

Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Diplomingenieur der Technik

# Biegedrillknicken von Stäben mit Zwischenhalterungen an nur einem Gurt bei Biegebeanspruchung

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften der

Technischen Universität Graz

Institut für Stahlbau

Betreuer:

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

Betreuender Assistent:

Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Taras

Verfasser:

Tappauf Clemens, BSc





## Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die Diplomarbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfen bedient habe, dass ich diese Diplomarbeit bisher weder im In- noch im Ausland in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## Danksagung

Meine Diplomarbeit entstand am Institut für Stahlbau der Technischen Universität unter der Betreuung von Univ. Prof. DI Dr. Harald Unterweger und DI Dr. Andreas Taras, bei denen ich mich für die Hilfestellungen und Korrekturen sowie das angenehme Arbeitsklima bedanken möchte.

Großer Dank gilt auch meinem Vater, mit dem ich zahlreiche Diskussionen führen durfte und der mir während meines ganzen Studiums bei fachlichen Unklarheiten, zusätzlich zu den Lehrenden der Technischen Universität Graz, zur Seite stand.

Besonders herzlicher Dank gilt meinen beiden Eltern, die mich nicht nur finanziell, sondern auch moralisch unterstützt haben.



## Inhalt

1.	Einführung .....	4
1.1.	Einleitung.....	4
1.2.	Umfang der Arbeit und untersuchte Systeme .....	5
2.	Grundlagen.....	10
2.1.	Euler'sche Knicklast .....	10
2.2.	Die Eulerhyperbel.....	13
2.3.	Dimensionslose Darstellung der Eulerhyperbel .....	14
3.	Methodik und Vorgehensweise bei den FE-Berechnungen.....	15
4.	Biegedrillknicknachweis gemäß Eurocode EN 1993-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten .....	21
4.1.	Stabilitätsnachweise gemäß Eurocode EN 1993-1-1 .....	21
4.2.	Biegedrillknicknachweis gemäß Eurocode EN 1993-1-1 für gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse [6.3.2] .....	22
4.2.1.	Nachweis N1: Knicklinien für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall [6.3.2.2] .....	23
4.2.2.	Nachweis N2: Biegedrillknicklinien gewalzter Querschnitte oder gleichartiger geschweißter Querschnitte [6.3.2.3] .....	24
4.2.3.	Nachweis N3: Vereinfachte Bemessungsverfahren – Knicken des Druckgurtes [6.3.2.4].....	26
4.3.	Ermittlung von $\bar{\lambda}_{LT}$ gemäß dem Nationalen Anhang ÖNORM B 1993-1-1 ...	31
5.	Vergleich der Nachweiskonzepte gemäß Eurocode 3 mit realitätsnahen FE-Analysen für Träger ohne Zwischenhalterung.....	34
5.1.	Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit den Nachweisverfahren N1 und N2 des Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 .....	35
5.2.	Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren N3 – Gurtnicken gemäß EC 3 .....	40
6.	Der Einfluss von zusätzlichen Halterungen am Obergurt auf das Tragverhalten und den Tragwiderstand.....	46

## Inhalt

7.	Vergleich des Tragwiderstandes von Trägern mit Halterungen an nur einem Gurt mit den Biegedrill-knickspannungslinien gemäß Eurocode EN 1993-1-1 .....	60
7.1.	Grundlagen für die durchgeführten Berechnungen .....	60
7.2.	Lineare Momentenverläufe .....	61
7.3.	Parabolische Momentenverläufe.....	69
7.4.	Zusammenfassung der dargestellten Berechnungen .....	73
8.	Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit Biegedrillknicklinien nach Taras/Greiner .....	74
8.1.	Methode nach Taras/Greiner.....	74
8.2.	Lineare Momentenverläufe .....	76
8.3.	Parabolische Momentenverläufe.....	81
8.4.	Zusammenfassende Beurteilung.....	85
9.	Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit Biegedrillknicklinien nach neuem Vorschlag Tappauf.....	86
9.1.	Grundlegende Überlegungen .....	86
9.2.	Lineare Momentenverläufe .....	87
9.3.	Parabolische Momentenverläufe.....	92
9.3.1.	Ermittlung der Erhöhungsfaktoren $\zeta_{2rest}$ für die einzelnen Lastfälle .....	92
9.3.2.	Zusammenfassung der ermittelten Erhöhungsfaktoren $\zeta_{2rest}$ .....	101
10.	Zusammenfassung.....	104
11.	Verweise .....	110
11.1.	Bilderverzeichnis .....	110
11.2.	Tabellenverzeichnis .....	116
11.3.	Literaturverzeichnis.....	116



## Inhalt Anhang

A1 – Vergleich dreier FE-Netze für ein Anwendungsbeispiel.....	A1
A2 – Ergänzungen zu Kapitel 5 .....	A3
A 2.1    Ergänzungen zu Kapitel 5.1 .....	A3
A 2.2    Ergänzungen zu Kapitel 5.2 .....	A6
A3 – Zusätzliche Ergänzungen zu Kapitel 6 .....	A8
A4 – Ergänzungen zu Kapitel 7 .....	A10
A 4.1    Ergänzungen zu Kapitel 7.2 .....	A10
A 4.2    Ergänzungen zu Kapitel 7.3 .....	A13
A5 – Ergänzungen zu Kapitel 8 .....	A15
A 5.1 – Ergänzungen zu Kapitel 8.2 .....	A15
A 5.1 – Ergänzungen zu Kapitel 8.3 .....	A17
A6 – Anhang zu Kapitel 9 .....	A19
A 6.1 – Ergänzungen zu Kapitel 9.2 .....	A19
A 6.2 – Ergänzungen zu Kapitel 9.3 .....	A21
A7 – Ergebnisse für drei Mal zusätzlich gehaltene Träger .....	A23
A8 – Anhang Inputfile .....	A44

## 1. Einführung

### 1.1. Einleitung

Während bei zugbeanspruchten Bauteilen die Beanspruchbarkeit direkt der Querschnittstragfähigkeit entspricht, ist dies bei Druckbeanspruchungen nicht der Fall, da gedrückte Bauteile im Regelfall vor Erreichen der Querschnittswiderstände einem Stabilitätsversagen erliegen. Dies gilt auch für rein biegebeanspruchte Träger.

Gerade im Stahlbau ist die Versagensform des Stabilitätsversagens von besonderer Bedeutung, da die Bauteile oft sehr schlank sind und schlanke Bauteile stabilitätsgefährdeter sind als gedrungene.

In den letzten Jahren wurden bezüglich des Stabilitätsversagens zahlreiche Untersuchungen durchgeführt und verschiedene Nachweise auf Basis von Knickspannungslinien gefunden, die auch Eingang in die aktuelle Bemessungsnorm – Eurocode EN 1993-1-1 – gefunden haben. Diese beschränken sich jedoch meist auf einfache Standardfälle. Insbesondere an der TU Graz werden nun weitere Untersuchungen durchgeführt, die die Anwendung auf zusätzliche Fälle, wie sie in der Praxis vorkommen, erweitert. So sind zum Beispiel die Knickspannungsbeziehungsweise Biegedrillknickspannungslinien noch nicht für alle Belastungsformen und Querschnitte geprüft. Weiters ist zum Beispiel nicht abgeklärt, wie man mit Trägern mit zusätzlichen Zwischenhalterungen an nur einem Gurt umgeht.

Aufbauend auf den Ergebnissen für I-Träger ohne Zwischenhalterungen wird in der vorliegenden Arbeit das Verhalten der I-Träger – die nur auf Biegung beansprucht werden – mit zusätzlichen Zwischenhalterungen an nur einem Gurt untersucht. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese Halterungen – je nach Belastungsbild – erhebliche Traglaststeigerungen bewirken. Um Konstruktionen wirtschaftlicher zu dimensionieren, sollte man diesen positiven Effekt berücksichtigen.

Langfristig ist es das Ziel, für Träger ohne und mit Zwischenhalterungen allgemein gültige gleiche Nachweisformen zu finden.

## 1.2. Umfang der Arbeit und untersuchte Systeme

Nach einer kurzen Darstellung der Ermittlung der Euler'schen Knicklast nach der idealen Stabilitätstheorie am Beispiel des zentrisch gedrückten Stabes wird die eigentliche Kernaufgabe behandelt.

Einleitend werden die zur Zeit angewendeten Methoden für die Biegedrillknicknachweise gemäß der aktuellen Norm – Eurocode EN 1993-1-1 – für Träger ohne Zwischenhalterung dargestellt. Diese Methoden werden mit den in Kapitel 3 beschriebenen realitätsnahen Berechnungen mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode für das System eines beidseits gelenkig gelagerten Einfeldbalkens (System A – Abbildung 1-1) verglichen.

Dadurch kann die Güte der Nachweise gemäß Eurocode im Vergleich zu den realitätsnahen – nichtlinearen – FE-Berechnungen gezeigt werden.

System A:

Beim System A handelt es sich um einen beidseits gelenkig und gabelgelagerten Einfeldträger. Für einen Querschnitt IPE 500 werden Trägerlängen zwischen 5-25 m untersucht.

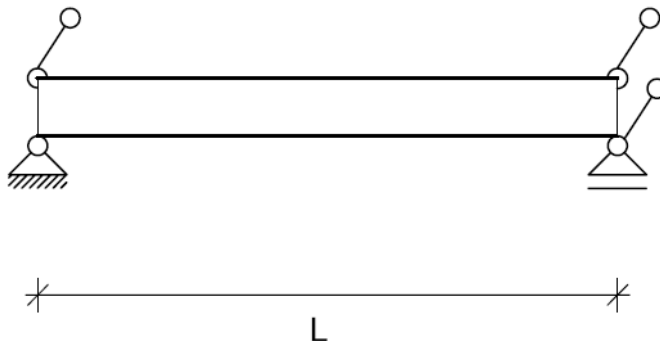


Abbildung 1-1: System A – beidseits gelenkig gelagerter Einfeldbalken

Anschließend werden für beidseits gelenkig und gabelgelagerte Einfeldträger mit zusätzlichen Zwischenhalterungen (Systeme B und C) ebenso realitätsnahe nichtlineare FE-Berechnungen durchgeführt, um zu untersuchen, ob (beziehungsweise in welchem Ausmaß) sich die Tragfähigkeit bei den einzelnen Momentenverläufen infolge der zusätzlichen Zwischenhalterungen an nur einem Gurt ändert. Beim System B werden Fälle mit zwei und beim System C mit drei zusätzlichen äquidistanten Zwischenhalterungen am Obergurt untersucht.

### System B:

Beim System B handelt es sich um einen beidseits gelenkig und gabelgelagerten Einfeldträger mit zwei zusätzlichen Halterungen am Obergurt. Für ein Querschnitt IPE 500 werden Trägerlängen zwischen 5-25 m untersucht.

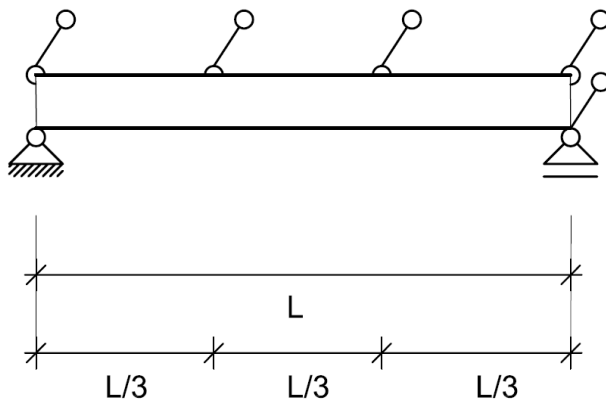


Abbildung 1-2: System B – Einfeldbalken mit zwei zusätzlichen Halterungen am Obergurt

### System C:

Beim System C handelt es sich um einen beidseits gelenkig und gabelgelagerten Einfeldträger mit drei zusätzlichen Halterungen am Obergurt. Für einen Querschnitt IPE 500 werden Trägerlängen zwischen 5-25 m untersucht.

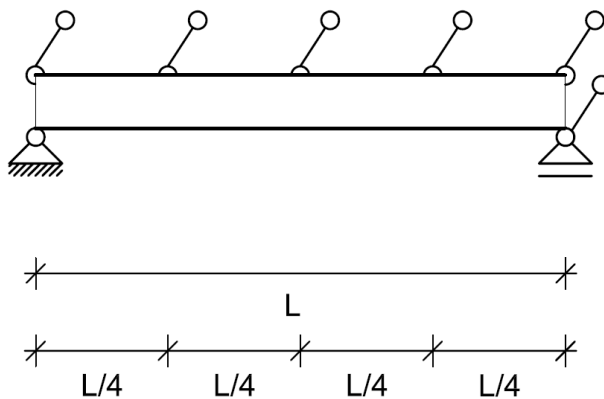


Abbildung 1-3: System C – Einfeldbalken mit drei zusätzlichen Halterungen am Obergurt

Die Wahl des Trägerquerschnittes IPE 500 erfolgte deshalb, da dieser schlanke Träger für die Vielzahl anderer eingesetzter Walzprofile (IPE- beziehungsweise HEA-Profile) repräsentativ ist.

