“ bezeichnet) durchgeführt, die anschließende Auswertung und Aufbereitung der Ergebnisse erfolgte in Microsoft Excel.

4.1 Übersicht Systeme

In Trägerlängsrichtung ist das statische System der betrachteten Modelle ein Einfeldträger mit der reduzierten Länge $L = 3 \cdot a$, d. h. die Trägerlänge entspricht dem Dreifachen des Quersteifenabstands. Dies deshalb, da nur die lokalen Spannungen von Bedeutung sind und die globalen Längsspannungen damit bewusst unterdrückt werden. Dadurch ergeben sich für das Stegblech drei „Felder“ zwischen den Quersteifen, wobei in dieser Arbeit nur das mittlere Feld für die Ergebnisse relevant ist (in diesem Feld liegt der Angriffspunkt der Radlast). Die beiden äußeren Felder werden mit abgebildet, um ein abruptes Ende der Ergebnisverläufe an den Quersteifen (bzw. an den Enden des mittleren Feldes) zu verhindern.

Für die Modellierung kann die Symmetrie des Systems genutzt werden, d. h. von den erwähnten drei Feldern werden nur eineinhalb in Abaqus modelliert. Wie in den Abb. 15 bis 17 ersichtlich, liegt diese Symmetriebedingung am rechten Ende des Modells, wo sich auch der Lastangriffspunkt befindet. Am anderen bzw. linken Ende ist das Modell entlang der Unterkante des Untergurtes gelagert.

Die Einleitung der Einzellast (bzw. Radlast) in das Volumenmodell erfolgt über einen dreidimensional modellierten Lasteinleitungsstempel, welcher mit der jeweiligen seitlichen Exzentrizität und auf Kontakt mit dem Schienenkopf (bzw. der Abnutzungsfläche der Kranschiene) eingefügt wird. Dies soll eine möglichst realitätsnahe Belastung der Kranschiene bzw. des Kranbahnträgers sicherstellen.

► System der Modelle M1 bis M4 mit Profilschiene A 100

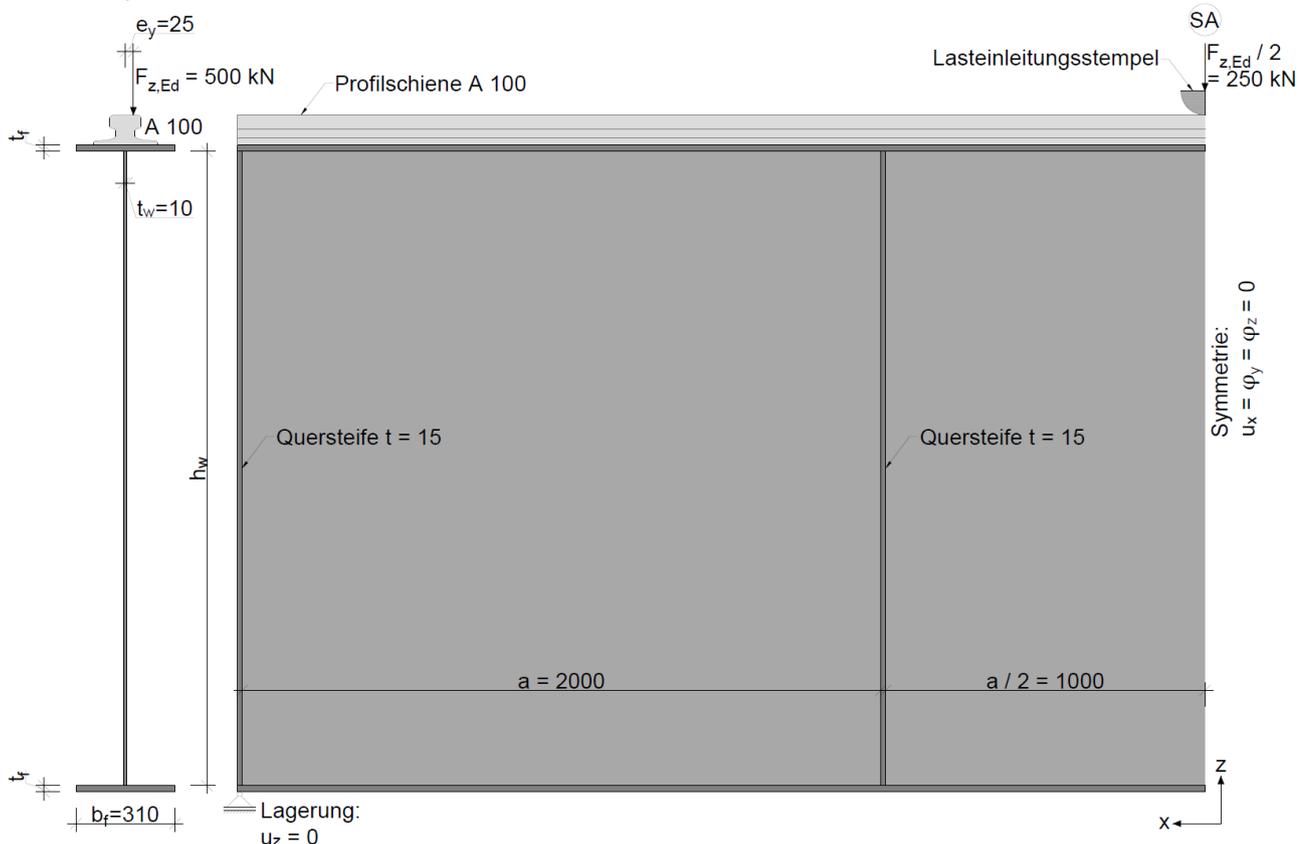


Abb. 15: Querschnitt und Ansicht des Systems der Modelle mit Profilschiene A 100 (M1 bis M4)

► System der Modelle M5 bis M10 mit Profilschiene A 55

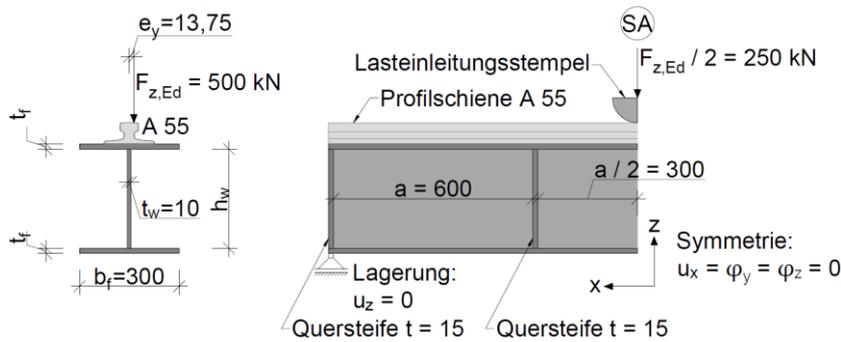


Abb. 16: Querschnitt und Ansicht des Systems der Modelle mit Profilschiene A 55 (M5 bis M10)

► System der Modelle M11 bis M14 mit Blockschiene 60/30

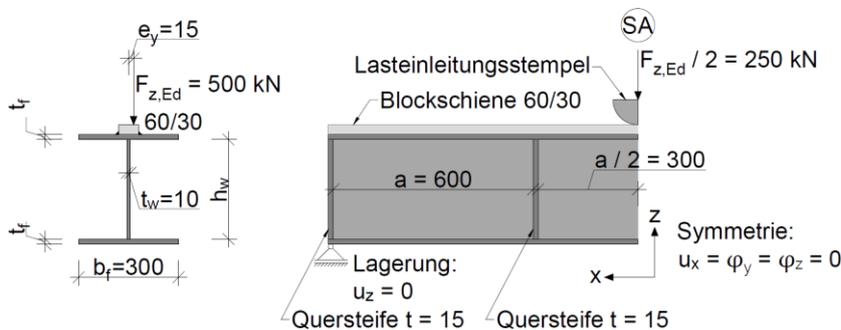


Abb. 17: Querschnitt und Ansicht des Systems der Modelle mit Blockschiene 60/30 (M11 bis M14)

4.2 Eingabe der FE-Modelle in Abaqus

Der Workflow bei der Modellierung der einzelnen Modelle bzw. Konfigurationen war jeweils der gleiche und wird nun (anhand ausgewählter Modelle) beispielhaft beschrieben und dargestellt.

4.2.1 Bauteile und Assembly

Grundsätzlich besteht jedes FE-Modell aus mehreren Bauteilen, den sogenannten „Parts“:

- Kranbahnträger
- Kranschiene
- Lasteinleitungsstempel
- Quersteife
- Klemme

Diese Bauteile werden (bis auf die Quersteifen) als dreidimensionale Volumenkörper modelliert, indem beispielsweise für den Träger zuerst der Querschnitt gezeichnet und dann die Abmessung in Längsrichtung (bzw. normal zur Zeichenebene) definiert wird.

Die Quersteifen sollen den Obergurt gegen Verdrehung stützen, weshalb für die Berechnung nur deren Dehnsteifigkeit von Bedeutung ist und daher zweidimensionale Schalenelemente ausreichend genau sind.

Jedem erstellten Bauteil wird danach ein Material mit entsprechenden Festigkeitseigenschaften (in dieser Arbeit: Stahl, Kennwerte siehe Tab. 17) zugewiesen.

Tab. 17: in der FE-Berechnung verwendete Materialkennwerte

Material "Stahl"		
Materialverhalten	elastisch	[-]
E-Modul E	210000	[Nmm ²]
Querkontraktionszahl ν	0,3	[-]

Den Quersteifen wird zusätzlich zum Material ein zuvor definierter Querschnitt („Section“) zugeschrieben, in welchem sich eine rechnerische (d. h. im Modell nicht sichtbare) Dicke der Schalenelemente (in dieser Arbeit: $t = 15 \text{ mm}$) festlegen lässt.

Anschließend werden im Modul „Assembly“ eine oder mehrere sogenannte „Instanzen“ („Instances“) der einzelnen Bauteile eingefügt und zur gewünschten Konfiguration angeordnet (siehe Abb. 18). So werden etwa vom Bauteil Quersteife insgesamt vier Instanzen eingefügt und an die richtigen Stellen verschoben.

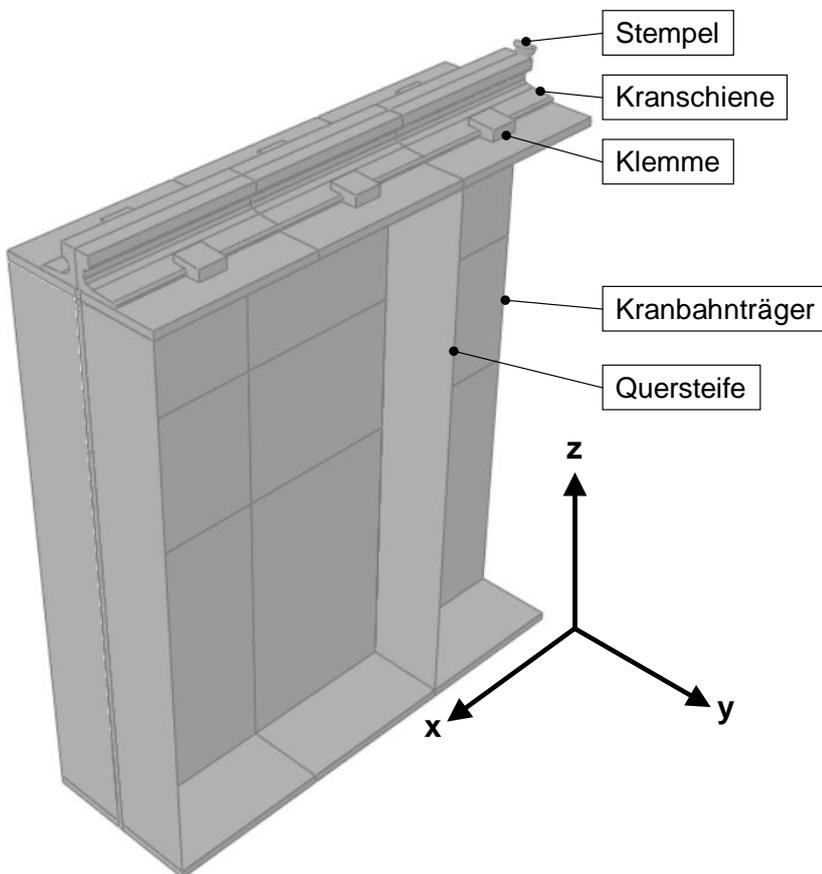


Abb. 18: zusammengesetzte Bauteile (Parts) eines FE-Modells im Modul Assembly (dargestellt ist M9c)

Die Modellierung der elastischen Unterlage (bei den Varianten b, d, g und h der Modelle M1 bis M10) erfolgt als Federelement mit der fiktiven Dicke $t = 0$ (d. h. die Kranschiene liegt im FE-Modell bündig am Kranbahnträgerobergurt auf, siehe Kapitel 4.2.3).

4.2.2 Randbedingungen und Lasten

Der nächste Schritt ist die Eingabe von Randbedingungen und Lasten im Modul „Steps“, wofür zuerst ein neuer „Belastungsschritt“ („Step“) angelegt wird, in dem die Randbedingungen und Lasten eingegeben werden können.

Die drei Randbedingungen des Systems sind (siehe Tab. 18):

- ▶ das Auflager (siehe Abb. 19, entspricht einem zweiwertigen Lager), welches an der Unterkante des Untergurtes (gegenüber des Lasteinleitungsstempels) liegt und eine Verschiebung in Trägerlängsrichtung (x -Richtung) sowie Verdrehung um die y -Achse ermöglicht,
- ▶ der Lasteinleitungsstempel (siehe Abb. 20), der mit einer gewissen seitlichen Exzentrizität e_y auf dem Schienenkopf aufliegt und nur eine vertikale Verschiebung (d. h. in z -Richtung) zulässt
- ▶ die Symmetriebedingung (siehe Abb. 21) in Feldmitte des Gesamtsystems bzw. am belasteten Ende des Modells. Diese Symmetrie wird erreicht, indem die Verschiebung in x -Richtung sowie Verdrehungen um y - und z -Achse gesperrt sind.

Tab. 18: Randbedingungen (BC = „Boundary Condition“) der FE-Modelle

BC Nr. [-]	Bezeichnung [-]	u_x [mm]	u_y [mm]	u_z [mm]	φ_x [rad]	φ_y [rad]	φ_z [rad]
BC1	Auflager		0	0	0		0
BC2	Stempel	0	0		0	0	0
BC3	Symmetrie	0				0	0

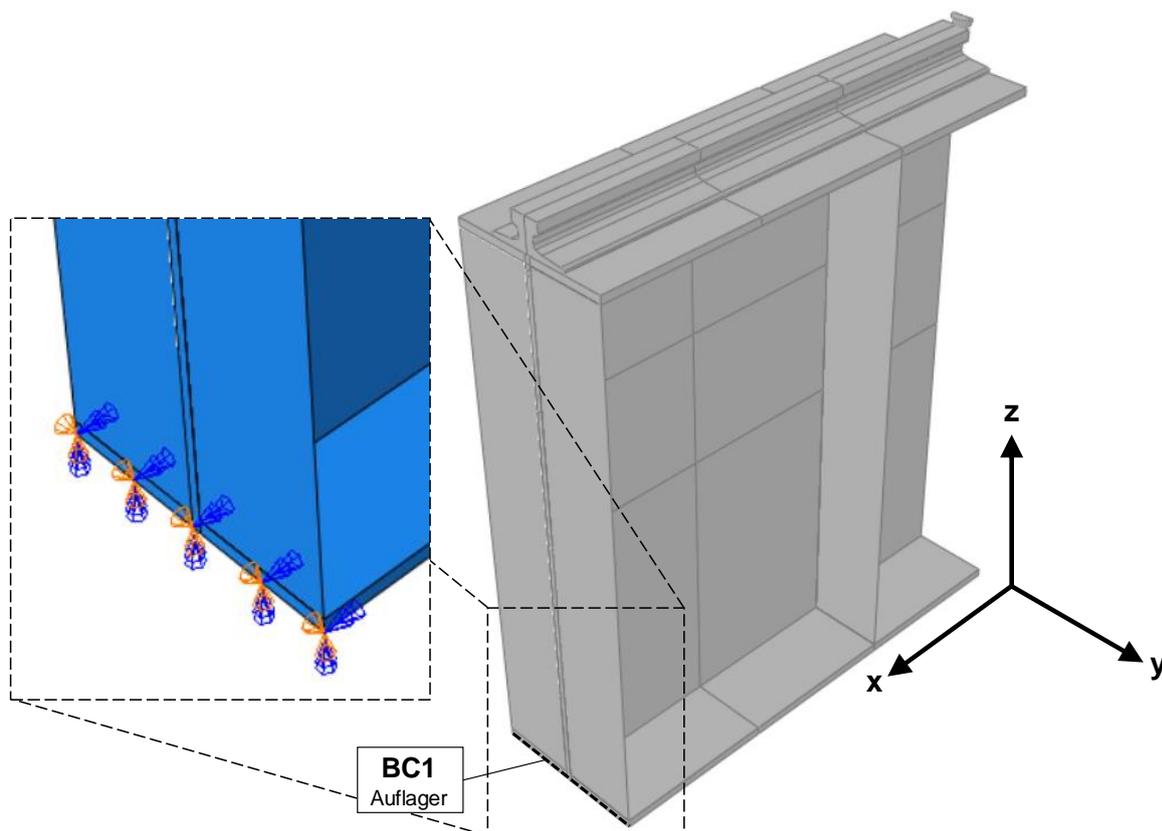


Abb. 19: Lage der Randbedingung BC 1 (Auflager am Trägerende)

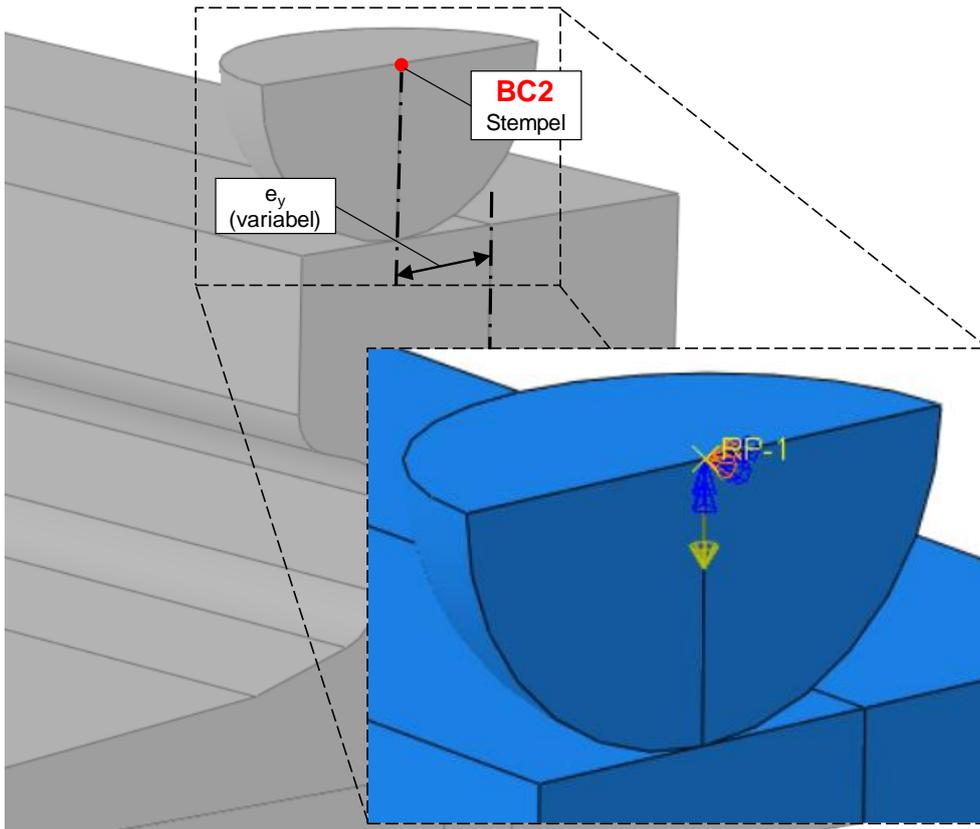


Abb. 20: Lage der Randbedingung BC 2 (Stempel für Radlasteinleitung)

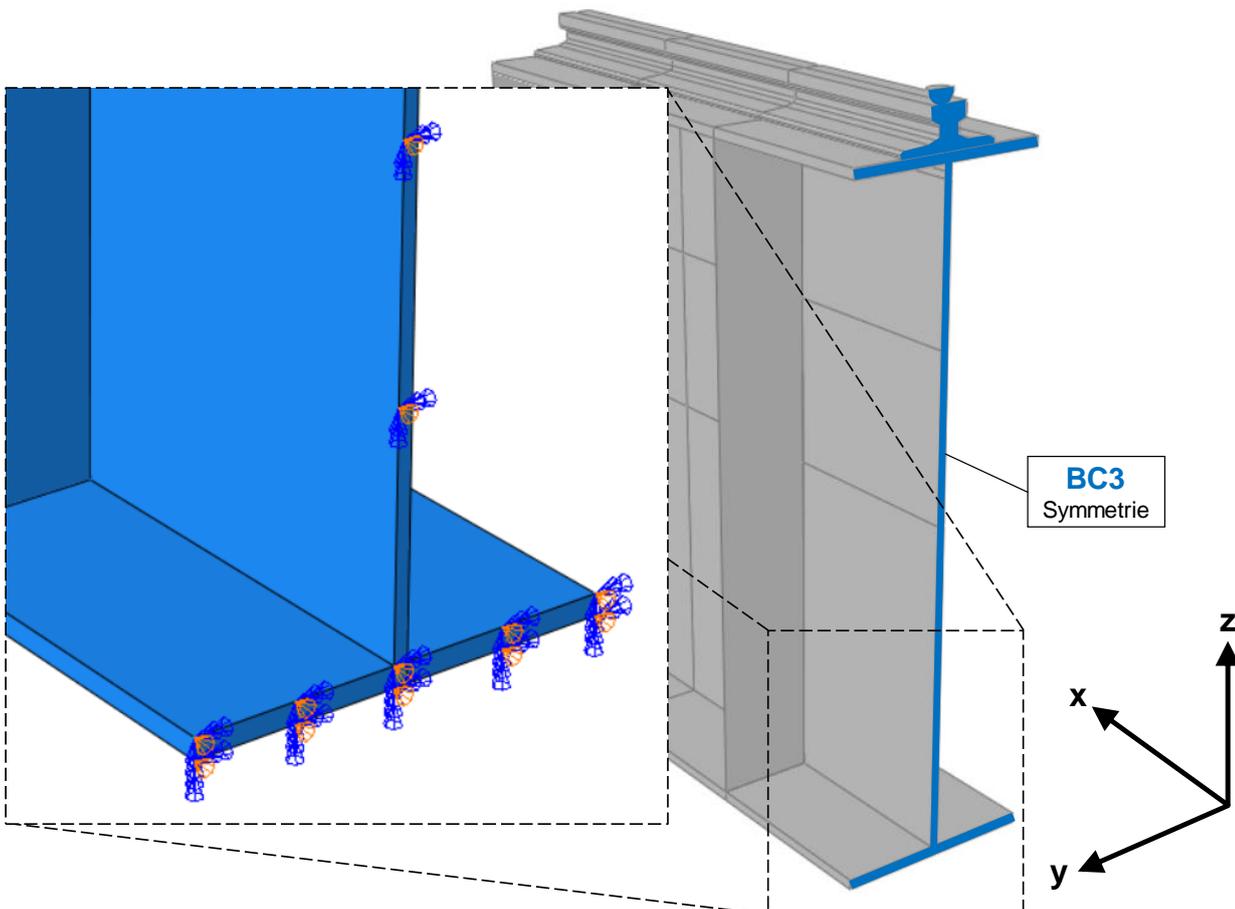


Abb. 21: Lage der Randbedingung BC 3 (Symmetrie in Trägermitte)

Durch die Symmetriebedingung in der Ebene der Lasteinleitung wird nur die Hälfte der Radlast, mit der in dieser Arbeit gerechnet wird (siehe Tab. 19), tatsächlich im FE-Modell auf den Stempel und damit auf Schiene und Träger aufgebracht.

Für die Last können drei Komponenten in x-, y- und z-Richtung angegeben werden, in dieser Arbeit wird, wie bereits erwähnt, nur die vertikale Radlast (d. h. Lastkomponente in z-Richtung) berücksichtigt. Das negative Vorzeichen ist notwendig, damit die Last in die richtige Richtung wirkend angesetzt wird (siehe Abb. 22).

Tab. 19: auf die FE-Modelle aufgebrachte Last

Last	Bezeichnung	F_x	F_y	F_z
[-]	[-]	[N]	[N]	[N]
$F_{z,Ed} / 2$	Radlast	0	0	-250000

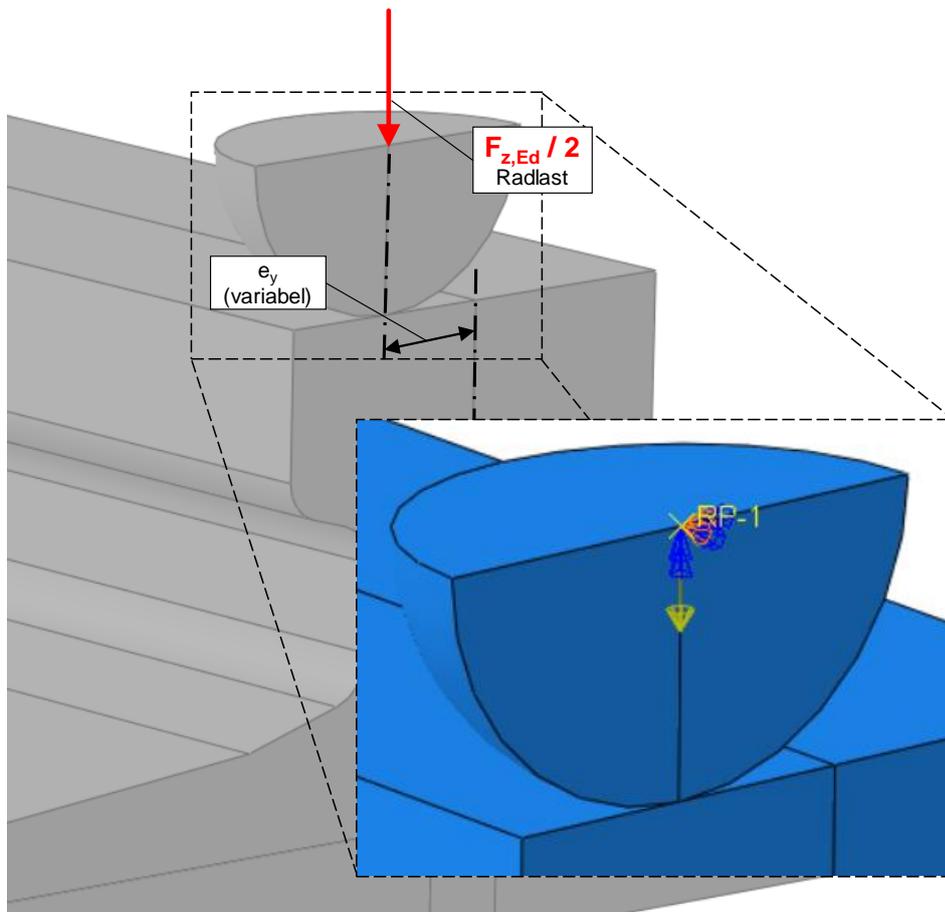


Abb. 22: Lage des Lastangriffspunktes der Radlast

4.2.3 Kontaktbedingungen

In weiterer Folge werden die Kontaktbedingungen („Interactions“ und „Constraints“, d. h. „Interaktionen“ und „Zwänge“) zwischen den einzelnen Bauteilen definiert.

Zwischen der Unterseite der Kranschiene und der Oberseite des Kranbahnträgerobergurts wird eine Interaktion eingegeben, wobei tangential zur Kontaktfläche ein Reibungskoeffizient für Stahl auf Stahl von $\mu = 0,2$ und normal zur Kontaktfläche ein „harter Kontakt“, d. h. starre Lagerung, angenommen wird. Dies erlaubt auch das freie und unbehinderte Abheben der Schiene in vertikaler Richtung.

Ähnlich ist der Kontakt zwischen dem Lasteinleitungsstempel und der Schiene bzw. deren Abnutzungsfläche definiert, mit dem Unterschied, dass sich die beiden Bauteile nicht voneinander lösen können. Damit wird sichergestellt, dass die aufgebrachte Last auch bei Verschiebung der Schiene oder des Stempels übertragen wird.

Die Verbindungen zwischen den Quersteifen und dem Kranbahnträger sowie die Befestigung der Klemmen am Obergurt werden jeweils über entsprechende Constraints abgebildet.

Bei den Varianten mit elastischer Unterlage zwischen Schiene und Flansch wird zusätzlich zur Reibung tangential zur Kontaktfläche (Reibungskoeffizient für Stahl auf Stahl von $\mu = 0,2$) eine vertikale Federsteifigkeit normal zur Kontaktfläche festgelegt. Diese Steifigkeit wurde im Rahmen der Arbeit mit 20 N/mm^3 angenommen und beinhaltet die Dicke der elastischen Unterlage von 6 mm (bündige Lage der Schiene am Trägerobergurt).

Für die Varianten mit Klemmen wird der Kontakt der Klemmen mit der Kranschiene in gleicher Art und Weise abgebildet wie der Kontakt zwischen Schiene und Flansch, der Reibungskoeffizient in tangentialer Richtung wird dabei mit $\mu = 0,1$ definiert. Bei den theoretischen Grenzfällen der durchgehenden Klemmung (d. h. Variante f und Variante h) wird dieser Reibbeiwert noch weiter reduziert und mit $\mu = 0,01$ angenommen.

4.2.4 Generieren des FE-Netzes

Der letzte notwendige Schritt vor der Durchführung der Berechnungen ist das Generieren eines Netzes im Modul „Mesh“. Dabei werden die einzelnen Bauteile im Modul „Part“ partitioniert, d. h. in mehrere Bereiche unterteilt (siehe Abb. 23), die entsprechend der notwendigen Genauigkeit mit unterschiedlicher Netzfeinheit und/oder verschiedenen Elementtypen vernetzt werden können.

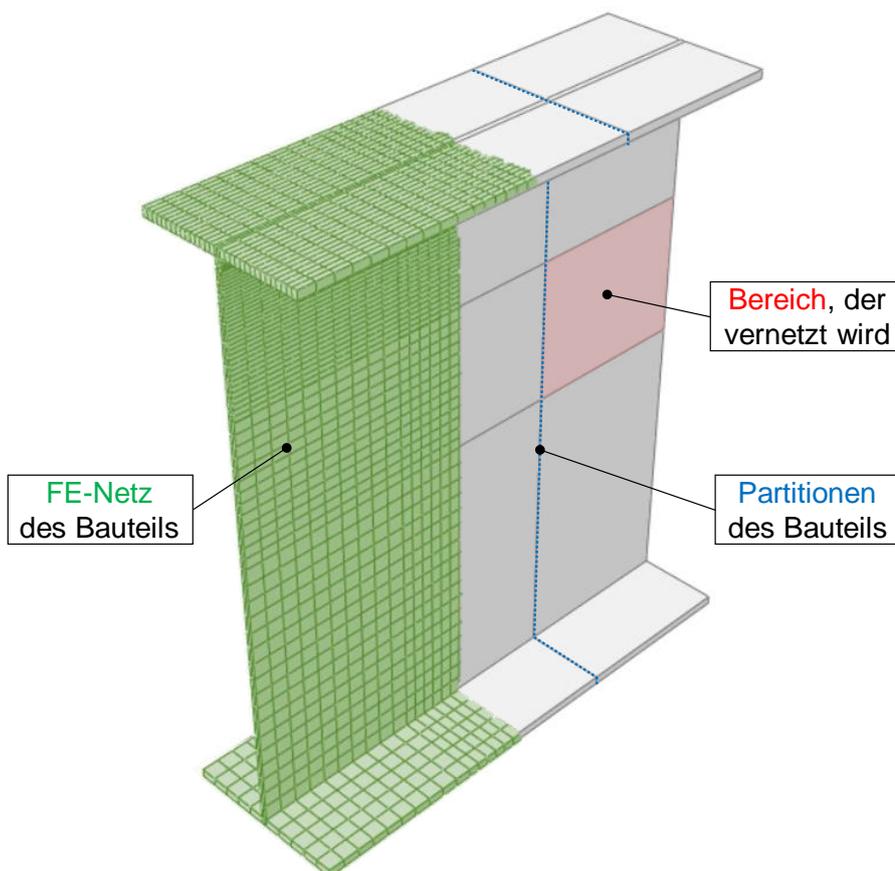


Abb. 23: partitionierter und vernetzter Bauteil „Träger“ (Modell M9)

Der Obergurt und das oberste Viertel des Stegblechs werden mit hexaedrischen Elementen 2. Ordnung (d. h. quaderförmige Volumenelementen mit quadratischen Ansatzfunktionen) vernetzt, da vor allem im oberen Stegbereich bzw. in unmittelbarer Nähe zu den Ergebnispfaden (siehe Abb. 24 und 27) genaue Ergebnisse gewünscht sind. Die Elementgröße beträgt in diesem fein vernetzten Bereich (siehe Abb. 24) bei allen Modellen in dieser Arbeit $10 / 5 / 2,5 \text{ mm}$ (d. h. die Elemente sind jeweils 10 mm in Trägerlängsrichtung lang, 5 mm breit und $2,5 \text{ mm}$ hoch).

Je nach Größe des untersuchten Modells sind die Elementgrößen der restlichen Bauteile entsprechend größer, beispielsweise ist der Obergurt des Modells M9 mit Elementen vernetzt, die $10 / 10 / 15 \text{ mm}$ (d. h. jeweils 10 mm in x - und y -Richtung sowie 15 mm hoch, was der Flanschdicke entspricht) groß sind. Über die Dicke des Stegblechs sind bei allen Modellen zwei Elemente vorhanden (jeweils 5 mm breit), was ebenfalls die Genauigkeit der Resultate erhöht (siehe Abb. 24).

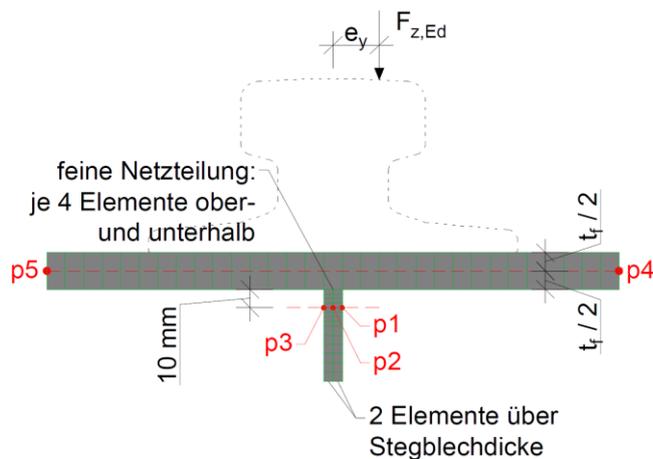


Abb. 24: Lage der Ergebnispfade und angrenzender finiter Elemente im Querschnitt

Für die Obergurte der Modelle mit dünnem Flansch (d. h. Modell M1 und M3 mit $t_f = 20 \text{ mm}$ bzw. Modell M5, M6, M9, M11 und M12 mit $t_f = 15 \text{ mm}$) wird ein Element über die Gurtdicke angeordnet (siehe Abb. 25 links). Bei den Modellen mit dickem Flansch (d. h. Modell M2 und M4 mit $t_f = 40 \text{ mm}$ bzw. Modell M7, M8, M10, M13 und M14 mit $t_f = 25 \text{ mm}$) sind die Obergurte mit zwei Elementen über ihre Dicke modelliert (siehe Abb. 25 rechts).

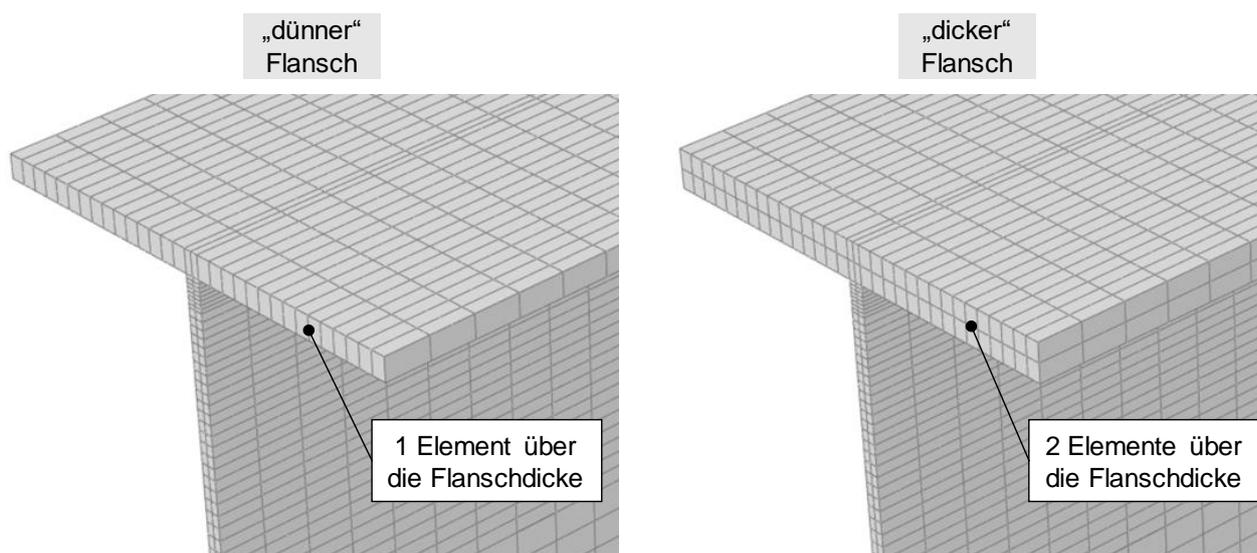


Abb. 25: Vergleich der Elementanzahl über die Gurtdicke bei „dünnem“ (links) bzw. „dickem“ Flansch (rechts)

Für das restliche Stegblech sowie den unteren Flansch des Trägers sind lineare Elemente (hexaedrische Elemente 1. Ordnung) ausreichend.

Die Kranschiene wird ebenso mit solchen Elementen vernetzt (hexaedrische Elemente mit linearer Ansatzfunktion), da für die Ergebnisse hauptsächlich die Steifigkeit der Schiene relevant ist (wofür lineare Elemente ausreichend genau sind).

Wie die Schiene sind auch die Klemmen mittels linearer Hexaeder-Elemente vernetzt.

Für den Lasteinleitungsstempel werden aufgrund der sphärischen Form tetraedrische Elemente 2. Ordnung verwendet, da diese Elementform die runde Oberfläche des Stempels besser abbilden kann als ein quaderförmiges Element.

In Tab. 20 sind exemplarisch für jeden Bauteil des Modelles M9c die Elemente des FE-Netzes (siehe Abb. 26) beschrieben, dieselben Elementtypen werden auch bei den restlichen Modellen verwendet.

Tab. 20: Übersicht über die in Modell M9c verwendeten Elemente

Bauteil	Element...			geometrische Ordnung
	...typ	...form	...anzahl	
Klemme	C3D8R	hexaedrisch	390	linear
Träger	C3D8R	hexaedrisch	3960	linear
	C3D20R	hexaedrisch	6160	quadratisch
Schiene	C3D8R	hexaedrisch	12155	linear
Stempel	C3D10	tetraedrisch	618	quadratisch
Quersteife	S4R	viereckig	165	linear

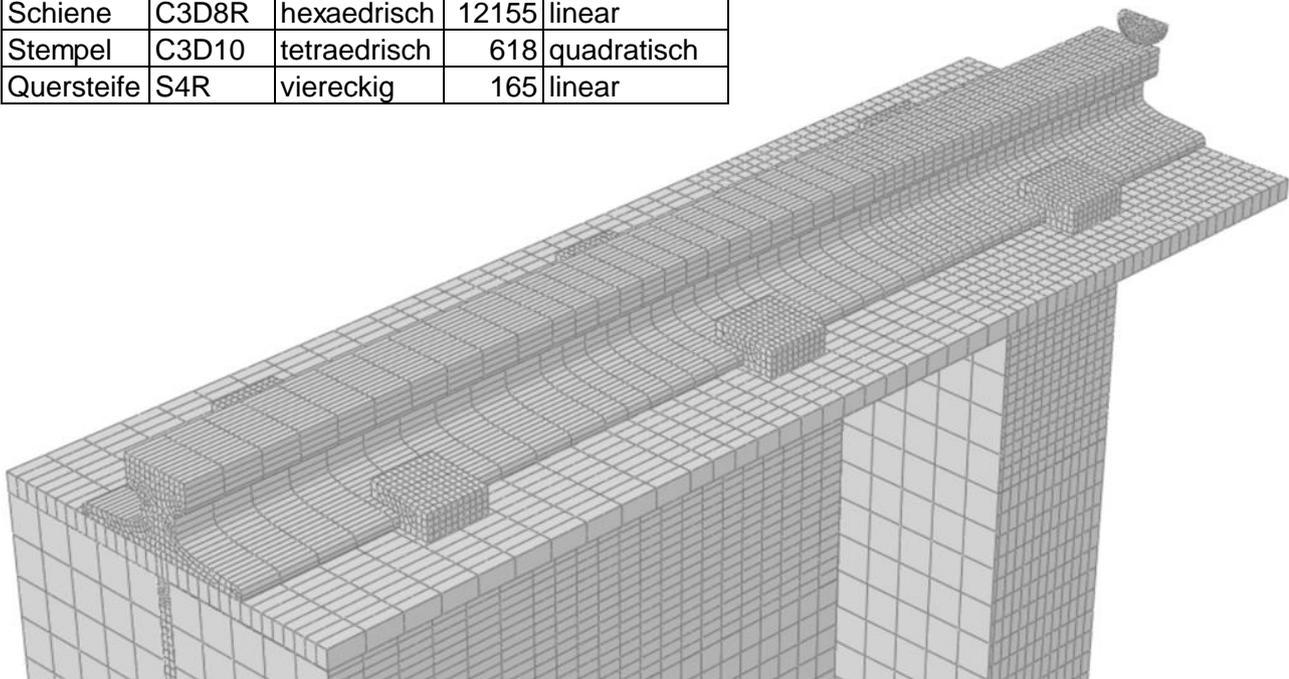


Abb. 26: Ausschnitt des FE-Netzes von Modell M9c

4.3 Auswertung

Nachdem die FE-Modelle mit Abaqus numerisch berechnet wurden, können die gewünschten Ergebnisse ausgewählt und zur weiteren Aufbereitung in Microsoft Excel importiert werden.

4.3.1 Ergebnispfade

Die Ergebnisse bzw. deren Verläufe (in dieser Arbeit vertikale Spannungen und vertikale Verschiebungen, letztere zur Berechnung der Verdrehung) werden mithilfe von Ergebnispfaden (sogenannten „paths“, siehe Tab. 21 bzw. Abb. 24 und 27) in Trägerlängsrichtung generiert.

Diese Pfade werden über ihren jeweiligen Start- und Endpunkt (Lage im Querschnitt siehe Abb. 24 und 27) definiert und anschließend die Ergebnisverläufe über die Pfadlänge geplottet.

Dabei wird, wie bereits erwähnt, nur das mittlere „Feld“ des Stegblechs (d. h. der Abschnitt zwischen den zwei „innenliegenden“ Quersteifen, Gesamtlänge entspricht Quersteifenabstand a) für die Resultate herangezogen. Die Ergebnisverläufe werden ausgehend vom Kräfteinleitungspunkt in Feldmitte bis zur nächsten Quersteife im Abstand $a/2$ abgebildet.

Im nächsten Schritt werden die mit den Verläufen zusammenhängenden Werte (absolute Spannungen und Verschiebungen) aus den von Abaqus generierten Wertetabellen ausgelesen und in Excel für die nachfolgende Auswertung und weitere Aufbereitung der Ergebnisse importiert.

Tab. 21: Bezeichnungen und Lage der Ergebnispfade

Pfad Nr.	Lage	Ablese	
p1	Steg	lastzugewandte Seite	max. Druckspannung
p2	Steg	Schwerachse	Membranspannung
p3	Steg	lastabgewandte Seite	min. Druckspannung
p4	Obergurt	lastzugewandte Seite	
p5	Obergurt	lastabgewandte Seite	

Wie in Tab. 21 ersichtlich, werden die Verläufe der maximalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{z,c}$ am Pfad p1 (d. h. auf der lastzugewandten Stegseite) und jene der minimalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{z,t}$ am Pfad p3 (d. h. auf der lastabgewandten Stegseite) abgelesen.

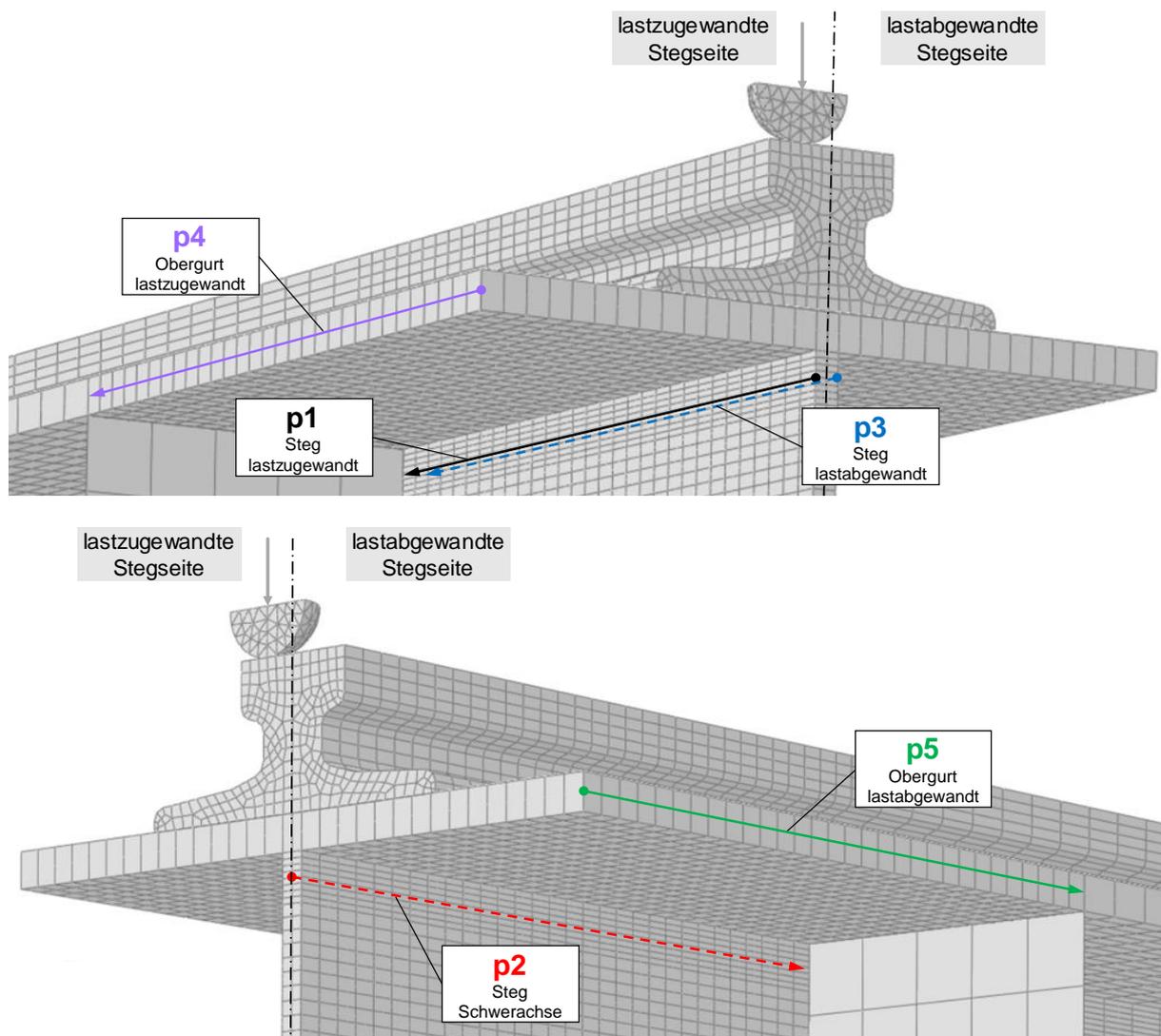


Abb. 27: Lage und Richtung der Ergebnispfade

Die Membranspannungen $\sigma_{z,0,A}$ werden am Pfad p2 in der Schwerachse des Stegblechs abgelesen und in der Auswertung mit den rechnerischen Membranspannungen $\sigma_{z,0,r}$ bzw. den Membranspannungen nach Eurocode $\sigma_{oz,Ed}$ verglichen.

4.3.2 Berechnung der Verdrehung

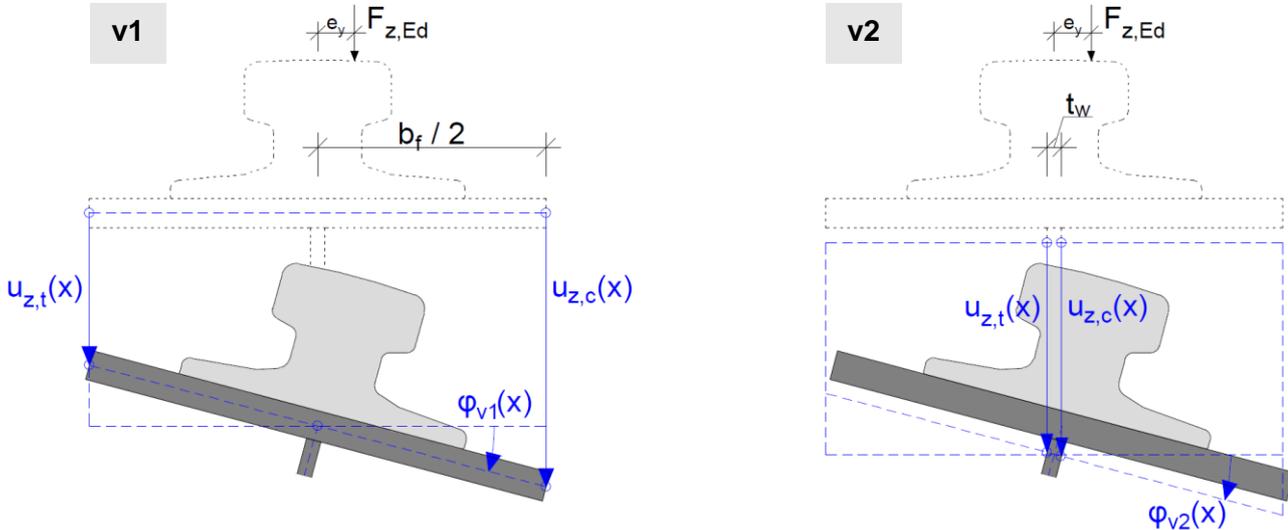


Abb. 28: Berechnung der Verdrehung des Obergurts (v1) bzw. der Stegoberkante (v2)

Da die Verdrehung bei FE-Modellen mit dreidimensionalen Volumenelementen nicht direkt ausgegeben werden kann, wird sie in dieser Arbeit über die vertikalen Verformungen hergeleitet. Für die Berechnung der Verdrehung wurden zwei Varianten (siehe Abb. 28) untersucht:

1. Variante 1 beschreibt die globale Verdrehung des Kranbahnträgerobergurts (diese kann auch mit dem Eurocode-Modell berechnet werden). Dazu werden die Vertikalverformungen (bzw. deren Verläufe) am belasteten und unbelasteten Rand des Flansches mittels Ergebnispfaden ausgelesen, die Differenz gebildet und durch die Flanschbreite geteilt (siehe Gl. (15)).

$$\varphi_{v1}(x) = \frac{u_{z,c}(x) - u_{z,t}(x)}{b_f} \tag{Gl. (15)}$$

2. Die zweite Variante berechnet die Verdrehung der Stegoberkante, indem die vertikalen Verformungsverläufe der belasteten und unbelasteten Stegseite an denselben Pfaden wie die Spannungen (d. h. 10 mm unterhalb der Flanschunterkante) abgelesen werden und die Differenz der Werte durch die Stegblechdicke dividiert wird (siehe Gl. (16)).

$$\varphi_{v2}(x) = \frac{u_{z,c}(x) - u_{z,t}(x)}{t_w} \tag{Gl. (16)}$$

mit:

- b_f ... Breite des Ober- und Untergurts (bzw. Flanschbreite)
- t_w ... Dicke des Stegblechs
- $u_{z,c}$... Verschiebung eines Knotens auf der lastzugewandten Stegseite in z-Richtung
- $u_{z,t}$... Verschiebung eines Knotens auf der lastabgewandten Stegseite in z-Richtung

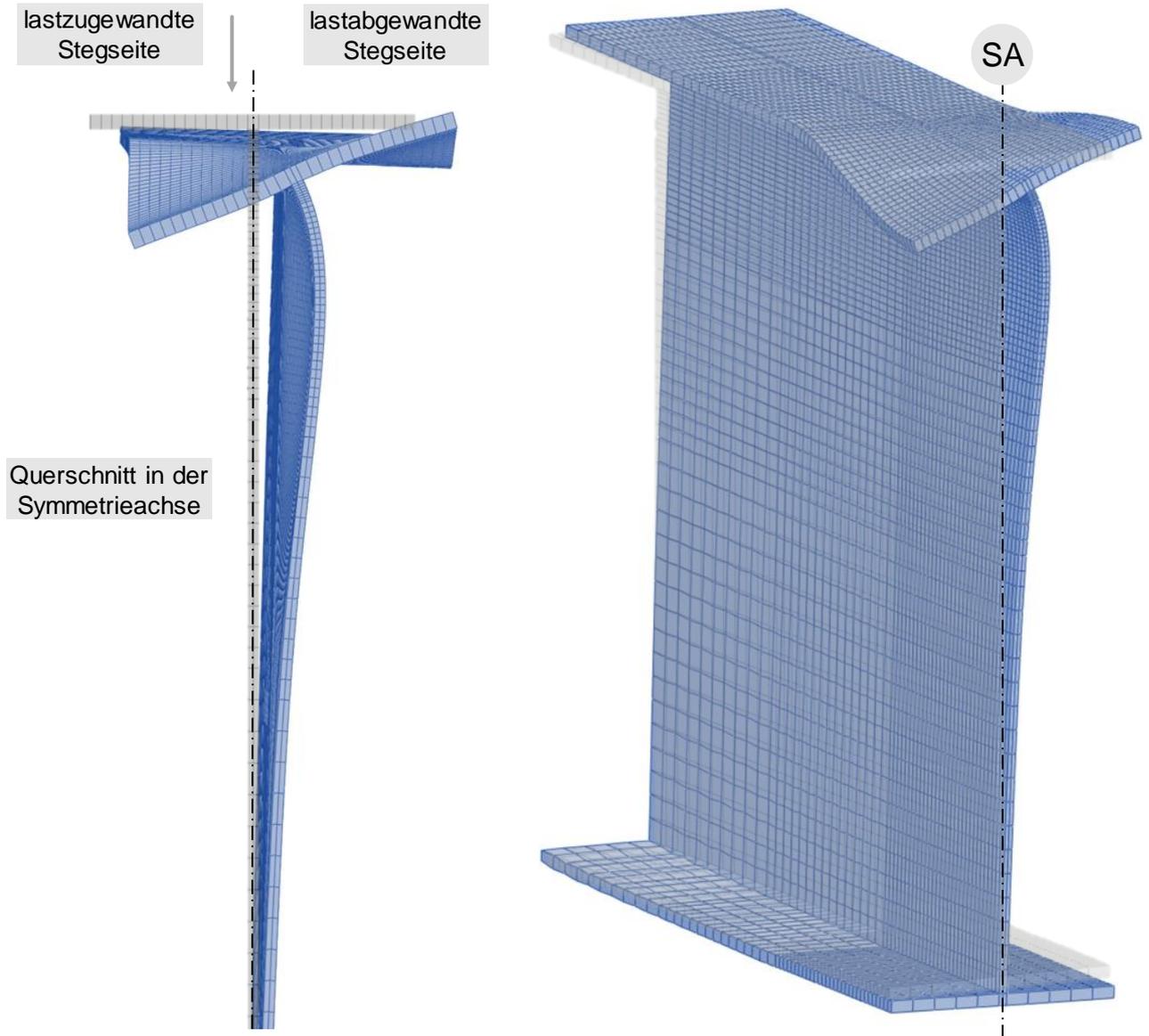


Abb. 29: Verformungsfigur des Kranbahnträgers von Modell M9c

In Abb. 29 ist die Verformungsfigur des Modells M9c zufolge der exzentrischen Radlast (seitliche Exzentrizität $e_y = 13,75 \text{ mm}$) dargestellt.

5 Vergleich FE-Berechnung - Eurocode

In diesem Kapitel werden sämtliche Ergebnisse der Berechnungen nach Eurocode (bzw. Rechenmodell nach Oxfort) mit den Resultaten der Finite Elemente-Berechnungen aus Abaqus gegenübergestellt und verglichen. Wie schon erwähnt, wird dieser Vergleich einerseits auf Spannungsebene und andererseits auf Verdrehungsebene durchgeführt.

Zuerst wird jeweils ein Modell (d. h. eine Querschnittsgeometrie des Kranbahnträgers) betrachtet, um dessen verschiedene Varianten hinsichtlich Lagerung und Befestigung der Kranschiene auf dem Obergurt des Trägers miteinander zu vergleichen (Varianten a bis h, siehe Abb. 1). Dabei sollen die Einflüsse der Lagerung (ohne bzw. mit elastischer Unterlage) sowie der Befestigung (ohne bzw. mit Klemmen, Klemmen mit bzw. ohne Spalt) auf die Spannungen und Verdrehungen untersucht und hervorgehoben werden.

Anschließend erfolgt der Vergleich von jeweils zwei unterschiedlichen Modellen mit gleichem Kranschienentyp, d. h. Fällen mit verschiedenen Querschnittsgeometrien des Kranbahnträgers, wobei sich nur ein geometrischer Parameter (Steghöhe oder Flanschdicke) unterscheidet, während der jeweils andere bei den zwei betrachteten Modellen gleich ist.

Die Gegenüberstellung der analytischen Lösung mit den numerischen Ergebnissen wird anhand ausgewählter Modelle und deren Varianten dargestellt und beschrieben.

Von den übrigen Modellen werden nur relevante Resultate der Auswertung (in Form von Tabellen) angeführt, die entsprechenden umfangreichen Diagramme sind im Anhang der Arbeit zu finden.

5.1 Vergleich auf Spannungsebene

5.1.1 Verlauf der lokalen vertikalen Druckspannungen zufolge Radlast

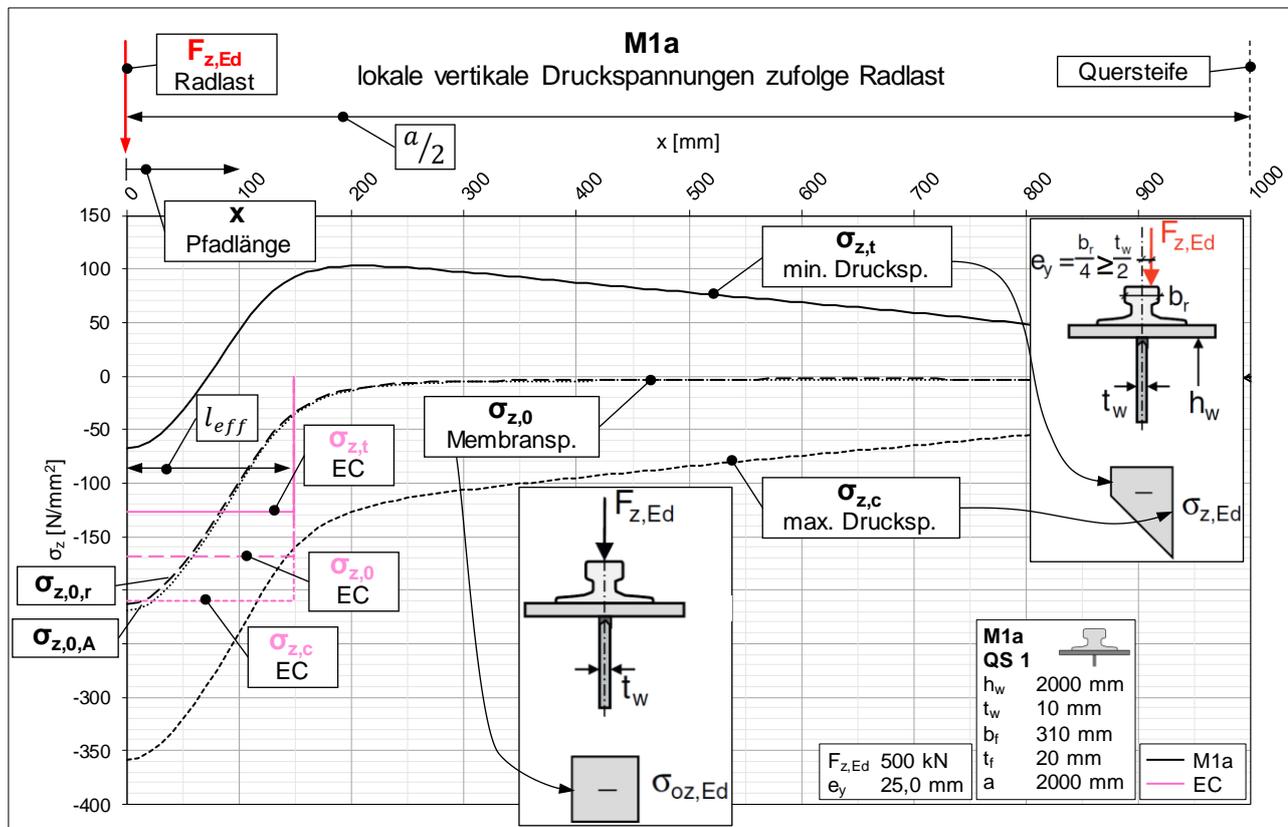


Diagramm 1: Verlauf der lokalen vertikalen Druckspannungen zufolge Radlast (Modell M1a - starre Lagerung ohne Klemmen)

In Diagramm 1 werden die Verläufe der lokalen vertikalen Druckspannungen im Stegblech zufolge Radlast (beispielhaft am Modell M1a) dargestellt sowie der grundsätzliche Aufbau der Diagramme in diesem Abschnitt erläutert.

Der dargestellte Bereich erstreckt sich jeweils von der Symmetrieachse bzw. dem Lasteinleitungspunkt in Feldmitte des Systems (d. h. an der Stelle $x = 0$) bis zur nächstgelegenen Quersteife im Abstand $a/2$.

Auf der Abszisse ist die Pfadlänge x (ausgehend vom Lasteinleitungspunkt links im Diagramm) abgebildet, die aus Abaqus exportierten Spannungen können dabei auf der Ordinate abgelesen werden.

Das jeweils betrachtete Modell (bzw. dessen Variante) und die dazugehörigen geometrischen Parameter des Kranbahnträgerquerschnitts sind im Diagramm unten rechts abgebildet.

Ebenfalls vermerkt sind die dargestellten Linien der FE-Ergebnisverläufe, in diesem Fall:

- ▶ $\sigma_{z,c}$... die maximale vertikale Druckspannung zufolge Radlast (Spannung auf der lastzugewandten Stegseite), dargestellt als kurz strichlierte Linie
- ▶ $\sigma_{z,t}$... die minimale vertikale Druckspannung zufolge Radlast (Spannung auf der lastabgewandten Stegseite), dargestellt als durchgezogene Linie
- ▶ $\sigma_{z,0,r}$... die rechnerische Membranspannung nach Gl. (17) (Spannung in der Schwerachse des Stegblechs zum Vergleich mit der aus Abaqus exportierten Membranspannung), dargestellt als lang strichlierte Linie

$$\sigma_{z,0,r} = \frac{\sigma_{z,c} + \sigma_{z,t}}{2} \quad \text{Gl. (17)}$$

- ▶ $\sigma_{z,0,A}$... die aus Abaqus bzw. der FE-Berechnung exportierte Membranspannung (zur Ermittlung der Biegespannungen, siehe Gl. (18) und (19)), dargestellt als gepunktete Linie

Diese Linien werden farblich den betrachteten FE-Modellen bzw. dem Eurocode zugeordnet, beispielsweise sind in Diagramm 1 die Ergebnisse des numerischen Modells M1a in schwarz, jene der EC-Lösung in rosa dargestellt (was auch der Legende unten rechts im Diagramm zu entnehmen ist).

Die nach Eurocode berechneten lokalen Vertikal- und Membranspannungen werden konstant über die effektive Ausbreitungslänge l_{eff} verteilt geplottet.

5.1.2 Verlauf der lokalen Biegespannungen zufolge exzentrischer Radlast

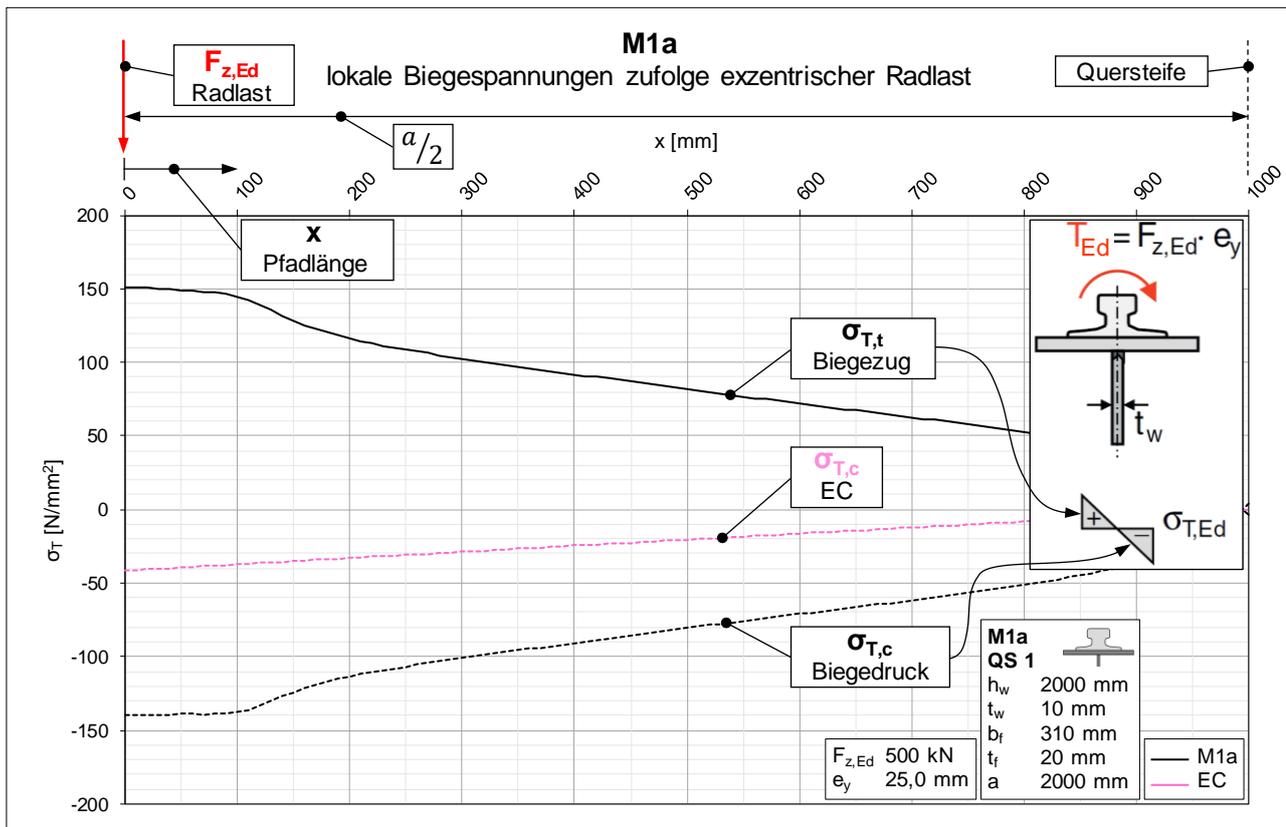


Diagramm 2: Verlauf der lokalen Biegespannungen zufolge exzentrischer Radlast (Modell M1a, starre Lagerung ohne Klemmen)

Diagramm 2 zeigt den Verlauf der lokalen Biegespannungen im Stegblech (beispielhaft am Modell M1a), welche wie bereits erwähnt durch das Torsionsmoment am Trägerobergurt zufolge seitlicher Exzentrizität der Radlast hervorgerufen werden.

Der Aufbau des Diagramms ist prinzipiell derselbe wie jener von Diagramm 1, dabei sind folgende FE-Ergebnisverläufe abgebildet:

- $\sigma_{T,c}$... die rechnerische lokale Biegedruckspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastzugewandter Stegseite) nach Gl. (18), dargestellt als kurz strichlierte Linie

$$\sigma_{T,c} = \sigma_{z,c} - \sigma_{z,0,A} \tag{Gl. (18)}$$

- $\sigma_{T,t}$... die rechnerische lokale Biegezugspannung zufolge exzentrischer Radlast (Spannung auf lastabgewandter Stegseite) nach Gl. (19), dargestellt als durchgezogene Linie

$$\sigma_{T,t} = \sigma_{z,t} - \sigma_{z,0,A} \tag{Gl. (19)}$$

In dieser Arbeit wird die aus Abaqus exportierte Membranspannung ($\sigma_{z,0,A}$) für die Ermittlung der Biegedruck- bzw. Biegezugspannungen ($\sigma_{T,c}$ bzw. $\sigma_{T,t}$) nach Gl. (18) und (19) herangezogen, womit nach Gl. (20) gilt:

$$|\sigma_{T,c}| \neq |\sigma_{T,t}| \tag{Gl. (20)}$$

Die Gl. (20) sagt aus, dass die Beträge der Biegedruckspannung $\sigma_{T,c}$ und der Biegezugspannung $\sigma_{T,t}$ nicht gleich groß sind. Die Biegedruckspannung ist dabei negativ, die Biegezugspannung positiv, wie in Diagramm 2 ersichtlich.

Auch hier werden die Linien der Spannungsverläufe durch verschiedene Farben den Modellen bzw. dem Eurocode zugeordnet (z. B. ist in Diagramm 2 das FE-Modell M1a in schwarz, die EC-Lösung in rosa abgebildet).

Für die Ergebnisse nach Eurocode wird nur der Verlauf der Biegedruckspannung geplottet (die entsprechende Biegezugspannung entspricht betragsmäßig der Biegedruckspannung).

5.1.3 Vergleich der Varianten von Modell M1

► Vergleich M1a / M1b - Einfluss der elastischen Unterlage

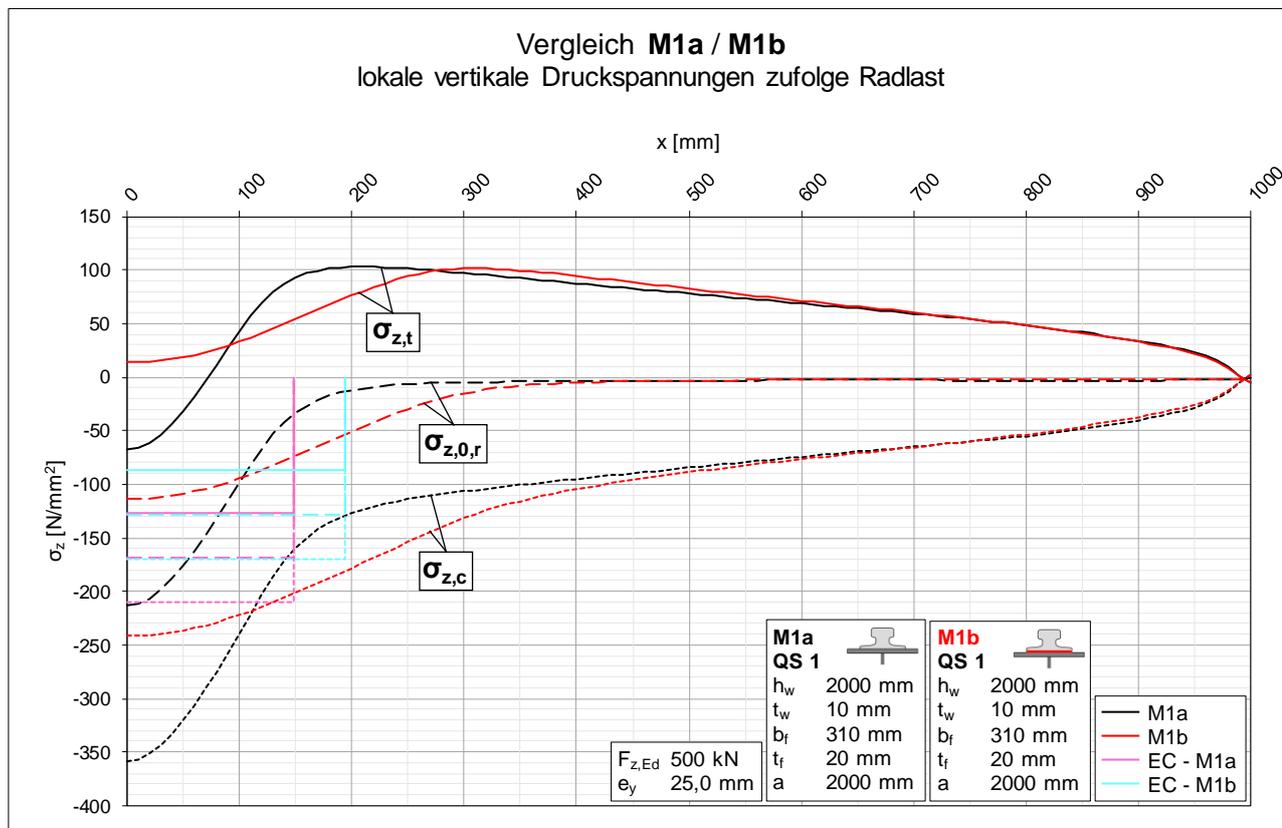


Diagramm 3: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M1

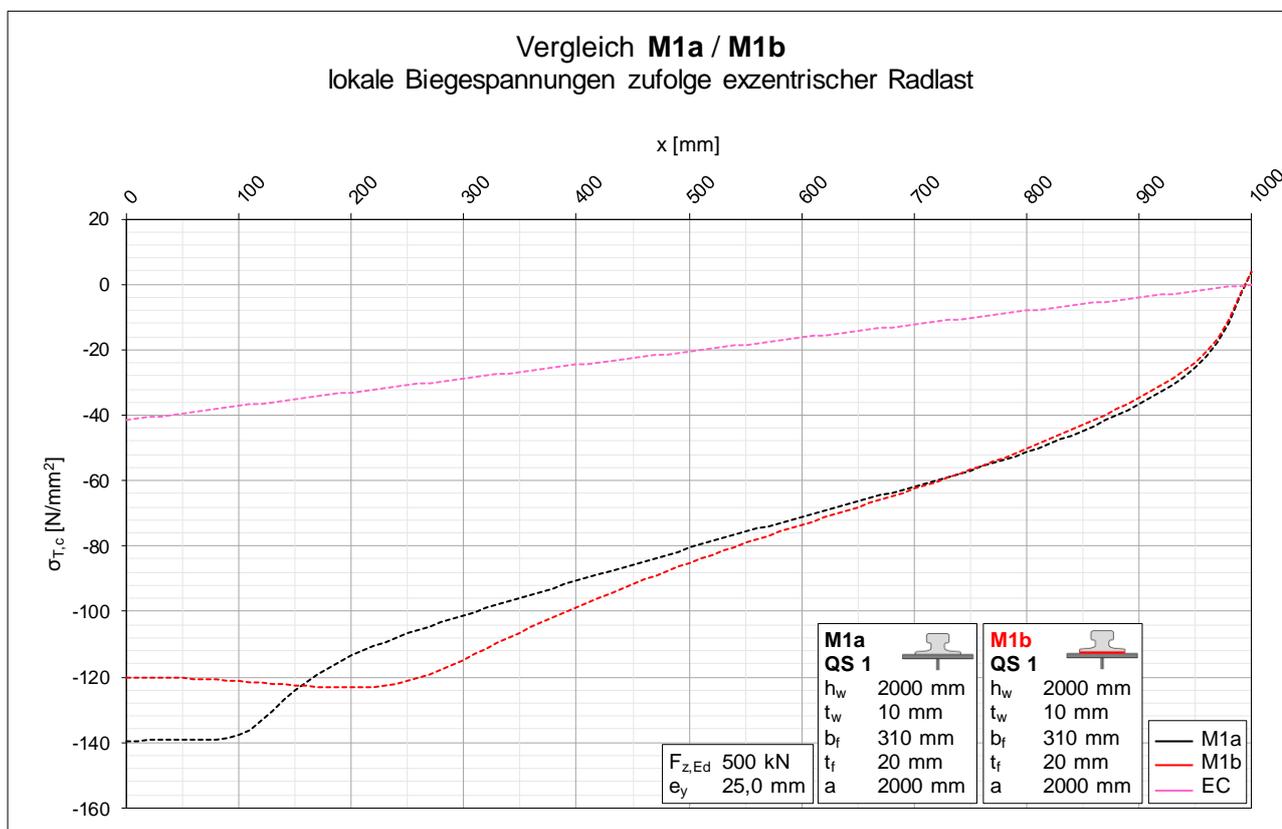


Diagramm 4: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Varianten a und b von Modell M1

In Diagramm 3 ist der Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen von Variante a (starre Lagerung der Kranschiene am Obergurt, in schwarz) mit Variante b (mit elastischer Unterlage, in rot) des Modells M1 dargestellt.

Es lässt sich erkennen, dass durch die elastische Unterlage die maximalen Spannungen (am Lasteinleitungspunkt, bei $x = 0$) abgebaut werden, die Spannungen jedoch nicht so rasch abfallen wie bei starrer Lagerung der Kranschiene (die Kurven werden „in die Länge gezogen“). Ein Grund dafür ist vermutlich, dass bei Variante a die Bettung der Schiene auf dem Obergurt „steifer“ ist (durch die starre Lagerung) und die Spannungen sich deshalb zum Lasteinleitungspunkt hin konzentrieren, während bei Variante b eine „weiche“ Bettung (durch die elastische Unterlage) vorliegt und sich die Spannungen dadurch auf eine größere Länge verteilen.

Dies ist auch bei den EC-Ergebnissen der Fall: die Spannungen der Variante b (mit elastischer Unterlage, in hellblau abgebildet) sind niedriger und verteilen sich auf eine größere effektive Lastausbreitungslänge als jene der Variante a (ohne Schienenunterlage, in rosa geplottet).

Das brauchbarste Ergebnis liefert der Eurocode dabei für die Membranspannung (strichlierte Linien in rot und hellblau sind sich relativ nahe). Ansonsten liegen die EC-Spannungen am Lastangriffspunkt entweder weit unter- oder oberhalb der FE-Ergebnisse.

Diagramm 4 zeigt den Verlauf der lokalen Biegespannungen (dargestellt ist jeweils die Biegedruckspannung $\sigma_{T,c}$) der Variante a (starre Lagerung der Kranschiene am Obergurt, in schwarz) im Vergleich mit Variante b (mit elastischer Unterlage, in rot) des Modells M1. Diese Biegedruckspannungen ergeben sich nach Gl. (19) aus der Differenz zwischen der maximalen vertikalen Druckspannung (auf der lastzugewandten Stegseite) und der Membranspannung (in der Schwerachse des Stegblechs).

Hier ist ebenso wie bei den vertikalen Druckspannungen in Diagramm 3 zu sehen, dass die Spannungsspitzen am Lasteinleitungspunkt etwas abgebaut bzw. in die Länge gezogen werden. Dies kann in gleicher Art und Weise damit begründet werden, dass sich bei weicherer Bettung die Last auf eine größere Länge verteilt.

Die analytische Lösung nach Eurocode (in rosa dargestellt) macht bei den Biegespannungen keine Unterscheidung zwischen den Varianten mit starrer Lagerung und elastischer Unterlage, die Linie liegt in beiden Fällen weit unter den numerisch berechneten Spannungen.

In Tab. 22 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten a und b von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 22: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Varianten a und b von Modell M1

Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M1a	M1b	M1b / M1a
$\sigma_{z,c}$	-358,8	-241,7	0,67
$\sigma_{z,c,EC}$	-209,9	-170,4	0,81
$\sigma_{T,c}$	-139,5	-120,2	0,86
$\sigma_{T,EC}$	-41,6	-41,6	1,00
$\sigma_{z,0,r}$	-213,4	-114,1	0,53
$\sigma_{z,0,EC}$	-168,3	-128,7	0,76

► Vergleich M1a / M1c - Einfluss der diskreten Klemmen (bei starrer Lagerung)

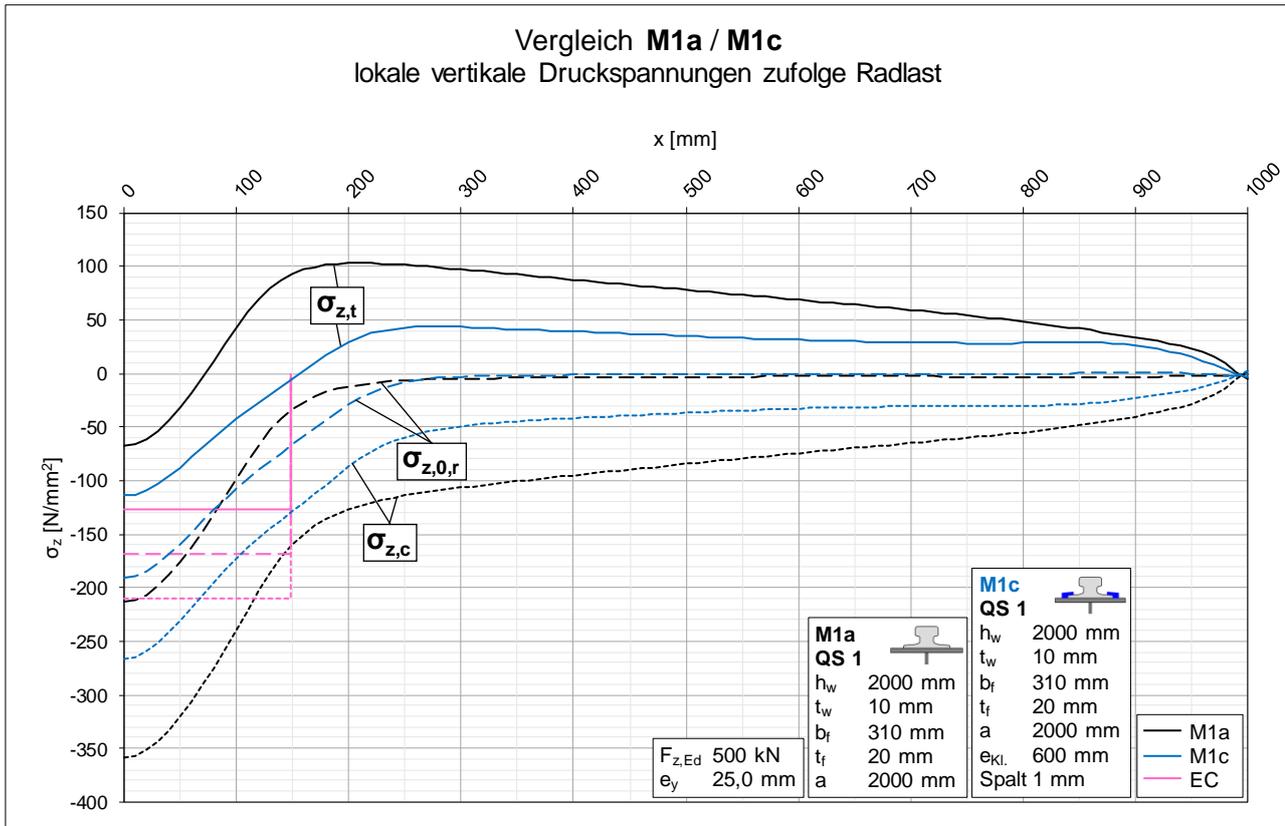


Diagramm 5: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M1

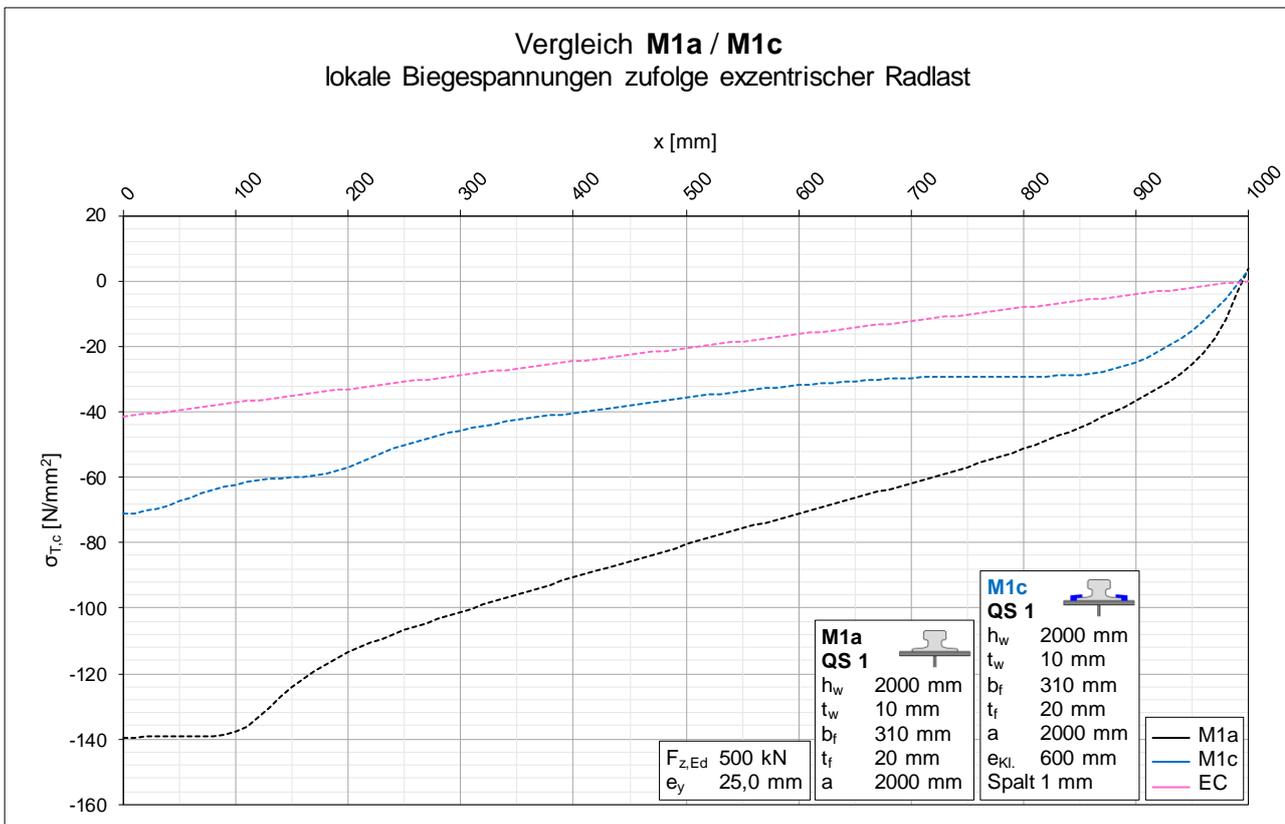


Diagramm 6: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Varianten a und c von Modell M1

Diagramm 5 bildet den Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen von Variante a (ohne Klemmen, in schwarz) mit Variante c (Klemmen mit 1 mm Spalt, in blau) des Modells M1 ab.

Durch die Klemmen wird die maximale Druckspannung auf der lastzugewandten Stegseite ähnlich stark abgebaut wie durch die elastische Unterlage (siehe Diagramm 3), die minimale Druckspannung auf der lastabgewandten Stegseite ist im Vergleich zur Variante ohne Klemmen allerdings sichtlich höher. Das bedeutet, dass die Differenz zwischen maximaler und minimaler Druckspannung im Steg wesentlich geringer ist, wenn Klemmen vorhanden sind.

Der Eurocode unterscheidet hier nicht zwischen Variante a (ohne Klemmen) und Variante c (mit Klemmen), was die Vermutung zulässt, dass die Klemmwirkung nicht berücksichtigt wird. Deshalb ist in Diagramm 5 nur der Fall (b), d. h. starre Lagerung ohne Befestigung der Schiene am Flansch, abgebildet (rosa Linien).

Betrachtet man die Spannungsverläufe der Varianten ohne und mit Klemmen des Modells M2 (siehe Anhang), sind sich die Linien im Vergleich zu jenen des Modells M1 sehr viel näher bzw. verlaufen fast deckungsgleich. Auch bei den Biegespannungen des Modells M2 ist die Differenz zwischen Spannung ohne und mit Klemmen geringer als beim Modell M1.

Die untersuchten Modelle unterscheiden sich im Querschnitt nur hinsichtlich der Flanschdicke (M1 mit $t_f = 20 \text{ mm}$, M2 mit $t_f = 40 \text{ mm}$). Es wird daher vermutet, dass der Einfluss der Klemmen auf die Spannungen bei dickerem Flansch geringer ist als bei dünnem Flansch. Um einen Zusammenhang zu bestätigen, müssten noch weitere Modelle mit unterschiedlichen Gurtdicken (beispielsweise mit $t_f = 30 \text{ mm}$) untersucht werden.

In Diagramm 6 ist der Verlauf der lokalen Biegespannungen der Variante a (ohne Klemmen, in schwarz) mit Variante c (Klemmen mit 1 mm Spalt, in blau) des Modells M1 dargestellt.

Bei den jeweiligen Druckspannungsverläufen wurde beobachtet, dass die Differenz zwischen maximaler und minimaler Druckspannung mit Klemmen wesentlich kleiner ausfällt als ohne. Daher sind auch die Biegespannungen (welche sich wie schon erwähnt mithilfe dieser Differenz der Druckspannungen berechnen lassen) bei Variante c sehr viel kleiner als bei Variante a.

Im Eurocode wird auch hier die Klemmwirkung nicht miteinbezogen, weshalb nur eine Linie (in rosa) für den Biegespannungsverlauf vorhanden ist. Dieser ist von den numerischen Ergebnissen, besonders von Variante a, weit entfernt.

In Tab. 23 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten a und c von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 23: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Varianten a und c von Modell M1

Vergleich der lokalen Spannungen			
am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M1a	M1c	M1c / M1a
$\sigma_{z,c}$	-358,8	-266,3	0,74
$\sigma_{z,c,EC}$	-209,9	-209,9	1,00
$\sigma_{T,c}$	-139,5	-71,1	0,51
$\sigma_{T,EC}$	-41,6	-41,6	1,00
$\sigma_{z0,r}$	-213,4	-190,2	0,89
$\sigma_{z0,EC}$	-168,3	-168,3	1,00

► Vergleich M1b / M1d - Einfluss der diskreten Klemmen (mit elastischer Unterlage)

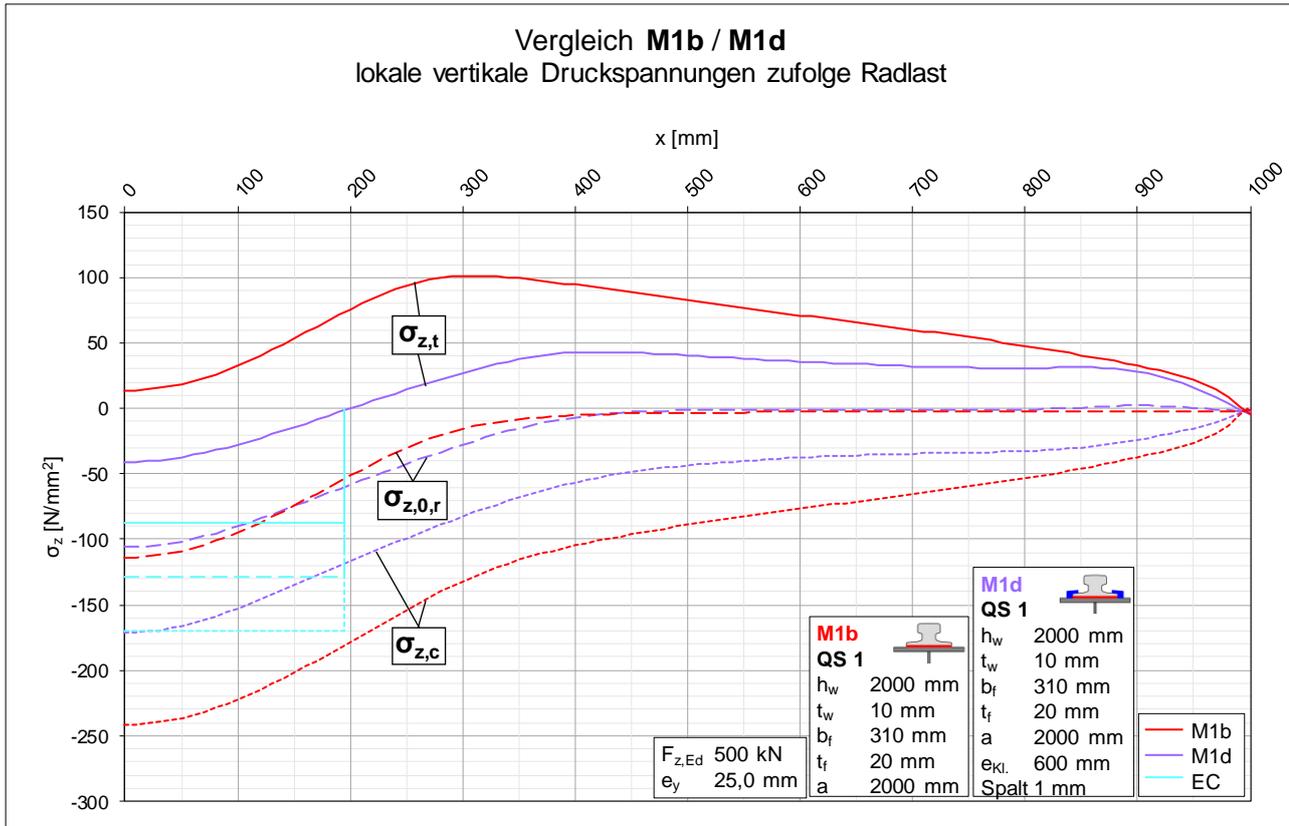


Diagramm 7: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M1

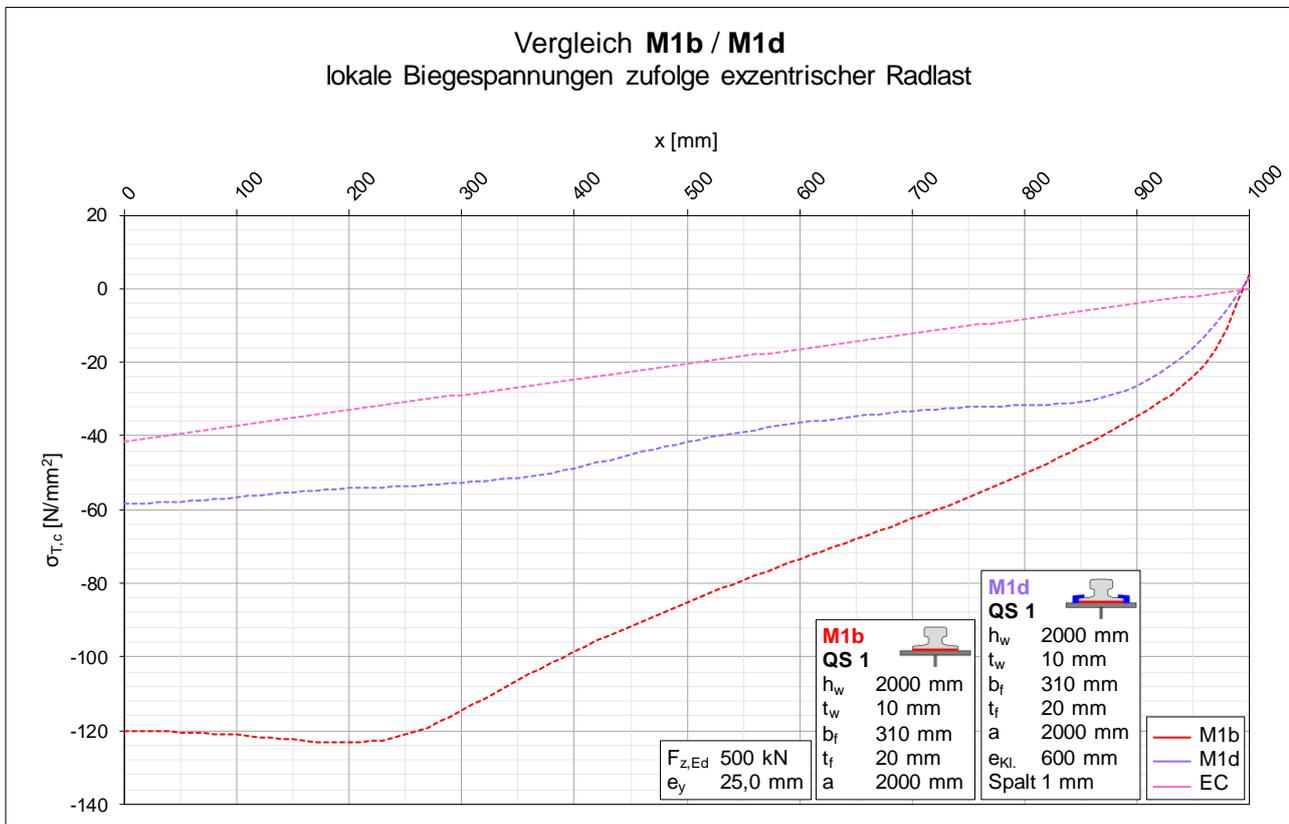


Diagramm 8: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Varianten b und d von Modell M1

In Diagramm 7 sind die lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b (elastische Unterlage, in rot) und d (Klemmen mit elastischer Unterlage, in lila) abgebildet.