Für alle drei Systeme werden FE-Berechnungen für folgende Momentenverläufe durchgeführt:

Momentenverlauf 1 – M1: konstantes positives Moment

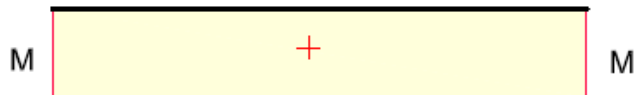


Abbildung 1-4: untersuchter Momentenverlauf M1

Momentenverlauf 2 – M2: positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf

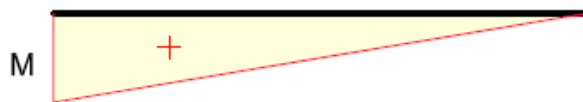


Abbildung 1-5: untersuchter Momentenverlauf M2

Momentenverlauf 3 – M3: durchschlagender linearer Momentenverlauf (teilweise Druck am nicht gehaltenen Gurt)

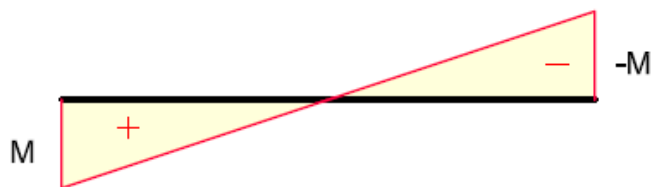


Abbildung 1-6: untersuchter Momentenverlauf M3

Momentenverlauf 4 – N4: negativer dreiecksförmiger Momentenverlauf (Druck am nicht gehaltenen Gurt)

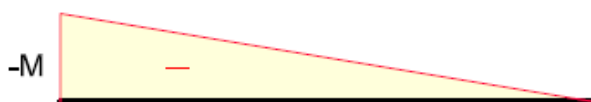


Abbildung 1-7: untersuchter Momentenverlauf M4

Momentenverlauf 5 – M5: konstantes negatives Moment (Druck am nicht gehaltenen Gurt)



Abbildung 1-8: untersuchter Momentenverlauf M5

Momentenverlauf 6 – M6 (0/1/0): Momente aus Querlast am Obergurt

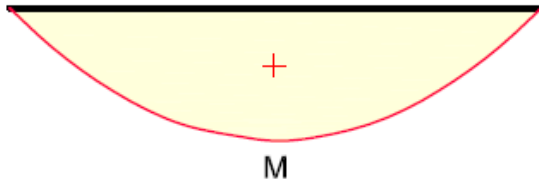


Abbildung 1-9: untersuchter Momentenverlauf M6

Momentenverlauf 7 – M7 (-1/1/-1): Momente zufolge Endmomente und Querlast am Obergurt (teilweise Druck am nicht gehaltenen Gurt)

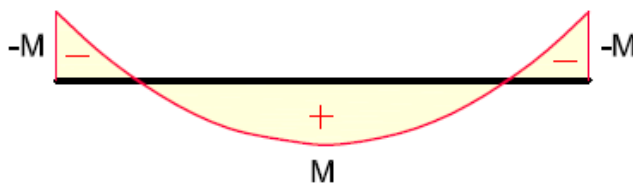


Abbildung 1-10: untersuchter Momentenverlauf M7

Momentenverlauf 8 – M8 (-1/0,5/-1): Momente zufolge Endmomente und Querlast am Obergurt (teilweise Druck am nicht gehaltenen Gurt)

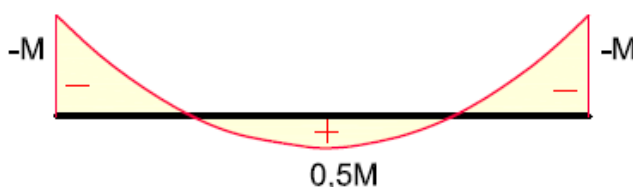


Abbildung 1-11: untersuchter Momentenverlauf M8

Momentenverlauf 9 – M8 (-1/0/-1): Momente zufolge Endmomente und Querlast am  
Obergurt (teilweise Druck am nicht gehaltenen  
Gurt)



Abbildung 1-12: untersuchter Momentenverlauf M9

Abschließend werden die Ergebnisse der FE-Berechnungen mit den drei Nachweismethoden des Eurocode (hier bezeichnet als N1, N2, N3), einer neuen Biegedrillknicklinie, die an der TU Graz entwickelt wurde, sowie mit einem eigenen Vorschlag des Verfassers für eine Biegedrillknickspannungslinie verglichen. Ziel ist es, die Treffsicherheit der einzelnen Vorgehensweisen für die untersuchten Fälle aufzuzeigen.

## 2. Grundlagen

Während bei zugbeanspruchten Bauteilen als obere Grenze der Beanspruchbarkeit die Materialfestigkeit herangezogen werden kann – dies liefert die Querschnittstragfähigkeit –, ist dies bei Druckbeanspruchungen nicht so einfach möglich, da gedrückte Bauteile vor Erreichen der Materialwiderstände einem sogenannten Stabilitätsversagen erliegen können.

### 2.1. Euler'sche Knicklast

Für einen ideal geraden Druckstab mit konstanter Steifigkeit hat Euler unter Voraussetzung einer zentrisch, richtungstreu angreifenden Normalkraft und einem ideal elastischen Materialverhalten bereits im Jahr 1744 die ideale Knicklast berechnet, die sogenannte Euler'sche Knicklast  $N_{cr}$ .

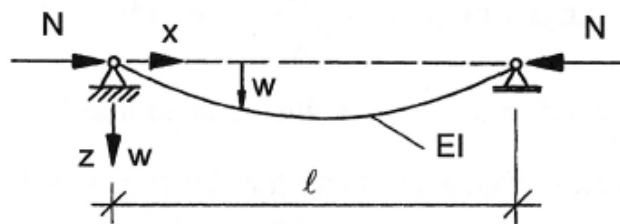


Abbildung 2-1: Euler Knickstab (Bild aus Stahlbau Fritsch)

Dazu muss das Gleichgewicht am verformten Stab erfüllt werden.

Das Biegemoment an der Stelle  $x$  des um  $w(x)$  ausgelenkten Stabes beträgt

$$M(x) = N * w(x) \quad (2-1)$$

Der Zusammenhang zwischen der Verformung und der Momentenbeanspruchung kann mit Formel (2-2) beschrieben werden.

$$w'' = -\frac{M(x)}{EI} = \frac{N * w(x)}{EI} \quad (2-2)$$

Mit Hilfe dieses Zusammenhanges wird die dieses Problem beschreibende Differentialgleichung aufgestellt (2-3).



$$w'' + \frac{N * l^2}{EI} * w = 0 \quad (2-3)$$

**Lösung der Differentialgleichung:**

Einführen der Stabkennzahl  $\epsilon$ :

$$\epsilon = l * \sqrt{\frac{N}{EI}} \quad (2-4)$$

$$w'' + \epsilon^2 * w = 0 \quad (2-5)$$

Allgemeine Lösung:

$$w(x) = A * \sin \epsilon \frac{x}{l} + B * \cos \epsilon \frac{x}{l} \quad (2-6)$$

$$\xi = \frac{x}{l} \quad (2-7)$$

$$w(\xi) = A * \sin \epsilon \xi + B * \cos \epsilon \xi \quad (2-8)$$

Durch Ableiten der allgemeinen Lösung und Einsetzen in die Differentialgleichung (2-3) wird gezeigt, dass die Lösung die Differentialgleichung erfüllt.

$$w' = A\epsilon * \cos \epsilon \xi - B\epsilon * \sin \epsilon \xi + C \quad (2-9)$$

$$w'' = -A\epsilon^2 * \sin \epsilon \xi - B\epsilon^2 * \cos \epsilon \xi \quad (2-10)$$

$$0 = [-A\epsilon^2 * \sin \epsilon \xi - B\epsilon^2 * \cos \epsilon \xi] + \epsilon^2 * [A * \sin \epsilon \xi + B * \cos \epsilon \xi] \quad (2-11)$$

### Randbedingungen:

Die Konstanten A und B können mit folgenden Randbedingungen ermittelt werden.

1. Randbedingung:

$$w(0) = 0 \qquad 0 = B * \cos(\epsilon * 0) \qquad B = 0$$

2. Randbedingung:

$$w(1) = 0 \qquad 0 = A * \sin(\epsilon * 1) \qquad A = 0$$

oder

$$\epsilon = n * \pi = \epsilon_{ki}$$

mit  $n = 0, 1, 2, \dots$

Mit  $A = 0$  beziehungsweise  $n = 0$  wird  $w(\xi) = 0$  beschrieben, was der Gleichgewichtslage des geraden Stabes entspricht.

Ist  $n \neq 0$  und setzt man  $\epsilon = n * \pi$  in Gleichung (2-4) ein, so kann man die Gleichung nach der idealen Knicklast N auflösen.

$$N = \frac{n^2 * \pi^2 * EI}{l^2} \qquad (2-12)$$

Die kleinste ideale Knicklast mit  $n = 1$  ist die ideale Euler'sche Knicklast und lautet somit:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 * EI}{l^2} \qquad (2-13)$$

## 2.2. Die Eulerhyperbel

Aus der im letzten Kapitel ermittelten idealen Euler'schen Knicklast kann sehr einfach die ideale Knickspannung ermittelt werden:

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 * EI}{l^2 * A} \quad (2-14)$$

Durch die Länge  $l$  und den Trägheitsradius  $i = \sqrt{\frac{I}{A}}$  wird die Schlankheit  $\lambda$  bestimmt, die ein Maß für die Stabilitätsgefährdung darstellt.

$$\lambda = \frac{l}{i} \quad (2-15)$$

Daraus folgt dann die Formel für die sogenannte Eulerhyperbel.

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 * E}{\lambda^2} \quad (2-16)$$

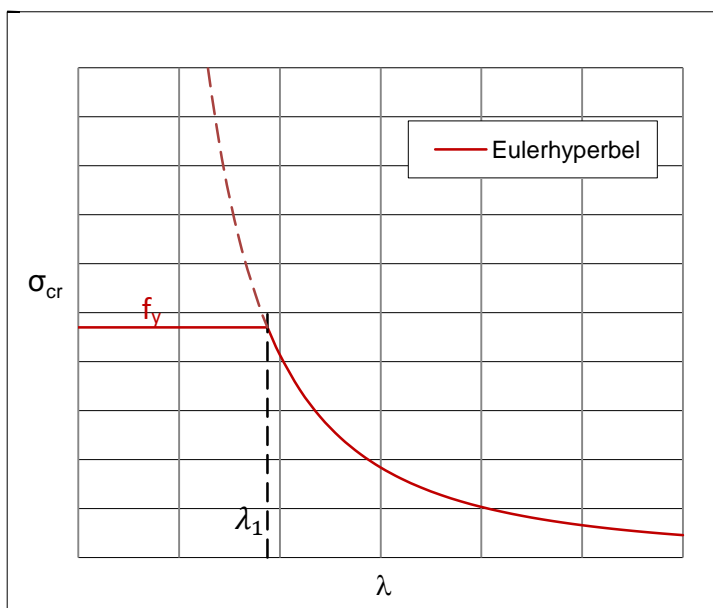


Abbildung 2-2:  $\sigma_{cr}$ - $\lambda$ -Diagramm

Für Stäbe mit elastisch –  
ideal plastischen  
Materialeigenschaften gilt die  
Eulerhyperbel im Bereich  
 $\sigma_{cr} \leq f_y$ .  
Die zur Fließgrenze gehörige  
Schlankheit beträgt

$$\lambda_1 = \pi * \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (2-17)$$

### 2.3. Dimensionslose Darstellung der Eulerhyperbel

Wie im nächsten Kapitel beschrieben wird, regelt der EC die Stabilitätsnachweise mit sogenannten Knickspannungslinien, welche aus umfangreichen Berechnungen und Versuchen ermittelt wurden. Für diese Linien wurde eine dimensionslose Darstellung gewählt, um unabhängig von der Fließgrenze  $f_y$  der einzelnen Stahlsorten zu sein.

Für die dimensionslose Darstellung wird der Abminderungsfaktor  $\chi$  ermittelt. Die dimensionslose Darstellung wird derart vorgenommen, dass für den Abminderungsfaktor  $\chi_{cr}$  gilt:

$$\chi_{cr} = \frac{\sigma_{cr}}{f_y} = \frac{N_{cr}}{N_{pl}} \quad (2-18)$$

Zusätzlich wird die Schlankheit  $\lambda$  durch die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}$  nach Formel (2-19) ersetzt.

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (2-19)$$

Damit bildet sich die Eulerhyperbel wieder als Hyperbel ab.

$$\chi_{cr} = \frac{1}{\bar{\lambda}^2} \quad (2-20)$$

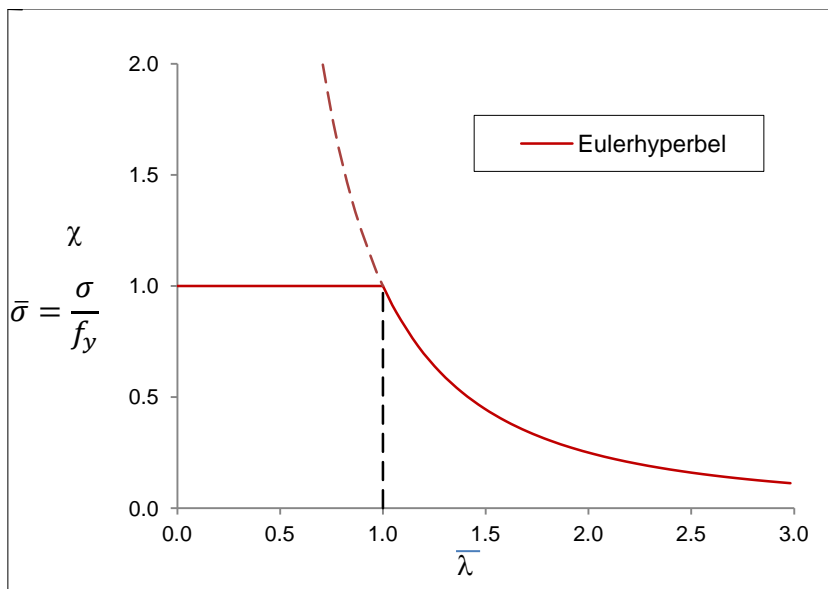


Abbildung 2-3: dimensionslose Darstellung der Eulerhyperbel

### **3. Methodik und Vorgehensweise bei den FE-Berechnungen**

Um Untersuchungen im Hinblick auf Stabilitätsversagen durchzuführen, ist es unabdingbar, die realitätsnahen Traglasten zu ermitteln.

Heutzutage werden hierfür Berechnungen mittels der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Diese liefern – bei einer geeigneten Modellierung – sehr gute Ergebnisse. Die mit der FE-Methode berechneten Ergebnisse können mit einigen wenigen Laborversuchen überprüft werden. Falls erforderlich, können einzelne Parameter der FE-Modelle adaptiert werden.

Sobald diese Modelle einmal verifiziert sind, können schnell und mit geringem Kostenaufwand viele verschiedene, sehr realitätsnahe Berechnungen mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt werden. Die hier verwendeten FE-Modelle sowie Berechnungsmethoden wurden bereits in der Vergangenheit an der TU-Graz mit Versuchsergebnissen überprüft, sodass hier eine Anwendung – ohne Kalibrierung an Versuchen – möglich ist.

Die in dieser Arbeit dargestellten Ergebnisse der numerischen Berechnungen wurden mit der Software ABAQUS berechnet. Nachfolgend wird die Modellierung für die FE-Berechnungen in Bezug auf Netzteilung, Material, angesetzte strukturelle und geometrische Imperfektionen sowie die Vorgehensweise bei den Traglastberechnungen vorgestellt.

### (a) FE-Netz und Elementtyp

Grundsätzlich wird der Biegeträger in Form eines Schalenmodelles abgebildet. Im Zuge der Untersuchung dieser Arbeit wurden mit drei unterschiedlichen FE-Netzen Berechnungen durchgeführt. Im Anhang wird für ein Anwendungsbeispiel ein Vergleich der Ergebnisse unter Zugrundelegung dieser drei Netzgeometrien dargestellt.

Für die endgültigen Berechnungen wurde das „Netz 3“ mit folgender Auflösung herangezogen.

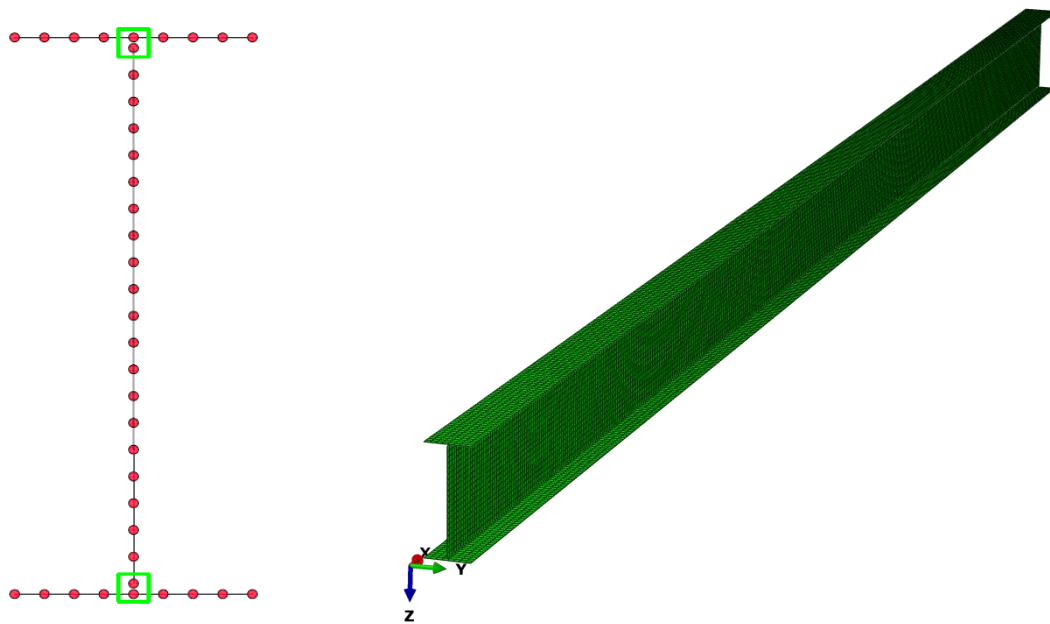


Abbildung 3-1: Elementteilung im Querschnitt des Trägers (IPE 500)

Netz 3:

Gurte: 8 Schalenelemente über die Breite

Steg: 20 Schalenelemente über die Höhe

Die Länge des Trägers wurde gleichmäßig auf 400 Elemente aufgeteilt.

Dabei ist zu erwähnen, dass sich die Elementlänge und somit das Verhältnis der Elementlänge  $l_{el}$  zur Elementbreite  $b_{el}$  je nach Länge des Trägers ändert. Für die kürzesten Träger mit 5 m beträgt das Verhältnis 0,5 und für die längsten untersuchten Träger 2,5. Diese Verhältnisse entsprechen den Anforderungen für FE-Analysen.

Als Elementtyp werden rechteckige Shell-Elemente mit linearer Ansatzfunktion gewählt, die von ABAQUS als „S4-Elemente“ bezeichnet werden.

Die Ausrundungen des Querschnittes IPE 500 werden ersatzweise mit Hilfe von zwei identen äquivalenten Hohlkastenquerschnitten (ein Stabzug je Gurt) modelliert. Hier werden Elemente mit zwei Knoten und linearer Ansatzfunktion gewählt, die von ABAQUS als B31-Element bezeichnet werden. Die Elementteilung erfolgt wie beim Flansch und beim Steg mit jeweils 400 Elementen über die Länge.

**(b) Material:**

Alle Berechnungen erfolgen für den Baustahl S235 mit einer Streckgrenze von  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$  und einem Elastizitätsmodul von  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ . Die Querdehnungszahl wird mit  $\nu = 0,3$  berücksichtigt.

Die Berechnungen erfolgen für ein ideal elastisch-plastisches Materialverhalten (Abbildung 3-2), wobei die Wiederverfestigung des Materials im plastischen Bereich nicht berücksichtigt wird.

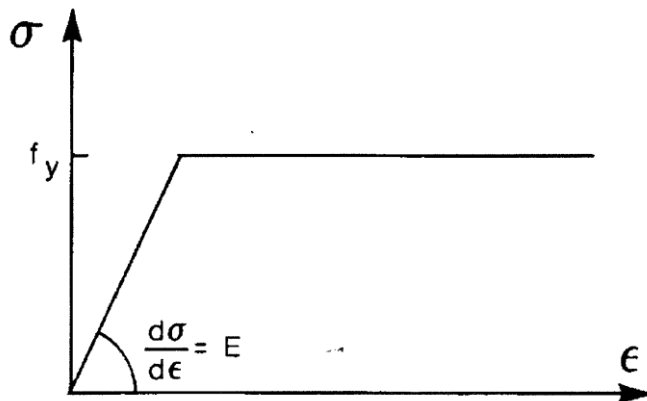


Abbildung 3-2: idealisierte Spannungs-Dehnungs-Linie des Materials

**(c) Strukturelle Imperfektionen**

Wenn Walzprofile nach dem Walzen abkühlen, so bleiben die Bereiche der Übergänge vom Steg in die Gurte mit den Ausrundungen länger heiß. Dadurch werden sie von dem schneller abkühlenden Flansch und den Stegbereichen plastisch gestaucht. Folglich sind nach endgültigem Abkühlen in diesen plastisch gestauchten Bereichen Zugspannungen sowie in den restlichen Bereichen Druckspannungen vorhanden. Für den untersuchten Trägerquerschnitt IPE 500 werden Eigenspannungen, wie sie in Abbildung 3-3 dargestellt sind (idealisierte vereinfachte Spannungsverteilung gemäß ECCS – recc., 1984), berücksichtigt.

Eigenspannungen  
IPE 500

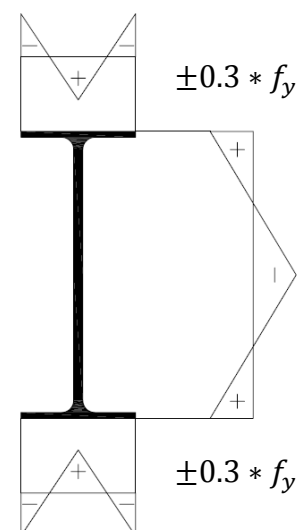


Abbildung 3-3: Eigenspannungen



## (d) Geometrische Imperfektionen

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 2 beschriebenen idealen Druckstab weist jeder reale Bauteil geometrische Imperfektionen auf, die bei einer realitätsnahen Berechnung auf jeden Fall berücksichtigt werden müssen, da sie zu zusätzlichen Beanspruchungen und damit geringeren Traglasten führen. Bei allen Berechnungen wird daher die vorweg ermittelte Eigenform der kleinsten idealen Verzweigungslast (ideales Biegedrillknickmoment) als Vorverformung berücksichtigt und mit folgenden Maximalamplitudenwerten  $e_0$  skaliert;

- bei ungehaltenen Stäben beträgt die maximale Amplitude  $e_0 = L/1000$ ;
- bei zweimal zusätzlich gehaltenen Stäben variieren die Amplituden, je nach Eigenform, zwischen  $e_0 = L/1000$  und  $e_0 = L/3000$ ;
- bei dreimal gehaltenen Stäben variieren die Amplituden, je nach Eigenform, zwischen  $e_0 = L/1000$  und  $e_0 = L/4000$ ,

wobei  $L$  die Gesamtlänge des Trägers darstellt. Dabei liegt in allen Fällen dieselbe Imperfektionsamplitude  $e_0 = L^*/1000$  bezogen auf die Knicklänge  $L^*$  des maßgebenden Gurtes vor, wie beispielhaft in Abbildung 3-4 dargestellt ist.



Abbildung 3-4: skalierte Eigenformen mit maximalen Amplituden – Beispiel für M1

### **(e) Vorgehensweise**

Bedingt durch den Ansatz von eigenformkonformen Vorverformungen muss bereits vor der Traglastberechnung die maßgebende Eigenform bekannt sein. Diese wird zunächst in einem ersten Berechnungsschritt mit Hilfe einer LBA-Analyse (Linear Buckling Analysis) ermittelt.

Nachfolgend kann eine sogenannte GMNIA (Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections) zur Berechnung der eigentlichen Traglast durchgeführt werden. Dabei wird die Belastung so lange gesteigert, bis das Maximum der Last-Verformungs-Kurve erreicht wird. Als Bezugslast wird jenes Lastniveau verwendet, welches im höchstbeanspruchten Querschnitt die plastische Querschnittstragfähigkeit  $M_{pl}$  liefert.

## 4. Biegedrillknicknachweis gemäß Eurocode EN 1993-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten

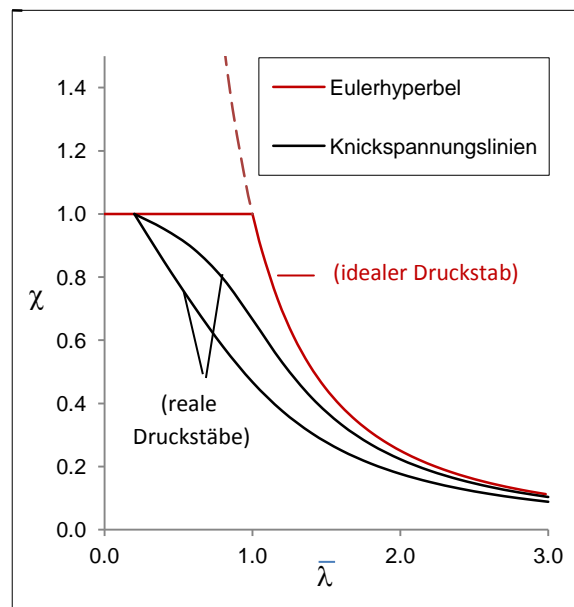
Bei sämtlichen Formeln und Tabellen wird zusätzlich zur fortlaufenden Nummerierung in eckigen Klammern die Nummerierung laut Eurocode angeführt.

### 4.1. Stabilitätsnachweise gemäß Eurocode EN 1993-1-1

Wie in Kapitel 2 erläutert, versagen Bauteile, die auf Druck oder Biegung beziehungsweise auf Druck und Biegung beansprucht werden, vor Erreichen der Querschnittstragfähigkeit. Aus diesem Grund sind in diesen Fällen die Querschnittsnachweise nicht ausreichend und es sind Stabilitätsnachweise zu führen. Grundsätzlich stellt der EC für Stabilitätsnachweise die sogenannten Knickspannungslinien für unterschiedliche Querschnitte zur Verfügung. Die Knickspannungslinien beschreiben die Abminderungsfaktoren  $\chi$  für die Querschnittstragfähigkeiten in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}$ . Die dimensionslose Darstellung der Eulerhyperbel stellt die Knickspannungslinie des theoretischen Falles des in Kapitel 2 beschriebenen idealen Druckstabes dar.

Reale Stäbe weisen im Unterschied zum idealen Druckstab geringe Vorkrümmungen auf, der Lastangriff erfolgt nicht ideal zentrisch und der Querschnitt hat produktionsbedingte Eigenspannungen. All diese Effekte haben einen negativen Einfluss auf das Tragverhalten der Stäbe und führen zu einem früheren Stabilitätsversagen. Für Druckstäbe stellt die Eulerhyperbel eine ideale obere Grenze da. Bei geringen Schlankheiten werden die Knickspannungslinien durch die Querschnittstragfähigkeit begrenzt.

Abbildung 4-1: Eulerhyperbel verglichen mit



Wie bereits erwähnt, treten Stabilitätsversagen bei reinem Druck, bei reiner Biegung und bei Kombinationen aus Druck und Biegung auf. Des Weiteren wird nun für Fälle reiner Biegung auf folgende drei im EC geregelte Nachweisführungen eingegangen:

- N1 Biegedrillknicknachweis mit Knicklinien für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall [Kapitel 6.3.2.2]
- N2 Biegedrillknicknachweis mit Knicklinien für das Biegedrillknicken gewalzter oder gleichartiger Querschnitte [Kapitel 6.3.2.3]
- N3 Vereinfachtes Bemessungsverfahren für Träger mit Biegedrillknickbehinderung im Hochbau [Kapitel 6.3.2.4]

#### **4.2. Biegedrillknicknachweis gemäß Eurocode EN 1993-1-1 für gleichförmige Bauteile mit Biegung um die Hauptachse [6.3.2]**

Für einen am Druckgurt nicht kontinuierlich gehaltenen Träger mit reiner Biegung um die Hauptachse ist folgender Biegedrillknicknachweis zu führen.

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (4-1) [6.54]$$

Dabei ist

$M_{Ed}$  der Bemessungswert des einwirkenden Biegemomentes –  $M_y$   
(Maximalwert am Stab )

$M_{b,Rd}$  der Bemessungswert der Biegebeanspruchbarkeit –  $M_y$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} * W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (4-2) [6.55]$$

Dabei ist

$W_y$  das maßgebende Widerstandsmoment zur Ermittlung der Querschnittstragfähigkeit  $M_{Rd}$  ( $W_y = W_{pl,y}$  für QS-Klasse 1 u. 2)

$\chi_{LT}$  der Abminderungsfaktor für das Biegedrillknicken in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$

### 4.2.1. Nachweis N1: Knicklinien für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall [6.3.2.2]

Hier werden auch für das Biegedrillknicken die Biegeknicklinien – entwickelt für zentrische Druckbeanspruchung – verwendet.

Der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  kann in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  aus der maßgebenden Biegeknicklinie wie folgt ermittelt werden:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT} \leq 1 \quad (4-3) [6.56]$$

Dabei ist

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

$\alpha_{LT}$  der Imperfektionsbeiwert für die maßgebende Knicklinie für das Biegedrillknicken laut Tabelle 4-1 [6.3]. Die Zuordnung der verschiedenen Querschnitte zu den maßgebenden Knicklinien kann mit Hilfe von Tabelle 4-2 erfolgen.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_R}{M_{cr}}}$$

$M_{cr}$  das ideale Biegedrillknickmoment.

$M_R$  Querschnittstragfähigkeit; ( $M_{pl}$  bei QS-Klasse 1 u. 2)

Knicklinie	a	b	c	d
Imperfektionsbeiwert $\alpha_{LT}$	0,21	0,34	0,49	0,76

Tabelle 4-1 [6.3]: Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken

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

Tabelle 4-2 [6.4]: Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken

### 4.2.2. Nachweis N2: Biegedrillknicklinien gewalzter Querschnitte oder gleichartiger geschweißter Querschnitte [6.3.2.3]

Für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte dürfen die Werte der Abminderungsfaktoren  $\chi_{LT}$  in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  nach Formel (4-4) [6.57] ermittelt werden.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{jedoch} \quad \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (4-4) [6.57]$$

Dabei ist

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

$\alpha_{LT}$  der Imperfektionsbeiwert für die maßgebende Biegedrillknicklinie laut Tabelle 4-1 [6.3]. Die Zuordnung der verschiedenen Querschnitte zu den maßgebenden Biegedrillknicklinien kann mit Hilfe von Tabelle 4-3 [6.5] erfolgen.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_R}{M_{cr}}}$$

$M_{cr}$  das ideale Biegedrillknickmoment.