Die lastverteilende Wirkung (d. h. Spannung fällt weniger schnell ab als bei Varianten a und c) der elastischen Unterlage ist hier bei beiden Varianten etwa gleich, vor allem die Verläufe der Membranspannungen (lang strichlierte Linien) sind beinahe deckungsgleich.

Auch hier ist der Unterschied zwischen maximaler und minimaler vertikaler Druckspannung im Stegblech bei Variante d um einiges kleiner als bei Variante b. Dies hat wiederum zur Folge, dass die Biegespannungen von Variante d viel kleiner sind als jene von Variante b (ähnlich wie beim Vergleich der Varianten c und a).

Vermutlich liegt dies daran, dass durch die Klemmwirkung bei Variante c und d die Kranschiene und der Kranbahnträgerobergurt eher als gemeinsamer Bauteil (wie im Modell von Oxford angenommen wurde) wirken als ohne Klemmen (Varianten a und b). Durch den somit höheren Torsionswiderstand sind die Biegespannungen bei den Konfigurationen mit Klemmen geringer, wie in Diagramm 6 und 8 gezeigt.

Wie zuvor berücksichtigt der Eurocode keine Befestigung der Kranschiene durch Klemmen, weshalb auch bei den Varianten mit elastischer Unterlage nur eine Linie pro Spannungskomponente (in hellblau) abgebildet ist.

Diagramm 8 zeigt die Verläufe der lokalen Biegespannungen der Varianten b (elastische Unterlage, in rot) und d (Klemmen mit elastischer Unterlage, in lila) des Modells M1.

Wie schon angeführt, sind die Biegespannungen bei der Variante mit zusätzlichen Klemmen deutlich kleiner.

Trotzdem liegt die Lösung nach Eurocode (rosa Linie) auch in diesem Fall noch weit unter den Ergebnissen der numerischen Berechnungen.

In Tab. 24 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten b und d von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 24: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Varianten b und d von Modell M1

Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M1b	M1d	M1d / M1b
$\sigma_{z,c}$	-241,69	-171,35	0,71
$\sigma_{z,c,EC}$	-170,35	-170,35	1,00
$\sigma_{T,c}$	-120,17	-58,35	0,49
$\sigma_{T,EC}$	-41,56	-41,56	1,00
$\sigma_{z,0,r}$	-114,11	-106,07	0,93
$\sigma_{z,0,EC}$	-128,68	-128,68	1,00

► Vergleich M1c / M1e / M1f - Einfluss der diskreten/durchgehenden Klemmen mit/ohne Spalt (bei starrer Lagerung)

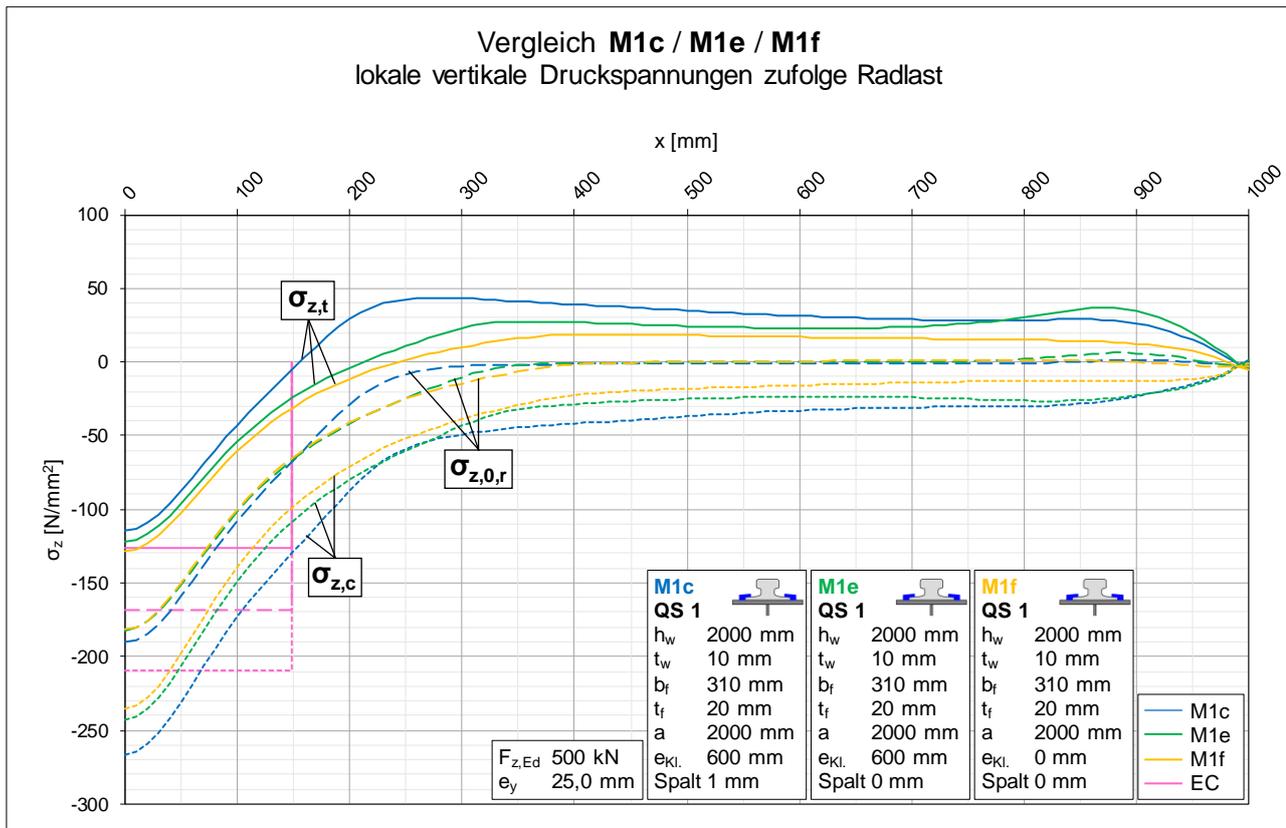


Diagramm 9: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M1

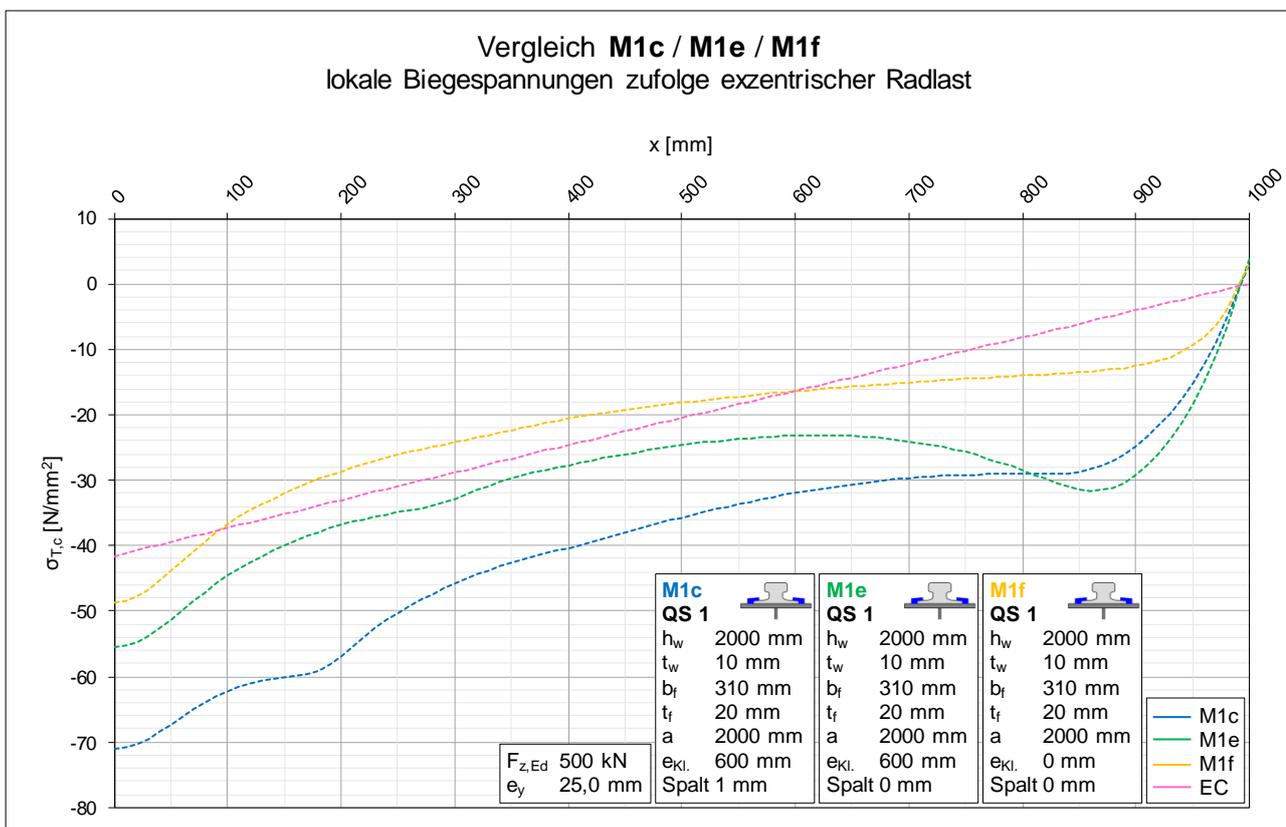


Diagramm 10: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Varianten c, e und f von Modell M1

Diagramm 9 bildet den Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten mit Klemmen und starrer Lagerung der Kranschiene ab. Die Ergebnisse der Variante c (diskret modellierte Klemmen mit 1 mm Spalt) sind in blau, jene der Variante e (Klemmen ohne Spalt) in grün sowie die Verläufe der Variante f (durchgehend modellierte Klemmen ohne Spalt) in gelb dargestellt.

Grundsätzlich sind sich die jeweiligen Kurven recht ähnlich, wobei sich bei den Varianten mit Klemmen ohne Spalt die Membranspannung etwas langsamer abbaut (bzw. sich die Kurve eher „fließend“ dem Wert Null annähert). Außerdem sind die Differenzen zwischen maximaler und minimaler vertikaler Druckspannung mit „steigender Klemmwirkung“ kleiner, was sich auch in niedrigeren Biegespannungen (siehe Diagramm 10) bemerkbar macht.

Interessant zu beobachten ist der Verlauf der Kurven in der Nähe zur Quersteife (d. h. zum rechten Rand des abgebildeten Bereichs hin), wo die grüne durchgehende Linie im Abschnitt von ungefähr $x = 780 \text{ mm}$ bis $x = 1000 \text{ mm}$ über den beiden anderen Kurven liegt. Das bedeutet, dass in diesem Bereich die minimalen vertikalen Druckspannungen $\sigma_{z,t}$ (auf der „Zugseite“ bzw. der lastabgewandten Stegseite) für die Variante e (diskrete Klemmen ohne Spalt) - wenn auch nur minimal - am größten sind.

Die analytische Lösung im Eurocode macht keinen Unterschied zwischen starrer Lagerung und Klemmen (mit bzw. ohne Spalt), weshalb wie zuvor (Vergleich der Varianten a und c) nur der Fall der starren Lagerung geplottet ist (rosa Linien).

Im Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f im Diagramm 10 zeigt sich, dass die Biegespannungen wie erwartet mit zunehmender Klemmwirkung sinken.

Auffallend ist hierbei jedoch, dass die Verläufe nach anfänglichem Spannungsabbau (im Bereich des Lasteinleitungspunktes) abflachen, bevor sie zur Stelle der Quersteife (bei $x = 1000 \text{ mm}$) hin wieder rasch absinken. Bei Variante e, d. h. diskreten Klemmen ohne Spalt (in grün dargestellt), steigen die Spannungen ab $x = 600 \text{ mm}$ sogar wieder an und sind im Bereich von $x = 820 \text{ mm}$ bis $x = 1000 \text{ mm}$ höher als bei Variante c (Klemmen mit Spalt, in blau). Dieser Verlauf der Spannungen hat sich sinngemäß auch bei den vertikalen Druckspannungen (siehe Diagramm 9) gezeigt.

Der Verlauf nach Eurocode nähert sich von den drei gezeigten Verläufen am besten der gelben Kurve (d. h. Variante f, durchgehende Klemmung ohne Spalt) an, die maximalen Werte am Lasteinleitungspunkt liegen bei den numerischen Ergebnissen jedoch nach wie vor über jenen der analytischen Lösung.

In Tab. 25 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten c, e und f von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 25: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Varianten c, e und f von Modell M1

Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt					
Spannung [N/mm ²]	M1c	M1e	M1f	M1e / M1c	M1f / M1c
$\sigma_{z,c}$	-266,3	-242,4	-235,0	0,91	0,88
$\sigma_{z,c,EC}$	-209,9	-209,9	-209,9	1,00	1,00
$\sigma_{T,c}$	-71,1	-55,6	-48,6	0,78	0,68
$\sigma_{T,EC}$	-41,6	-41,6	-41,6	1,00	1,00
$\sigma_{z0,r}$	-190,2	-182,0	-181,6	0,96	0,95
$\sigma_{z0,EC}$	-168,3	-168,3	-168,3	1,00	1,00

► Vergleich M1d / M1g / M1h - Einfluss der diskreten/durchgehenden Klemmen mit/ohne Spalt (mit elastischer Unterlage)

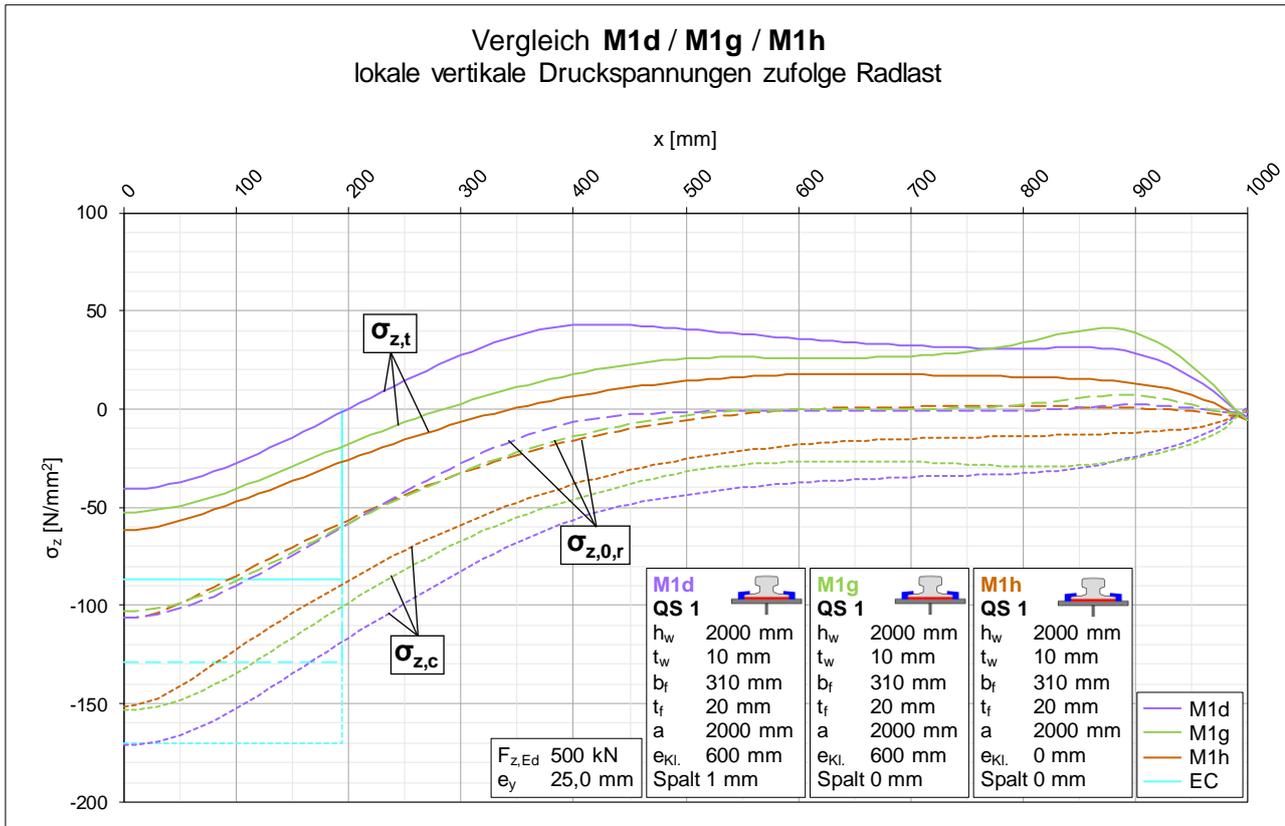


Diagramm 11: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M1

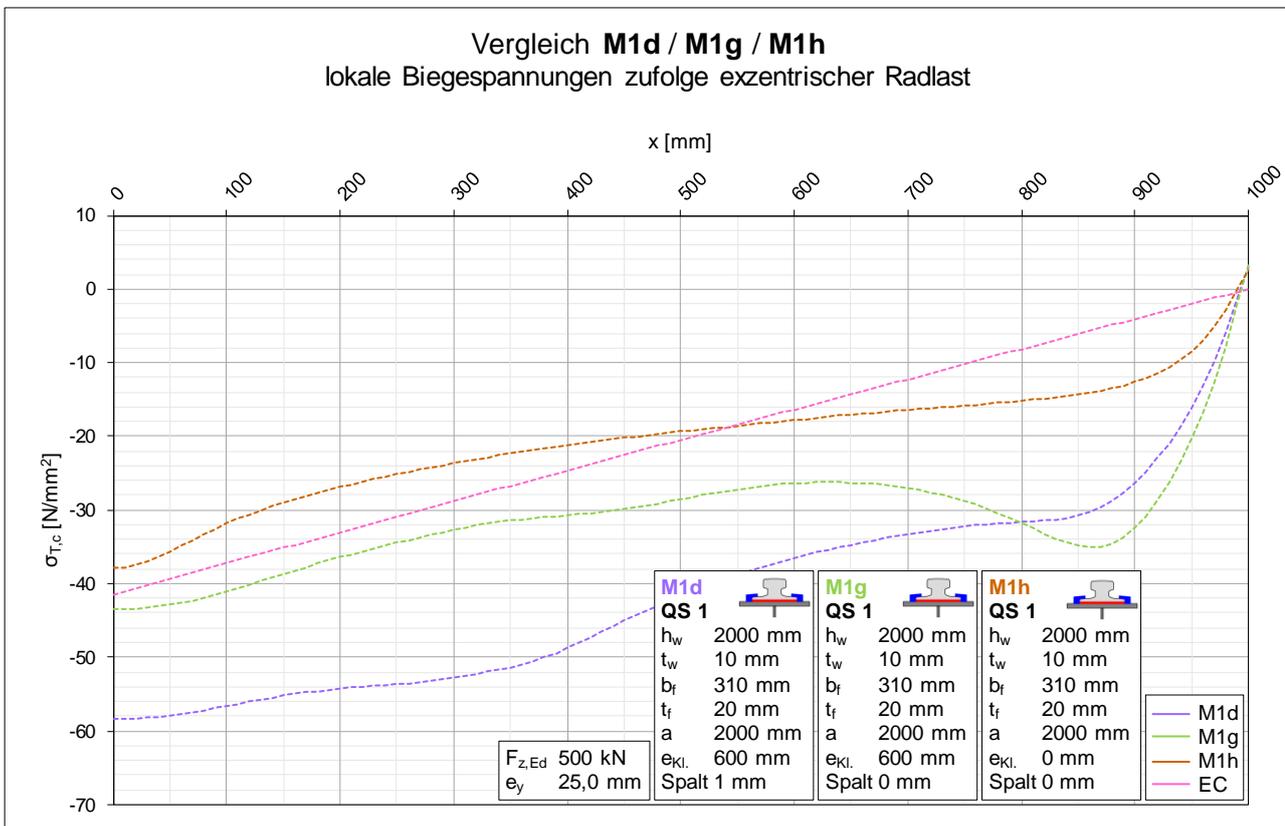


Diagramm 12: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Varianten d, g und h von Modell M1

Die Verläufe der lokalen vertikalen Druckspannungen in Diagramm 11 zeigen die Varianten mit Klemmen und zusätzlicher elastischer Unterlage. Die Resultate der diskret modellierten Klemmen mit 1 mm Spalt sind dabei in lila, jene der Klemmen ohne Spalt in hellgrün sowie die Verläufe der durchgehend modellierten Klemmen ohne Spalt in braun geplottet.

Die Spannungen der betrachteten Varianten verlaufen zueinander ähnlich wie bei starrer Lagerung (siehe Diagramm 9), auch hier ist erwartungsgemäß die Differenz zwischen minimaler und maximaler vertikaler Druckspannungen bei der Variante h (d. h. bei durchgehender Klemmung mit elastischer Unterlage) am geringsten und in weiterer Folge die Biegespannung am kleinsten.

Wie zuvor bei starrer Lagerung zeigt sich bei der Variante g (d. h. bei diskreten Klemmen ohne Spalt mit elastischer Unterlage) ein Anstieg in der Nähe der Quersteife. Im Bereich von etwa $x = 770 \text{ mm}$ bis zur Quersteife ($x = 1000 \text{ mm}$) sind die Druckspannungen auf der lastabgewandten Stegseite bei dieser Variante am höchsten.

Diagramm 12 zeigt die lokalen Biegespannungsverläufe der Varianten mit Klemmen und zusätzlicher elastischen Unterlage, wobei die Maximalwerte der Spannungen wie schon zuvor mit zunehmender Klemmwirkung sinken.

Wie schon beim Verlauf der vertikalen Druckspannungen (siehe Diagramm 11) weist die grüne Linie (d. h. Variante e, diskrete Klemmen ohne Spalt) im Bereich von $x = 800 \text{ mm}$ bis zur Quersteife ($x = 1000 \text{ mm}$) einen Anstieg (und anschließend raschen Abfall) der Spannungen auf, d. h. die Biegespannung ist an dieser Stelle größer als bei den beiden anderen Kurven.

Der EC-Verlauf bildet am besten die braune Linie (d. h. die Variante h, durchgehende Klemmung ohne Spalt) ab, bei den anderen Varianten liegen die maximalen Biegespannungen am Lasteinleitungspunkt deutlich weiter oberhalb der analytischen Lösung bzw. des EC-Wertes.

Vergleicht man die Kurven der Varianten c, e und f (Klemmen ohne elastische Unterlage, dadurch starre bzw. steife Bettung) in Diagramm 10 mit jenen der Varianten d, g und h (Klemmen mit elastischer Unterlage, dadurch weichere Bettung) in Diagramm 12, so sind sich die Verläufe sehr ähnlich. Lediglich die Maximalwerte der Biegespannungen bei $x = 0 \text{ mm}$ werden - wie schon bei früheren Vergleichen gezeigt - durch die zusätzliche elastische Unterlage etwas reduziert sowie die Kurven abgeflacht (d. h. die Spannungen fallen weniger stark ab).

In Tab. 26 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten d, g und h von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 26: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Varianten d, g und h von Modell M1

Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt					
Spannung [N/mm ²]	M1d	M1g	M1h	M1g / M1d	M1h / M1d
$\sigma_{z,c}$	-171,3	-153,3	-151,1	0,89	0,88
$\sigma_{z,c,EC}$	-170,4	-170,4	-170,4	1,00	1,00
$\sigma_{T,c}$	-58,3	-43,6	-37,9	0,75	0,65
$\sigma_{T,EC}$	-41,6	-41,6	-41,6	1,00	1,00
$\sigma_{z0,r}$	-106,1	-103,0	-106,3	0,97	1,00
$\sigma_{z0,EC}$	-128,7	-128,7	-128,7	1,00	1,00

► *Vergleich aller Varianten von M1 - Zusammenfassung*

In Tab. 27 sind die Maximalwerte der Spannungskomponenten am Lastangriffspunkt der bisher grafisch beschriebenen Spannungsverläufe der verschiedenen Varianten von Modell M1 aufgelistet.

Zum Vergleich mit den jeweiligen Maximalspannungen nach Eurocode sind die Verhältnisse der Spannungen aus den FE-Berechnungen zu den Spannungen nach der analytischen Lösung angegeben. Ein Faktor über 1,0 bedeutet dabei, dass die Spannung aus der numerischen Berechnung größer ist als jene laut EC-Modell.

Der Einfluss einer Variante (bzw. der Einfluss der jeweiligen Art der Lagerung und/oder Befestigung der Kranschiene am Flansch) auf die Ergebnisse kann durch diese sogenannten „Spannungsfaktoren“ quantifiziert werden.

Um ein Gefühl für die Streuung dieser Verhältnisse von FE- zu EC-Spannungen sowie eventuelle „Ausreißer“ (d. h. einzelne stark von den restlichen Werten abweichende Ergebnisse) zu bekommen, sind für die Faktoren $\frac{\sigma_{FE}}{\sigma_{EC}}$ aller Varianten des Modells M1 (d. h. von den jeweils acht Werten in Tab. 27) der arithmetische Mittelwert \bar{x} sowie die Standardabweichung σ angeführt.

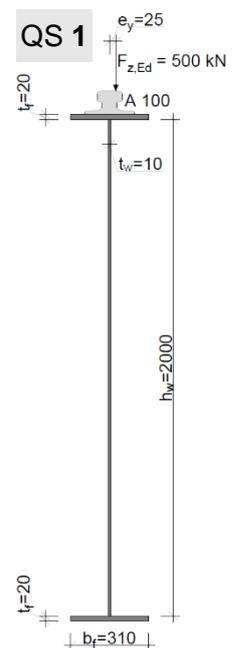
Tab. 27: Übersicht über die Spannungsvergleiche der Varianten von Modell M1

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mM1]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mM1]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mM1]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mM1]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z,0,r}$ [N/mM1]	$\sigma_{z,0,EC}$ [N/mM1]	$\sigma_{z,0,r} / \sigma_{z,0,EC}$ [-]
M1a	-358,8	-209,9	1,71	-139,5	-41,6	3,36	-213,4	-168,3	1,27
M1b	-241,7	-170,4	1,42	-120,2	-41,6	2,89	-114,1	-128,7	0,89
M1c	-266,3	-209,9	1,27	-71,1	-41,6	1,71	-190,2	-168,3	1,13
M1d	-171,3	-170,4	1,01	-58,3	-41,6	1,40	-106,1	-128,7	0,82
M1e	-242,4	-209,9	1,15	-55,6	-41,6	1,34	-182,0	-168,3	1,08
M1f	-235,0	-209,9	1,12	-48,6	-41,6	1,17	-181,6	-168,3	1,08
M1g	-153,3	-170,4	0,90	-43,6	-41,6	1,05	-103,0	-128,7	0,80
M1h	-151,1	-170,4	0,89	-37,9	-41,6	0,91	-106,3	-128,7	0,83
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		1,18			1,73			0,99
σ	Standardabweichung		0,26			0,84			0,16

Für das Modell M1 zeigt sich demnach, dass die Biegespannungen nach EC allesamt auf der unsicheren Seite liegen bzw. zu klein bemessen sind. Vor allem die Varianten a (starre Lagerung) mit $\frac{\sigma_{T,c}}{\sigma_{T,c,EC}} = 3,36$ und b (elastische Unterlage) mit $\frac{\sigma_{T,c}}{\sigma_{T,c,EC}} = 2,89$ sind weit entfernt von den Ergebnissen der restlichen Varianten.

Auch die vertikalen Druckspannungen zufolge FE-Berechnung sind überwiegend (insbesondere bei den Varianten ohne elastische Unterlage) höher als jene der analytischen Lösung, was sich in Spannungsfaktoren im Bereich von 1,12 bis 1,71 bei starrer Lagerung sowie 0,89 bis 1,42 bei elastischer Unterlage widerspiegelt.

Die Membranspannungen werden vom Eurocode dagegen einigermaßen gut getroffen, vor allem bei den Varianten mit elastischer Unterlage liegen die Spannungsverhältnisse weniger weit auseinander und allesamt auf der sicheren Seite ($\frac{\sigma_{z,0,r}}{\sigma_{z,0,EC}} < 1,0$). Bei starrer Lagerung liegen die Faktoren im Bereich zwischen 1,08 und 1,27.



5.1.4 Vergleich der Modelle mit Profilschiene A 55

► Vergleich M6a / M8a - Einfluss der Flanschdicke (bei starrer Lagerung)

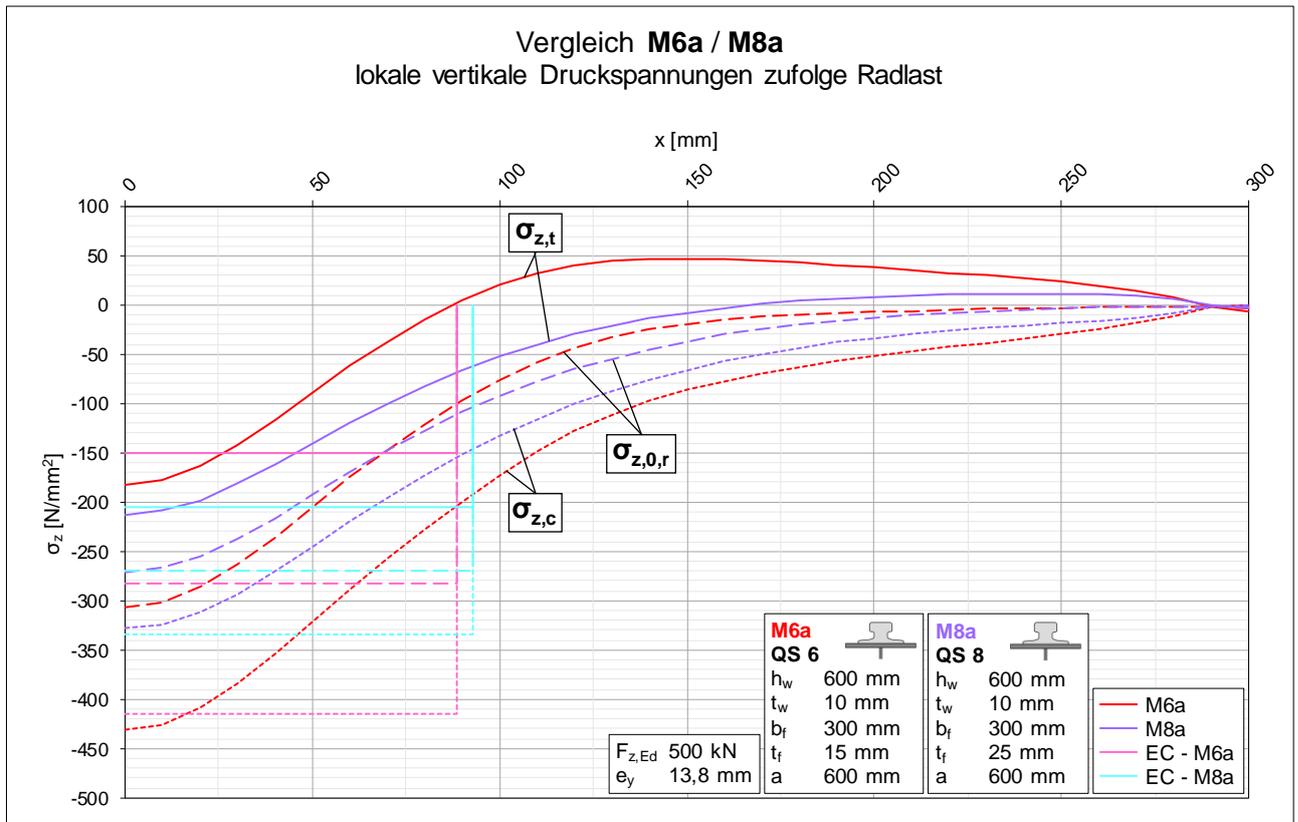
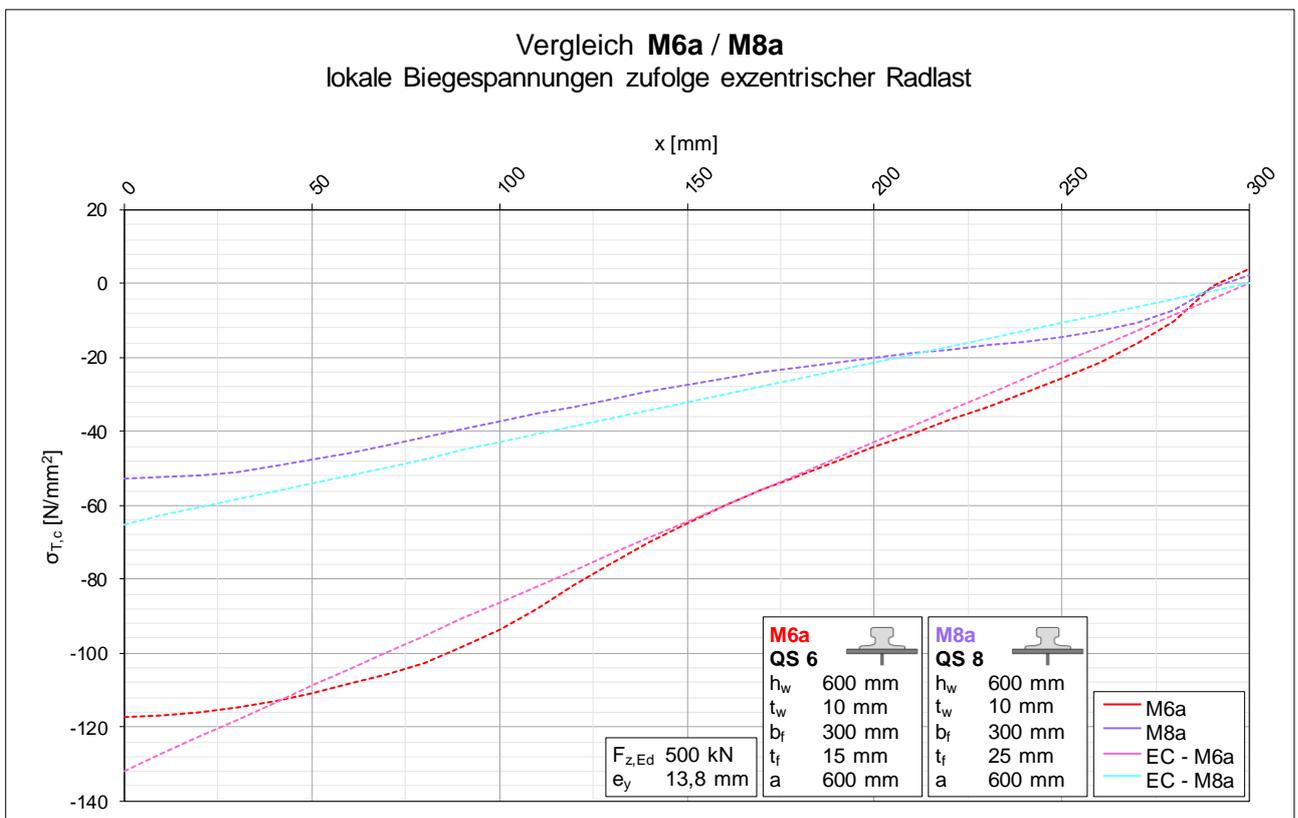


Diagramm 13: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M6a und M8a


 Diagramm 14: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Modelle M6a und M8a

In Diagramm 13 sind die Verläufe der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M6a (in rot) und M8a (in lila) - d. h. jeweils die Variante der starren Lagerung - zum Vergleich abgebildet.

Die Kurven der beiden Modelle verlaufen qualitativ gesehen recht ähnlich, wobei jene des Modells M8a etwas „abgeflachter“ erscheinen (d. h. die Spannungen fallen vom Lastangriffspunkt aus etwas weniger schnell ab als beim Modell M6a).

Die betrachteten Modelle unterscheiden sich im Querschnitt des Kranbahnträgers nur hinsichtlich der Flanschdicke (M6a mit $t_f = 15 \text{ mm}$, M8a mit $t_f = 25 \text{ mm}$). Die unterschiedliche Gurtdicke hat einen eindeutig sichtbaren Einfluss auf die Spannungsverläufe: die maximale Druckspannung (kurz strichlierte Linien), die Membranspannung (lang strichlierte Linien) als auch die Differenz zwischen maximaler (kurz strichlierte Linien) und minimaler vertikaler Druckspannung (durchgezogene Linien) des Modells mit dickem Gurt (M8a) sind kleiner als jene des Modells mit dünnem Gurt (M6a).

Betrachtet man die Spannungen nach Eurocode, so ist einerseits die effektive Lastausbreitungslänge beim dicken Flansch (M8a, Linien in hellblau) größer als beim dünnen Flansch (M6a, Linien in rosa). Damit sind die Werte der Spannungen (bis auf die minimale vertikale Druckspannung, durchgezogene Linien) mit dickem Flansch niedriger als mit dünnem Flansch.

Grundsätzlich stimmen die Spannungen am Lastangriffspunkt aus der analytischen Berechnung vor allem beim Modell M8a sehr gut mit der Finite Elemente-Analyse überein, auch beim Modell M6a liegt der Eurocode einigermaßen in der Nähe der Maximalwerte bei $x = 0 \text{ mm}$.

Diagramm 14 zeigt den Vergleich der lokalen Biegespannungsverläufe der Modelle M6a (in rot) und M8a (in lila), d. h. zwei unterschiedliche Trägergeometrien bei jeweils starrer Lagerung der Kranschiene am Obergurt.

Dabei ist ebenfalls der Einfluss der Gurtdicke auf die Spannungen eindeutig erkennbar: die Biegespannungen bei dickem Flansch (M8a mit $t_f = 25 \text{ mm}$) sind nur etwa halb so groß wie jene bei dünnem Flansch (M6a mit $t_f = 15 \text{ mm}$).

Auch hier bestehen gewisse Ähnlichkeiten im qualitativen Verlauf der Kurven (die rote Linie von M6a ist gewissermaßen eine „hochskalierte“ Version der lila Linie von M8a).

Der Eurocode ist in diesem Fall im Stande, die Verläufe der Biegespannungen zwar vereinfacht, aber ausreichend genau abzubilden sowie die maximalen Spannungen am Lasteinleitungspunkt bei $x = 0$ - auf der sicheren Seite liegend - gut zu treffen.

In Tab. 28 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Modelle M6a und M8a aufgelistet.

Tab. 28: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Modelle M6a und M8a

Vergleich der lokalen Spannungen			
am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M6a	M8a	M6a / M8a
$\sigma_{z,c}$	-431,5	-328,5	1,31
$\sigma_{z,c,EC}$	-414,9	-334,9	1,24
$\sigma_{T,c}$	-117,3	-52,7	2,23
$\sigma_{T,EC}$	-132,0	-65,1	2,03
$\sigma_{z,0,r}$	-307,2	-270,5	1,14
$\sigma_{z,0,EC}$	-282,6	-269,6	1,05

► Vergleich M5a / M9a - Einfluss der Steghöhe (bei starrer Lagerung)

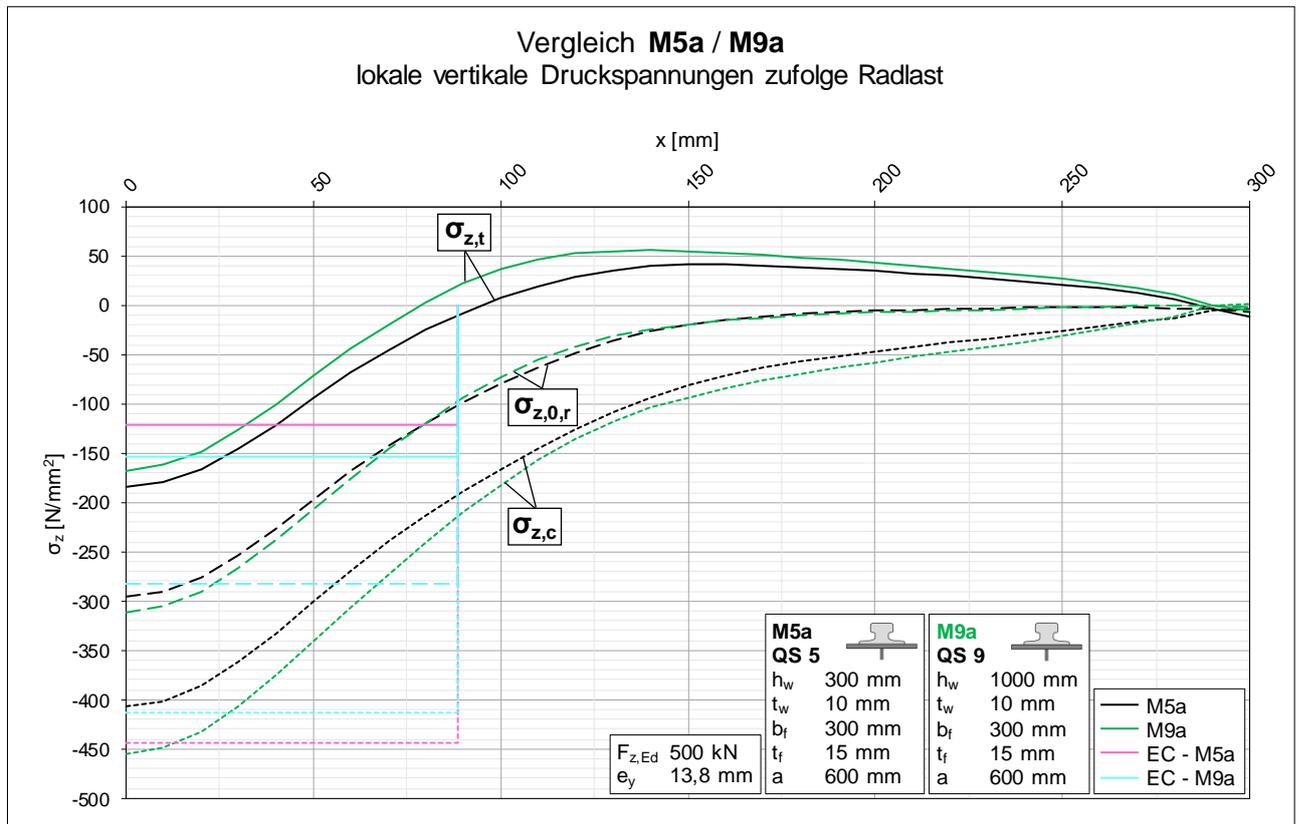


Diagramm 15: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M5a und M9a

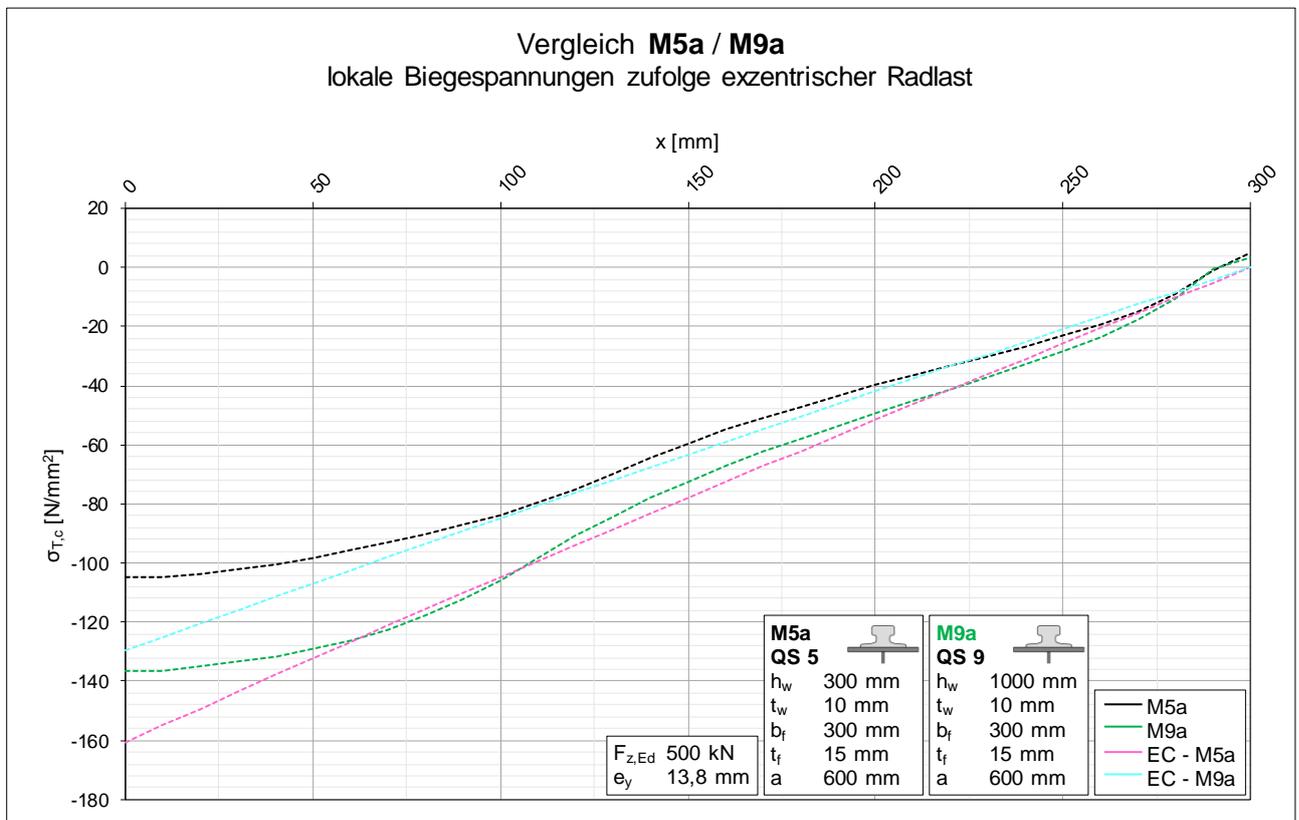


Diagramm 16: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Modelle M5a und M9a

Diagramm 15 vergleicht die Verläufe der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M5a (in schwarz) und M9a (in grün) und damit wiederum jeweils die Variante der starren Lagerung.

Die qualitativen Verläufe der Kurven beider betrachteter Modelle sind sich sehr ähnlich, vor allem jene der Membranspannungen (lang gestrichelte Linien) sind über weite Teile des betrachteten Stegfelds bzw. im Bereich von $x = 150 \text{ mm}$ bis zur Quersteife bei $x = 300 \text{ mm}$ deckungsgleich.

Die gegenübergestellten Modelle unterscheiden sich im Querschnitt des Kranbahnträgers nur bei der Steghöhe (M5a mit $h_w = 300 \text{ mm}$, M9a mit $h_w = 1000 \text{ mm}$). Diese verschiedenen Stegblechhöhen haben einen sichtbaren Einfluss auf die Spannungsverläufe, wenngleich dieser im betrachteten Fall weniger ausgeprägt ist als jener der Flanschdicke (siehe Diagramm 13). Zu beachten ist jedoch, dass deutlich unterschiedliche Trägerschlankheiten vorliegen ($L/h \approx 6$ bei M5a, $L/h \approx 1,8$ bei M9a).

In diesem Fall sind die maximalen vertikalen Druckspannungen (kurz strichlierte Linien), die Membranspannungen (lang strichlierte Linien) sowie die Differenz zwischen maximaler und minimaler vertikaler Druckspannung beim Modell mit niedrigerem Steg (M5a mit $h_w = 300 \text{ mm}$) kleiner. Die minimalen vertikalen Druckspannungen (durchgezogene Linien) sind hingegen größer als beim Modell mit höherem Steg (M9a mit $h_w = 1000 \text{ mm}$).

Interessant sind die Ergebnisse der Berechnung nach Eurocode: Abgesehen von der effektiven Ausbreitungslänge, die bei beiden Modellen gleich lang ist (da von den geometrischen Parametern nur die Flanschdicke mit jeweils $t_f = 15 \text{ mm}$ in l_{eff} einfließt), verhalten sich die EC-Spannungen gegenteilig zu den Ergebnissen der Finite Elemente-Analyse.

Im Detail ist damit gemeint, dass die Spannungskomponente, welche bei einem der FE-Modelle größer ist, in der analytischen Lösung bei besagtem Modell kleiner ist, wie am Beispiel der maximalen vertikalen Druckspannungen gezeigt:

	M5a ($h_w = 300 \text{ mm}$)		M9a ($h_w = 1000 \text{ mm}$)		M5a / M9a
▶ FE	$\sigma_{z,c} = -407,1 \text{ N/mm}^2$	<	$\sigma_{z,c} = -454,9 \text{ N/mm}^2$		0,89
▶ EC	$\sigma_{z,c,EC} = -443,7 \text{ N/mm}^2$	>	$\sigma_{z,c,EC} = -412,5 \text{ N/mm}^2$		1,08

Diese Diskrepanz wird auch durch Vergleich der in Tab. 29 aufgelisteten Verhältnisse der maximalen Spannungen am Lastangriffspunkt sichtbar, so sind diese „Spannungsfaktoren“ (bzw. Verhältnisse von M5a zu M9a) für die FE-Ergebnisse jeweils kleiner als 1,0, für die EC-Resultate hingegen jeweils größer (oder gleich) 1,0.

Dieses widersprüchliche Verhalten von FE- zu EC-Spannungen kann auch bei einigen anderen Modellen mit Profilschiene A 55 beobachtet werden, die entsprechenden Diagramme dazu sind im Anhang der Arbeit zu finden.

In Diagramm 16 sind die Biegespannungsverläufe der Modelle M5a (in schwarz) und M9a (in grün) und damit jeweils die Variante der starren Lagerung - bei unterschiedlichen Geometrien der Kranbahnträger - zum Vergleich abgebildet.

Die Kurven verlaufen qualitativ wie schon zuvor sehr ähnlich, die Differenz in den Biegespannungen liegt dabei vermutlich an den unterschiedlich hohen Stegblechen der betrachteten Modelle (M5a mit $h_w = 300 \text{ mm}$ und M9a mit $h_w = 1000 \text{ mm}$) sowie den unterschiedlichen Verhältnissen a/h_w und Trägerschlankheiten L/h .

Auf den ersten Blick scheinen die EC-Linien mit den numerischen Ergebnisverläufen gut übereinzustimmen, bei genauerer Betrachtung wird allerdings klar, dass auch bei den Biegespannungen die vorhin erwähnte Widersprüchlichkeit zwischen FE- und EC-Berechnung vorliegt.

Im Detail bedeutet dies, dass (sinngemäß wie bei den lokalen Vertikalspannungen in Diagramm 15) die Biegespannung des FE-Modells für M5a kleiner ist als jene von M9a, die entsprechenden Spannungen nach Eurocode sich jedoch gegensätzlich verhalten:

	M5a ($h_w = 300 \text{ mm}$)		M9a ($h_w = 1000 \text{ mm}$)	M5a / M9a
▶ FE	$\sigma_{T,c} = -111,6 \text{ N/mm}^2$	<	$\sigma_{T,c} = -143,9 \text{ N/mm}^2$	0,78
▶ EC	$\sigma_{T,c,EC} = -160,7 \text{ N/mm}^2$	>	$\sigma_{T,c,EC} = -129,6 \text{ N/mm}^2$	1,24

Tab. 29: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Modelle M5a und M9a

Vergleich der lokalen Spannungen			
am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M5a	M9a	M5a / M9a
$\sigma_{z,c}$	-407,1	-454,9	0,89
$\sigma_{z,c,EC}$	-443,7	-412,5	1,08
$\sigma_{T,c}$	-105,0	-136,7	0,77
$\sigma_{T,EC}$	-160,7	-129,6	1,24
$\sigma_{z0,r}$	-295,5	-311,0	0,95
$\sigma_{z0,EC}$	-282,6	-282,6	1,00

5.1.5 Vergleich der Modelle mit Blockschiene 60/30

► Vergleich M11 / M13 - Einfluss der Flanschdicke

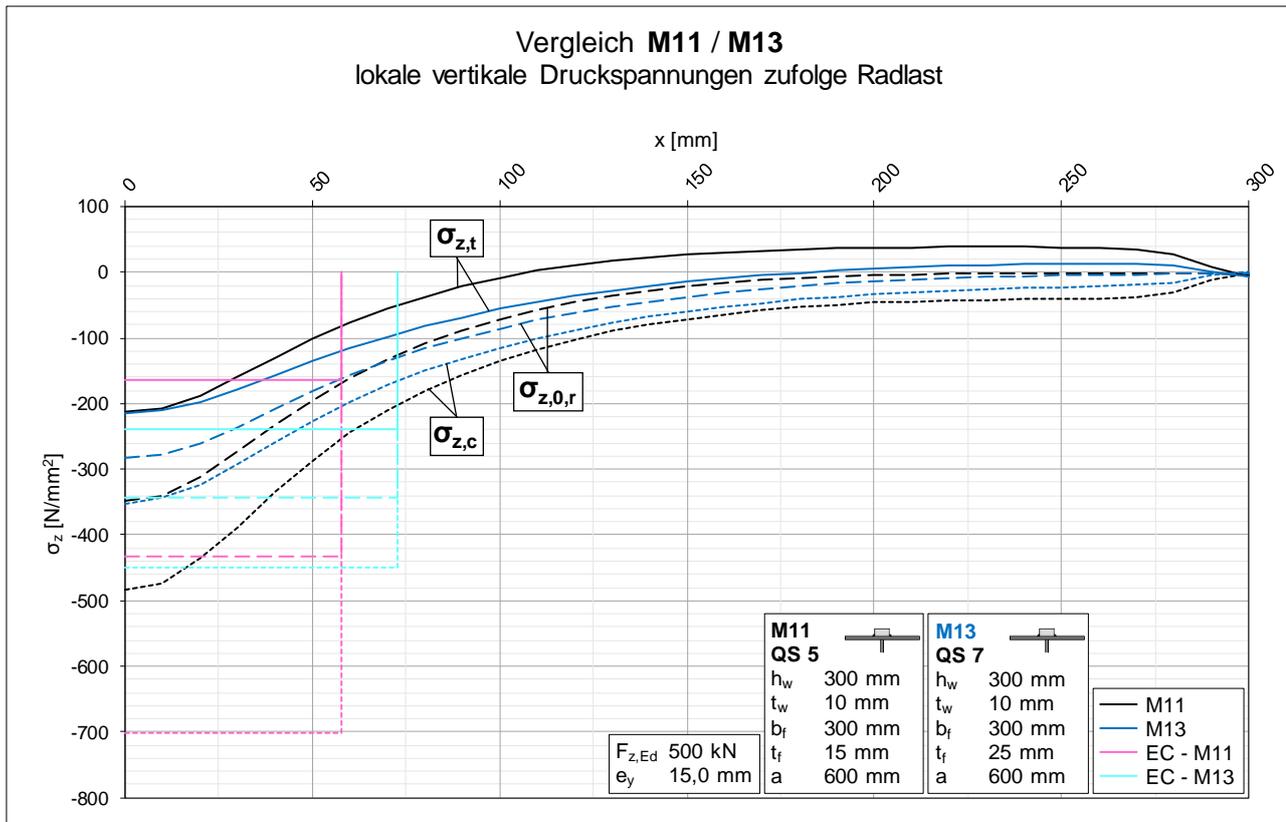


Diagramm 17: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M11 und M13

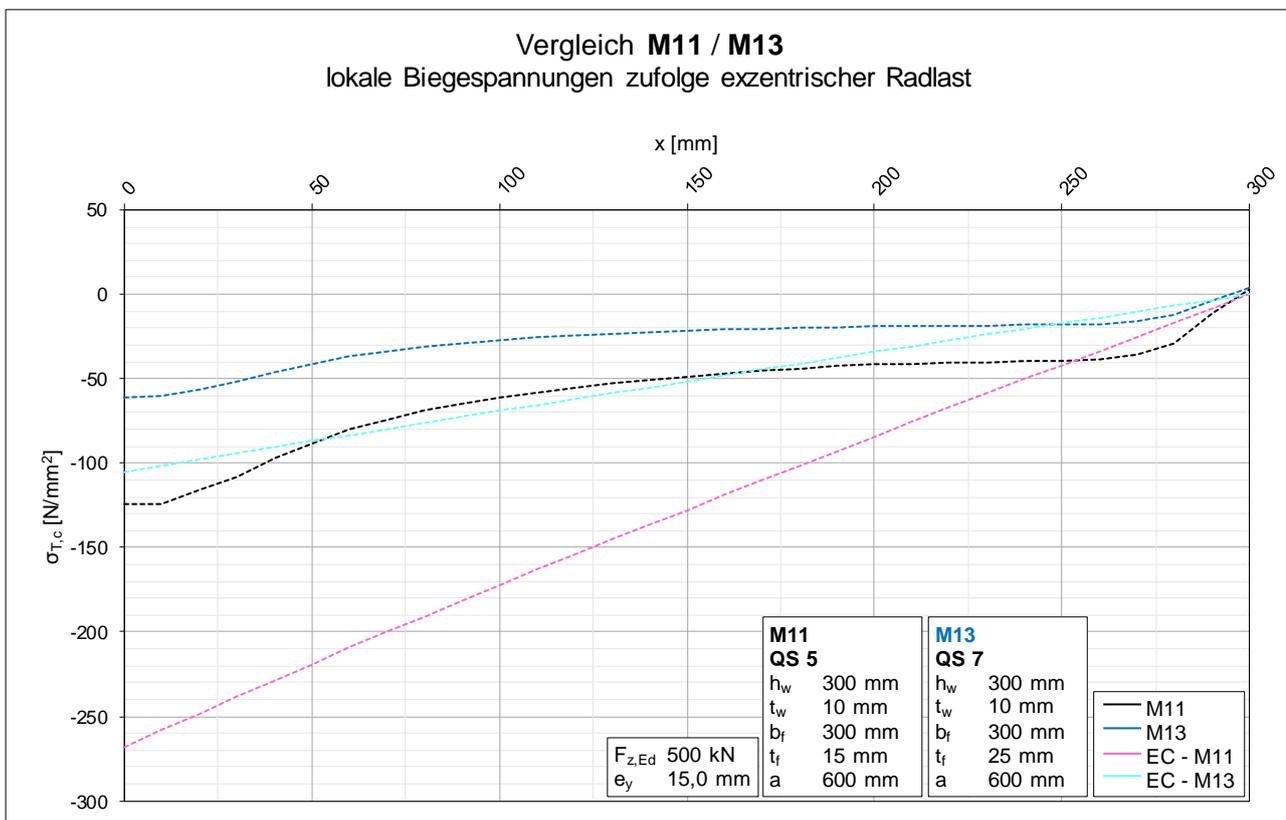


Diagramm 18: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Modelle M11 und M13

In Diagramm 17 sind die Verläufe der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M11 (in schwarz) und M13 (in blau) gegenübergestellt.

Betrachtet man den qualitativen Verlauf der Kurven, ähneln die beiden untersuchten Modelle einander. Dabei ist auffallend, dass die Werte der minimalen vertikalen Druckspannungen am Lasteinleitungspunkt identisch sind (die durchgezogenen Linien treffen sich an der Stelle $x = 0 \text{ mm}$). Die entsprechenden Werte der analytischen Lösung nach EC weichen dagegen voneinander ab.

Generell ist festzustellen, dass die Spannungen nach Eurocode zu groß sind (mit Ausnahme der minimalen vertikalen Druckspannung des Modells M11, durchgezogene Linie in rosa). Außerdem sind die Differenzen der betrachteten Spannungskomponenten zwischen den EC-Modellen M11 und M13 vergleichsweise groß (im Vergleich mit jenen der FE-Modelle).

Die betrachteten Modelle unterscheiden sich im Querschnitt nur hinsichtlich der Flanschdicke (M11 mit $t_f = 15 \text{ mm}$, M13 mit $t_f = 25 \text{ mm}$). Durch die unterschiedliche Gurtstärke ergibt sich einerseits eine unterschiedliche Membranspannung (bei FE- und EC-Lösung), andererseits ist erkennbar, dass die effektive Lastausbreitungslänge mit größerer Gurtstärke ansteigt (vertikale Linien in hellblau sind weiter rechts als jene in rosa). Dieser Umstand müsste allerdings mit weiteren Gurtstärken untersucht werden, um einen genaueren Zusammenhang herzustellen.

Diagramm 18 zeigt die Verläufe der lokalen Biegespannungen für die Modelle M11 und M13, welche sich im Querschnitt nur hinsichtlich der Flanschdicke (M11 mit $t_f = 15 \text{ mm}$, M13 mit $t_f = 25 \text{ mm}$) voneinander unterscheiden.

Hier fällt auf, dass sich die Kurven (wie bei den Vertikalspannungen in Diagramm 13) qualitativ sehr ähnlich sind, nur im Bereich des Lasteinleitungspunktes fällt die Spannung bei M11 rascher ab als bei M13. Das lässt vermuten, dass der Flansch eine gewisse lastverteilende Wirkung hat, die bei dickerem Gurt ausgeprägter ist (wie es bei M13 im Vergleich zu M11 der Fall ist).

Der Eurocode überschätzt die Biegespannungen vor allem beim Modell mit dünnerem Flansch (d. h. bei M11) enorm. Der Unterschied zwischen den Maximalspannungen ist bei den EC-Modellen viel auffälliger als bei den FE-Modellen. Vermutlich fließt die Gurtstärke unverhältnismäßig stark in die Ermittlung der Biegespannungen nach dem Rechenmodell im EC ein.

In Tab. 30 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Modelle M11 und M13 aufgelistet.

Tab. 30: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Modelle M11 und M13

Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M11	M13	M11 / M13
$\sigma_{z,c}$	-483,2	-351,8	1,37
$\sigma_{z,c,EC}$	-701,9	-449,2	1,56
$\sigma_{T,c}$	-124,2	-61,6	2,02
$\sigma_{T,EC}$	-268,0	-105,1	2,55
$\sigma_{z,0,r}$	-347,9	-283,7	1,23
$\sigma_{z,0,EC}$	-433,2	-343,9	1,26

► Vergleich M11 / M12 - Einfluss der Steghöhe

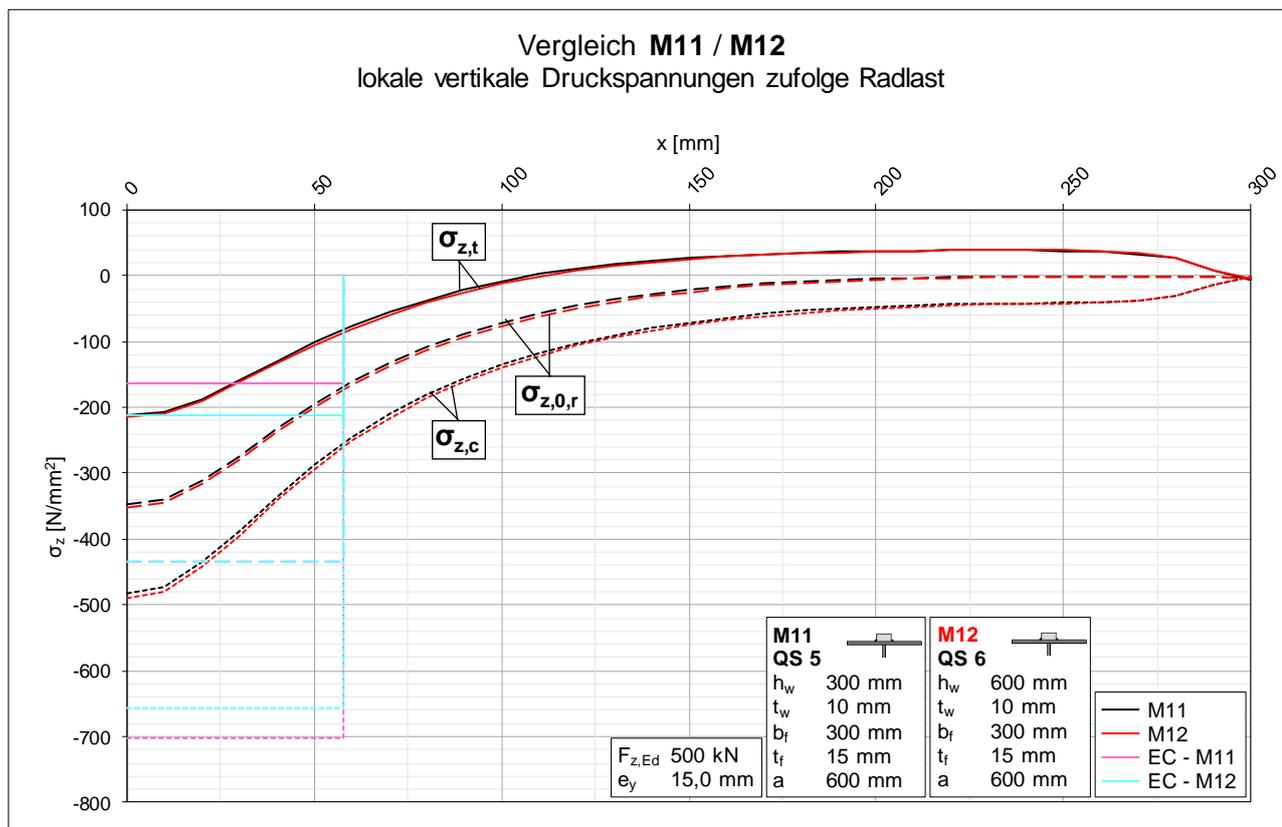


Diagramm 19: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M11 und M12

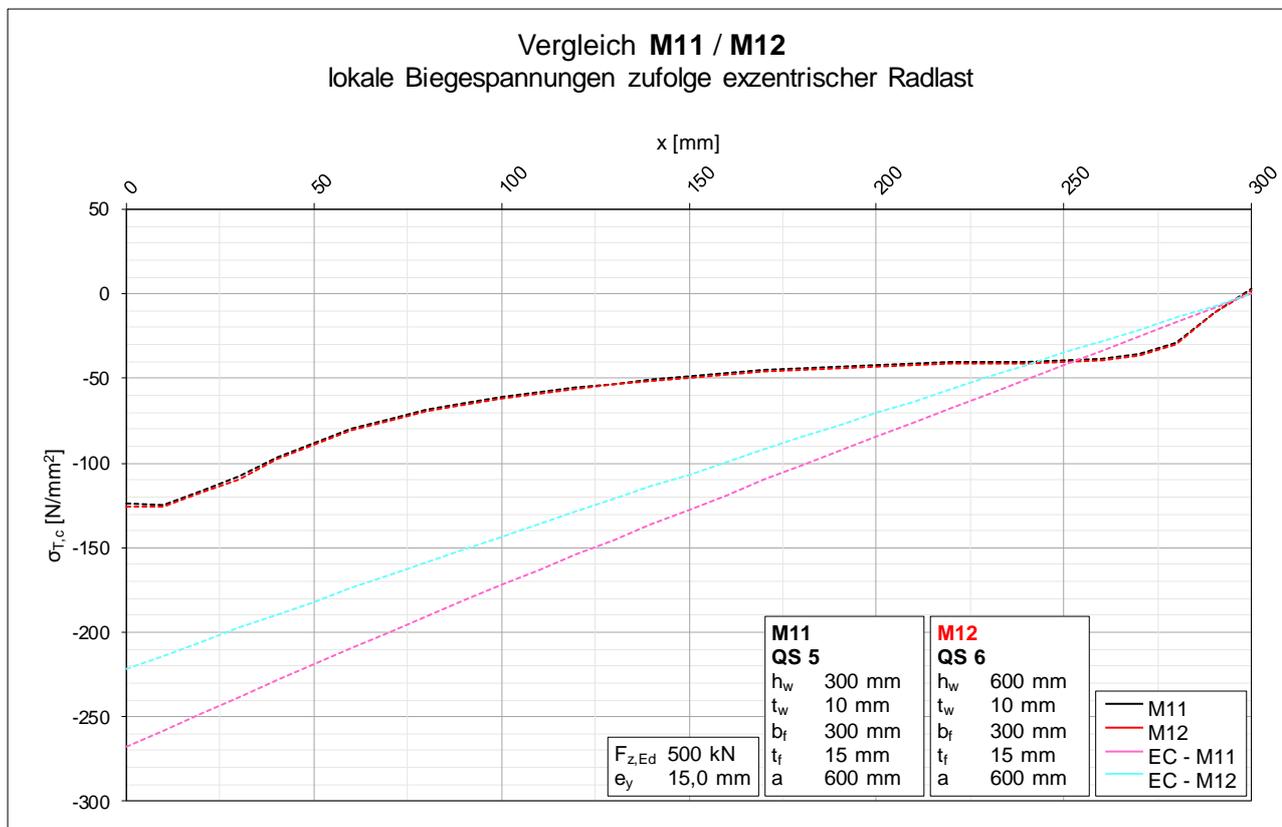


Diagramm 20: Vergleich der lokalen Biegespannungen $\sigma_{T,c}$ der Modelle M11 und M12

Diagramm 19 bildet den Verlauf der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M11 (in schwarz) und M12 (in rot) ab, deren Unterschied im Querschnitt in der Steghöhe (M11 mit $h_w = 300 \text{ mm}$, M12 mit $h_w = 600 \text{ mm}$) liegt.

Die Kurven liegen fast deckungsgleich aufeinander, was darauf schließen lässt, dass die Steghöhe so gut wie keinen Einfluss auf die lokalen vertikalen Druckspannungen hat.

Bei den Ergebnisverläufen nach Eurocode unterscheiden sich die Maximalwerte der Spannungen dagegen deutlich, da die Steghöhe in die Berechnung der Biegespannungen einfließt. Die effektive Lastausbreitungslänge sowie die Membranspannungen sind allerdings identisch (lang gestrichelte Linien in hellblau und rosa überlappen sich), auch weil die Steghöhe nicht in die Ermittlung letzterer einfließt.

Der EC liegt vor allem bei den maximalen vertikalen Druckspannungen (kurz strichlierte Linien in hellblau und rosa) abermals weit über den Ergebnissen der FE-Modelle, auch die Membranspannungen werden überschätzt. Lediglich die minimalen Druckspannungen sind im Fall von Modell M11 geringer (durchgezogene Linie in rosa), beim Modell M12 dagegen treffen sie den numerisch ermittelten Wert (durchgezogene Linie in hellblau).

Auch beim Verlauf der Biegespannungen in Diagramm 20 verlaufen die Kurven fast deckungsgleich, d. h. hier ist der Einfluss der Steghöhe noch geringer als bei den Vertikalspannungen.

Abermals sind die Spannungen nach Eurocode zu hoch, die Differenz der Maximalwerte der Linien in rosa und hellblau lässt auf einen vorhandenen Einfluss der Steghöhe auf die numerischen Ergebnisse schließen.

In Tab. 31 sind die Maximalwerte der Spannungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Modelle M11 und M12 aufgelistet.

Tab. 31: maximale Spannungen am Lastangriffspunkt der Modelle M11 und M12

Vergleich der lokalen Spannungen			
am Lastangriffspunkt			
Spannung [N/mm ²]	M11	M12	M11 / M12
$\sigma_{z,c}$	-483,2	-490,0	0,99
$\sigma_{z,c,EC}$	-701,9	-655,6	1,07
$\sigma_{T,c}$	-124,2	-126,1	0,99
$\sigma_{T,EC}$	-268,0	-221,8	1,21
$\sigma_{z,0,r}$	-347,9	-352,7	0,99
$\sigma_{z,0,EC}$	-433,2	-433,2	1,00

Tab. 32: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Varianten a und b von Modell M1

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt			
Verdrehung [mrad]	M1a	M1b	M1b / M1a
φ_{v1}	-30,1	-30,2	1,00
φ_{v2}	-29,2	-28,8	0,99
φ_{EC}	-11,2	-11,2	1,00

► Vergleich M1a / M1c - Einfluss der diskreten Klemmen (bei starrer Lagerung)

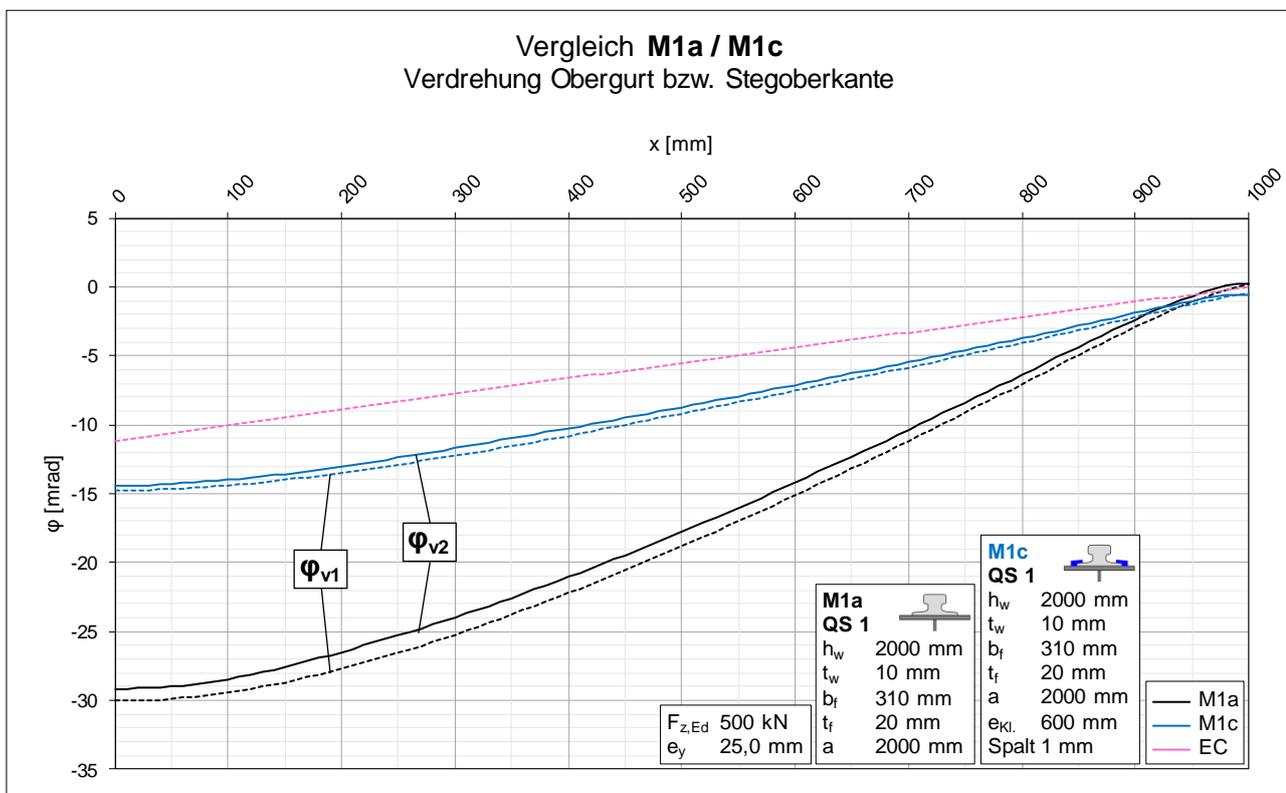


Diagramm 23: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M1

Obiges Diagramm 23 zeigt die Verdrehungsverläufe der Varianten a (ohne Klemmen, in schwarz) und c (Klemmen mit 1 mm Spalt, in blau) im Vergleich.

In diesem Fall ist die Verdrehung der Variante c durch die zusätzliche Klemmwirkung nur etwa halb so groß als jene der Variante a mit ungeklemmter Kranschiene. Auch die zwei betrachteten Varianten der Verdrehungsberechnung (Obergurt φ_{v1} und Stegoberkante φ_{v2}) sind sich bei Variante c näher als bei Variante a. Dies könnte daran liegen, dass der Kranbahnträgerobergurt durch die Klemmen gemeinsam mit der Kranschiene wirkt und sich aufgrund der dadurch höheren Torsionssteifigkeit weniger stark verdreht als ohne Klemmen.

Die Verdrehung nach EC-Modell (rosa Linie) ist auch hier zu klein, wenngleich sie von der blauen Kurve (Variante c) nicht ganz so weit abweicht wie von der schwarzen Kurve (Variante a). Weiters ist der Einfluss der Klemmwirkung im Verlauf der Verdrehungen nach Eurocode nicht berücksichtigt, da erneut nur eine Kurve für den Vergleich mit beiden Varianten a und c vorhanden ist.

In Tab. 33 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten a und c von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 33: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Varianten a und c von Modell M1

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt			
Verdrehung [mrad]	M1a	M1c	M1c / M1a
φ_{v1}	-30,1	-14,8	0,49
φ_{v2}	-29,2	-14,4	0,49
φ_{EC}	-11,2	-11,2	1,00

► Vergleich M1b / M1d - Einfluss der diskreten Klemmen (mit elastischer Unterlage)

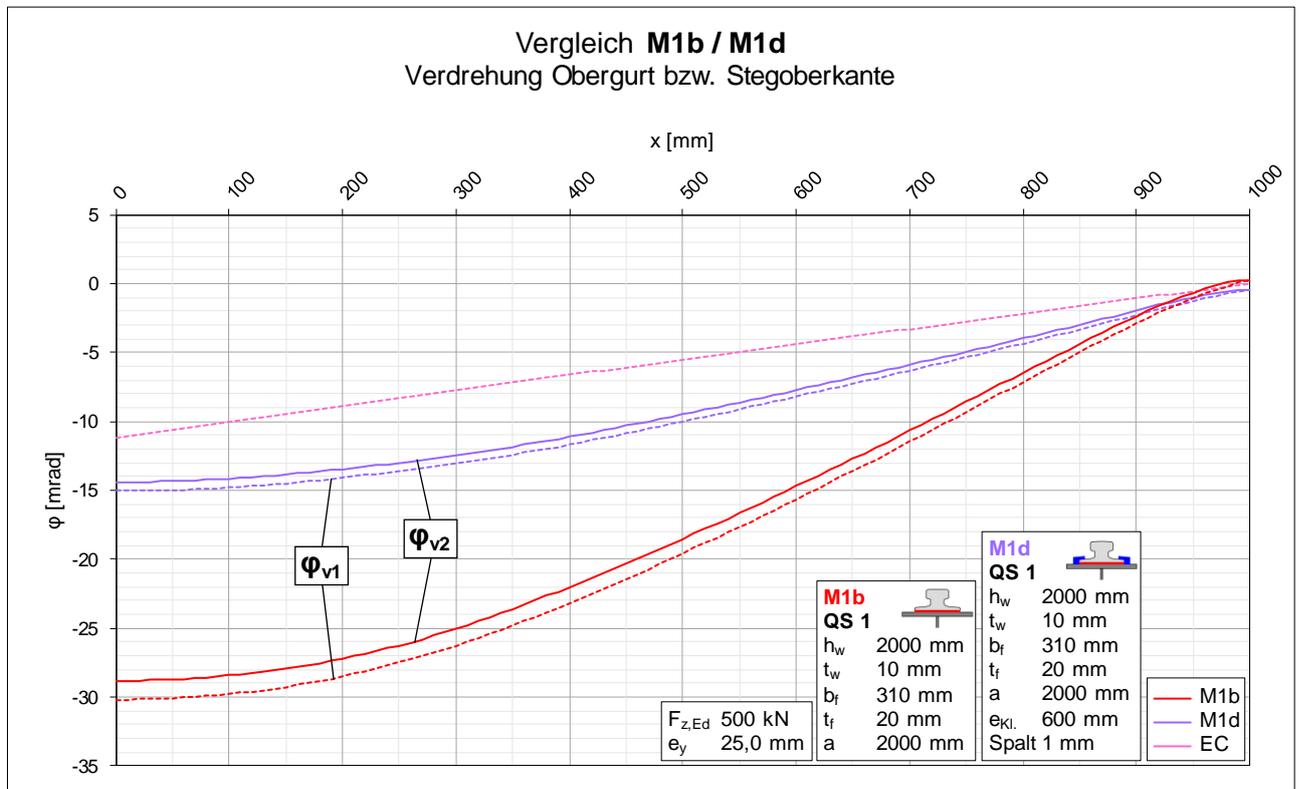


Diagramm 24: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M1

Der Vergleich von Variante b (elastische Unterlage, in rot) mit Variante d (Klemmen mit elastischer Unterlage, in lila) in Diagramm 24 zeigt ein ähnliches Bild wie Diagramm 23.

Der Maximalwert der Verdrehung am Lasteinleitungspunkt wird durch die Klemmwirkung ungefähr halbiert, sowie die Differenz zwischen φ_{v1} (Obergurt) und φ_{v2} (Stegoberkante) wird kleiner.

Die EC-Verdrehung (rosa Linie) ist wie bei den vorhergehenden Vergleichen zu gering, ein Einfluss der Klemmwirkung ist auch hier nicht erfassbar (nur eine Kurve für beide Varianten).

In Tab. 34 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten b und d von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 34: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Varianten b und d von Modell M1

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt			
Verdrehung [mrad]	M1b	M1d	M1d / M1b
φ_{v1}	-30,2	-15,1	0,50
φ_{v2}	-28,8	-14,4	0,50
φ_{EC}	-11,2	-11,2	1,00

► Vergleich M1c / M1e / M1f - Einfluss der diskreten/durchgehenden Klemmen mit/ohne Spalt (bei starrer Lagerung)

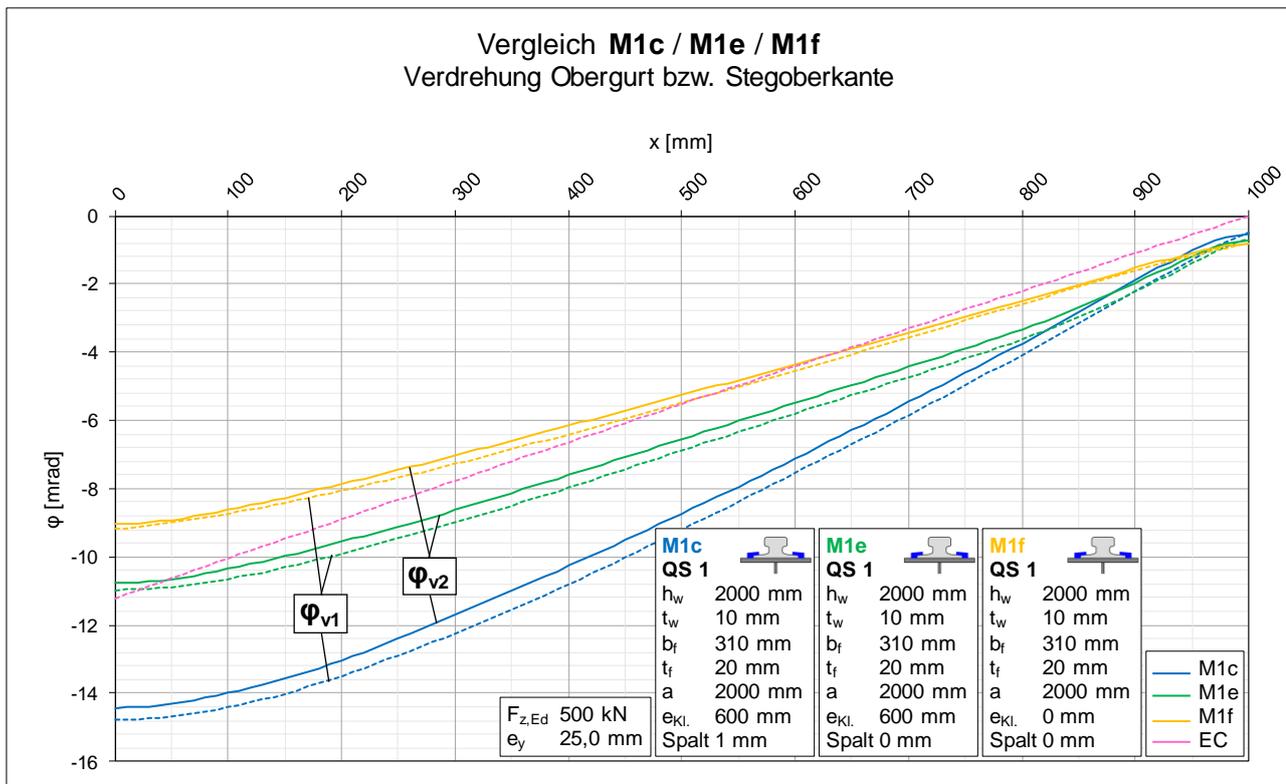


Diagramm 25: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M1

In Diagramm 25 sind die Verläufe der Verdrehungen der Varianten c, e und f (Klemmen und starre Lagerung der Kranschiene) abgebildet. Die Verdrehungen der Variante c (diskret modellierte Klemmen mit 1 mm Spalt) sind in blau, jene der Variante e (diskrete Klemmen ohne Spalt) in grün sowie die Verläufe der Variante f (durchgehend modellierte Klemmen ohne Spalt) in gelb dargestellt.

Wie schon zuvor beobachtet, nimmt der Unterschied zwischen den zwei betrachteten Verdrehungen φ_{v1} und φ_{v2} mit zunehmender Klemmwirkung ab (d. h. die strichlierte und durchgezogene Linie sind sich bei Variante f näher als bei e und c). Vermutlich liegt dies daran, dass sich der Kranbahnträgerobergurt durch die Klemmen gemeinsam mit der Kranschiene verformt bzw. verdreht und die maximale Verdrehung durch die höhere Torsionssteifigkeit geringer ist als bei einer Konfiguration ohne zusätzliche Befestigung der Schiene.

Der Verdrehungsverlauf nach Eurocode (rosa Linie) trifft in etwa den Maximalwert der Verdrehungen von Variante e (diskrete Klemmen ohne Spalt). Betrachtet man den qualitativen Verlauf der Kurven, sind die Varianten e und f (d. h. Klemmen ohne Spalt) dem Eurocode am nächsten, die numerisch

ermittelte Verdrehung der Variante c (Klemmen mit 1 mm Spalt) ist dagegen deutlich höher als die analytisch berechnete Verdrehung.

In Tab. 35 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten c, e und f von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 35: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Varianten c, e und f von Modell M1

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt					
Verdrehung [mrad]	M1c	M1e	M1f	M1e / M1c	M1f / M1c
φ_{v1}	-14,8	-11,0	-9,2	0,74	0,62
φ_{v2}	-14,4	-10,8	-9,0	0,75	0,63
φ_{EC}	-11,2	-11,2	-11,2	1,00	1,00

► Vergleich M1d / M1g / M1h - Einfluss der diskreten/durchgehenden Klemmen mit/ohne Spalt (mit elastischer Unterlage)

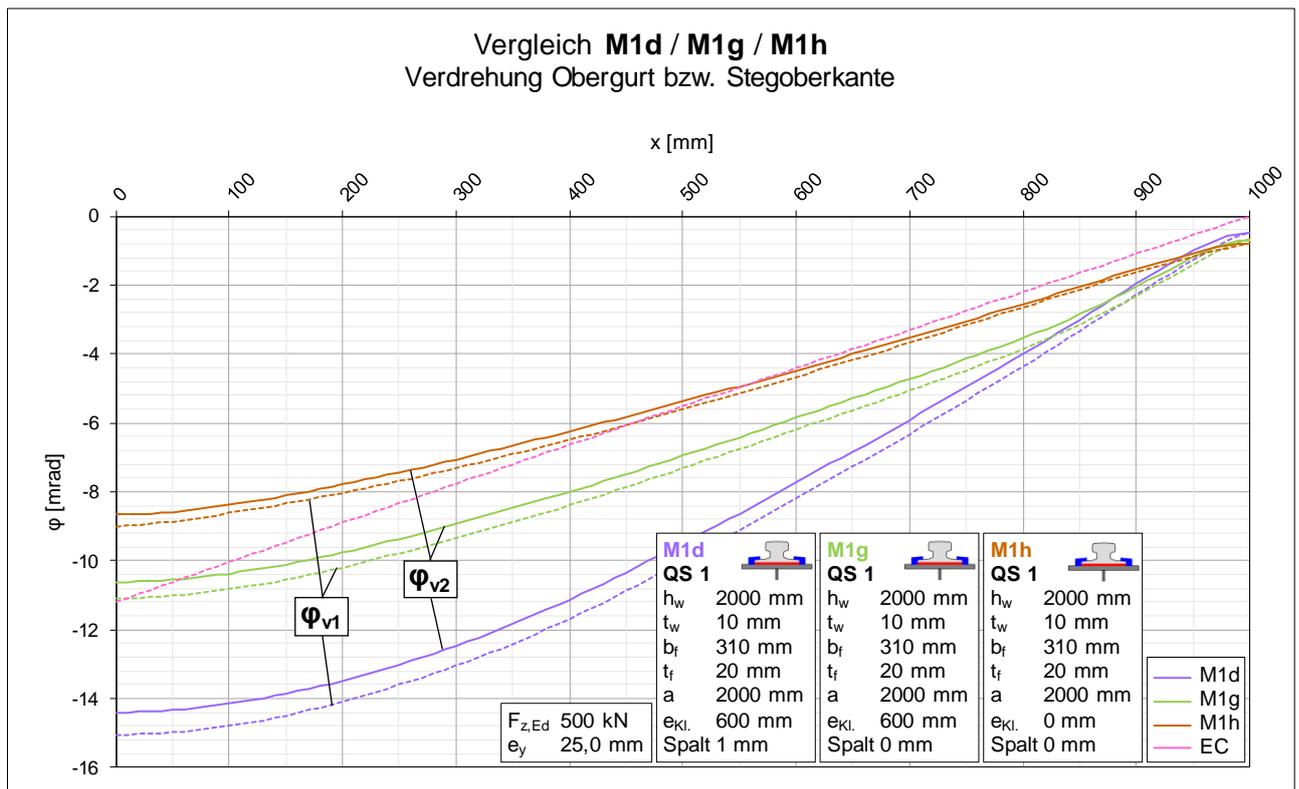


Diagramm 26: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M1

Diagramm 26 zeigt die Verdrehungsverläufe der Varianten d, g und h (Klemmen mit zusätzlicher elastischer Unterlage). Variante d (diskrete Klemmen mit 1 mm Spalt) ist dabei in lila, Variante g (diskrete Klemmen ohne Spalt) in hellgrün und Variante h (durchgehende Klemmung ohne Spalt) in braun dargestellt.

Wie schon zuvor beobachtet, verringert sich die Differenz zwischen der Verdrehung des Obergurts φ_{v1} und der Stegoberkante φ_{v2} mit zunehmender Klemmwirkung (d. h. die strichlierte und

durchgezogene Linie sind sich bei Variante h näher als bei g und d), was vermutlich an der - durch die Klemmen mitwirkenden Kranschiene - höheren Torsionssteifigkeit des Obergurts liegt.

Auch hier fällt der Maximalwert nach Eurocode (rosa Linie) mit der Verdrehung der Variante g (d. h. der Variante mit diskreten Klemmen ohne Spalt) zusammen. Die Verläufe der Varianten mit Klemmen ohne Spalt (g und h) können wie zuvor durch das EC-Modell einigermaßen gut abgebildet werden, die maximale Verdrehung der Variante d (Klemmen mit 1 mm Spalt) aus der FE-Analyse hingegen ist deutlich größer als die der EC-Lösung.

In Tab. 36 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Varianten d, g und h von Modell M1 aufgelistet.

Tab. 36: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Varianten d, g und h von Modell M1

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt					
Verdrehung [mrad]	M1d	M1g	M1h	M1g / M1d	M1h / M1d
φ_{v1}	-15,1	-11,1	-9,0	0,74	0,60
φ_{v2}	-14,4	-10,6	-8,7	0,74	0,60
φ_{EC}	-11,2	-11,2	-11,2	1,00	1,00

► Vergleich aller Varianten von M1 ► Zusammenfassung

In Tab. 37 sind die maximalen Verdrehungen am Lastangriffspunkt der bisher grafisch beschriebenen Verdrehungsverläufe φ_{v1} bzw. φ_{v2} (d. h. der Verdrehung des Obergurts bzw. der Stegoberkante) der verschiedenen Varianten von Modell M1 aufgelistet.

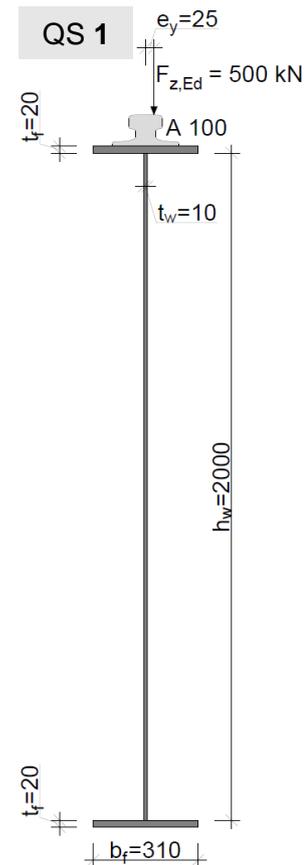
Zum Vergleich mit den jeweiligen Maximalverdrehungen nach Eurocode sind die Verhältnisse der Verdrehungen aus den FE-Berechnungen zu den Verdrehungen nach analytischer Lösung (wie schon bei den Spannungsvergleichen von Modell M1) angegeben. Ein Faktor über 1,0 bedeutet dabei, dass die Verdrehung aus der numerischen Berechnung größer ist als jene laut EC-Modell.

Der Einfluss einer Variante (bzw. der Einfluss der jeweiligen Art der Lagerung und/oder Befestigung der Kranschiene am Flansch) auf die Ergebnisse kann durch diese sogenannten „Verdrehungsfaktoren“ quantifiziert werden.

Um ein Gefühl für die Streuung dieser Verhältnisse von FE- zu EC-Verdrehungen sowie eventuelle „Ausreißer“ (d. h. einzelne stark von den restlichen Werten abweichende Ergebnisse) zu bekommen, sind für die Faktoren $\varphi_{FE}/\varphi_{EC}$ aller Varianten des Modells M1 (d. h. von den jeweils acht Werten in Tab. 37) der arithmetische Mittelwert \bar{x} sowie die Standardabweichung σ angeführt.