$M_R$  die Querschnittstragfähigkeit; ( $M_{p1}$  bei QS-Klasse 1 u. 2)

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,40$$

$$\beta = 0,75$$

Querschnitt	Grenzen	Biegedrillknicklinien
gewalztes I-Profil	$h/b \leq 2$	b
	$h/b > 2$	c
geschweißtes I-Profil	$h/b \leq 2$	c
	$h/b > 2$	d

Tabelle 4-3 [6.5]: Empfohlene Biegedrillknicklinien

Um den positiven Effekt von nicht konstanten Momentenverläufen berücksichtigen zu können, darf bei der Bemessung gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.3 der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  wie folgt modifiziert werden.

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1 \quad (4-5) [6.58]$$

Dabei ist

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_c) * [1 - 2,0 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$$

$k_c$  der Korrekturbeiwert für unterschiedliche Momentenverläufe laut Tabelle 4-4.








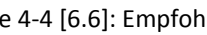
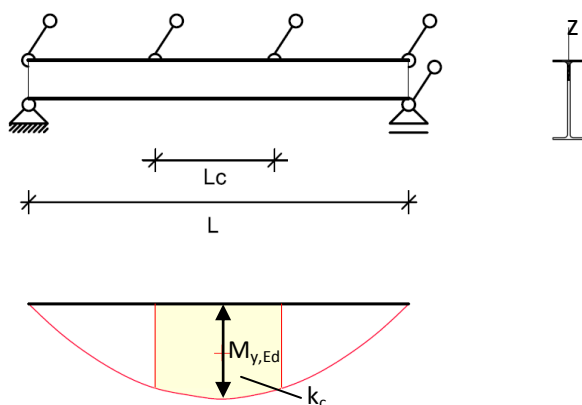
Momentenverteilung	$k_c$
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	0,94
	0,90
	0,91
	0,86
	0,77
	0,82

Tabelle 4-4 [6.6]: Empfohlene Korrekturbeiwerte  $k_c$

### 4.2.3. Nachweis N3: Vereinfachte Bemessungsverfahren – Knicken des Druckgurtes [6.3.2.4]

Dieses Verfahren ist ein Knicknachweis des gedrückten Gurtes. Somit können auch seitliche Stützungen in einzelnen Punkten des Druckflansches berücksichtigt werden.

Wenn der Schlankheitsgrad  $\bar{\lambda}_f$  eines Trägers nachfolgende Anforderungen erfüllt, kann er als nicht biegedrillknickgefährdet angesehen werden.



$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \leq \bar{\lambda}_{c0} \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} = 0,5 * \frac{M_{c,Rd}}{M_{y,Ed}} \quad (4-6) [6.59]$$

Dabei ist

$M_{y,Ed}$  das größte einwirkende Bemessungsmoment zwischen den betrachteten Stützpunkten des Druckgurtes.

$$M_{c,Rd} = W_y * \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$W_y$  das maßgebende Widerstandsmoment des Querschnittes für die gedrückte Querschnittsfaser.

$k_c$  der Korrekturbeiwert für den Schlankheitsgrad abhängig von der Momentenverteilung zwischen den seitlich gehaltenen Punkten laut Tabelle 4-4 [6.6].

$i_{f,z}$  der Trägheitsradius des druckbeanspruchten Flansches um die schwache Querschnittsachse unter Berücksichtigung von 1/3 der auf Druck beanspruchten Fläche des Steges.



$\bar{\lambda}_{c0}$  der Grenzschlankheitsgrad für das oben betrachtete, druckbeanspruchte Bauteil (der Grenzwert ist  $\bar{\lambda}_{c0} = \bar{\lambda}_{LT} + 0,1$ ).

$L_c$  die Länge zwischen den gehaltenen Punkten.

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 * \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

Wird die Bedingung (4-6) [6.59] nicht erfüllt, so kann man den Bemessungswert der Biegedrillknickbeanspruchbarkeit wie folgt ermitteln:

$$M_{y,Ed} \leq M_{b,Rd}$$

$$M_{b,Rd} = k_{fl} * \chi * M_{c,Rd} = 1,1 * \chi * M_{c,Rd} \quad M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd}$$

Dabei ist

$\chi$  der mit  $\bar{\lambda}_f$  ermittelte Abminderungsfaktor des äquivalenten druckbeanspruchten Flansches auf Basis der Knickspannungslinie für zentrischen Druck.

$k_{fl}$  der Anpassungsfaktor, mit dem dem konservativen Nachweis mit äquivalenten druckbeanspruchten Flanschen Rechnung getragen wird. Der Wert  $k_{fl} = 1,1$  wird empfohlen und im Nationalen Anhang übernommen.

Grundsätzlich ist die Knickspannungslinie c zu verwenden. Ist allerdings die Bedingung (4-7) erfüllt, ist für geschweißte Querschnitte die **Knickspannungslinie d** heranzuziehen.

$$\frac{h}{t_f} \leq 44 \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (4-7)$$

Dabei ist

h die Gesamthöhe des Querschnittes.

t<sub>f</sub> die Dicke des beanspruchten Flansches.

Zur Veranschaulichung wird anhand des folgenden angeführten Beispiels eine Berechnung des Tragwiderstandes mit Zahlenwerten gezeigt. Einfeldträger mit einer Stützweite von 10 m; Querschnitt: IPE 500; Material S235; Beanspruchung durch eine konstante Momentenbelastung.

**System + Belastung:**

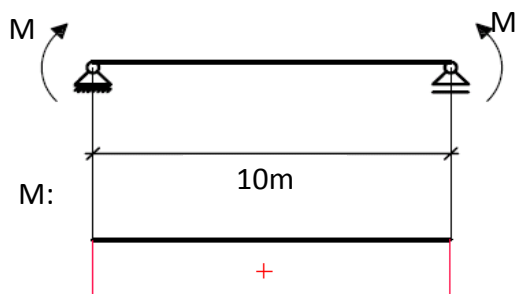
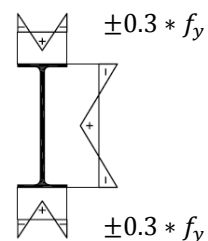


Abbildung 4-2: System und Belastung

**Eigenspannungen IPE 500:**



$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} = \frac{1 * 1000}{4,96 * 93,91} = 2,15 \quad (4-6) [6.59]$$

Der Wert  $i_{f,z}$  wurde nicht berechnet, sondern aus der Profiltabelle abgelesen [10]. Dabei ist zu erwähnen, dass die berücksichtigte Stegfläche nicht ein Drittel der auf Druck beanspruchten Fläche des Steges, sondern ein Fünftel der gesamten Stegfläche ist.

Da es sich bei dem verwendeten IPE 500 um einen gewalzten und nicht um einen geschweißten Querschnitt handelt, ist die Knickspannungslinie c mit dem Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$  zu verwenden.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_f^2}} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT} \leq 1 \quad (4-8) [6.56]$$

Dabei ist

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_f - 0,2) + \bar{\lambda}_f^2]$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{3,28 + \sqrt{3,28^2 - 2,15^2}} = 0,17$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + 0,49 * (2,15 - 0,2) + 2,15^2] = 3,28$$

$$M_{b,Rd} = k_{fl} * \chi * M_{c,Rd} = 1,1 * \chi * M_{c,Rd} \quad M_{b,Rd} \leq M_{c,Rd}$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl} = 515 \text{ kNm} \quad (\text{für IPE 500, Querschnittsklasse 2})$$

$$M_{b,Rd} = 1,1 * 0,17 * 515 = 0,19 * 515 = \underline{108 \text{ kNm}}$$

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}$$

Der mit der realitätsnahen GMNIA-Analyse ermittelte Tragwiderstand beträgt  
 $M_{b,Rd} = \underline{180 \text{ kNm}}$  (siehe Abbildung 5-10).

### 4.3. Ermittlung von $\bar{\lambda}_{LT}$ gemäß dem Nationalen Anhang ÖNORM B 1993-1-1

Wie bereits gezeigt, werden bei den zwei Bemessungsverfahren N1 und N2 gemäß EC 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 zur Bestimmung der Abminderungsfaktoren die  $\bar{\lambda}_{LT}$ -Werte benötigt. Wie bereits erwähnt, wird  $\bar{\lambda}_{LT}$  nach Formel (4-9) ermittelt.

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_R}{M_{cr}}} \quad (4-9)$$

Bei den Querschnittsklassen 1 und 2 ist  $M_R = M_{pl}$ .

Das größte Problem hierbei stellt die Ermittlung des idealen Biegedrillknickmomentes  $M_{cr}$  dar, da es sowohl von den Auflagerbedingungen als auch von den Schnittkraftverläufen sowie von der Art der Lasteinleitung stark beeinflusst wird. Für den allgemeinen Fall des Einzelstabes stellt das Nationale Anwendungsdokument ÖNORM B 1993-1-1 für einige Momentenverläufe ein Verfahren zur Berechnung von  $M_{cr}$  zur Verfügung, welches hier kurz gezeigt wird.

$$M_{cr} = C_1 * \frac{\pi^2 * EI_z}{(k_z * L)^2} \left\{ \sqrt{\left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 * \frac{I_w}{L_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2 \right]} - C_2 z_g \right\} \quad (4-10)$$

Mit

- L           Stablänge zwischen Punkten mit seitlicher Halterung
- k<sub>z</sub>       berücksichtigt eine allfällige Einspannwirkung gegen  
          Endverdrehungen aus der Stegebene:  
          k<sub>z</sub> = 0,5 für beidseitige Einspannung  
          k<sub>z</sub> = 1,0 für gelenkige Lagerung
- k<sub>w</sub>       berücksichtigt eine allfällige Verwölbungsbehinderung an den  
          Stabenden:   k<sub>w</sub> = 0,5 für beidseitige Einspannung  
                          k<sub>w</sub> = 1,0 für freie Verwölbbarkeit
- C<sub>1</sub>       Beiwert gemäß Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 für verschiedene Lastfälle
- C<sub>2</sub>       Beiwert gemäß Tabelle 4-6 für verschiedene Lastfälle
- z<sub>g</sub>       Abstand des Angriffspunktes der Querbelastrung vom  
          Schubmittelpunkt.  
          Vorzeichen: z<sub>g</sub> ist positiv für Querlasten, die vom Lastangriffspunkt  
          zum Schubmittelpunkt gerichtet sind.

Für Momentenverläufe, die nicht in Tabelle 4-5 beziehungsweise in Tabelle 4-6 geregelt sind, wie z. B. Randmomente gekoppelt mit Querbelastrung oder für an nur einem Gurt gehaltene Stäbe, ist dieses Verfahren nicht anwendbar, da keine C-Werte zur Verfügung stehen.

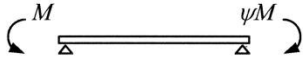









Endmomente und Auflagerbedingungen	Diagramm des Biegemoments	Werte von $k_z$	Beiwerte		
			$C_1$	$C_3$	
				$\psi_f \leq 0$	$\psi_f > 0$
	$\psi = +1$ 	1,0 0,5	1,000 1,127	1,000 1,019	
	$\psi = +3/4$ 	1,0 0,5	1,141 1,285	1,000 1,017	
	$\psi = +1/2$ 	1,0 0,5	1,320 1,482	1,000 1,000	
	$\psi = +1/4$ 	1,0 0,5	1,551 1,730	1,000 1,000	
	$\psi = 0$ 	1,0 0,5	1,847 2,027	1,000 1,000	
	$\psi = -1/4$ 	1,0 0,5	2,207 2,341	1,000 1,000	0,850 0,650
	$\psi = -1/2$ 	1,0 0,5	2,591 2,579	1,000 0,950	$1,3 - 1,2 \psi_f$ $0,77 - \psi_f$
	$\psi = -3/4$ 	1,0 0,5	2,852 2,606	1,000 0,850	$0,55 - \psi_f$ $0,35 - \psi_f$
	$\psi = -1$ 	1,0 0,5	2,733 2,390	$-\psi_f$ $0,125 - 0,7 \psi_f$	$-\psi_f$ $0,125 - 0,7 \psi_f$

Tabelle 4-5: Endmomentenbelastungen, Werte für  $C_1$  und  $C_3$  (ÖNORM B 1993-1-1, Tabelle 2)

$C_2$  ist für alle Fälle ohne Querlasten 0.

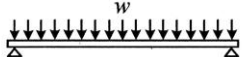

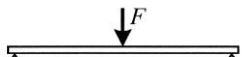

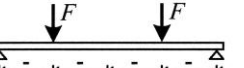

Belastung und Auflagerbedingungen	Diagramm des Biegemoments	Werte von $k_z$	Beiwerte		
			$C_1$	$C_2$	$C_3$
		1,0 0,5	1,132 0,997	0,459 0,407	0,525 0,478
		1,0 0,5	1,363 1,087	0,553 0,449	0,411 0,338
		1,0 0,5	1,040 0,960	0,431 0,404	0,562 0,539

Tabelle 4-6: Querbelastung, Werte für  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  (ÖNORM B 1993-1-1, Tabelle 3)

## **5. Vergleich der Nachweiskonzepte gemäß Eurocode 3 mit realitätsnahen FE-Analysen für Träger ohne Zwischenhalterung**

Wie bereits in Abschnitt drei angeführt, werden in weiterer Folge die Ergebnisse gemäß Eurocode 3 den FE-Analysen gegenübergestellt.

In diesem Kapitel werden nun die in Kapitel 4 vorgestellten Nachweismethoden mit realitätsnahen GMNIA-Analysen mittels der Finiten-Elemente-Methode (Softwarepaket ABAQUS) verglichen.



## 5.1. Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit den Nachweisverfahren N1 und N2 des Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der GMNIA-Analysen für beidseits gabelgelagerte IPE 500-Einfeldträger mit Walzprofilen IPE 500 für unterschiedliche Längen und Momentenverläufe mit den Nachweismethoden des Eurocode 3 verglichen (N1 nach Kapitel 6.2.3.2 und N2 nach Kapitel 6.2.3.3). Sämtliche Untersuchungen erfolgen mit dem Material S235.

Die Ergebnisse werden in Diagrammen derartig dargestellt, dass der Einfluss der Trägerlängen gut erkennbar ist.

Für diese Vergleiche wird folgende Darstellungsform gewählt:

- Der Abinderungsfaktor  $\chi_{LT}$  wird in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  dargestellt. Dabei stellt die rote Kurve die Biegeknicklinie gemäß EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (Nachweis N1) und die blaue Kurve die modifizierte Biegedrillknicklinie  $\chi_{LT,mod}$  nach Gleichung (4-5) gemäß EC 3 Kapitel 6.2.3.3 (Nachweis N2) dar.
- In die Grafik werden die Ergebnisse für die Stützweiten 5, 10, 15, 20 und 25 m mit den entsprechenden  $\bar{\lambda}_{LT}$ -Werten eingetragen. Zur Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$  dienen die idealen Kippmomente  $M_{cr}$  nach Kapitel 4.3 Formel (4-10). Für den untersuchten Querschnitt IPE 500 gilt  $M_R = M_{pl}$ . Die Schnittpunkte der  $\bar{\lambda}_{LT}$ -Ergebnisse der einzelnen Stützweiten mit den Bemessungslinien des Eurocode entsprechen den einzelnen Abminderungsfaktoren  $\chi_{LT}$  (N1) und  $\chi_{LT,mod}$  (N2).
- In weiterer Folge werden für die angeführten Stützweiten die Ergebnisse aus der FE-Analyse als grüne Quadrate in die Grafik eingetragen. Diese Ergebnisse auf Basis der GMNIA entsprechen annähernd der Wirklichkeit.

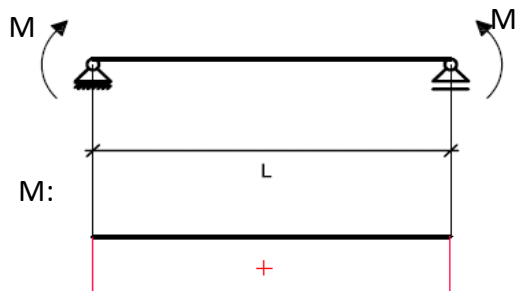
Somit hat man einen guten Vergleich der Ergebnisse in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$ .

**(a) Ergebnisse im Vergleich**

Die Abbildung 5-2 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit den Nachweismethoden N1 und N2 gemäß Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 für Einfeldträger mit dem Querschnitt IPE 500 mit konstantem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 5-1).

Der Nachweis N1 wird mit der Knicklinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und der Nachweis N2 mit der der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) sowie dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$  durchgeführt.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**

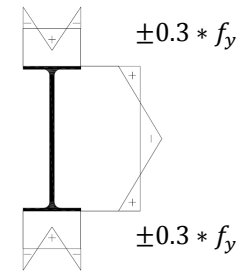


Abbildung 5-1: System und Belastung

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

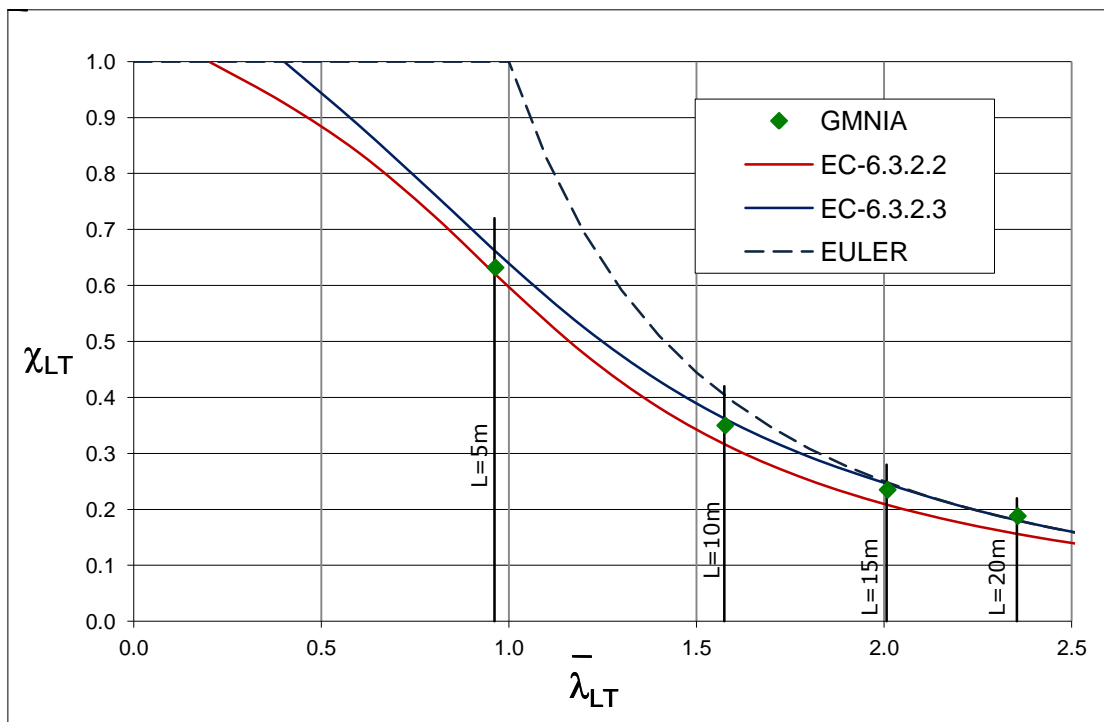
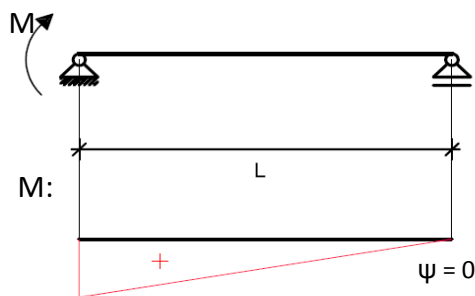


Abbildung 5-2: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; M = konstant)

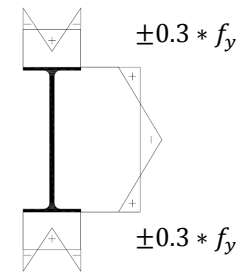
Die Abbildung 5-4 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit den Nachweismethoden N1 und N2 laut Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 für Einfeldträger mit dem Querschnitt IPE 500 mit linearem Momentenverlauf mit  $\psi = 0$  und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 5-3).

Der Nachweis N1 wird mit der Knicklinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und der Nachweis N2 mit der der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) und dem Momentenbeiwert  $k_c = 0,75$  durchgeführt.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-3: System und Belastung

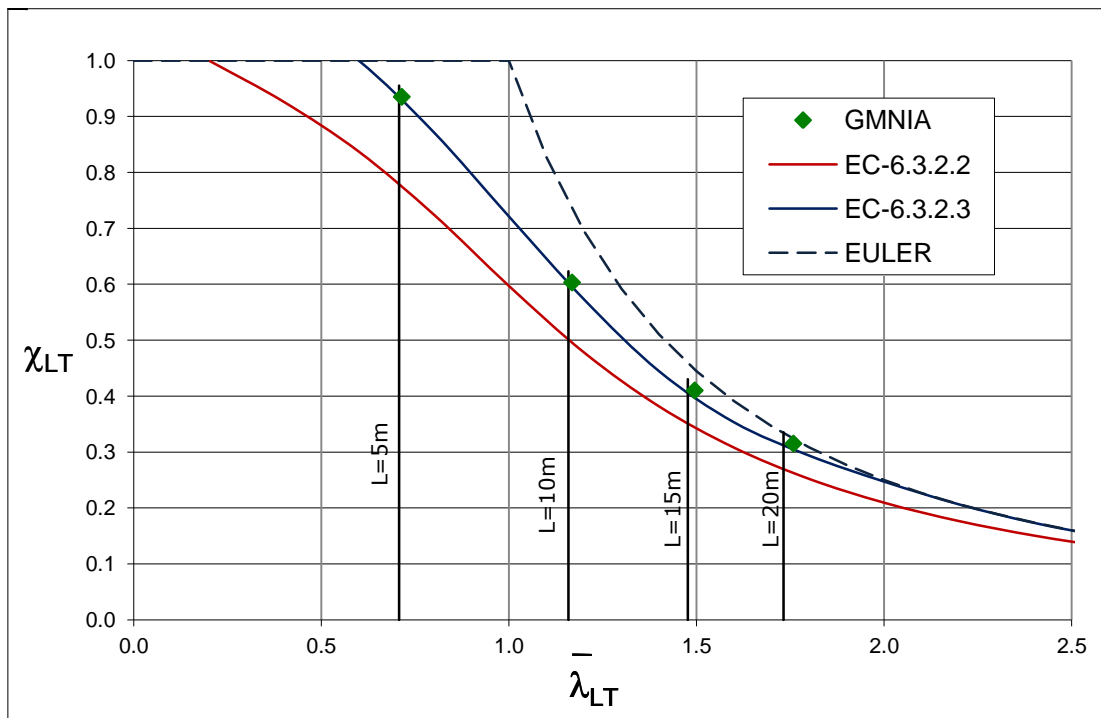
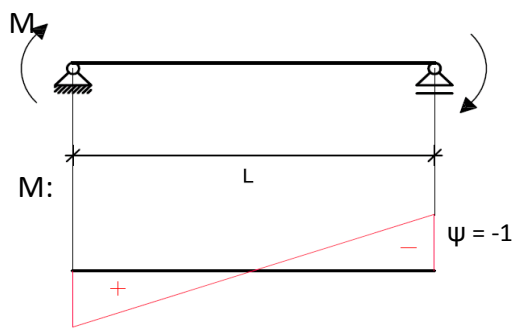


Abbildung 5-4: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))

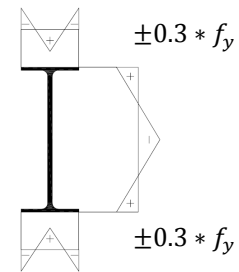
Die Abbildung 5-6 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit den Nachweismethoden N1 und N2 gemäß Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 für Einfeldträger mit dem Querschnitt IPE 500 mit linearem durchschlagenden Momentenverlauf mit  $\psi = -1$  und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 5-5).

Der Nachweis N1 wird mit der Knicklinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und der Nachweis N2 mit der der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) sowie dem Momentenbeiwert  $k_c = 0,60$  durchgeführt.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-5: System und Belastung

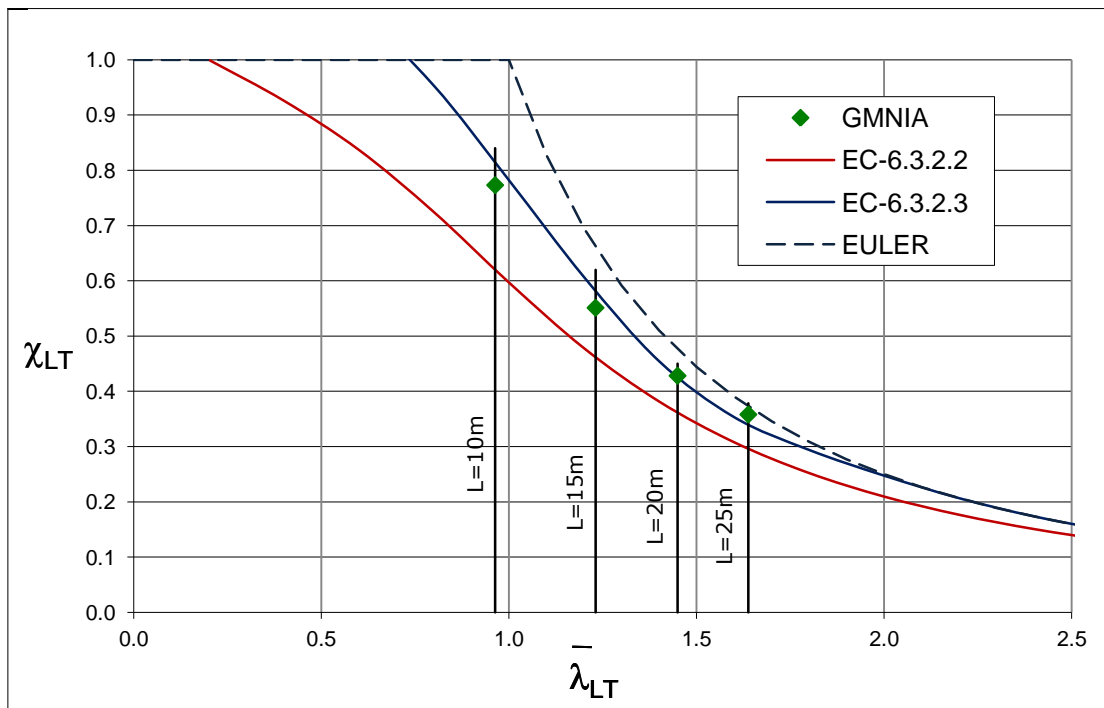
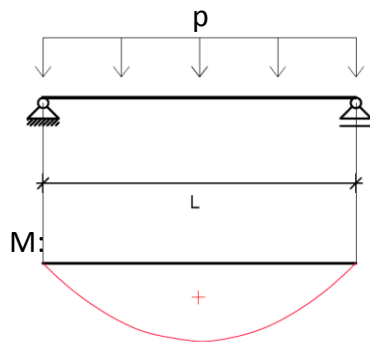


Abbildung 5-6: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

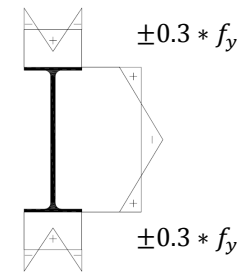
Die Abbildung 5-8 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit den Nachweismethoden N1 und N2 gemäß Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.2 und Kapitel 6.2.3.3 für Einfeldträger mit dem Querschnitt IPE 500 mit positivem parabolischem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 5-7).

Der Nachweis N1 wird mit der Knicklinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und der Nachweis N2 mit der der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) sowie dem Momentenbeiwert  $k_c = 0,94$  durchgeführt.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-7: System und Belastung

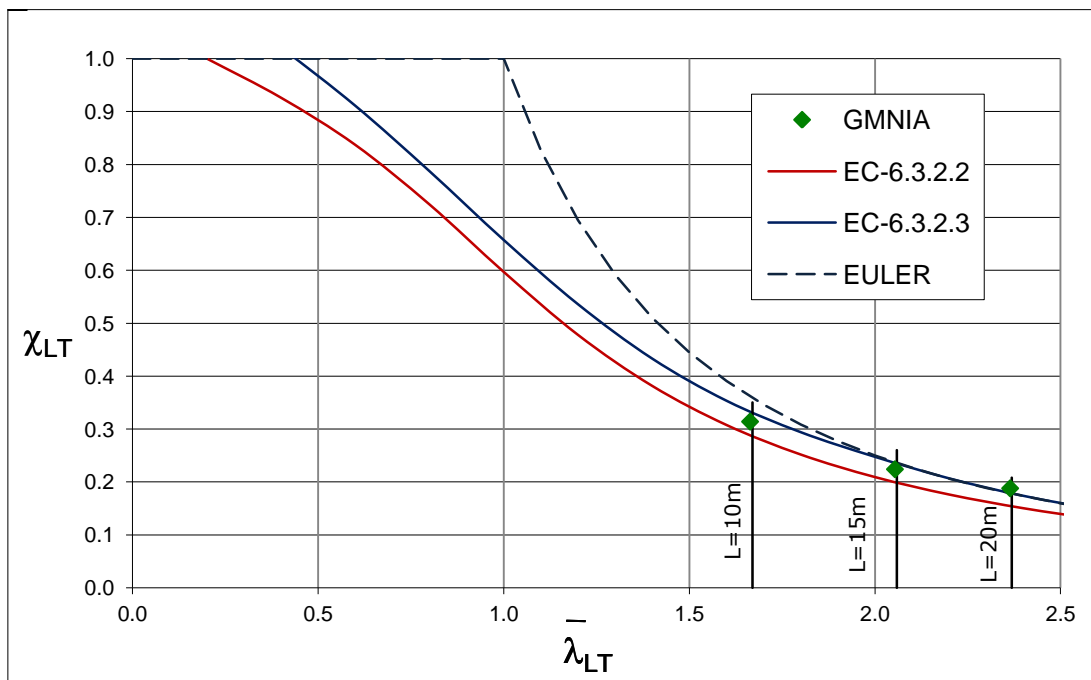


Abbildung 5-8 : Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; positiver parabolischer Momentenverlauf)

## (b) Interpretation der Ergebnisse

Zusammenfassend lassen sich aus Abbildung 5-1 bis Abbildung 5-8 folgende wesentliche Ergebnisse ablesen:

- Der Nachweis N1, auf Basis der Knickspannungslinien für zentrischen Druck, liefert immer die konservativsten Ergebnisse. Für ein konstantes Moment kann das reale Tragverhalten noch sehr gut wiedergegeben werden. Da bei diesem Nachweis keine Anpassung der Biegeknicklinien an die unterschiedlichen Momentenverläufe erfolgt, liegen die Ergebnisse teilweise weit auf der sicheren Seite.
- Das Nachweisverfahren N2, auf Basis der für Biegedrillknicken entwickelten Biegedrillknickkurven, kann das reale Tragverhalten sehr gut wiedergeben.