Tab. 37: Übersicht über die Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M1

M1 Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{v1} [mrad]	φ_{v2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{v1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{v2} / \varphi_{EC}$ [-]
M1a	-30,06	-29,16	-11,21	2,68	2,60
M1b	-30,19	-28,83	-11,21	2,69	2,57
M1c	-14,78	-14,43	-11,21	1,32	1,29
M1d	-15,05	-14,40	-11,21	1,34	1,29
M1e	-10,97	-10,77	-11,21	0,98	0,96
M1f	-9,16	-9,04	-11,21	0,82	0,81
M1g	-11,09	-10,62	-11,21	0,99	0,95
M1h	-9,00	-8,67	-11,21	0,80	0,77
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage					
\bar{x}	arithmetisches Mittel			1,45	1,40
σ	Standardabweichung			0,74	0,71



Für das untersuchte Modell M1 ergibt dieser Vergleich, dass der Eurocode nur für die Varianten mit Klemmen (diskret oder durchgehend) ohne Spalt (d. h. für die Varianten e, f, g und h) auf der sicheren Seite liegt. Das bedeutet auch, dass für die Varianten a, b, c und d die Verdrehungen nach EC-Modell kleiner sind als jene der numerischen Analyse.

Generell kann anhand der vorliegenden Maximalverdrehungen und Verdrehungsfaktoren festgestellt werden, dass die Variante φ_{v1} (d. h. die Verdrehung des Obergurts) etwas größere Verdrehungen und damit auch höhere Faktoren ergibt als die Variante φ_{v2} (Verdrehung der Stegoberkante).

Wie beim Vergleich der Biegespannung hinsichtlich der einzelnen Varianten von M1 (siehe Tab. 27) verhalten sich die Verhältnisse der Verdrehungen aus FE zu EC erwartungsgemäß (gedanklich hängen die untersuchten Biegespannungen und Verdrehungen zusammen) ähnlich.

Demzufolge sind die Faktoren bei den Varianten a (starre Lagerung) mit $\varphi_{v1}/\varphi_{EC} = 2,68$ bzw. $\varphi_{v2}/\varphi_{EC} = 2,60$ und b (elastische Unterlage) mit $\varphi_{v1}/\varphi_{EC} = 2,69$ bzw. $\varphi_{v2}/\varphi_{EC} = 2,57$ etwas mehr als doppelt so groß wie die entsprechenden Verhältnisse für die Variante c (Klemmen mit 1 mm Spalt bei starrer Lagerung).

Abgesehen davon liegen die Faktoren der restlichen Varianten einigermaßen enger gestreut bzw. weniger weit auseinander.

5.2.3 Vergleich der Modelle mit Profilschiene A 55

► Vergleich M6a / M8a - Einfluss der Flanschdicke (bei starrer Lagerung)

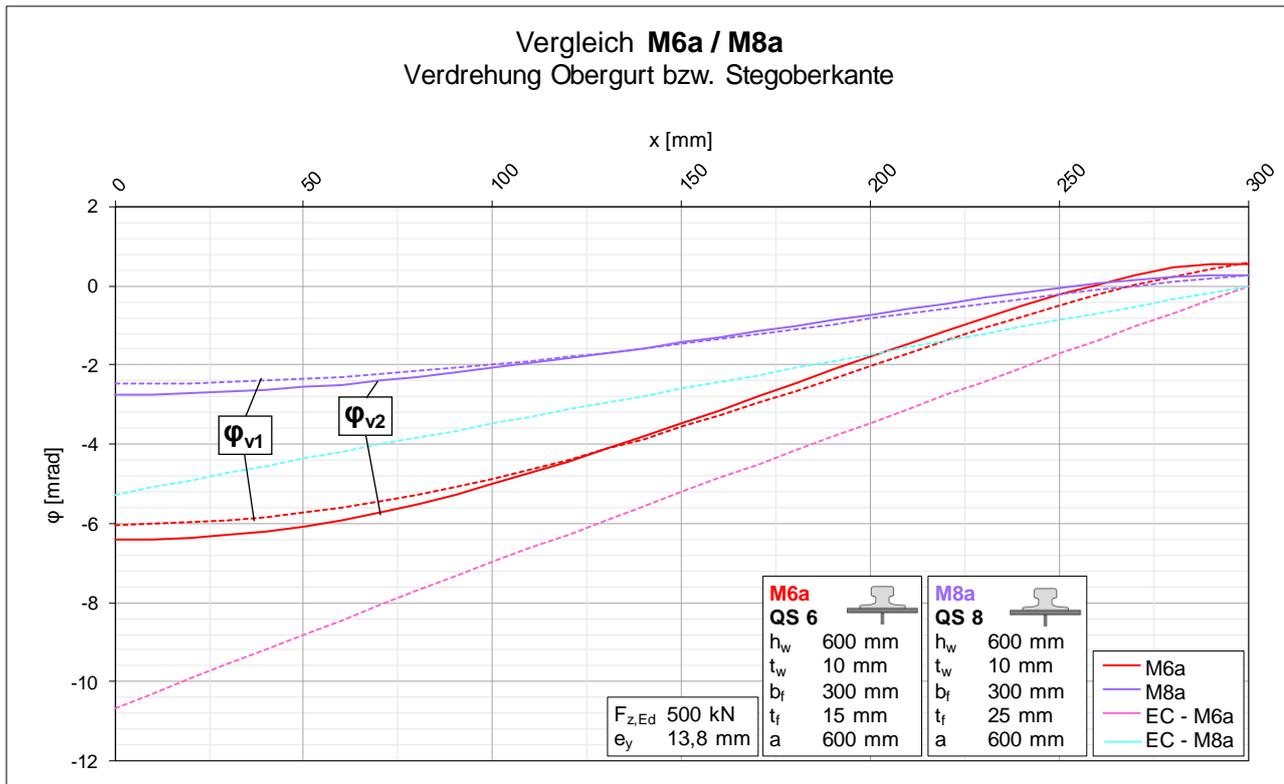


Diagramm 27: Vergleich der Verdrehungen der Modelle M6a und M8a

In Diagramm 27 sind die Verdrehungsverläufe der Modelle M6a (in rot) und M8a (in lila) - d. h. jeweils die Variante mit der starren Lagerung - gegenübergestellt.

Die Kurven der untersuchten Modelle - betrachtet man den qualitativen Verlauf - sind sich sehr ähnlich, wobei die Verdrehung des Modells mit dünnem Flansch (M6a mit $t_f = 15 \text{ mm}$) in etwa doppelt so groß ist wie jene des Modells mit dickem Flansch (M8a mit $t_f = 25 \text{ mm}$).

Interessant ist der Vergleich der zwei untersuchten Varianten der Verdrehung:

Im Bereich vom Lasteinleitungspunkt bei $x = 0 \text{ mm}$ bis zur Stelle von etwa $x = 125 \text{ mm}$ ist die Verdrehung der Stegoberkante φ_{v2} (durchgehende Linien) bei beiden betrachteten Modellen etwas größer als die Verdrehung des Obergurts φ_{v1} (strichlierte Linien). Diese Kurven kreuzen sich bei beiden Modellen ungefähr an dieser Stelle ($x = 125 \text{ mm}$), von hier bis zur Quersteife bei $x = 300 \text{ mm}$ (wo sich die durchgezogenen und strichlierten Linien der jeweiligen Modelle treffen), ist die Verdrehung der Stegoberkante kleiner als jene des Obergurts.

Die Verdrehungen nach EC-Modell sind bei beiden Modellen deutlich zu groß, wie beim Vergleich der Linien in rot und rosa (d. h. Vergleich von M6a mit EC) bzw. der Linien in lila und hellblau (d. h. Vergleich von M8a mit EC) sichtbar wird.

In Tab. 37 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Modelle M6a und M8a aufgelistet.

Tab. 38: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Modelle M6a und M8a

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt			
Verdrehung [rad]	M6a	M8a	M6a / M8a
φ_{v1}	-6,0	-2,5	2,44
φ_{v2}	-6,4	-2,7	2,34
φ_{EC}	-10,7	-5,3	2,03

► Vergleich M5a / M9a - Einfluss der Steghöhe (bei starrer Lagerung)

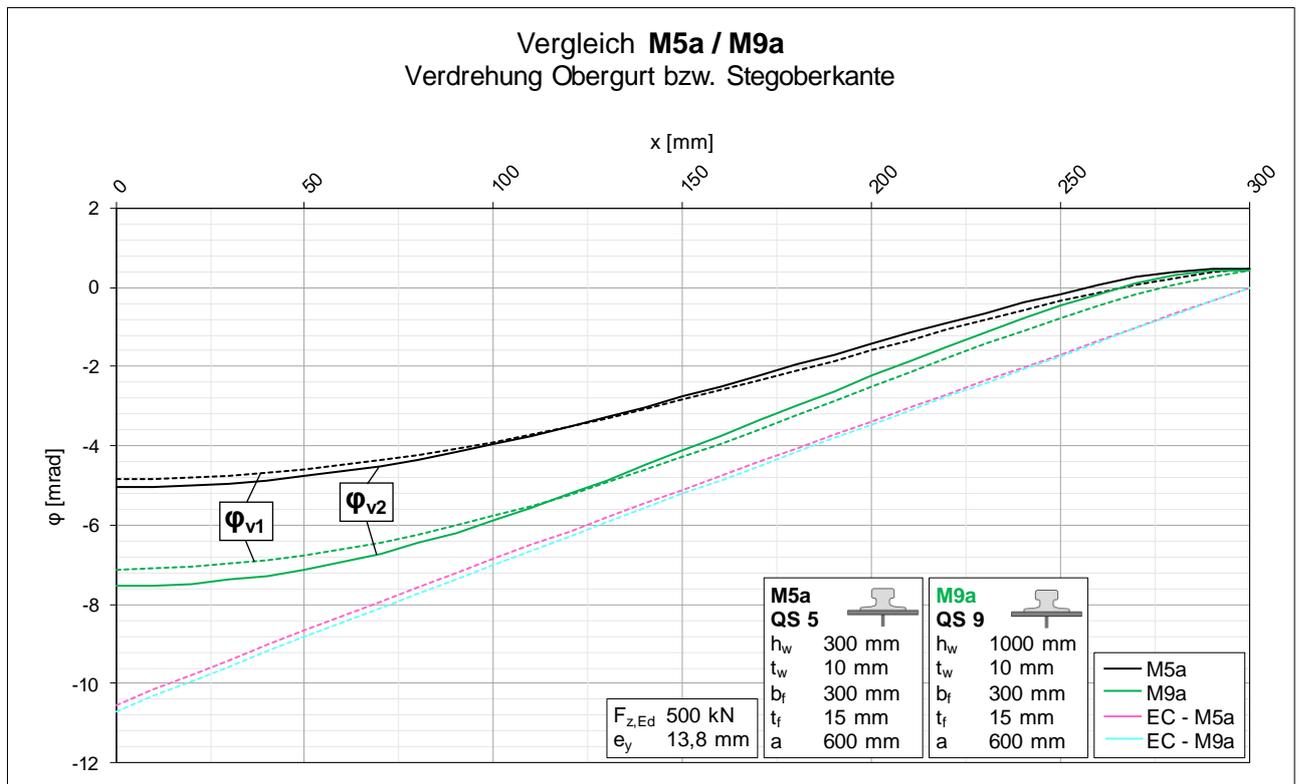


Diagramm 28: Vergleich der Verdrehungen der Modelle M5a und M9a

Diagramm 28 zeigt den Vergleich der Verdrehungsverläufe der Modelle M5a (in schwarz) und M9a (in grün), d. h. jeweils die Variante mit der starren Lagerung der Kranschiene.

Qualitativ sind die Verläufe der Verdrehungen auch hier recht ähnlich (d. h. die grünen Kurven von M9a wirken, als wären sie eine „hochskalierte“ Version der schwarzen Kurven von M5a).

Die größeren numerisch ermittelten Verdrehungen (bzw. Maximalwerte am Lasteinleitungspunkt) ergeben sich bei den Verläufen für das Modell mit höherem Stegblech (M9a mit $h_w = 1000 \text{ mm}$).

Auch hier sind (wie schon in Diagramm 27 beobachtet) im Bereich vom Lasteinleitungspunkt bei $x = 0 \text{ mm}$ bis ungefähr zur Stelle $x = 125 \text{ mm}$ die Verdrehungen der Stegoberkante φ_{v2} (durchgezogene Linien) etwas größer, bevor sich die jeweiligen Kurven überschneiden und von diesem Kreuzungspunkt weg bis zur Quersteife bei $x = 300 \text{ mm}$ die Verdrehung des Obergurts φ_{v1} (strichlierte Linien) größer ist.

Die maximale Verdrehung der analytischen Lösung nach Eurocode ist bei beiden Modellen deutlich größer (beim Modell M5a mehr als doppelt so groß), wobei sich die Verläufe der betrachteten

Modelle kaum unterscheiden (Linien in rosa und hellblau). Daher hat die Steghöhe auf die Verdrehungen nach EC-Modell vermutlich keinen (bzw. einen vernachlässigbar kleinen) Einfluss.

In Tab. 38 sind die Maximalwerte der Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt (d. h. bei $x = 0$) bzw. deren Verhältnisse für die Modell M5a und M9a aufgelistet.

Tab. 39: maximale Verdrehungen am Lastangriffspunkt der Modelle M5a und M9a

Vergleich der Verdrehung am Lastangriffspunkt			
Verdrehung [rad]	M5a	M9a	M5a / M9a
φ_{v1}	-4,8	-7,1	0,68
φ_{v2}	-5,0	-7,5	0,67
φ_{EC}	-10,5	-10,7	0,98

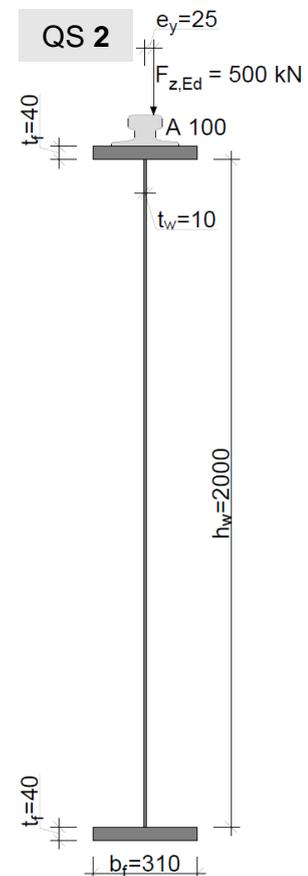
5.3 Vergleich der lokalen Spannungen und Verdrehungen der Modelle M2 bis M14 - Zusammenfassung

In den folgenden Tab. 40 bis 49 werden die maximalen Spannungen und Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt sämtlicher im Hauptteil der Arbeit nicht grafisch abgebildeten Modelle und deren Varianten aufgelistet und die Verhältnisse zu den jeweiligen Ergebnissen nach Eurocode angegeben.

Tab. 40: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M2

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M2a	-228,5	-181,5	1,26	-51,0	-22,6	2,26	-174,4	-158,8	1,10
M2b	-150,2	-144,1	1,04	-41,8	-22,6	1,85	-105,8	-121,5	0,87
M2c	-215,9	-181,5	1,19	-41,5	-22,6	1,84	-171,2	-158,8	1,08
M2d	-139,0	-144,1	0,96	-32,9	-22,6	1,46	-103,4	-121,5	0,85
M2e	-199,9	-181,5	1,10	-31,9	-22,6	1,41	-165,0	-158,8	1,04
M2f	-196,3	-181,5	1,08	-29,3	-22,6	1,30	-164,0	-158,8	1,03
M2g	-126,6	-144,1	0,88	-23,4	-22,6	1,04	-100,7	-121,5	0,83
M2h	-126,1	-144,1	0,88	-20,8	-22,6	0,92	-102,6	-121,5	0,85
\bar{x}	arithmetisches Mittel		1,05			1,51			0,96
σ	Standardabweichung		0,13			0,42			0,11

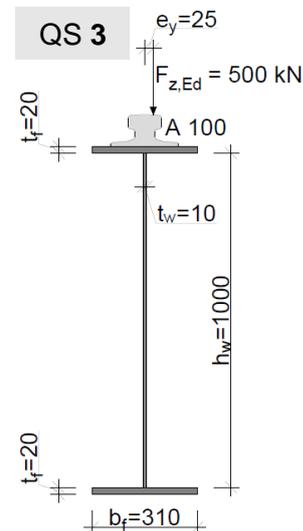
Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt					
	φ_{v1} [mrad]	φ_{v2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{v1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{v2} / \varphi_{EC}$ [-]	
	M2a	-10,42	-10,09	-6,09	1,71	1,66
M2b	-10,10	-9,58	-6,09	1,66	1,57	
M2c	-8,56	-8,30	-6,09	1,41	1,36	
M2d	-8,14	-7,73	-6,09	1,34	1,27	
M2e	-6,37	-6,21	-6,09	1,05	1,02	
M2f	-5,62	-5,51	-6,09	0,92	0,90	
M2g	-5,93	-5,64	-6,09	0,97	0,93	
M2h	-5,13	-4,89	-6,09	0,84	0,80	
\bar{x}	arithmetisches Mittel			1,24	1,19	
σ	Standardabweichung			0,32	0,30	



Tab. 41: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M3

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M3a	-355,2	-219,3	1,62	-139,9	-50,9	2,75	-209,6	-168,3	1,25
M3b	-241,9	-179,7	1,35	-122,1	-50,9	2,40	-112,4	-128,7	0,87
M3c	-268,1	-219,3	1,22	-74,3	-50,9	1,46	-188,7	-168,3	1,12
M3d	-174,2	-179,7	0,97	-62,1	-50,9	1,22	-105,2	-128,7	0,82
M3e	-242,6	-219,3	1,11	-57,1	-50,9	1,12	-180,7	-168,3	1,07
M3f	-228,7	-219,3	1,04	-45,3	-50,9	0,89	-178,8	-168,3	1,06
M3g	-154,1	-179,7	0,86	-45,3	-50,9	0,89	-102,1	-128,7	0,79
M3h	-155,1	-179,7	0,86	-38,6	-50,9	0,76	-109,3	-128,7	0,85
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		1,13			1,44			0,98
σ	Standardabweichung		0,24			0,69			0,16

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt					
	φ_{v1} [mrad]	φ_{v2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{v1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{v2} / \varphi_{EC}$ [-]	
M3a	-28,02	-27,06	-11,11	2,52	2,44	
M3b	-28,18	-26,77	-11,11	2,54	2,41	
M3c	-15,33	-14,93	-11,11	1,38	1,34	
M3d	-15,55	-14,85	-11,11	1,40	1,34	
M3e	-11,70	-11,48	-11,11	1,05	1,03	
M3f	-9,19	-9,14	-11,11	0,83	0,82	
M3g	-11,77	-11,28	-11,11	1,06	1,01	
M3h	-9,79	-9,41	-11,11	0,88	0,85	
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage						
\bar{x}	arithmetisches Mittel			1,46	1,41	
σ	Standardabweichung			0,65	0,61	

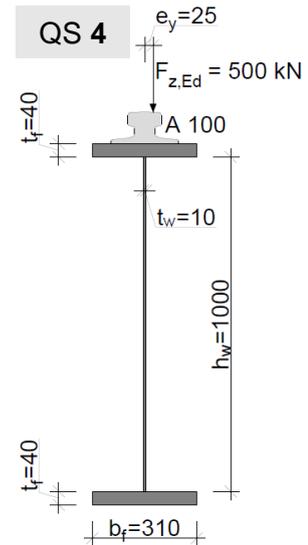


Tab. 42: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M4

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M4a	-228,9	-186,7	1,23	-53,2	-27,8	1,92	-172,6	-158,8	1,09
M4b	-151,9	-149,3	1,02	-44,8	-27,8	1,62	-104,4	-121,5	0,86
M4c	-217,9	-186,7	1,17	-44,7	-27,8	1,61	-170,1	-158,8	1,07
M4d	-141,7	-149,3	0,95	-36,4	-27,8	1,31	-102,6	-121,5	0,85
M4e	-201,1	-186,7	1,08	-34,3	-27,8	1,23	-163,9	-158,8	1,03
M4f	-199,1	-186,7	1,07	-31,1	-27,8	1,12	-165,0	-158,8	1,04
M4g	-127,9	-149,3	0,86	-25,5	-27,8	0,92	-99,9	-121,5	0,82
M4h	-130,2	-149,3	0,87	-22,5	-27,8	0,81	-105,1	-121,5	0,87
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		1,03			1,32			0,95
σ	Standardabweichung		0,12			0,35			0,11

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]
M4a	-10,04	-9,65	-6,06	1,66	1,59
M4b	-9,77	-9,20	-6,06	1,61	1,52
M4c	-8,63	-8,32	-6,06	1,42	1,37
M4d	-8,20	-7,74	-6,06	1,35	1,28
M4e	-6,61	-6,41	-6,06	1,09	1,06
M4f	-5,91	-5,76	-6,06	0,98	0,95
M4g	-6,14	-5,82	-6,06	1,01	0,96
M4h	-5,41	-5,14	-6,06	0,89	0,85
\bar{x}	arithmetisches Mittel			1,25	1,20
σ	Standardabweichung			0,28	0,26

grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage



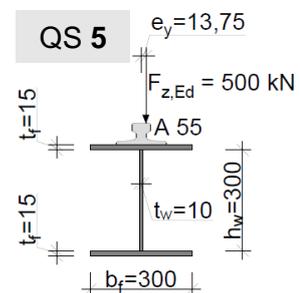
Tab. 43: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M5

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M5a	-407,1	-443,7	0,92	-105,0	-160,7	0,65	-295,5	-282,6	1,05
M5b	-230,6	-377,2	0,61	-74,6	-160,7	0,46	-144,3	-216,1	0,67
M5c	-402,8	-443,7	0,91	-100,6	-160,7	0,63	-295,6	-282,6	1,05
M5d	-224,7	-377,2	0,60	-69,4	-160,7	0,43	-143,6	-216,1	0,66
M5e	-388,3	-443,7	0,88	-90,8	-160,7	0,57	-291,1	-282,6	1,03
M5f	-373,3	-443,7	0,84	-70,1	-160,7	0,44	-296,1	-282,6	1,05
M5g	-210,7	-377,2	0,56	-59,4	-160,7	0,37	-140,0	-216,1	0,65
M5h	-209,1	-377,2	0,55	-44,0	-160,7	0,27	-152,8	-216,1	0,71
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,73			0,86		
σ	Standardabweichung			0,16			0,19		

grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]
M5a	-4,84	-5,05	-10,53	0,46	0,48
M5b	-4,58	-4,09	-10,53	0,44	0,39
M5c	-4,61	-4,86	-10,53	0,44	0,46
M5d	-4,24	-3,84	-10,53	0,40	0,37
M5e	-4,17	-4,38	-10,53	0,40	0,42
M5f	-2,76	-3,38	-10,53	0,26	0,32
M5g	-3,63	-3,32	-10,53	0,34	0,32
M5h	-2,29	-2,44	-10,53	0,22	0,23
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,37	0,37
σ	Standardabweichung			0,08	0,08

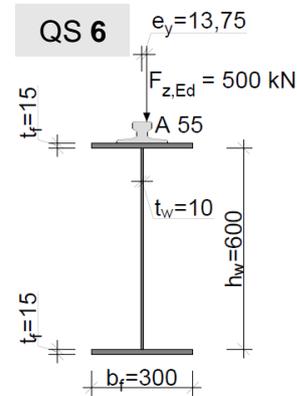
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage



Tab. 44: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M6

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M6a	-431,5	-414,9	1,04	-117,3	-132,0	0,89	-307,2	-282,6	1,09
M6b	-243,1	-348,4	0,70	-81,0	-132,0	0,61	-150,0	-216,1	0,69
M6c	-422,0	-414,9	1,02	-109,3	-132,0	0,83	-305,7	-282,6	1,08
M6d	-228,4	-348,4	0,66	-69,9	-132,0	0,53	-146,8	-216,1	0,68
M6e	-394,6	-414,9	0,95	-91,8	-132,0	0,70	-296,3	-282,6	1,05
M6f	-374,5	-414,9	0,90	-72,3	-132,0	0,55	-295,6	-282,6	1,05
M6g	-214,5	-348,4	0,62	-60,2	-132,0	0,46	-142,9	-216,1	0,66
M6h	-204,8	-348,4	0,59	-45,0	-132,0	0,34	-148,2	-216,1	0,69
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,81			0,61			0,87
σ	Standardabweichung		0,18			0,17			0,19

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{v1} [mrad]	φ_{v2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{v1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{v2} / \varphi_{EC}$ [-]
M6a	-6,03	-6,42	-10,68	0,56	0,60
M6b	-5,61	-5,15	-10,68	0,52	0,48
M6c	-5,62	-6,02	-10,68	0,53	0,56
M6d	-4,76	-4,45	-10,68	0,45	0,42
M6e	-4,65	-4,97	-10,68	0,44	0,47
M6f	-2,92	-3,67	-10,68	0,27	0,34
M6g	-4,07	-3,84	-10,68	0,38	0,36
M6h	-2,42	-2,67	-10,68	0,23	0,25
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage					
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,42	0,44	
σ	Standardabweichung		0,11	0,11	

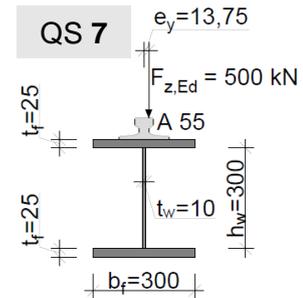


Tab. 45: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M7

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M7a	-316,6	-349,6	0,91	-48,6	-79,8	0,61	-262,9	-269,6	0,98
M7b	-176,3	-286,2	0,62	-27,9	-79,8	0,35	-141,9	-206,2	0,69
M7c	-315,7	-349,6	0,90	-47,3	-79,8	0,59	-263,3	-269,6	0,98
M7d	-174,5	-286,2	0,61	-26,5	-79,8	0,33	-141,6	-206,2	0,69
M7e	-311,4	-349,6	0,89	-45,0	-79,8	0,56	-261,4	-269,6	0,97
M7f	-306,8	-349,6	0,88	-37,6	-79,8	0,47	-264,0	-269,6	0,98
M7g	-166,6	-286,2	0,58	-22,9	-79,8	0,29	-137,4	-206,2	0,67
M7h	-169,6	-286,2	0,59	-17,2	-79,8	0,22	-145,7	-206,2	0,71
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,75			0,43			0,83
σ	Standardabweichung		0,15			0,14			0,14

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]
M7a	-2,06	-2,23	-5,23	0,39	0,43
M7b	-1,46	-1,31	-5,23	0,28	0,25
M7c	-2,01	-2,18	-5,23	0,38	0,42
M7d	-1,38	-1,24	-5,23	0,26	0,24
M7e	-1,91	-2,07	-5,23	0,36	0,40
M7f	-1,46	-1,74	-5,23	0,28	0,33
M7g	-1,19	-1,08	-5,23	0,23	0,21
M7h	-0,78	-0,78	-5,23	0,15	0,15
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,29	0,30
σ	Standardabweichung			0,08	0,10

grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage



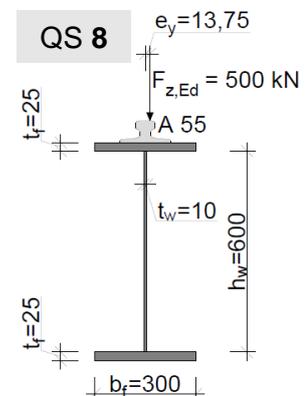
Tab. 46: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M8

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt									
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen			
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z,0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,0,r} / \sigma_{z,0,EC}$ [-]	
M8a	-328,5	-334,9	0,98	-52,7	-65,1	0,81	-270,5	-269,6	1,00	
M8b	-183,4	-271,4	0,68	-29,7	-65,1	0,46	-147,1	-206,2	0,71	
M8c	-326,4	-334,9	0,97	-50,5	-65,1	0,78	-270,6	-269,6	1,00	
M8d	-178,1	-271,4	0,66	-26,6	-65,1	0,41	-144,9	-206,2	0,70	
M8e	-317,5	-334,9	0,95	-46,0	-65,1	0,71	-266,4	-269,6	0,99	
M8f	-308,4	-334,9	0,92	-38,7	-65,1	0,59	-264,7	-269,6	0,98	
M8g	-170,2	-271,4	0,63	-23,2	-65,1	0,36	-140,6	-206,2	0,68	
M8h	-167,7	-271,4	0,62	-17,7	-65,1	0,27	-143,5	-206,2	0,70	
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,80			0,55			0,85
σ	Standardabweichung			0,16			0,19			0,15

grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]
M8a	-2,48	-2,74	-5,27	0,47	0,52
M8b	-1,85	-1,72	-5,27	0,35	0,33
M8c	-2,38	-2,65	-5,27	0,45	0,50
M8d	-1,66	-1,55	-5,27	0,32	0,30
M8e	-2,13	-2,38	-5,27	0,41	0,45
M8f	-1,58	-1,94	-5,27	0,30	0,37
M8g	-1,44	-1,36	-5,27	0,27	0,26
M8h	-0,94	-0,97	-5,27	0,18	0,18
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,34	0,36
σ	Standardabweichung			0,09	0,11

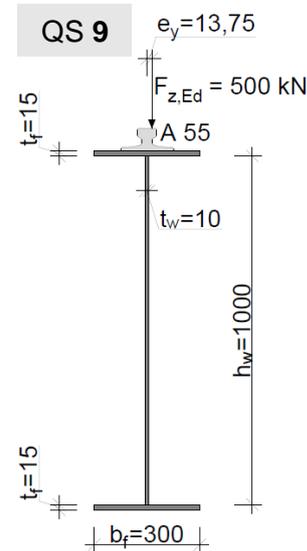
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage



Tab. 47: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M9

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M9a	-454,9	-412,5	1,10	-136,7	-129,6	1,05	-311,0	-282,6	1,10
M9b	-258,2	-346,0	0,75	-95,0	-129,6	0,73	-151,1	-216,1	0,70
M9c	-437,4	-412,5	1,06	-122,8	-129,6	0,95	-307,5	-282,6	1,09
M9d	-237,9	-346,0	0,69	-79,2	-129,6	0,61	-147,0	-216,1	0,68
M9e	-405,3	-412,5	0,98	-101,4	-129,6	0,78	-297,3	-282,6	1,05
M9f	-379,8	-412,5	0,92	-78,9	-129,6	0,61	-294,6	-282,6	1,04
M9g	-222,6	-346,0	0,64	-68,1	-129,6	0,53	-143,1	-216,1	0,66
M9h	-206,8	-346,0	0,60	-50,0	-129,6	0,39	-145,7	-216,1	0,67
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,84			0,71			0,87
σ	Standardabweichung		0,18			0,21			0,20

Modell Nr. [-]	Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt					
	φ_{v1} [mrad]	φ_{v2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{v1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{v2} / \varphi_{EC}$ [-]	
M9a	-7,11	-7,54	-10,69	0,66	0,71	
M9b	-6,65	-6,11	-10,69	0,62	0,57	
M9c	-6,39	-6,80	-10,69	0,60	0,64	
M9d	-5,46	-5,10	-10,69	0,51	0,48	
M9e	-5,23	-5,53	-10,69	0,49	0,52	
M9f	-3,25	-4,03	-10,69	0,30	0,38	
M9g	-4,65	-4,38	-10,69	0,44	0,41	
M9h	-2,73	-3,00	-10,69	0,26	0,28	
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage						
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,48	0,50		
σ	Standardabweichung		0,14	0,13		

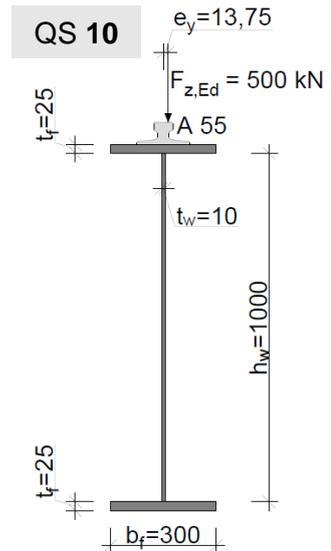


Tab. 48: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Varianten von Modell M10

Modell Nr. [-]	Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt								
	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M10a	-337,8	-333,6	1,01	-59,9	-63,9	0,94	-272,5	-269,6	1,01
M10b	-189,6	-270,2	0,70	-34,8	-63,9	0,54	-148,1	-206,2	0,72
M10c	-334,3	-333,6	1,00	-56,7	-63,9	0,89	-272,3	-269,6	1,01
M10d	-182,2	-270,2	0,67	-30,4	-63,9	0,48	-145,2	-206,2	0,70
M10e	-323,0	-333,6	0,97	-50,6	-63,9	0,79	-267,2	-269,6	0,99
M10f	-311,1	-333,6	0,93	-42,2	-63,9	0,66	-263,9	-269,6	0,98
M10g	-174,0	-270,2	0,64	-26,6	-63,9	0,42	-141,0	-206,2	0,68
M10h	-168,4	-270,2	0,62	-20,2	-63,9	0,32	-141,8	-206,2	0,69
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage									
\bar{x}	arithmetisches Mittel		0,82			0,63			0,85
σ	Standardabweichung		0,16			0,21			0,15

M10		Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
Modell Nr. [-]	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]	
M10a	-2,89	-3,18	-5,27	0,55	0,60	
M10b	-2,29	-2,14	-5,27	0,43	0,41	
M10c	-2,75	-3,02	-5,27	0,52	0,57	
M10d	-2,01	-1,88	-5,27	0,38	0,36	
M10e	-2,42	-2,68	-5,27	0,46	0,51	
M10f	-1,79	-2,16	-5,27	0,34	0,41	
M10g	-1,76	-1,66	-5,27	0,33	0,31	
M10h	-1,19	-1,22	-5,27	0,23	0,23	
\bar{x}	arithmetisches Mittel			0,41	0,43	
σ	Standardabweichung			0,10	0,12	

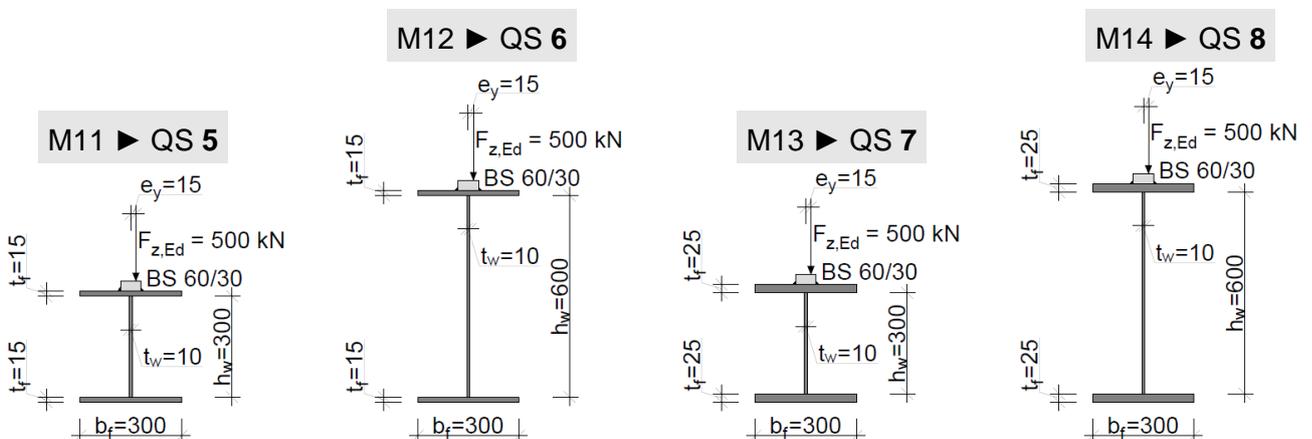
grau hinterlegte Werte = Modelle mit elastischer Unterlage



Tab. 49: Übersicht über die Spannungs- und Verdrehungsvergleiche der Modelle M11 bis M14

M11 - M14		Vergleich der lokalen Spannungen am Lastangriffspunkt							
Modell Nr. [-]	vertikale Druckspannungen			Biegespannungen			Membranspannungen		
	$\sigma_{z,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$ [-]	$\sigma_{T,c}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ [-]	$\sigma_{z0,r}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,EC}$ [N/mm ²]	$\sigma_{z0,r} / \sigma_{z0,EC}$ [-]
M11	-483,2	-701,9	0,69	-124,2	-268,0	0,46	-347,9	-433,2	0,80
M12	-490,0	-655,6	0,75	-126,1	-221,8	0,57	-352,7	-433,2	0,81
M13	-351,8	-449,2	0,78	-61,6	-105,1	0,59	-283,7	-343,9	0,83
M14	-357,1	-429,9	0,83	-62,0	-85,9	0,72	-288,5	-343,9	0,84

M11 - M14		Vgl. Verdrehung am Lastangriffspunkt				
Modell Nr. [-]	φ_{V1} [mrad]	φ_{V2} [mrad]	φ_{EC} [mrad]	$\varphi_{V1} / \varphi_{EC}$ [-]	$\varphi_{V2} / \varphi_{EC}$ [-]	
M11	-5,58	-5,89	-17,56	0,32	0,34	
M12	-5,57	-5,95	-17,95	0,31	0,33	
M13	-2,61	-2,81	-6,88	0,38	0,41	
M14	-2,56	-2,81	-6,94	0,37	0,40	



6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt werden die analytischen und numerischen Ergebnisse sämtlicher in der Arbeit untersuchten Modelle gegenübergestellt und in Form von Punktdiagrammen dargestellt.

Dabei werden die Verhältnisse der lokalen Spannungen (vertikale Druckspannungen, Biegespannungen und Membranspannungen) aus der Finite Elemente-Analyse zu jenen nach dem Rechenmodell im Eurocode, in dieser Arbeit als „Spannungsfaktoren“ bezeichnet, dargestellt.

Weiters werden die maximalen Verdrehungen (des Obergurts und der Stegoberkante) am Lastangriffspunkt mit den EC-Ergebnissen verglichen.

Varianten mit starrer Lagerung der Kranschiene (d. h. die Varianten a, c, e und f) auf dem Kranbahnträgerobergurt sind durch „leere“ Symbole repräsentiert, Varianten mit zusätzlicher elastischer Unterlage durch „gefüllte“ Symbole.

Die Form der Symbole gibt einen Hinweis auf die Befestigung der Schiene, so steht z. B. das Quadrat einerseits für die Variante e (starre Lagerung und Klemmen ohne Spalt, „leer“ und in grün abgebildet), andererseits für die Variante g (elastische Unterlage und Klemmen ohne Spalt, „gefüllt“ und in hellgrün dargestellt).

6.1 Vergleich FE - EC auf Spannungsebene

Die einzelnen Punkte bzw. Symbole entsprechen hierbei den auf der Ordinate aufgetragenen Spannungsfaktoren ($\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC}$, $\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC}$ und $\sigma_{z,0,r} / \sigma_{z,0,EC}$) aller Varianten (a bis h) des jeweiligen auf der Abszisse abgebildeten Modells (M1 bis M14). Die rot gepunktete horizontale Linie repräsentiert einen Faktor von FE / EC von 1,0 und damit eine vollständige Übereinstimmung der analytischen mit der numerischen Lösung.

6.1.1 Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen

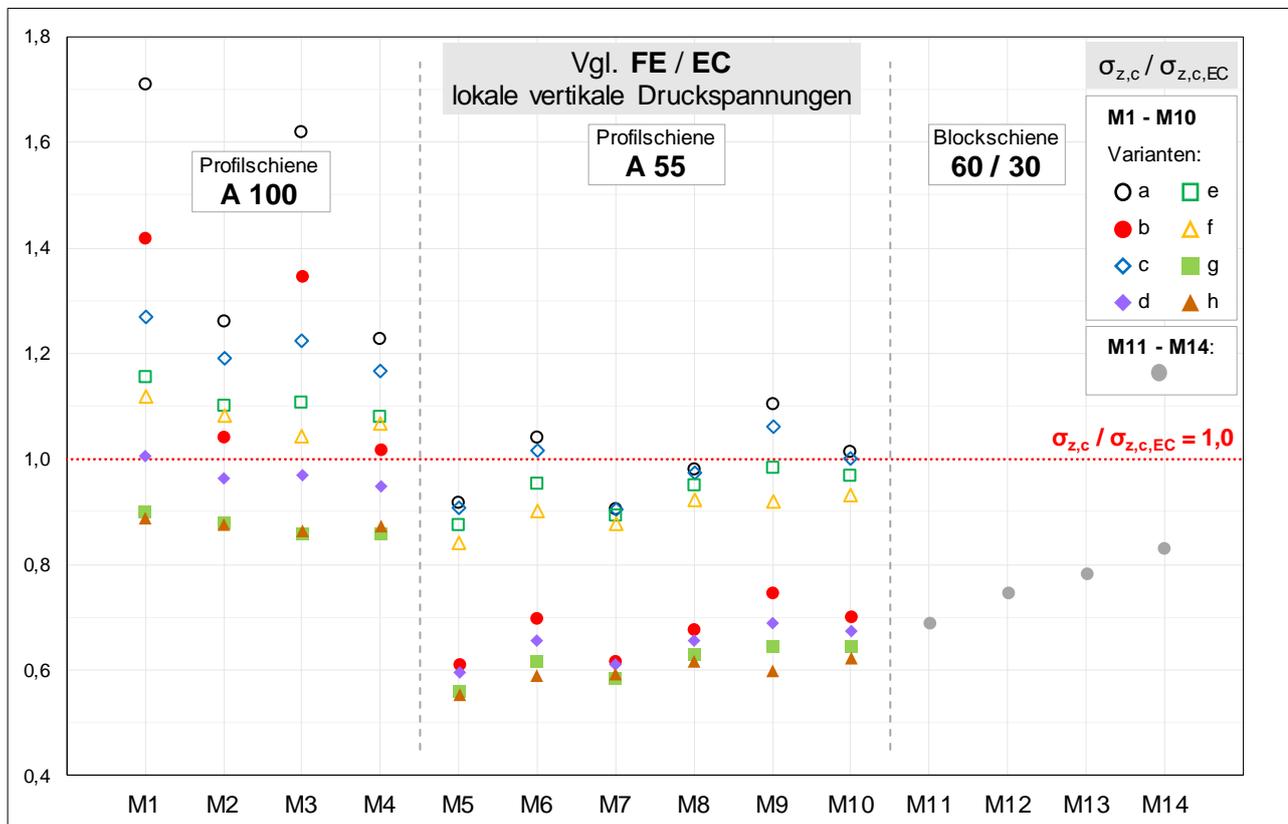


Diagramm 29: Vergleich FE- EC der lokalen vertikalen Druckspannungen sämtlicher Modelle (bzw. Varianten)

In Diagramm 29 sind die Verhältnisse der lokalen vertikalen Druckspannungen aus der Finite Elemente-Berechnung zur analytischen Lösung nach Eurocode für sämtliche in der Arbeit untersuchten Modelle und deren entsprechende Varianten abgebildet. Im Detail sind die Verhältnisse der in Diagramm 1 definierten maximalen vertikalen Druckspannungen zufolge Radlast $\sigma_{z,c}$ (d. h. der Spannung auf der lastzugewandten Stegseite) dargestellt.

► *Modelle mit Profilschiene A 100 - M1 bis M4*

Bei den Modellen mit Profilschiene A 100 (M1 bis M4) ist vor allem jeweils die Variante d, d. h. Klemmen mit 1 mm Spalt und elastischer Unterlage (dargestellt als lila gefüllte Raute) vom Rechenmodell im Eurocode sehr gut getroffen.

Sogenannte „Ausreißer“ (d. h. stark von den restlichen Ergebnissen abweichende Werte) sind bei den Varianten a (starre Lagerung, schwarzer Kreis) und b (elastische Unterlage, rot gefüllter Kreis) der Modelle M1 und M3 zu beobachten. Diese großen Differenzen der Spannungsfaktoren im Vergleich zu den Modellen M2 und M4 liegen vermutlich an der Gurtstärke: M1 und M3 besitzen mit $t_f = 20 \text{ mm}$ einen dünnen Flansch, M2 und M4 mit $t_f = 40 \text{ mm}$ einen doppelt so dicken Obergurt des Kranbahnträgers.

Bei den Varianten mit Klemmen (c bis h) der betrachteten Modelle M1 bis M4 sind diese Unterschiede zwar bemerkbar, aber weniger auffallend als bei Variante a und b.

Auffallend ist auch, dass die Punkte der Varianten mit diskreten Klemmen (Variante g, hellgrün gefülltes Quadrat) bzw. durchgehender Klemmung (Variante h, braun gefülltes Dreieck) ohne Spalt und mit elastischer Unterlage sehr nah aneinander bzw. deckungsgleich liegen. Das bedeutet, dass es keinen großen Unterschied macht, ob diskrete Klemmen (d. h. Klemmen im Abstand e_{KL}) oder durchgehende Klemmen modelliert werden.

► *Modelle mit Profilschiene A 55 - M5 bis M10*

Bei den Modellen mit Profilschiene A 55 (M5 bis M10) ist auffallend, dass die Punkte der Varianten mit starrer Lagerung der Kranschiene (d. h. Varianten a, c, e und f, dargestellt als „leere“ Symbole) nahe zueinander liegen und vom Eurocode generell einigermaßen gut angenähert werden (liegen in der Nähe der rot gepunkteten Linie).

Die Varianten mit elastischer Unterlage (d. h. Varianten b, d, g und h, dargestellt als „gefüllte“ Symbole) liegen ebenso nahe zueinander, jedoch allesamt weiter entfernt von der EC-Lösung.

Die Streuung der einzelnen Varianten voneinander ist bei diesen beiden Gruppen (Varianten mit starrer Lagerung bzw. mit elastischer Unterlage) sehr ähnlich und der Abstand auf der Ordinate zwischen zwei Varianten gleicher Befestigung, aber unterschiedlicher Lagerung der Schiene, ist innerhalb eines Modells immer etwa gleich groß.

Außerdem streuen die Ergebnisse der Modelle mit „dünnem“ Flansch sichtbar mehr als jene mit „dickem“ Flansch, wie beispielsweise beim Vergleich der Modelle M6 und M8 (M6 mit $t_f = 15 \text{ mm}$ bzw. dünnem Flansch, M8 mit $t_f = 25 \text{ mm}$ bzw. dickem Flansch, beide Modelle mit einer Steghöhe von $h_w = 600 \text{ mm}$).

Am besten getroffen hat die analytische Lösung bei diesen Modellen jeweils die Variante c (starre Lagerung, diskrete Klemmen mit 1 mm Spalt, repräsentiert durch blaue Raute).

► *Modelle mit Blockschiene 60/30 - M11 bis M14*

Bei den Modellen mit Blockschiene 60/30 (M11 bis M14) liegen die Ergebnisse der FE-Berechnung allesamt weit unterhalb der Resultate nach EC-Modell (die Verhältnisse der Spannungen aus FE zu den Spannungen aus EC liegen im Bereich von 0,69 bis 0,83).

Auffallend ist hier vor allem, dass sich die Punkte (bzw. grau gefüllten Kreise) mit höherem Stegblech und dickeren Gurten näher an der rot gepunkteten Linie, d. h. der EC-Lösung, befinden.

Der Einfluss der Flanschdicke ist größer und beispielsweise beim Vergleich der Modelle M11 und M13 sichtbar (M11 mit $t_f = 15 \text{ mm}$ bzw. dünnem Flansch, M13 mit $t_f = 25 \text{ mm}$ bzw. dickem Flansch, beide Modelle mit einer Steghöhe von $h_w = 300 \text{ mm}$). Der Punkt von Modell M13 liegt dabei näher an der rot gepunkteten Linie, d. h. der EC-Lösung, als jener von Modell M11.

Die steigende Stegblechhöhe bewirkt ebenso einen gewissen Einfluss auf die Ergebnisse, wie beim Vergleich des Modells M11 mit M12 erkennbar wird (M11 mit $h_w = 300 \text{ mm}$, M12 mit $h_w = 600 \text{ mm}$, beide Modelle mit einer Flanschdicke von $t_f = 15 \text{ mm}$). Der Punkt von Modell M12 liegt dabei näher an der rot gepunkteten Linie, d. h. der EC-Lösung, als jener von Modell M11.

6.1.2 Vergleich der lokalen Biegespannungen

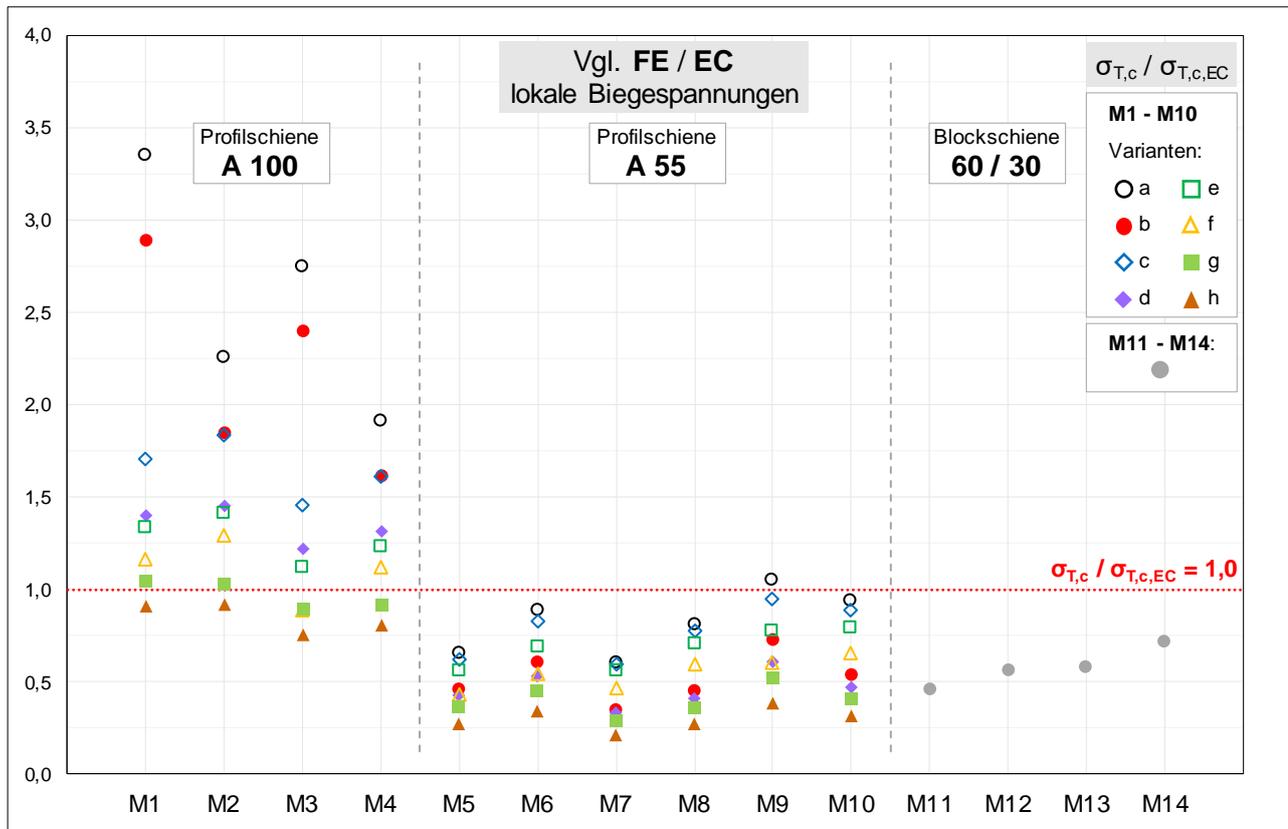


Diagramm 30: Vergleich FE - EC der lokalen Biegespannungen sämtlicher Modelle (bzw. Varianten)

In Diagramm 30 sind die Verhältnisse der lokalen Biegespannungen aus der Finite Elemente-Berechnung zur analytischen Lösung nach Eurocode für sämtliche in der Arbeit untersuchten Modelle und deren entsprechende Varianten abgebildet. Genauer betrachtet werden dabei die Verhältnisse der lokalen Biegedruckspannungen zufolge exzentrischer Radlast $\sigma_{T,c}$ (d. h. der Biegespannungen auf der lastzugewandten Stegseite).

► Modelle mit Profilschiene A 100 - M1 bis M4

Hier liegen bei fast allen betrachteten Varianten die Spannungen aus den FE-Berechnungen zum Teil weit über jenen des EC-Modells (Faktor der Modellvariante M1a bei 3,50).

Am nächsten sind die Spannungen nach Eurocode jeweils den FE-Resultaten der Variante g (d. h. diskrete Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage, als hellgrün gefülltes Quadrat dargestellt). Auch die Variante h (durchgehende Klemmung ohne Spalt, mit elastischer Unterlage, als braun

gefülltes Dreieck abgebildet) liegt vor allem bei den Modellen mit höherem Steg (M1 und M2 mit $h_w = 2000 \text{ mm}$) nahe der rot gepunkteten Linie (EC-Lösung).

Interessant sind hier auch die Varianten b (elastische Unterlage, rot gefüllter Kreis) und c (Klemmen mit 1 mm Spalt, blaue Raute): Während die Punkte der besagten Varianten bei den Modellen M1 und M3 (d. h. bei Modellen mit dünnem Flansch, $t_f = 20 \text{ mm}$) sehr weit auseinander liegen (beispielsweise liegt M1b bei 3,07 und M1c bei 1,83), sind sie bei den Modellen M2 und M4 (d. h. Modellen mit dickem Flansch, $t_f = 40 \text{ mm}$) fast an denselben Stellen (M2b bei 1,97 und M2c bei 1,98).

Ist bei den lokalen vertikalen Druckspannungen der Faktor FE / EC bei dicken Flanschen noch kleiner als bei dünnen Flanschen, so zeigt sich bei den Verhältnissen der lokalen Biegespannungen das gegenteilige Bild:

M1c ($t_f = 20 \text{ mm}$)	>	M2c ($t_f = 40 \text{ mm}$)	
▶ $\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC} = 1,27$		$\sigma_{z,c} / \sigma_{z,c,EC} = 1,19$	lokale vertikale Druckspannung (siehe Diagramm 29)
▶ $\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC} = 1,83$	<	$\sigma_{T,c} / \sigma_{T,c,EC} = 1,98$	lokale Biegespannung (siehe Diagramm 30)

Ein ähnliches Verhalten kann auch bei den Spannungsfaktoren der Variante e (d. h. diskrete Klemmen ohne Spalt, starre Lagerung, als grünes Quadrat abgebildet) beobachtet werden, wobei dies hier weniger stark ausgeprägt ist.

▶ *Modelle mit Profilschiene A 55 - M5 bis M10*

Im Gegensatz zu den Modellen M1 bis M4 liegen die Faktoren FE / EC bei den Modellen M5 bis M10 (bzw. Modellen mit Profilschiene A 55) größtenteils unterhalb der rot gepunkteten Linie, d. h. die Spannungen nach Eurocode sind in diesen Fällen höher als jene aus der numerischen Berechnung.

Wie bei den lokalen vertikalen Druckspannungen in Diagramm 29 liegen die Punkte der einzelnen Varianten nahe beieinander (d. h. die Faktoren streuen weniger stark als jene der Modelle M1 bis M4 bzw. deren Varianten). Auch ist der Unterschied zwischen Varianten mit starrer Lagerung der Kranschiene auf dem Kranbahnträgerobergurt (a, c, e und f) und Varianten mit elastischer Schienenunterlage (b, d, g und h) nicht mehr so offensichtlich wie zuvor, wobei letztere generell weiter von der rot gepunkteten Linie (EC-Lösung) entfernt sind.

Lässt man die Modelle M5 und M7 außen vor, so liegt die EC-Lösung den Varianten a (starre Lagerung, schwarzer Kreis) und c (Klemmen mit 1 mm Spalt, blaue Raute) am nächsten. Ein Zusammenhang dafür, dass eben diese Varianten bei den Modellen M5 und M7 stärker von der rot gepunkteten Linie abweichen, als bei den restlichen Modellen (M6, M8, M9 und M10), konnte nicht eindeutig festgestellt werden.

▶ *Modelle mit Blockschiene 60/30 - M11 bis M14*

Ähnlich wie bei der Betrachtung der lokalen vertikalen Druckspannungen liegen die Verhältnisse der FE-Berechnung zur EC-Lösung weit unterhalb der rot gepunkteten Linie (Faktoren der Spannungen aus FE zu den Spannungen aus EC liegen im Bereich von 0,50 bis 0,80).

Auch bei den Biegespannungen fällt wieder auf, dass sich die Punkte (grau gefüllte Kreise) mit höherem Stegblech und dickeren Gurten näher an der rot gepunkteten Linie und damit einem Verhältnis von FE / EC von 1,0 befinden.

Die Flanschdicke hat auch hier einen etwas größeren Einfluss als die Steghöhe, wobei die Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen ähnlich groß sind wie bei den Vertikalspannungsfaktoren.

6.1.3 Vergleich der lokalen Membranspannungen

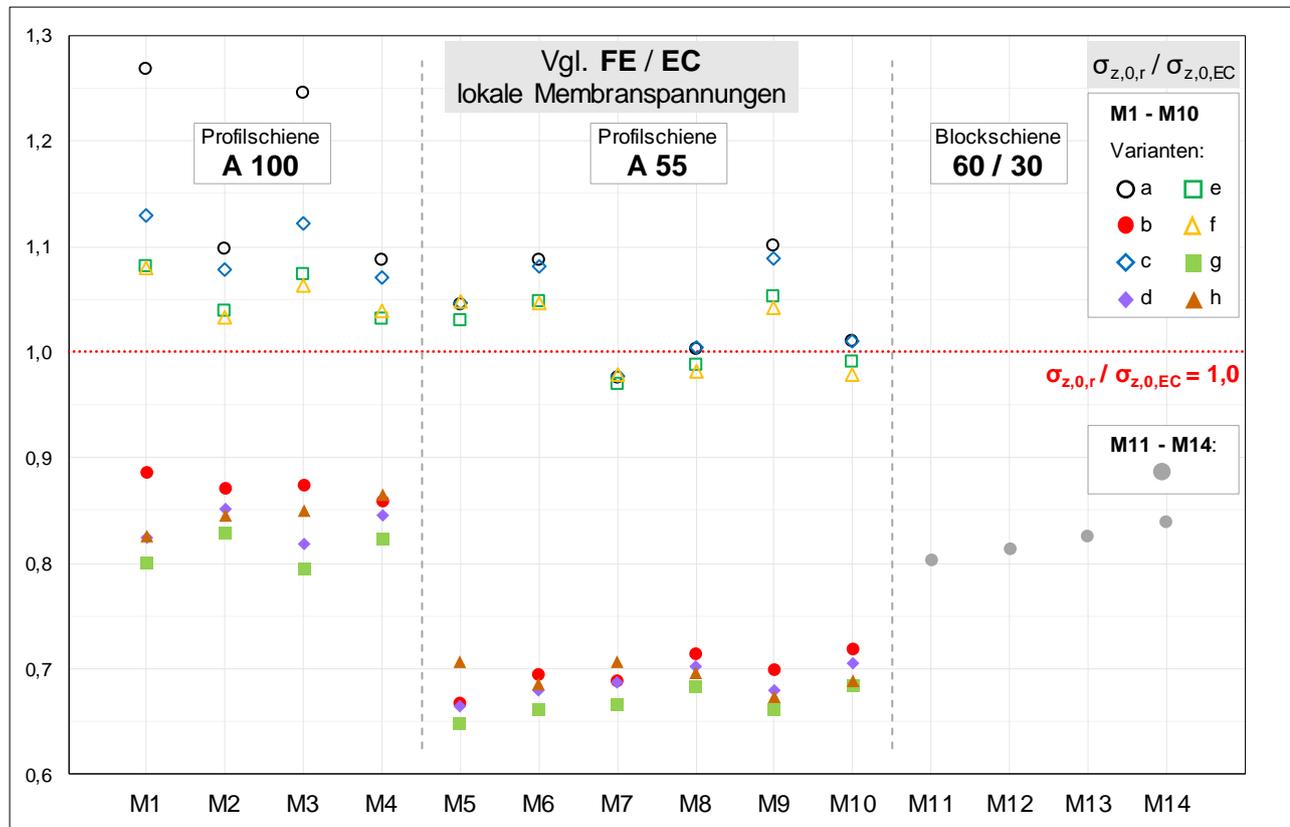


Diagramm 31: Vergleich FE - EC der lokalen Membranspannungen sämtlicher Modelle (bzw. Varianten)

Diagramm 31 bildet die Verhältnisse der lokalen Membranspannungen $\sigma_{z,0,r}$ (d. h. der rechnerischen vertikalen Spannungen in der Stegblechebene) aus der FE-Analyse zur Lösung nach Eurocode für sämtliche in der Arbeit untersuchten Modelle und deren entsprechende Varianten ab.

► Modelle mit Profilschiene A 100 - M1 bis M4

Hier fällt auf, dass die Punkte sämtliche Varianten mit starrer Lagerung der Kranschiene am Kranbahnträgerobergut (d. h. Varianten a, c, e und f, dargestellt als „leere“ Symbole) oberhalb (z. B. für M1 im Bereich von 1,08 bis 1,27) und die Varianten mit elastischer Unterlage (d. h. b, d, g und h, abgebildet als „gefüllte“ Symbole) allesamt unterhalb (z. B. für M1 im Bereich von 0,80 bis 0,89) der rot gepunkteten Linie (FE / EC = 1,0) liegen.

Der Eurocode ist demnach nicht in der Lage, die Membranspannungen der Modelle M1 bis M4 zuverlässig, auf der sicheren Seite, zu bestimmen. Nur bei den Varianten e und f (d. h. diskrete und durchgehende Klemmen ohne Spalt und mit starrer Lagerung, dargestellt als grünes Quadrat und gelbes Dreieck) kommt die analytische Lösung - vor allem bei den Modellen mit dickem Flansch (M2 und M4 mit $t_f = 40 \text{ mm}$) - in die Nähe der numerischen Resultate.

Außerdem kann festgestellt werden, dass sich bis auf die Varianten a und b (bzw. Varianten ohne Klemmen) die Spannungsfaktoren dieser beiden „Gruppen“ der Varianten mit starrer Lagerung und Varianten mit elastischer Unterlage beim Vergleich zweier Modelle untereinander gegensätzlich verhalten.

Vergleicht man beispielsweise die Modelle M1 und M2, so sind die Spannungsfaktoren der Varianten mit Klemmen und starrer Lagerung (c, e und f) bei dünnem Flansch (M1 mit $t_f = 20 \text{ mm}$) höher als die jeweiligen Varianten bei dickem Flansch (M2 mit $t_f = 40 \text{ mm}$). Bei einer zusätzlichen elastischen Unterlage (d, g und h) verhalten sich die Faktoren hingegen gegenteilig, d. h. die Verhältnisse FE / EC einer betrachteten Variante sind bei dünnem Flansch (M1) niedriger als bei dickem Flansch (M2).

Weiters wird beobachtet, dass die Ergebnisse der einzelnen Varianten bei Modellen mit dünnem Flansch (M1 und M3 mit $t_f = 20 \text{ mm}$) weiter auseinander liegen bzw. mehr streuen als die Punkte der Modelle mit dickem Flansch (M2 und M4 mit $t_f = 40 \text{ mm}$).

► *Modelle mit Profilschiene A 55 - M5 bis M10*

Bei den Modellen mit Profilschiene A 55 (M5 bis M10) zeigt sich ein ähnliches Bild wie jenes der Modelle mit Profilschiene A 100 (M1 bis M4). Die Spannungsfaktoren der Varianten mit starrer Lagerung (a, c, e und f) liegen oberhalb bzw. in der Nähe, die Ergebnisse der Varianten mit zusätzlicher elastischer Unterlage (b, d, g und h) dagegen weit unterhalb der rot gepunkteten Linie (FE / EC = 1,0).

Innerhalb eines betrachteten Modells liegen die Punkte der einzelnen Variante (bzw. der Gruppen „starr“ und „elastisch“ wie schon zuvor beobachtet) sehr nahe beieinander bzw. sind teilweise deckungsgleich.

Am besten passen die Spannungen nach Eurocode bei den starr gelagerten Varianten a, c, e und f der Modelle mit dickem Flansch (M7, M8 und M10 mit $t_f = 25 \text{ mm}$). Bei den Modellen M8 und M10 liegen die Punkte der Varianten a (starre Lagerung, schwarzer Kreis) und c (Klemmen, blaue Raute) dabei aufeinander, bei Modell M7 sind die einzelnen Varianten mit starrer Lagerung einander ebenfalls sehr nahe.

Ein gewisser Einfluss der Steghöhe kann ebenso hervorgehoben werden: Betrachtet man die Modelle mit dünnem Flansch ($t_f = 15 \text{ mm}$), d. h. M5 ($h_w = 300 \text{ mm}$), M6 ($h_w = 600 \text{ mm}$) und M9 ($h_w = 1000 \text{ mm}$), so steigen die Spannungsfaktoren mit höherem Stegblech leicht an (beim Vergleich von z. B. M5a mit M6a bzw. M5b mit M6b am deutlichsten sichtbar). Dieser Einfluss ist auch bei den Modellen mit dickem Flansch (M7, M8 und M10 mit $t_f = 25 \text{ mm}$) zu erkennen.

► *Modelle mit Blockschiene 60/30 - M11 bis M14*

Wie schon bei den lokalen vertikalen Druckspannungen sowie den Biegespannungen liegen bei den Modellen mit Blockschiene (M11 bis M14) die Spannungsfaktoren deutlich unterhalb der rot gepunkteten Linie, jedoch weniger stark gestreut bzw. enger aneinander (Verhältnisse der Spannungen aus FE zu den Spannungen aus EC liegen im Bereich von 0,80 bis 0,84).

Ebenfalls fällt wie zuvor beobachtet auf, dass sich die Punkte (grau gefüllte Kreise) mit höherem Stegblech und dickeren Gurten der rot gepunkteten Linie und damit einem Verhältnis von FE / EC von 1,0 leicht annähern.

Welcher der beiden Parameter (Steghöhe und Flanschdicke) im Vergleich der Modelle untereinander einen größeren Einfluss auf die Membranspannungen hat, kann anhand der untersuchten Modelle nicht eindeutig festgestellt werden.

6.2 Vergleich FE - EC auf Verdrehungsebene

Die einzelnen Punkte bzw. Symbole entsprechen hierbei den auf der Ordinate aufgetragenen Verdrehungsfaktoren ($\varphi_{v1}/\varphi_{EC}$ und $\varphi_{v2}/\varphi_{EC}$) aller Varianten (a bis h) des jeweiligen auf der Abszisse abgebildeten Modells (M1 bis M14). Die rot gepunktete horizontale Linie repräsentiert einen Faktor von FE / EC von 1,0 und damit eine vollständige Übereinstimmung der analytischen mit der numerischen Lösung.

6.2.1 Vergleich der Verdrehung des Obergurtes

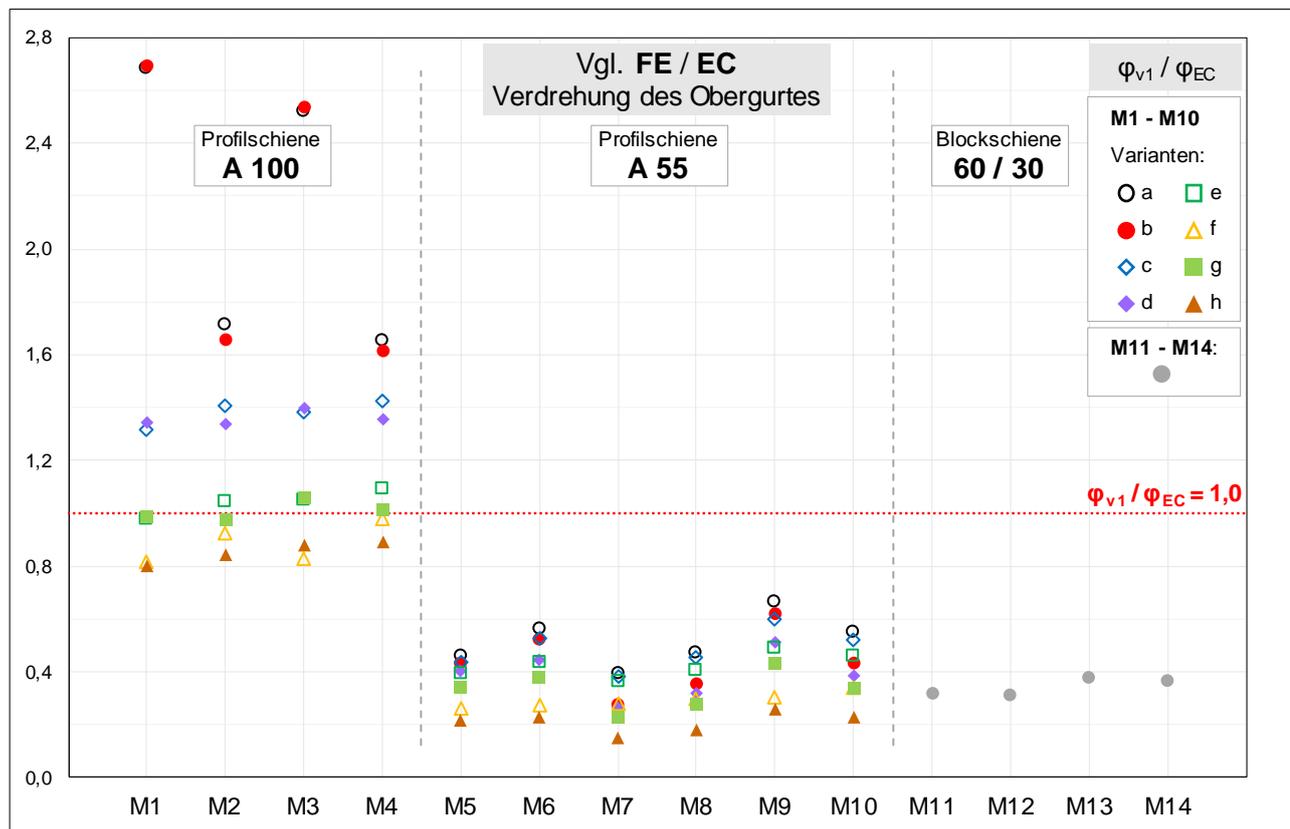


Diagramm 32: Vergleich FE - EC der maximalen Verdrehungen des Obergurtes sämtlicher Modelle (bzw. Varianten)

Diagramm 32 stellt die Verhältnisse der maximalen Verdrehungen des Obergurtes φ_{v1} aus der FE-Analyse zur Lösung nach Eurocode für sämtliche in der Arbeit untersuchten Modelle und deren entsprechende Varianten dar.

► Modelle mit Profilschiene A 100 - M1 bis M4

Bei den Modellen mit Profilschiene A 100 (M1 bis M4) sind vor allem die Varianten e (diskrete Klemmen ohne Spalt, als grünes Quadrat abgebildet) und g (diskrete Klemmen ohne Spalt und mit zusätzlicher elastischer Unterlage, dargestellt durch hellgrün gefülltes Quadrat) nahe der rot gepunkteten Linie und damit dem Verhältnis FE / EC von 1,0.

Auch die Varianten mit durchgehender Klemmung - d. h. die Varianten f (mit starrer Lagerung, gelbes Dreieck) und h (mit elastischer Unterlage, braun gefülltes Dreieck) liegen vergleichsweise nahe an der EC-Lösung.

Die restlichen Varianten (a, b, c, d) liegen teilweise weit oberhalb der rot gepunkteten Linie, was bedeutet, dass die Verdrehungen nach EC viel zu klein sind. Im Speziellen die Varianten a (starre Lagerung, schwarzer Kreis) und b (elastische Unterlage, rot gefüllter Kreis) der Modelle mit dünnem

Flansch (M1 und M3 mit $t_f = 20 \text{ mm}$) sind als „Ausreißer“ zu betrachten, d. h. die Punkte liegen weit entfernt (im Bereich von 2,54 bis 2,68) von den übrigen Faktoren.

Beim Vergleich dieser Varianten a und b der Modelle M1 und M3 mit M2 und M4 kann - wie schon bei der Betrachtung der lokalen vertikalen Druckspannungen (siehe Diagramm 29) - der Einfluss der Gurtstärke hervorgehoben werden. So ergeben sich für die Modelle mit dünnem Flansch (M1 und M3 mit $t_f = 20 \text{ mm}$) sehr viel höhere Verhältnisse FE / EC als für die Modelle mit dickem Flansch (M2 und M4 mit $t_f = 40 \text{ mm}$).

► *Modelle mit Profilschiene A 55 - M5 bis M10*

Die Verdrehungsfaktoren der Modelle mit Profilschiene A 55 (M5 bis M10) liegen allesamt weit unterhalb der rot gepunkteten Linie, womit die Verdrehung nach Eurocode für diese Konfigurationen keine brauchbaren Ergebnisse liefert.

Interessant ist dabei, dass beim Vergleich von jeweils zwei Modellen mit gleicher Steghöhe (z. B. M5 und M7 mit $h_w = 300 \text{ mm}$) die Faktoren bei den Modellen mit dünnem Flansch (M5 mit $t_f = 15 \text{ mm}$) etwas höher sind als jene der Modelle mit dickem Flansch (M7 mit $t_f = 25 \text{ mm}$).

Weiters ist auffallend, dass die Verhältnisse der Variante f (d. h. durchgehende Klemmung bei starrer Lagerung, abgebildet als gelbes Dreieck) bei allen Modellen M5 bis M10 ungefähr im selben Bereich liegen (zwischen 0,26 und 0,34) und weniger streuen als beispielsweise die Variante b (elastische Unterlage, rot gefüllter Kreis, Werte von 0,28 bis 0,62).

► *Modelle mit Blockschiene 60/30 - M11 bis M14*

Auch bei den Modellen mit Blockschiene 60/30 (M11 bis M14) liegen die Verdrehungsfaktoren weit unterhalb der rot gepunkteten Linie (im Bereich von 0,31 bis 0,37). Demnach ist die mittels EC-Modell berechnete Verdrehung hier ebenfalls unbrauchbar (da sie die maximalen Verdrehungen am Lasteinleitungspunkt massiv überschätzt).

Es kann festgestellt werden, dass die Verhältnisse der FE-Verdrehung zur EC-Lösung mit höherem Stegblech minimal abnehmen, beispielsweise beim Vergleich von M11 (mit $h_w = 300 \text{ mm}$, Faktor FE / EC = 0,32) und M12 (mit $h_w = 600 \text{ mm}$, Faktor FE / EC = 0,31).

Der Einfluss der Flanschdicke ist dagegen besser sichtbar, so etwa ist der Verdrehungsfaktor beim Modell M11 (dünner Flansch mit $t_f = 15 \text{ mm}$, Faktor FE / EC = 0,32) deutlich kleiner als jener des Modells M13 (dicker Flansch mit $t_f = 25 \text{ mm}$, Faktor FE / EC = 0,38).

6.2.2 Vergleich der Verdrehung der Stegoberkante

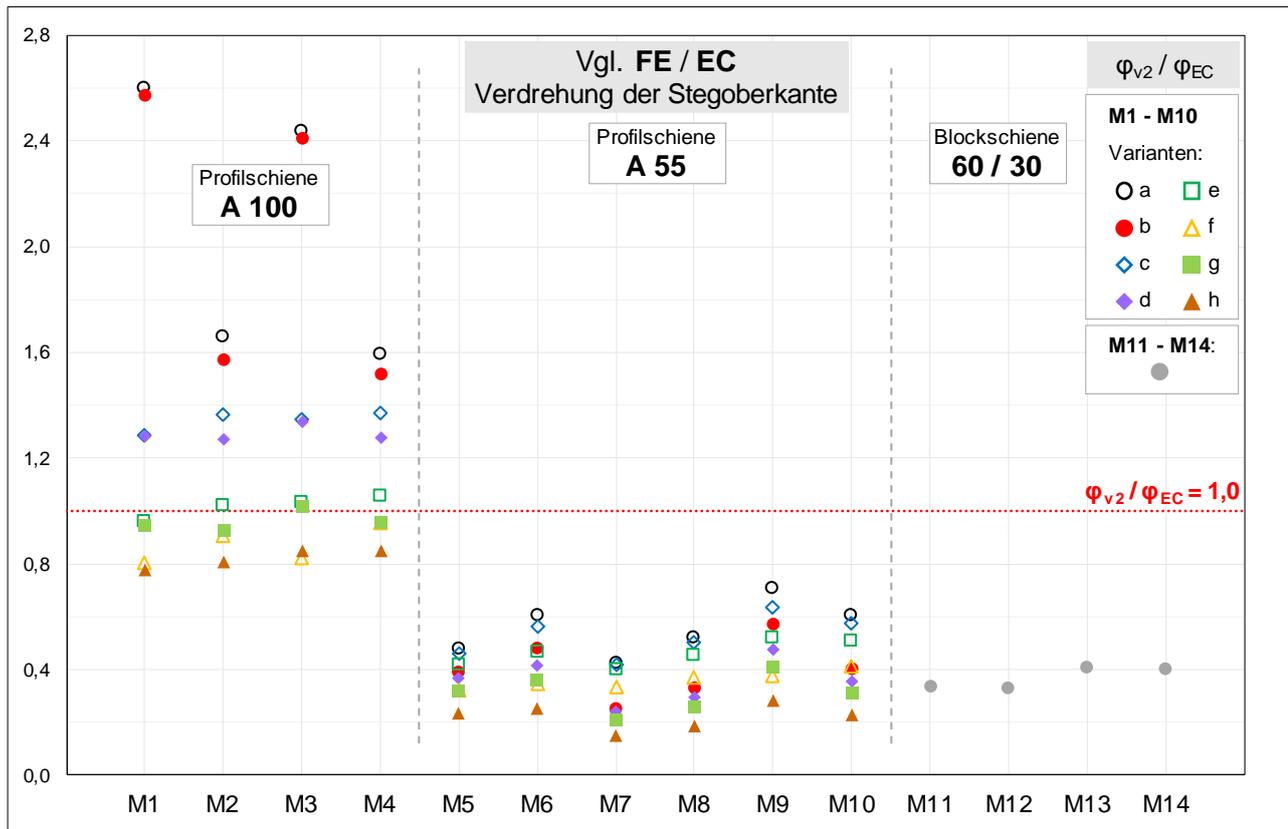


Diagramm 33: Vergleich FE - EC der maximalen Verdrehungen der Stegoberkante sämtlicher Modelle (bzw. Varianten)

In Diagramm 33 sind die Verhältnisse der maximalen Verdrehungen der Stegoberkante φ_{v2} aus der FE-Analyse zur Lösung nach Eurocode für sämtliche in der Arbeit untersuchten Modelle und deren entsprechende Varianten abgebildet.

Da diese Darstellung der Verdrehungsfaktoren qualitativ dem Diagramm 32 entspricht und die Unterschiede zwischen φ_{v1} und φ_{v2} (d. h. Verdrehung des Obergurtes und der Stegoberkante) bei allen Modellen und den entsprechenden Varianten in etwa gleich groß sind, wird an dieser Stelle auf eine detailliertere Beschreibung des Diagramm 33 verzichtet und auf Abschnitt 6.2.1 verwiesen.

7 Diskussion und Ausblick

In dieser Arbeit wurden im Rahmen einer Parameterstudie die lokalen vertikalen Spannungen im Stegblech von Kranbahnträgern unter Einwirkung einer seitlich exzentrischen Radlast untersucht.

Im Detail wurden dabei die Membranspannungen zufolge zentrischem Lastanteil $\sigma_{oz,Ed}$ sowie die durch Torsion des Obergurts hervorgerufenen Biegespannungen $\sigma_{T,Ed}$ einerseits analytisch (d. h. nach aktuell im Eurocode 3, Teil 6 (Version 2010) verankertem Rechenmodell) und andererseits numerisch (d. h. im Zuge einer Finite Elemente-Analyse) berechnet.

Im anschließenden Vergleich der Resultate (auf Spannungs- und Verdrehungsbasis) wurden die verschiedenen betrachteten Varianten der Lagerung und Befestigung der Kranschiene auf dem Obergurt des Kranbahnträgers gegenübergestellt. Außerdem wurden jeweils mehrere Kranschiementypen untersucht und die Ergebnisse der Modelle mit unterschiedlichen Querschnitten (bzw. Trägergeometrien) verglichen.

Ein Ziel dieser Untersuchungen war es, die Einflüsse der Lagerung (starre Lagerung oder elastische Unterlage) bzw. Befestigung der Schiene (mit oder ohne Klemmen und diskrete oder durchgehende Klemmen, jeweils mit und ohne Spalt) sowie der geometrischen Parameter (Steghöhe h_w und Flanschdicke t_f) auf die Ergebnisse hervorzuheben.

Weiters sollten die im Eurocode bereitgestellten Formeln (bzw. die dahintersteckenden Rechenmodelle) auf ihre Treffsicherheit bei verschiedenen Konfigurationen überprüft werden.

Im Hinblick auf die Ergebnisse dieser Arbeit ist der Verfasser der Meinung, dass eine Anpassung der aktuell im Eurocode (Version 2010) verankerten Formeln an den heutigen Stand der Technik sinnvoll ist bzw. notwendig sein wird. Vor allem die bei einigen untersuchten Modellen auftretenden „Ausreißer“, d. h. Konfigurationen, bei denen der Eurocode weit daneben liegt, machen weitere Untersuchungen der Thematik unabdingbar.

Bezüglich der Lagerung und Befestigung der Kranschiene am Flansch wurde festgestellt, dass die im Eurocode berücksichtigten Fälle für zutreffende Ergebnisse nicht ausreichend sind. Im Speziellen die Klemmwirkung der untersuchten Varianten mit diskreten bzw. durchgehenden Schienenklemmen sowie die Kombination dieser mit einer zusätzlichen elastischen Schienenunterlage sollten rechnerisch zutreffender erfasst werden (da dieser Fall heutzutage auch häufig in der Praxis zu finden ist).

Literatur

- [1] ÖNORM EN 1993-6 (2010) *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 6: Kranbahnen*. CEN, Brüssel
- [2] Kettler, M.; Unterweger, H.; Ebner, D. (2020) *Lokale Spannungen in Kranbahnträgern mit Längssteifen. Experimentelle und numerische Untersuchungen*. in: Stahlbau 90, Heft 4, S. 248 - 261
- [3] ÖNORM B 1993-6 (2008) *Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 6: Kranbahnen - Nationaler Anhang*. ON, Wien
- [4] Oxford, J. (1963) *Zur Beanspruchung der Obergurte vollwandiger Kranbahnträger durch Torsionsmomente und durch Querkraftbiegung unter dem örtlichen Radlastangriff*. in: Der Stahlbau 32, Heft 12, S. 360 - 367
- [5] Oxford, J. (1981) *Zur Biegebeanspruchung des Stegblechanschlusses infolge exzentrischer Radlasten auf dem Obergurt von Kranbahnträgern*. in: Der Stahlbau 50, Heft 7, S. 215 - 217
- [6] Kettler, M.; Kamleitner, A.; Novak, F.; Mandl, A.; Unterweger, H. (2017) *Local stresses in webs of crane runway girders: Tests and numerical calculations*. in: Journal of Constructional Steel Research 139, S. 188 - 201
- [7] Kraus, M.; Mämpel, S. (2017) *Kennwerte neuer und abgenutzter Kranschiene für die Bemessung von Kranbahnträgern*. in: Stahlbau 86, Heft 1, S. 36 - 44

Software

- [8] Abaqus/CAE 2017, © Dassault Systèmes, 2016

Anhang

A	Profilschiene A 100 / Modelle M1 - M4	A-1
A.1	Modell M2 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-2
A.1.1	Vergleich M2a / M2b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-2
A.1.2	Vergleich M2a / M2c ► Einfluss der Klemmen.....	A-3
A.1.3	Vergleich M2b / M2d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-4
A.1.4	Vergleich M2c / M2e / M2f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-5
A.1.5	Vergleich M2d / M2g / M2h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage.....	A-6
A.2	Modell M2 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-7
A.2.1	Vergleich M2a / M2b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-7
A.2.2	Vergleich M2a / M2c ► Einfluss der Klemmen.....	A-7
A.2.3	Vergleich M2b / M2d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-8
A.2.4	Vergleich M2c / M2e / M2f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-8
A.2.5	Vergleich M2d / M2g / M2h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage.....	A-9
A.3	Modell M3 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-10
A.3.1	Vergleich M3a / M3b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-10
A.3.2	Vergleich M3a / M3c ► Einfluss der Klemmen.....	A-11
A.3.3	Vergleich M3b / M3d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-12
A.3.4	Vergleich M3c / M3e / M3f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-13
A.3.5	Vergleich M3d / M3g / M3h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-14
A.4	Modell M3 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-15
A.4.1	Vergleich M3a / M3b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-15
A.4.2	Vergleich M3a / M3c ► Einfluss der Klemmen.....	A-15
A.4.3	Vergleich M3b / M3d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-16
A.4.4	Vergleich M3c / M3e / M3f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-16
A.4.5	Vergleich M3d / M3g / M3h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-17
A.5	Modell M4 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-18
A.5.1	Vergleich M4a / M4b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-18
A.5.2	Vergleich M4a / M4c ► Einfluss der Klemmen.....	A-19
A.5.3	Vergleich M4b / M4d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-20
A.5.4	Vergleich M4c / M4e / M4f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-21
A.5.5	Vergleich M4d / M4g / M4h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-22
A.6	Modell M4 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-23
A.6.1	Vergleich M4a / M4b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-23
A.6.2	Vergleich M4a / M4c ► Einfluss der Klemmen.....	A-23
A.6.3	Vergleich M4b / M4d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-24
A.6.4	Vergleich M4c / M4e / M4f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-24

A.6.5	Vergleich M4d / M4g / M4h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-25
B	Profilschiene A 55 / Modelle M5 - M10	A-26
B.1	Modell M5 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-27
B.1.1	Vergleich M5a / M5b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-27
B.1.2	Vergleich M5a / M5c ► Einfluss der Klemmen.....	A-28
B.1.3	Vergleich M5b / M5d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-29
B.1.4	Vergleich M5c / M5e / M5f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-30
B.1.5	Vergleich M5d / M5g / M5h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-31
B.2	Modell M5 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-32
B.2.1	Vergleich M5a / M5b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-32
B.2.2	Vergleich M5a / M5c ► Einfluss der Klemmen.....	A-32
B.2.3	Vergleich M5b / M5d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-33
B.2.4	Vergleich M5c / M5e / M5f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-33
B.2.5	Vergleich M5d / M5g / M5h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-34
B.3	Modell M6 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-35
B.3.1	Vergleich M6a / M6b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-35
B.3.2	Vergleich M6a / M6c ► Einfluss der Klemmen.....	A-36
B.3.3	Vergleich M6b / M6d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-37
B.3.4	Vergleich M6c / M6e / M6f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-38
B.3.5	Vergleich M6d / M6g / M6h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-39
B.4	Modell M6 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-40
B.4.1	Vergleich M6a / M6b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-40
B.4.2	Vergleich M6a / M6c ► Einfluss der Klemmen.....	A-40
B.4.3	Vergleich M6b / M6d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-41
B.4.4	Vergleich M6c / M6e / M6f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-41
B.4.5	Vergleich M6d / M6g / M6h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-42
B.5	Modell M7 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-43
B.5.1	Vergleich M7a / M7b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-43
B.5.2	Vergleich M7a / M7c ► Einfluss der Klemmen.....	A-44
B.5.3	Vergleich M7b / M7d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-45
B.5.4	Vergleich M7c / M7e / M7f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-46
B.5.5	Vergleich M7d / M7g / M7h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-47
B.6	Modell M7 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-48
B.6.1	Vergleich M7a / M7b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-48
B.6.2	Vergleich M7a / M7c ► Einfluss der Klemmen.....	A-48
B.6.3	Vergleich M7b / M7d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-49
B.6.4	Vergleich M7c / M7e / M7f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-49
B.6.5	Vergleich M7d / M7g / M7h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-50

B.7	Modell M8 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-51
B.7.1	Vergleich M8a / M8b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-51
B.7.2	Vergleich M8a / M8c ► Einfluss der Klemmen.....	A-52
B.7.3	Vergleich M8b / M8d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-53
B.7.4	Vergleich M8c / M8e / M8f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-54
B.7.5	Vergleich M8d / M8g / M8h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-55
B.8	Modell M8 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-56
B.8.1	Vergleich M8a / M8b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-56
B.8.2	Vergleich M8a / M8c ► Einfluss der Klemmen.....	A-56
B.8.3	Vergleich M8b / M8d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-57
B.8.4	Vergleich M8c / M8e / M8f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-57
B.8.5	Vergleich M8d / M8g / M8h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-58
B.9	Modell M9 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-59
B.9.1	Vergleich M9a / M9b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-59
B.9.2	Vergleich M9a / M9c ► Einfluss der Klemmen.....	A-60
B.9.3	Vergleich M9b / M9d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-61
B.9.4	Vergleich M9c / M9e / M9f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-62
B.9.5	Vergleich M9d / M9g / M9h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-63
B.10	Modell M9 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-64
B.10.1	Vergleich M9a / M9b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-64
B.10.2	Vergleich M9a / M9c ► Einfluss der Klemmen.....	A-64
B.10.3	Vergleich M9b / M9d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage.....	A-65
B.10.4	Vergleich M9c / M9e / M9f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-65
B.10.5	Vergleich M9d / M9g / M9h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage....	A-66
B.11	Modell M10 / Vergleiche auf Spannungsebene	A-67
B.11.1	Vergleich M10a / M10b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-67
B.11.2	Vergleich M10a / M10c ► Einfluss der Klemmen.....	A-68
B.11.3	Vergleich M10b / M10d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage	A-69
B.11.4	Vergleich M10c / M10e / M10f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-70
B.11.5	Vergleich M10d / M10g / M10h ► Klemmen ohne Spalt, mit elast. Unterlage	A-71
B.12	Modell M10 / Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-72
B.12.1	Vergleich M10a / M10b ► Einfluss der elastischen Unterlage.....	A-72
B.12.2	Vergleich M10a / M10c ► Einfluss der Klemmen.....	A-72
B.12.3	Vergleich M10b / M10d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage	A-73
B.12.4	Vergleich M10c / M10e / M10f ► Klemmen ohne Spalt.....	A-73
B.12.5	Vergleich M10d / M10g / M10h ► Klemmen ohne Spalt, mit elast. Unterlage	A-74
C	Blockschiene 60/30 / Modelle M11 - M14	A-75
C.1	Vergleiche auf Spannungsebene	A-76

C.1.1	Vergleich M12 / M14 ► Einfluss der Flanschdicke	A-76
C.1.2	Vergleich M13 / M14 ► Einfluss der Steghöhe	A-77
C.2	Vergleiche auf Verdrehungsebene	A-78
C.2.1	Vergleich M12 / M14 ► Einfluss der Flanschdicke	A-78
C.2.2	Vergleich M13 / M14 ► Einfluss der Steghöhe	A-78

A Profilschiene A 100 / Modelle M1 - M4

In Anhang A werden die Spannungs- und Verdrehungsverläufe der Modelle M2 bis M4 mittels Diagrammen dargestellt, die im Hauptteil der Arbeit nicht abgebildet sind (Diagramme des Modells M1 siehe Kap. 5).

Die folgenden Diagramme zeigen einerseits die Verläufe der lokalen vertikalen Druck- bzw. Biegespannungen, wobei jeweils zwei oder drei Varianten des betrachteten Modells verglichen werden.

Andererseits sind in den Diagrammen die Verläufe der Verdrehung des Obergurts bzw. der Stegoberkante abgebildet, auch hier werden immer Vergleiche zwischen zwei oder drei Varianten betrachtet.

Wie in Kap. 5 beschrieben, können damit Einflüsse der elastischen Unterlage, der Schienenklemmen bzw. der Klemmen mit elastischer Unterlage hervorgehoben werden.

A.1 Modell M2 / Vergleiche auf Spannungsebene

A.1.1 Vergleich M2a / M2b ► Einfluss der elastischen Unterlage

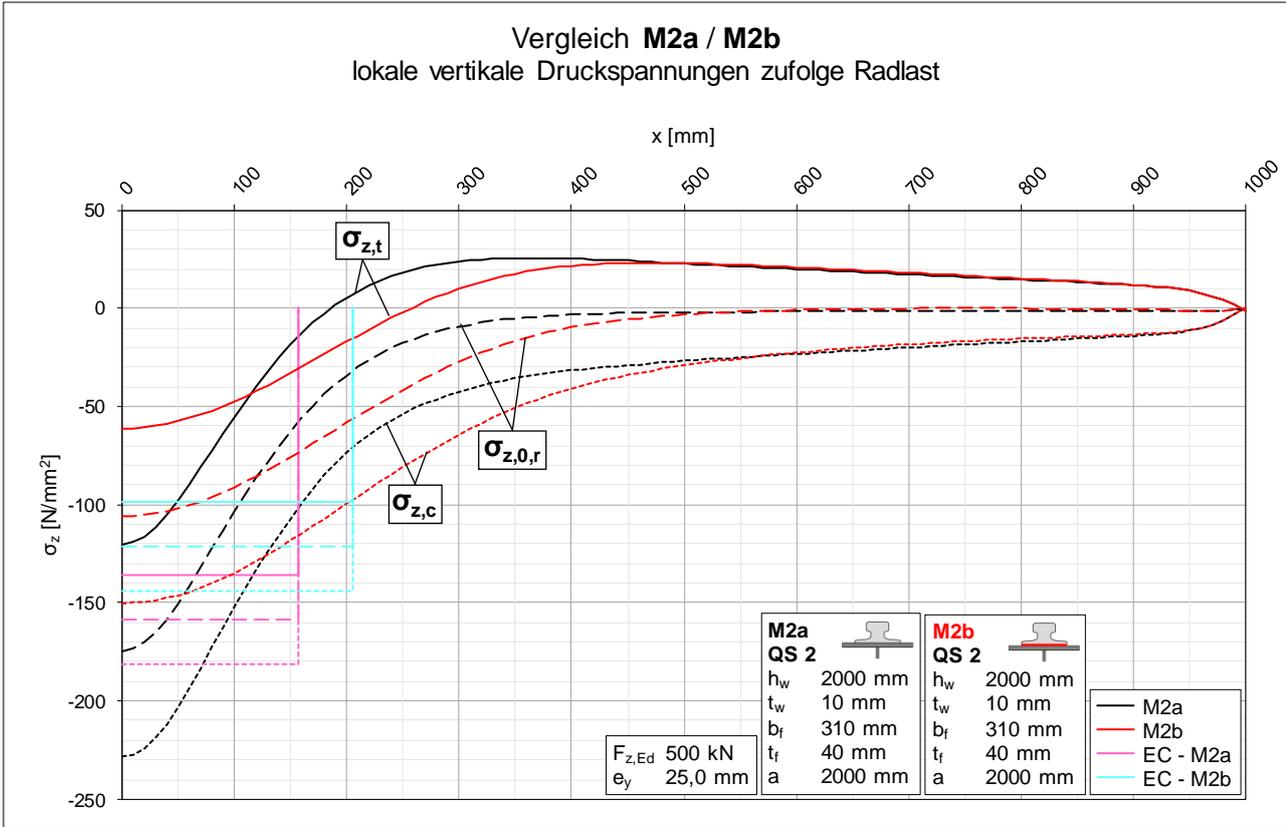


Diagramm 34: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M2

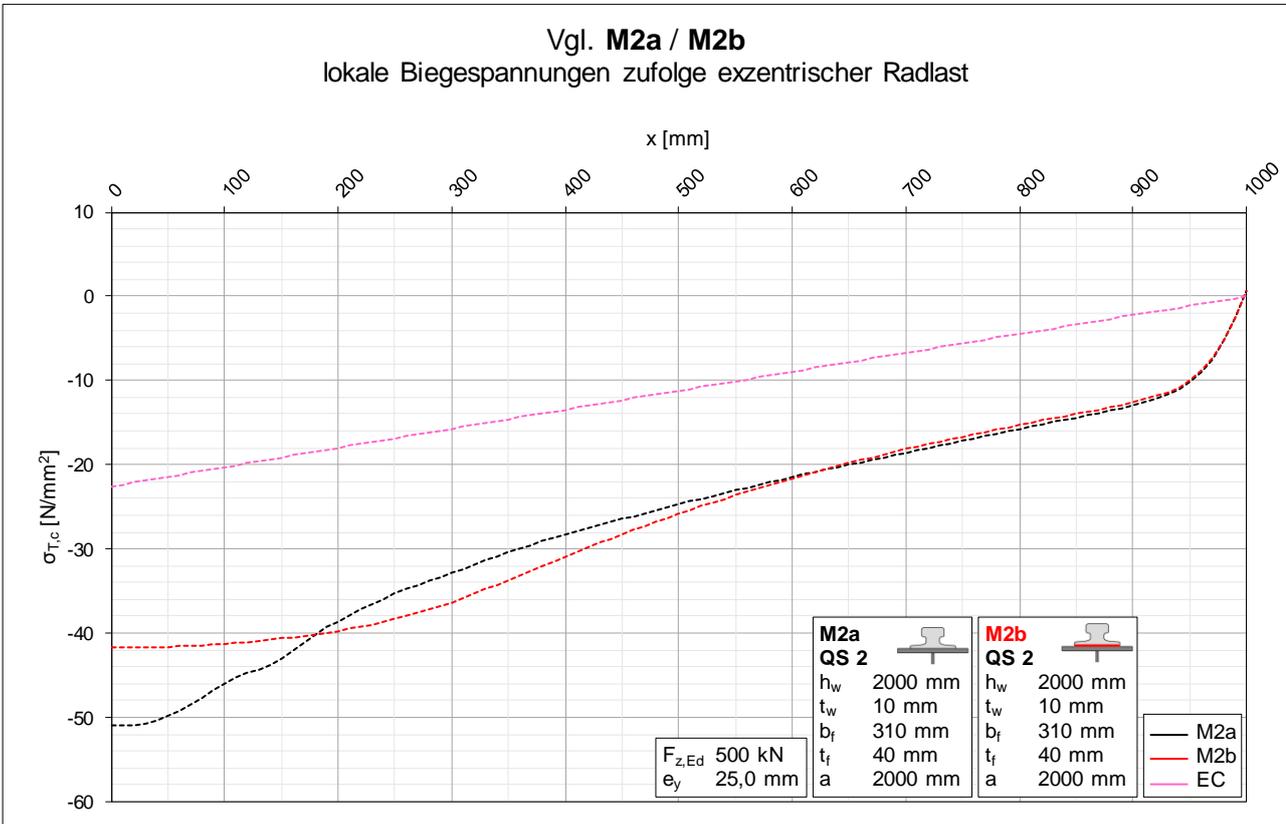


Diagramm 35: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M2

A.1.2 Vergleich M2a / M2c ► Einfluss der Klemmen

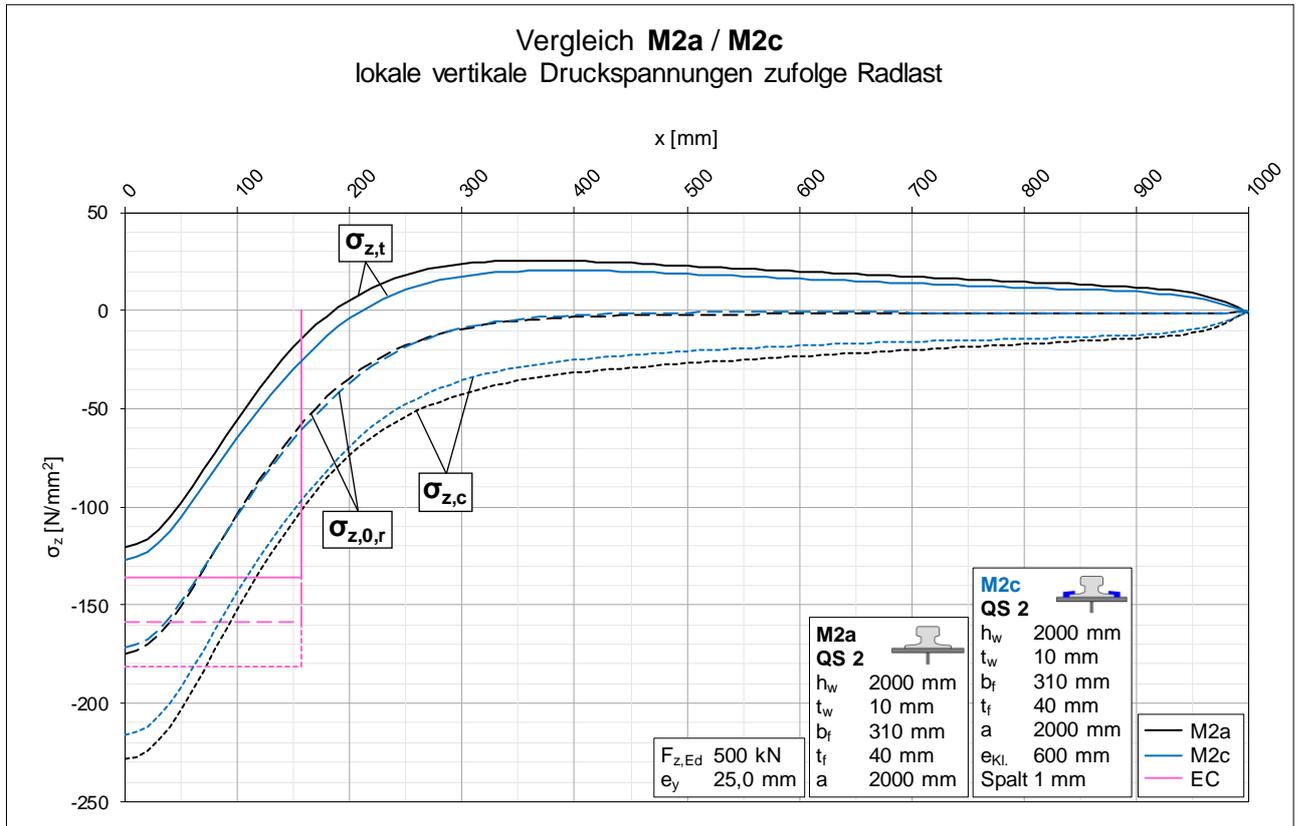


Diagramm 36: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M2

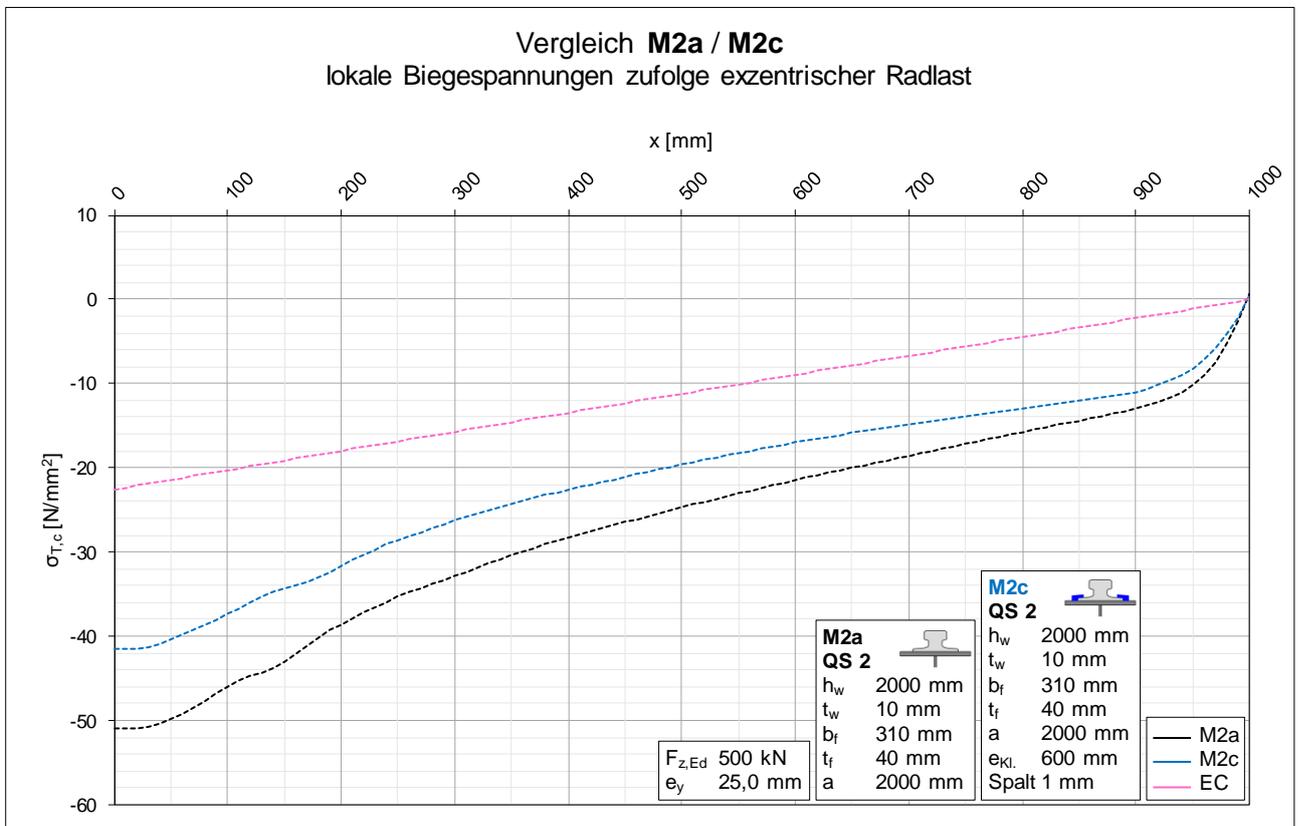


Diagramm 37: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M2

A.1.3 Vergleich M2b / M2d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

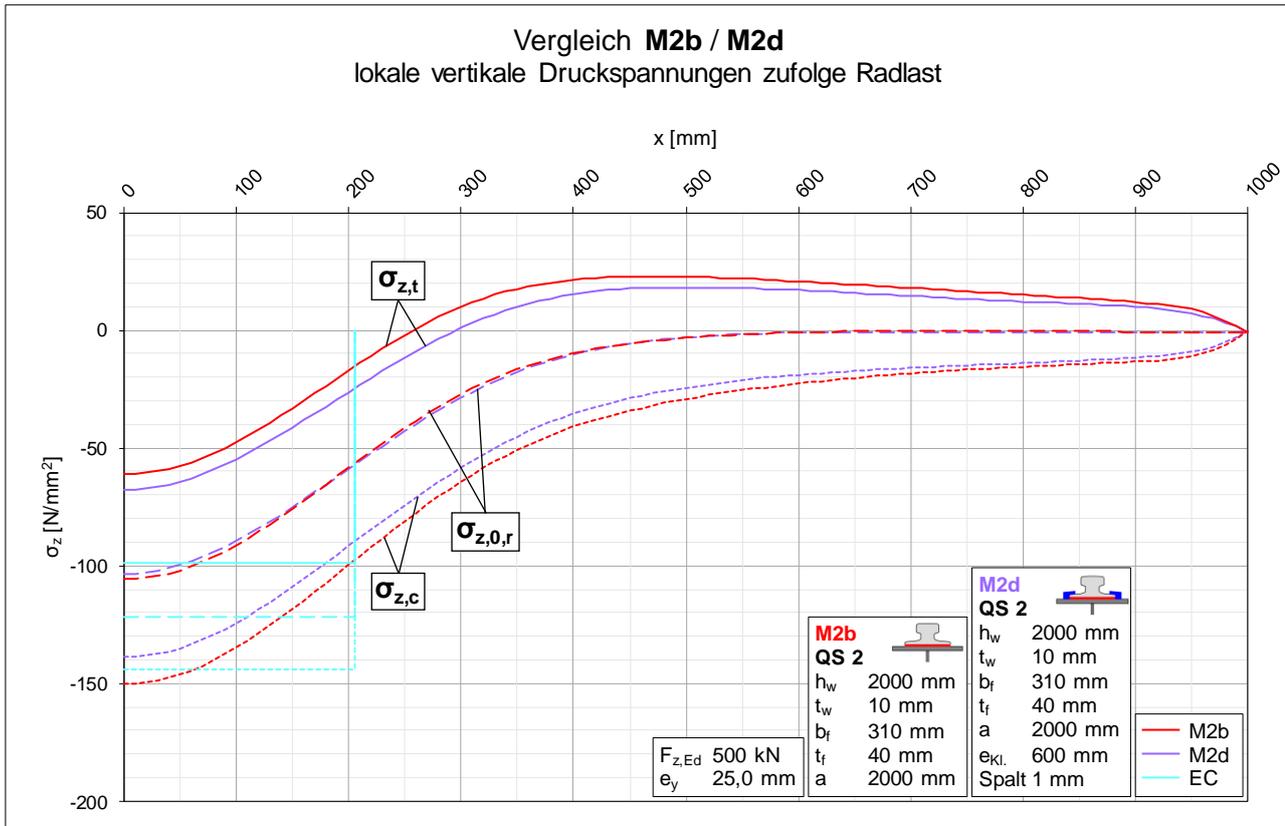


Diagramm 38: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M2

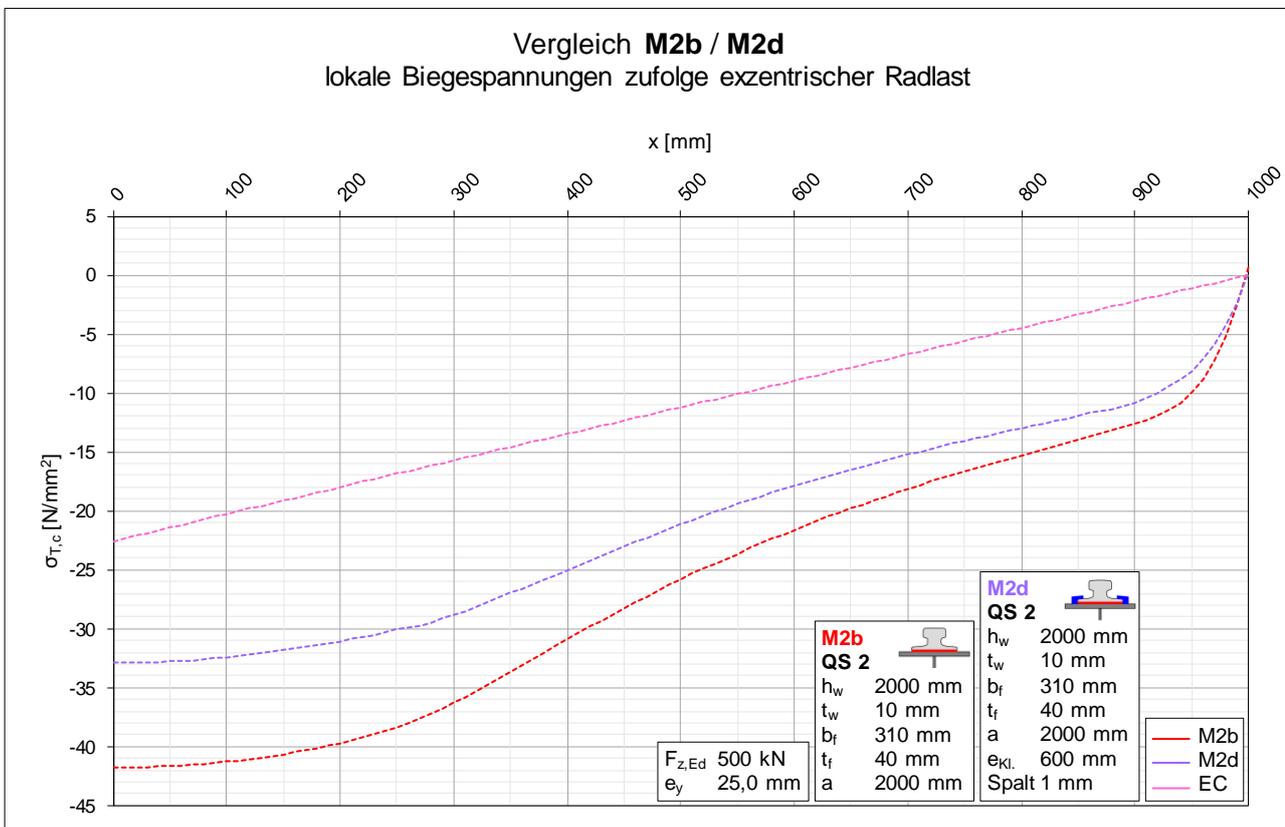


Diagramm 39: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M2

A.1.4 Vergleich M2c / M2e / M2f ► Klemmen ohne Spalt

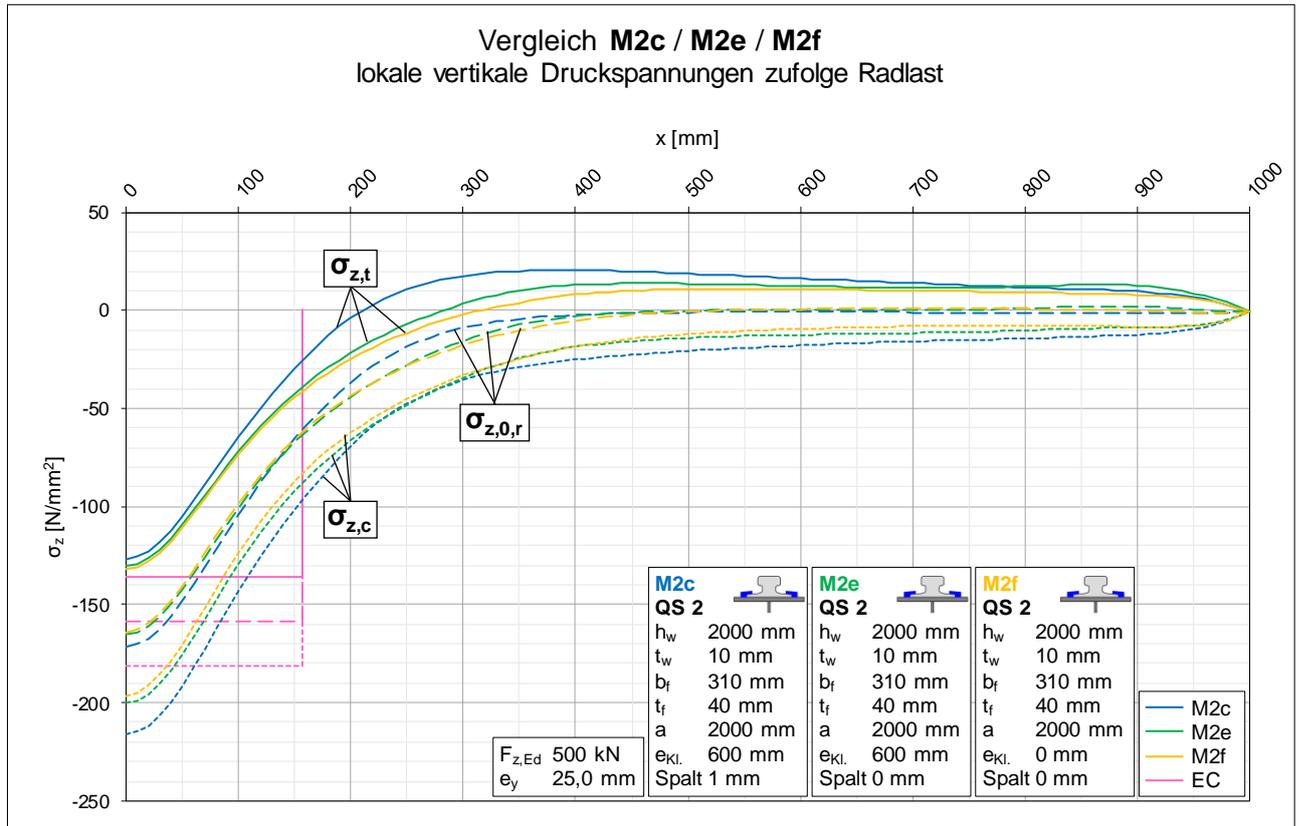


Diagramm 40: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M2

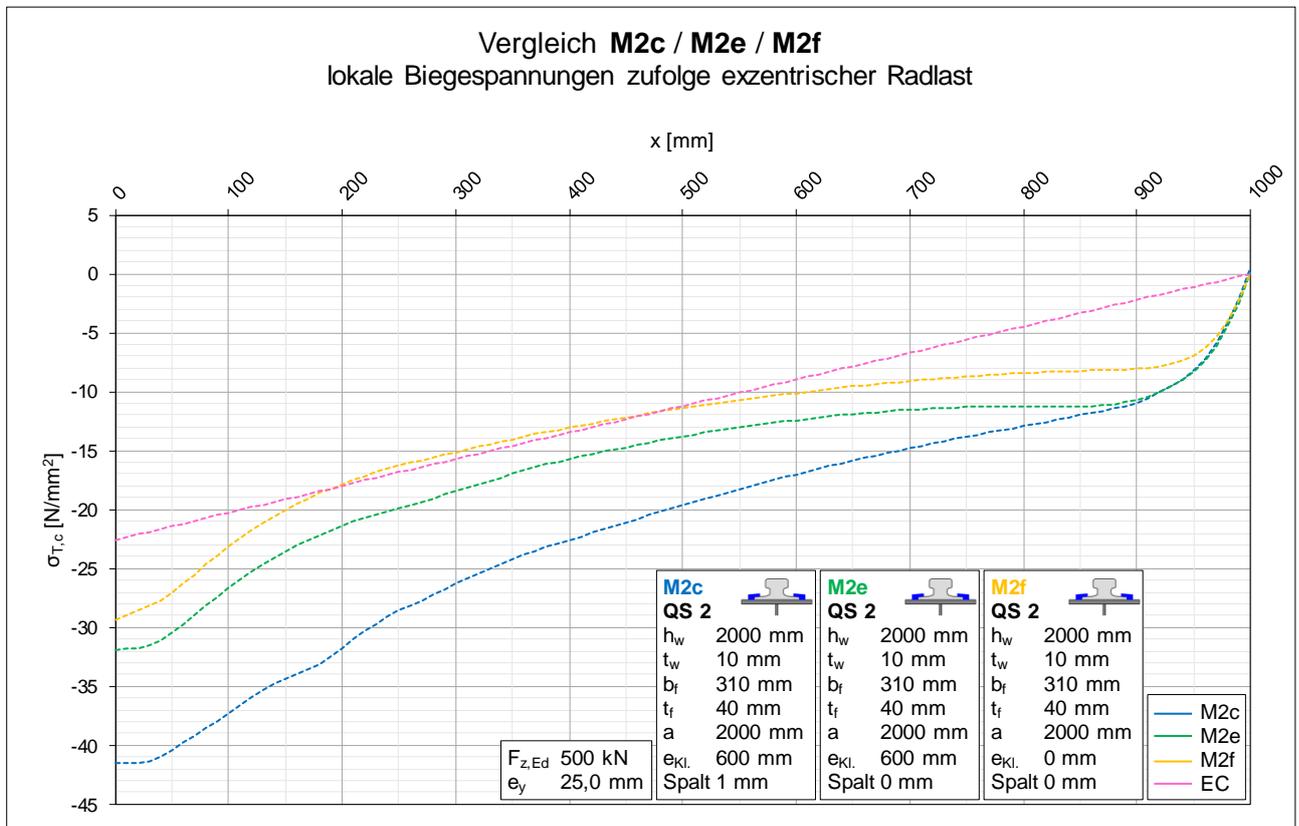


Diagramm 41: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M2

A.1.5 Vergleich M2d / M2g / M2h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

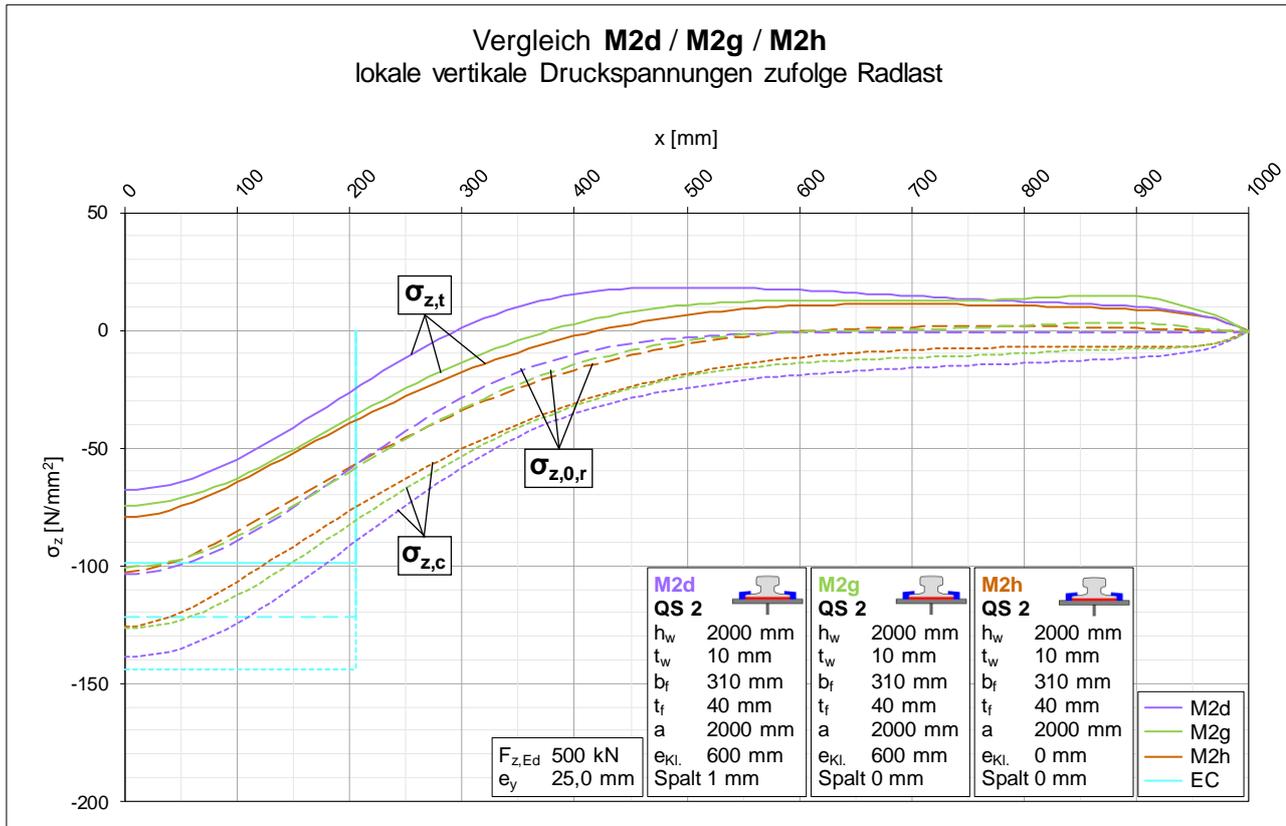


Diagramm 42: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M2

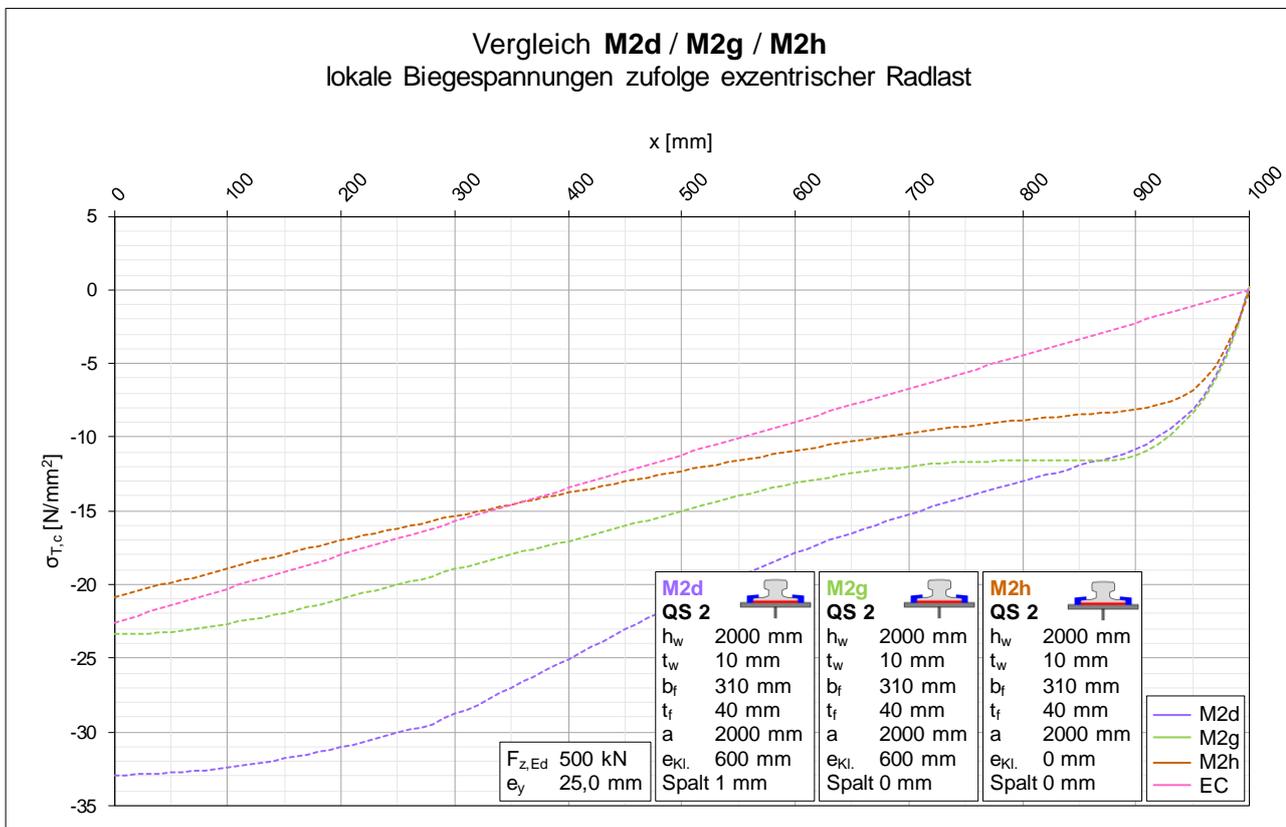


Diagramm 43: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M2

A.2 Modell M2 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

A.2.1 Vergleich M2a / M2b ► Einfluss der elastischen Unterlage

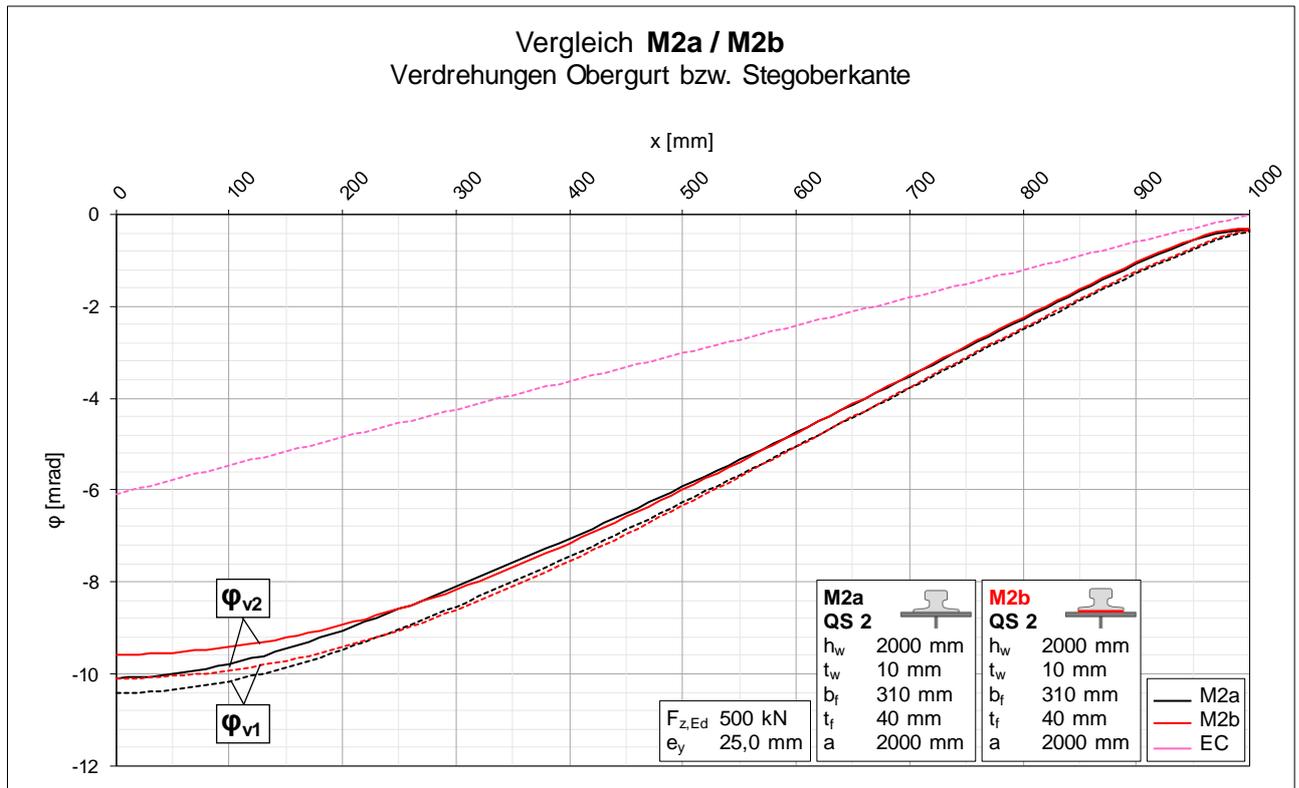


Diagramm 44: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M2

A.2.2 Vergleich M2a / M2c ► Einfluss der Klemmen

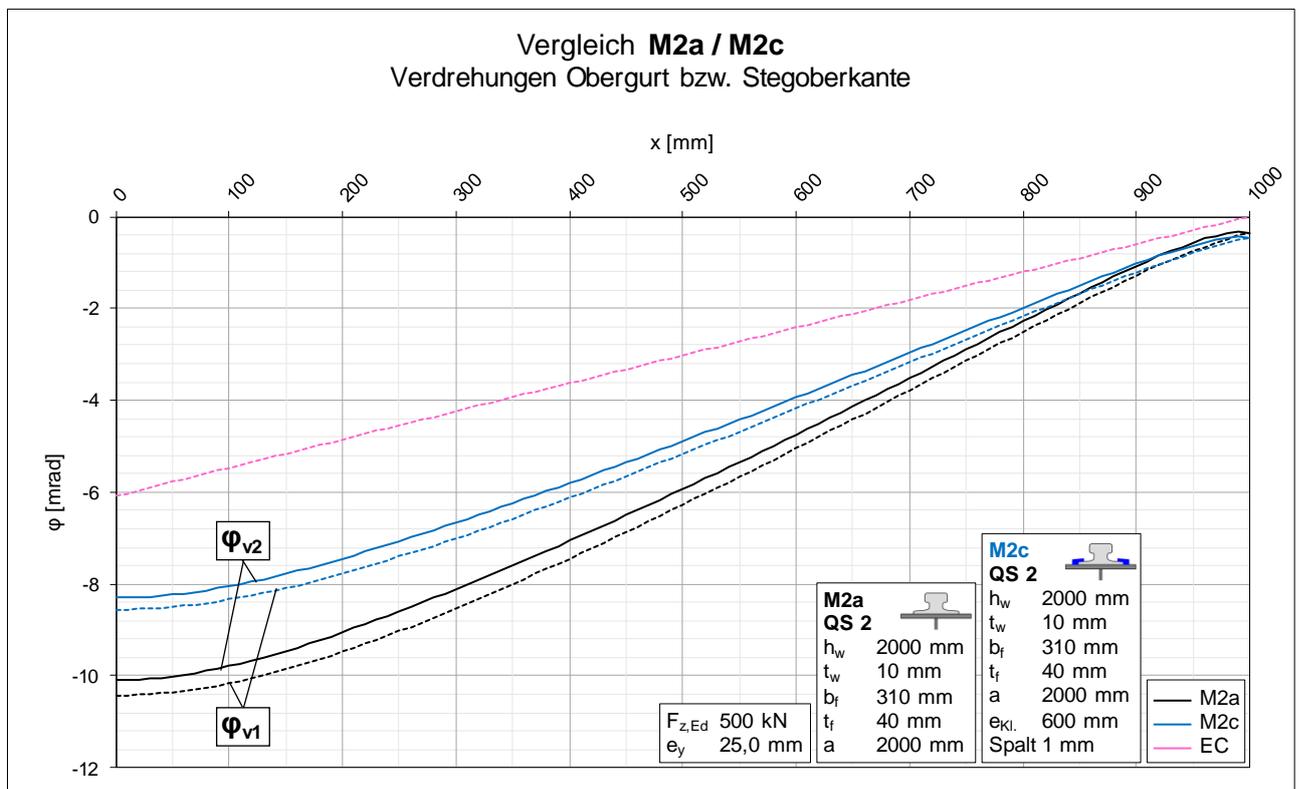


Diagramm 45: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M2

A.2.3 Vergleich M2b / M2d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

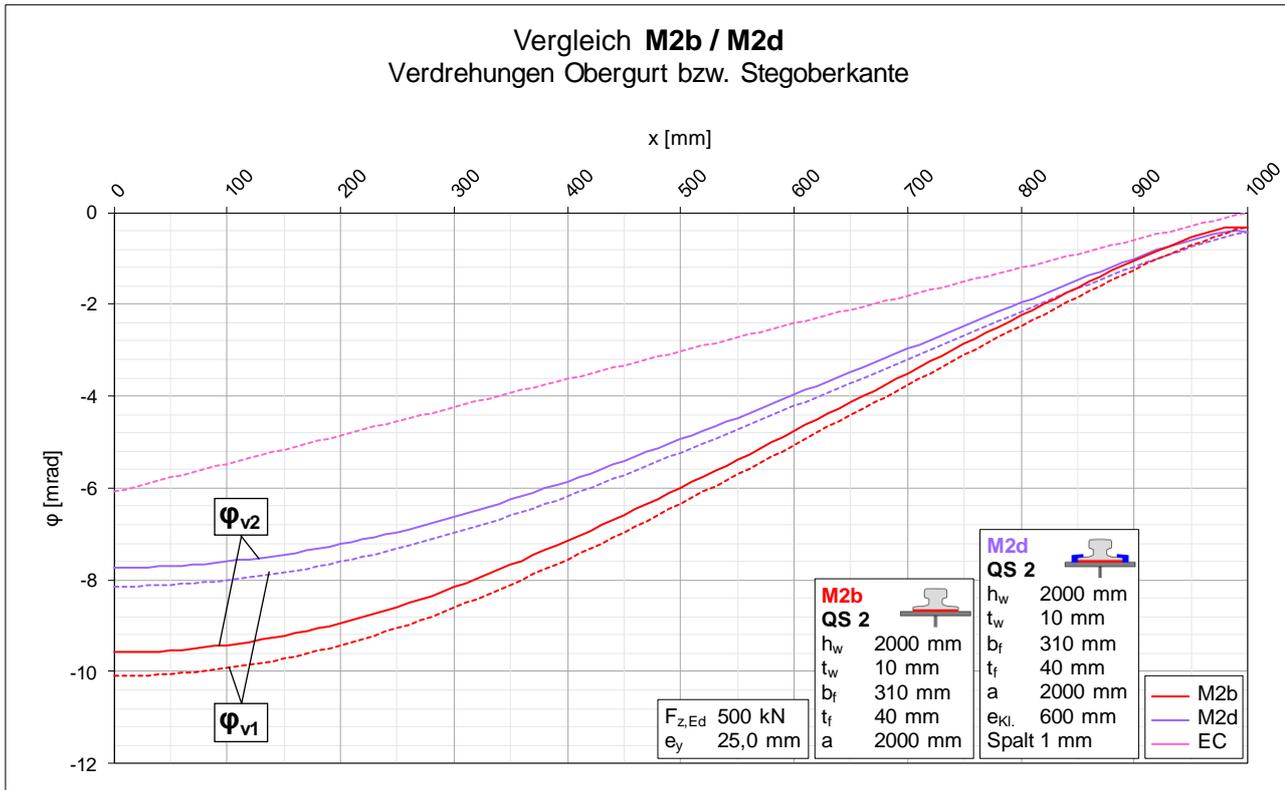


Diagramm 46: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M2

A.2.4 Vergleich M2c / M2e / M2f ► Klemmen ohne Spalt

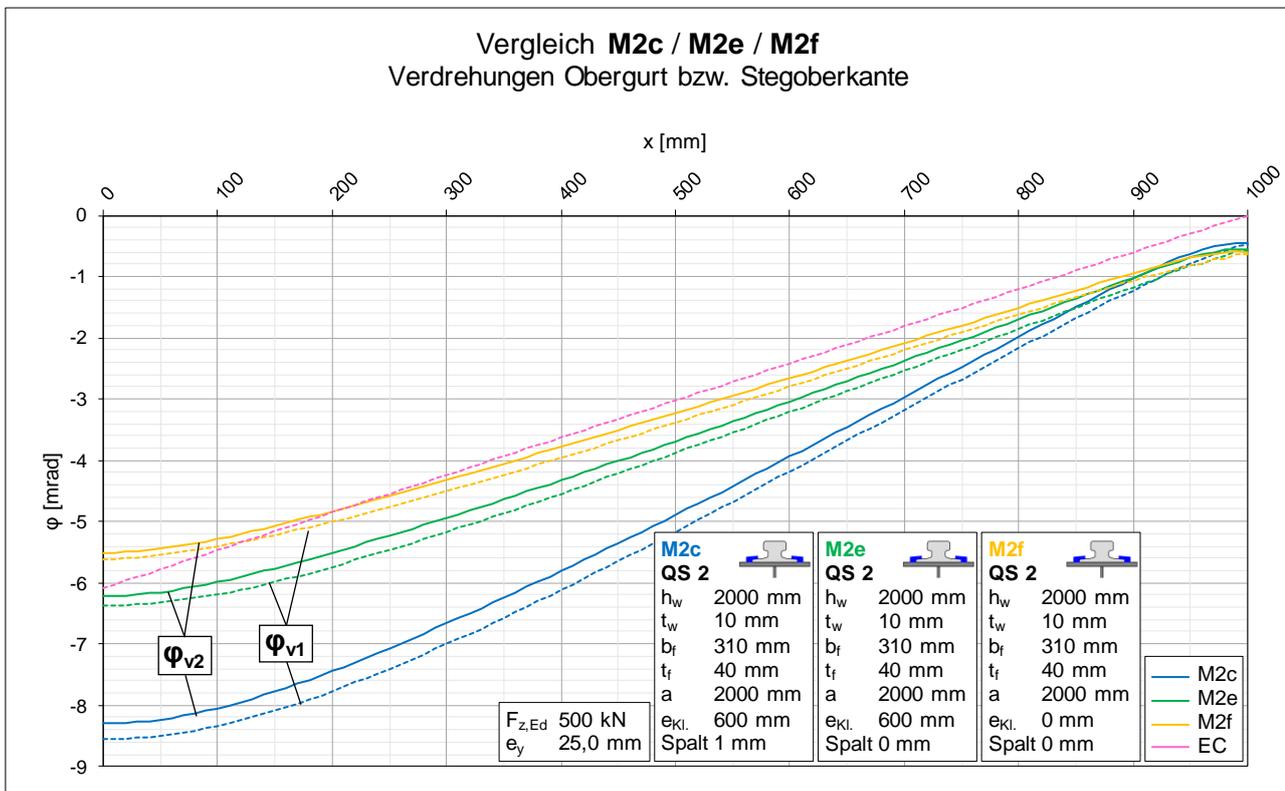


Diagramm 47: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M2

A.2.5 Vergleich M2d / M2g / M2h ▶ Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

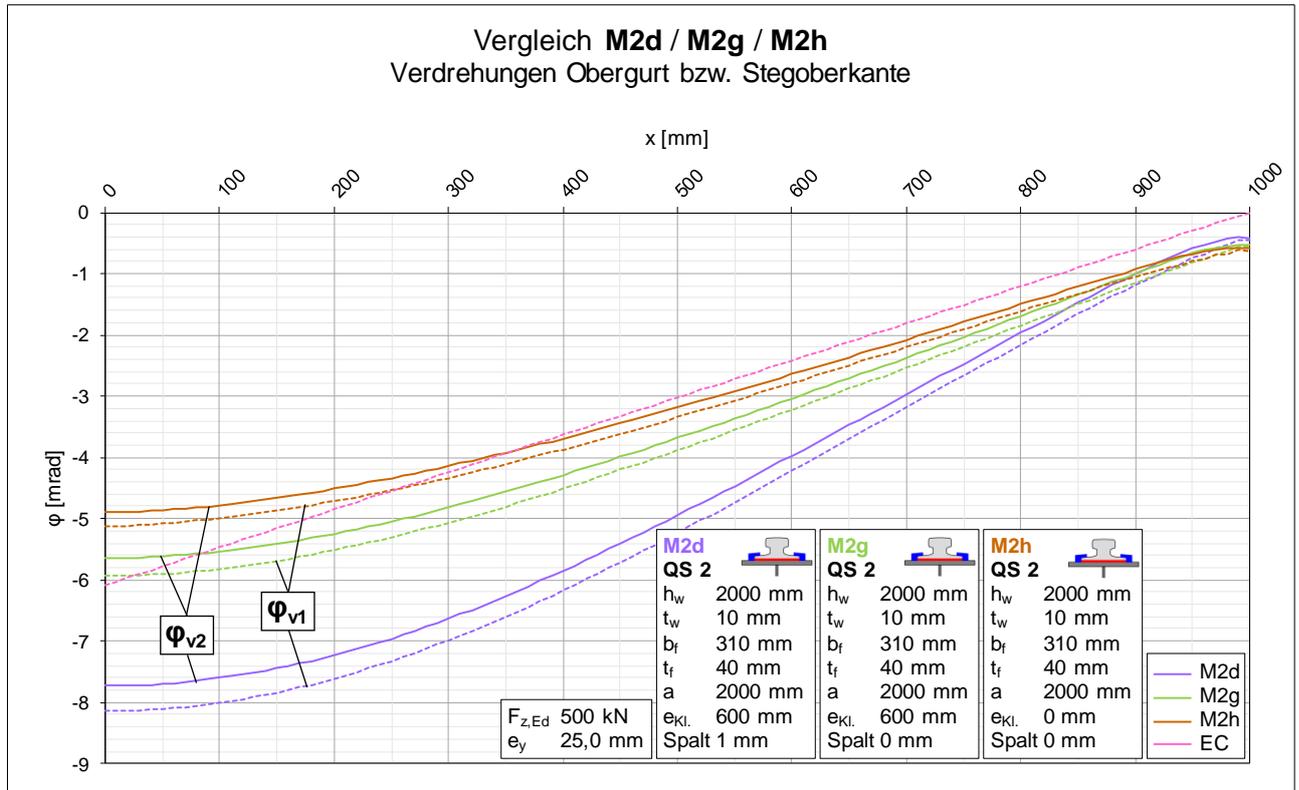


Diagramm 48: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M2

A.3 Modell M3 / Vergleiche auf Spannungsebene

A.3.1 Vergleich M3a / M3b ► Einfluss der elastischen Unterlage

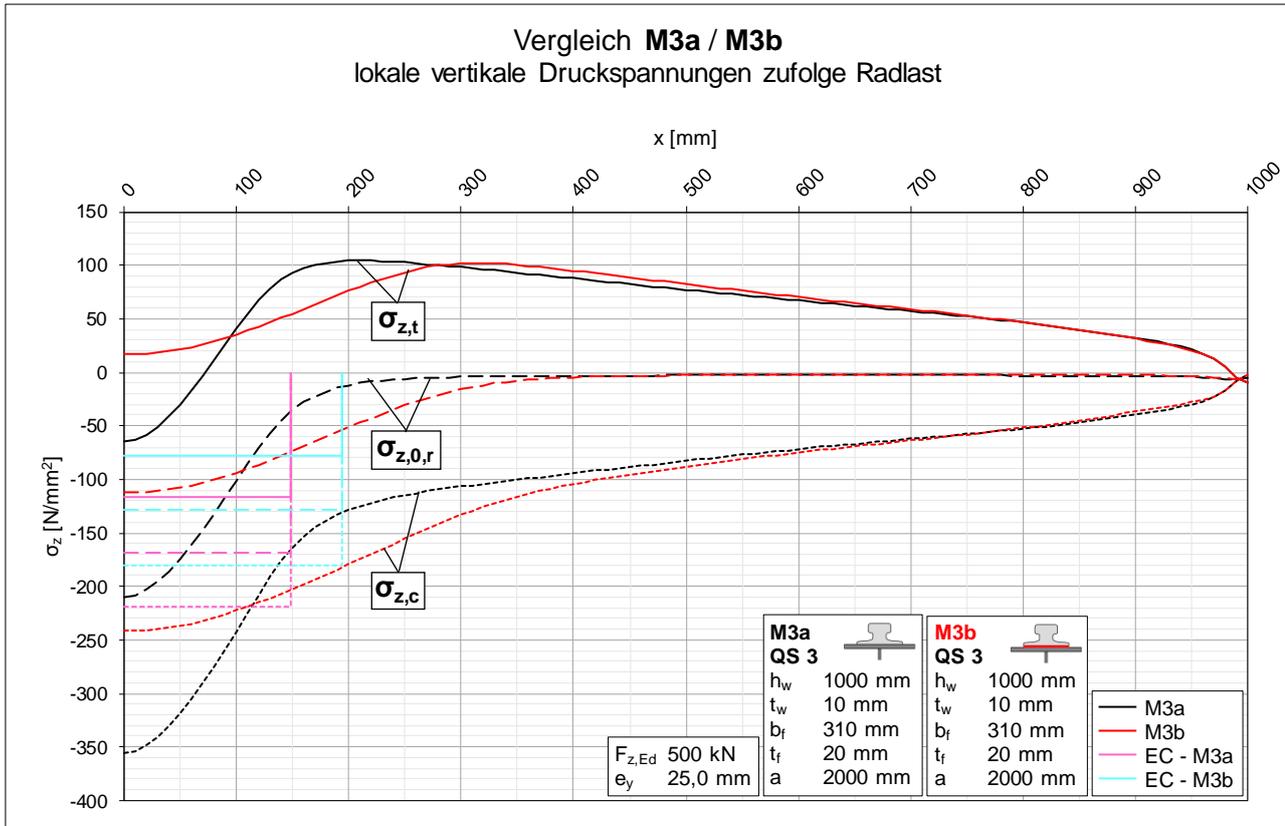


Diagramm 49: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M3

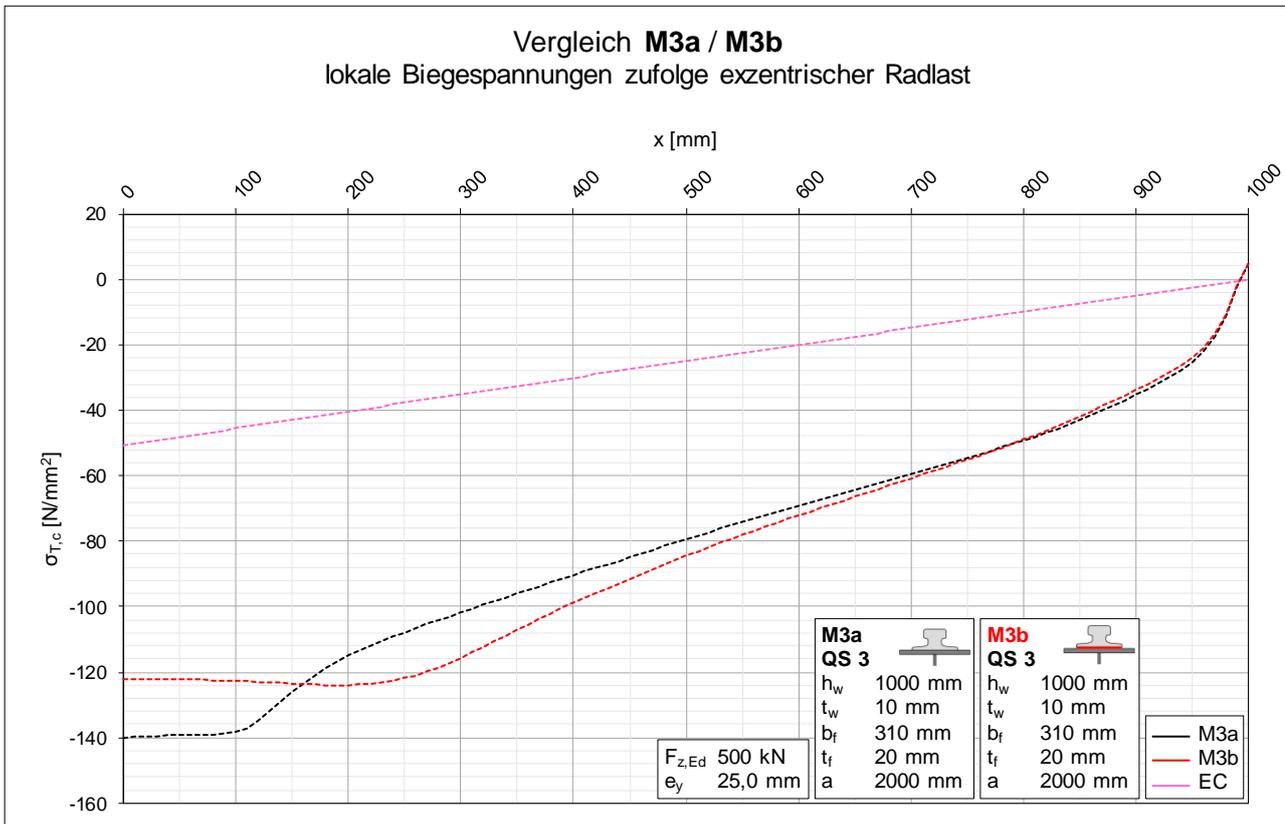


Diagramm 50: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M3

A.3.2 Vergleich M3a / M3c ► Einfluss der Klemmen

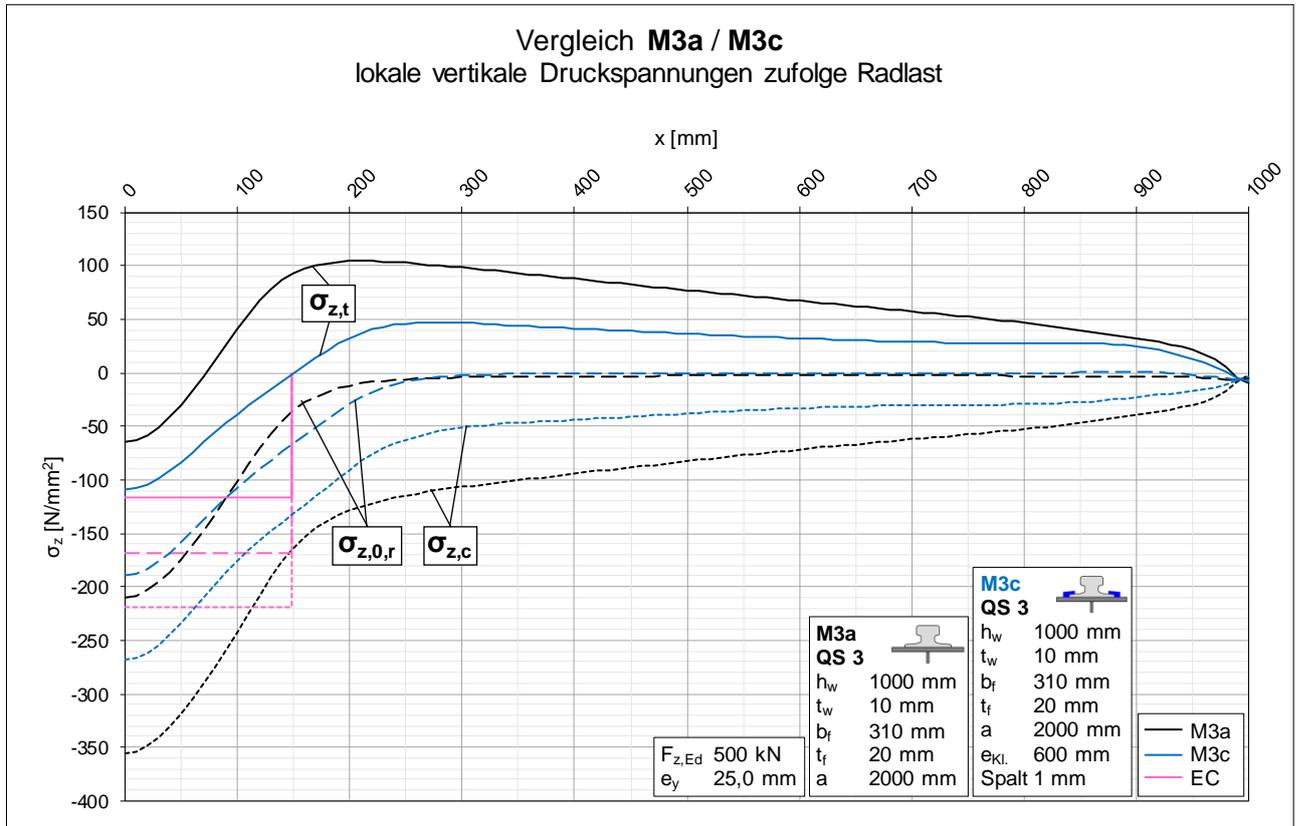


Diagramm 51: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M3

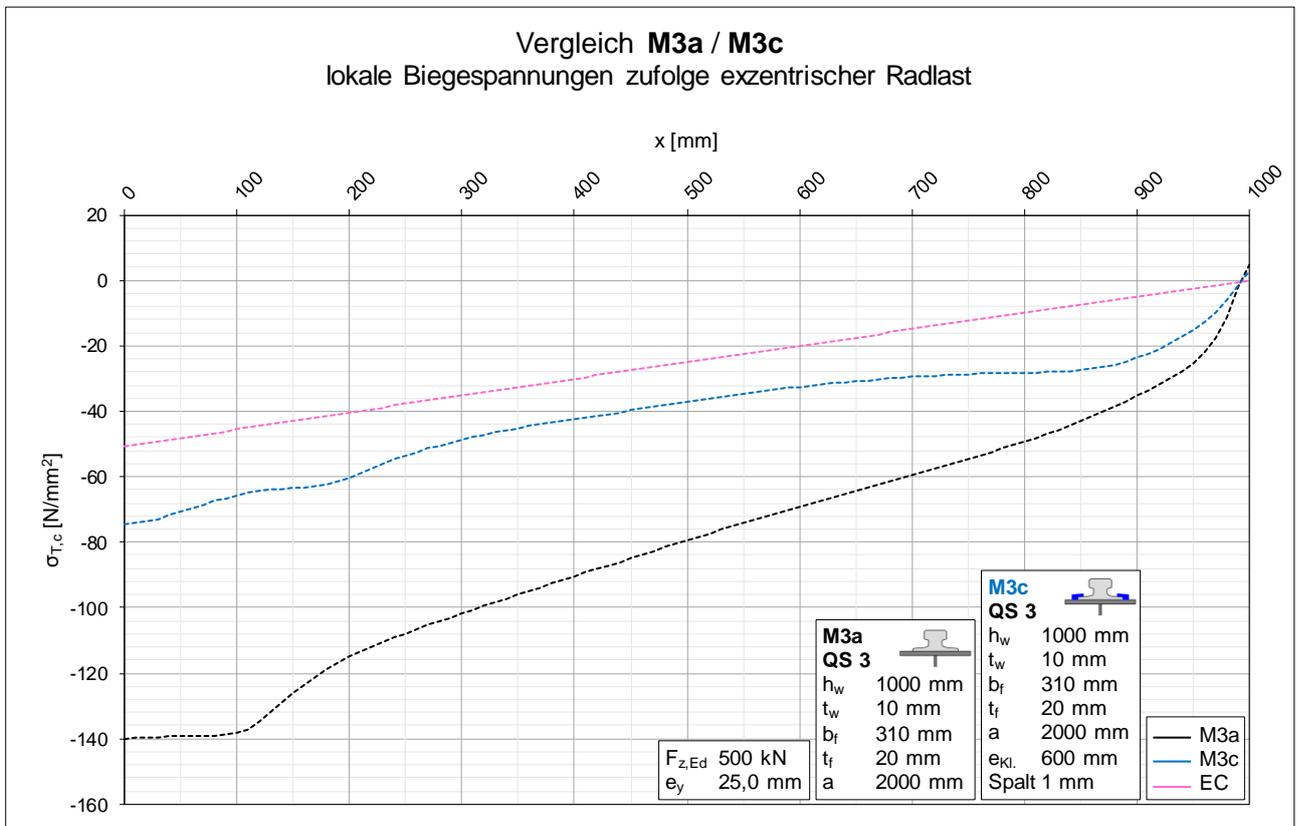


Diagramm 52: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M3

A.3.3 Vergleich M3b / M3d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

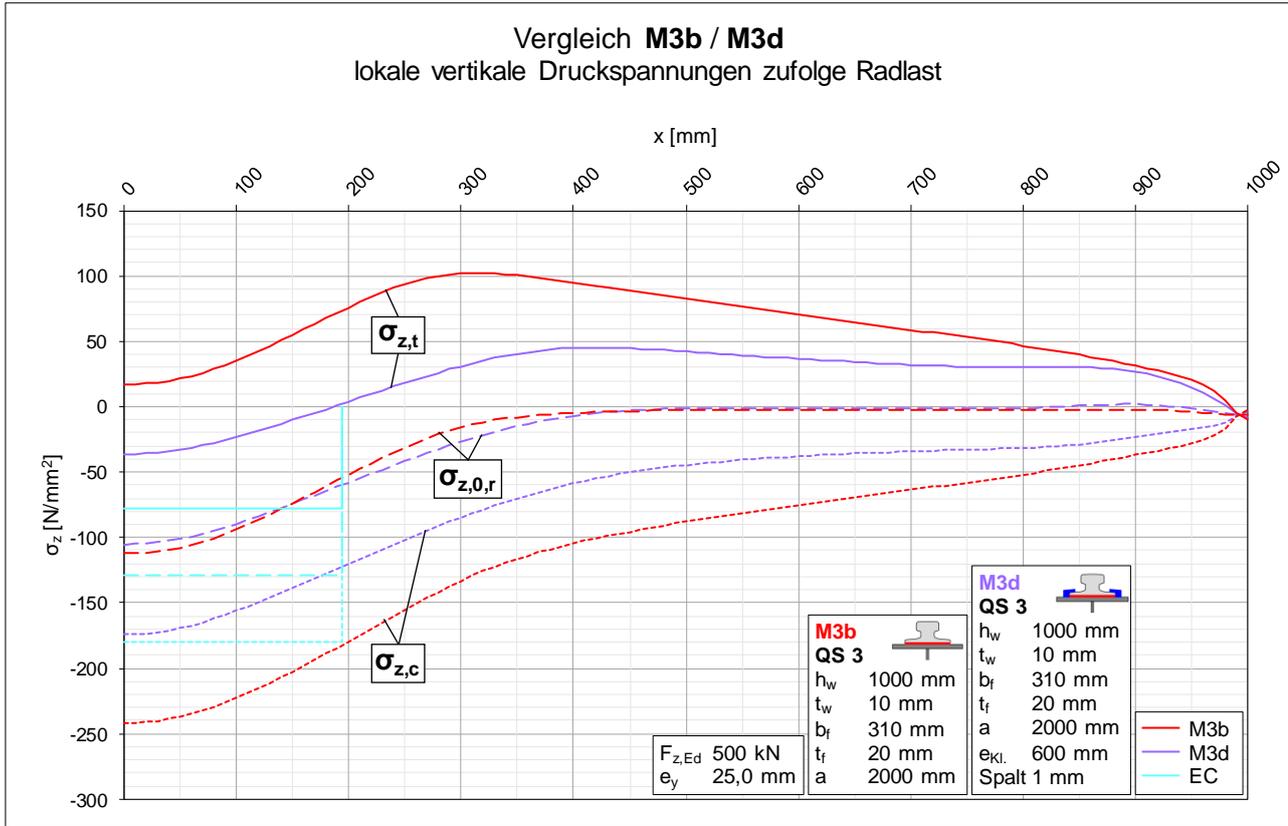


Diagramm 53: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M3

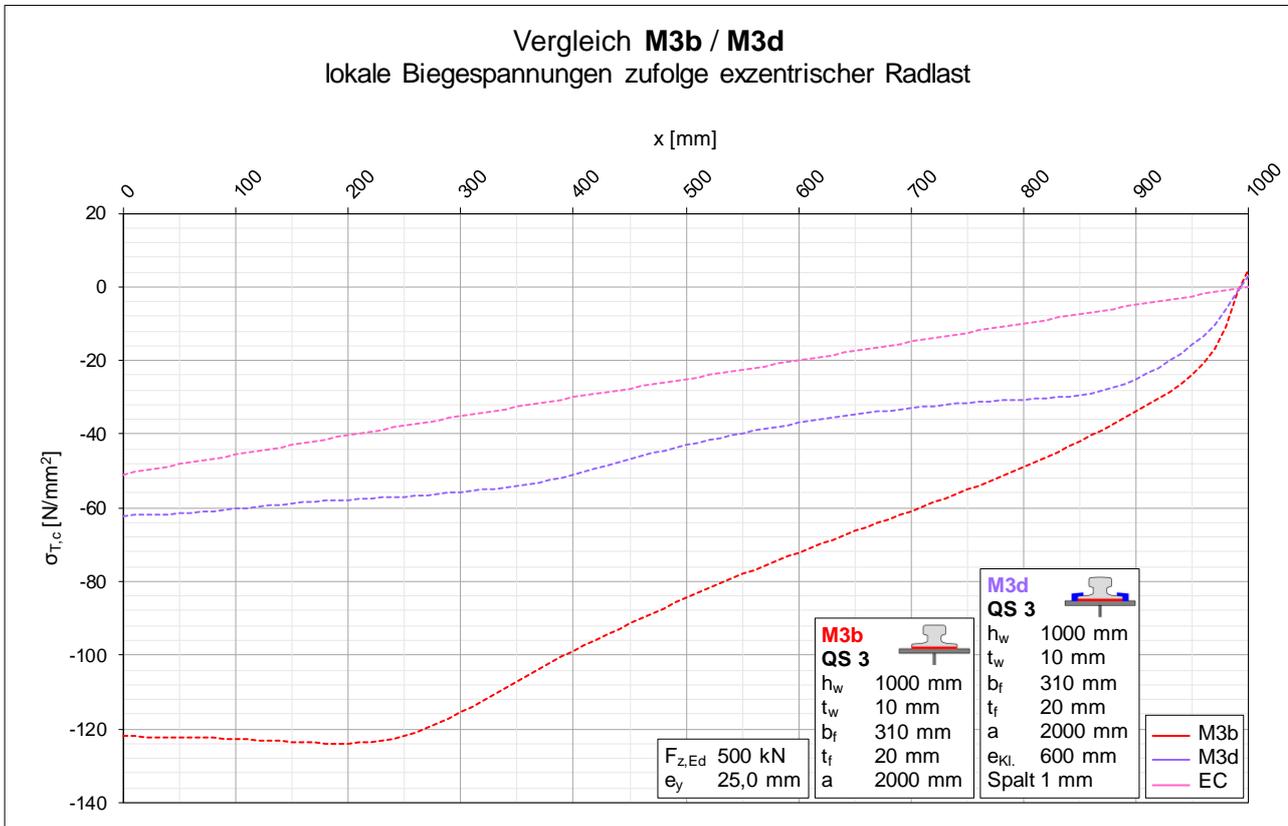


Diagramm 54: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M3

A.3.4 Vergleich M3c / M3e / M3f ► Klemmen ohne Spalt

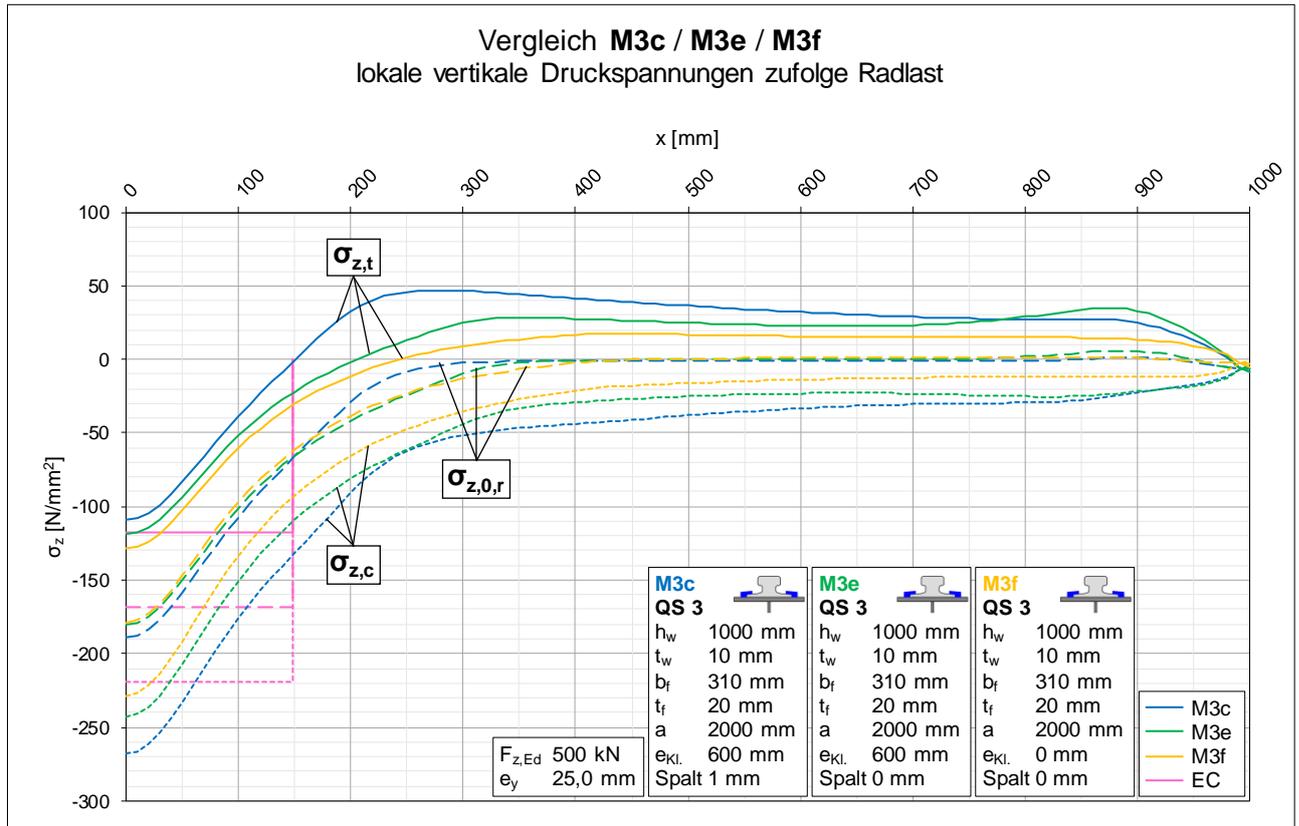


Diagramm 55: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M3

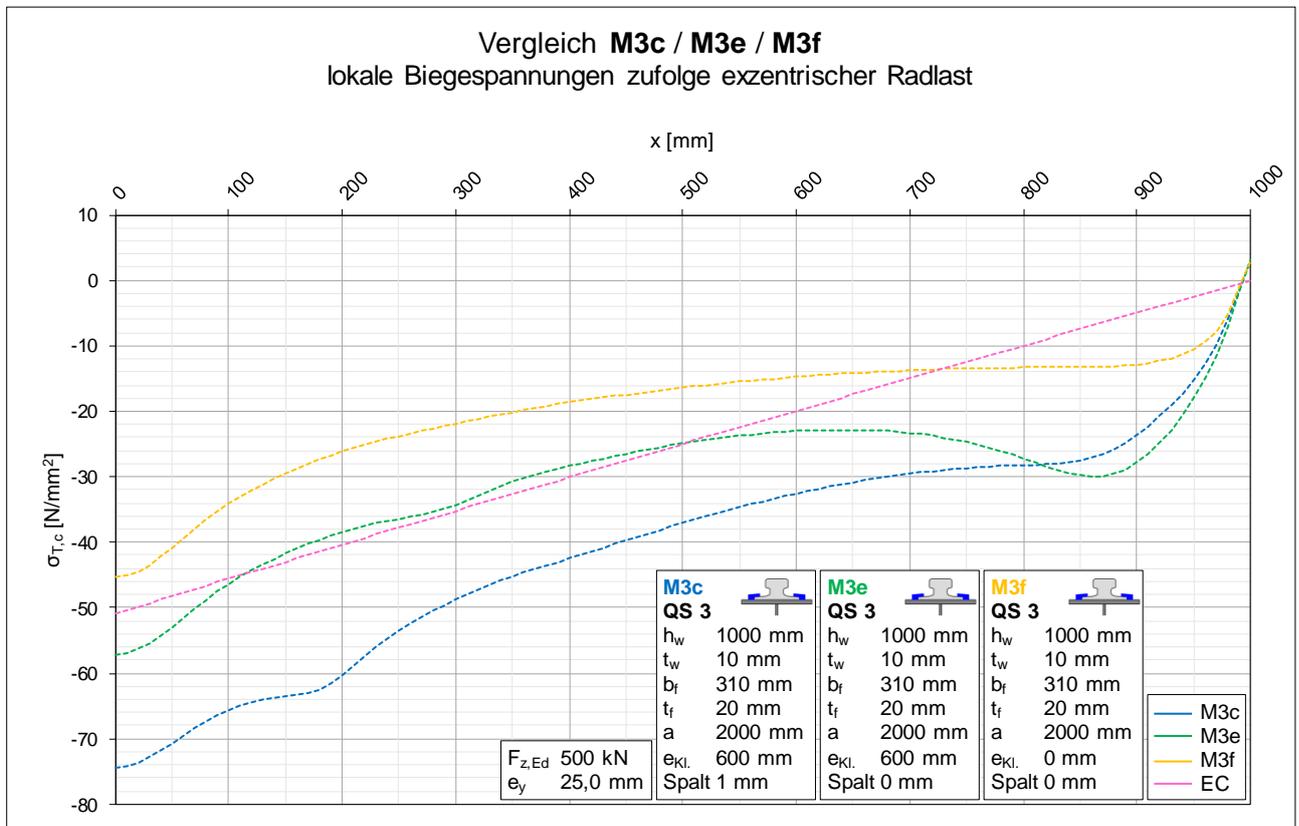


Diagramm 56: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M3

A.3.5 Vergleich M3d / M3g / M3h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

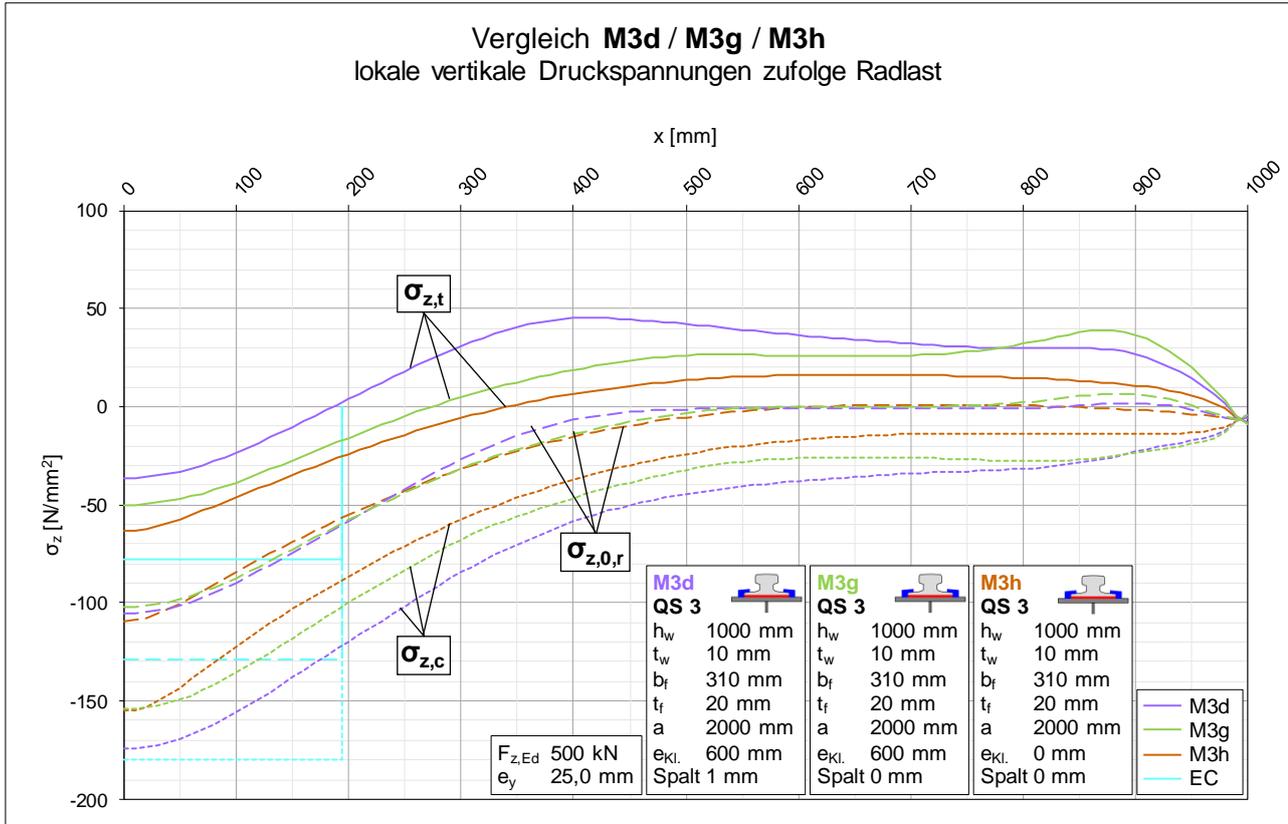


Diagramm 57: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M3

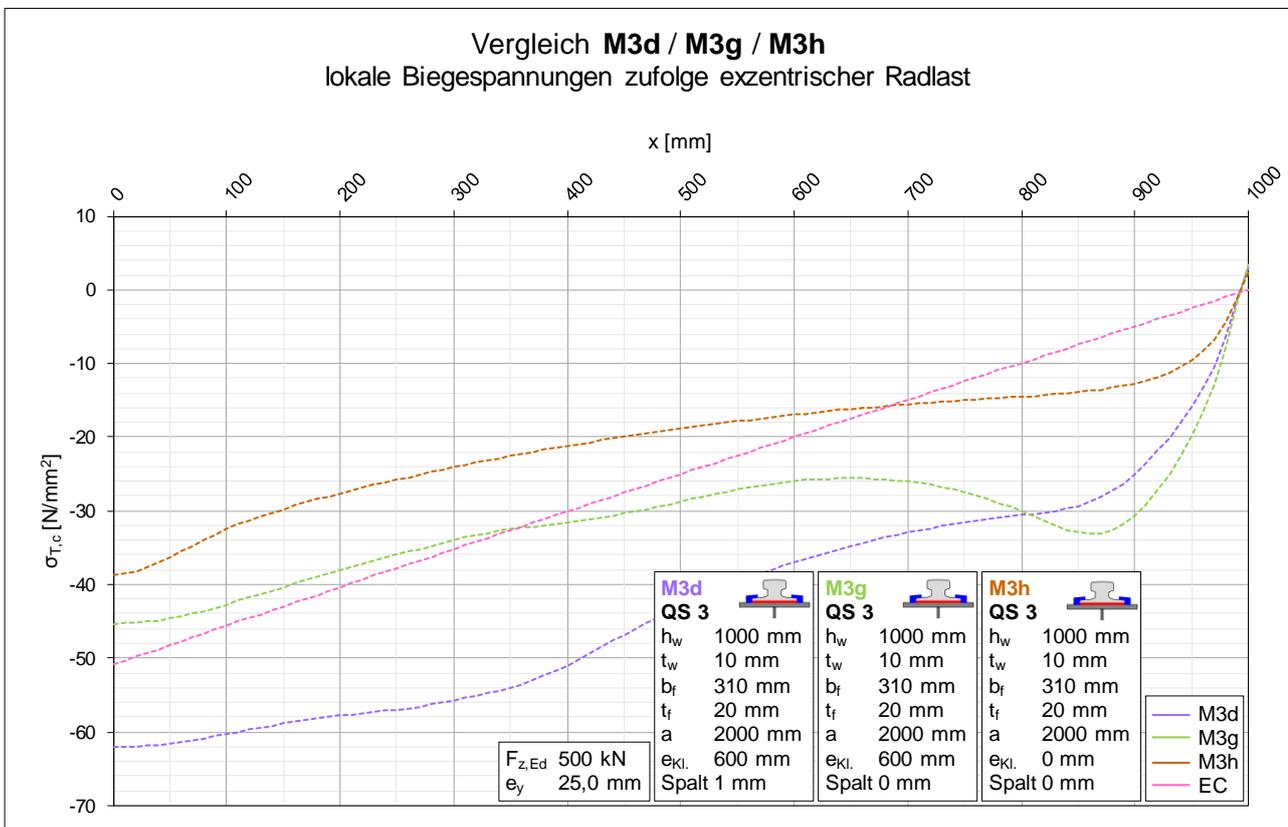


Diagramm 58: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M3

A.4 Modell M3 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

A.4.1 Vergleich M3a / M3b ► Einfluss der elastischen Unterlage

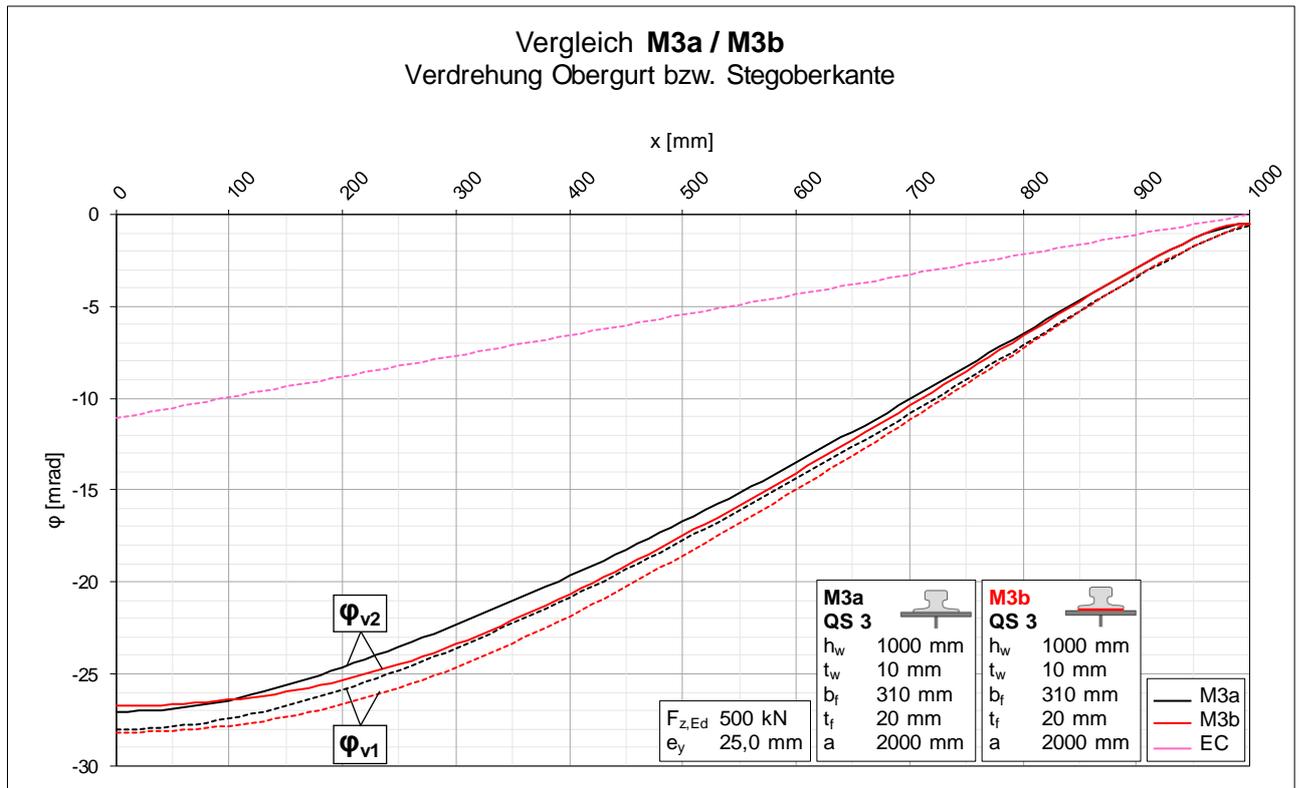


Diagramm 59: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M3

A.4.2 Vergleich M3a / M3c ► Einfluss der Klemmen

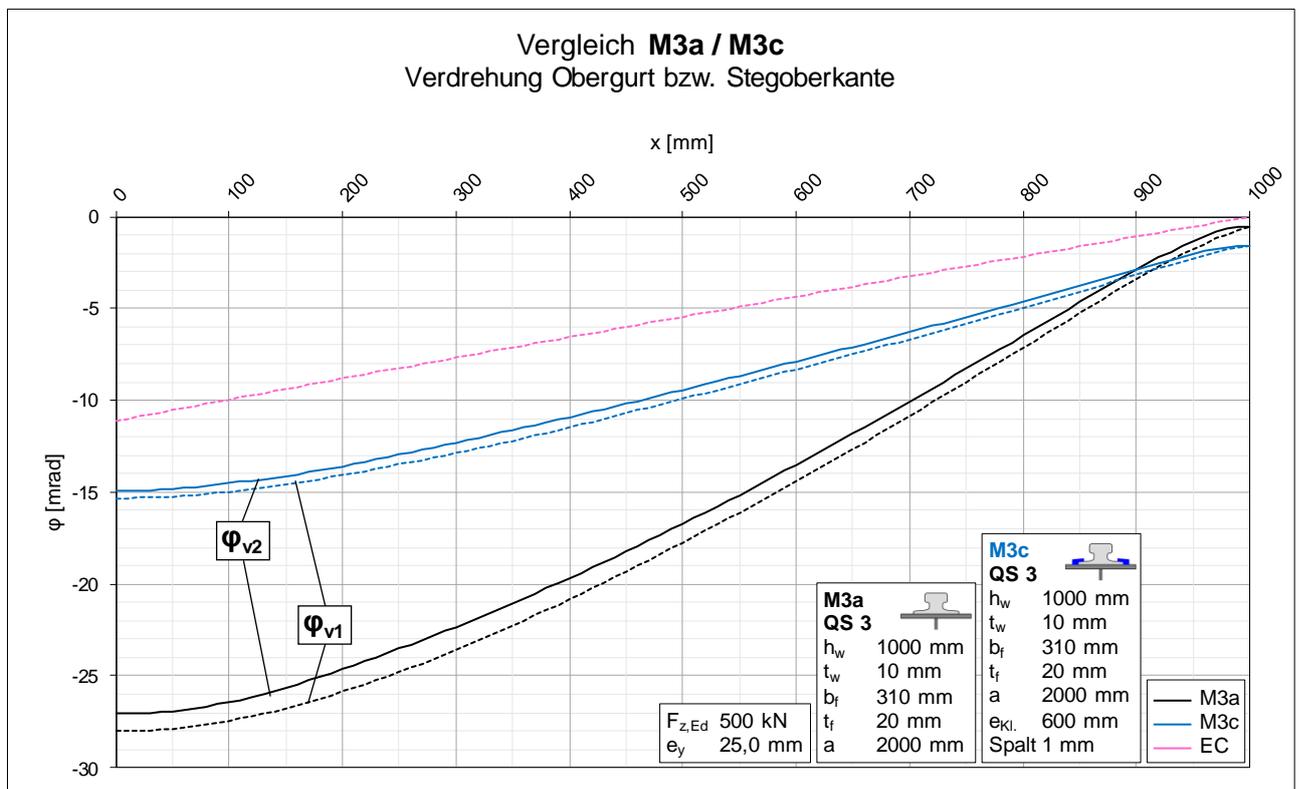


Diagramm 60: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M3

A.4.3 Vergleich M3b / M3d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

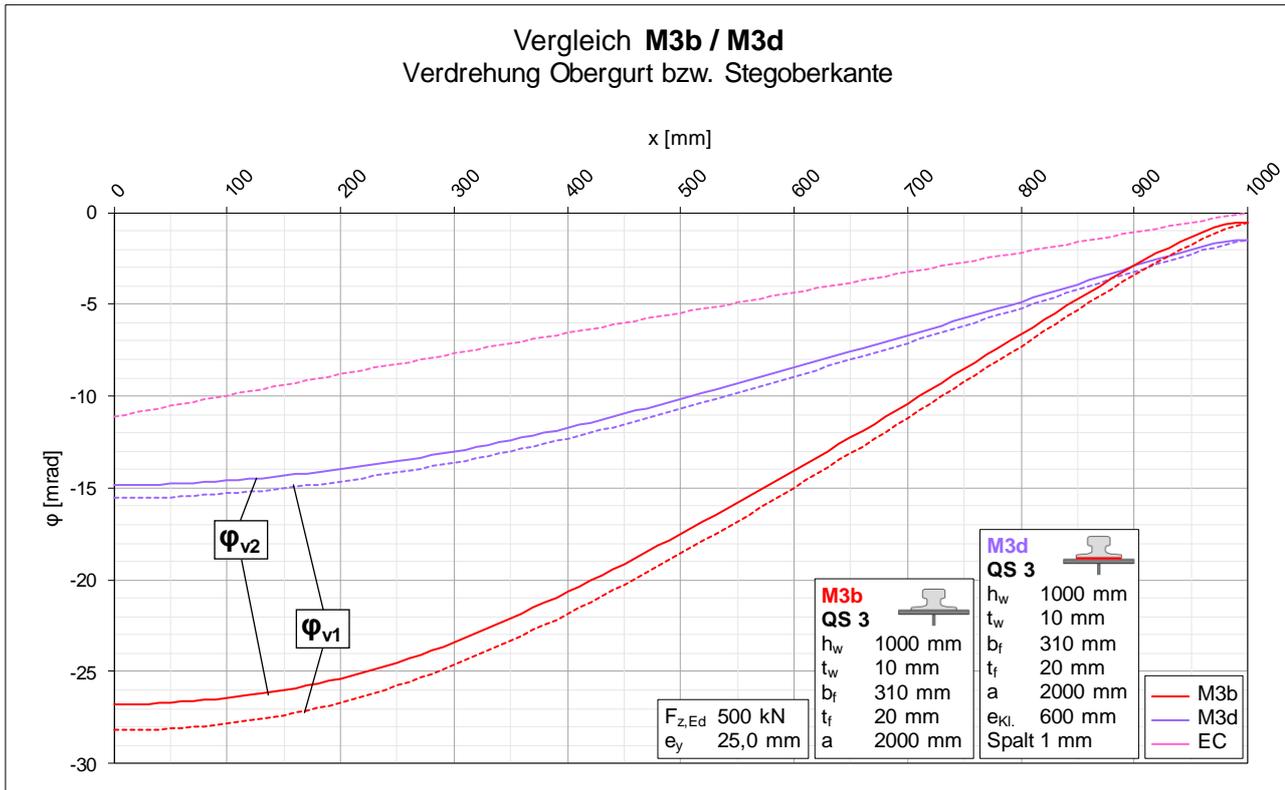


Diagramm 61: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M3

A.4.4 Vergleich M3c / M3e / M3f ► Klemmen ohne Spalt

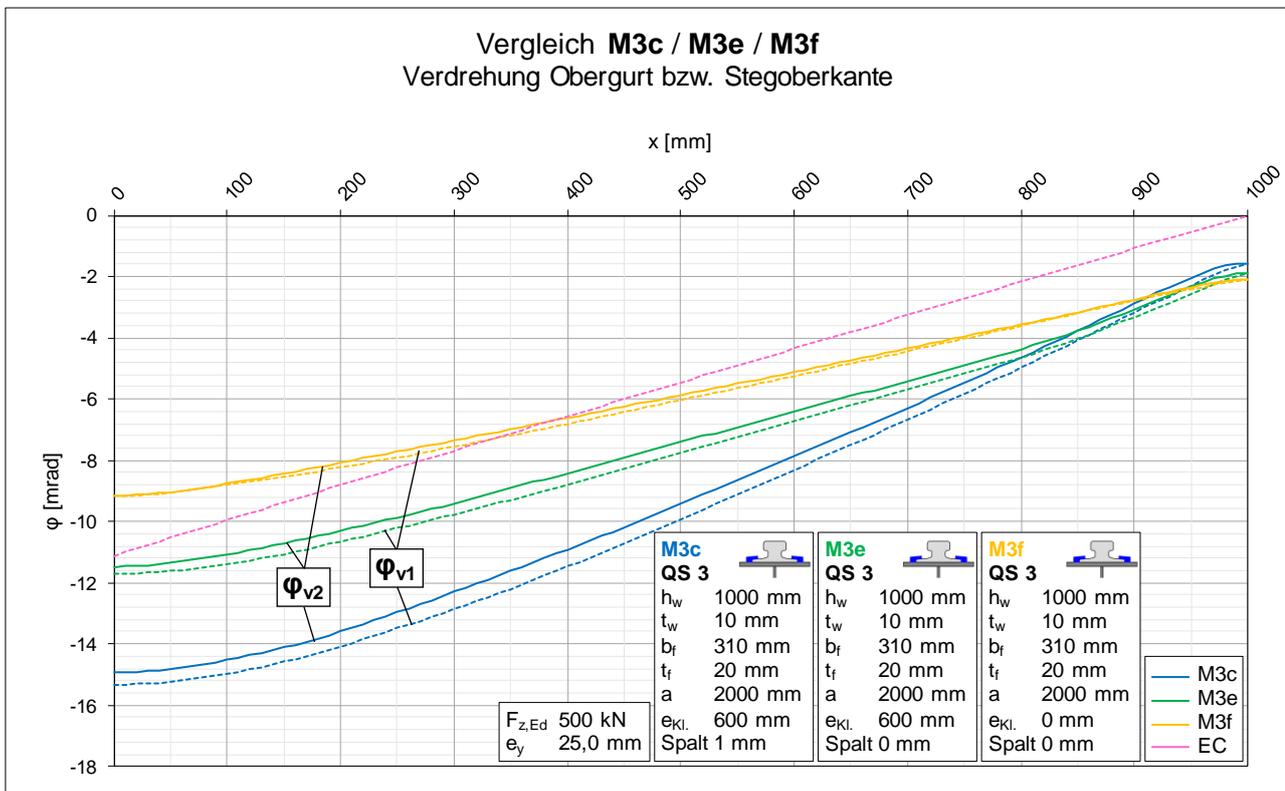


Diagramm 62: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M3

A.4.5 Vergleich M3d / M3g / M3h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