## 5.2. Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit dem vereinfachten Bemessungsverfahren N3 – Gurtnicken gemäß EC 3

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der GMNIA-Analyse für gabelgelagerte IPE 500-Einfeldträger unterschiedlicher Längen und mit verschiedenen Momentenverläufen mit der Nachweismethode N3 gemäß Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.4 verglichen.

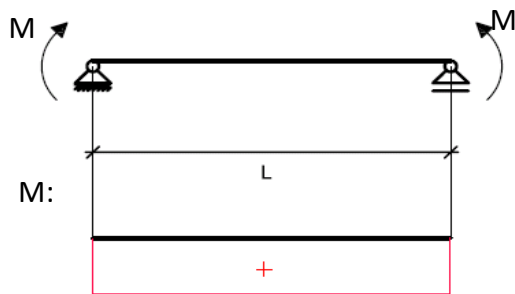
Näherungsweise erfolgte die Ermittlung des Trägheitsradius um die z-Achse unter Berücksichtigung der Fläche des Druckgurtes und einem Fünftel des Steges (gemäß Eurocode wäre 1/6 des Steges zu berücksichtigen). Für den untersuchten Querschnitt IPE 500 wird die Knickspannungslinie c mit dem Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$  verwendet. Der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  wurde in den Darstellungen bereits mit dem Faktor  $k_{fi} = 1.1$  vervielfacht.

Die Ergebnisse werden hier in Abhängigkeit von der Stützweite und nicht in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  dargestellt.

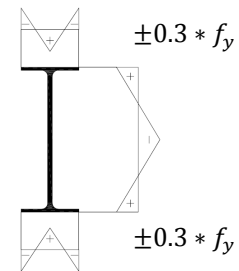
**(a) Ergebnisse im Vergleich**

Die Abbildung 5-10 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit der Nachweismethode N3 unter Berücksichtigung von  $k_c = 1$  laut Eurocode 3, Kapitel 6.2.3.4 für Einfeldträger mit dem Querschnitt IPE 500 mit konstantem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 5-9).

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-9: System und Belastung

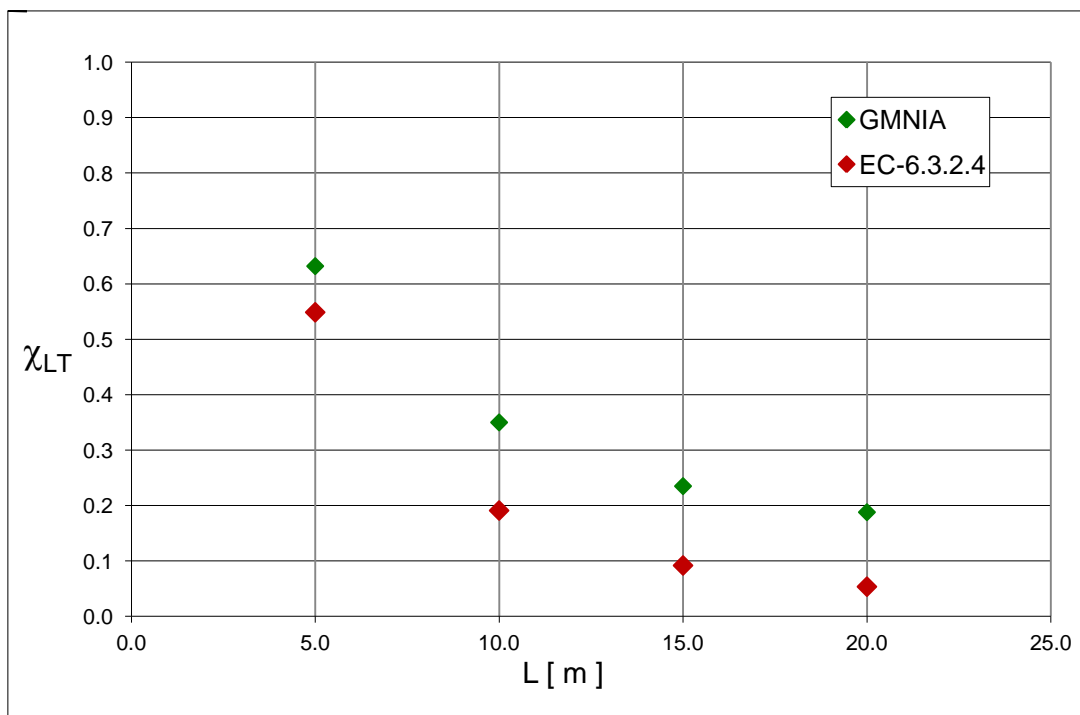
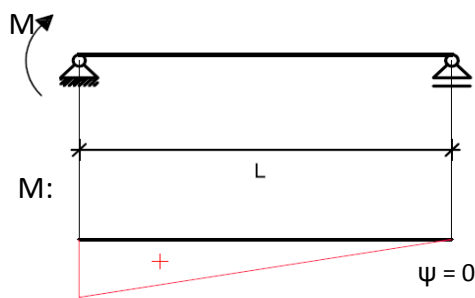


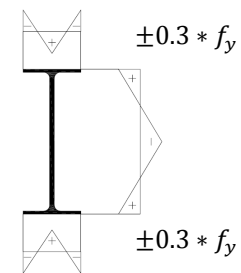
Abbildung 5-10: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; M = konstant)

Die Abbildung 5-12 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit der Nachweismethode N3 unter Berücksichtigung von  $k_c = 0,75$  laut Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.4 für die, wie in Abbildung 5-11 dargestellten, IPE 500-Einfeldträger mit linearem dreiecksförmigen Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ) und unterschiedlicher Länge.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-11: System und Belastung

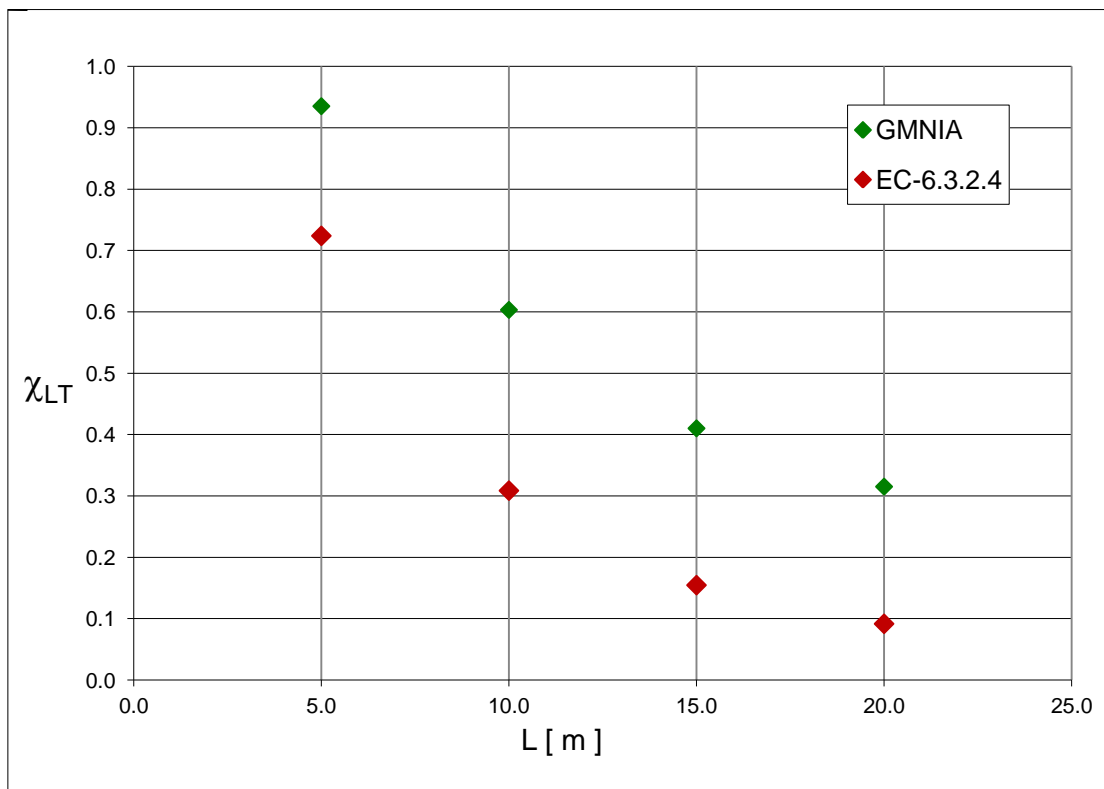
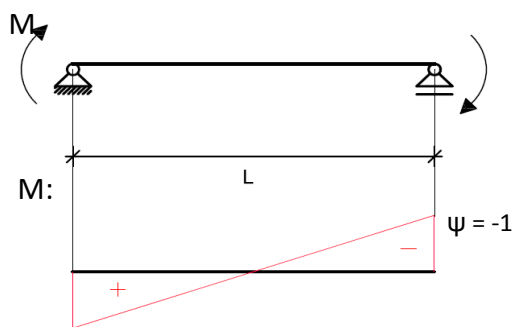


Abbildung 5-12: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))



Die Abbildung 5-14 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit der Nachweismethode N3 unter Berücksichtigung von  $k_c = 0,60$  laut Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.4 für die, wie in Abbildung 5-13 dargestellten, IPE 500-Einfeldträger mit linearem durchschlagenden Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ) und unterschiedlicher Länge.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**

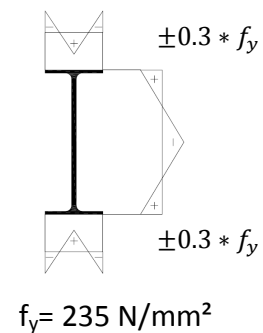


Abbildung 5-13: System und Belastung

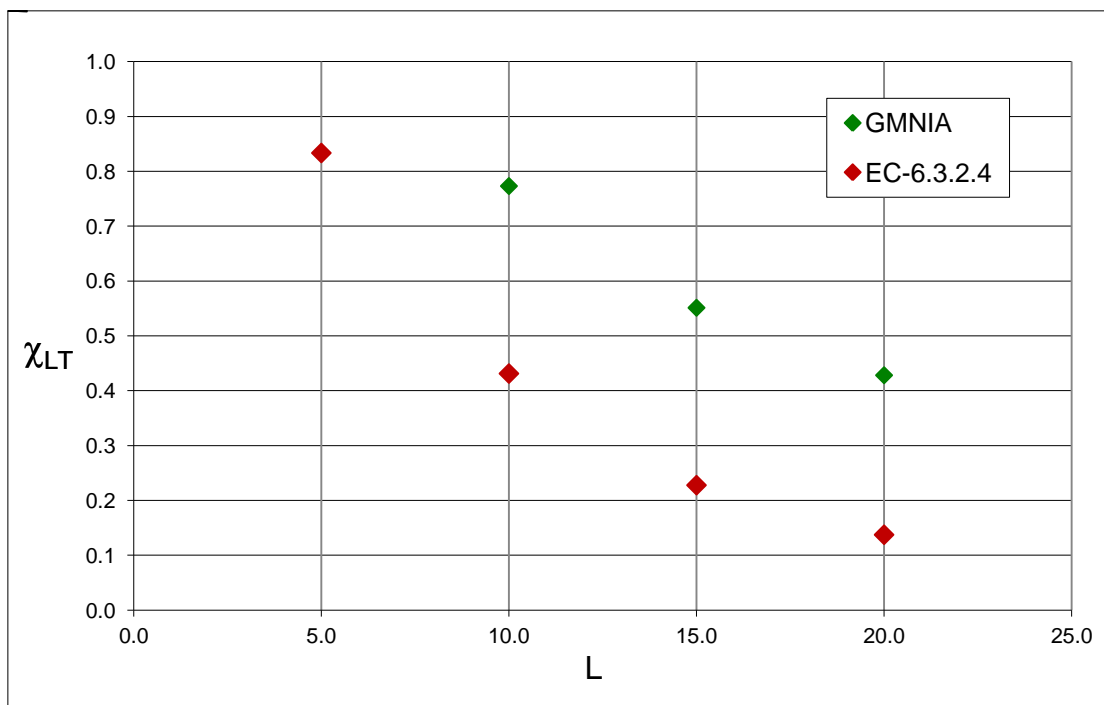
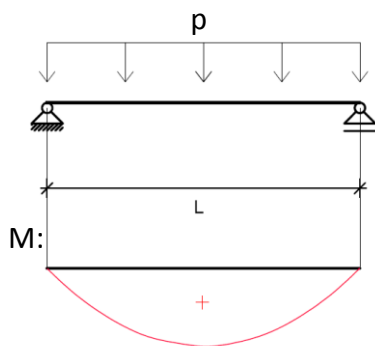


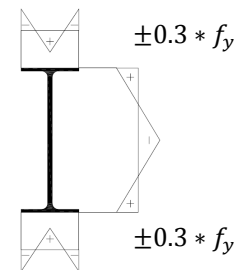
Abbildung 5-14: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

Die Abbildung 5-16 zeigt den Vergleich der Ergebnisse der GMNIA-Analyse mit der Nachweismethode N3 unter Berücksichtigung von  $k_c = 0,94$  laut Eurocode 3 Kapitel 6.2.3.4 für die, wie in Abbildung 5-15 dargestellten, IPE 500 Einfeldträger mit positivem parabolischem Momentenverlauf und unterschiedlicher Länge.