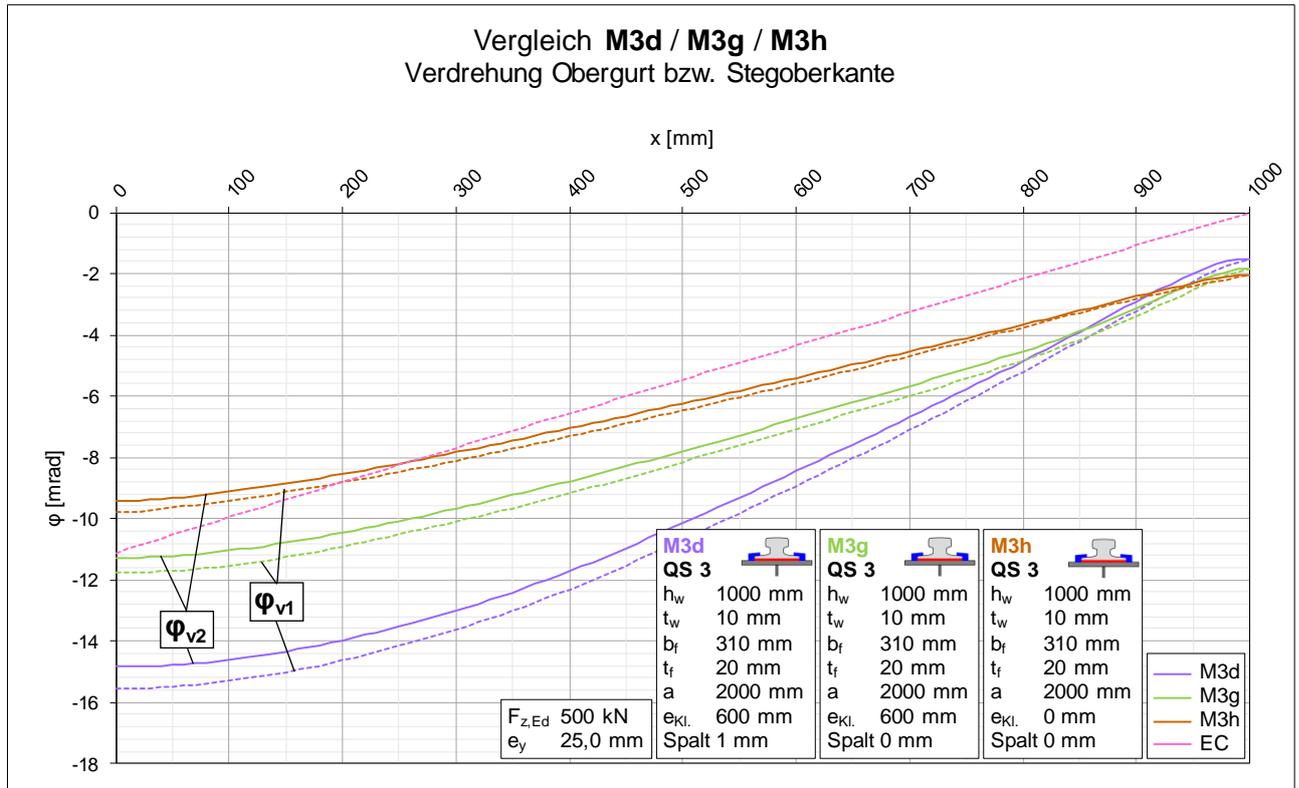


Diagramm 63: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M3

A.5 Modell M4 / Vergleiche auf Spannungsebene

A.5.1 Vergleich M4a / M4b ► Einfluss der elastischen Unterlage

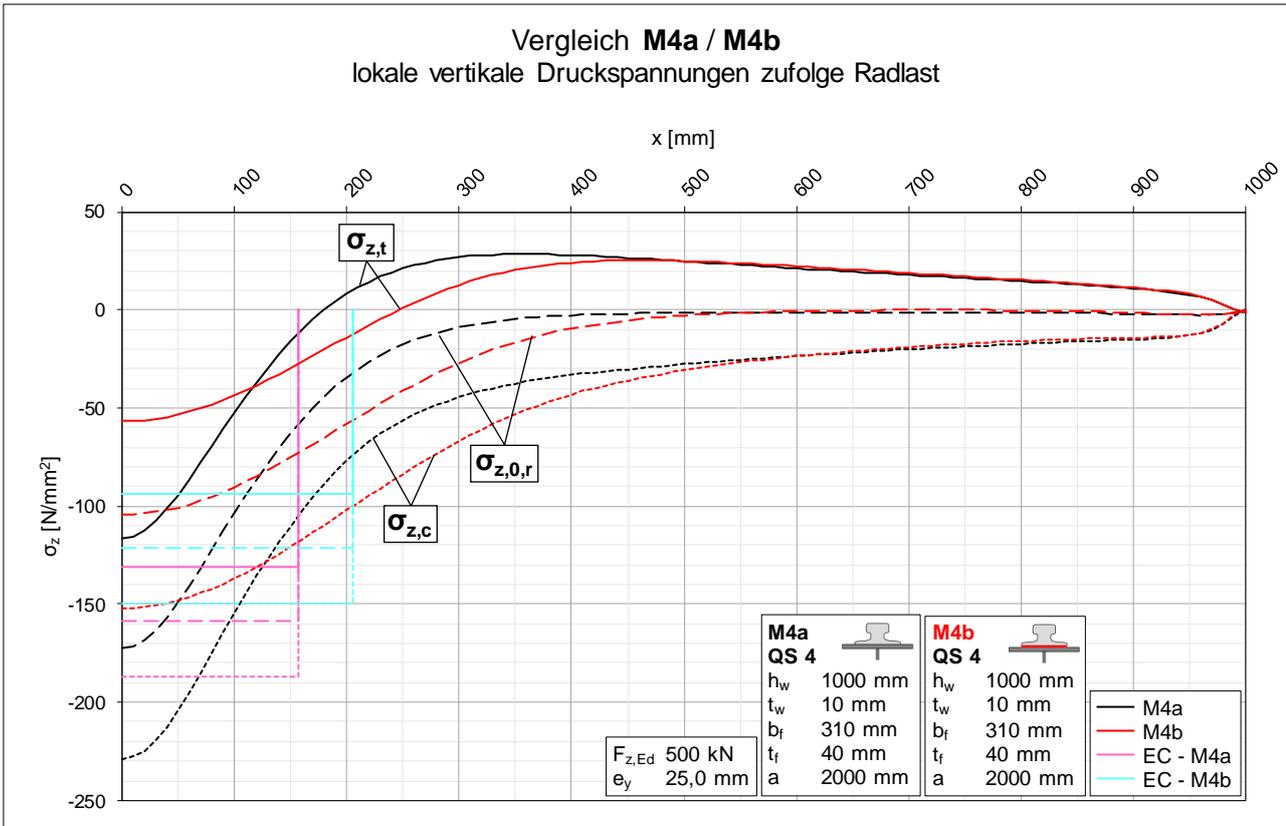


Diagramm 64: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M4

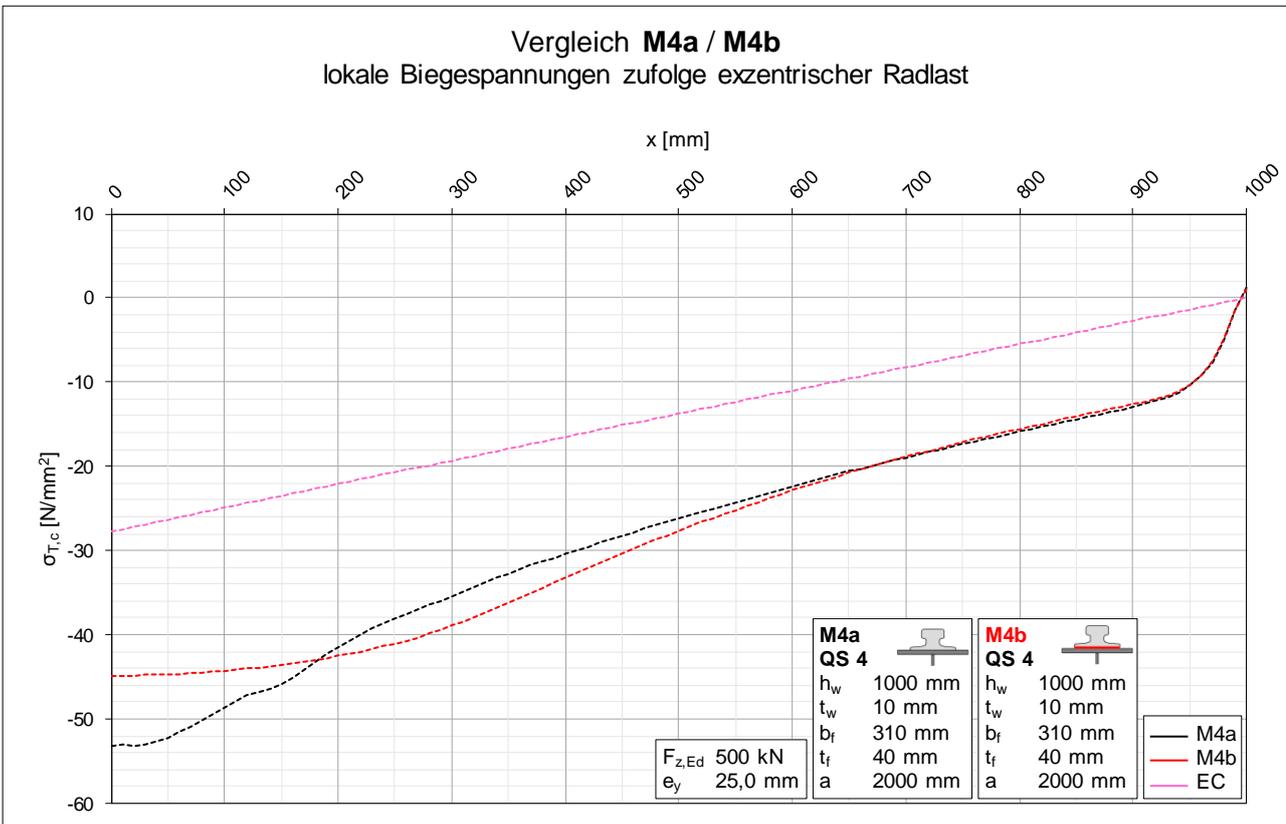


Diagramm 65: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M4

A.5.2 Vergleich M4a / M4c ► Einfluss der Klemmen

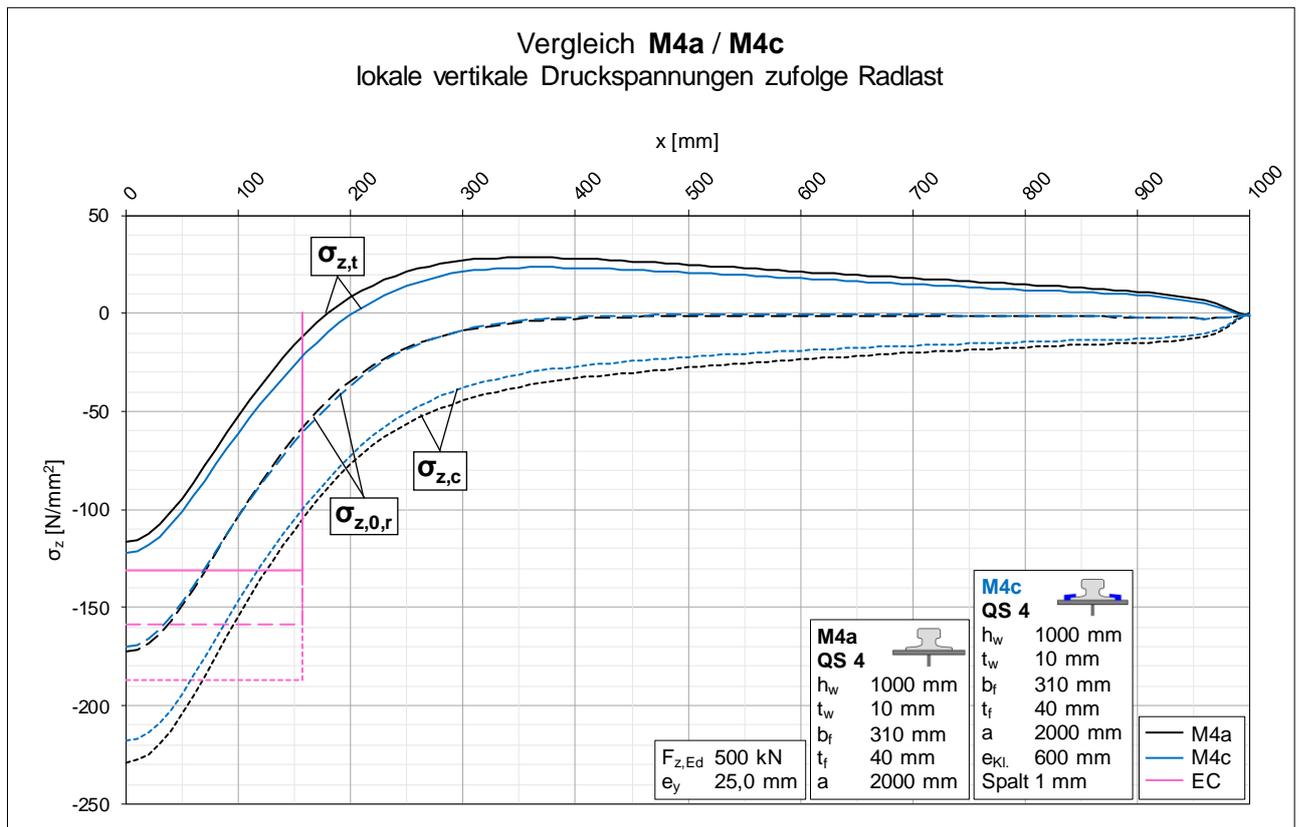


Diagramm 66: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M4

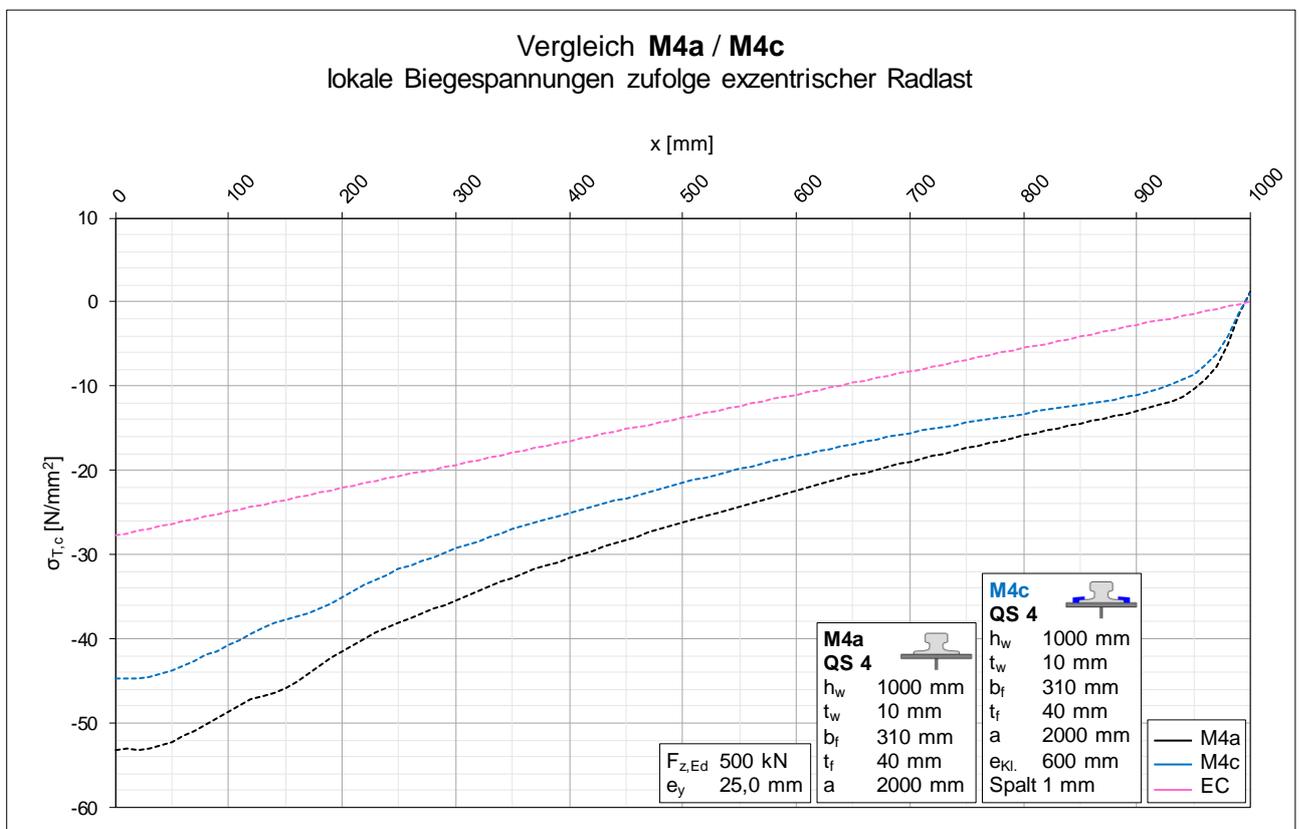


Diagramm 67: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M4

A.5.3 Vergleich M4b / M4d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

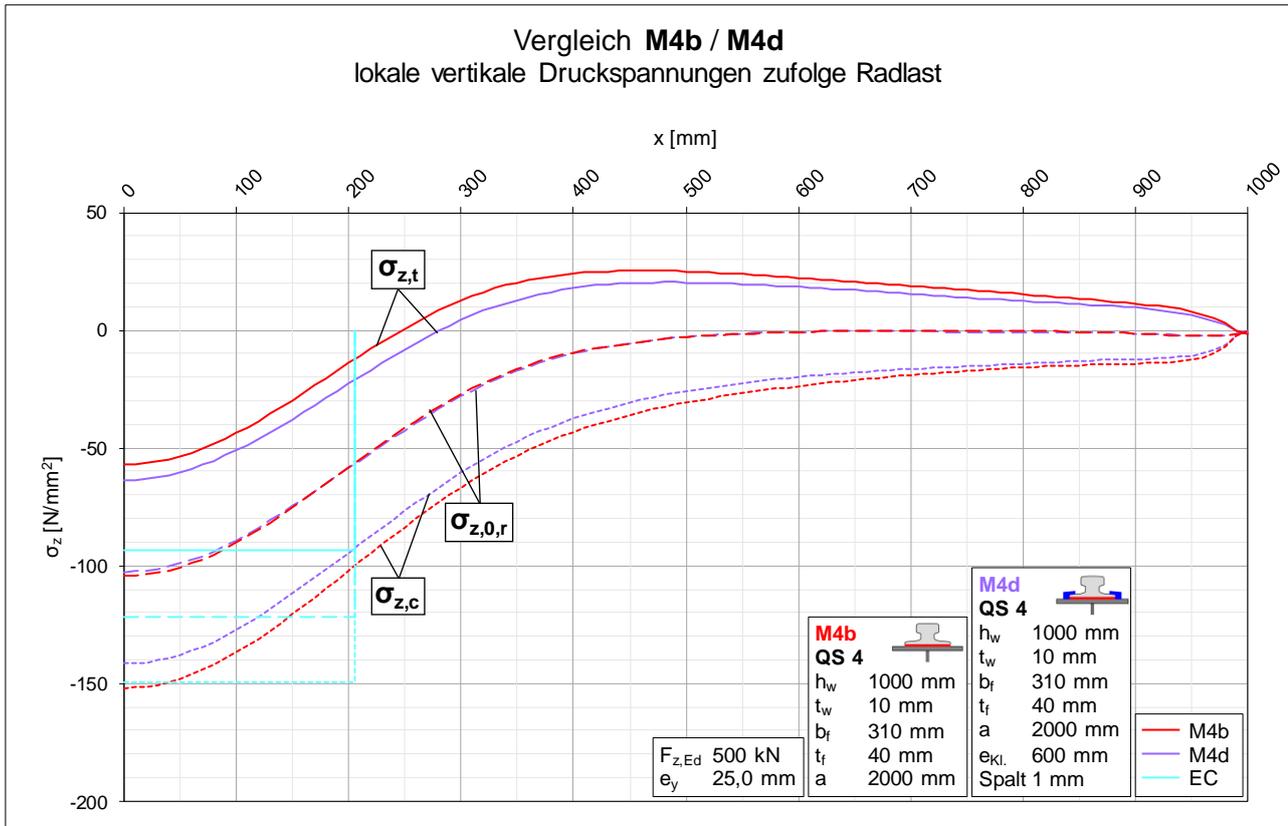


Diagramm 68: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M4

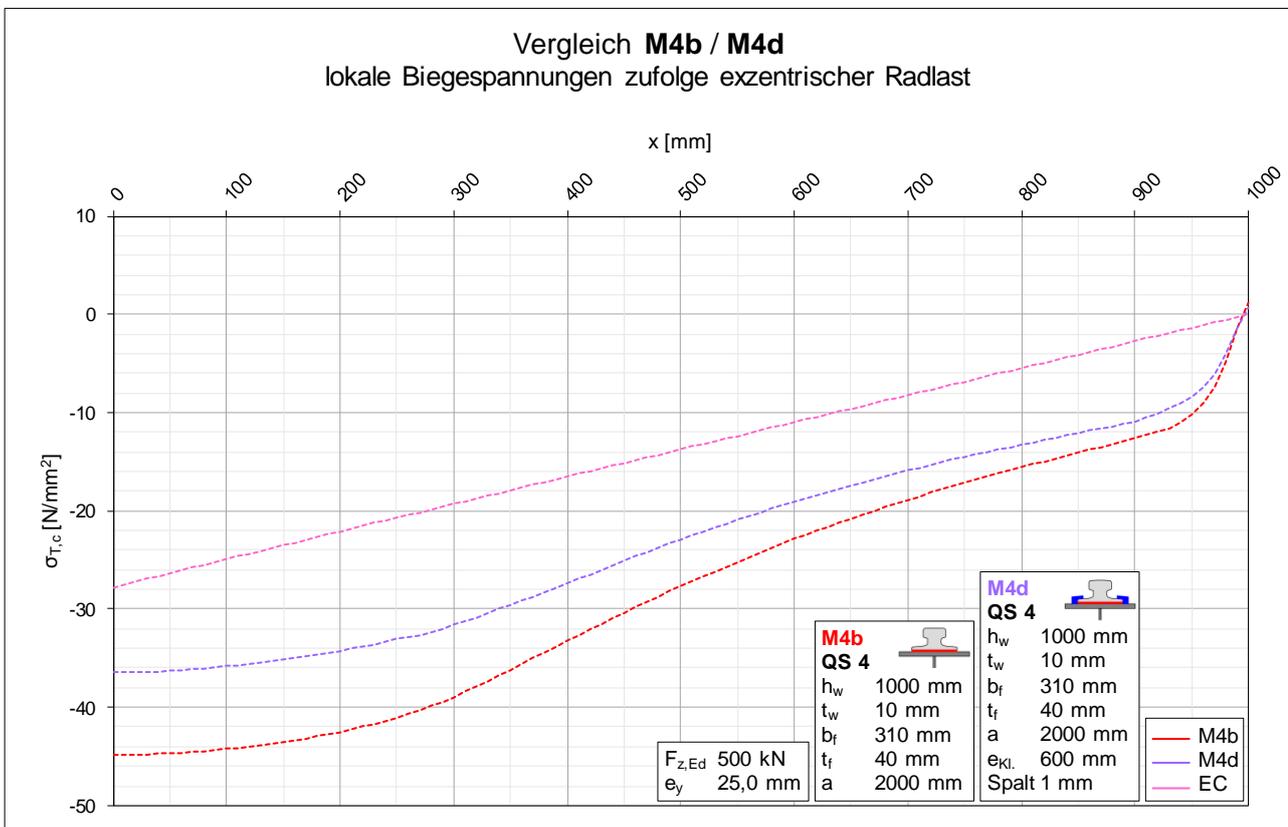


Diagramm 69: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M4

A.5.4 Vergleich M4c / M4e / M4f ► Klemmen ohne Spalt

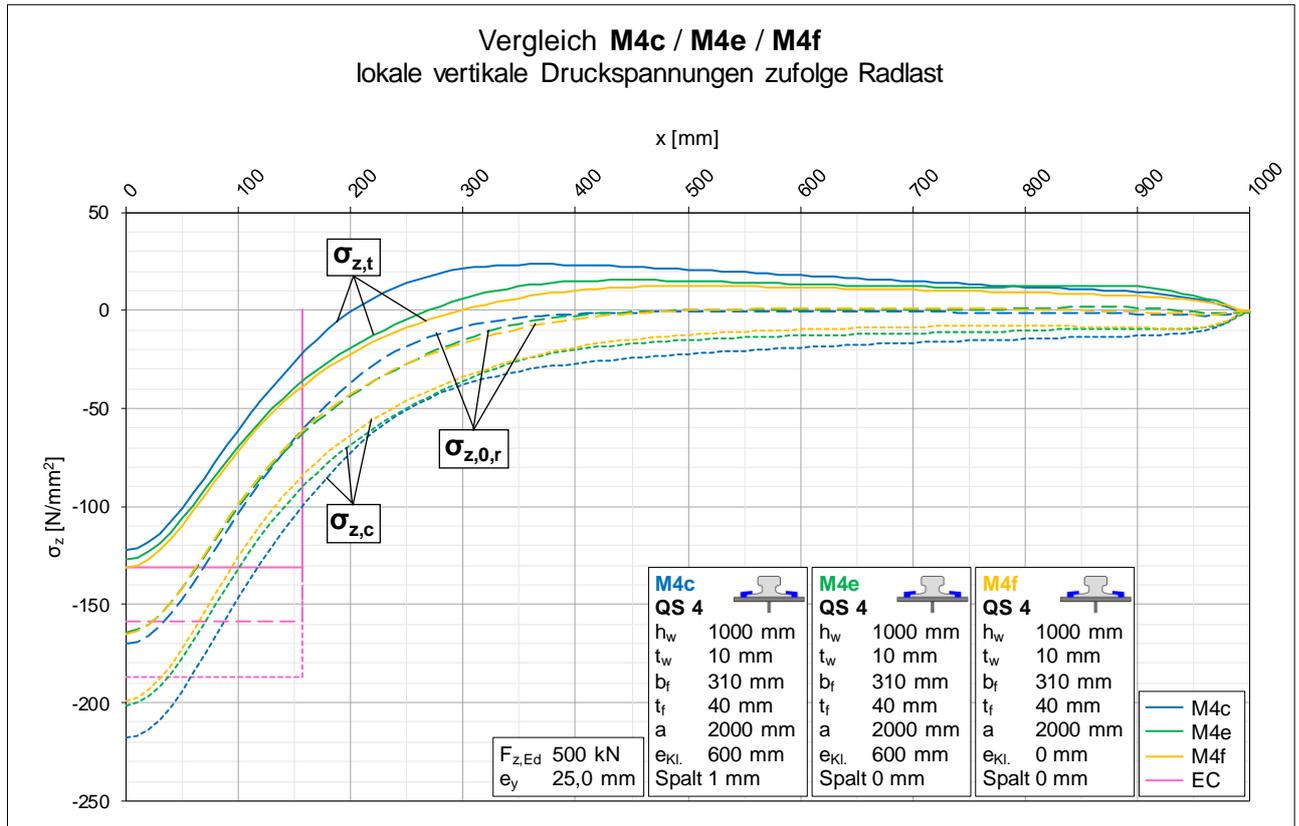


Diagramm 70: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M4

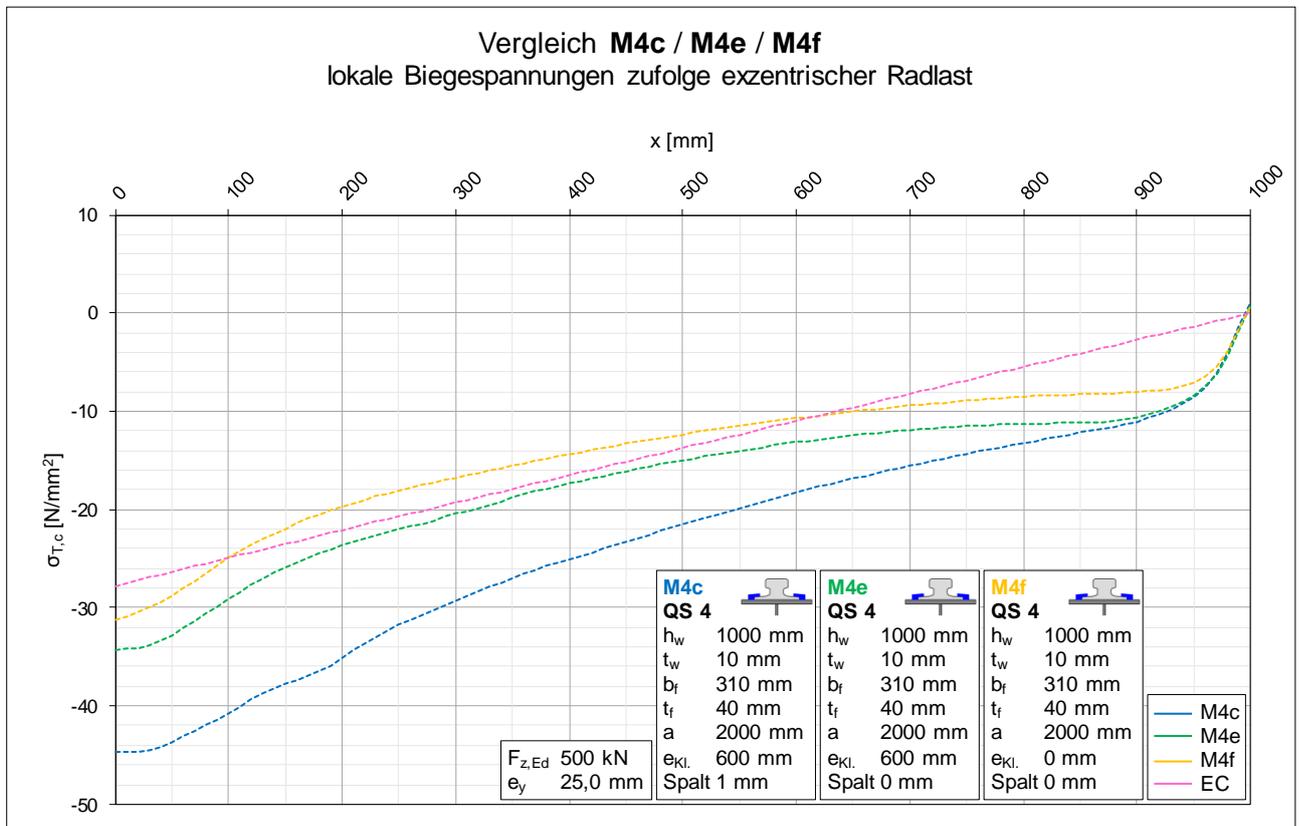


Diagramm 71: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M4

A.5.5 Vergleich M4d / M4g / M4h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

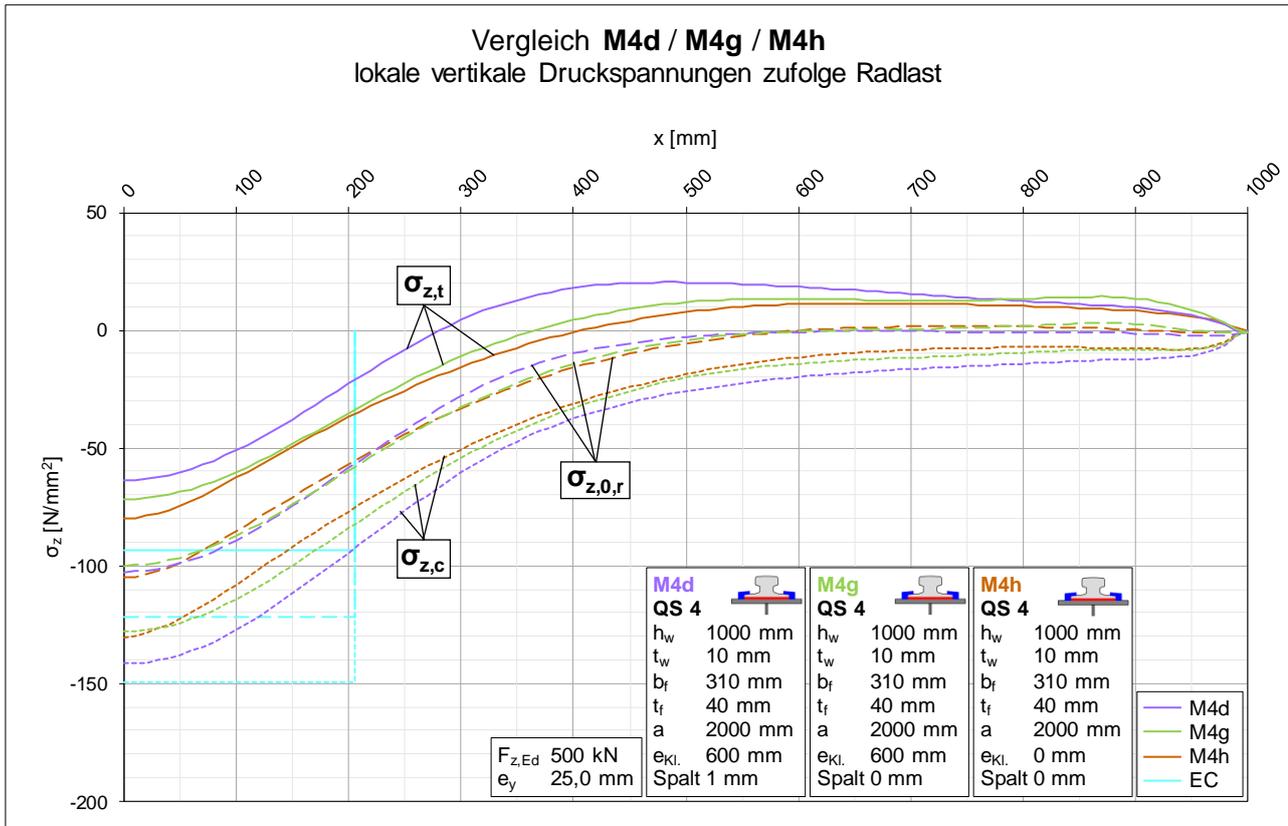


Diagramm 72: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M4

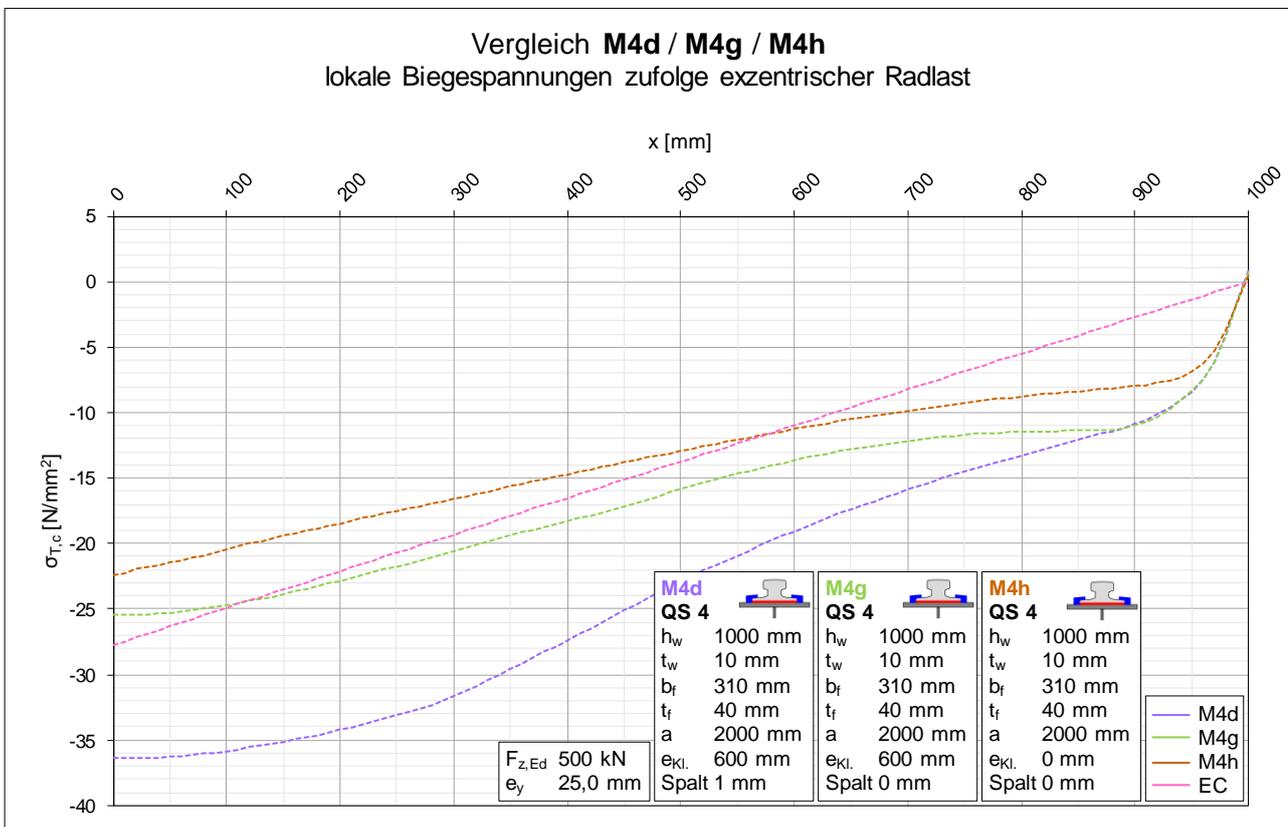


Diagramm 73: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M4

A.6 Modell M4 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

A.6.1 Vergleich M4a / M4b ► Einfluss der elastischen Unterlage

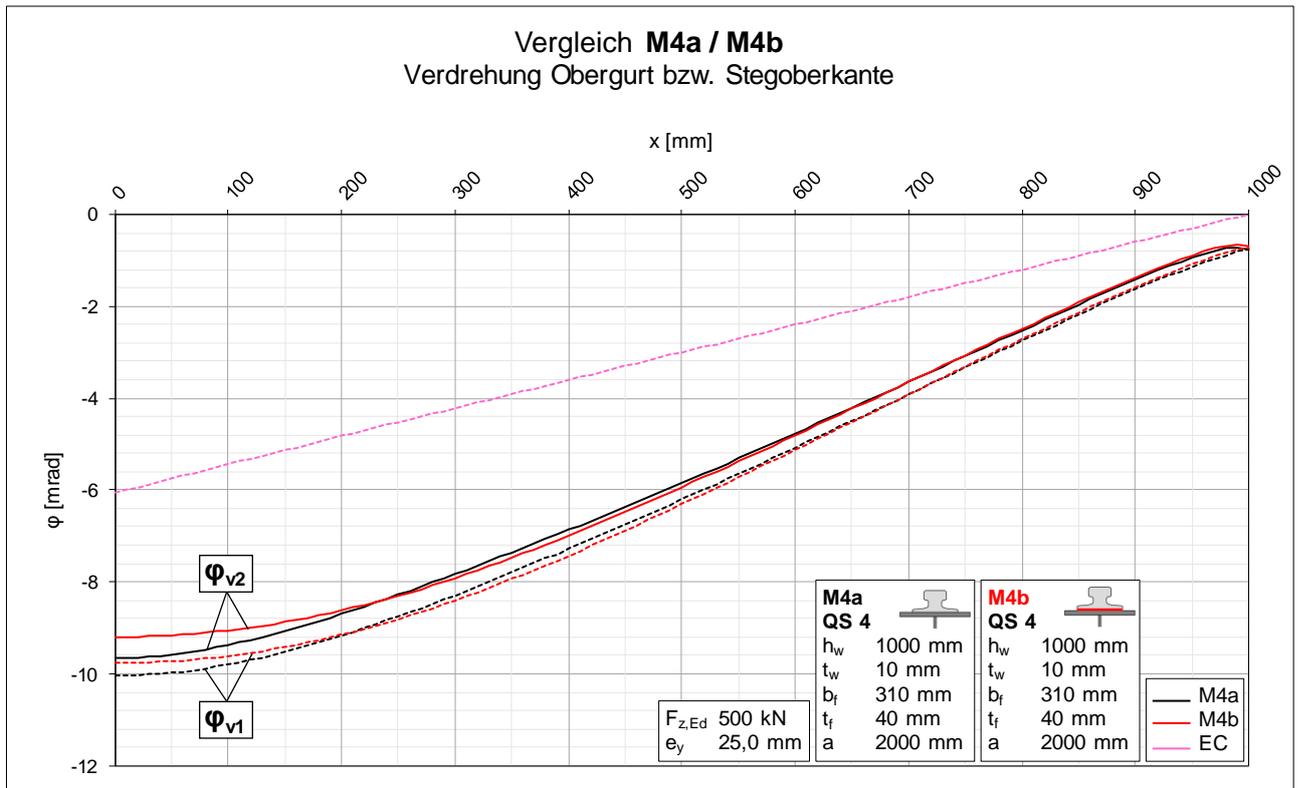


Diagramm 74: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M4

A.6.2 Vergleich M4a / M4c ► Einfluss der Klemmen

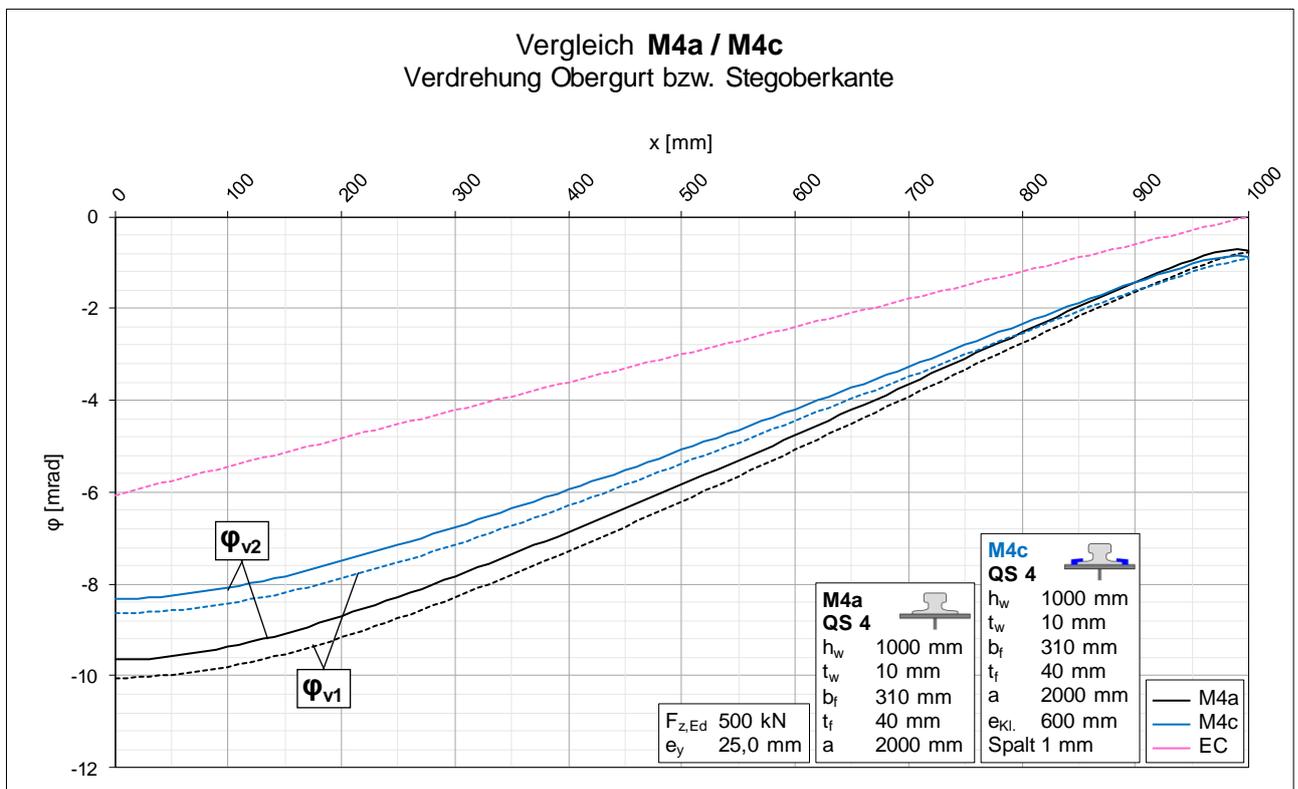


Diagramm 75: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M4

A.6.3 Vergleich M4b / M4d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

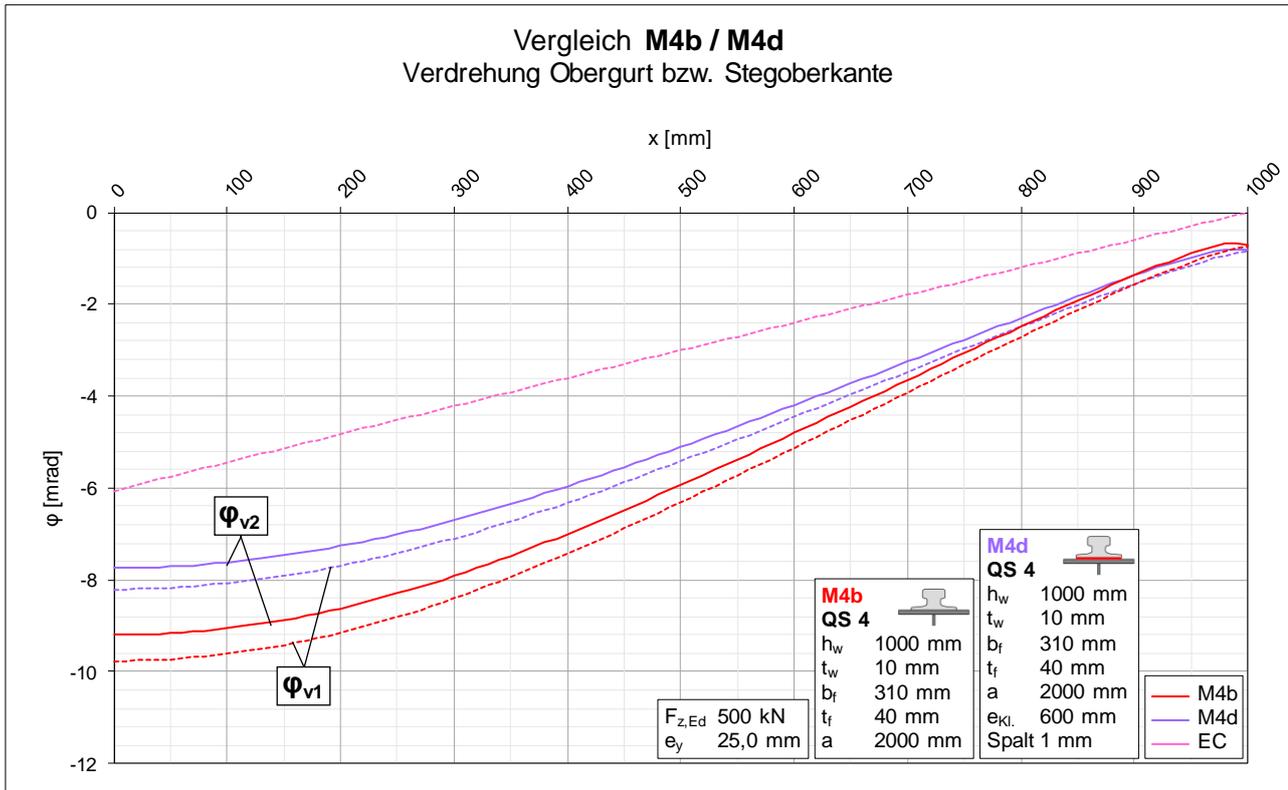


Diagramm 76: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M4

A.6.4 Vergleich M4c / M4e / M4f ► Klemmen ohne Spalt

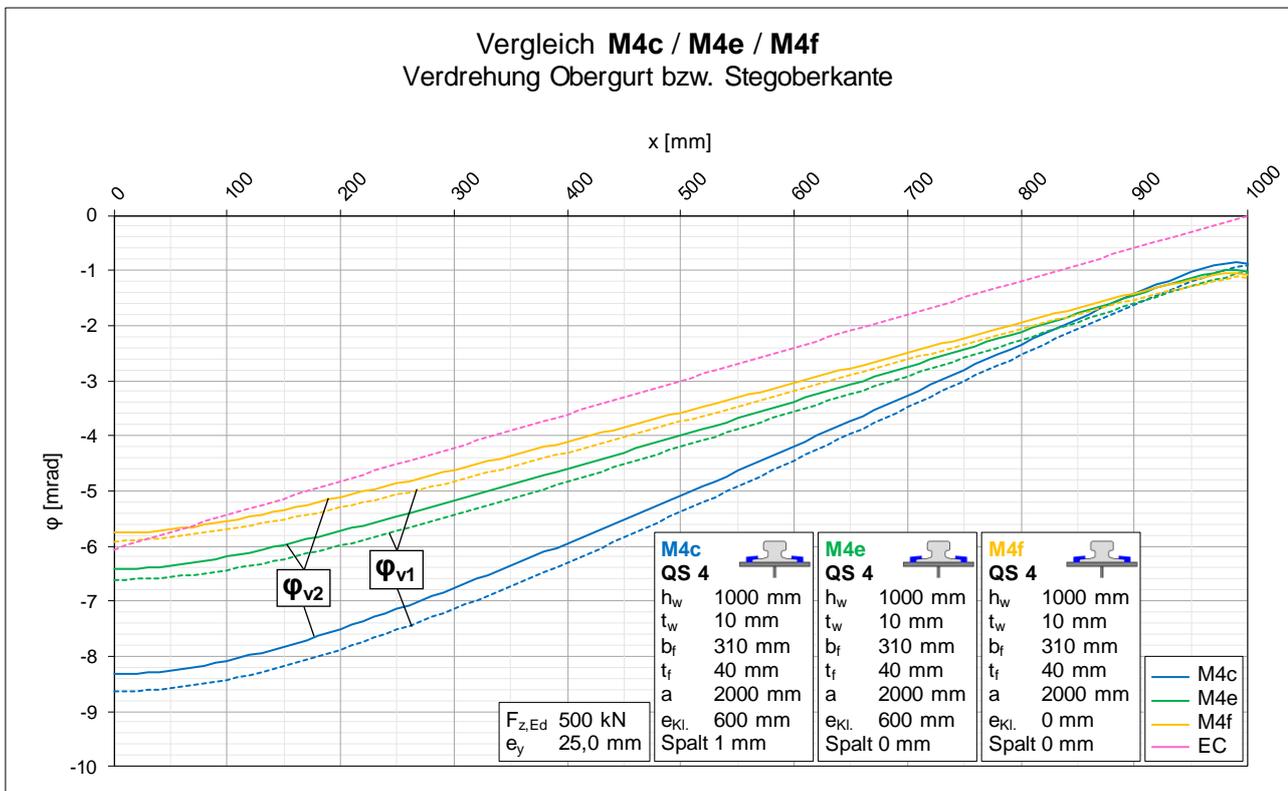


Diagramm 77: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M4

A.6.5 Vergleich M4d / M4g / M4h ▶ Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

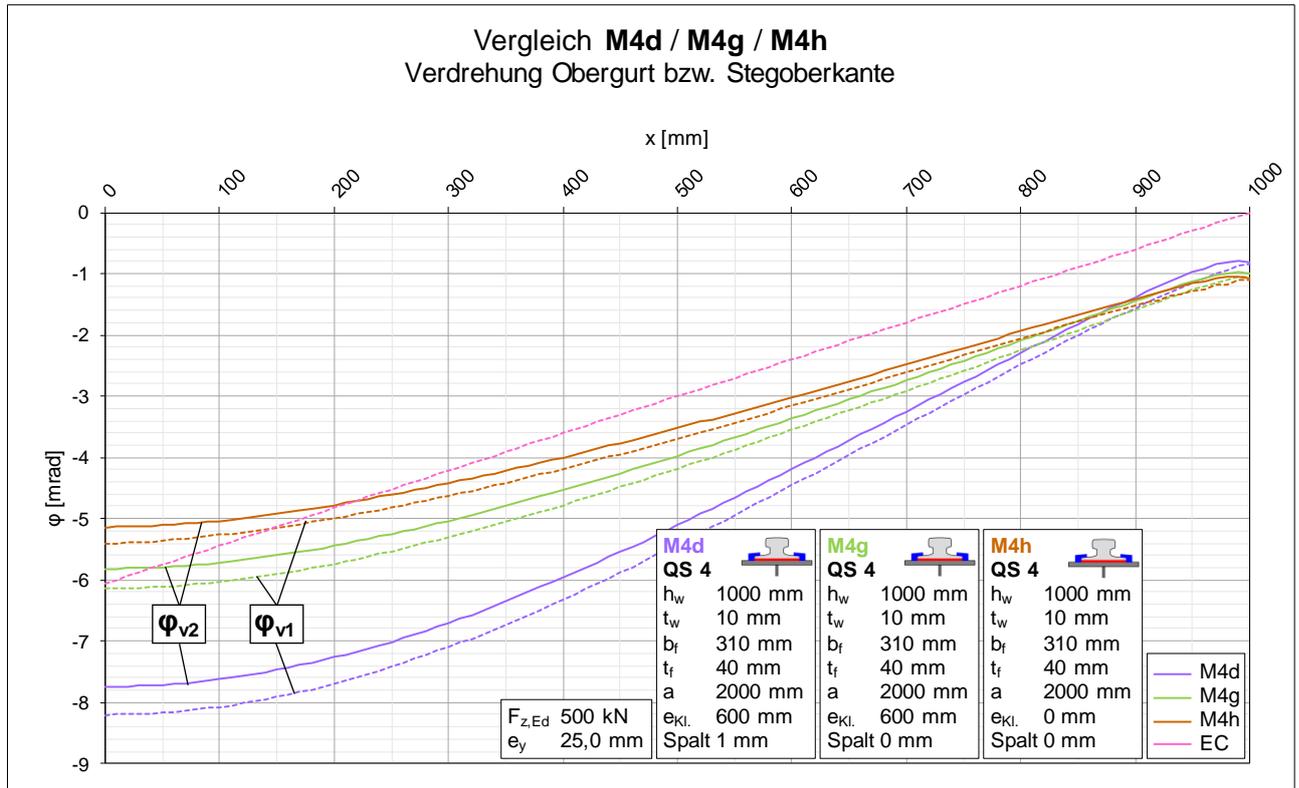


Diagramm 78: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M4

B Profilschiene A 55 / Modelle M5 - M10

In Anhang B werden jene Spannungs- und Verdrehungsverläufe der Modelle M5 bis M10 dargestellt, die im Hauptteil der Arbeit nicht abgebildet sind.

Die folgenden Diagramme zeigen einerseits die Verläufe der lokalen vertikalen Druck- bzw. Biegespannungen, wobei jeweils zwei oder drei Varianten des betrachteten Modells verglichen werden.

Andererseits sind in den Diagrammen die Verläufe der Verdrehung des Obergurts bzw. der Stegoberkante abgebildet, auch hier werden jeweils Vergleiche zwischen zwei oder drei Varianten gezogen.

Wie in Kap. 5 beschrieben, können damit Einflüsse der elastischen Unterlage, der Schienenklemmen bzw. der Klemmen mit elastischer Unterlage hervorgehoben werden.

B.1 Modell M5 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.1.1 Vergleich M5a / M5b ► Einfluss der elastischen Unterlage

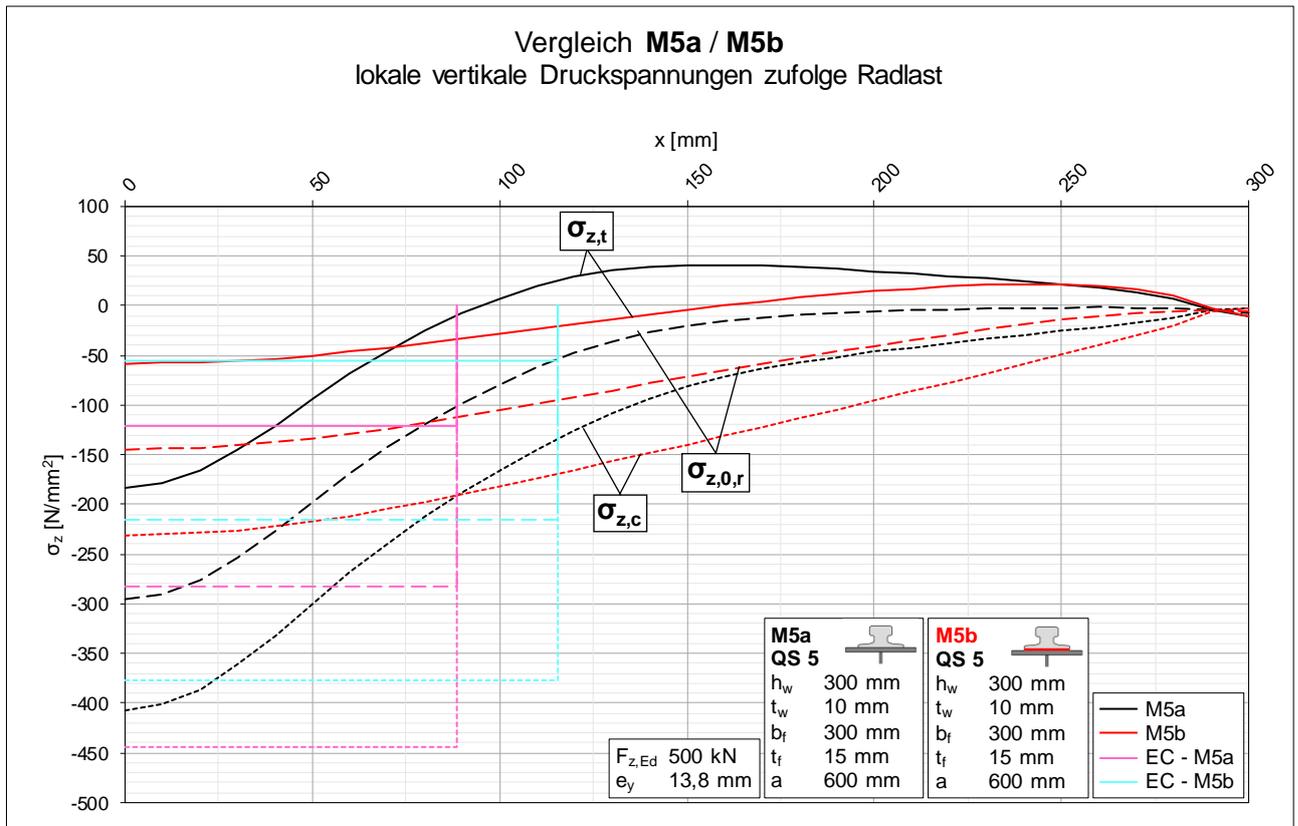


Diagramm 79: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M5

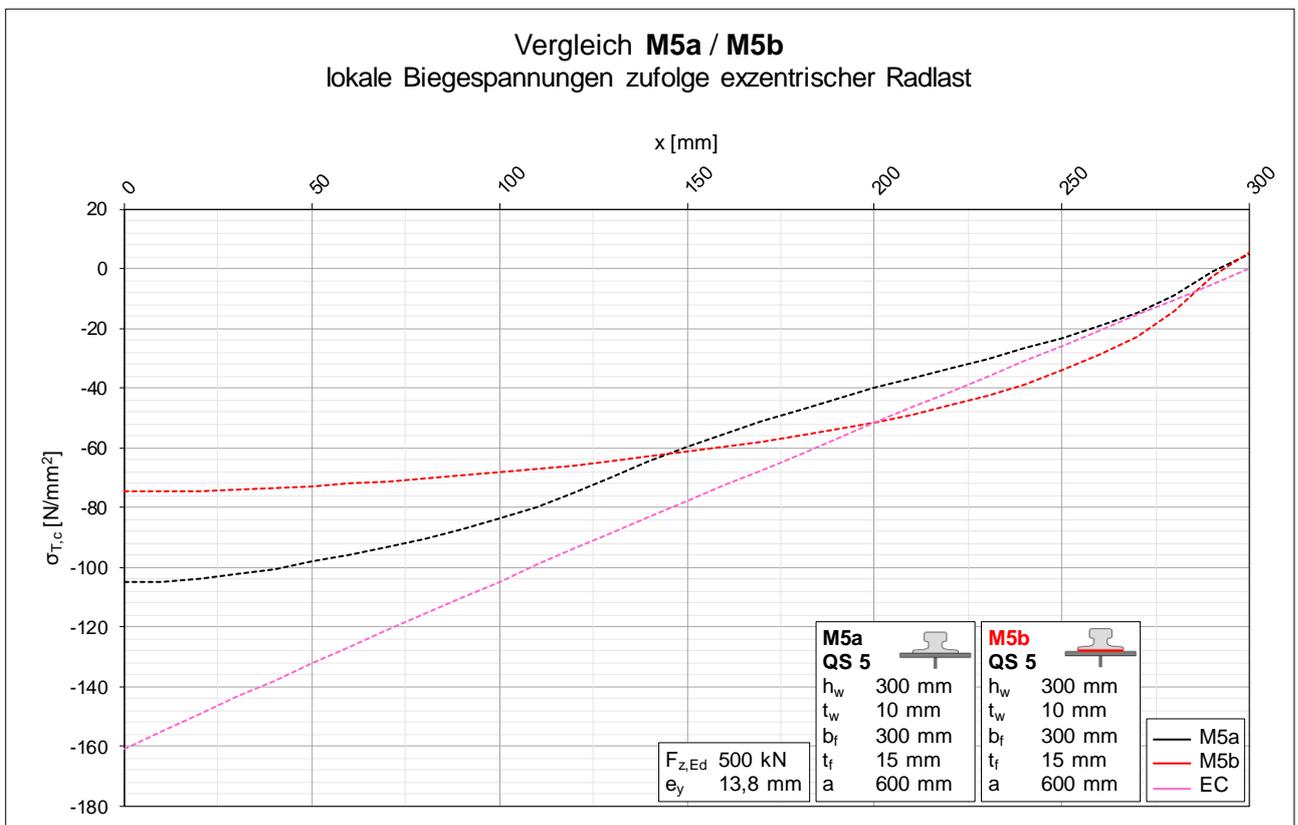


Diagramm 80: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M5

B.1.2 Vergleich M5a / M5c ► Einfluss der Klemmen

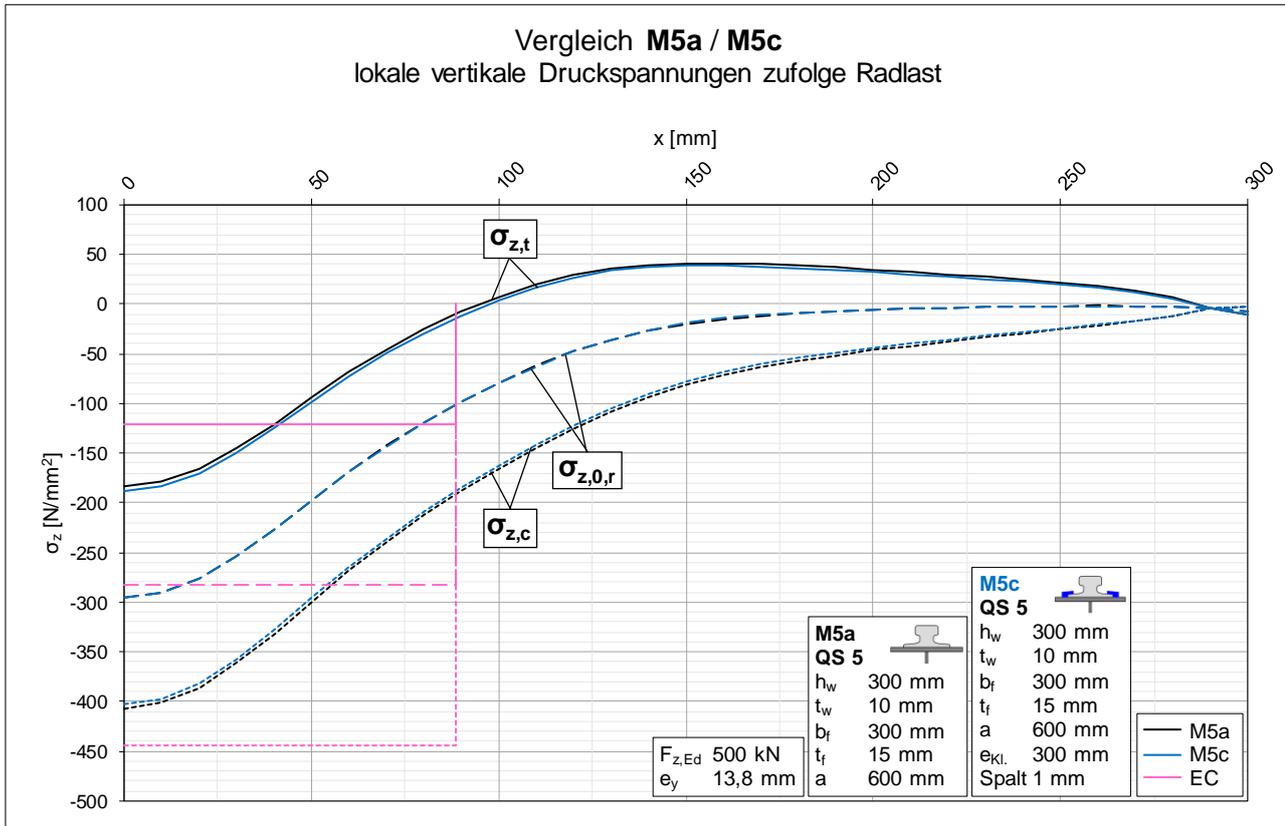


Diagramm 81: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M5

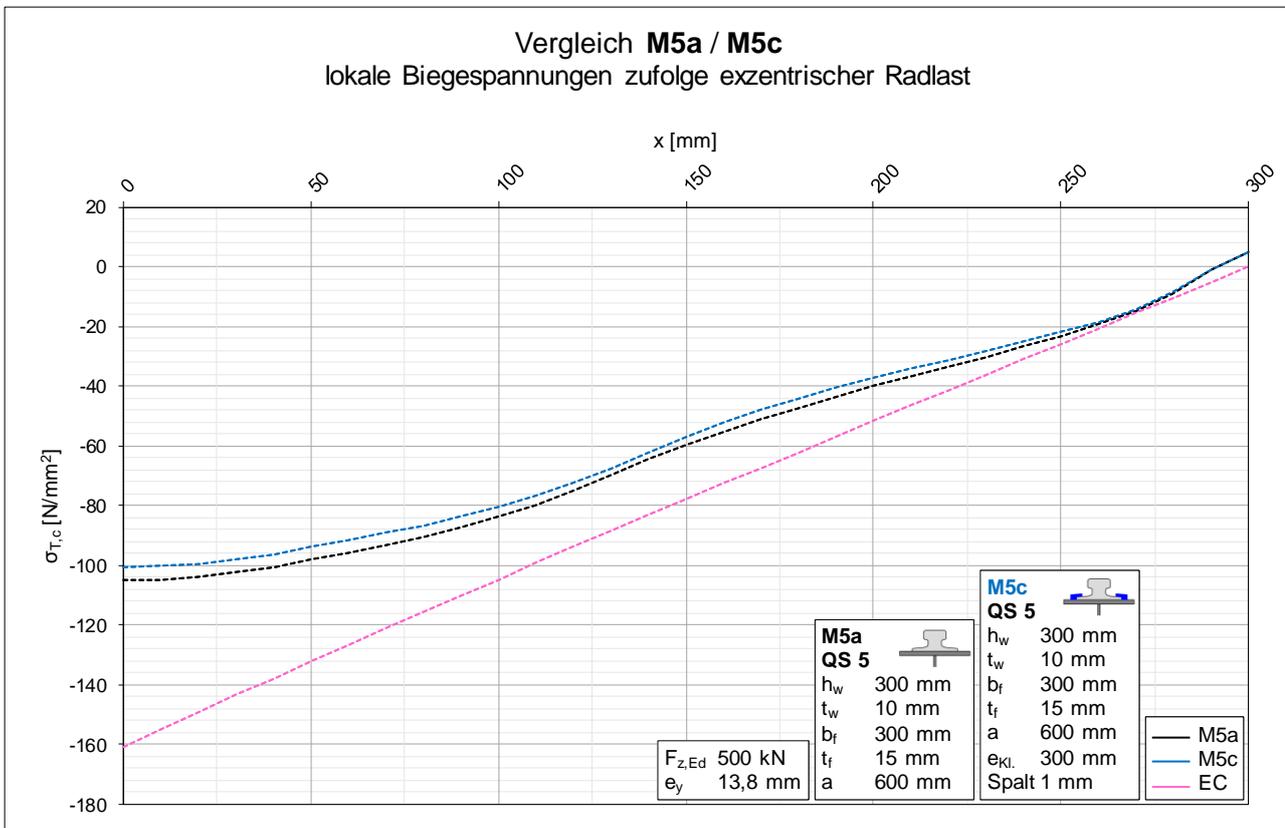


Diagramm 82: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M5

B.1.3 Vergleich M5b / M5d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

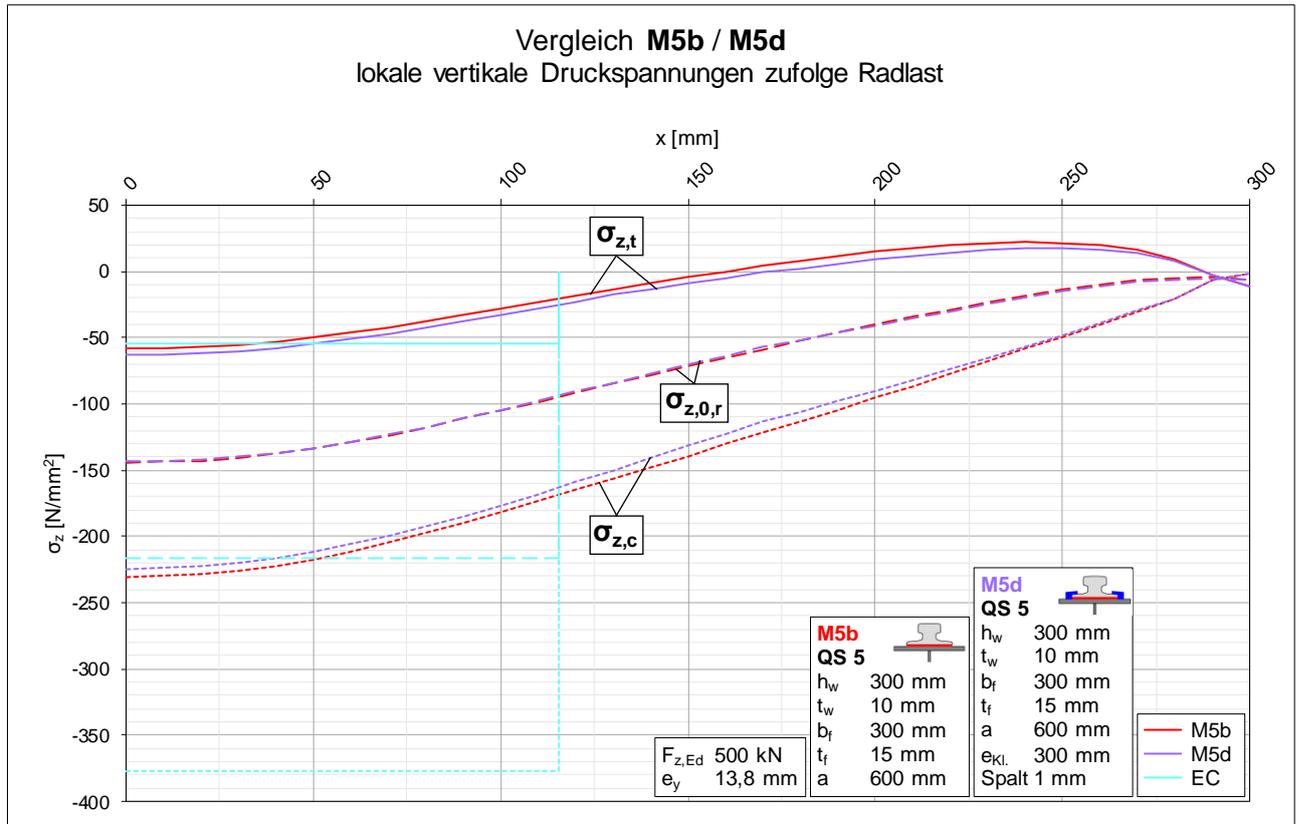


Diagramm 83: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M5

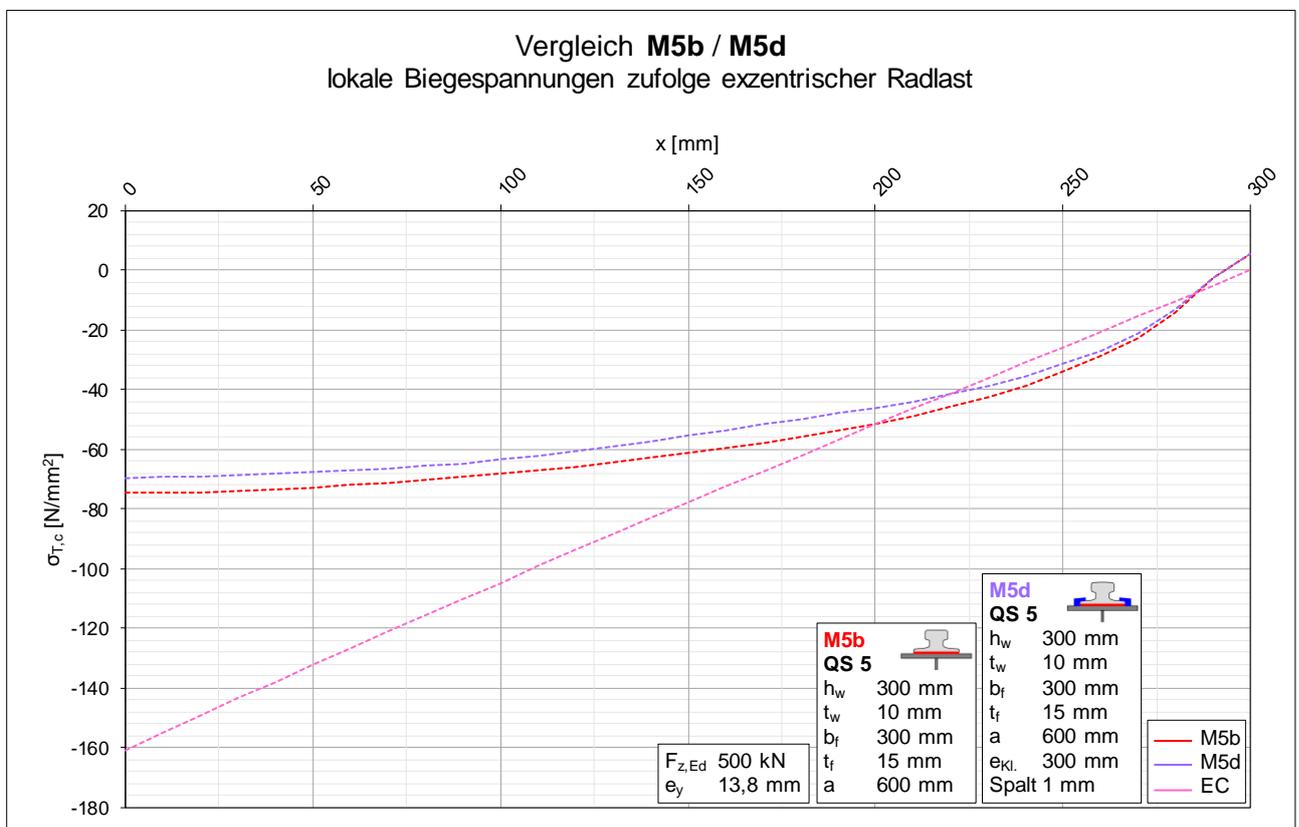


Diagramm 84: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M5

B.1.4 Vergleich M5c / M5e / M5f ► Klemmen ohne Spalt

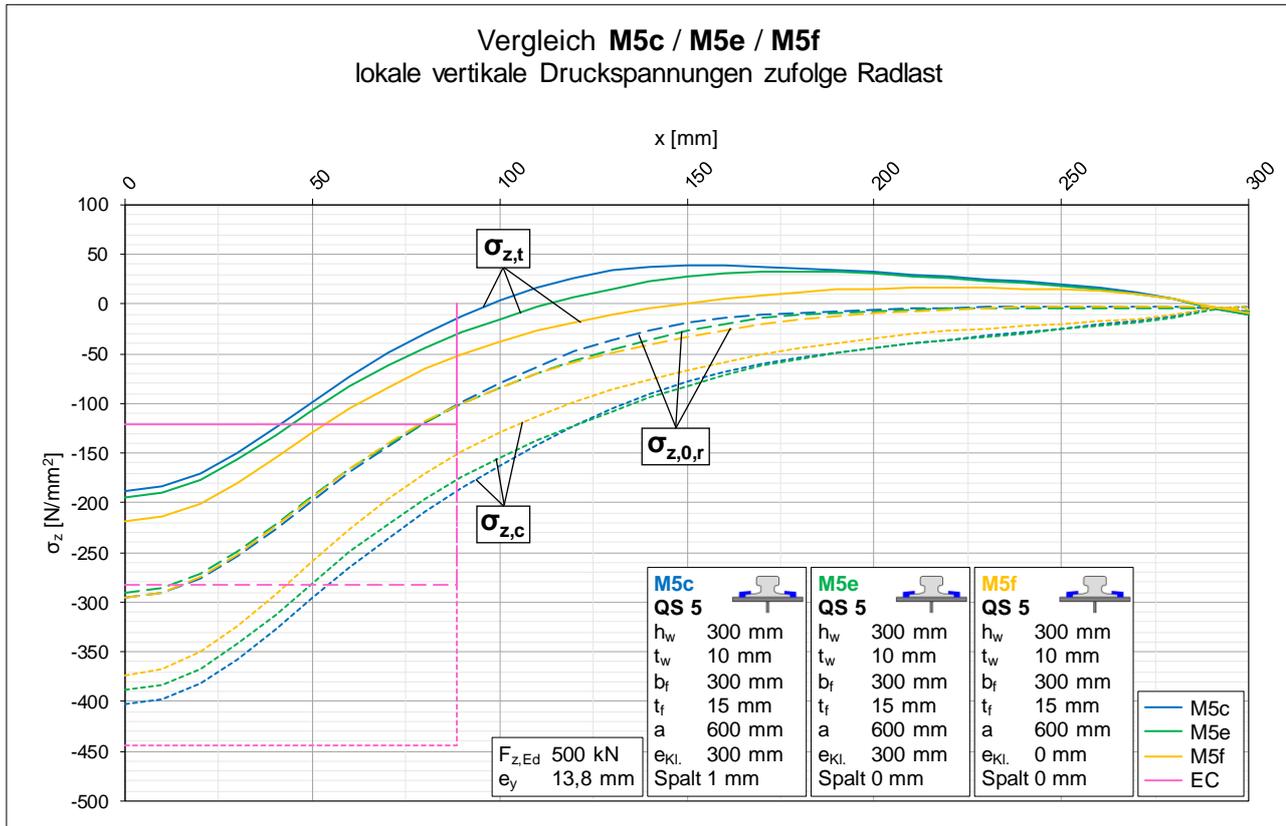


Diagramm 85: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M5

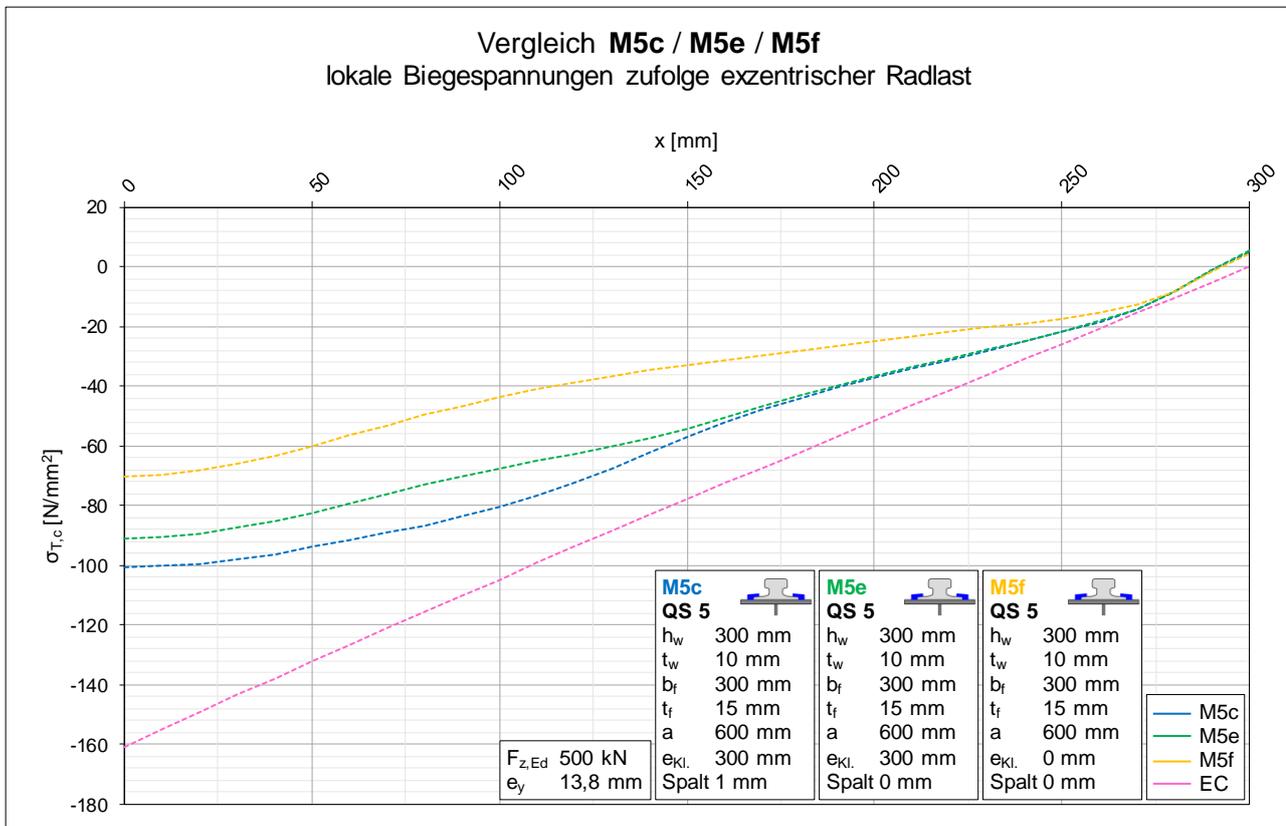


Diagramm 86: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M5

B.1.5 Vergleich M5d / M5g / M5h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

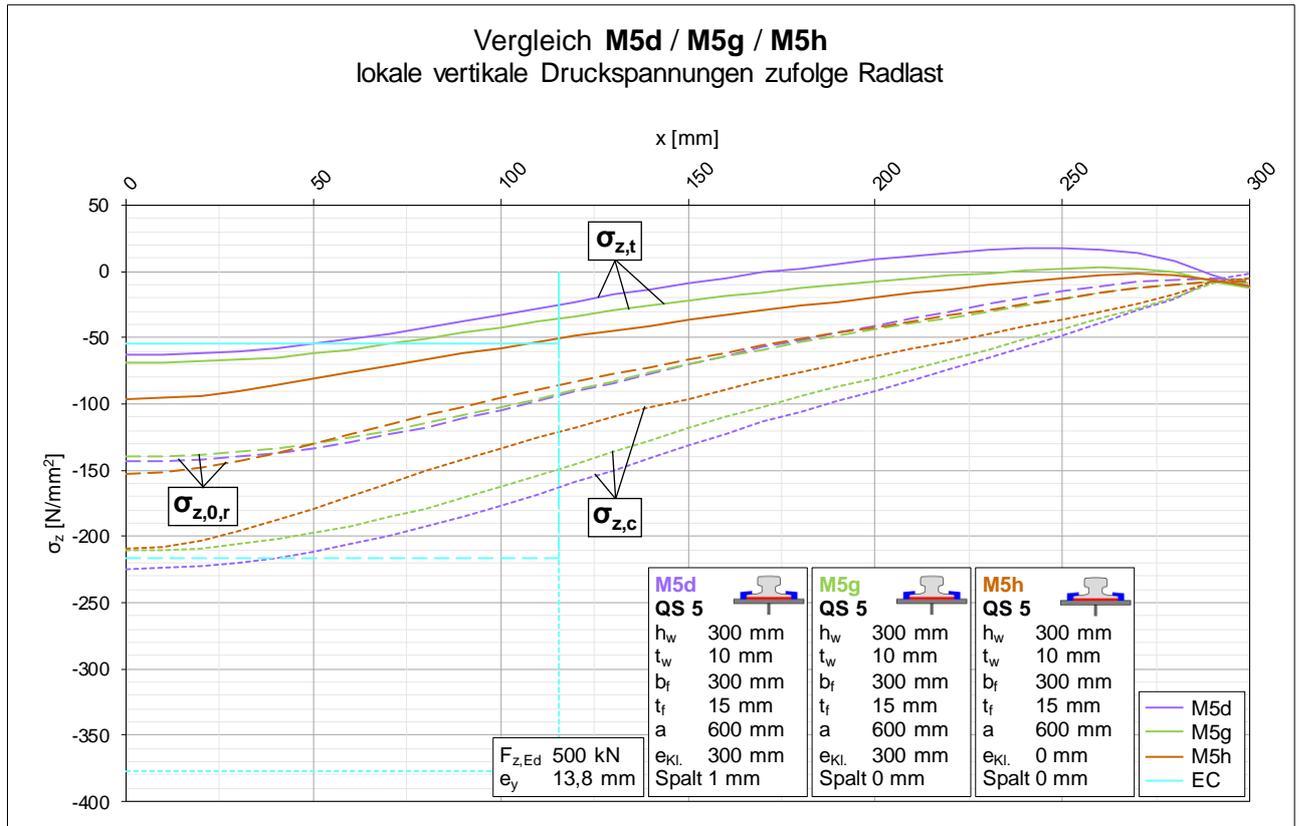


Diagramm 87: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M5

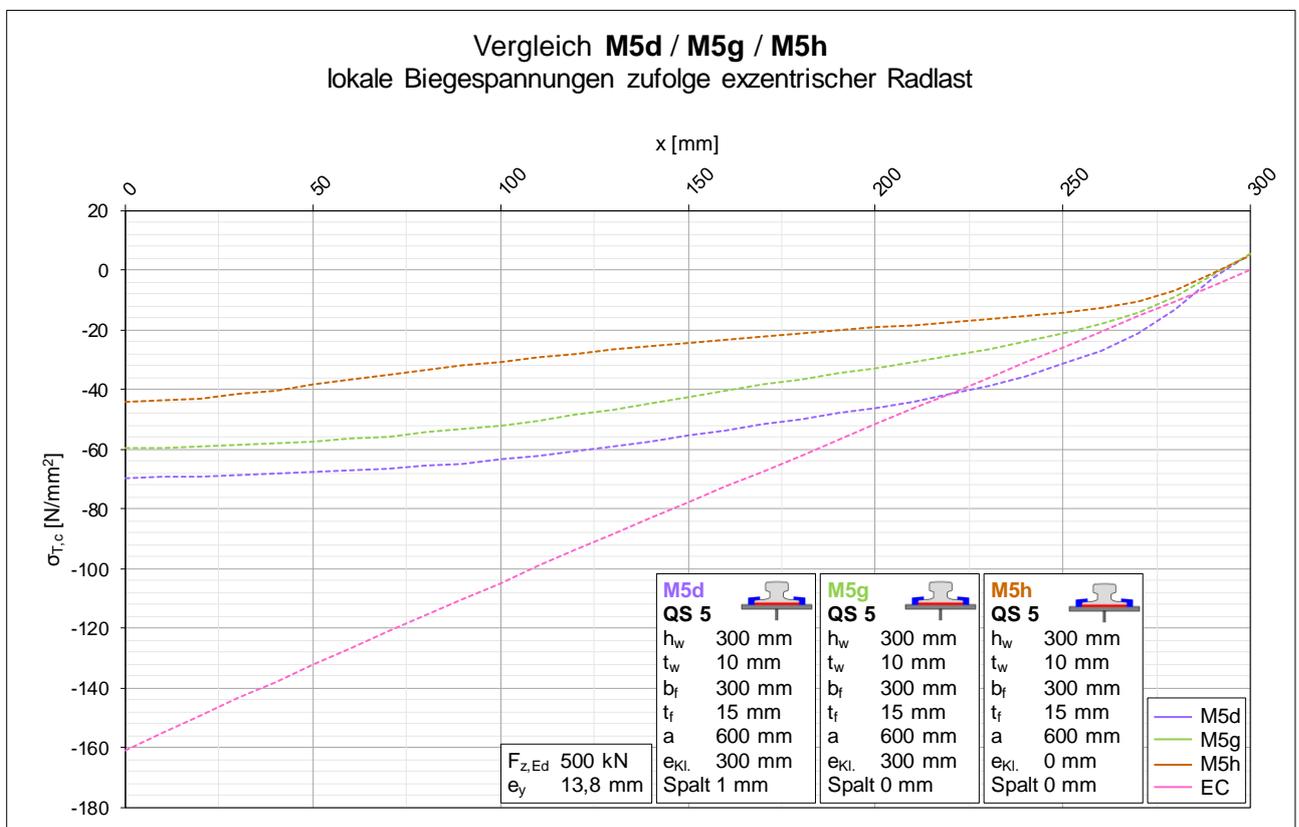


Diagramm 88: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M5

B.2 Modell M5 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.2.1 Vergleich M5a / M5b ► Einfluss der elastischen Unterlage

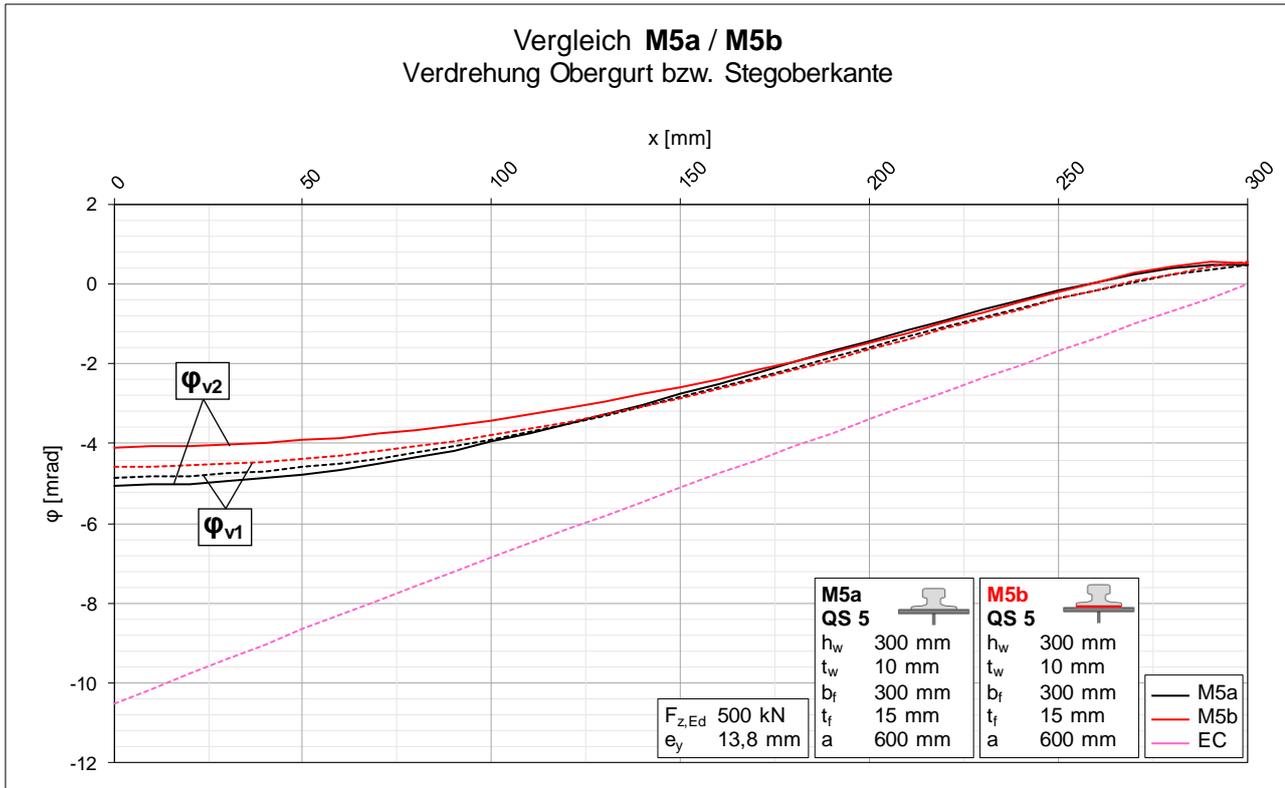


Diagramm 89: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M5

B.2.2 Vergleich M5a / M5c ► Einfluss der Klemmen

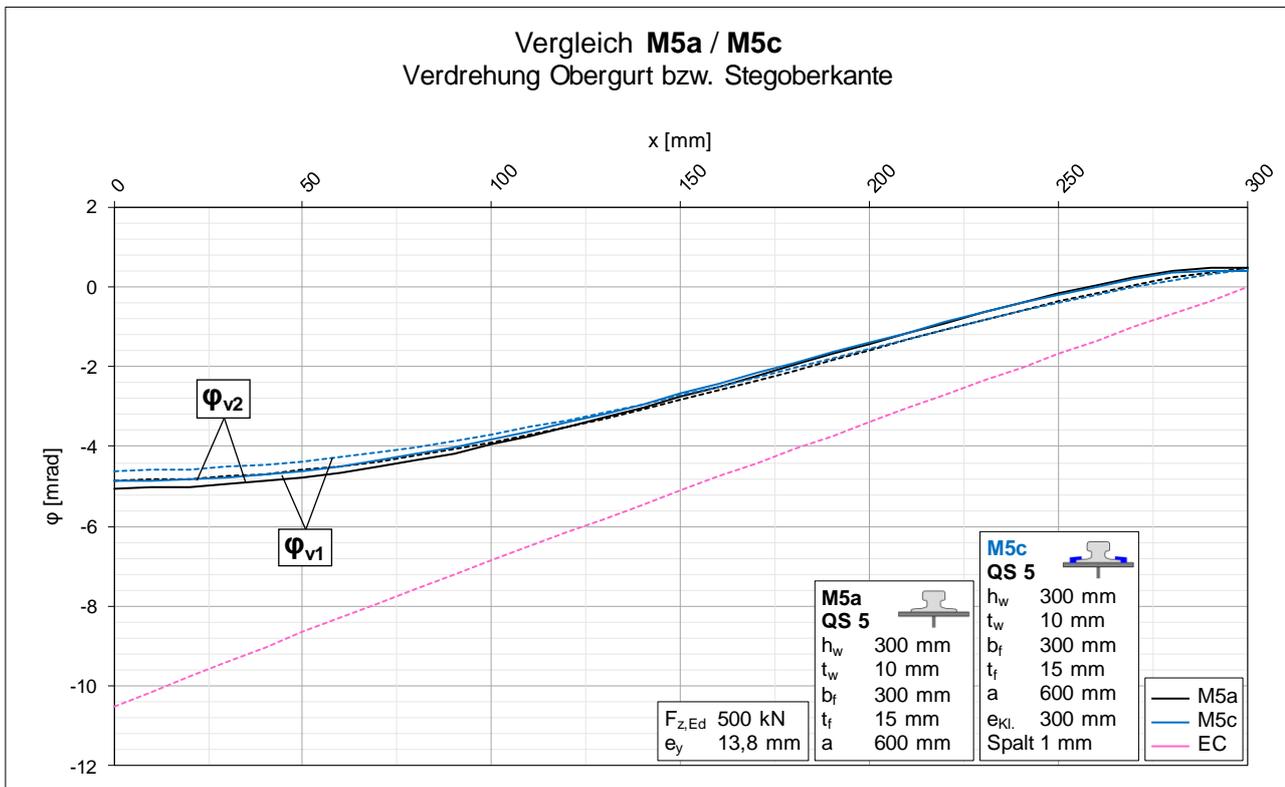


Diagramm 90: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M5

B.2.3 Vergleich M5b / M5d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

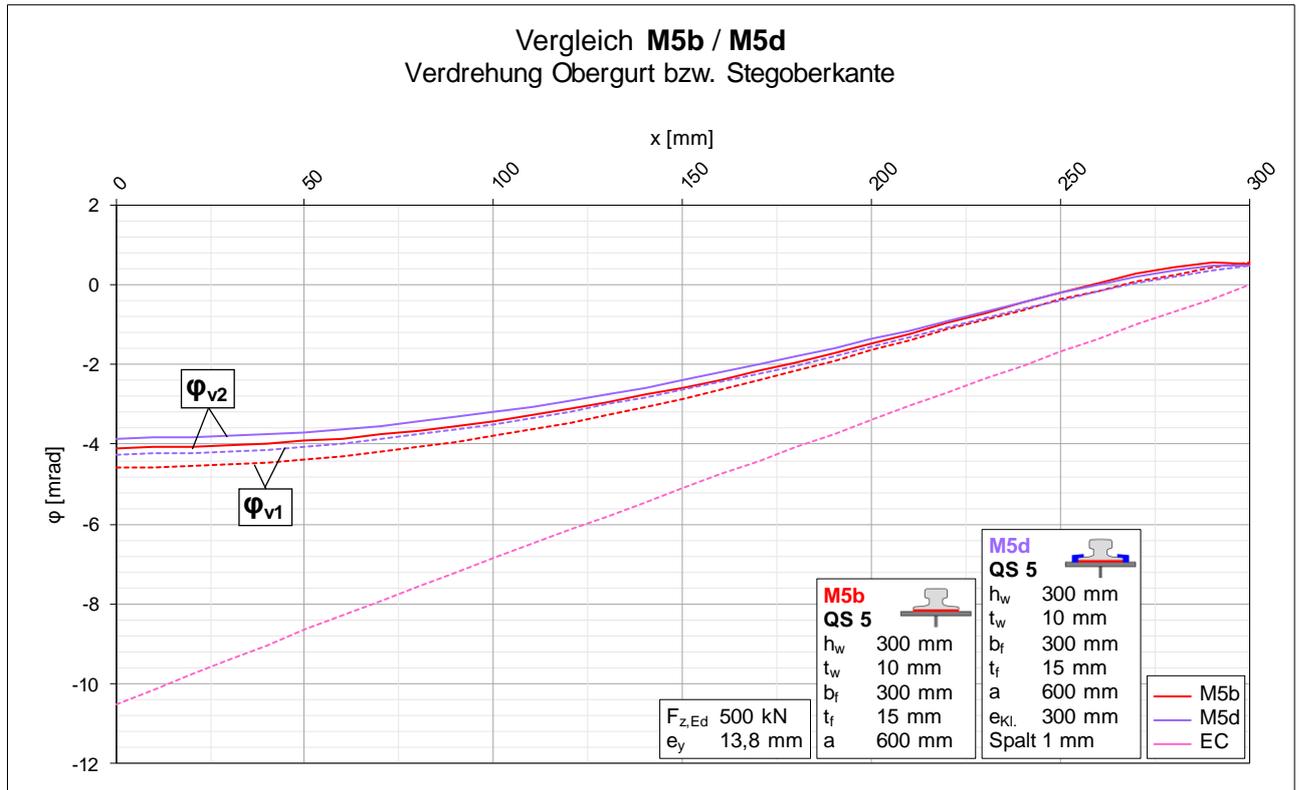


Diagramm 91: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M5

B.2.4 Vergleich M5c / M5e / M5f ► Klemmen ohne Spalt

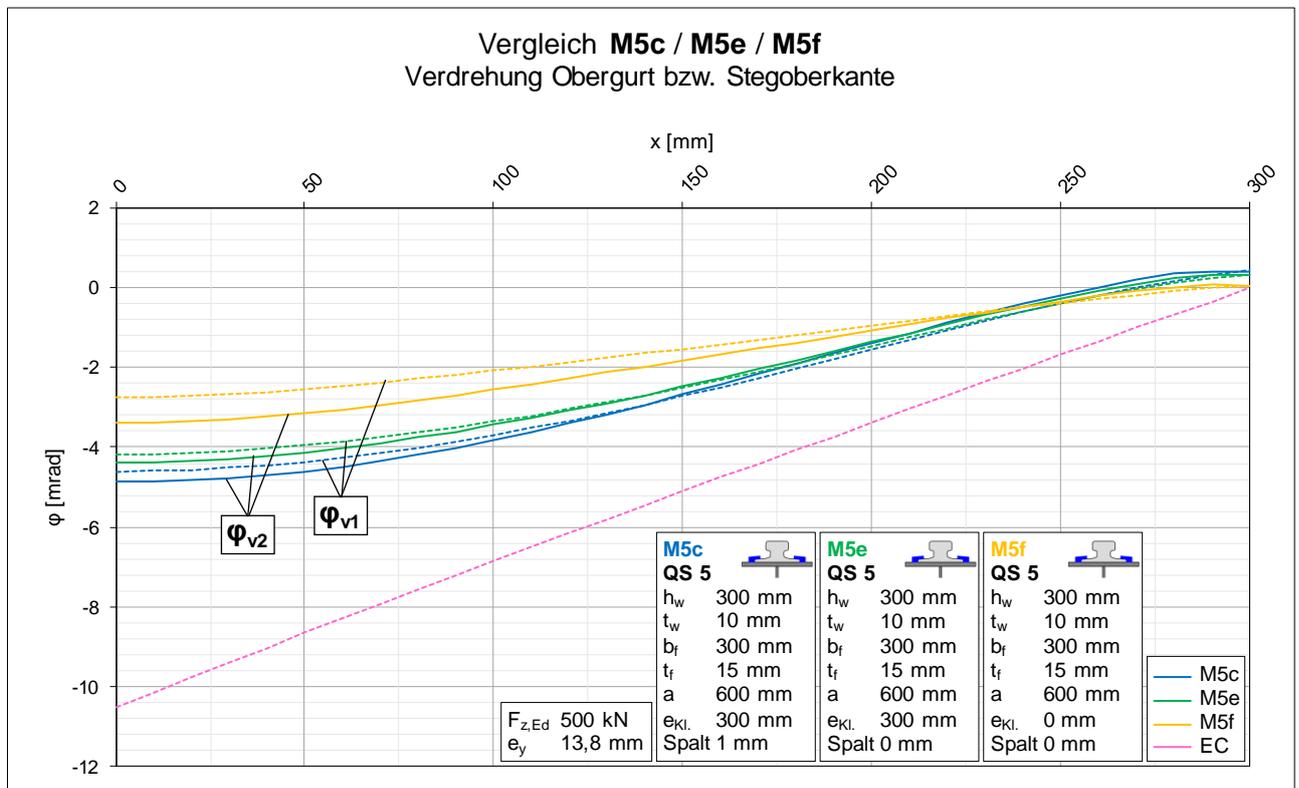


Diagramm 92: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M5

B.2.5 Vergleich M5d / M5g / M5h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

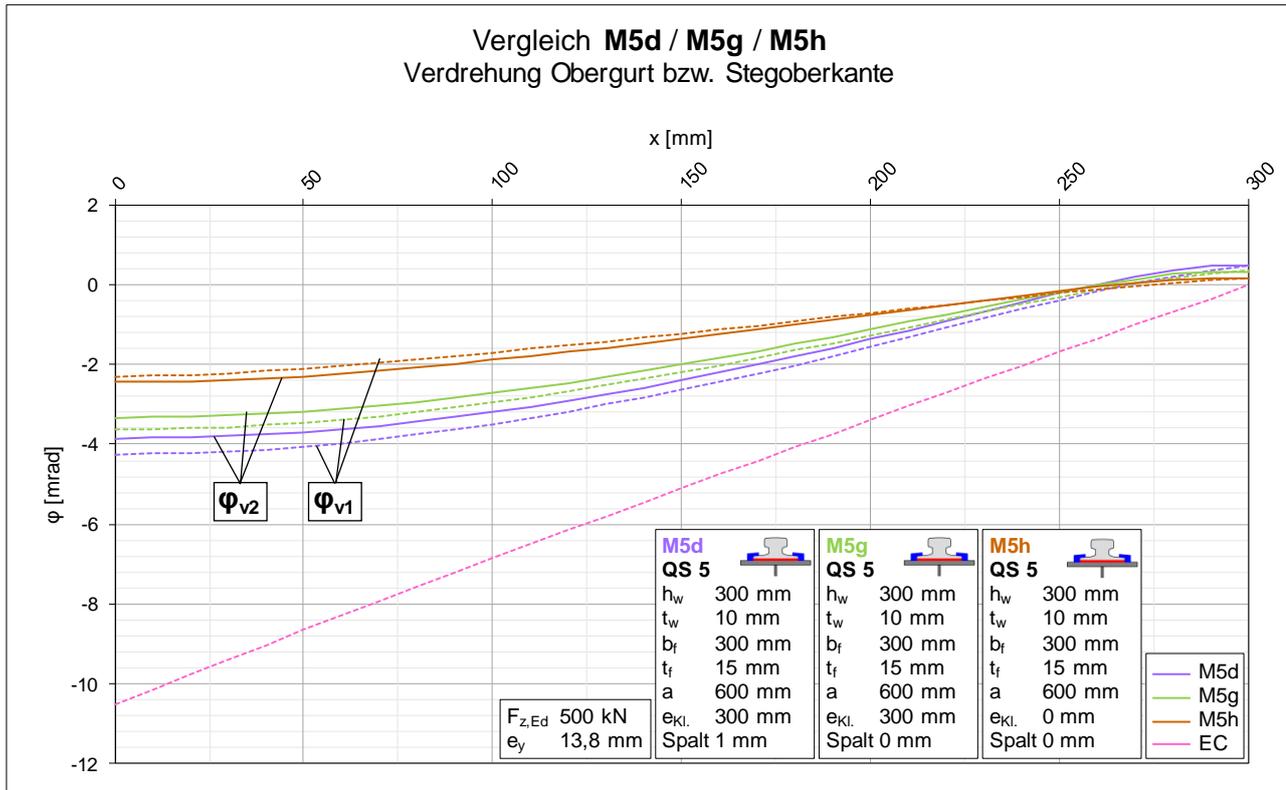


Diagramm 93: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M5

B.3 Modell M6 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.3.1 Vergleich M6a / M6b ► Einfluss der elastischen Unterlage

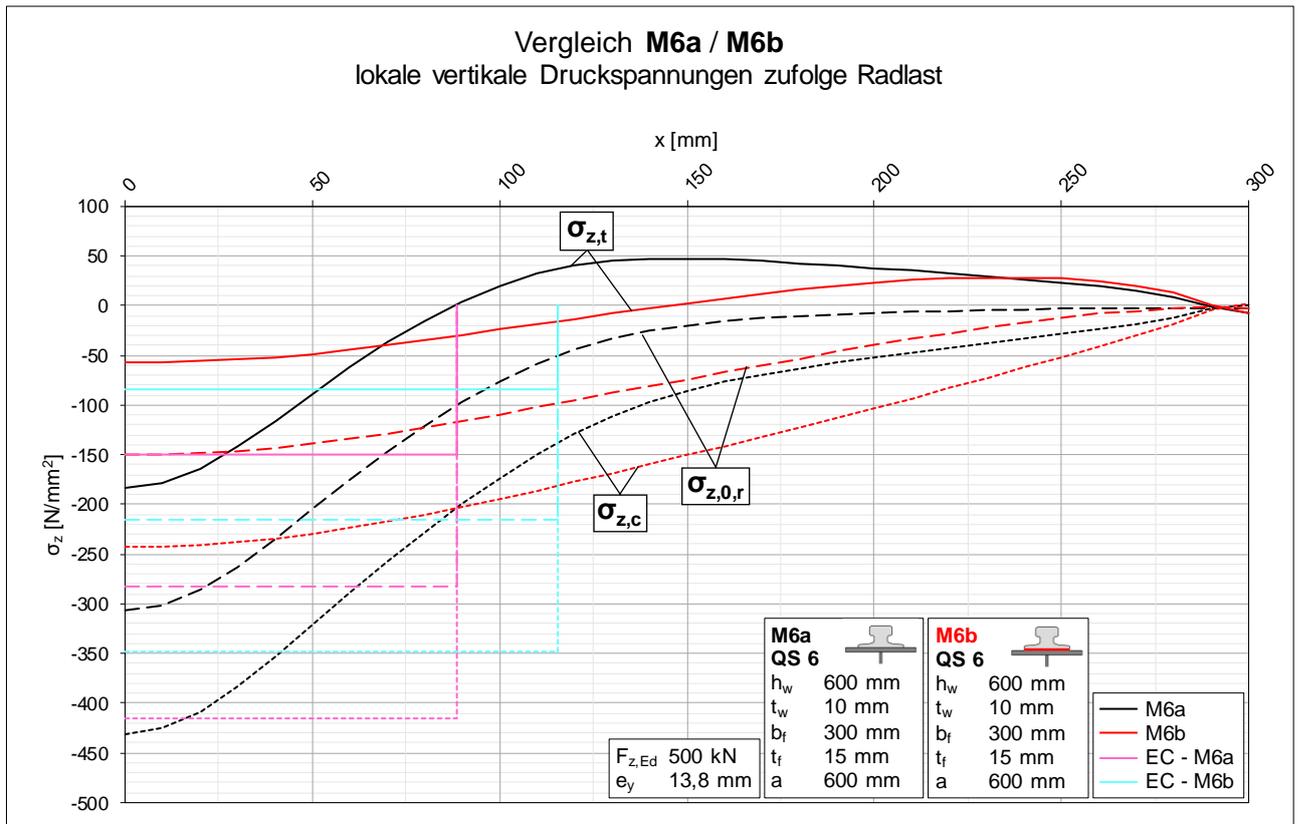


Diagramm 94: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M6

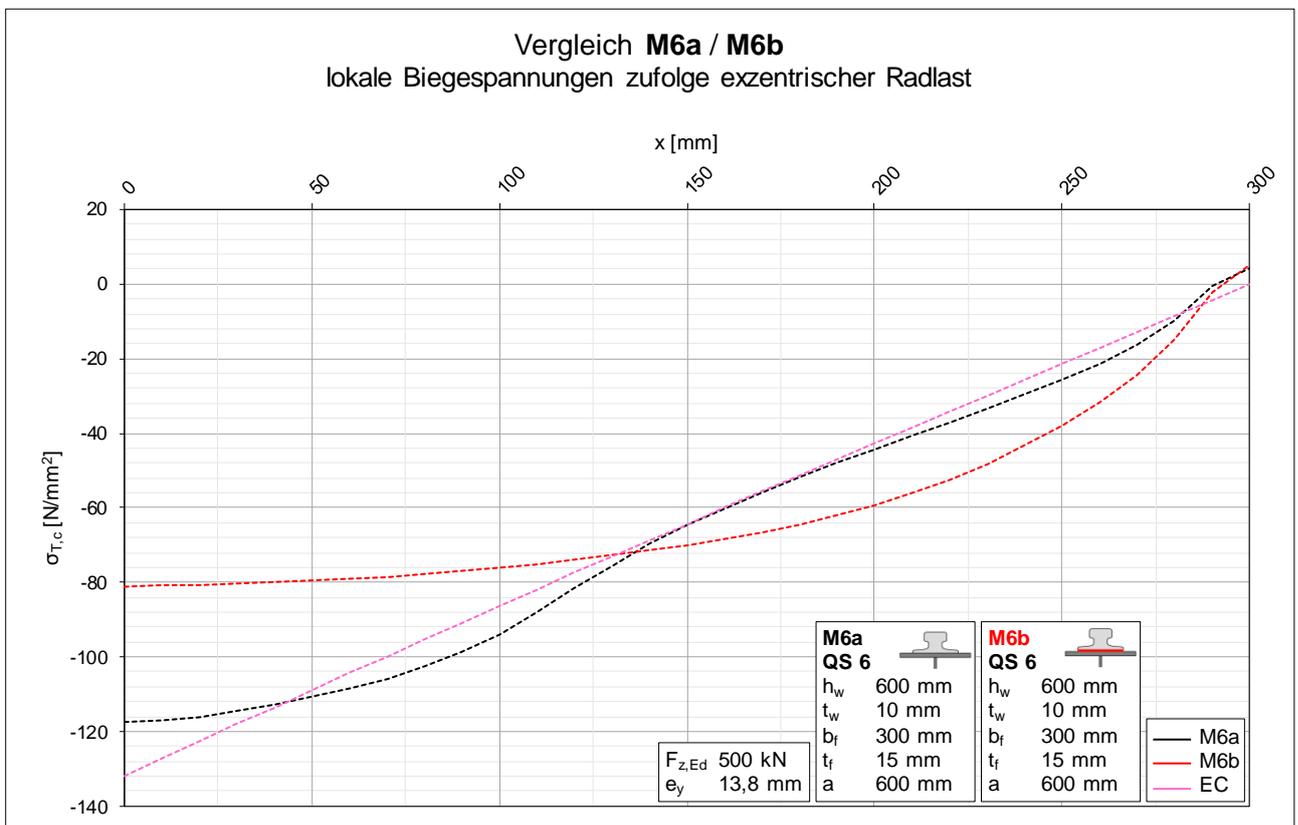


Diagramm 95: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M6

B.3.2 Vergleich M6a / M6c ► Einfluss der Klemmen

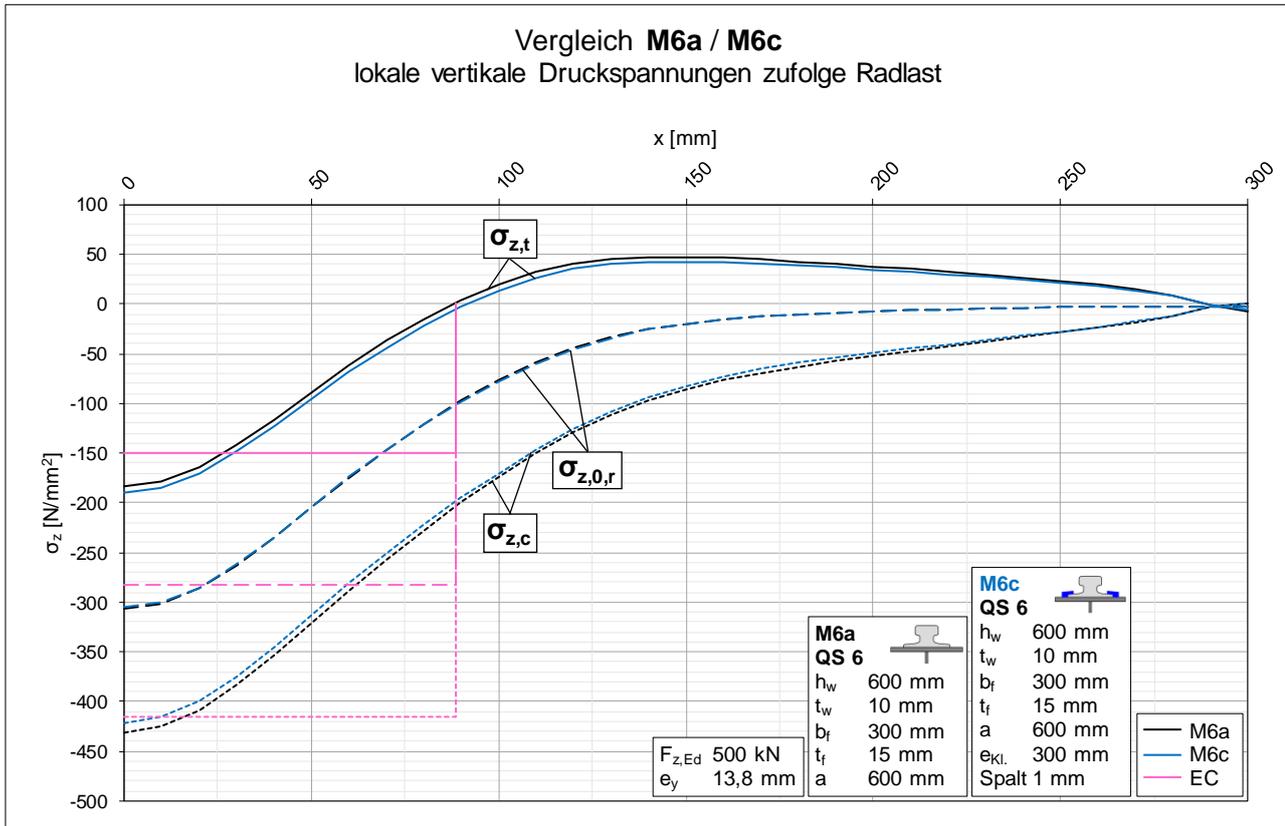


Diagramm 96: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M6

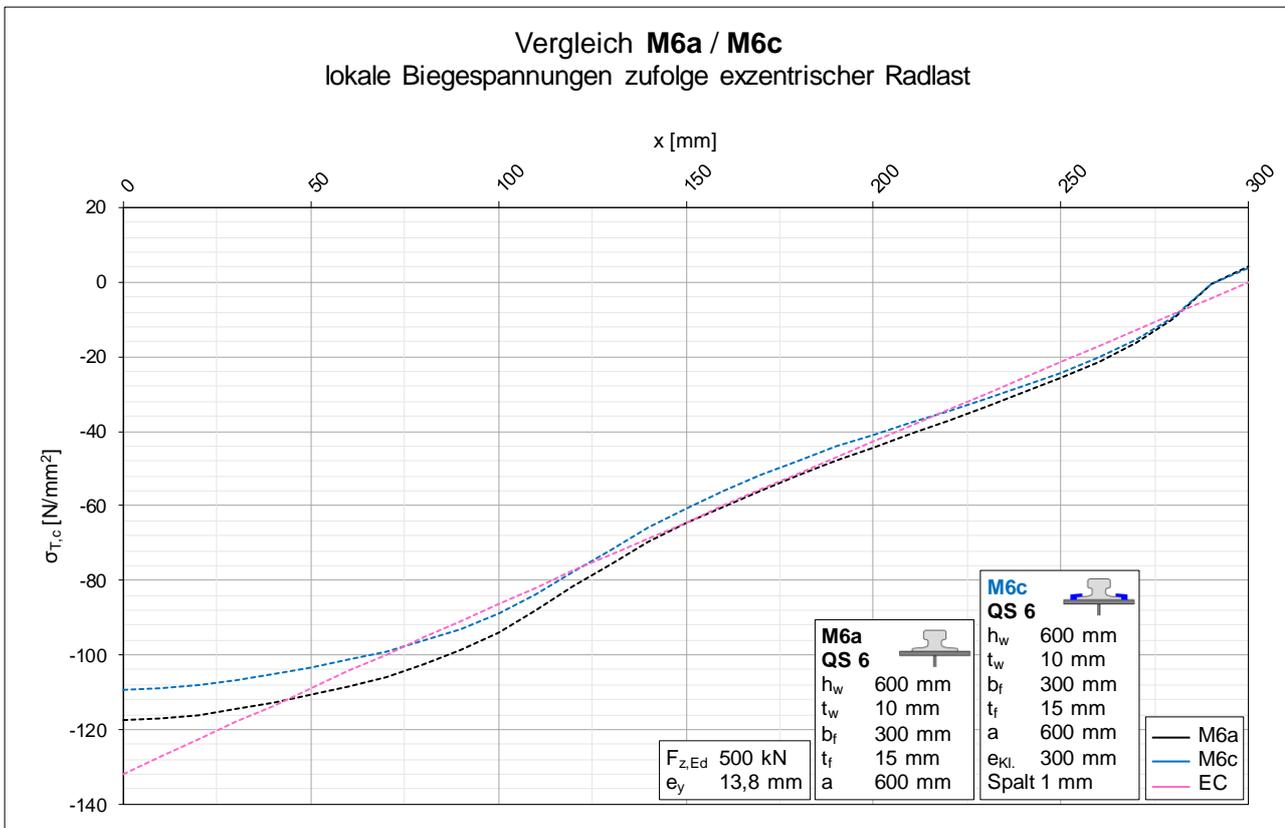


Diagramm 97: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M6

B.3.3 Vergleich M6b / M6d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

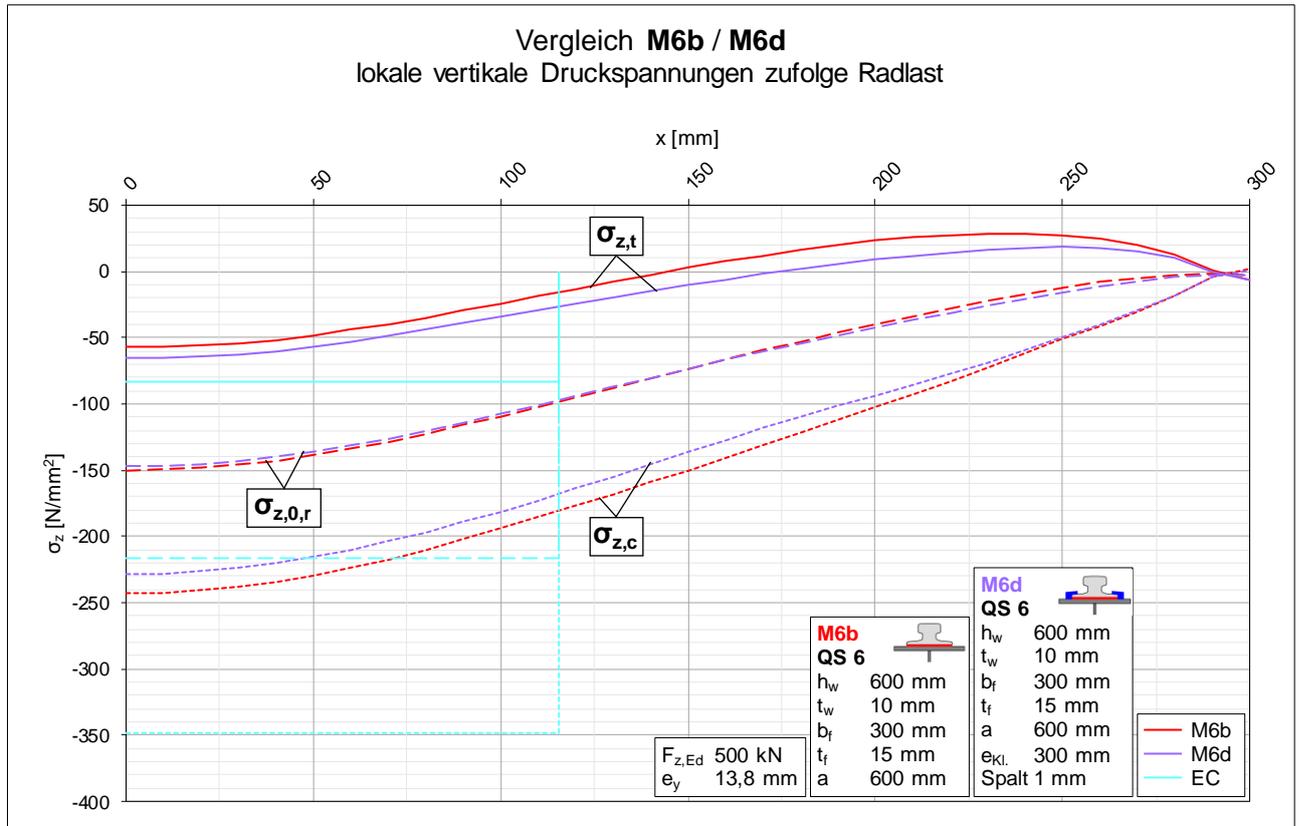


Diagramm 98: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M6

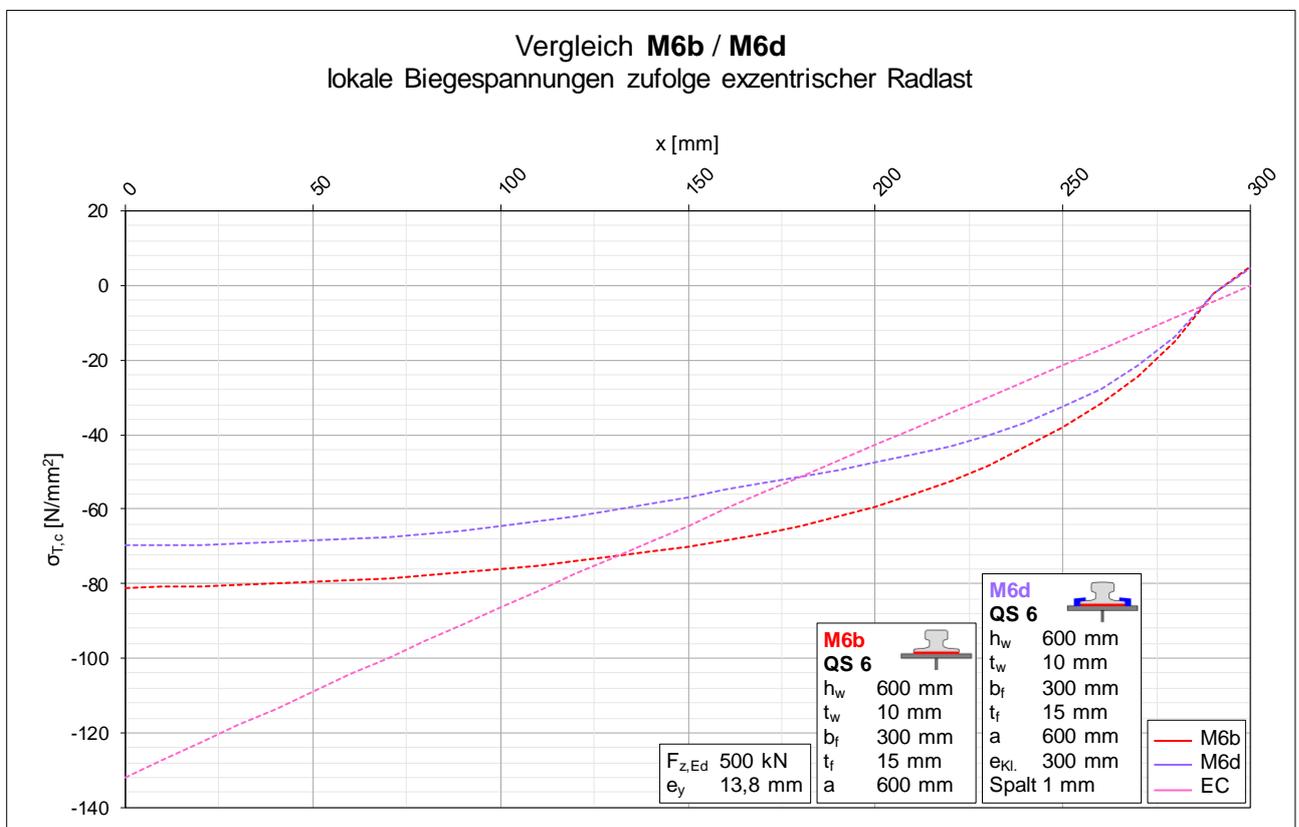


Diagramm 99: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M6

B.3.4 Vergleich M6c / M6e / M6f ► Klemmen ohne Spalt

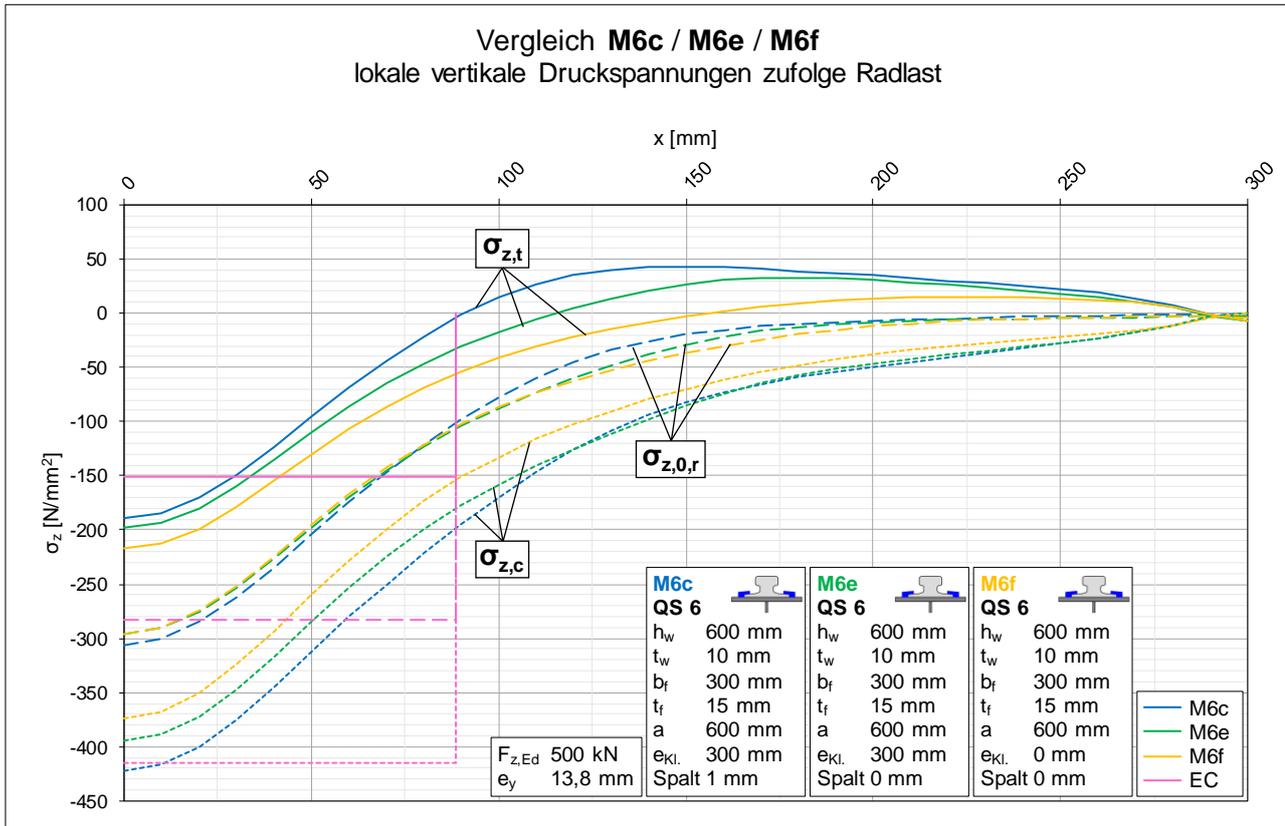


Diagramm 100: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M6

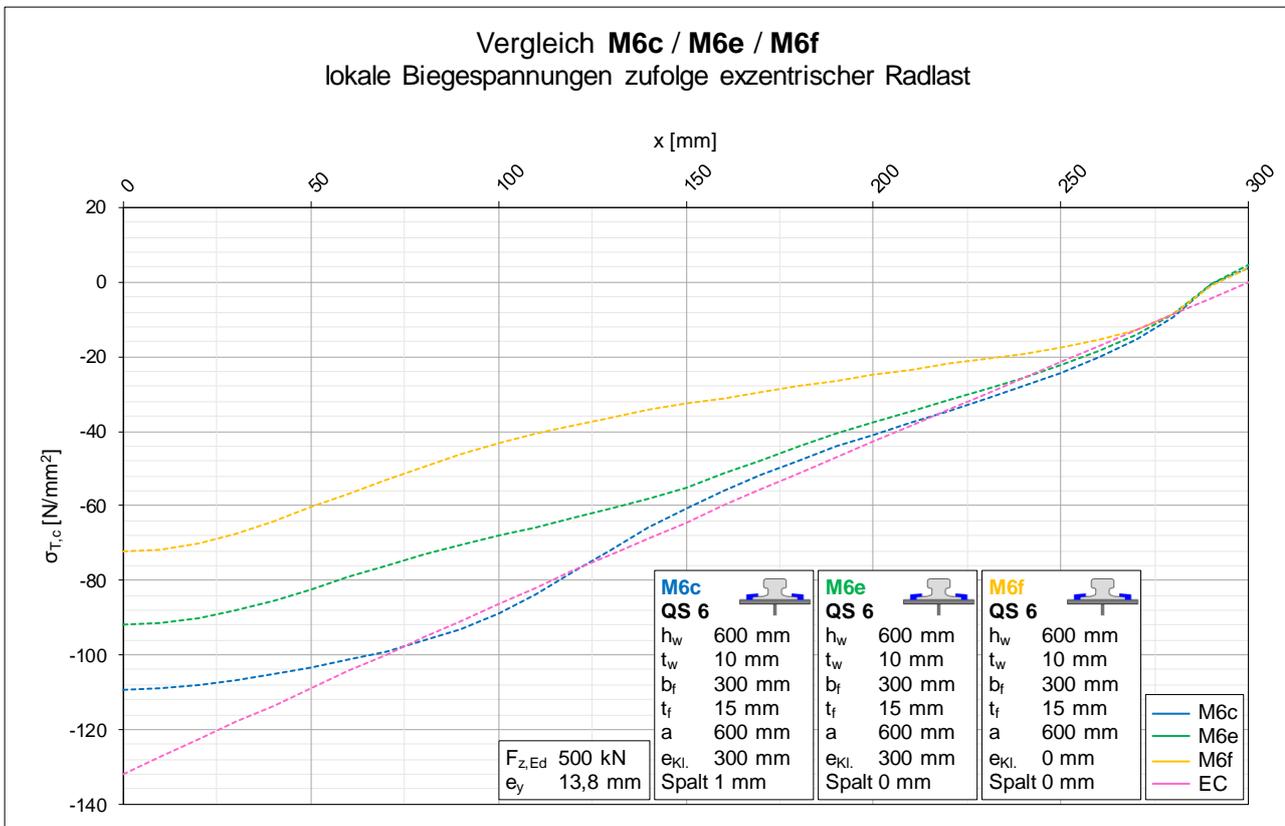


Diagramm 101: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M6

B.3.5 Vergleich M6d / M6g / M6h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

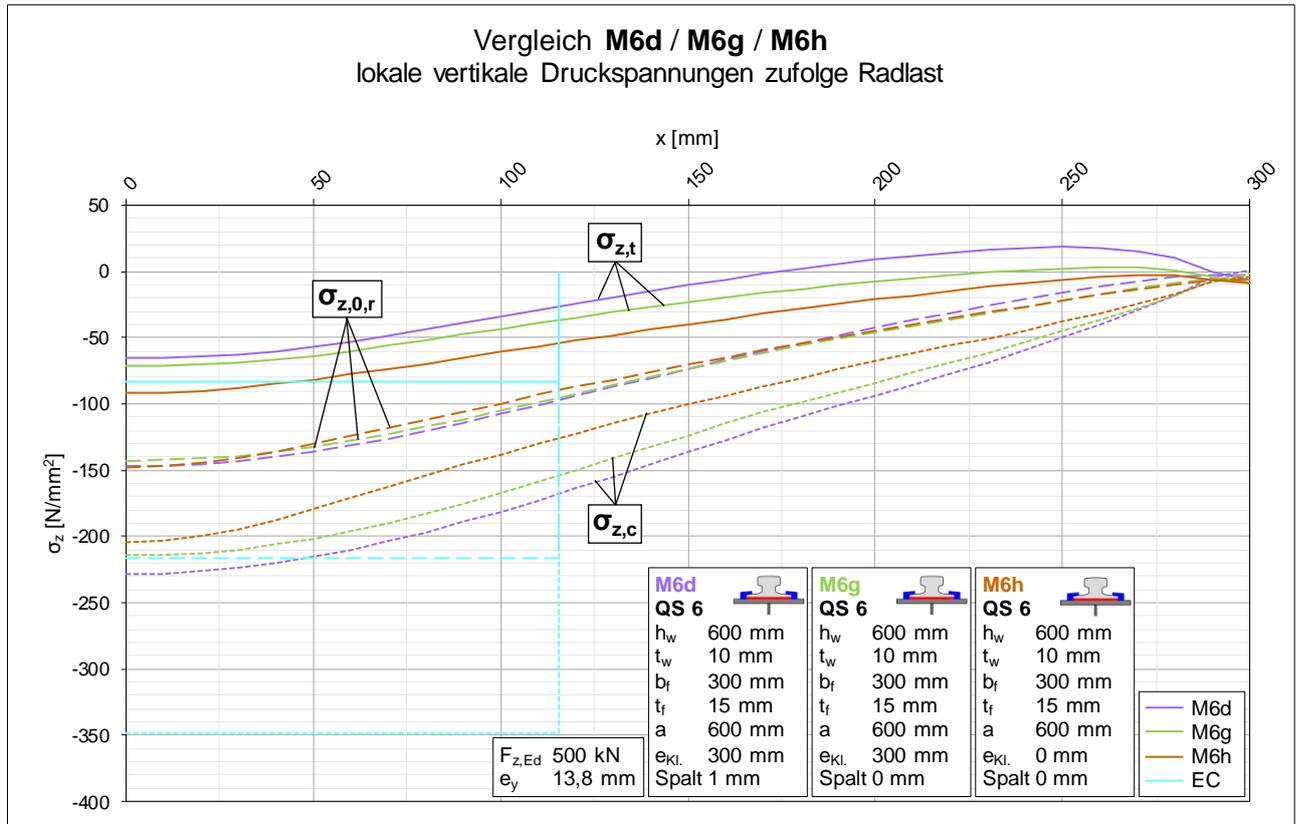


Diagramm 102: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M6

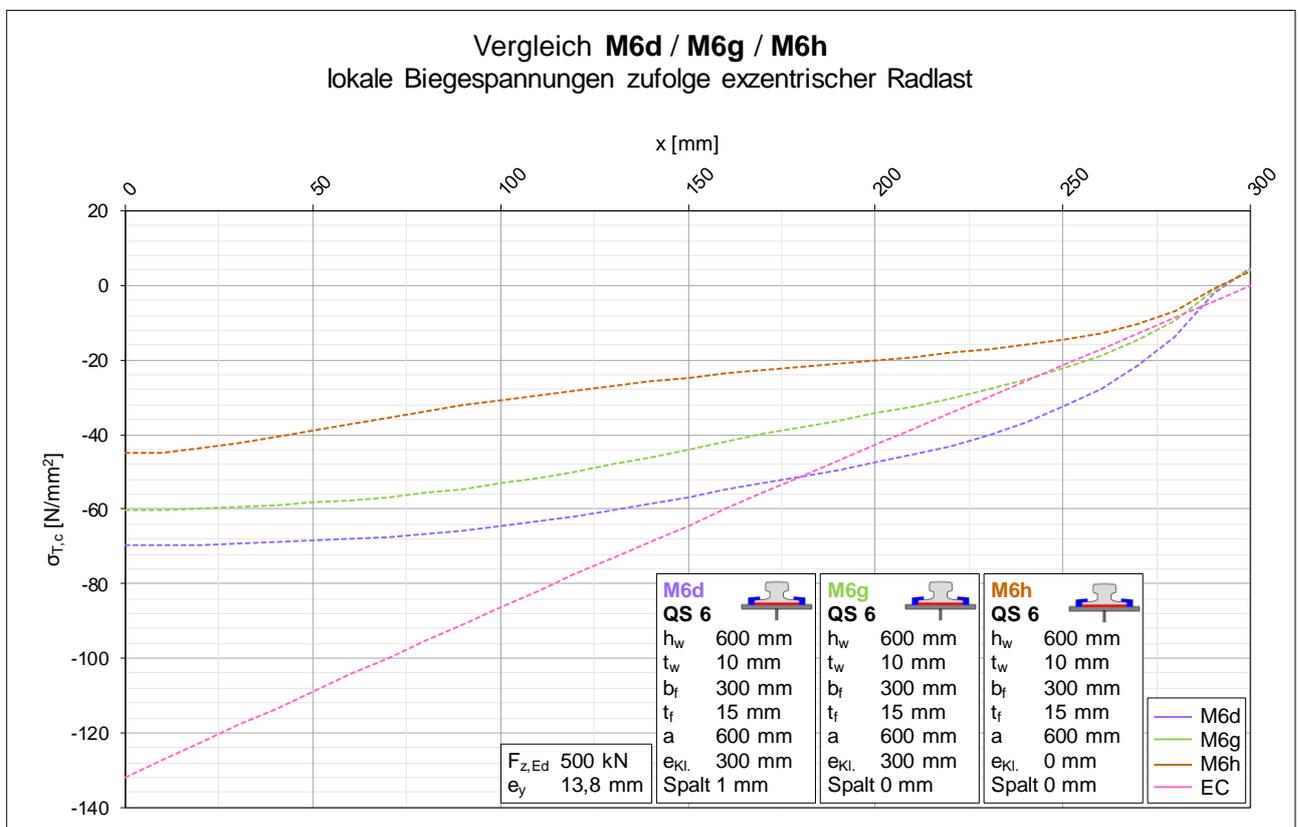


Diagramm 103: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M6

B.4 Modell M6 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.4.1 Vergleich M6a / M6b ► Einfluss der elastischen Unterlage

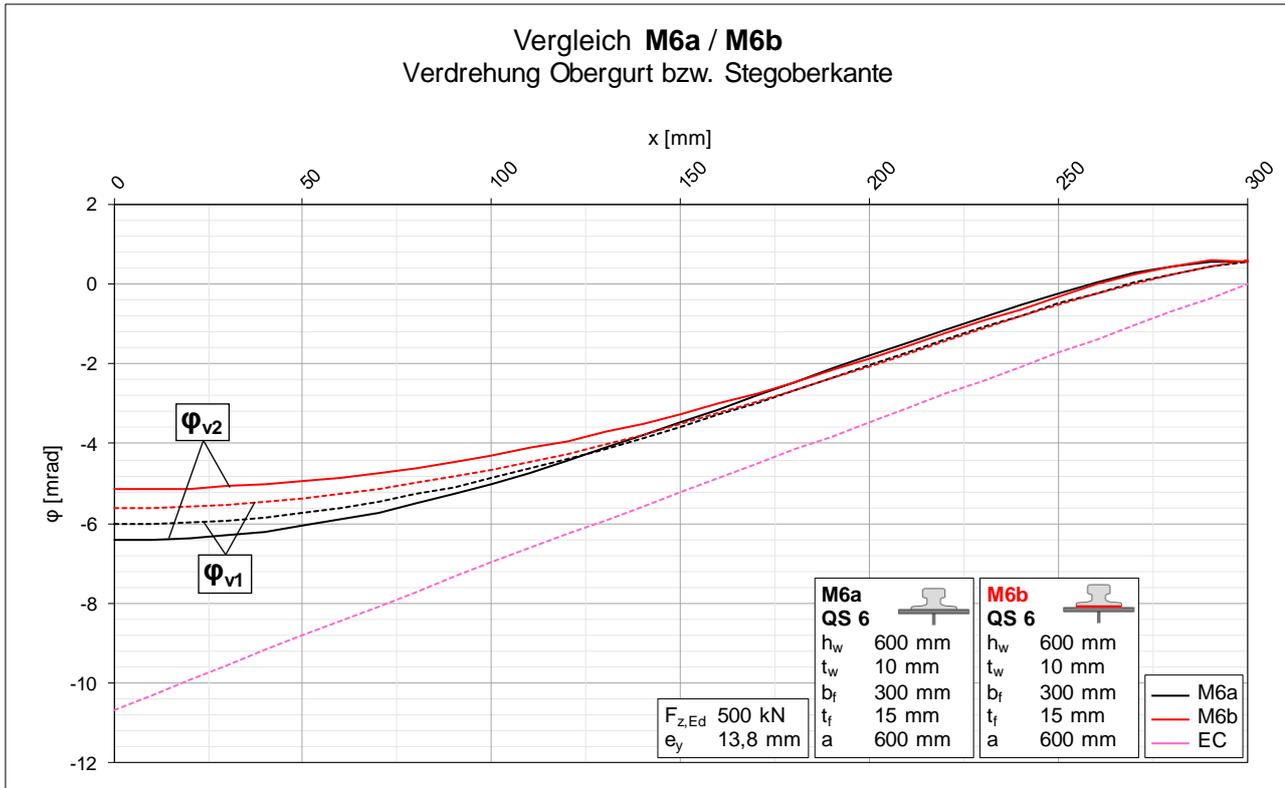


Diagramm 104: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M6

B.4.2 Vergleich M6a / M6c ► Einfluss der Klemmen

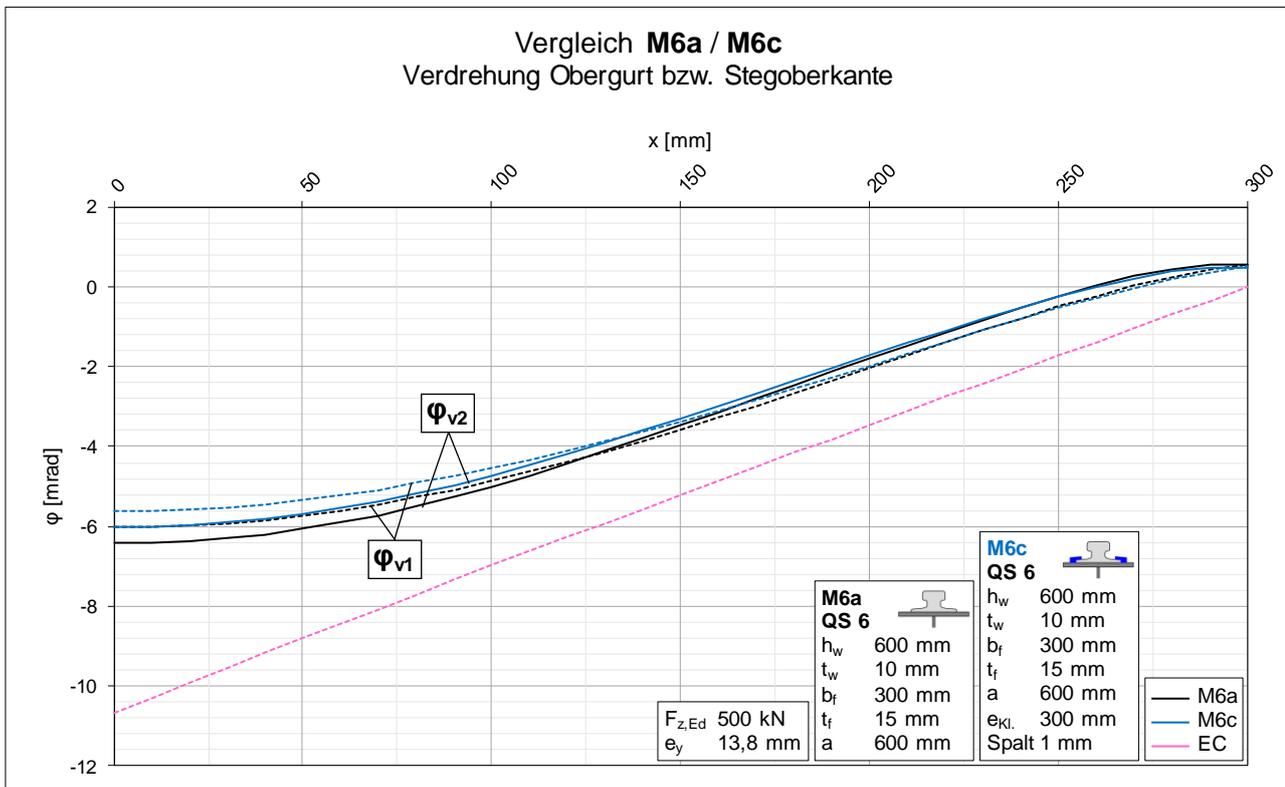


Diagramm 105: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M6

B.4.3 Vergleich M6b / M6d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

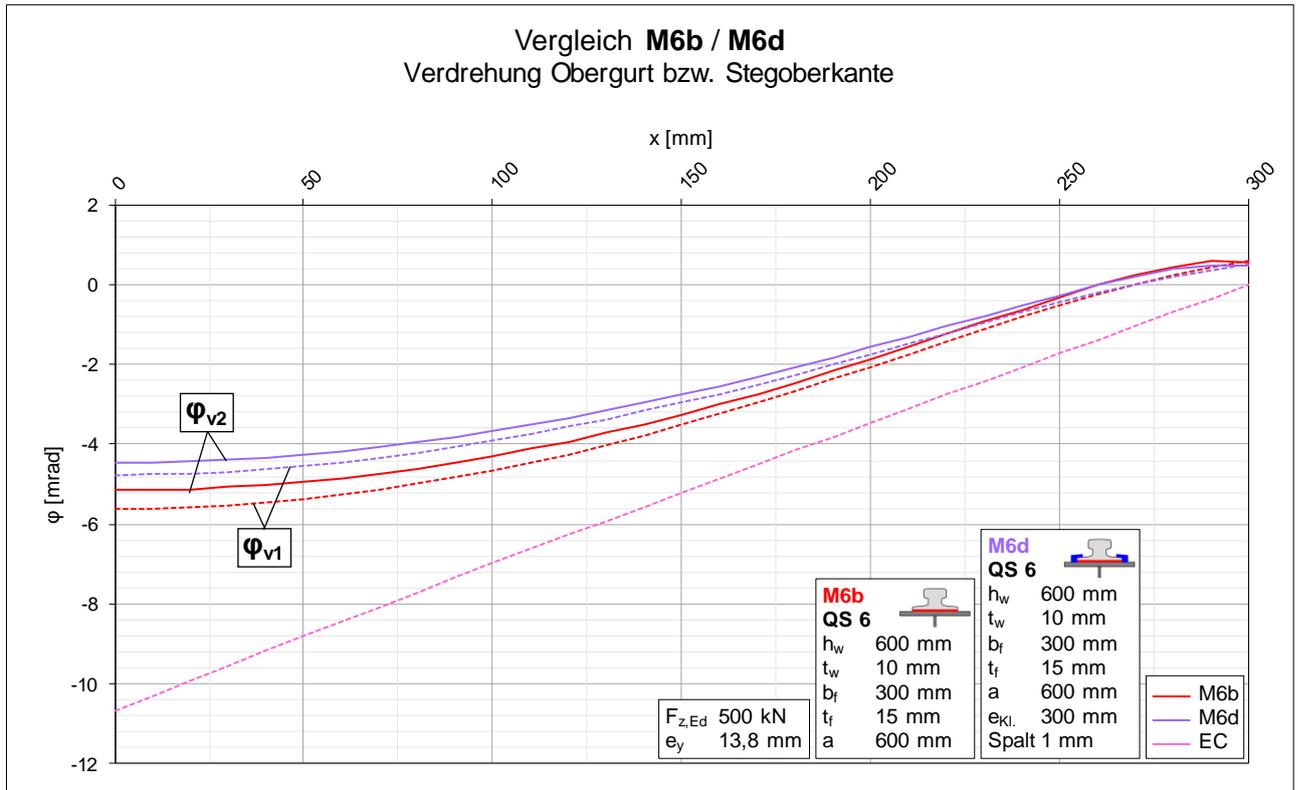


Diagramm 106: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M6

B.4.4 Vergleich M6c / M6e / M6f ► Klemmen ohne Spalt

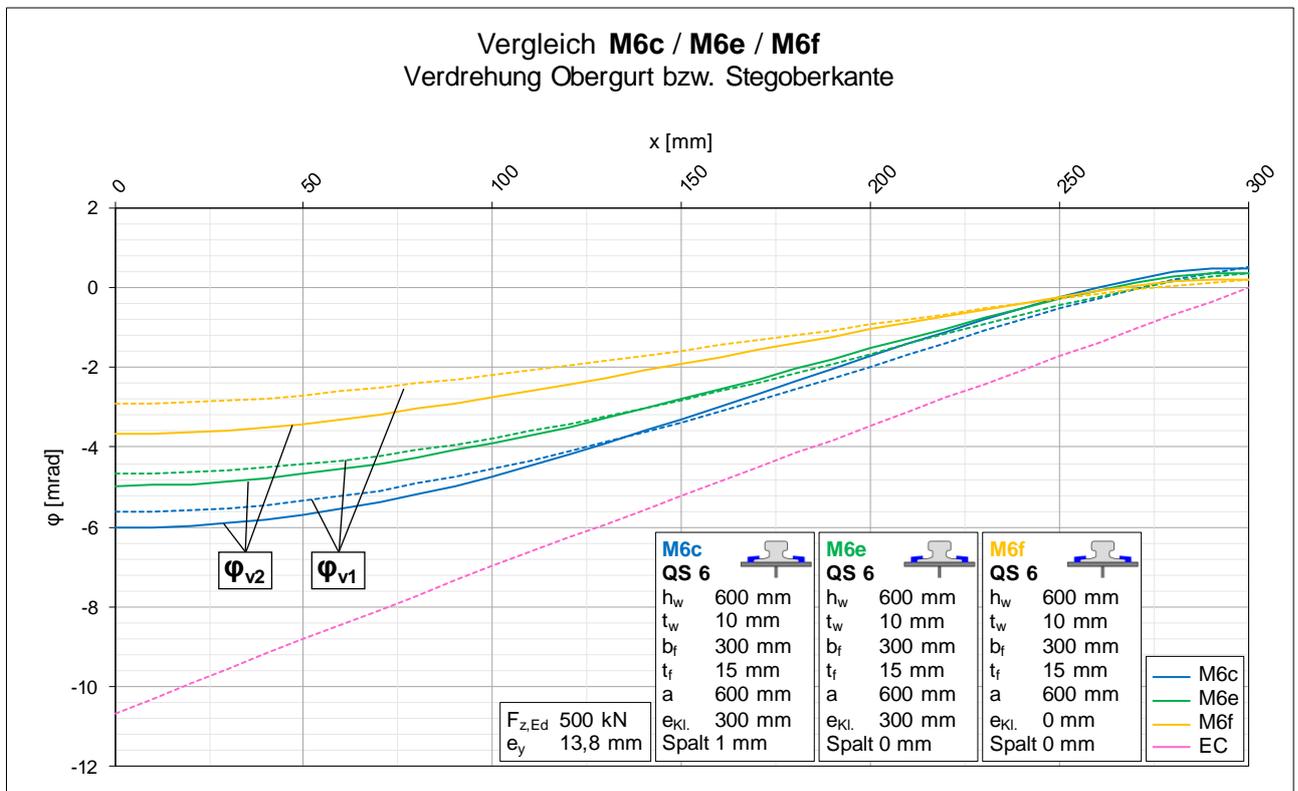


Diagramm 107: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M6

B.4.5 Vergleich M6d / M6g / M6h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

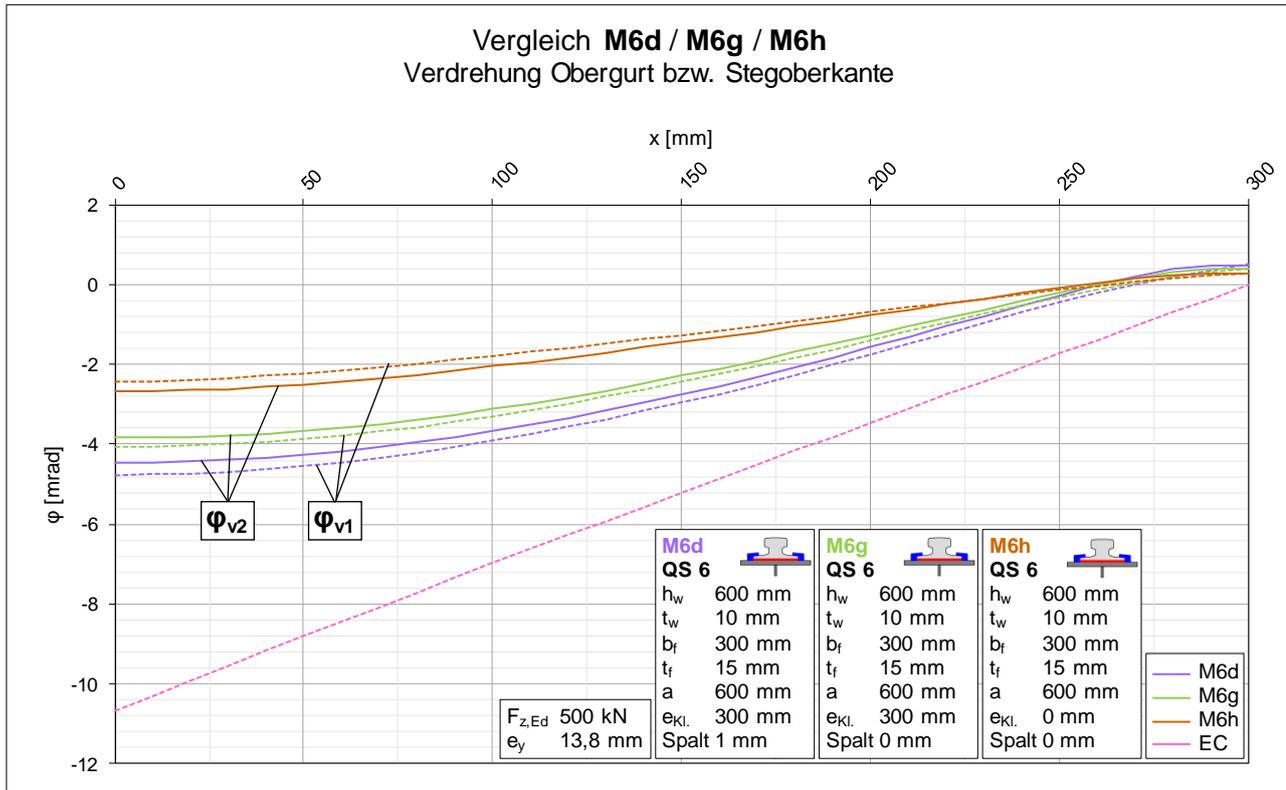


Diagramm 108: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M6

B.5 Modell M7 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.5.1 Vergleich M7a / M7b ► Einfluss der elastischen Unterlage

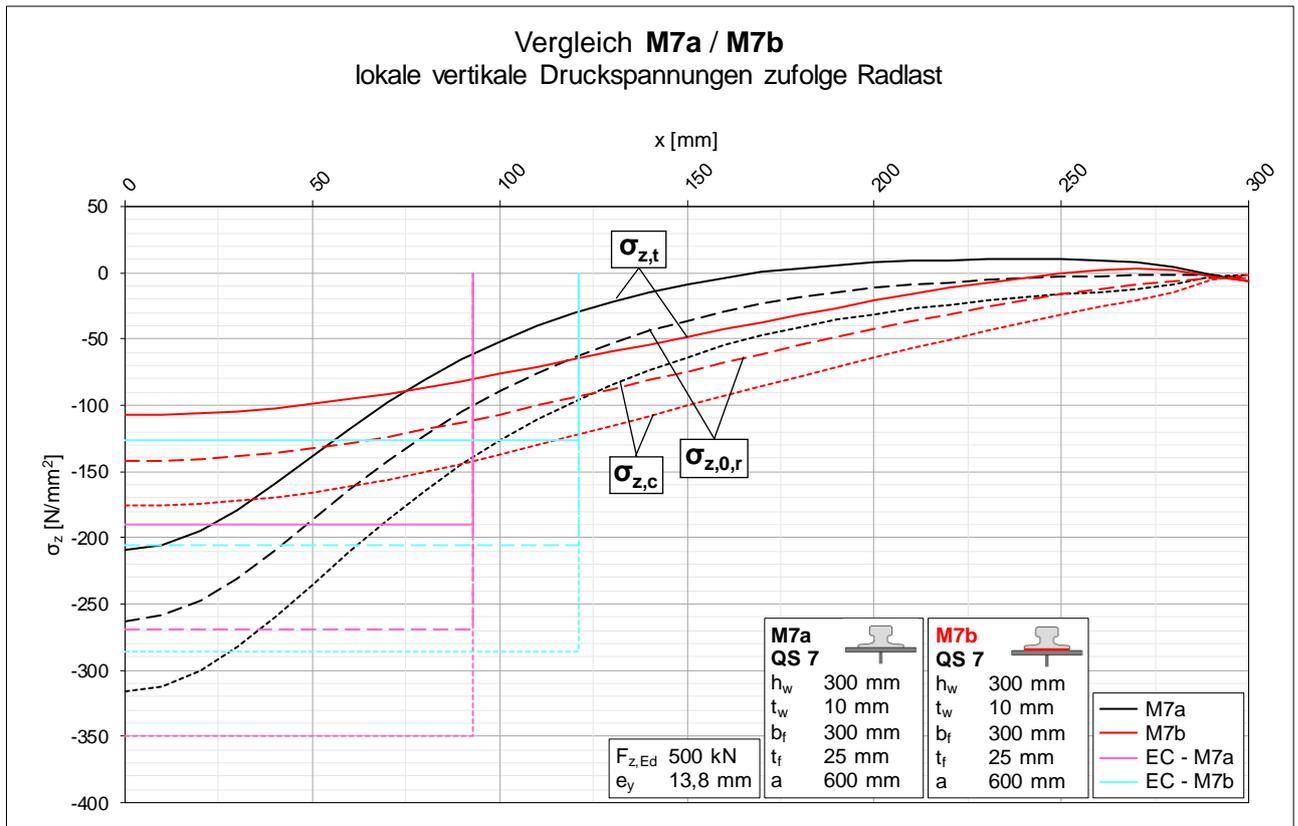


Diagramm 109: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M7

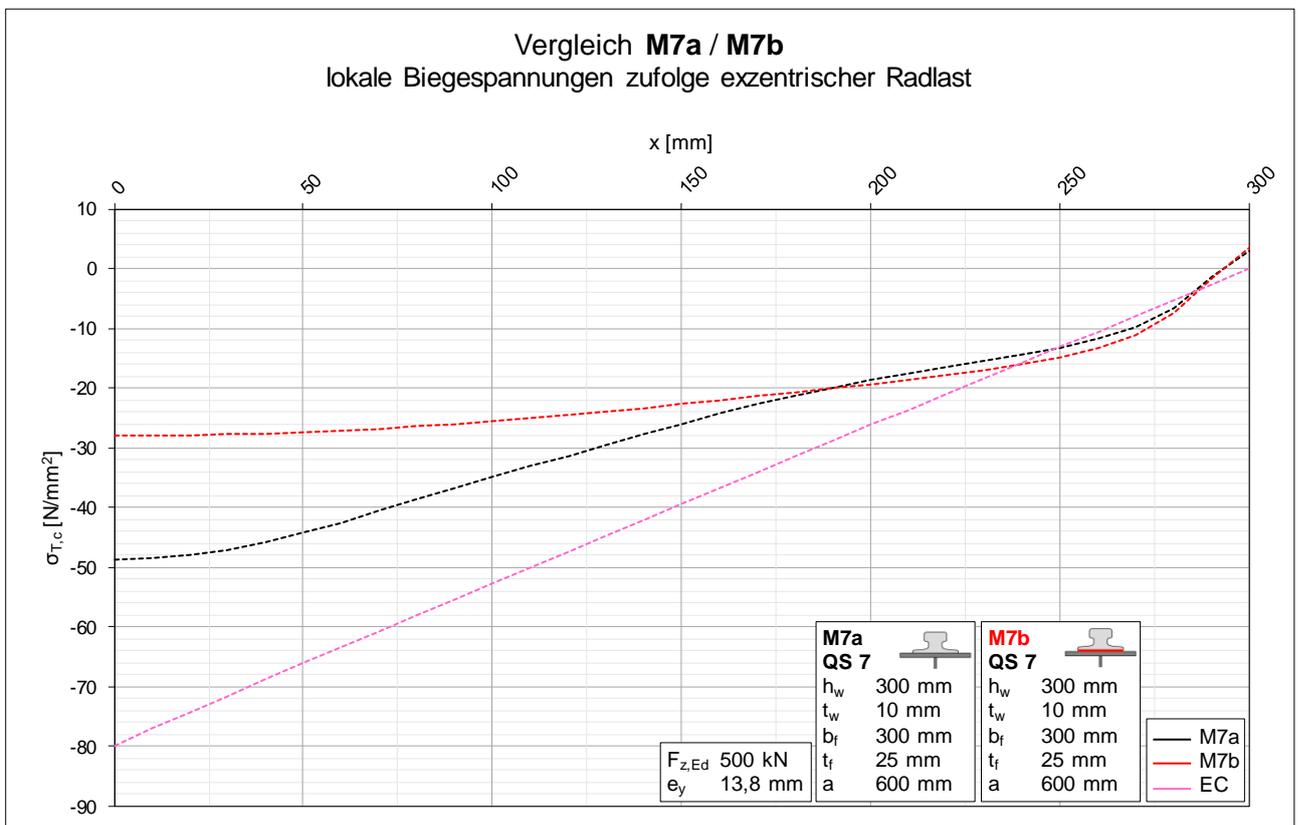


Diagramm 110: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M7

B.5.2 Vergleich M7a / M7c ► Einfluss der Klemmen

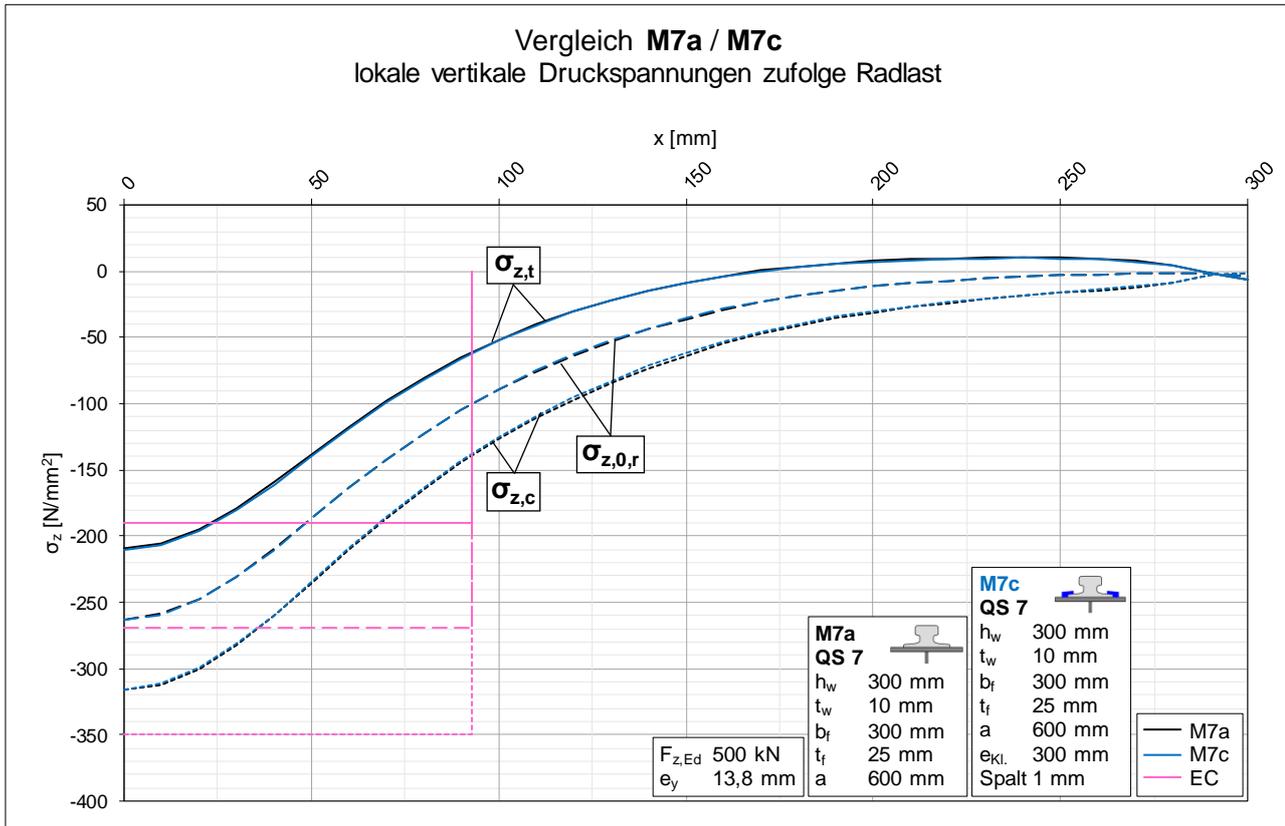


Diagramm 111: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M7

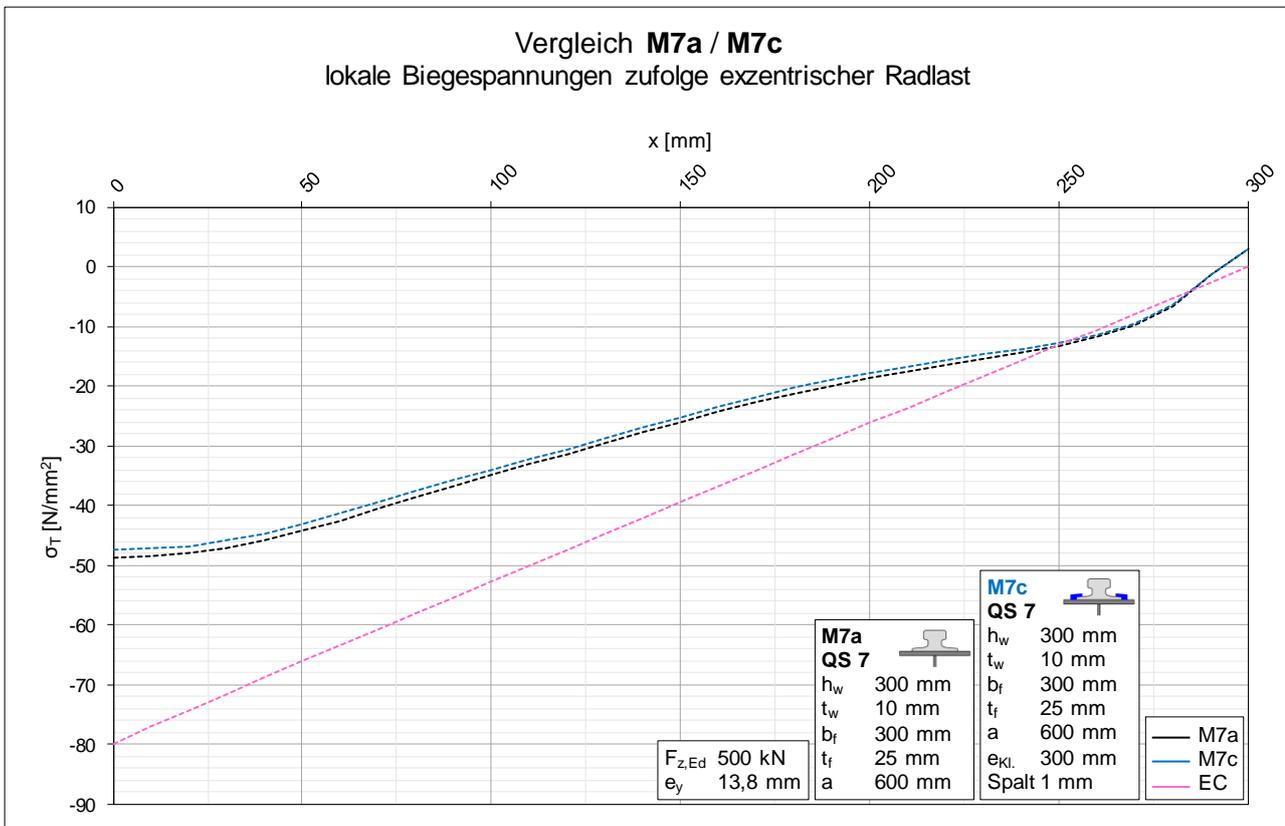


Diagramm 112: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M7

B.5.3 Vergleich M7b / M7d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

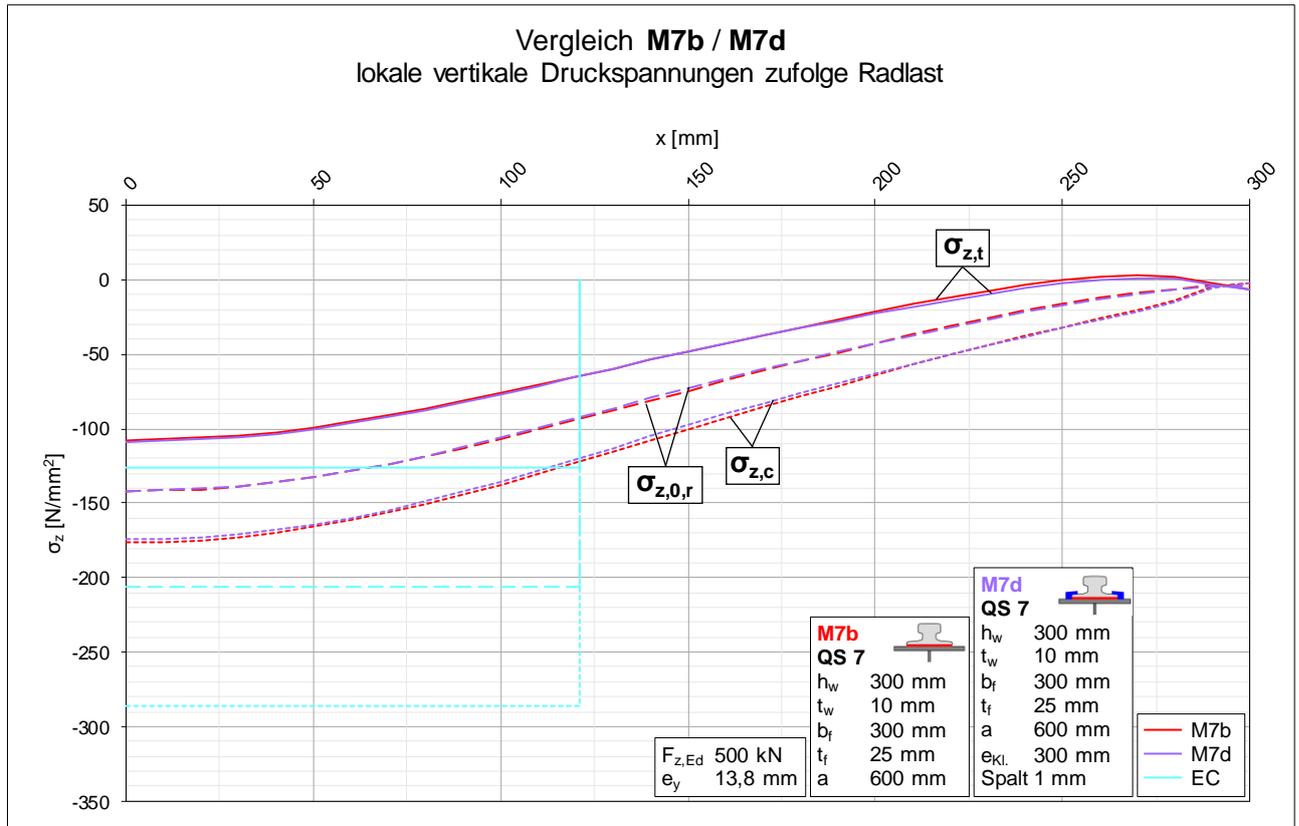


Diagramm 113: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M7

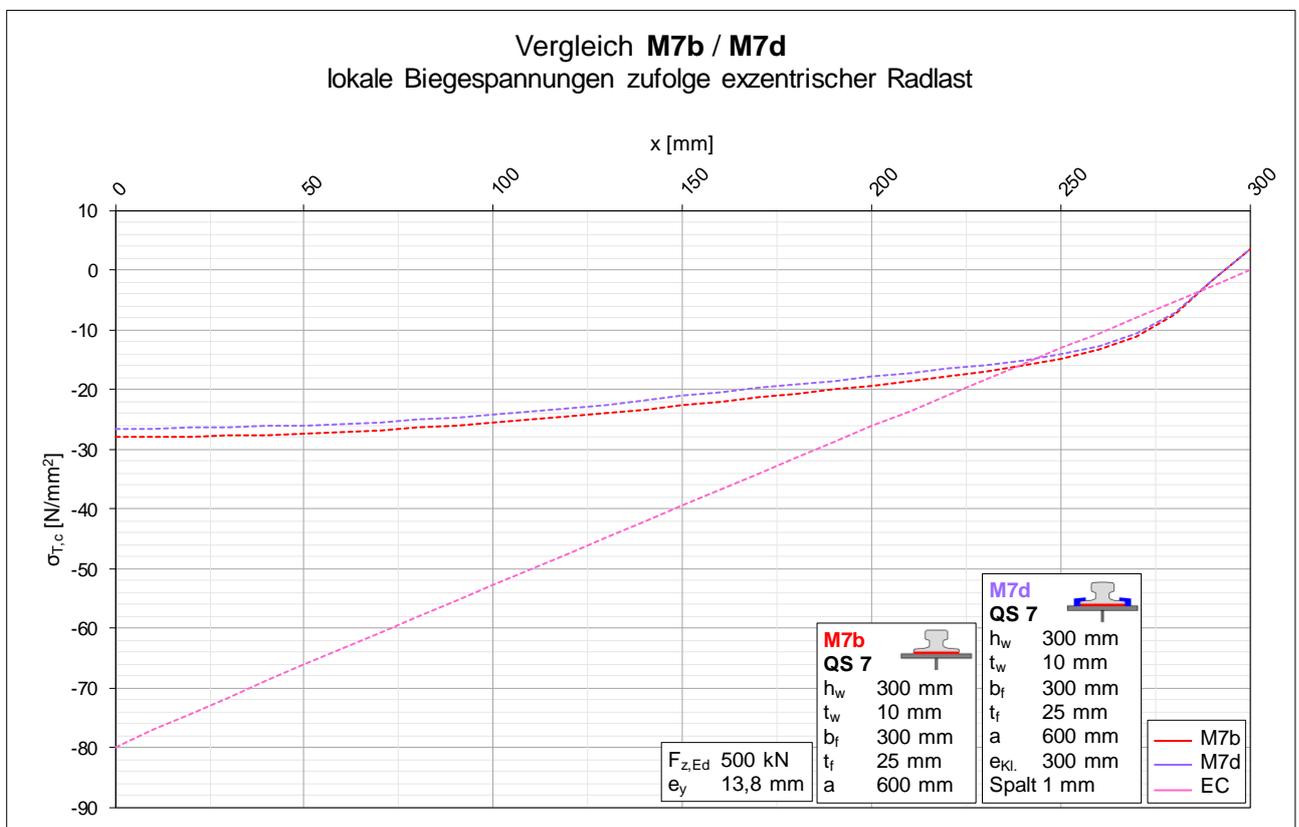


Diagramm 114: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M7

B.5.4 Vergleich M7c / M7e / M7f ► Klemmen ohne Spalt

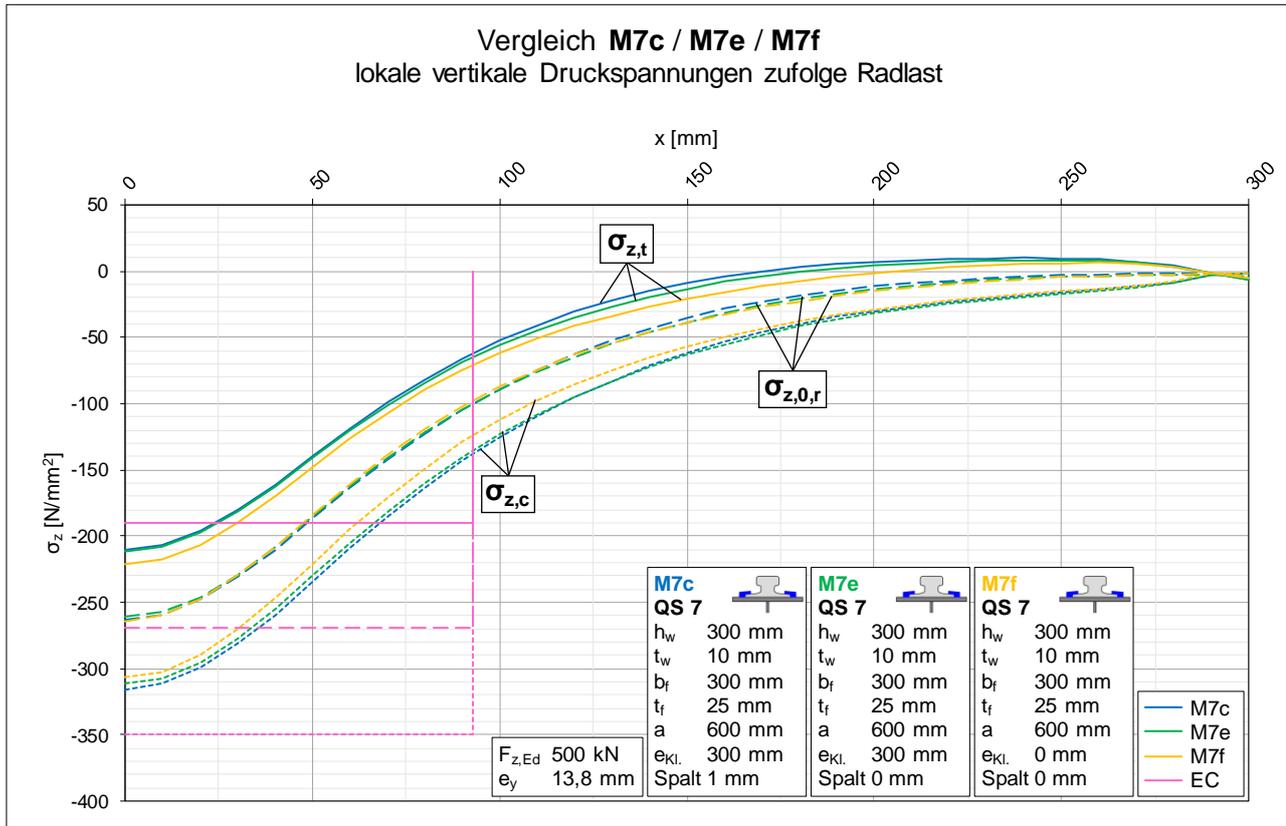


Diagramm 115: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M7

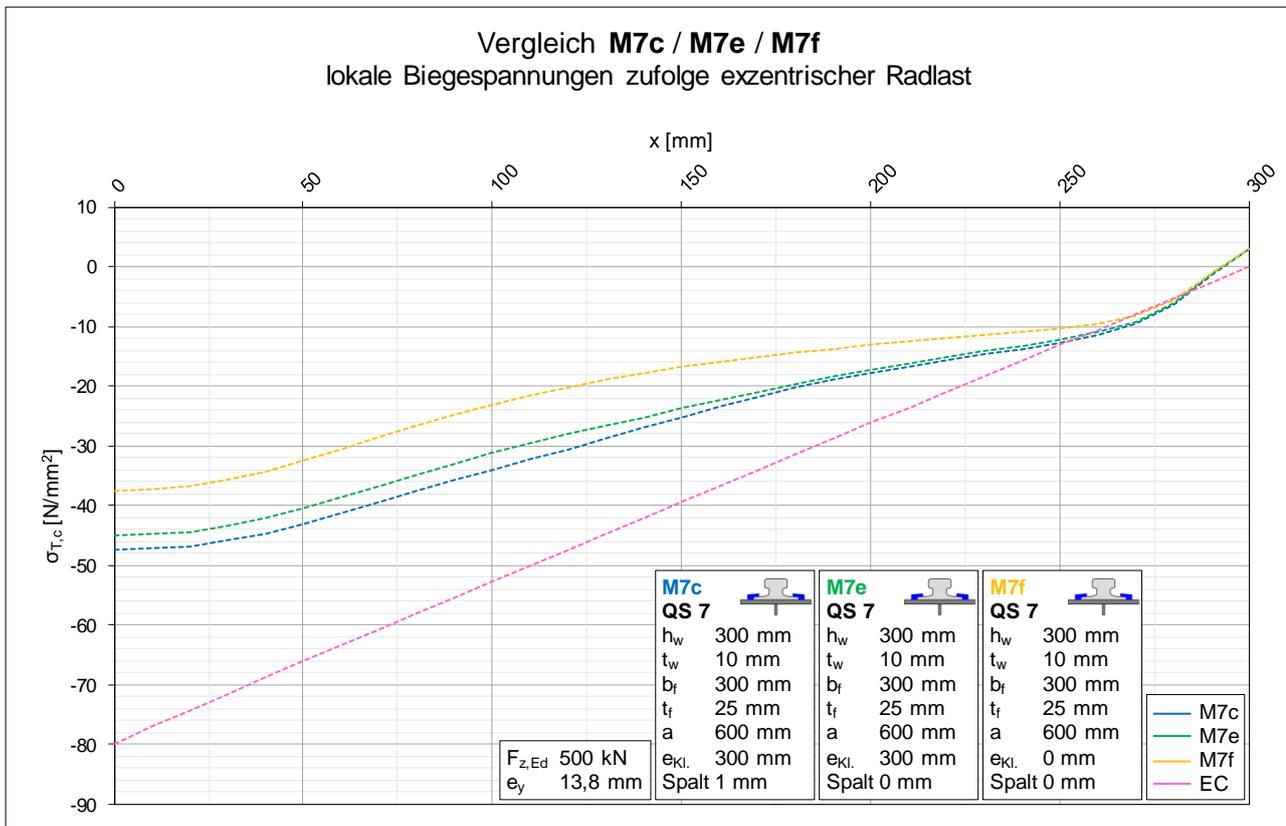


Diagramm 116: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M7

B.5.5 Vergleich M7d / M7g / M7h ▶ Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

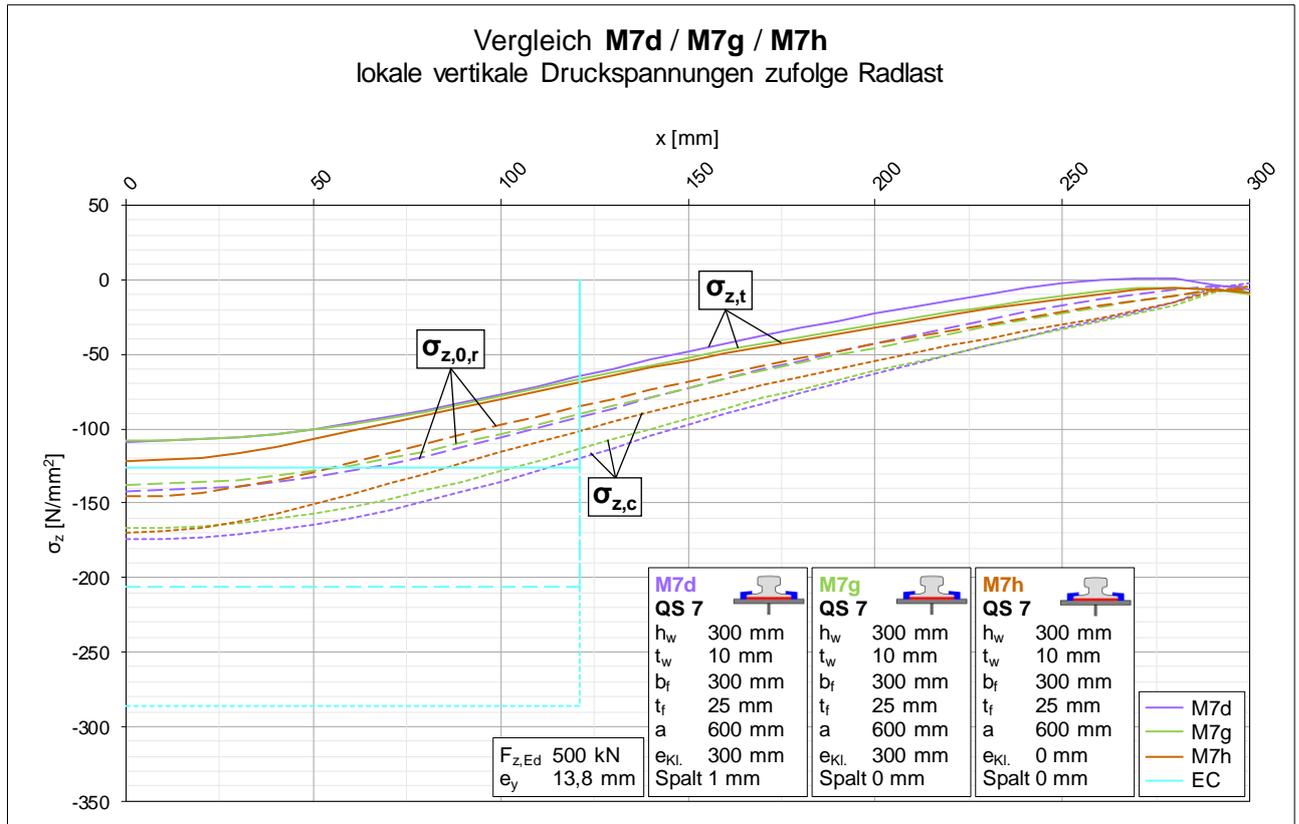


Diagramm 117: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M7

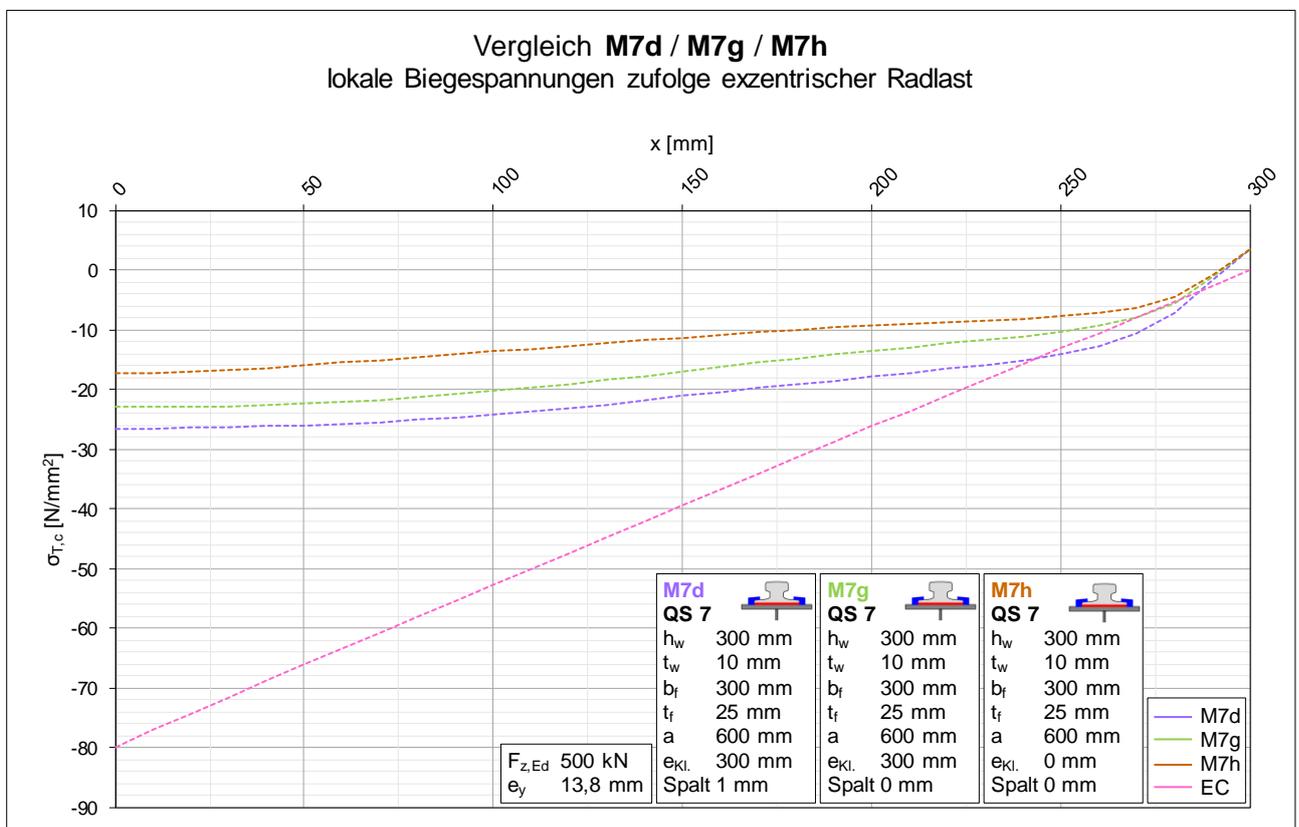


Diagramm 118: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M7

B.6 Modell M7 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.6.1 Vergleich M7a / M7b ► Einfluss der elastischen Unterlage