**System + Belastung:**



**Eigenspannungen IPE 500:**



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 5-15: System und Belastung

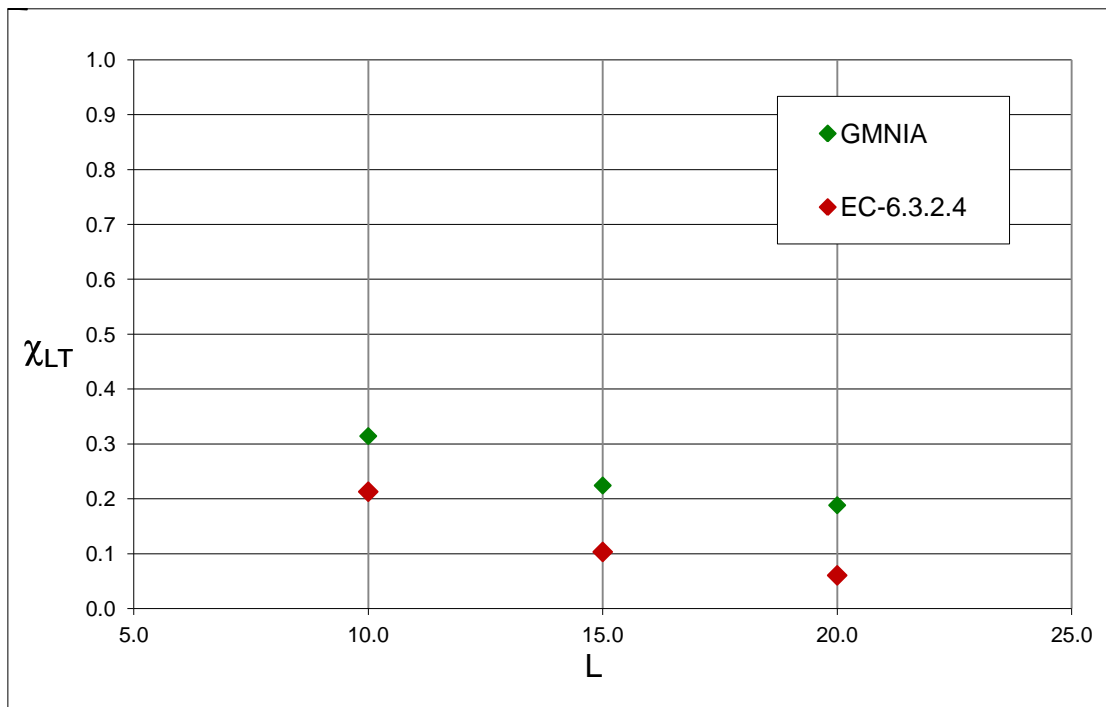


Abbildung 5-16: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; positiver parabolischer Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

## **(b) Interpretation der Ergebnisse**

Wie in Abbildung 5-10 bis Abbildung 5-16 ersichtlich, liefert der Nachweis N3 gemäß Eurocode 3 Kapitel 6.3.2.4 immer weit auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse.

Die Ursache für diese mit zunehmenden Stützweiten immer größer werdenden Abweichungen liegt darin, dass die rückhaltende Wirkung des Zuggurtes nicht berücksichtigt wird.

## 6. Der Einfluss von zusätzlichen Halterungen am Obergurt auf das Tragverhalten und den Tragwiderstand

Nachfolgend werden die Ergebnisse der GMNIA-Analysen für folgende Fälle dargestellt:

- beidseits gabelgelagerte Einfeldträger des Querschnittes IPE 500 ohne zusätzliche Zwischenhalterungen;
- beidseits gabelgelagerte Einfeldträger des Querschnittes IPE 500 mit zwei äquidistanten zusätzlichen Zwischenhalterungen am Obergurt;
- beidseits gabelgelagerte Einfeldträger des Querschnittes IPE 500 mit drei äquidistanten zusätzlichen Zwischenhalterungen am Obergurt.

Sämtliche Untersuchungen erfolgen für das Material S235. Für den Querschnitt IPE 500 kann für die Berechnung von  $\chi_{LT}$  von plastischem Querschnittswiderstand ausgegangen werden, da es sich um einen Klasse-2-Querschnitt handelt.

### (a) Tragverhalten bei konstantem positivem Moment

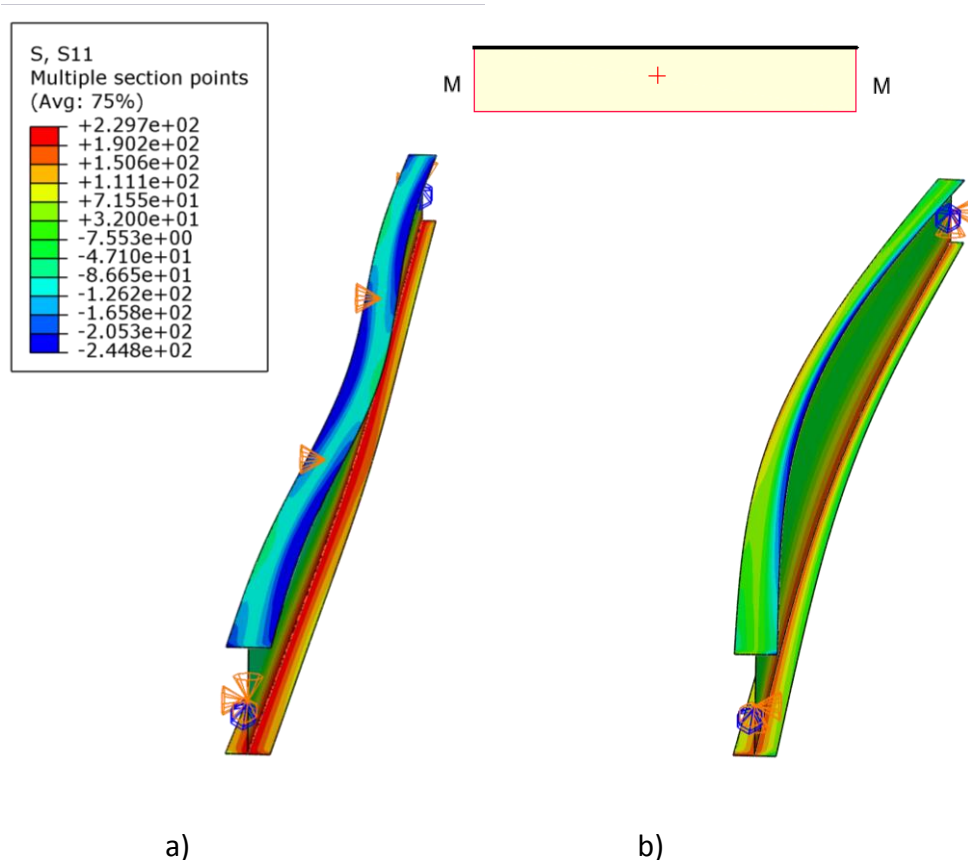


Abbildung 6-1: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (konstantes positives Moment)

Abbildung 6-1 zeigt die Spannungsverteilung und die Verformungen zufolge konstanter positiver Momentenbelastung eines 2 Mal am Obergurt zusätzlich gehaltenen (a) und eines nicht gehaltenen (b) IPE 500-Trägers im Traglastzustand.

Bei diesem Belastungsfall erfährt der Untergurt über die ganze Länge Zugbeanspruchungen, wodurch in Y-Richtung (Trägerquerrichtung) rückwirkende Kräfte aktiviert werden. Der Untergurt wirkt somit für den ganzen Querschnitt stabilisierend.

Der Obergurt hingegen wird über die ganze Länge konstant gedrückt und in beiden Fällen ist die Knickfigur am Obergurt analog den Knickfiguren eines zentrisch gedrückten Stabes. Dabei sind die Verformungen zwischen den Halterungen und die Verformung zwischen den Gabelagern affin.

Die Abbildung 6-2 zeigt die Ergebnisse der GMNIA-Analysen von nicht gehaltenen, 2 Mal und 3 Mal gehaltenen Biegeträgern unter konstanter positiver Momentenbelastung.

Wie bereits aufgezeigt wurde, entspricht das Tragverhalten von zusätzlich am Obergurt gestützten Trägern zwischen den Halterungen annähernd dem Tragverhalten eines gabelgelagerten Trägers mit einer Länge, die dem Abstand der Halterungen entspricht.

In Abbildung 6-2 kann man erkennen, dass ein nicht gehaltener Stab mit 5 m Länge die gleiche Tragfähigkeit wie ein 15 m langer, 2 Mal gehaltener Stab (die Länge zwischen den Halterungen ist dann ebenfalls 5 m) und wie ein 20 m langer Stab mit 3 Halterungen (die Länge zwischen den Halterungen ist 5 m) aufweist. Dies wird durch die horizontale strichlierte Linie verdeutlicht.

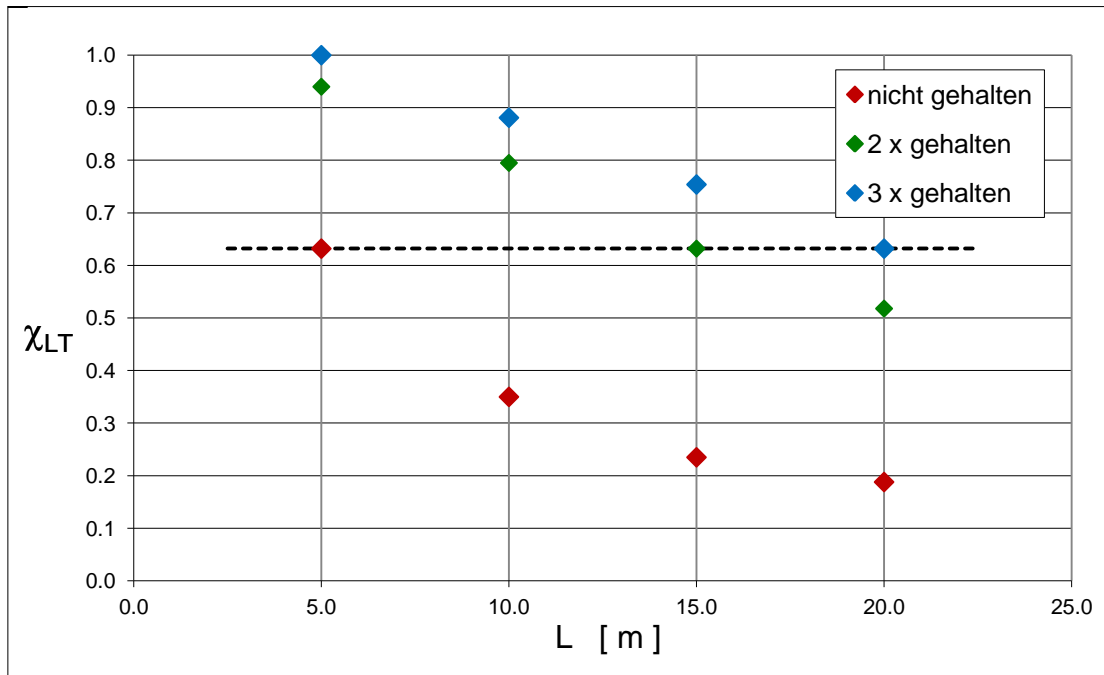


Abbildung 6-2: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; konstantes positives Moment)

Für die GMNIA-Analysen wurden dabei die Amplituden  $e_0$  der geometrischen Imperfektionen am Obergurt nicht mit  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge  $L$ , sondern bezogen auf den Abstand zwischen den Halterungen ermittelt. Für die Stäbe mit 2 Halterungen folgt daraus  $e_0 = L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge und für Stäbe mit 3 Halterungen  $e_0 = L/4000$ .

**(b) Tragverhalten bei konstantem negativem Moment**

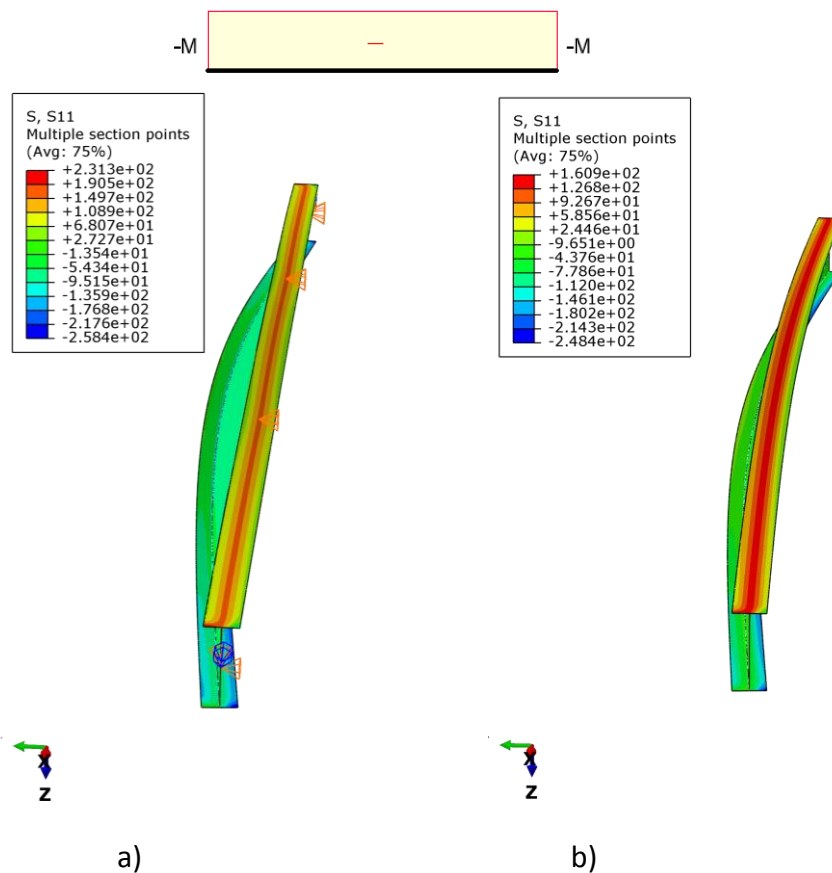


Abbildung 6-3: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (konstantes negatives Moment)

Die Abbildung 6-3 zeigt die Spannungsverteilungen und die Verformungen zufolge konstantem negativem Momentenverlauf im Traglastzustand.

Im Gegensatz zu dem zuvor beschriebenen Fall mit konstantem positivem Moment, wird jetzt nicht mehr der stabilitätsgefährdete Gurt gehalten, sondern der ohnehin schon stabilisierende Zuggurt. Durch diese Halterungen kann in diesen Punkten nur noch eine Verdrehung und eine Verschiebung in vertikaler Richtung auftreten. Dadurch ergibt sich auch für den Druckgurt eine geringere Horizontalverformung, die wiederum eine Erhöhung der Tragfähigkeit bewirkt. Je länger der Stab ist, desto größer ist die Erhöhung der Tragfähigkeit.

Die Abbildung 6-4 zeigt die Ergebnisse der GMNIA für nicht gehaltene, 2 Mal und 3 Mal gehaltene Stäbe unter konstanter negativer Momentenbelastung.