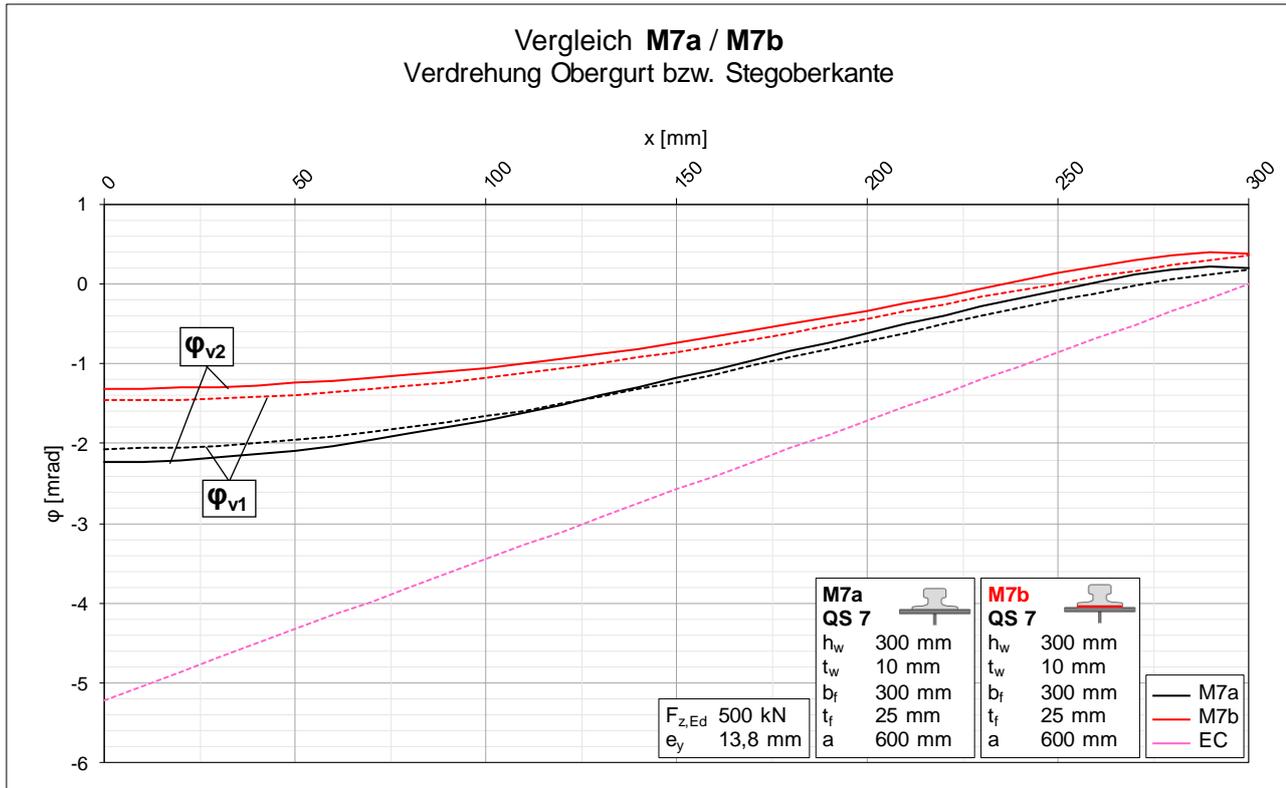


Diagramm 119: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M7

B.6.2 Vergleich M7a / M7c ► Einfluss der Klemmen

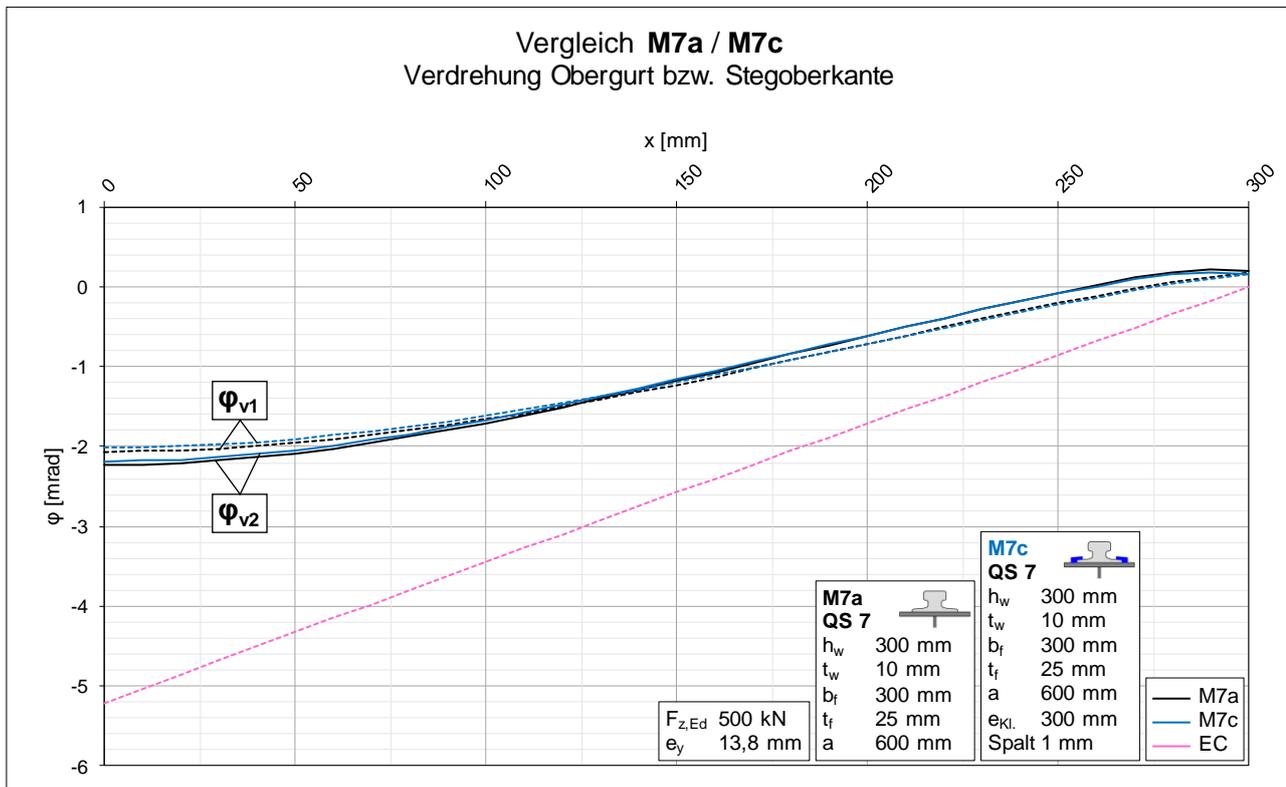


Diagramm 120: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M7

B.6.3 Vergleich M7b / M7d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

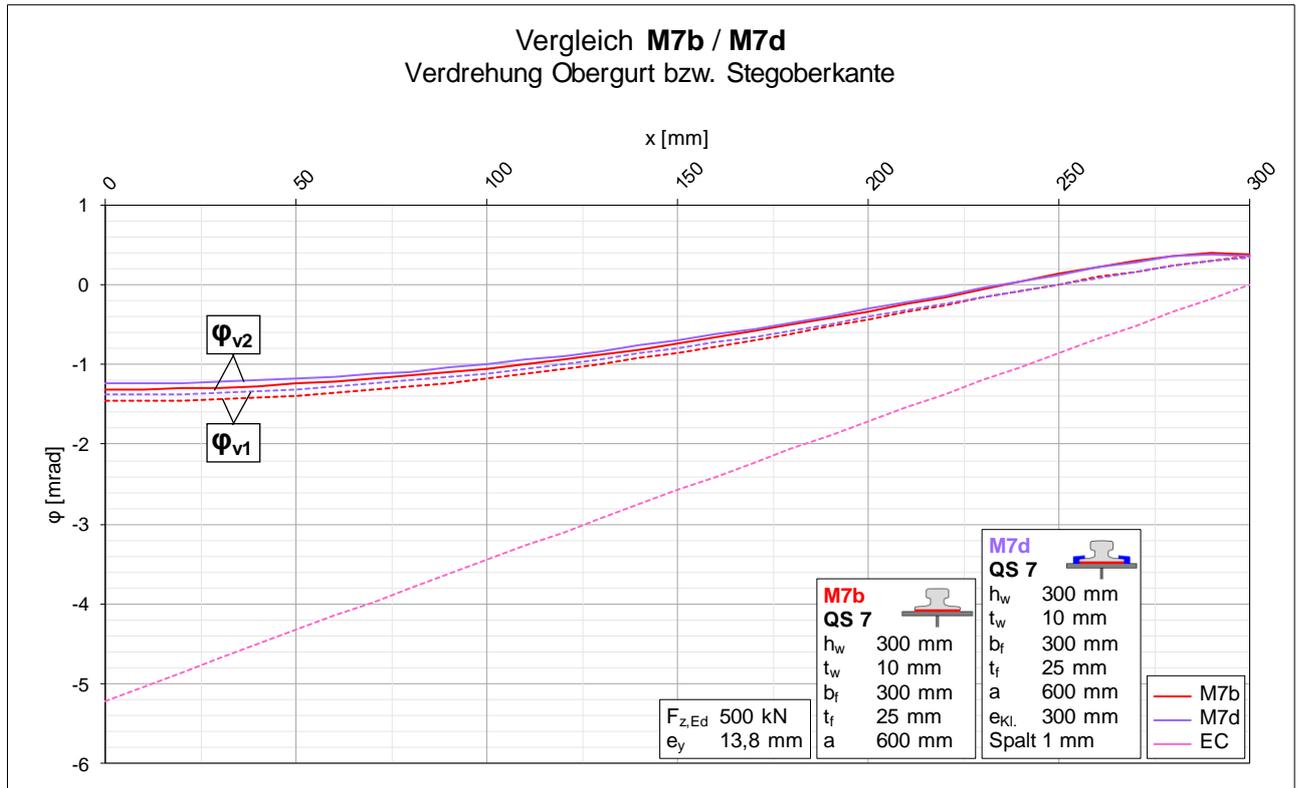


Diagramm 121: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M7

B.6.4 Vergleich M7c / M7e / M7f ► Klemmen ohne Spalt

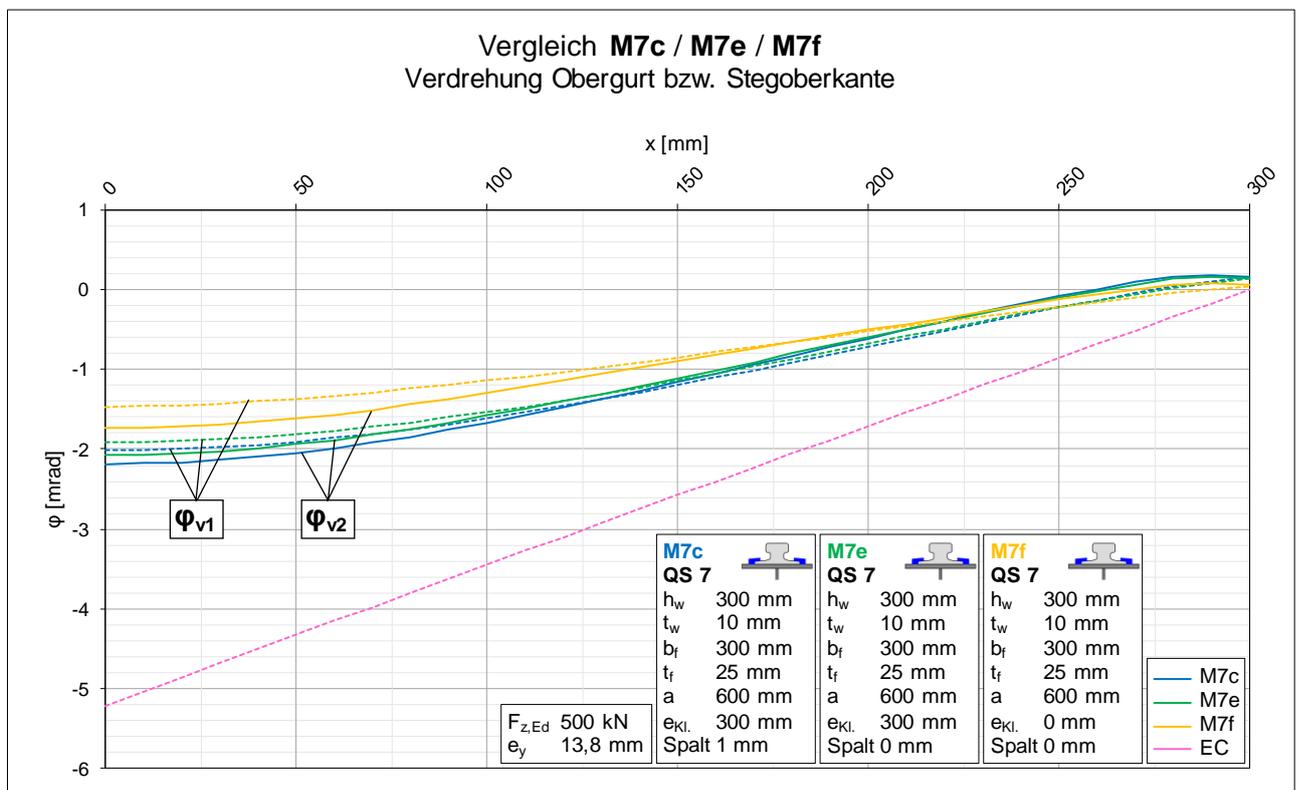


Diagramm 122: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M7

B.6.5 Vergleich M7d / M7g / M7h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

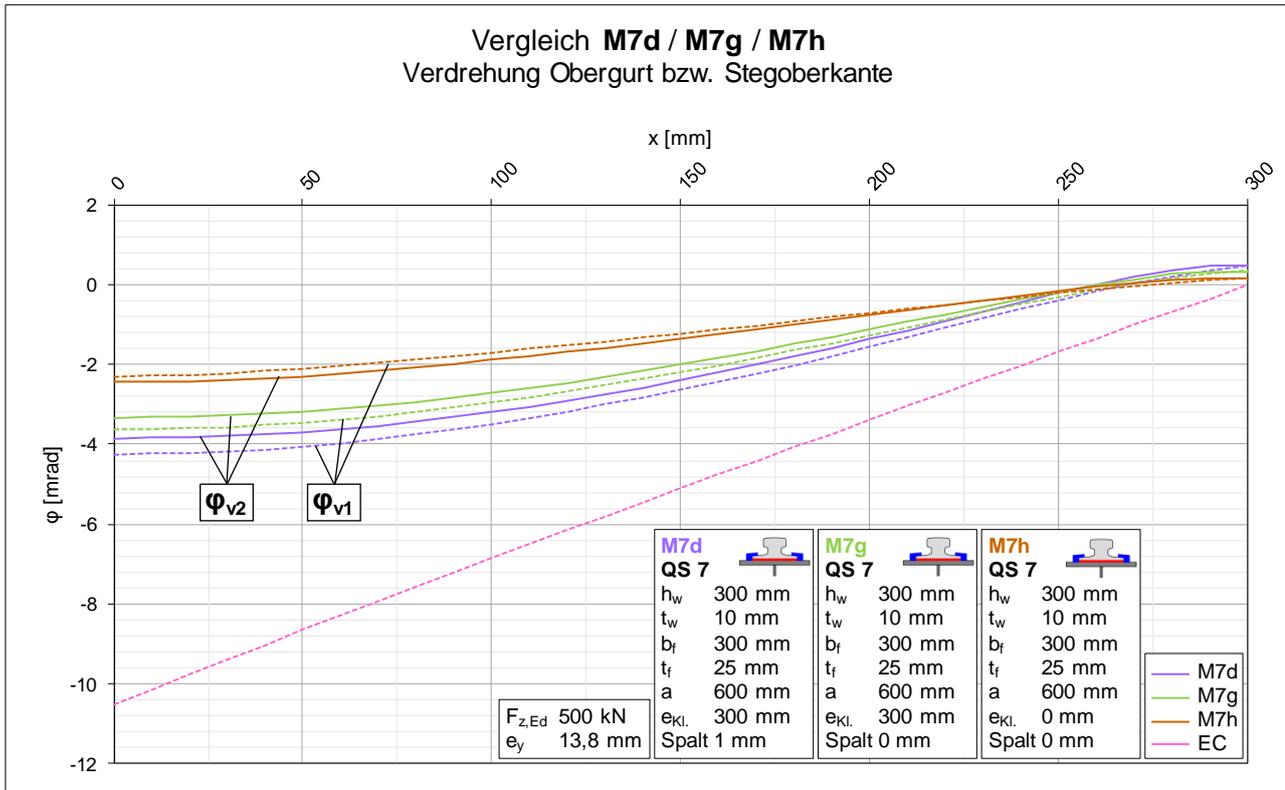


Diagramm 123: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M7

B.7 Modell M8 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.7.1 Vergleich M8a / M8b ► Einfluss der elastischen Unterlage

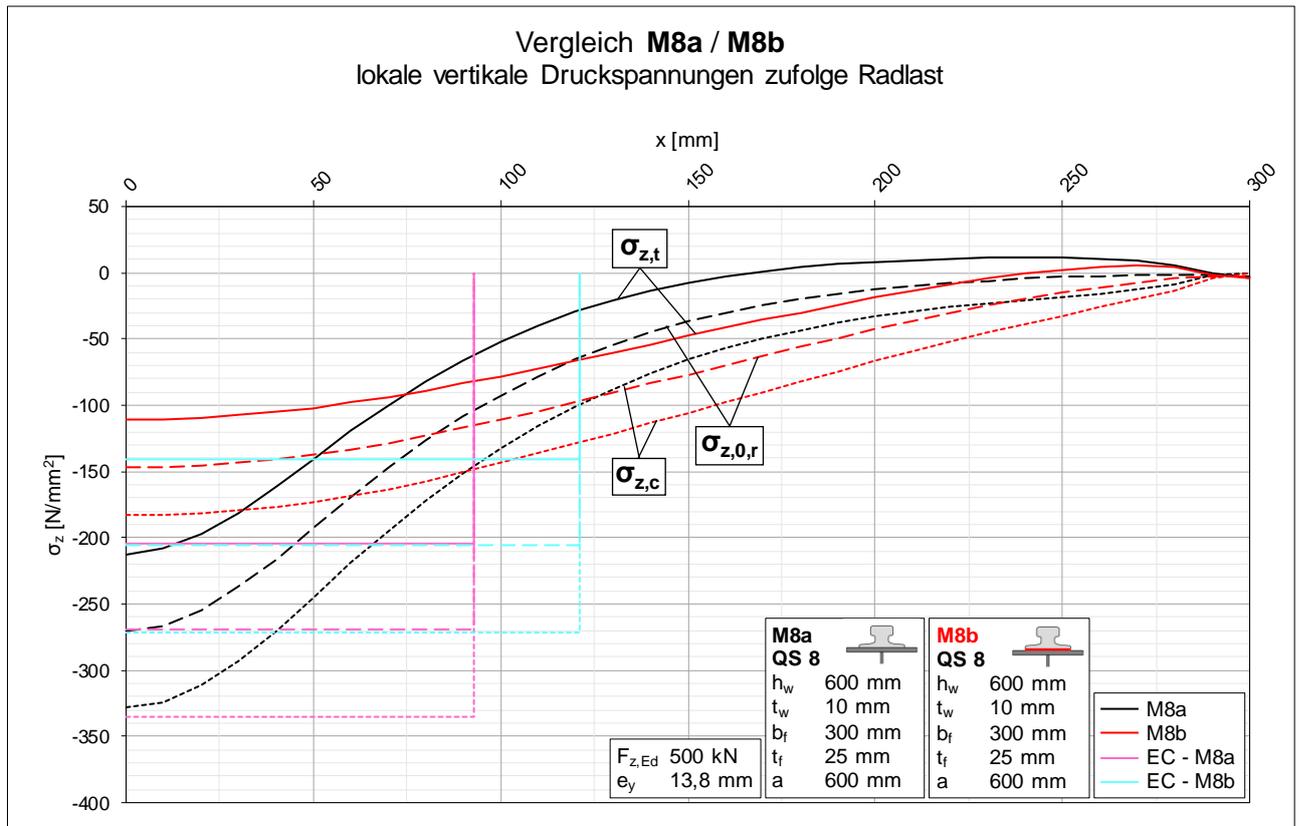


Diagramm 124: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M8

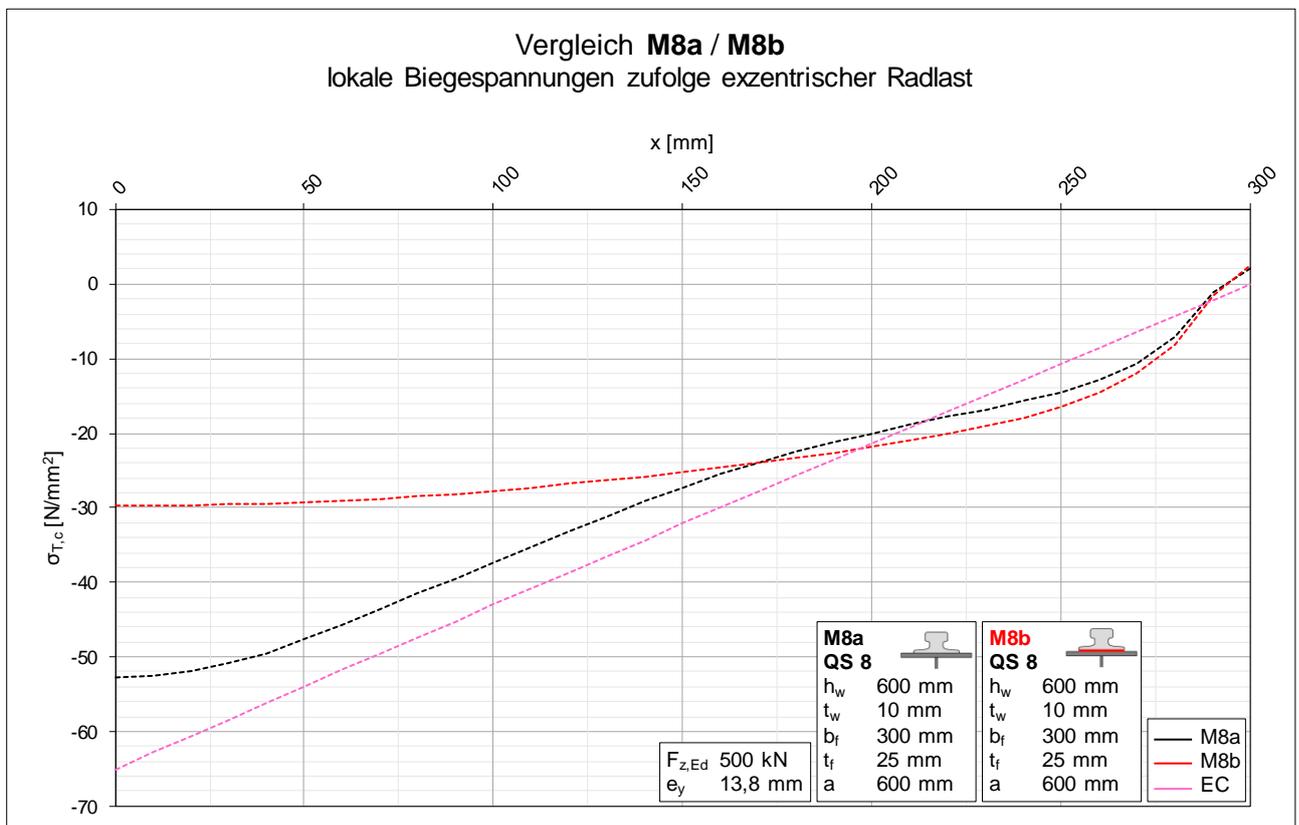


Diagramm 125: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M8

B.7.2 Vergleich M8a / M8c ► Einfluss der Klemmen

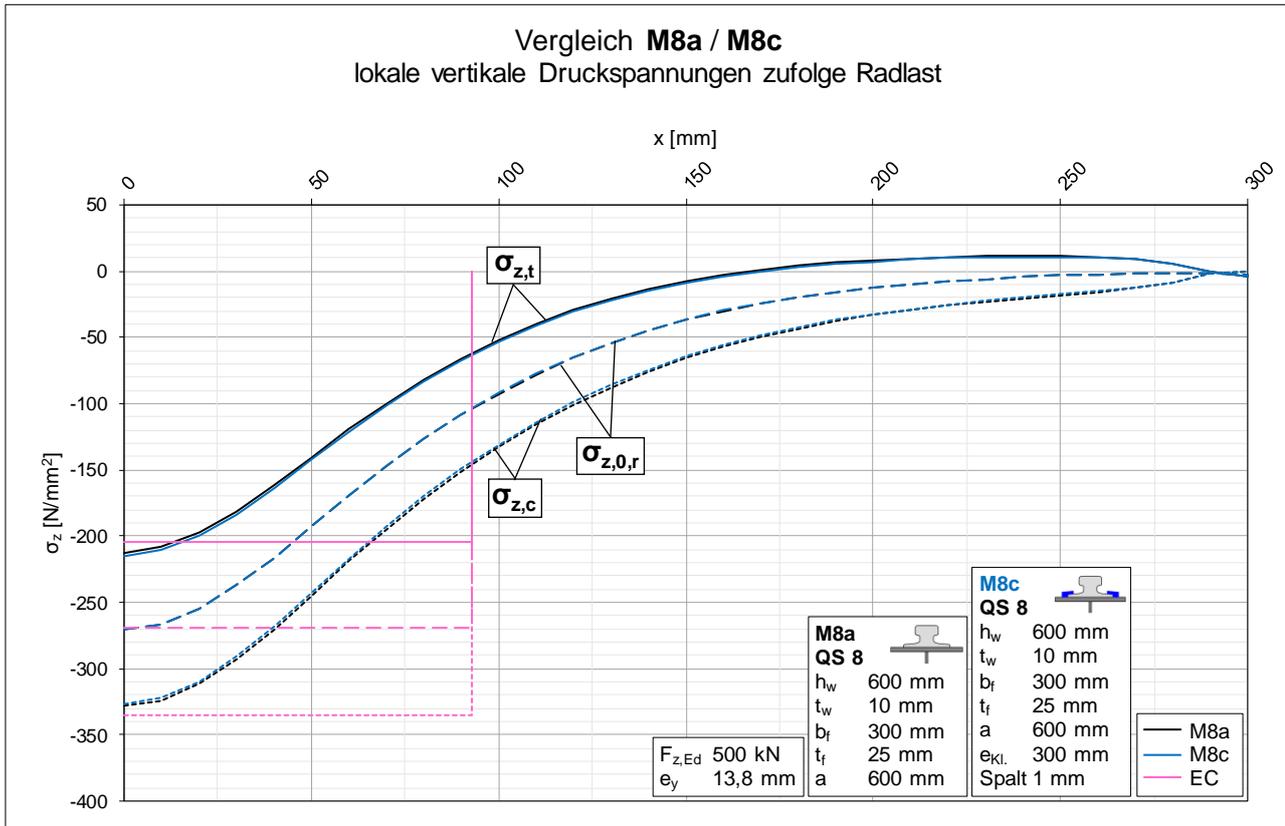


Diagramm 126: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M8

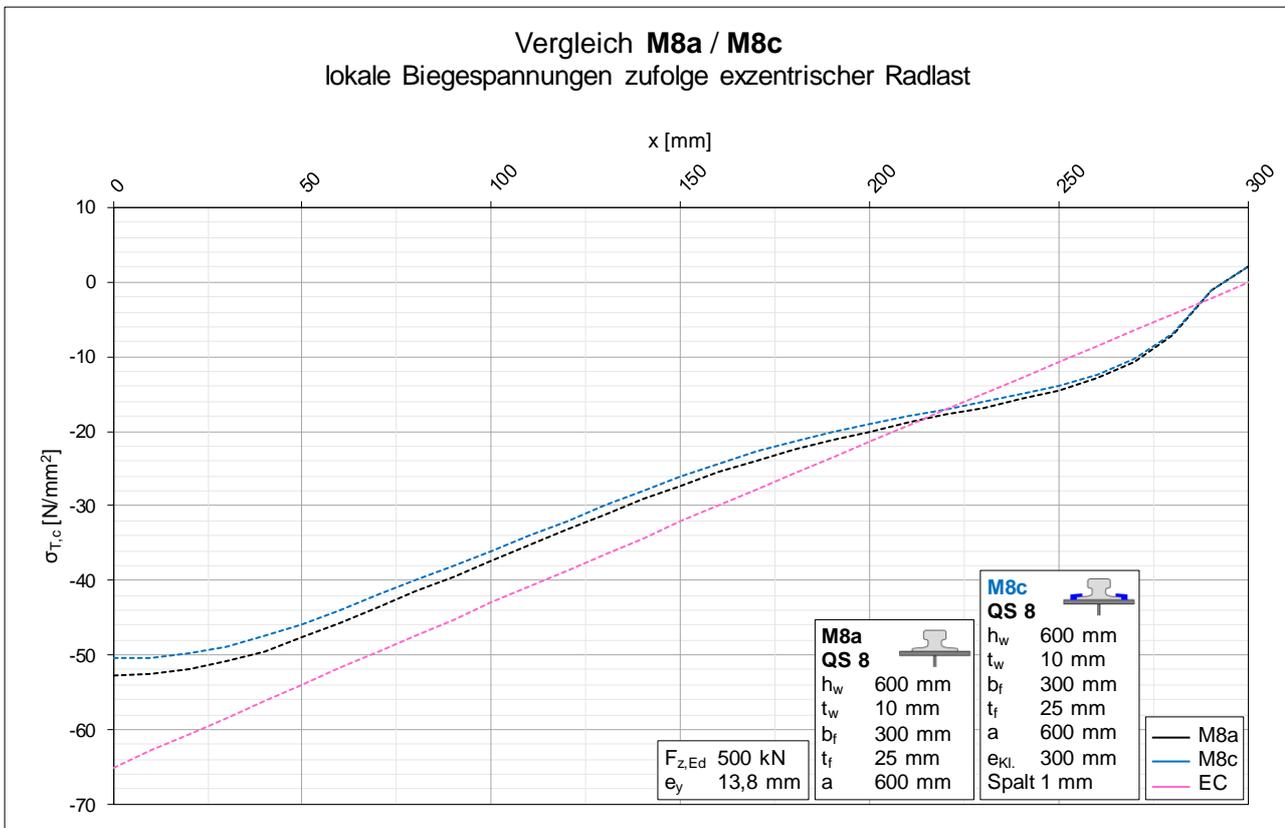


Diagramm 127: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M8

B.7.3 Vergleich M8b / M8d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

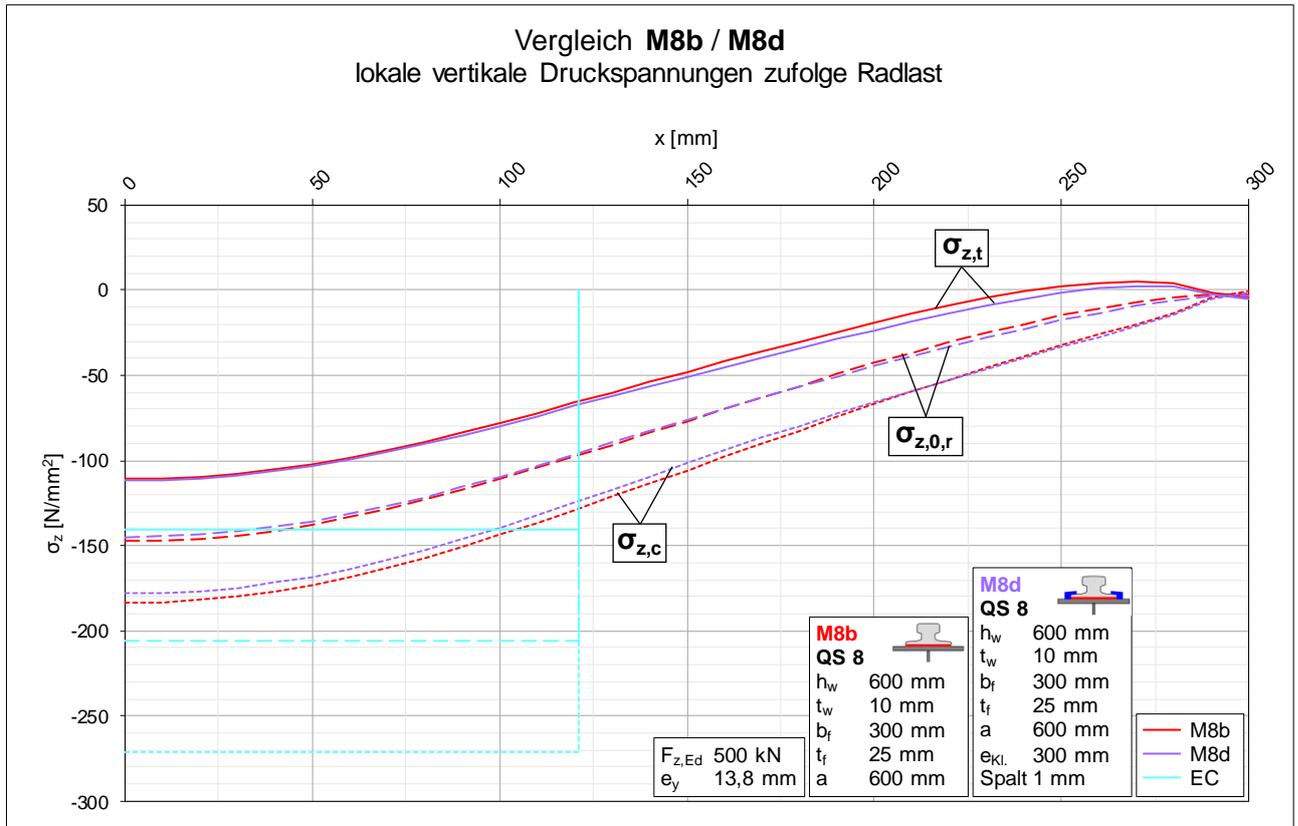


Diagramm 128: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M8

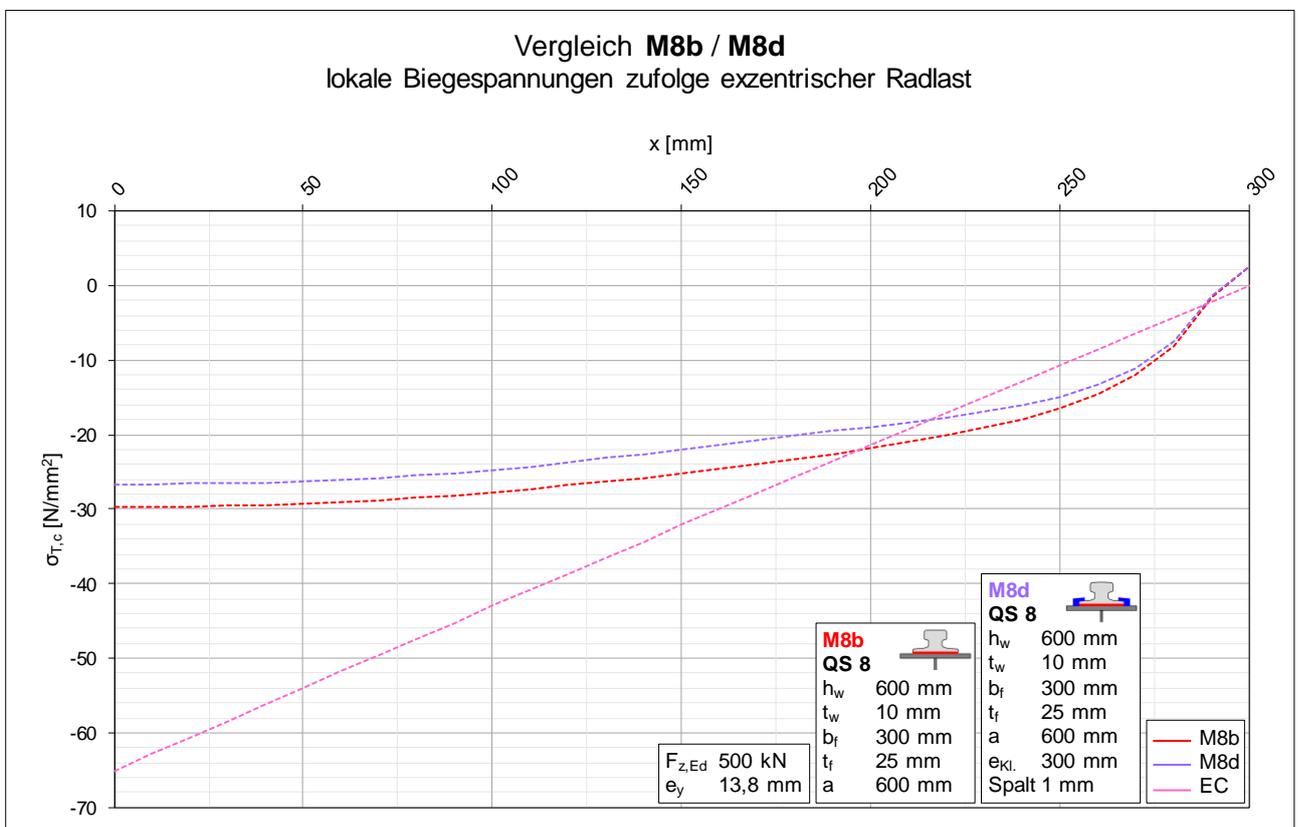


Diagramm 129: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M8

B.7.4 Vergleich M8c / M8e / M8f ► Klemmen ohne Spalt

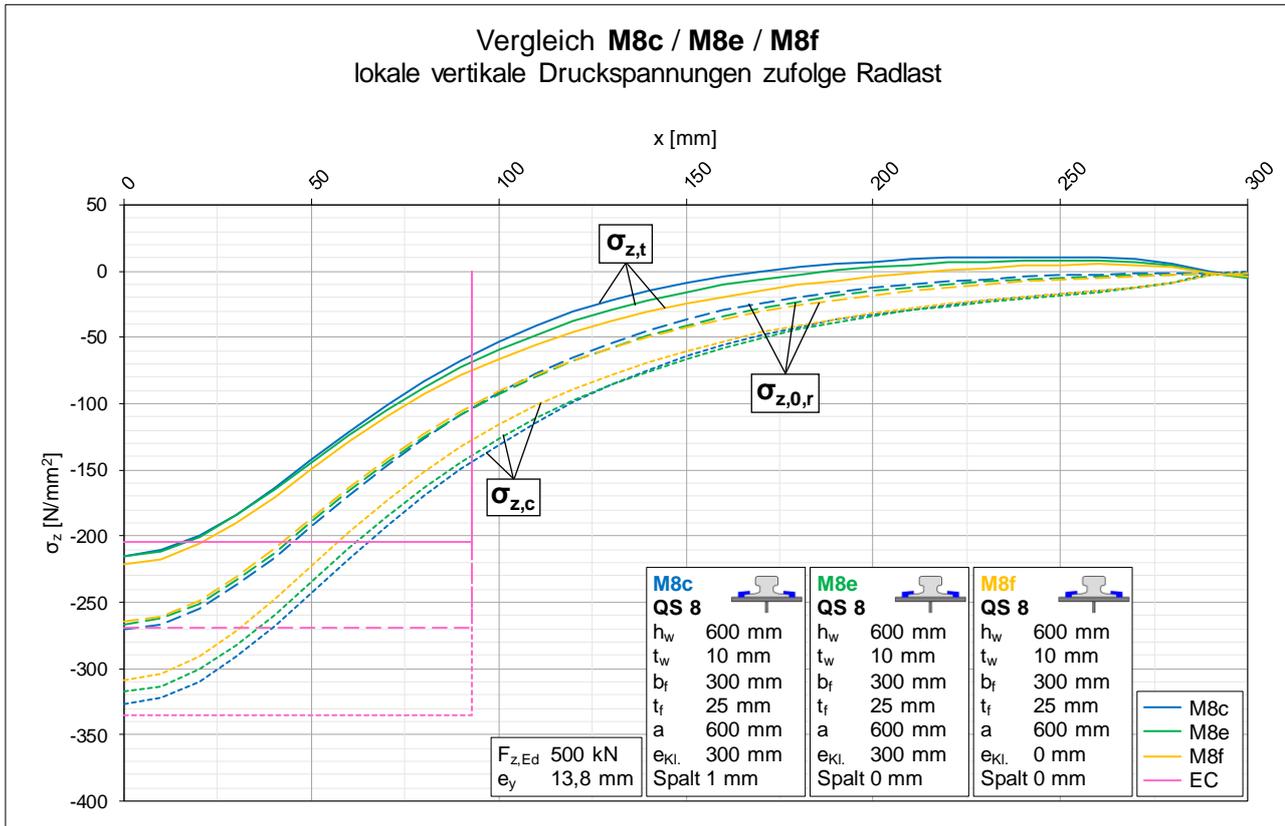


Diagramm 130: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M8

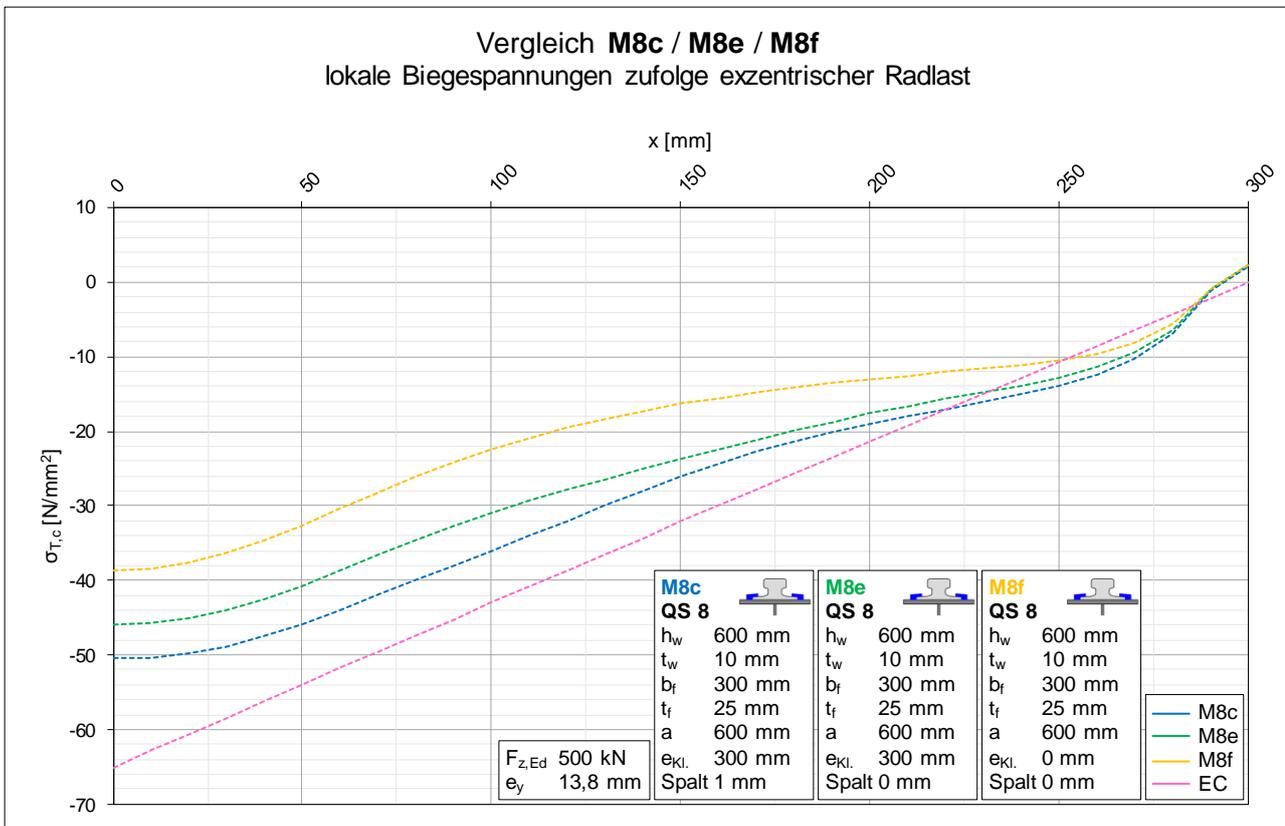


Diagramm 131: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M8

B.7.5 Vergleich M8d / M8g / M8h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

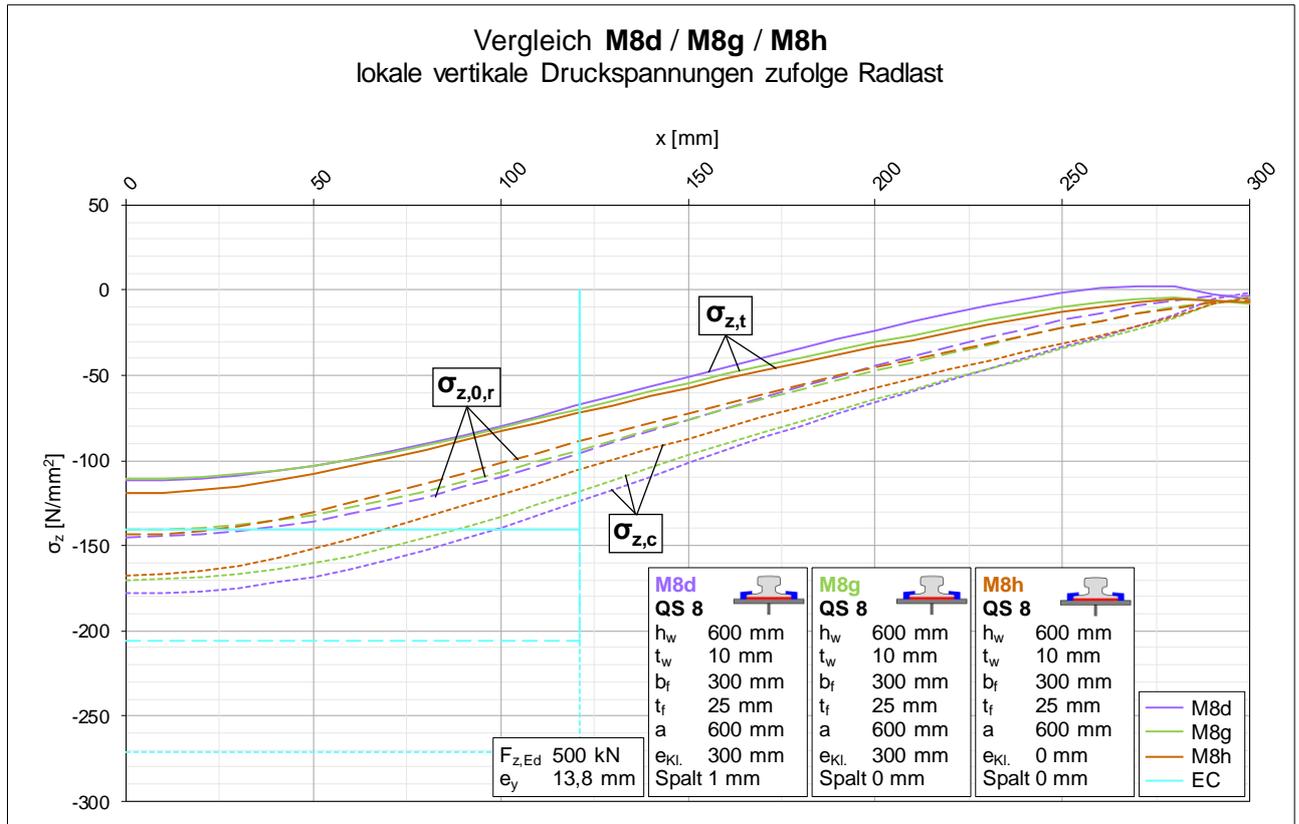


Diagramm 132: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M8

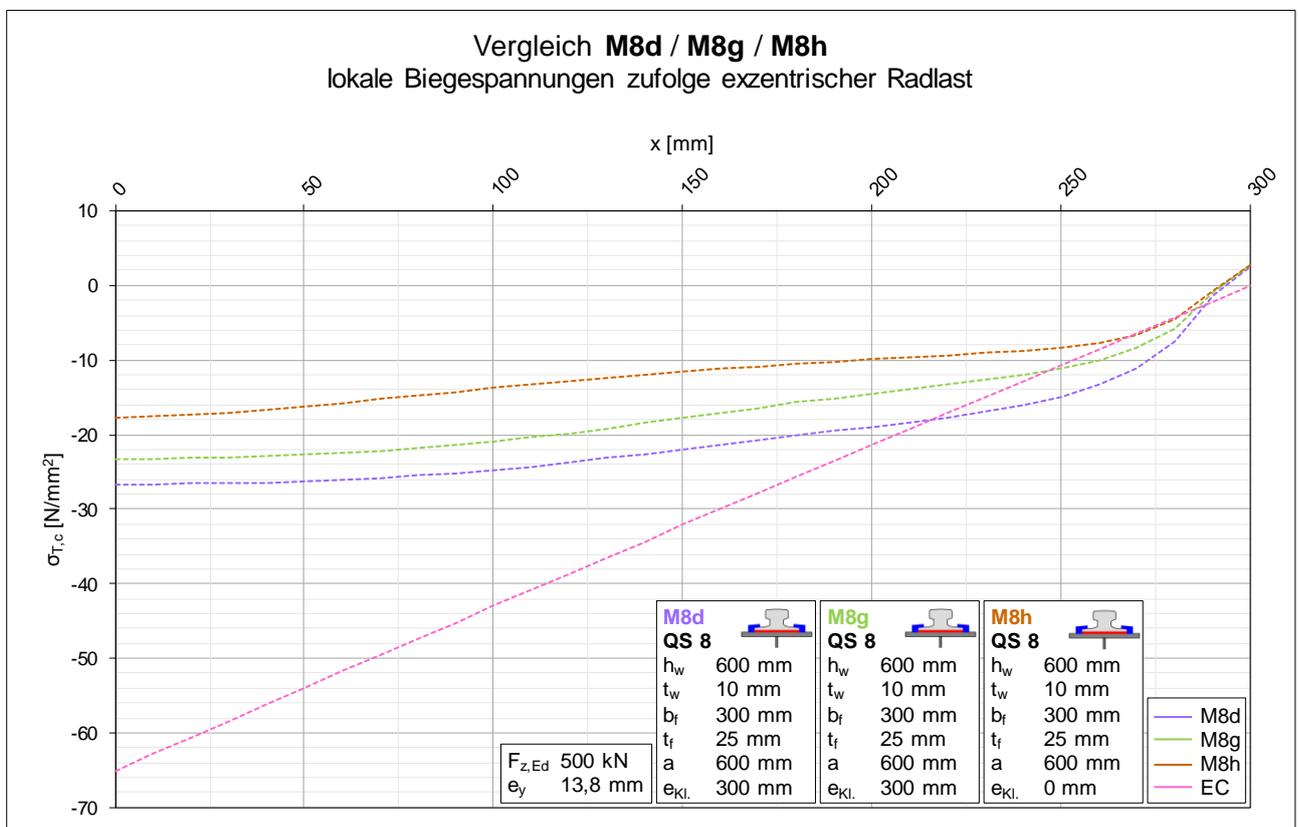


Diagramm 133: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M8

B.8 Modell M8 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.8.1 Vergleich M8a / M8b ► Einfluss der elastischen Unterlage

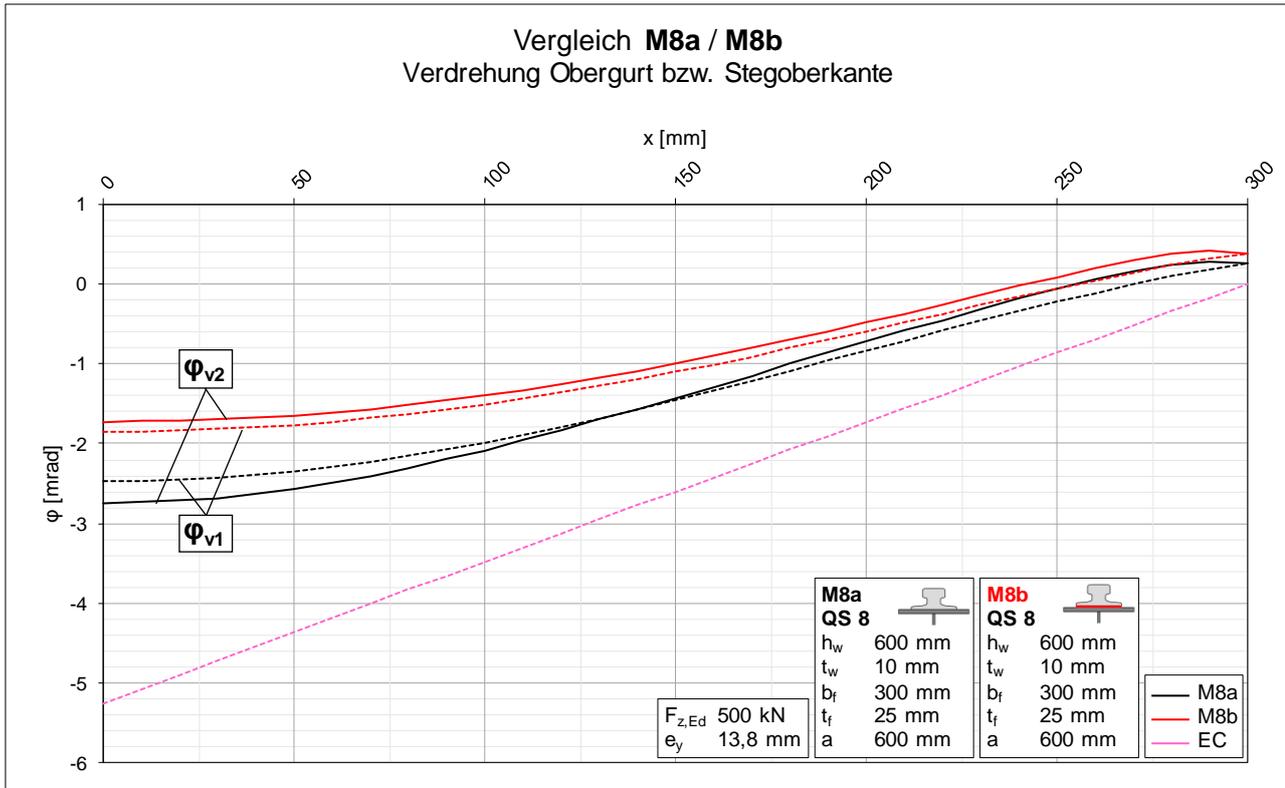


Diagramm 134: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M8

B.8.2 Vergleich M8a / M8c ► Einfluss der Klemmen

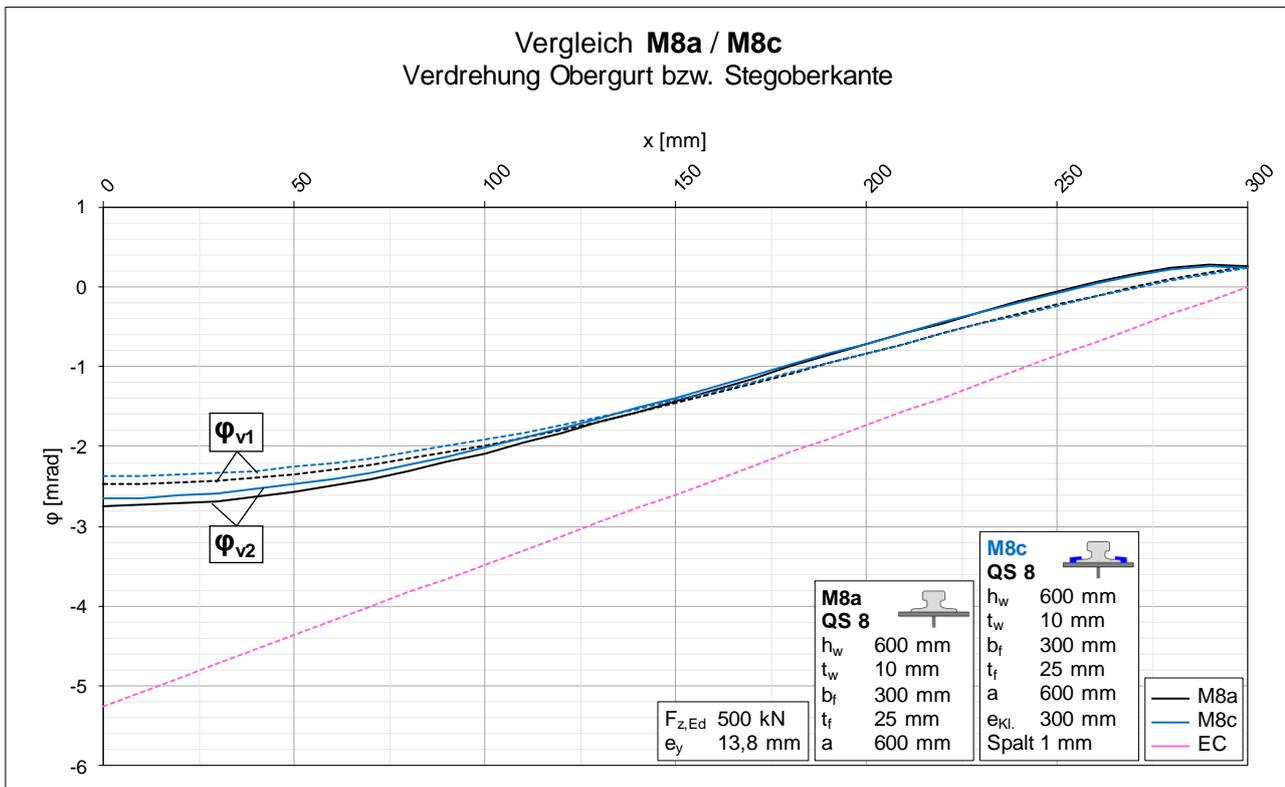


Diagramm 135: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M8

B.8.3 Vergleich M8b / M8d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

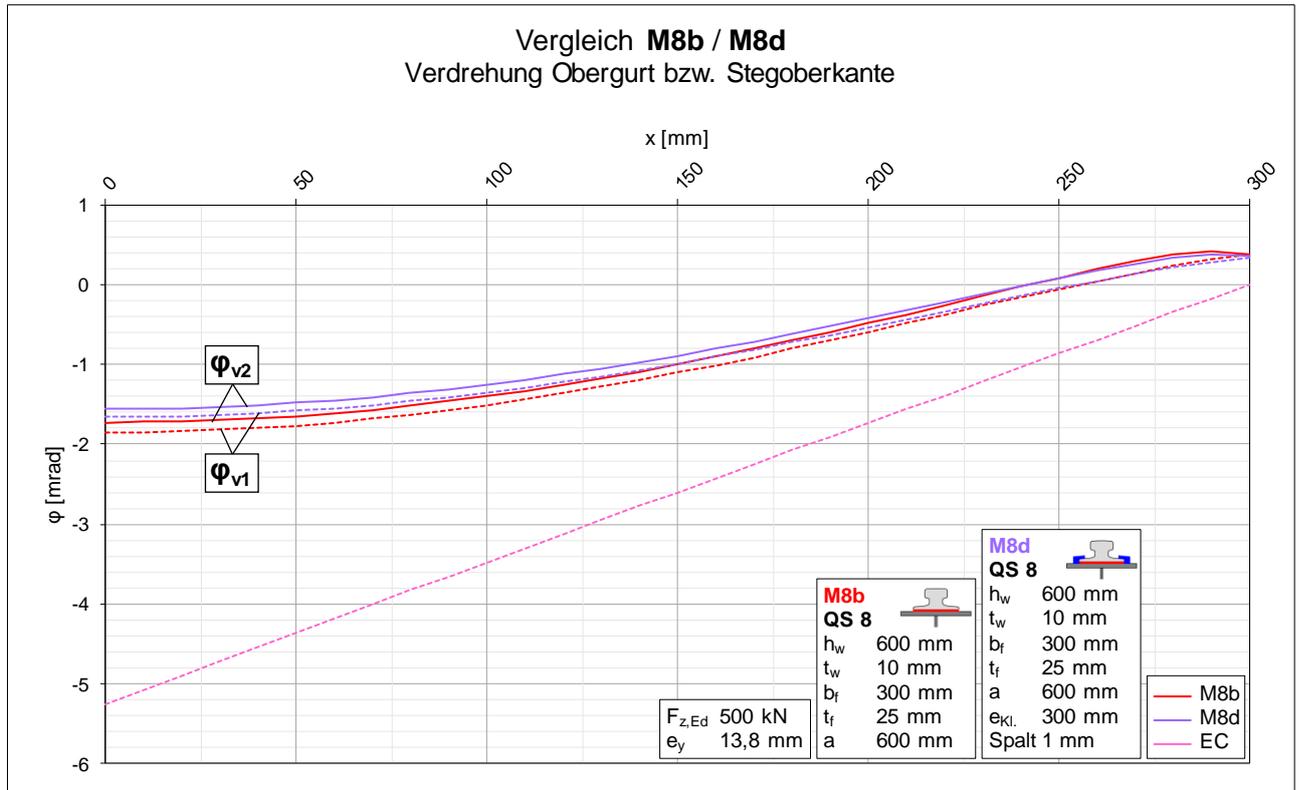


Diagramm 136: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M8

B.8.4 Vergleich M8c / M8e / M8f ► Klemmen ohne Spalt

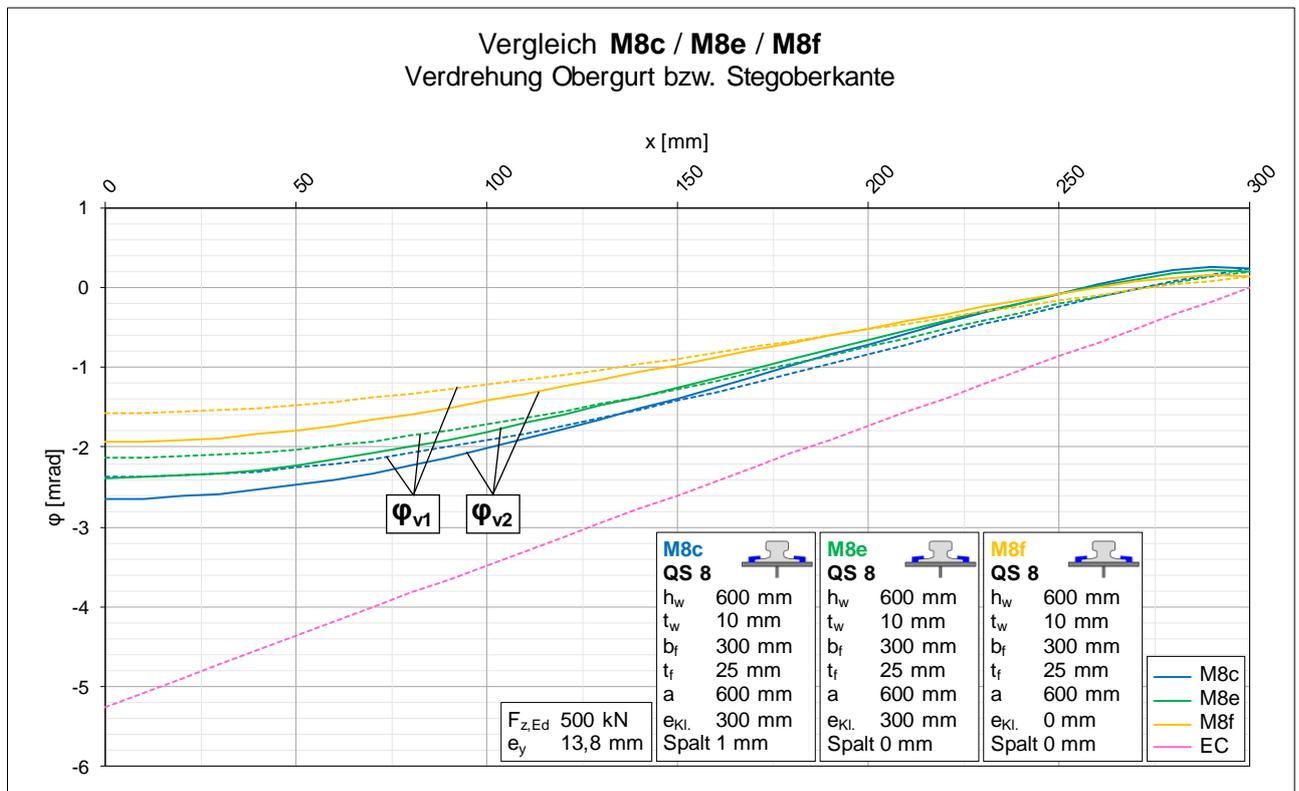


Diagramm 137: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M8

B.8.5 Vergleich M8d / M8g / M8h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

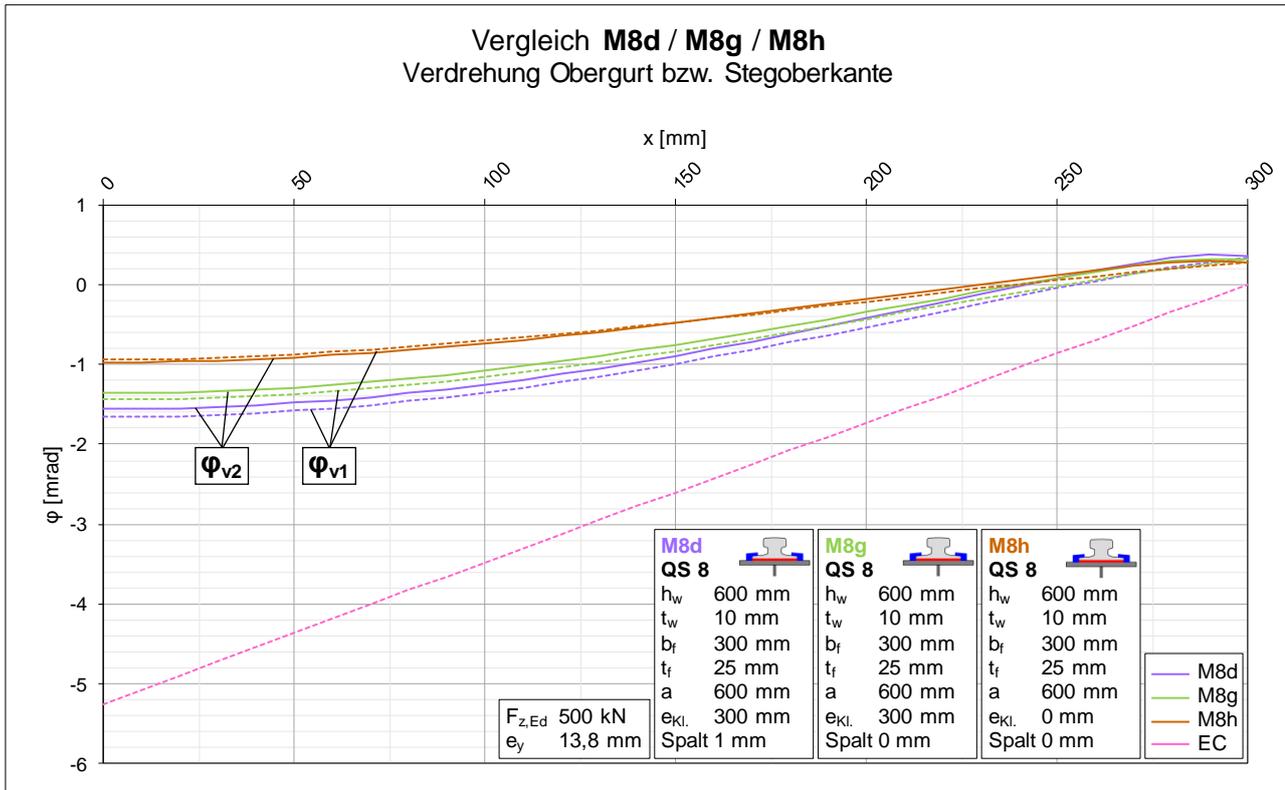


Diagramm 138: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M8

B.9 Modell M9 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.9.1 Vergleich M9a / M9b ► Einfluss der elastischen Unterlage

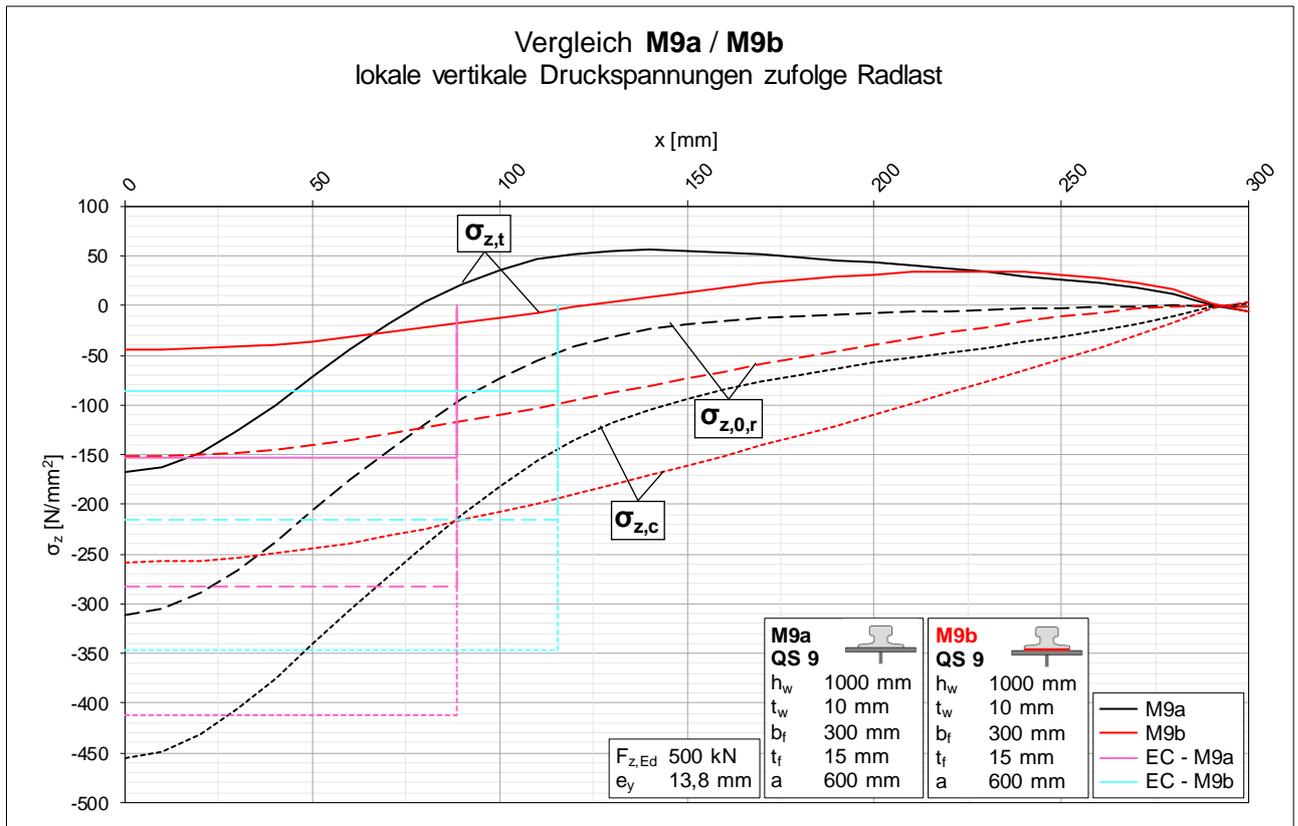


Diagramm 139: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M9

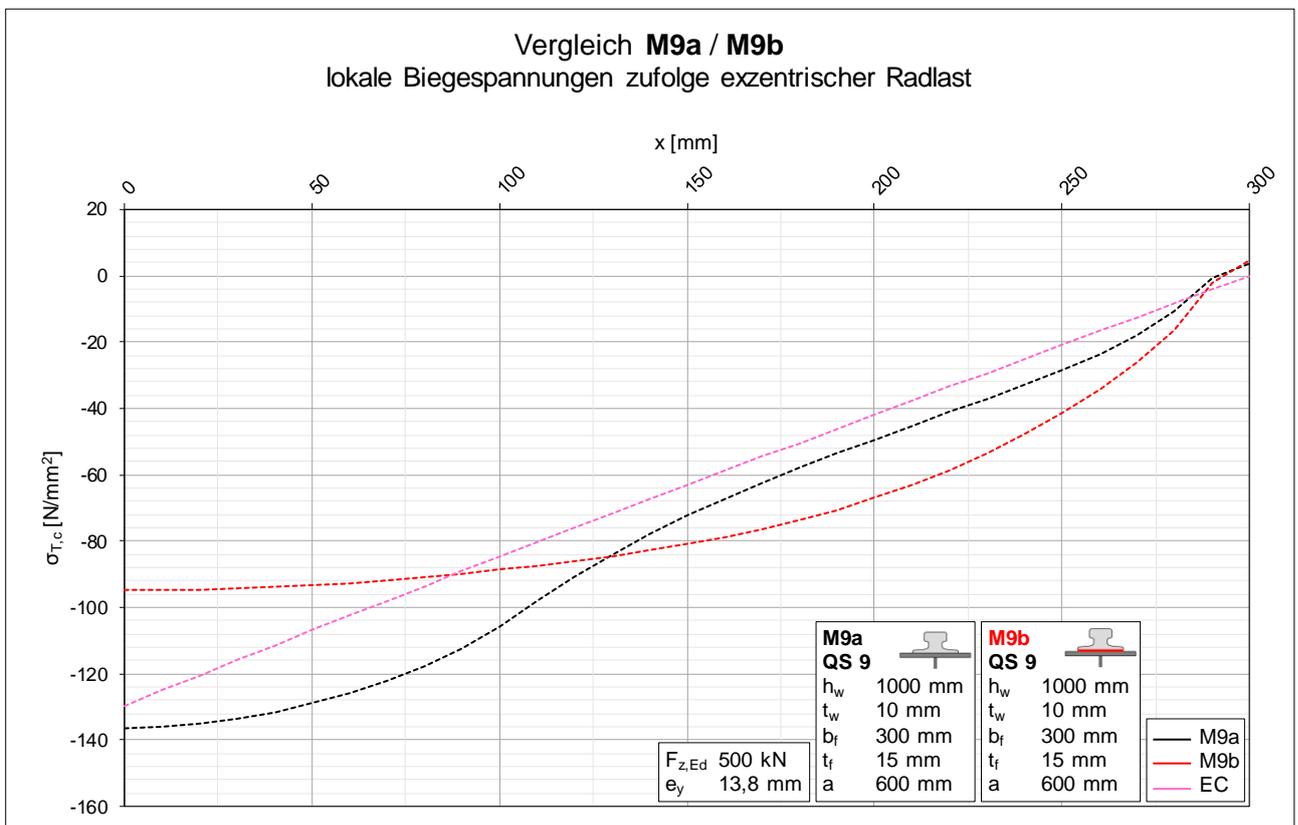


Diagramm 140: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M9

B.9.2 Vergleich M9a / M9c ► Einfluss der Klemmen

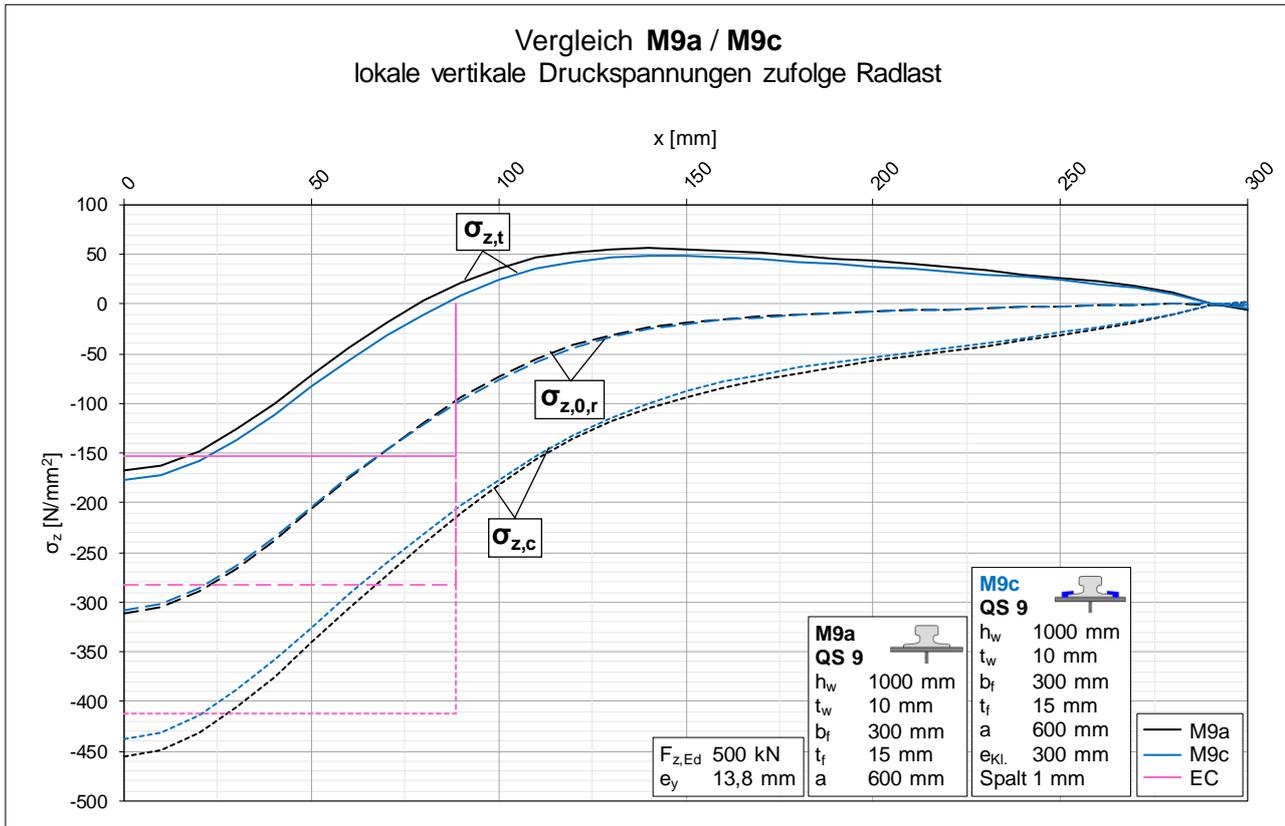


Diagramm 141: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M9

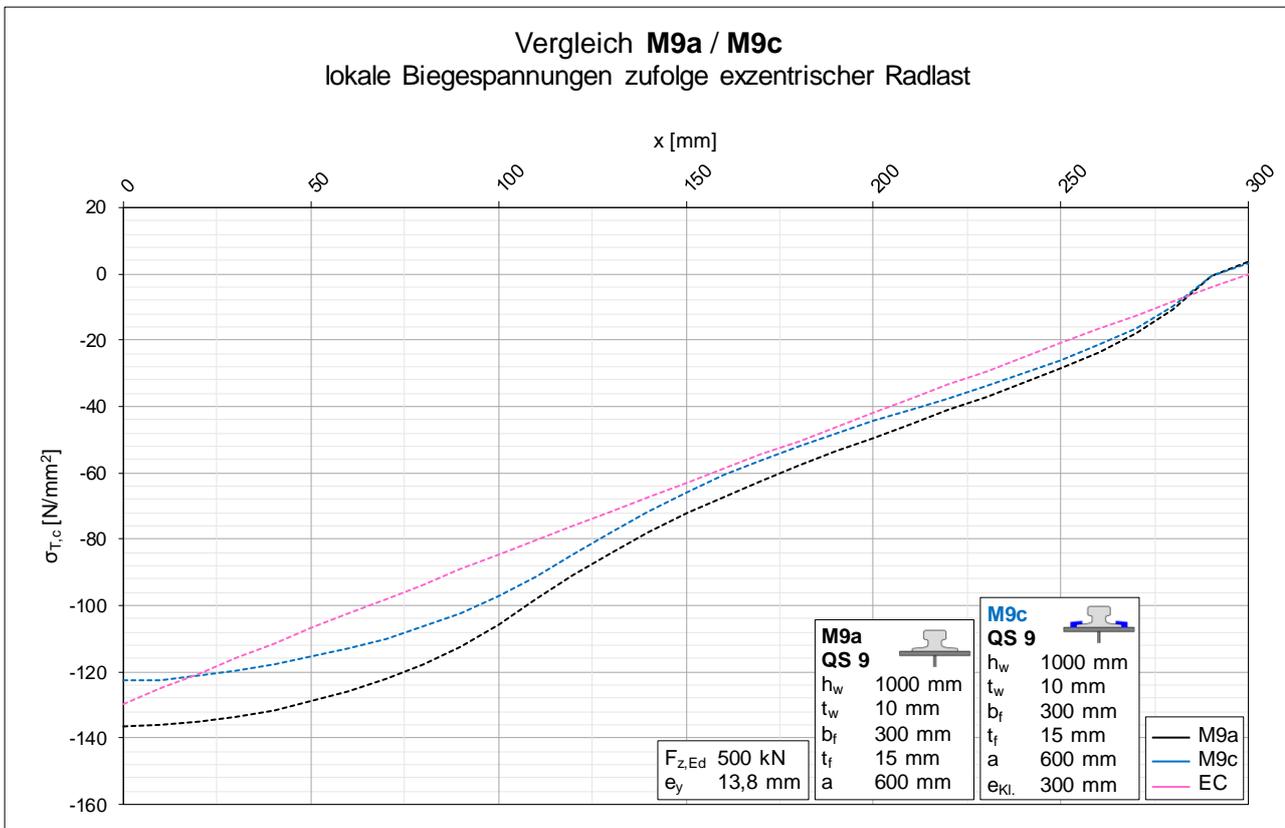


Diagramm 142: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M9

B.9.3 Vergleich M9b / M9d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

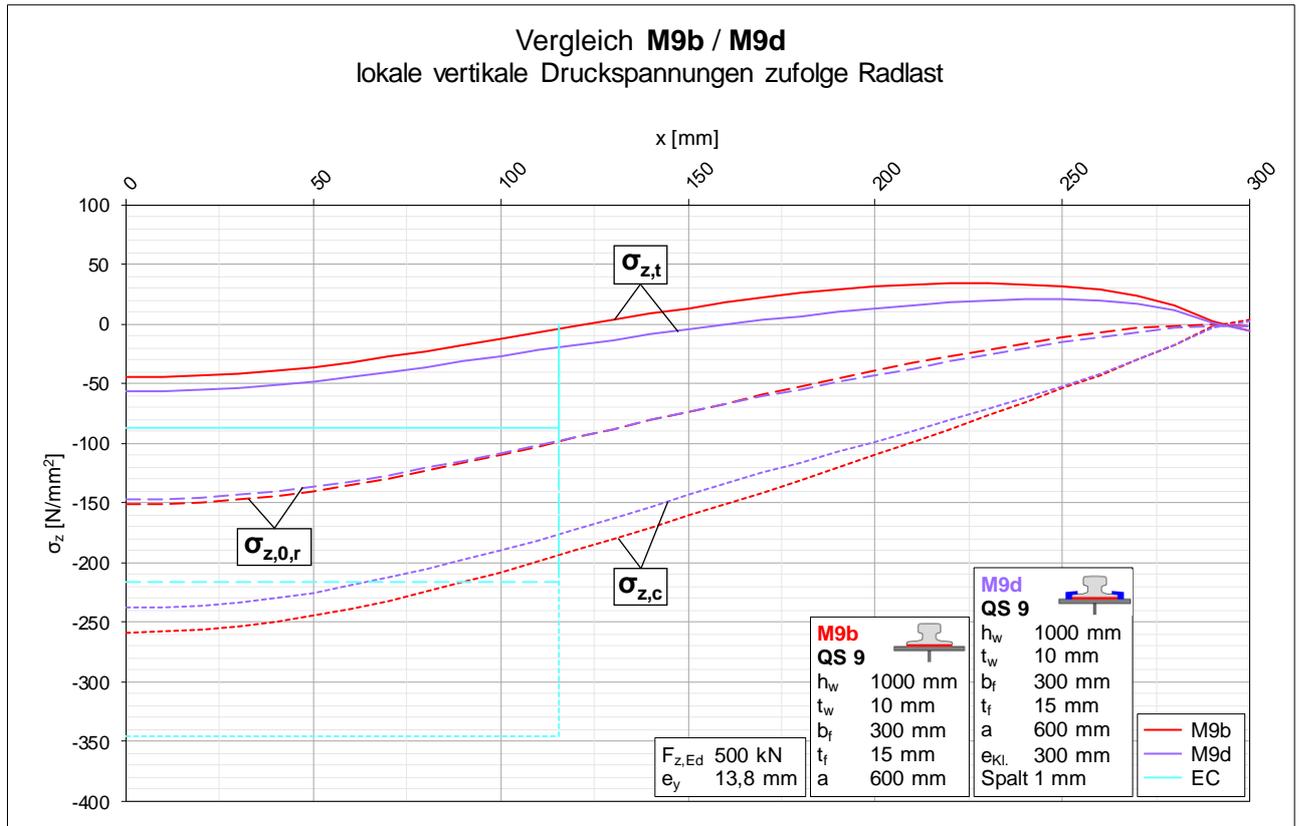


Diagramm 143: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M9

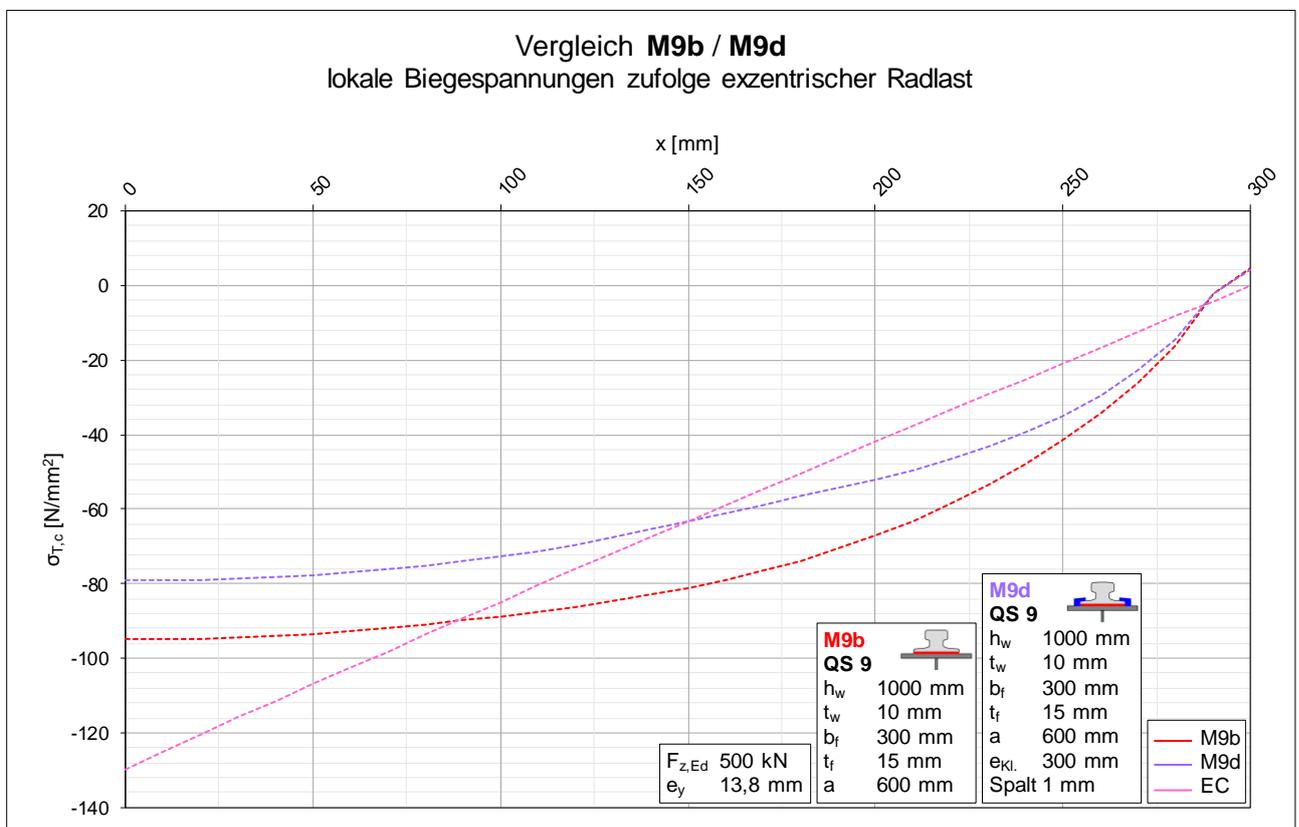


Diagramm 144: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M9

B.9.4 Vergleich M9c / M9e / M9f ► Klemmen ohne Spalt

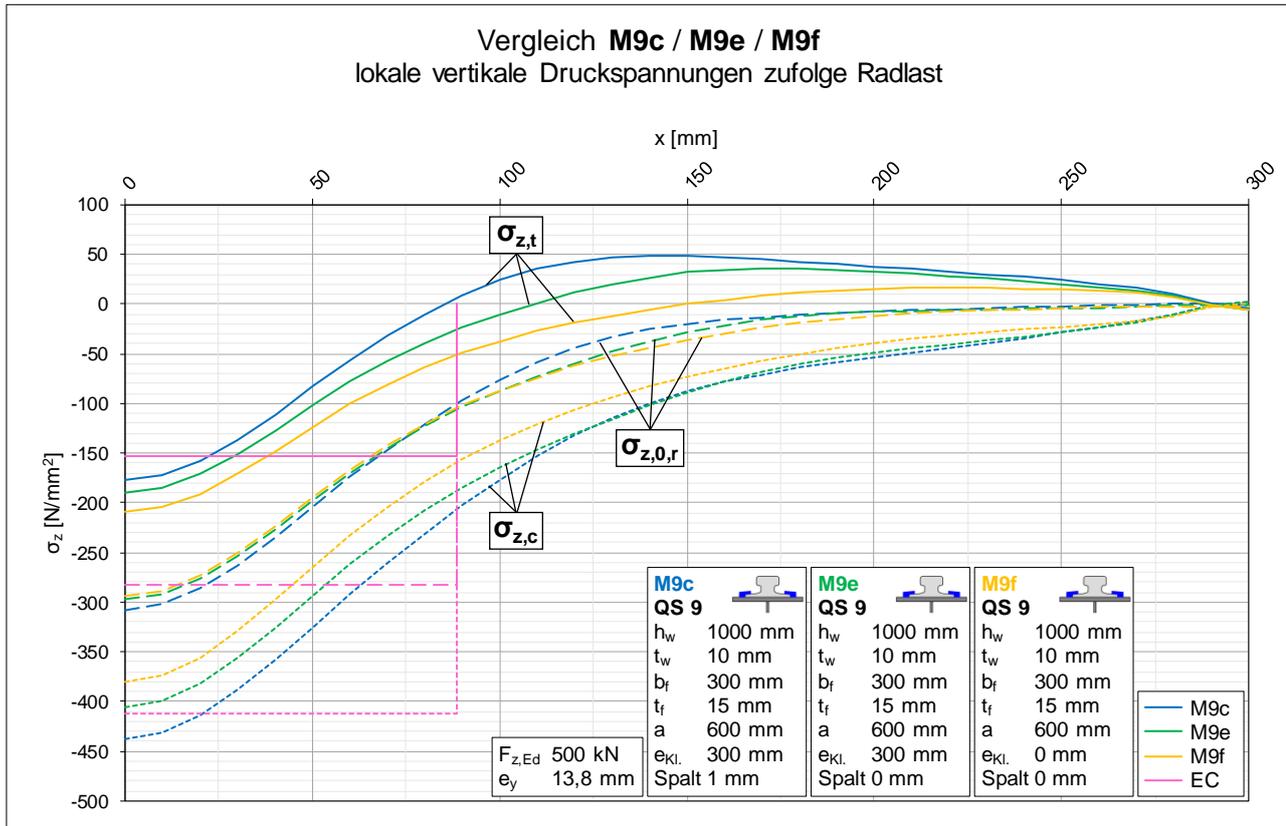


Diagramm 145: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M9

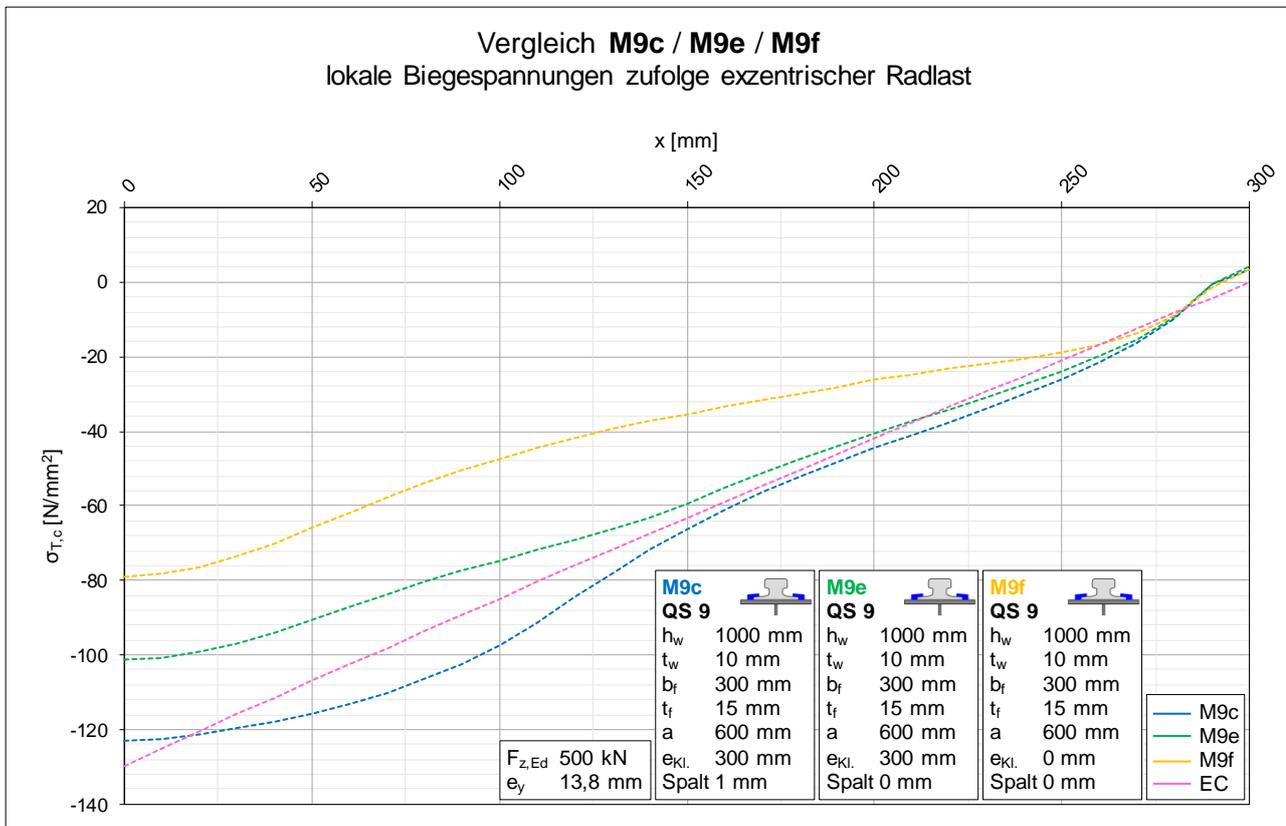


Diagramm 146: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M9

B.9.5 Vergleich M9d / M9g / M9h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