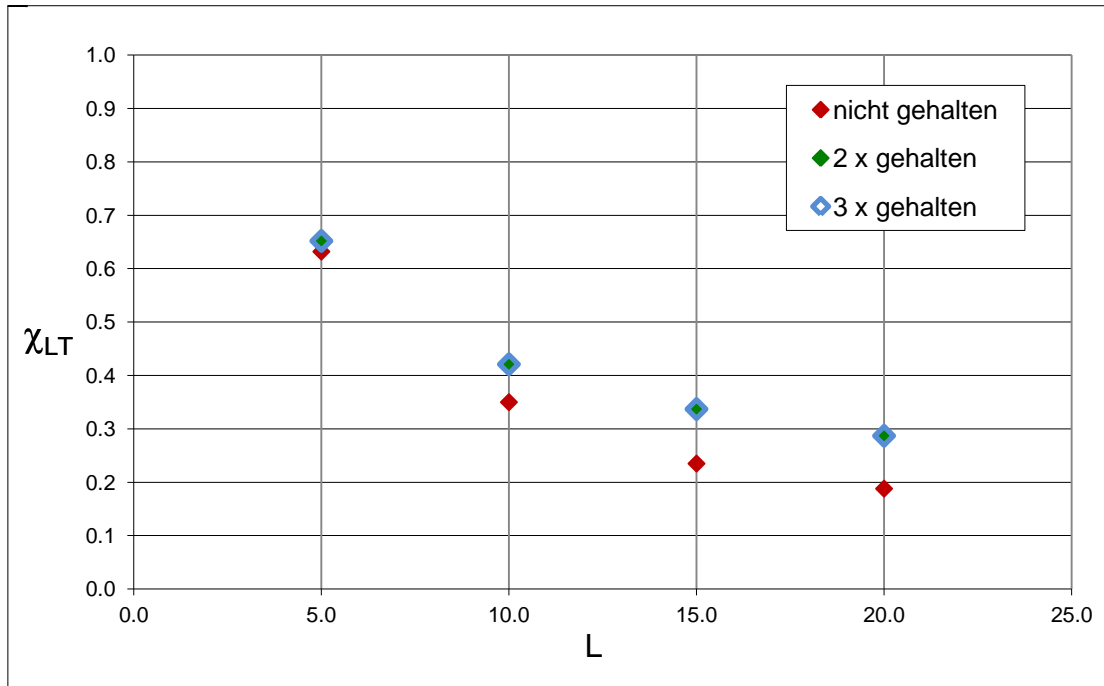


Abbildung 6-4: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; konstantes negatives Moment)

Da hier der stabilitätsgefährdete Druckgurt die gesamte Länge aufweist, wurde bei der GMNIA-Analyse die Amplitude  $e_0$  der geometrischen Imperfektion unabhängig von den Zwischenhalterungen mit  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge  $L$  eingesetzt.



(c) Tragverhalten bei positivem dreiecksförmigen Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )

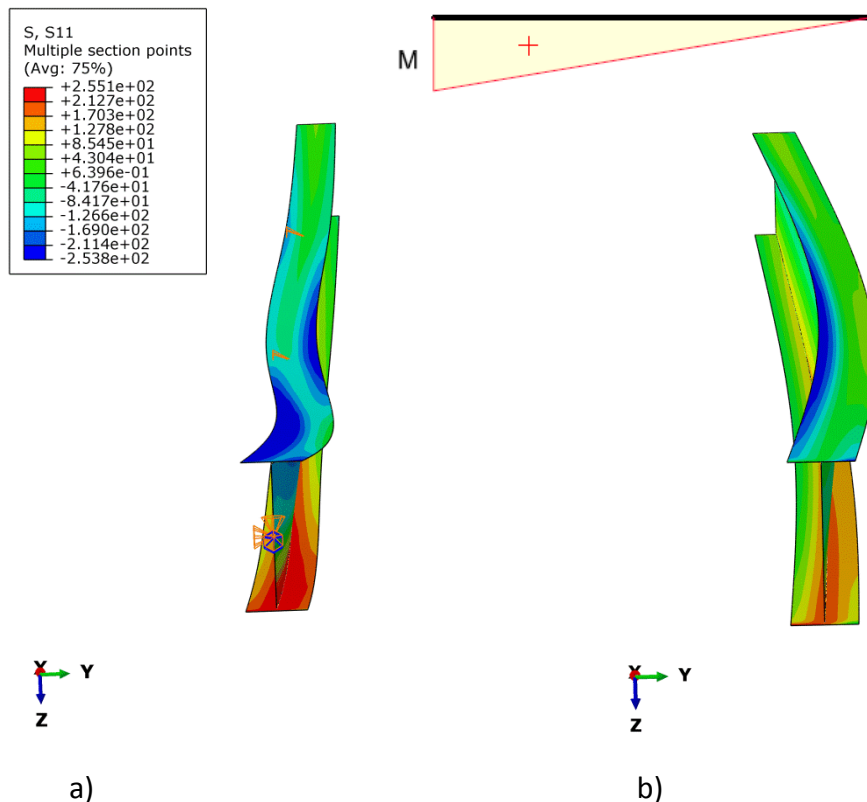


Abbildung 6-5: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf)

Die Abbildung 6-5 zeigt die Spannungsverteilung und die Verformungen zufolge linearer positiver Momentenbelastung eines a) 2 Mal am Obergurt zusätzlich gehaltenen und b) eines nicht gehaltenen IPE 500-Trägers.

Bei diesem Belastungsfall erfährt der Untergurt, gleich wie bei konstantem positiven Momentenverlauf, über die ganze Länge Zugbeanspruchungen, wodurch in Y-Richtung rückwirkende Kräfte aktiviert werden. Der Untergurt wirkt somit für den ganzen Querschnitt stabilisierend.

Der Obergurt hingegen erfährt über die ganze Länge Druckbeanspruchungen mit den daraus resultierenden abtreibenden Kräften. Zusätzliche Halterungen am Obergurt wirken diesen abtreibenden Kräften entgegen und reduzieren die Knicklängen, was zu höheren Beanspruchbarkeiten führt.

Vergleicht man zum Beispiel einen 15 m langen IPE-Träger mit zwei Halterungen am Obergurt mit einem 5 m langen gabelgelagerten Träger, der gleich wie das maßgebende Feld des 15 m langen Trägers belastet wird (zusätzliche GMNIA-Analyse für 5 m und  $\psi = 0,66$ ), so kann man erkennen, dass der längere, 2 Mal gehaltene Träger eine höhere Tragfähigkeit aufweist – wie Abbildung 6-6 für 15 m zeigt.

Die Lastabnahme im 2. und 3. Feld bewirkt eine teilweise Einspannung des Obergurtes im ersten Feld (vergleiche Abbildung 6-5). Eine Berechnung eines 5 m langen Stabes mit Gabellagerung mit gleicher Belastung wie im ersten Teilfeld führt daher zu einer etwas zu geringen Tragfähigkeit.

Die Abbildung 6-6 zeigt die Ergebnisse der GMNIA-Analyse für nicht gehaltene, 2 Mal und 3 Mal gehaltene Stäbe unter positiver dreiecksförmiger Momentenbelastung sowie den Vergleich mit einem 5 m langen IPE-Träger mit Gabellagerung und gleicher Belastung wie im ersten Teilfeld der gehaltenen Stäbe ( $\psi = 0,66$ ).

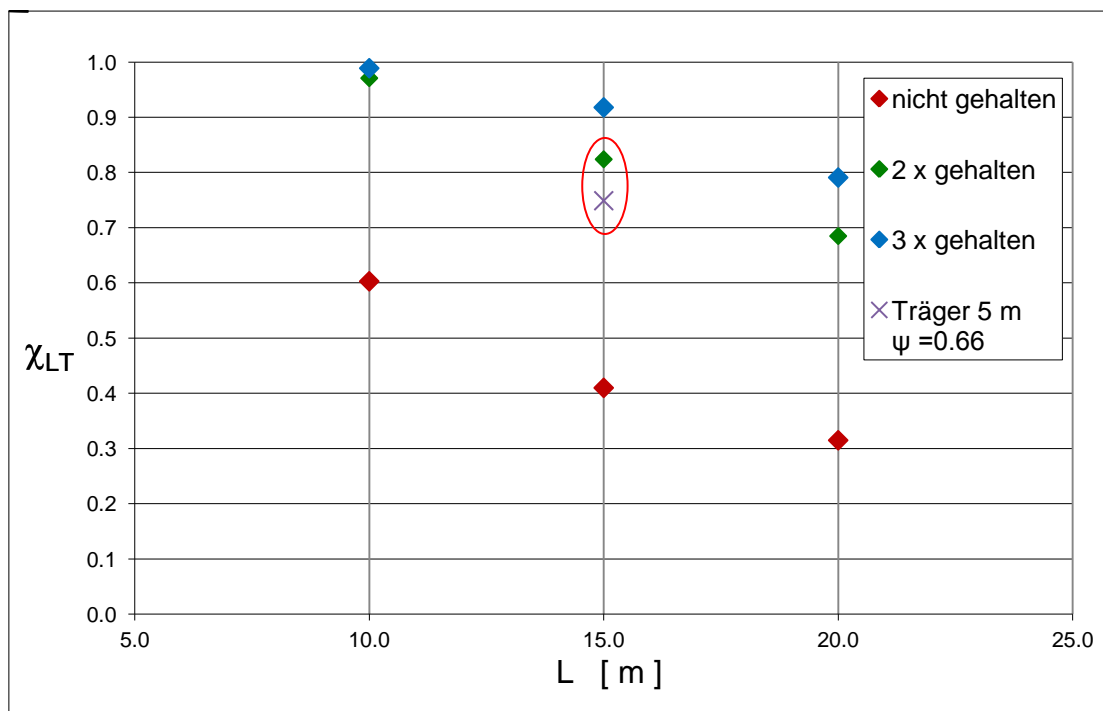


Abbildung 6-6: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf)

Für die GMNIA-Analyse wurde die Amplitude  $e_0$  der geometrischen Imperfektion nicht mit  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge  $L$ , sondern bezogen auf den Abstand zwischen den Halterungen angesetzt. Für die Stäbe mit 2 Halterungen folgt daraus  $e_0 = L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge und für Stäbe mit 3 Halterungen  $e_0 = L/4000$ .

**(d) Tragverhalten bei linearem durchschlagenden Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )**

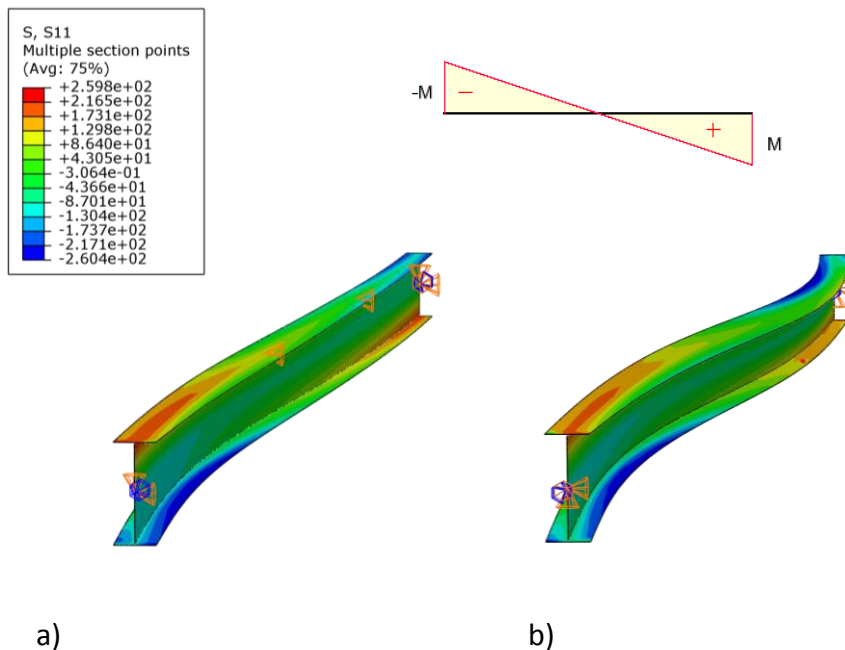


Abbildung 6-7: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (linearer durchschlagender Momentenverlauf)

Beim ungestützten Stab wird das Grenztragverhalten durch die Ausbildung gleicher antimetrischer Biegelinien am Obergurt und Untergurt bestimmt. Bei zusätzlichen Stützungen des Obergurtes wird die Biegelinie des Untergurtes kaum beeinflusst. Da der Untergurt annähernd gleich versagt, erhöht sich die Tragfähigkeit bei dieser Beanspruchung zufolge zusätzlicher Halterungen an nur einem Gurt nur gering.

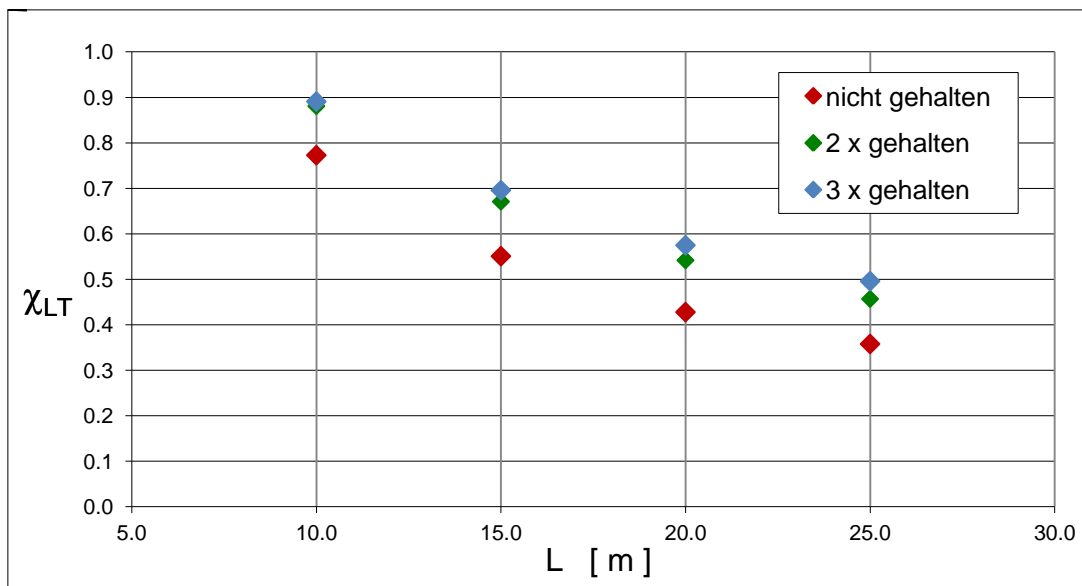


Abbildung 6-8: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (linearer durchschlagender Momentenverlauf)

(e) Tragverhalten bei Querlast und parabolischem Momentenverlauf (0/1/0)