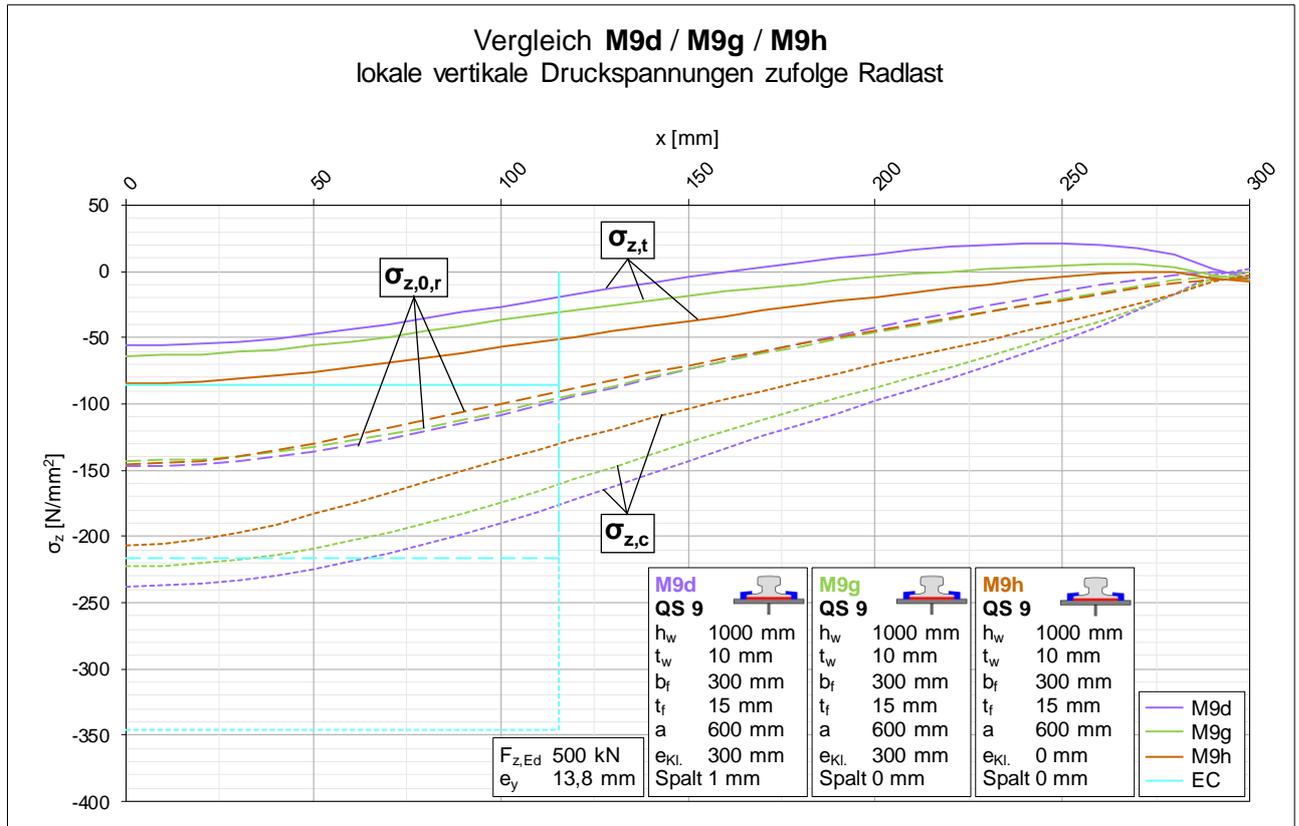


Diagramm 147: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M9

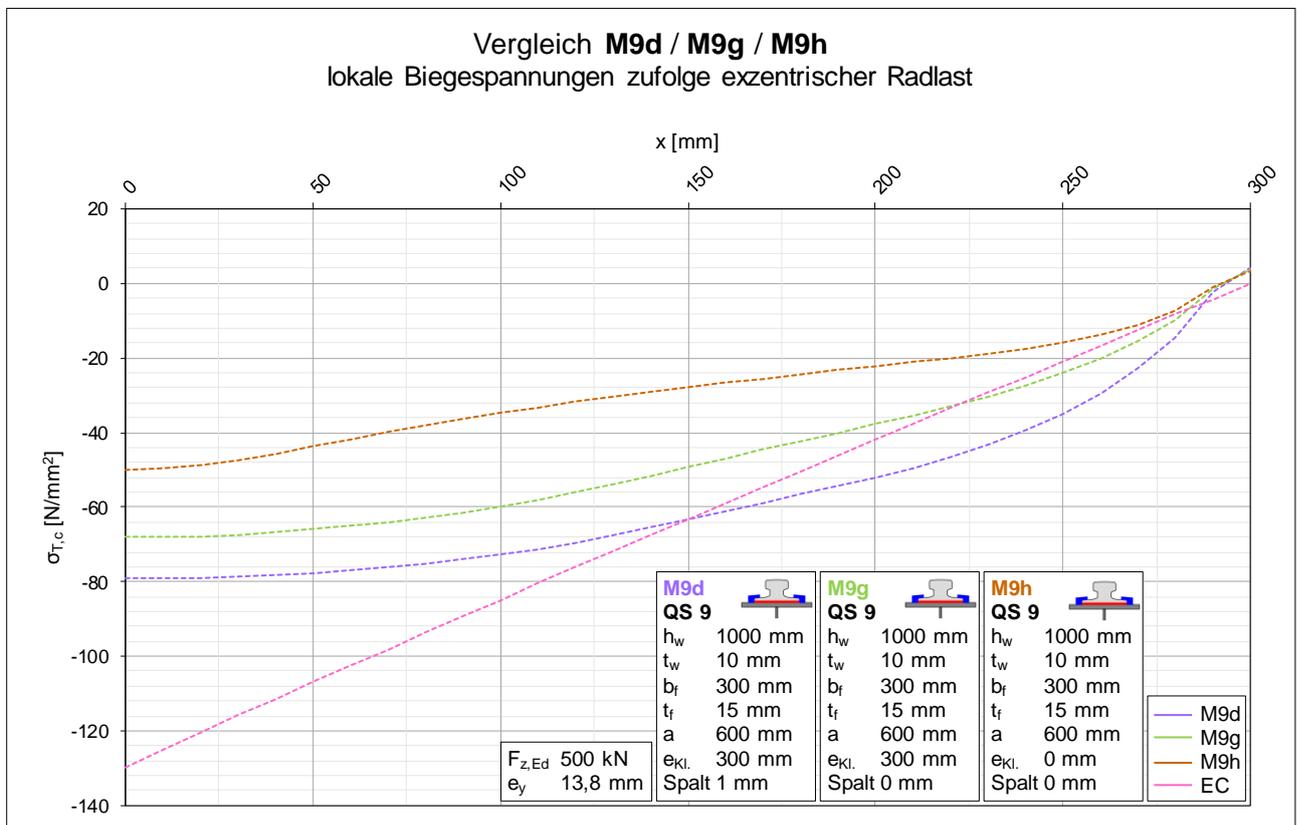


Diagramm 148: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M9

B.10 Modell M9 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.10.1 Vergleich M9a / M9b ► Einfluss der elastischen Unterlage

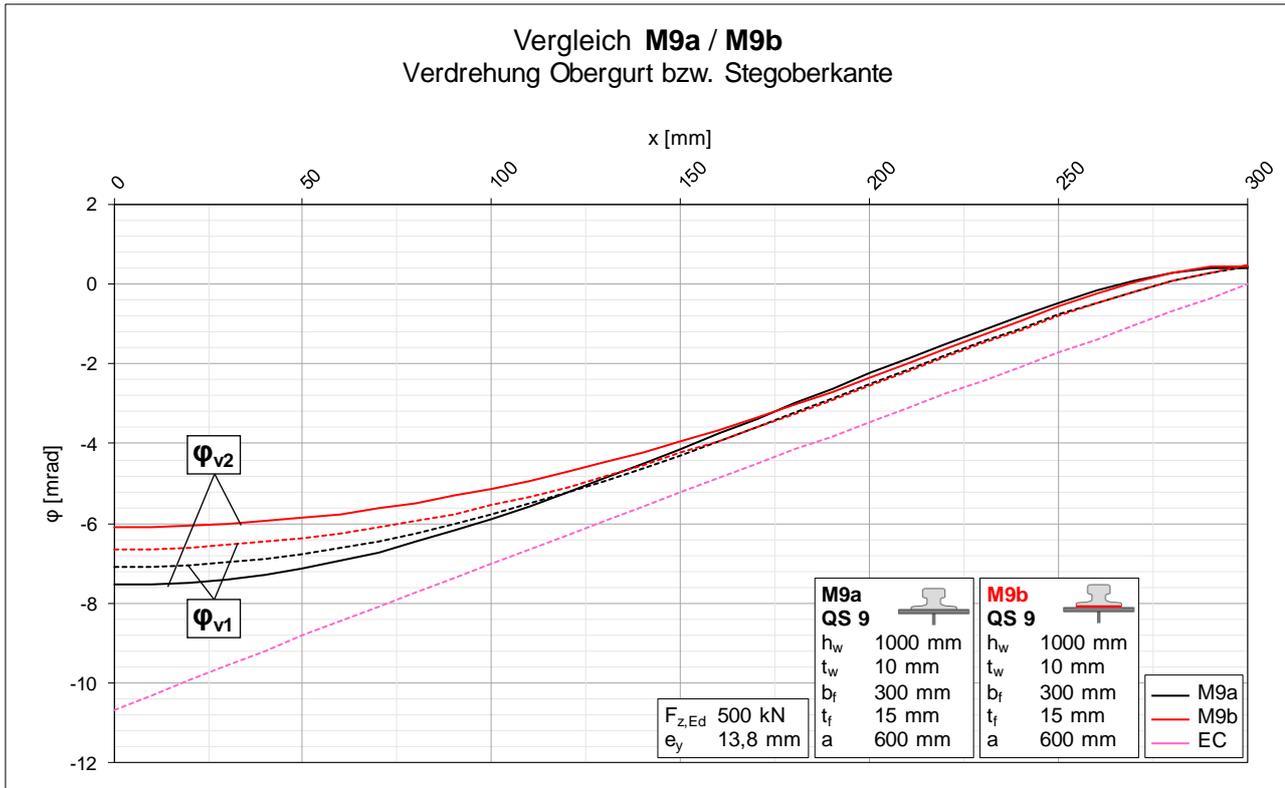


Diagramm 149: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M9

B.10.2 Vergleich M9a / M9c ► Einfluss der Klemmen

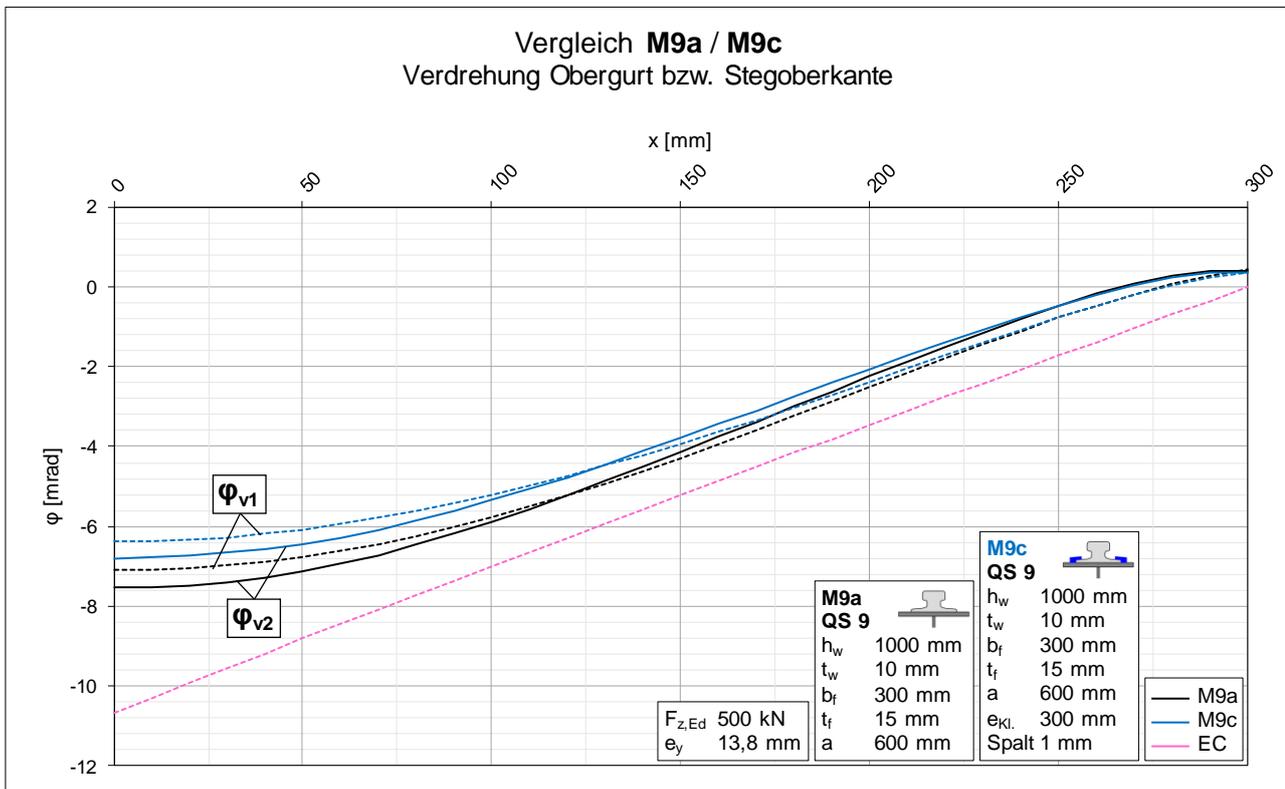


Diagramm 150: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M9

B.10.3 Vergleich M9b / M9d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

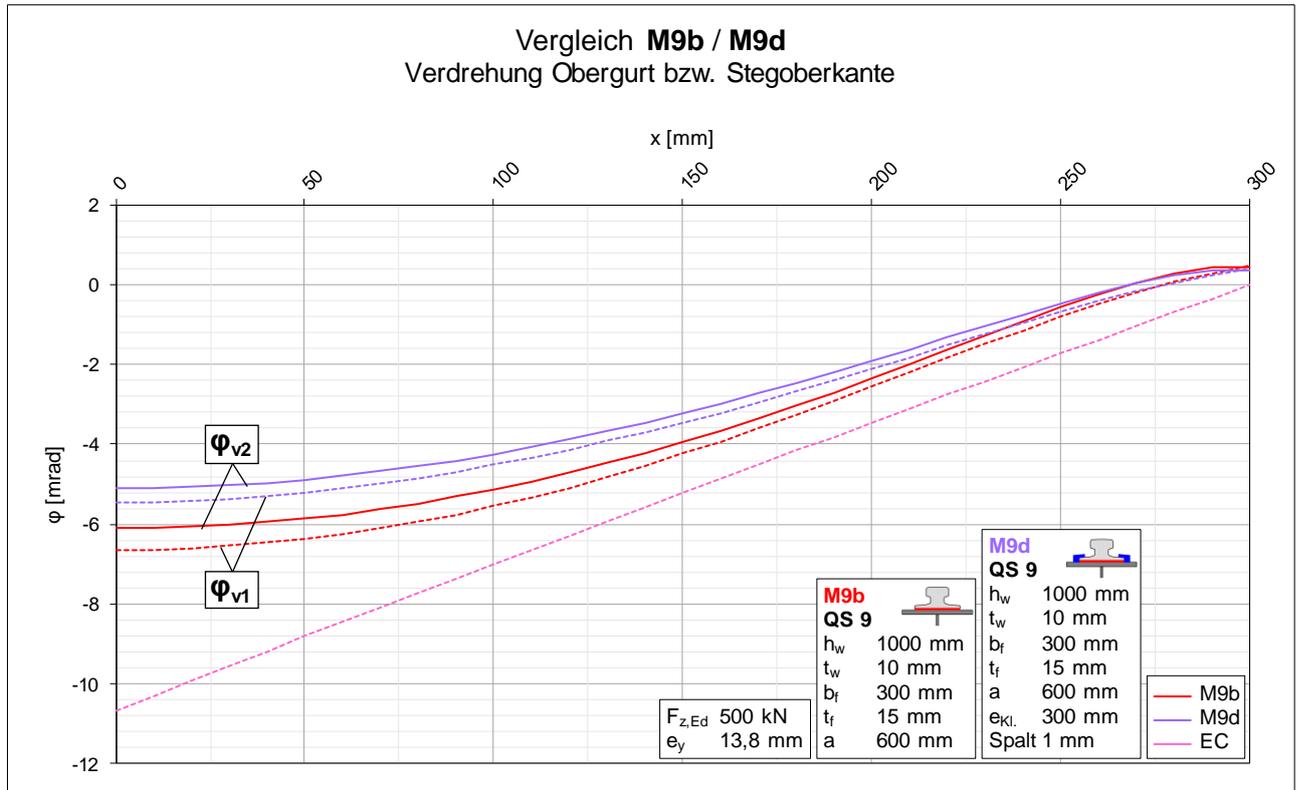


Diagramm 151: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M9

B.10.4 Vergleich M9c / M9e / M9f ► Klemmen ohne Spalt

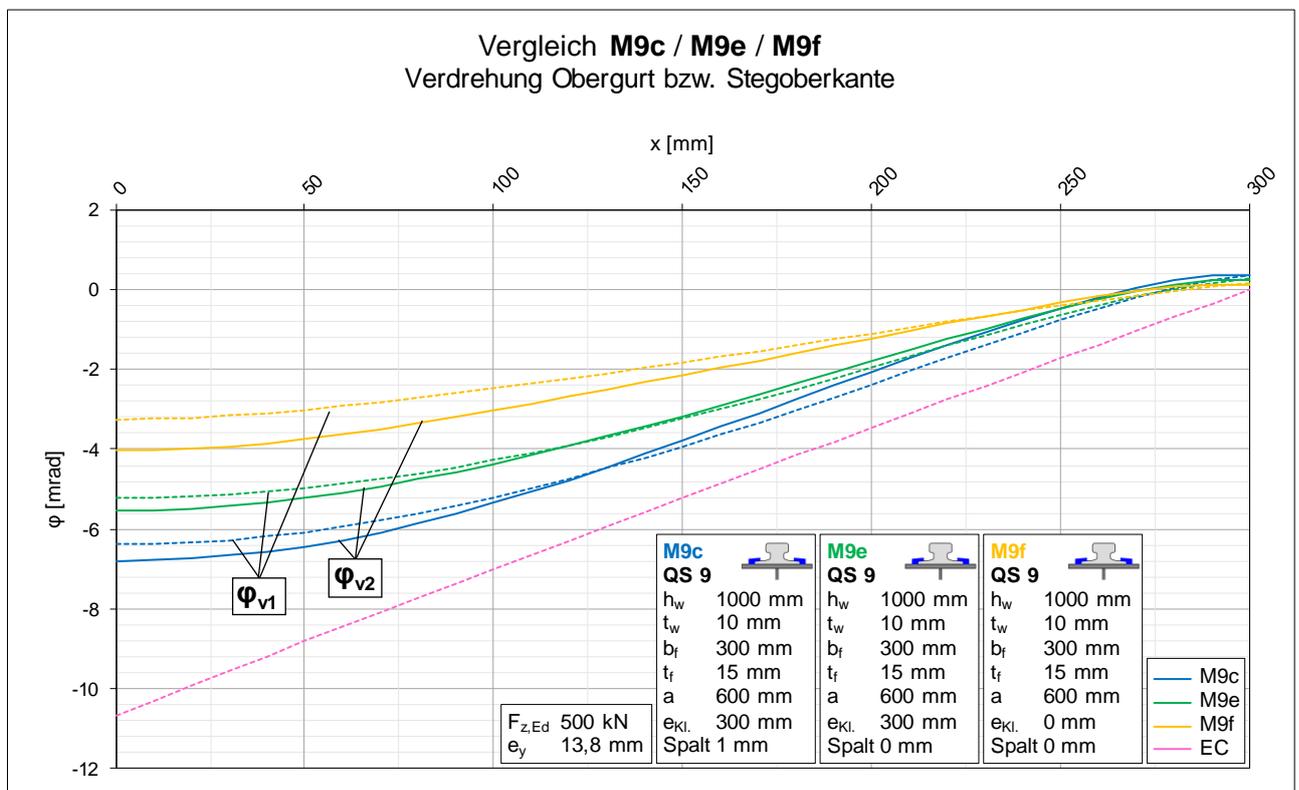


Diagramm 152: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M9

B.10.5 Vergleich M9d / M9g / M9h ► Klemmen ohne Spalt, mit elastischer Unterlage

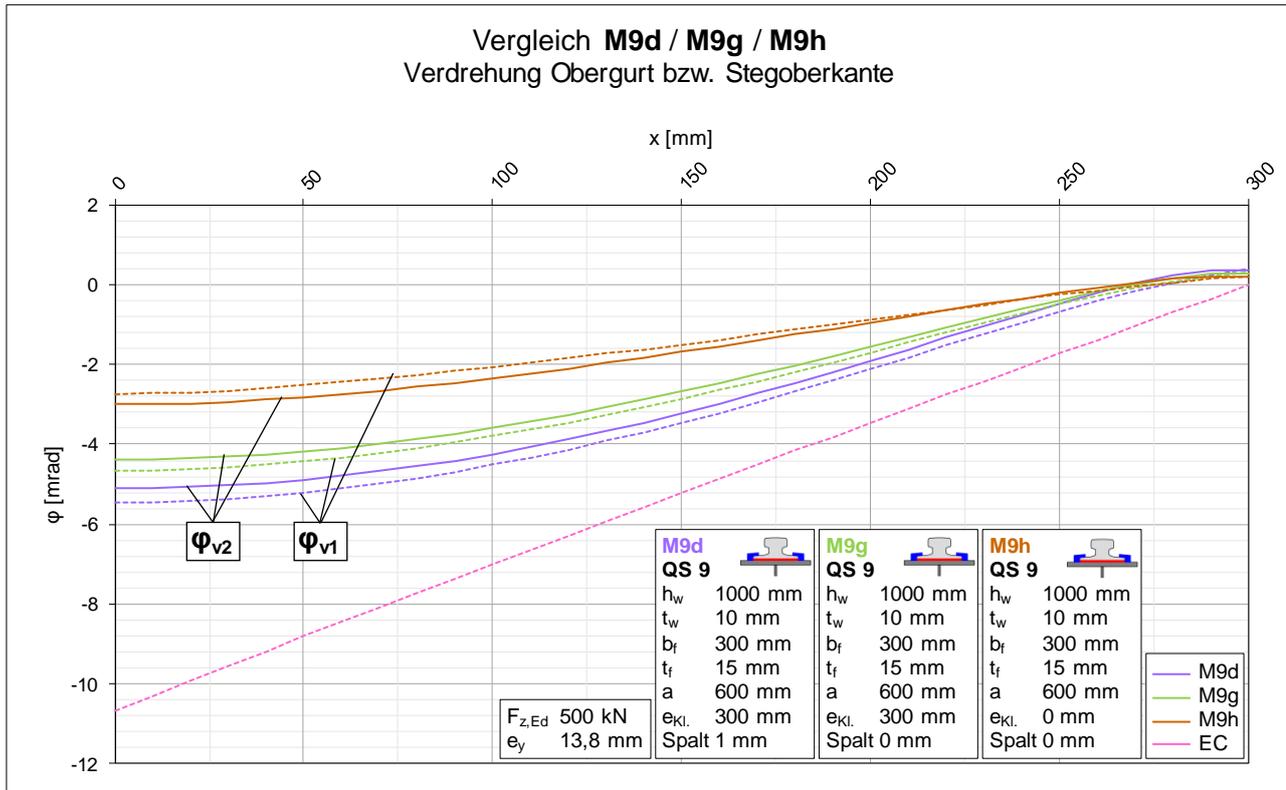


Diagramm 153: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M9

B.11 Modell M10 / Vergleiche auf Spannungsebene

B.11.1 Vergleich M10a / M10b ► Einfluss der elastischen Unterlage

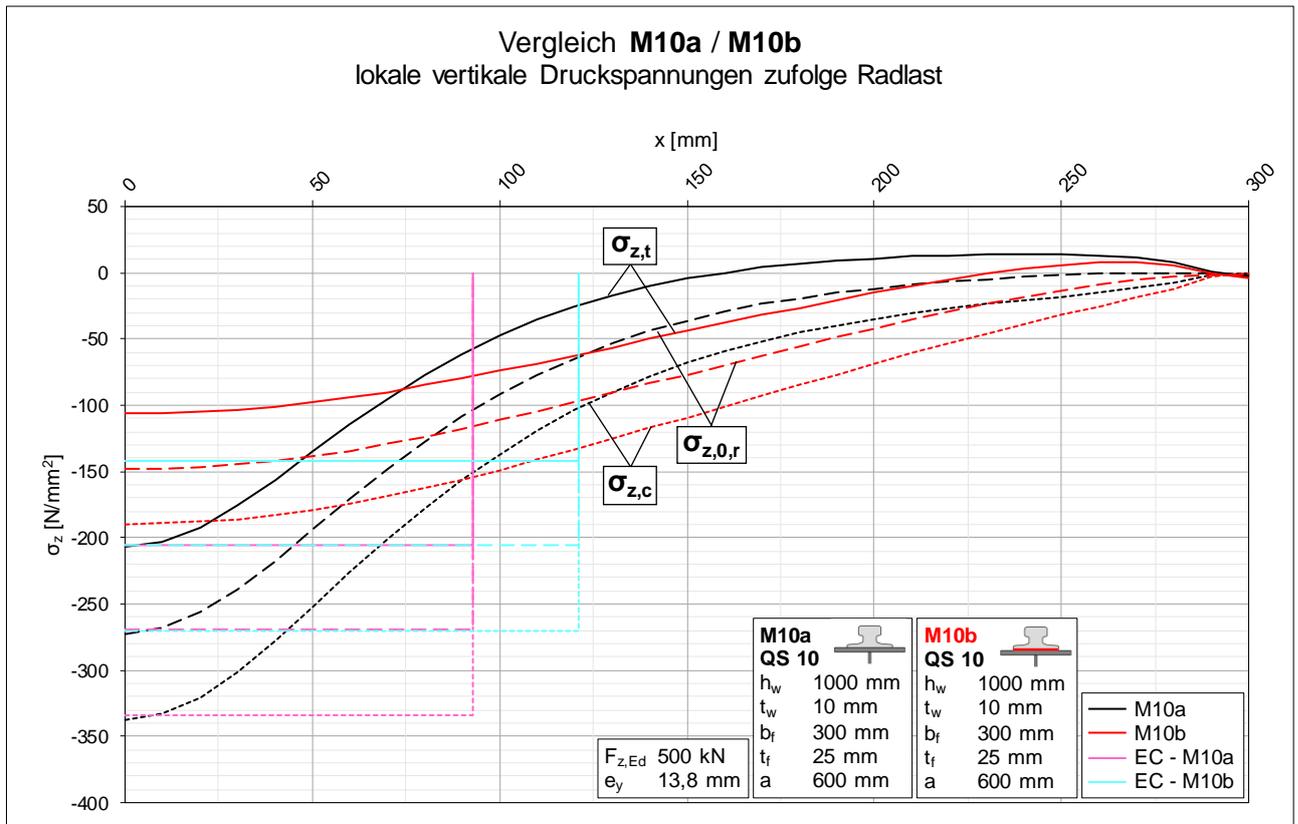


Diagramm 154: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und b von Modell M10

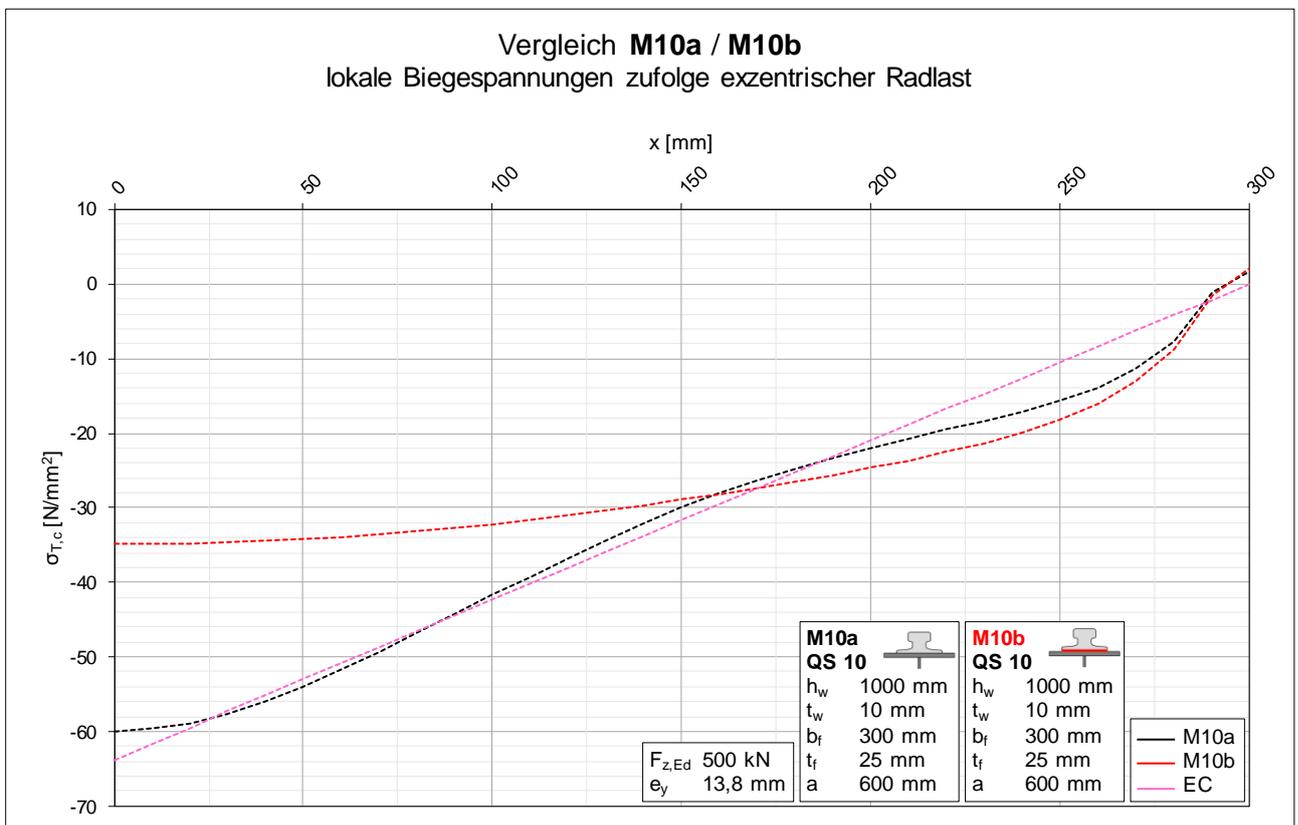


Diagramm 155: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und b von Modell M10

B.11.2 Vergleich M10a / M10c ► Einfluss der Klemmen

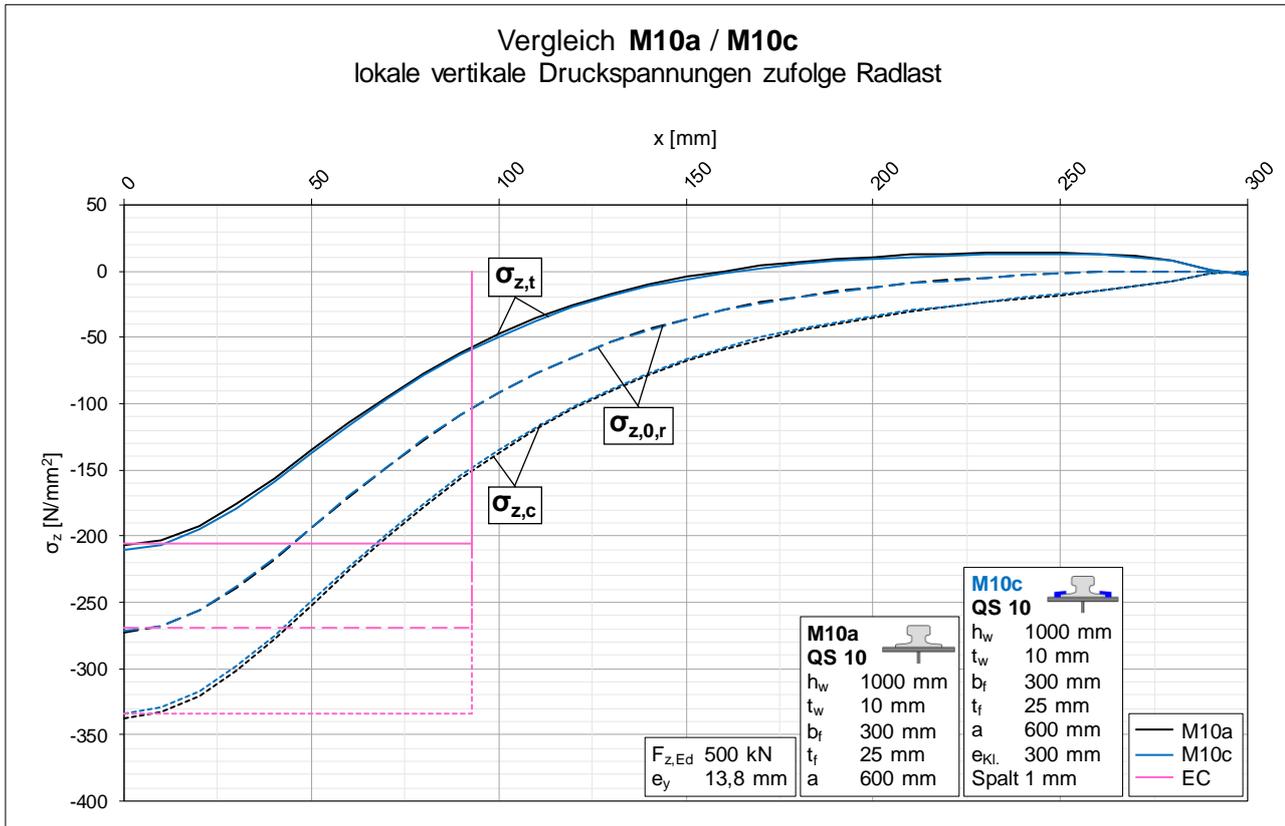


Diagramm 156: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten a und c von Modell M10

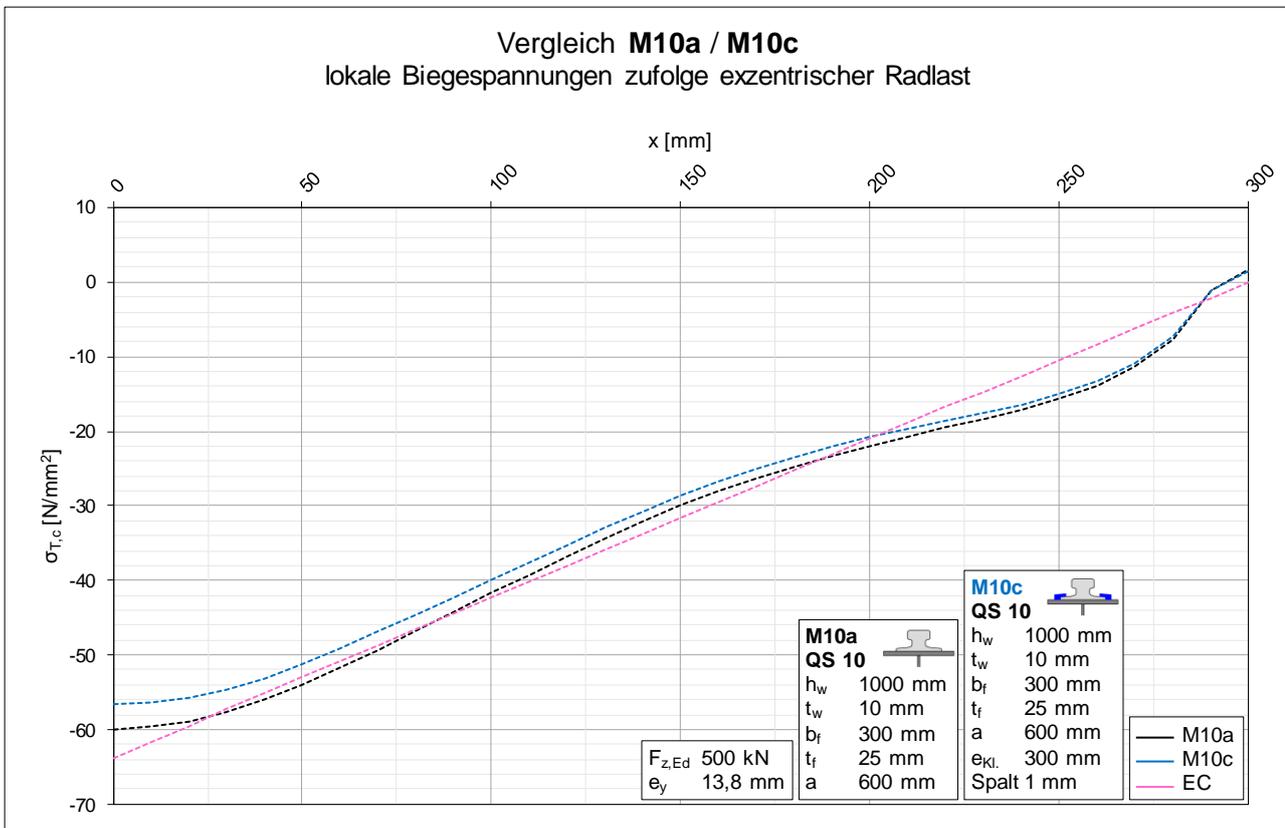


Diagramm 157: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten a und c von Modell M10

B.11.3 Vergleich M10b / M10d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

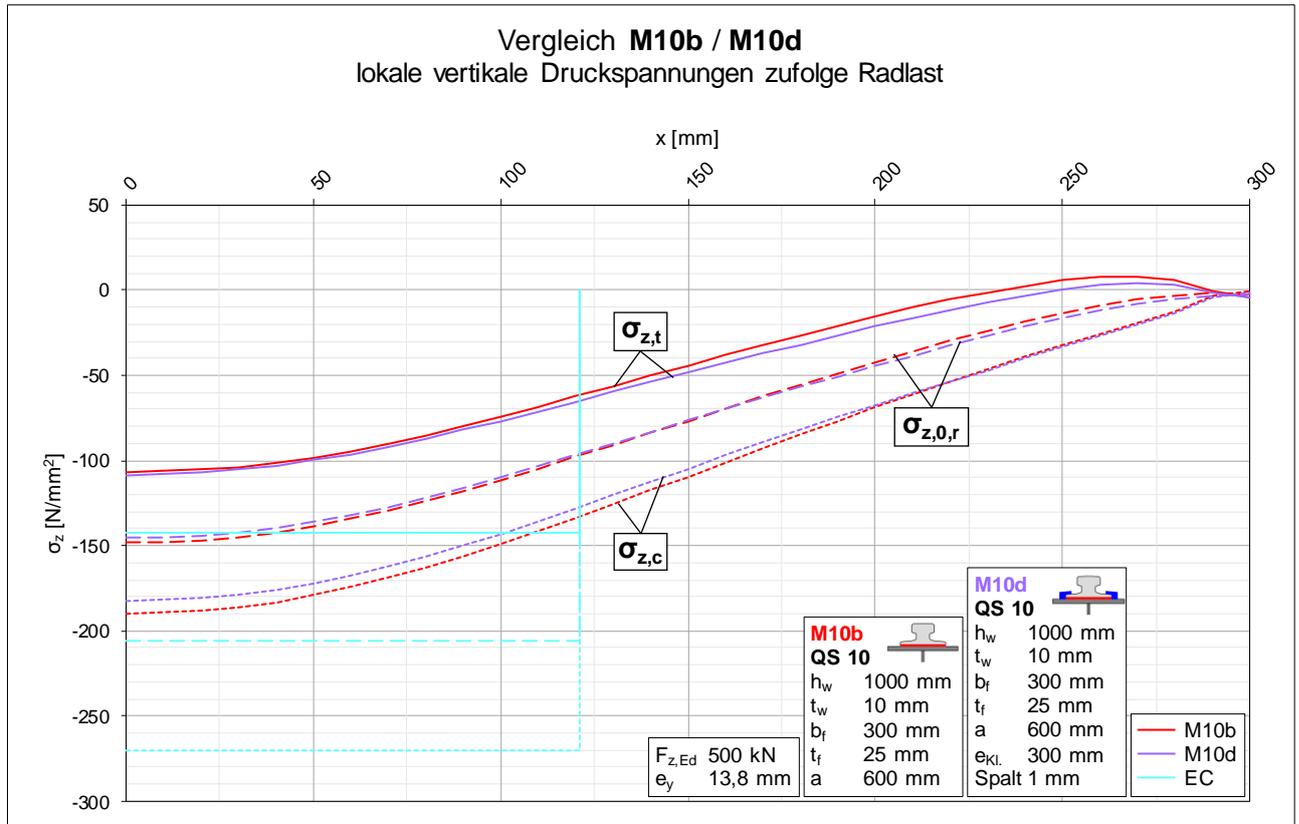


Diagramm 158: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten b und d von Modell M10

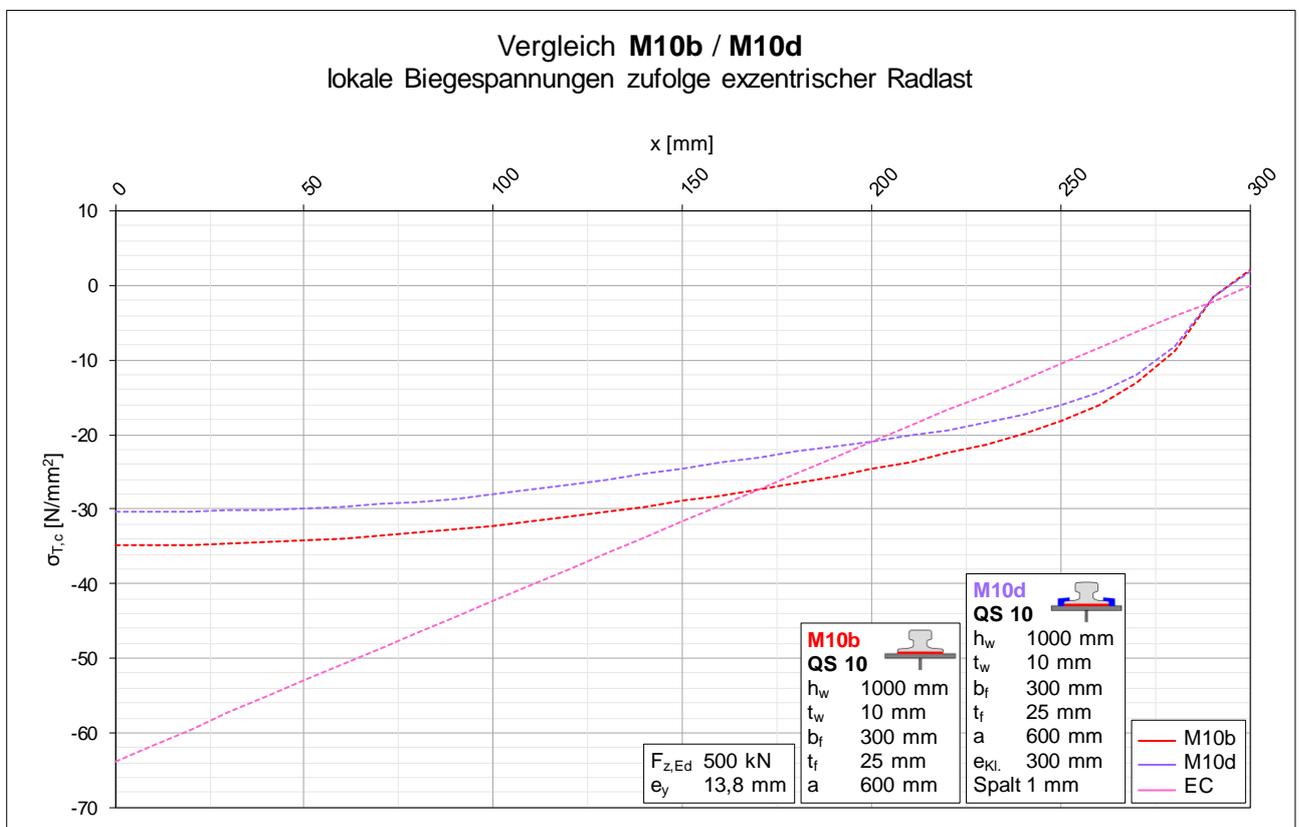


Diagramm 159: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten b und d von Modell M10

B.11.4 Vergleich M10c / M10e / M10f ► Klemmen ohne Spalt

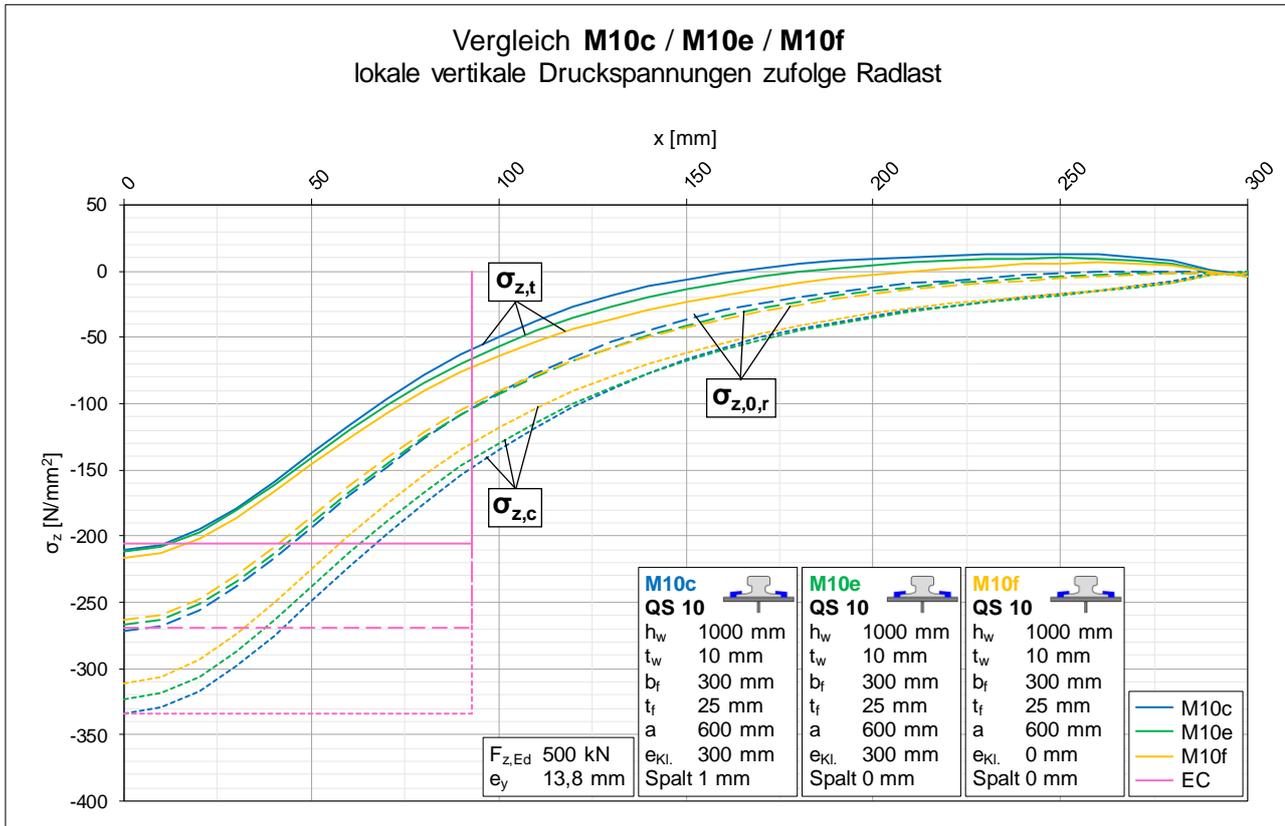


Diagramm 160: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten c, e und f von Modell M10

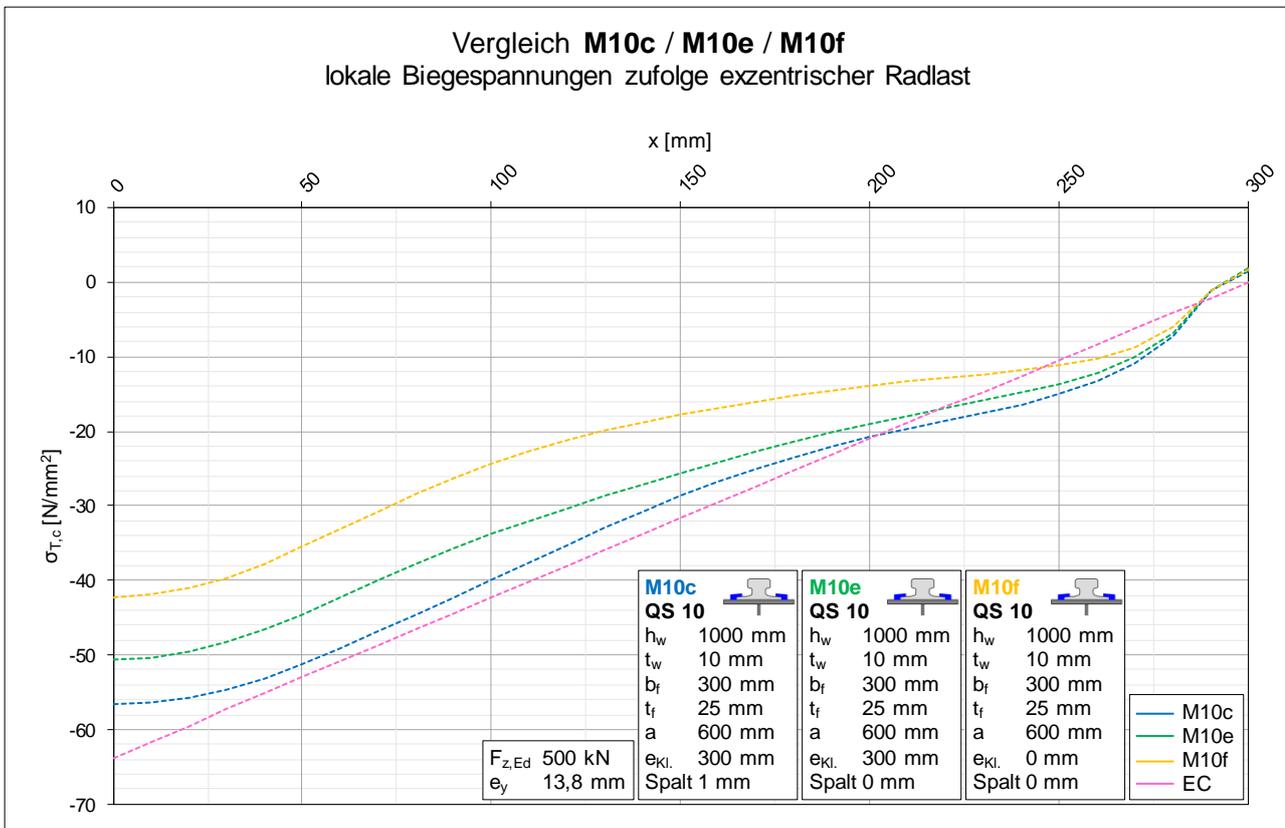


Diagramm 161: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten c, e und f von Modell M10

B.11.5 Vergleich M10d / M10g / M10h ▶ Klemmen ohne Spalt, mit elast. Unterlage

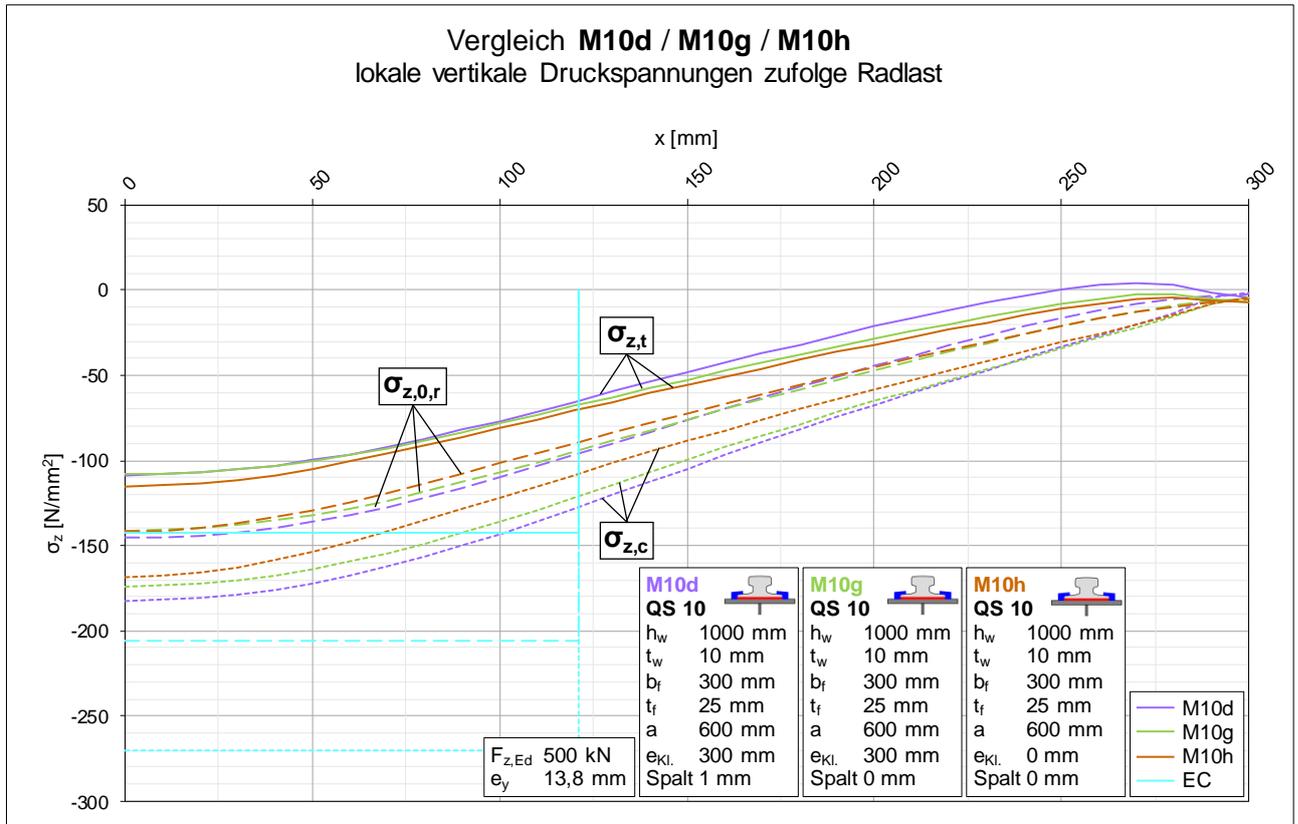


Diagramm 162: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Varianten d, g und h von Modell M10

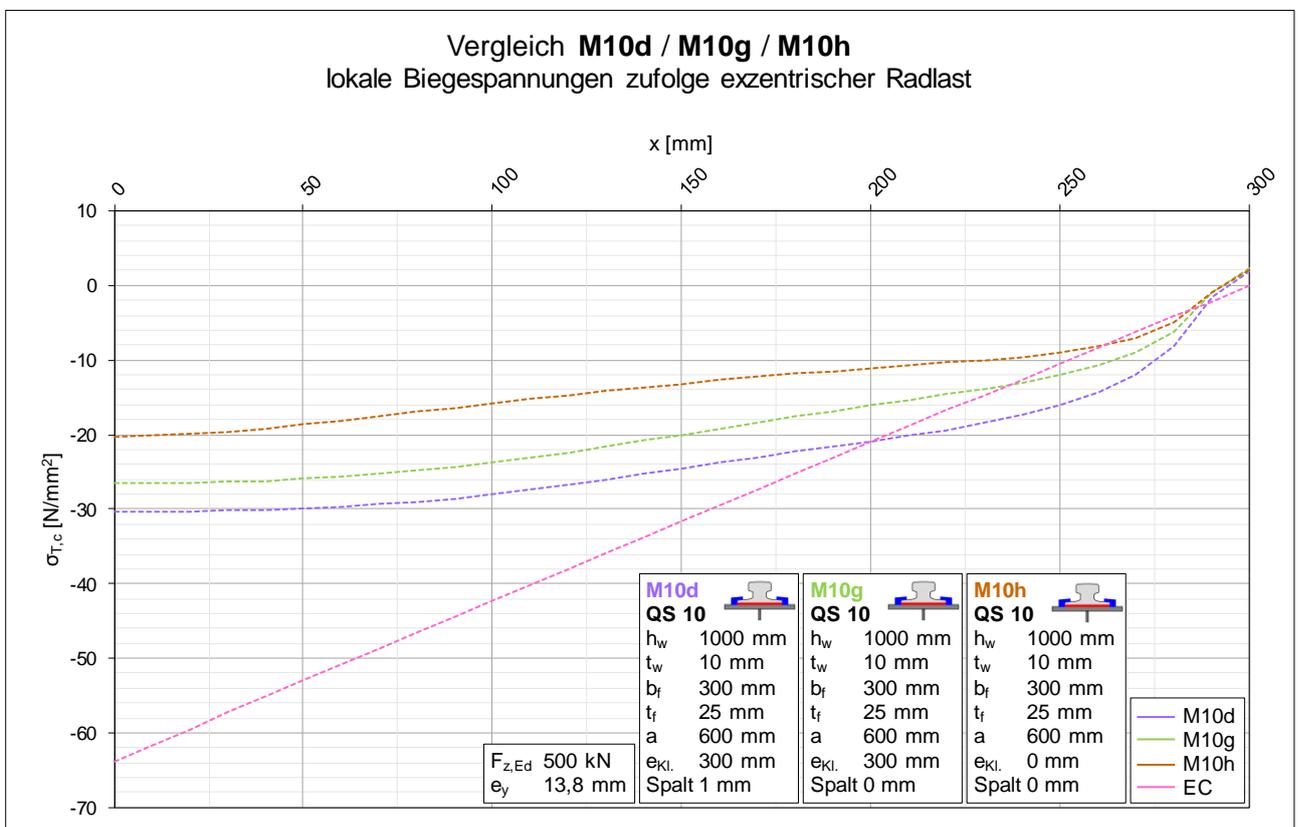


Diagramm 163: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Varianten d, g und h von Modell M10

B.12 Modell M10 / Vergleiche auf Verdrehungsebene

B.12.1 Vergleich M10a / M10b ► Einfluss der elastischen Unterlage

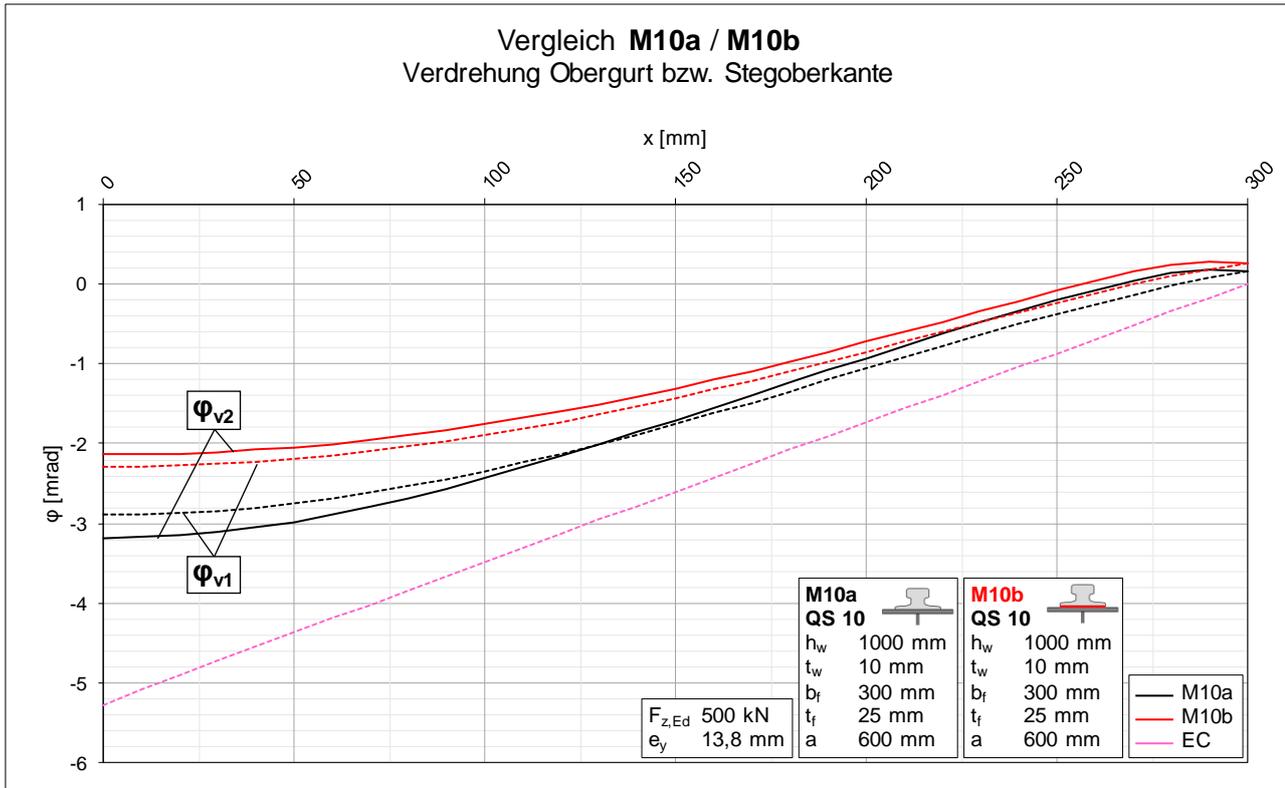


Diagramm 164: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und b von Modell M10

B.12.2 Vergleich M10a / M10c ► Einfluss der Klemmen

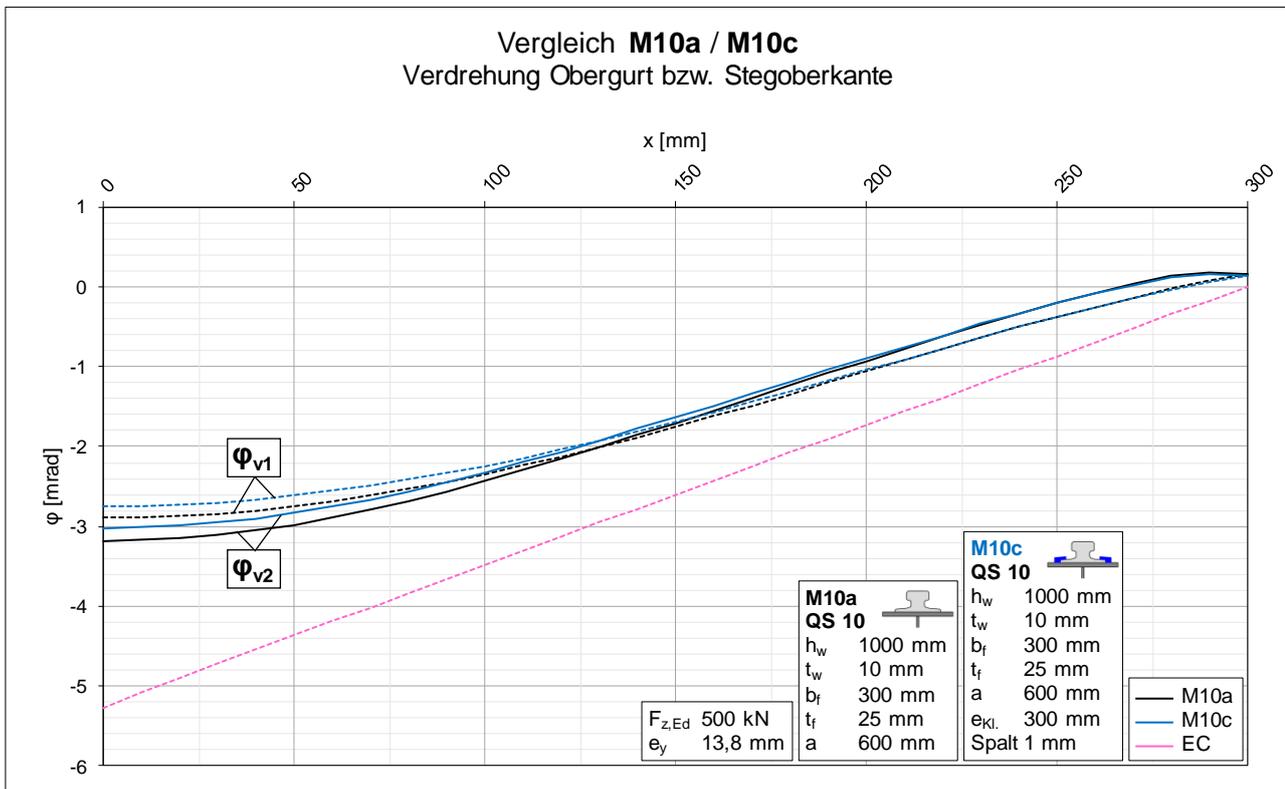


Diagramm 165: Vergleich der Verdrehungen der Varianten a und c von Modell M10

B.12.3 Vergleich M10b / M10d ► Einfluss der Klemmen mit elastischer Unterlage

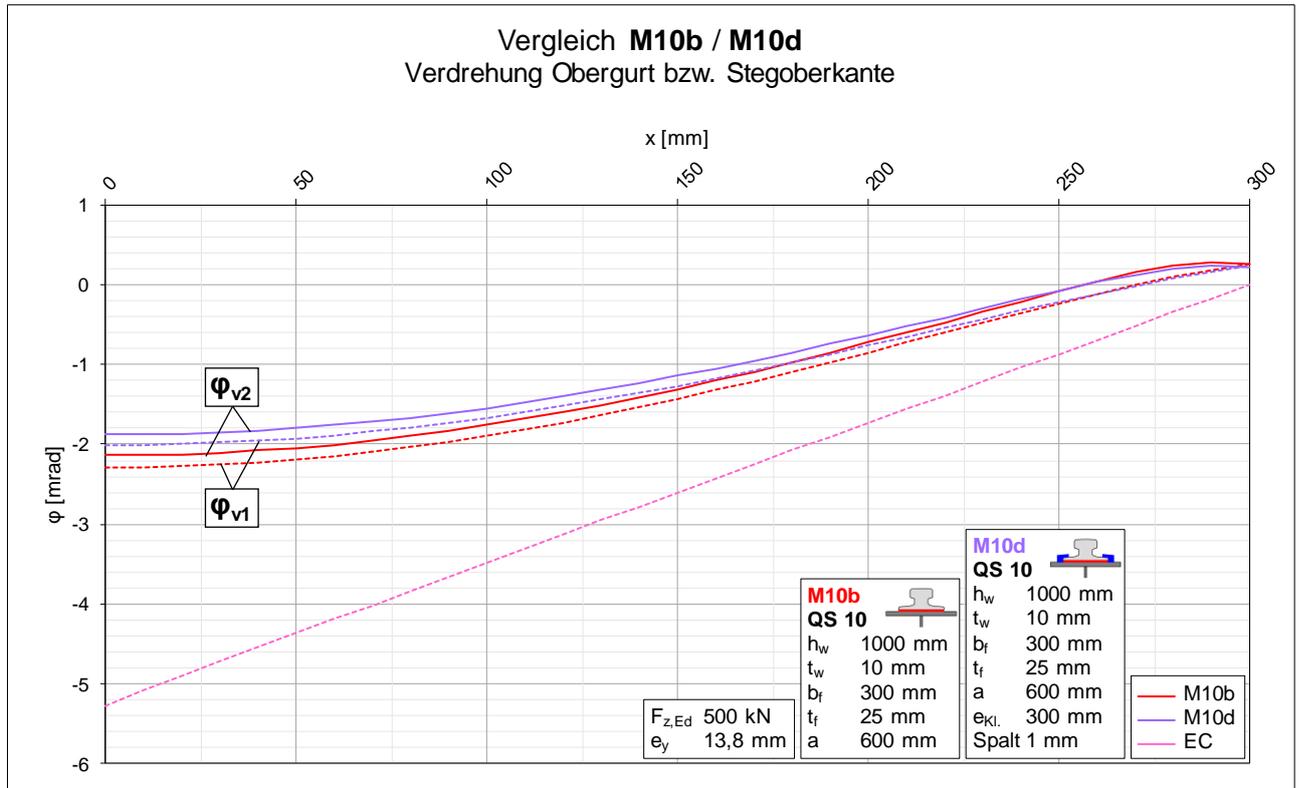


Diagramm 166: Vergleich der Verdrehungen der Varianten b und d von Modell M10

B.12.4 Vergleich M10c / M10e / M10f ► Klemmen ohne Spalt

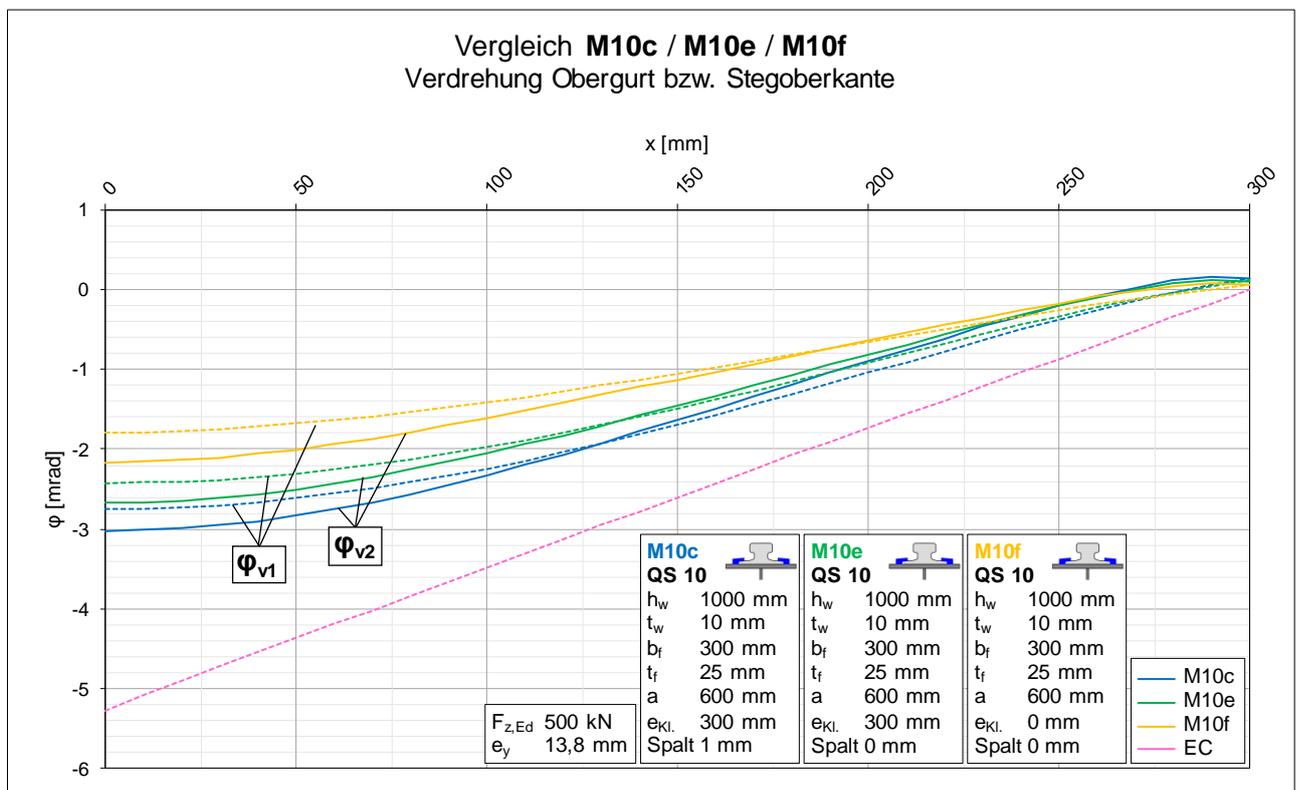


Diagramm 167: Vergleich der Verdrehungen der Varianten c, e und f von Modell M10

B.12.5 Vergleich M10d / M10g / M10h ▶ Klemmen ohne Spalt, mit elast. Unterlage

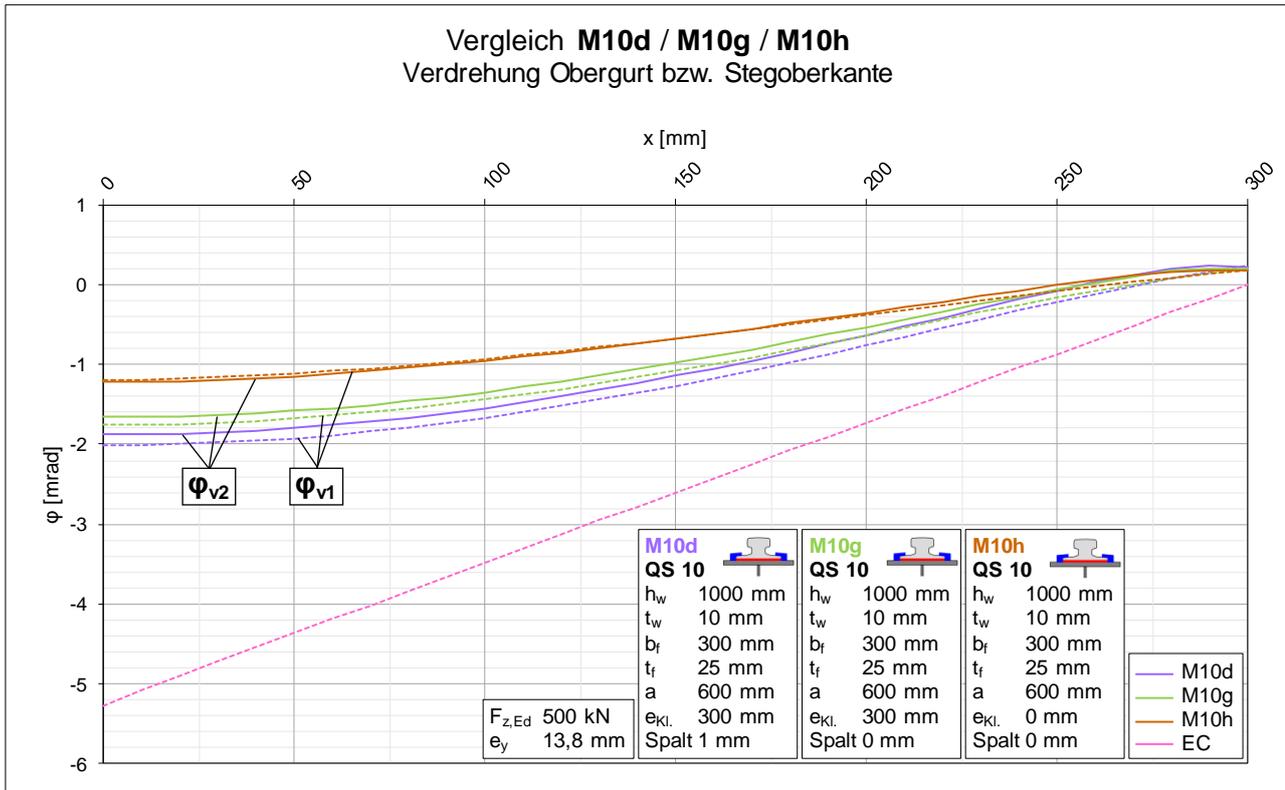


Diagramm 168: Vergleich der Verdrehungen der Varianten d, g und h von Modell M10

C Blockschiene 60/30 / Modelle M11 - M14

In Anhang C werden jene Vergleiche der Spannungs- und Verdrehungsverläufe der Modelle M12 bis M14 dargestellt, die im Hauptteil der Arbeit nicht abgebildet sind (Vergleiche mit Modell M11 siehe Kap. 5).

Die folgenden Diagramme zeigen einerseits die Verläufe der lokalen vertikalen Druck- bzw. Biegespannungen, wobei jeweils zwei Modelle mit unterschiedlichen geometrischen Parametern (d. h. Kranbahnträger mit verschiedenen Querschnitten) verglichen werden.

Andererseits sind in den Diagrammen die Verläufe der Verdrehung des Obergurts bzw. der Stegoberkante abgebildet, auch hier werden immer zwei unterschiedliche Trägergeometrien betrachtet.

Bei diesen Vergleichen wird (wie in Kap. 5 beschrieben) ein Parameter „eingefroren“, wodurch der Einfluss des jeweils anderen Parameters auf die Ergebnisse hervorgehoben wird.

C.1 Vergleiche auf Spannungsebene

C.1.1 Vergleich M12 / M14 ► Einfluss der Flanschdicke

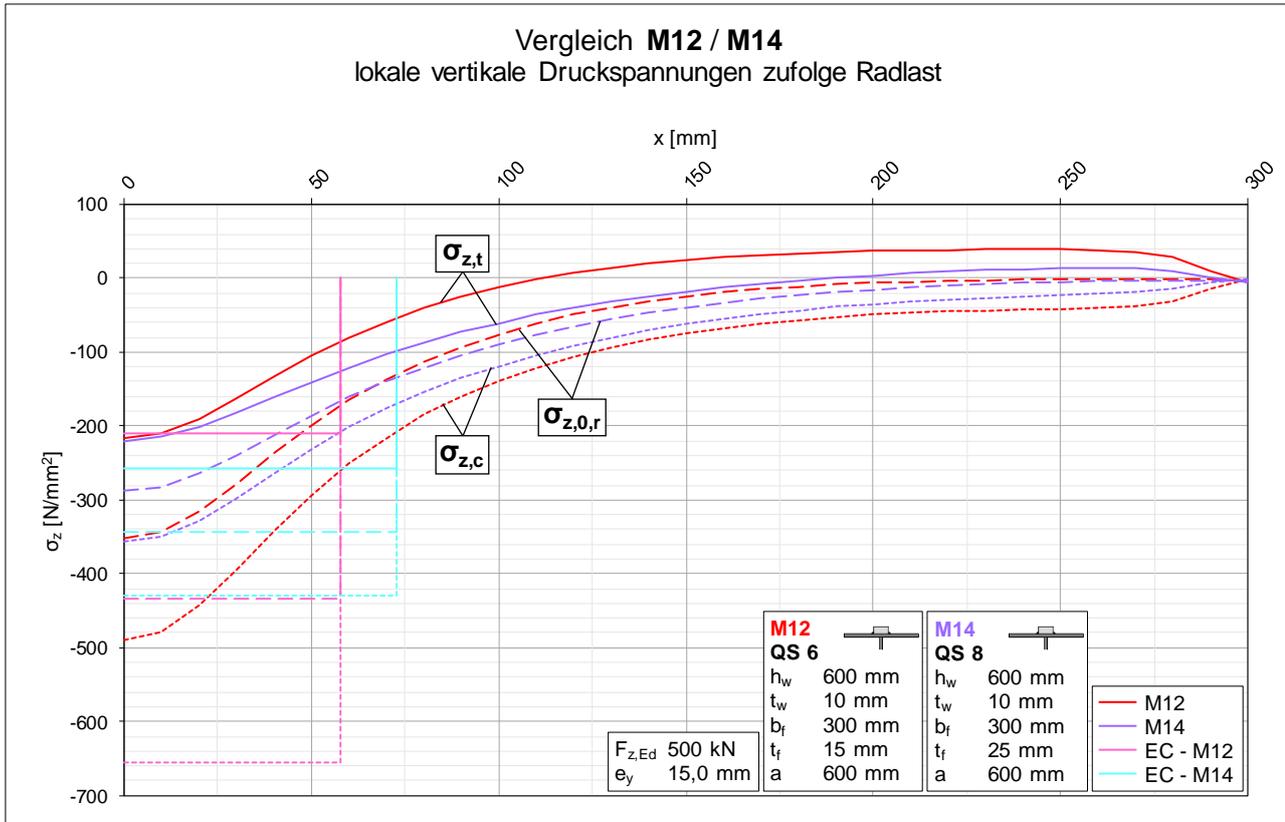


Diagramm 169: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M12 und M14

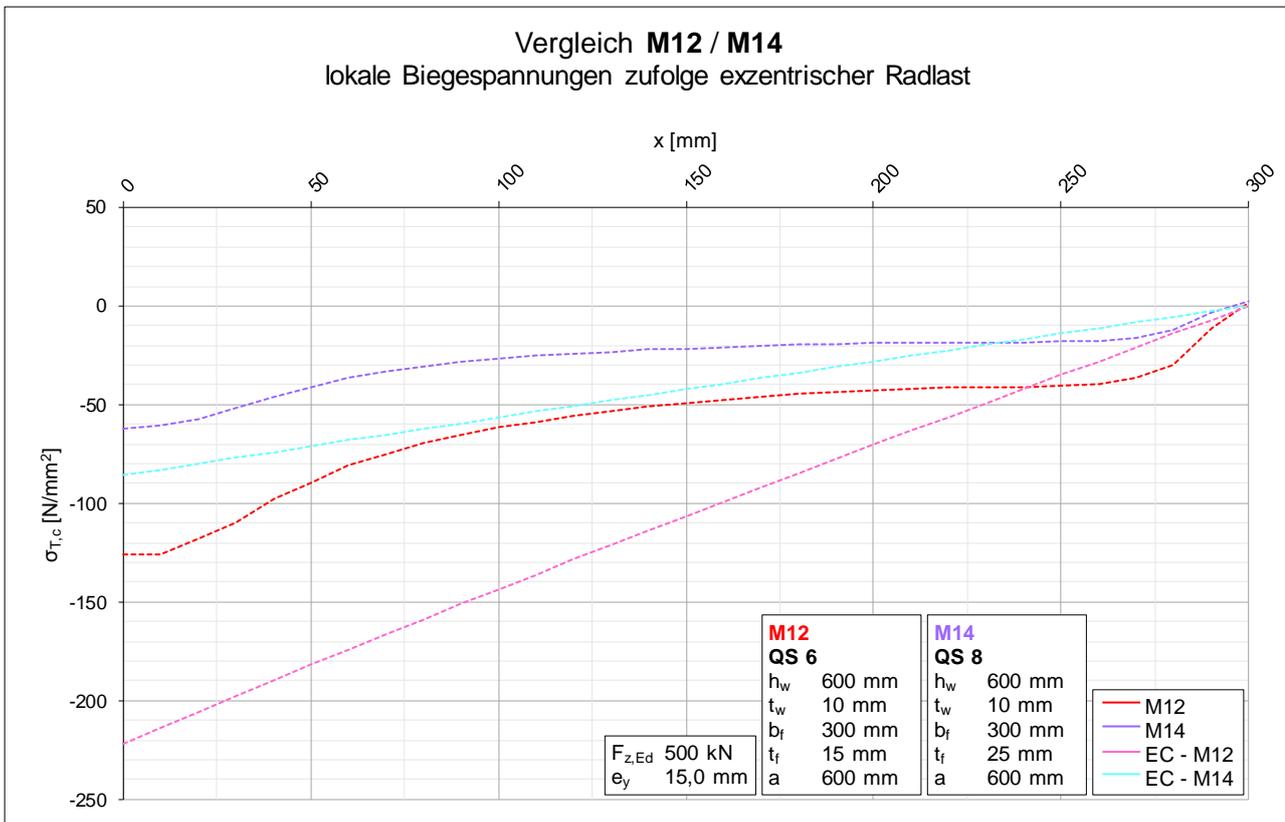


Diagramm 170: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Modelle M12 und M14

C.1.2 Vergleich M13 / M14 ► Einfluss der Steghöhe

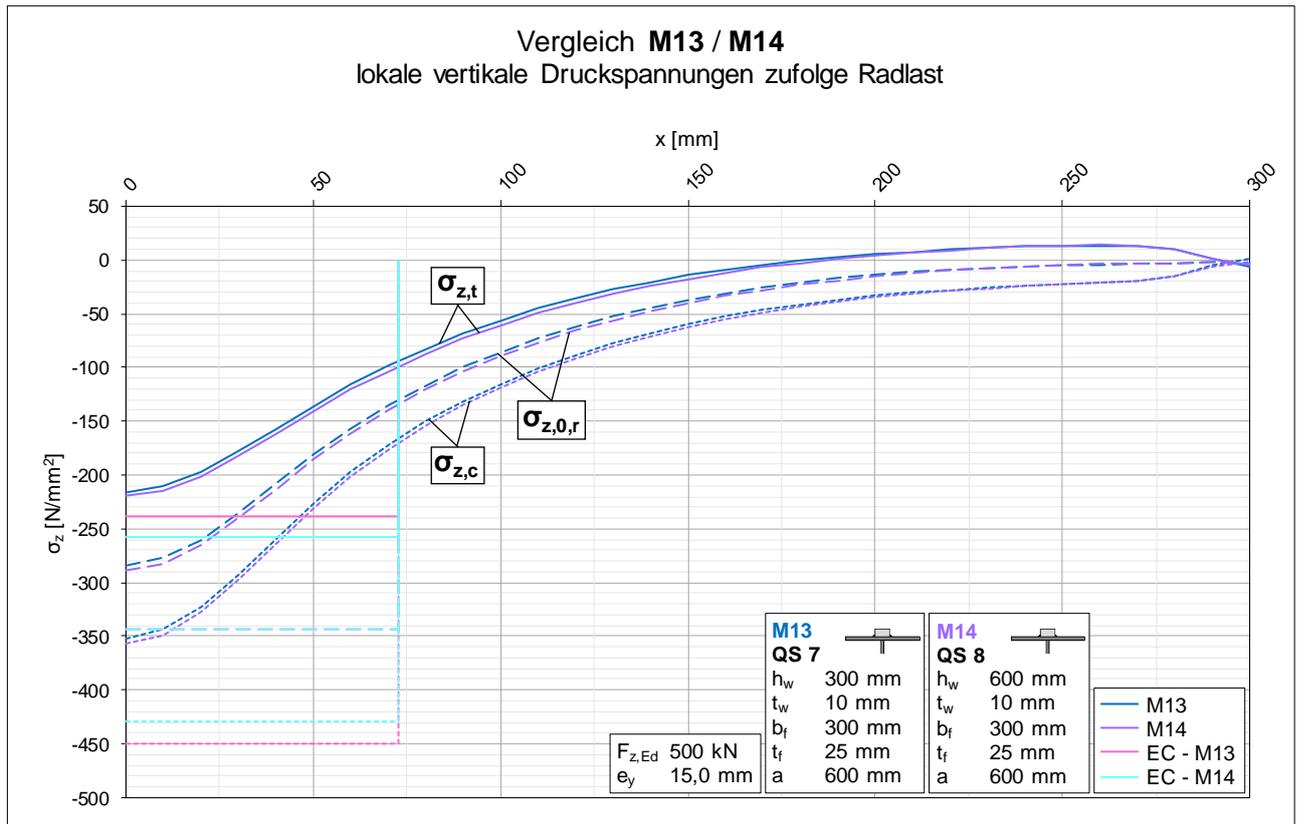


Diagramm 171: Vergleich der lokalen vertikalen Druckspannungen der Modelle M13 und M14

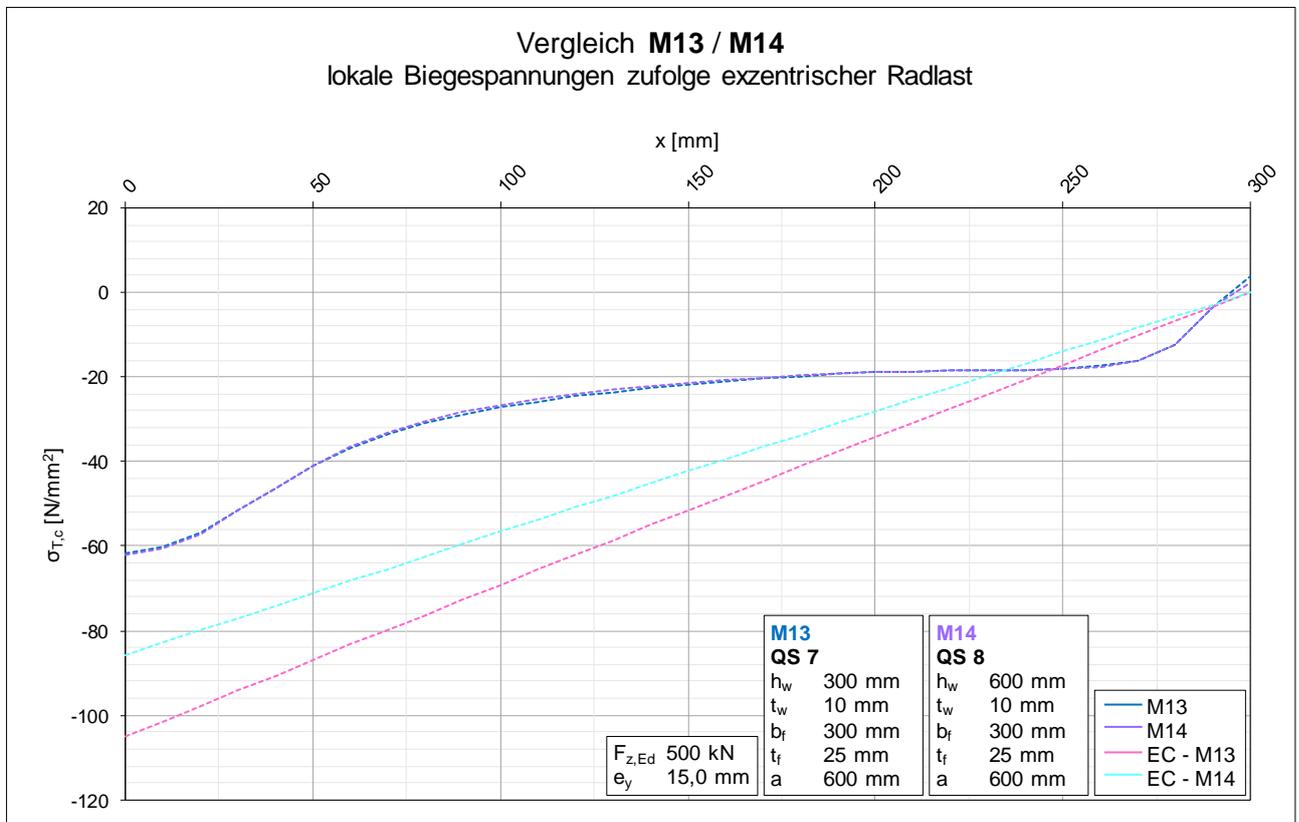


Diagramm 172: Vergleich der lokalen Biegespannungen der Modelle M13 und M14

C.2 Vergleiche auf Verdrehungsebene

C.2.1 Vergleich M12 / M14 ► Einfluss der Flanschdicke

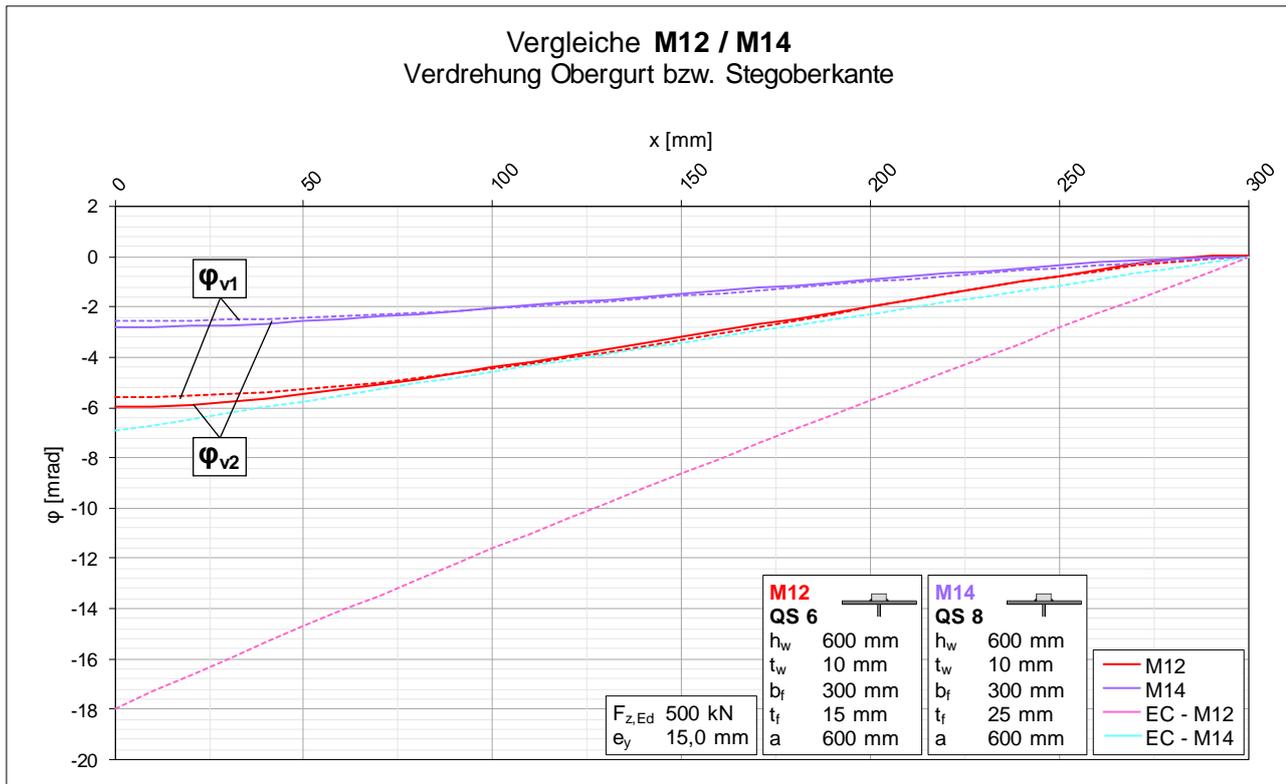


Diagramm 173: Vergleich der Verdrehungen der Modelle M12 und M14

C.2.2 Vergleich M13 / M14 ► Einfluss der Steghöhe

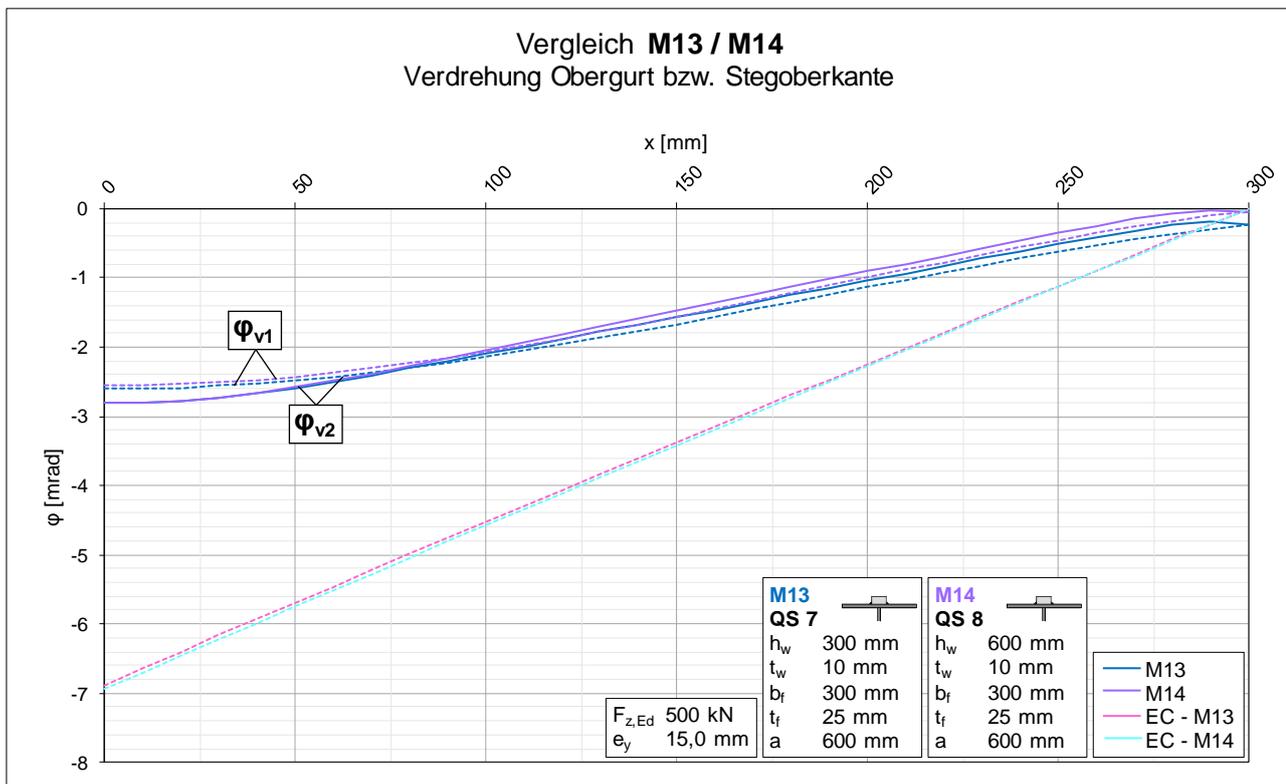


Diagramm 174: Vergleich der Verdrehungen der Modelle M13 und M14

Dies ist eine Veröffentlichung des

FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom-, Masterarbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte
S – Skripten, Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl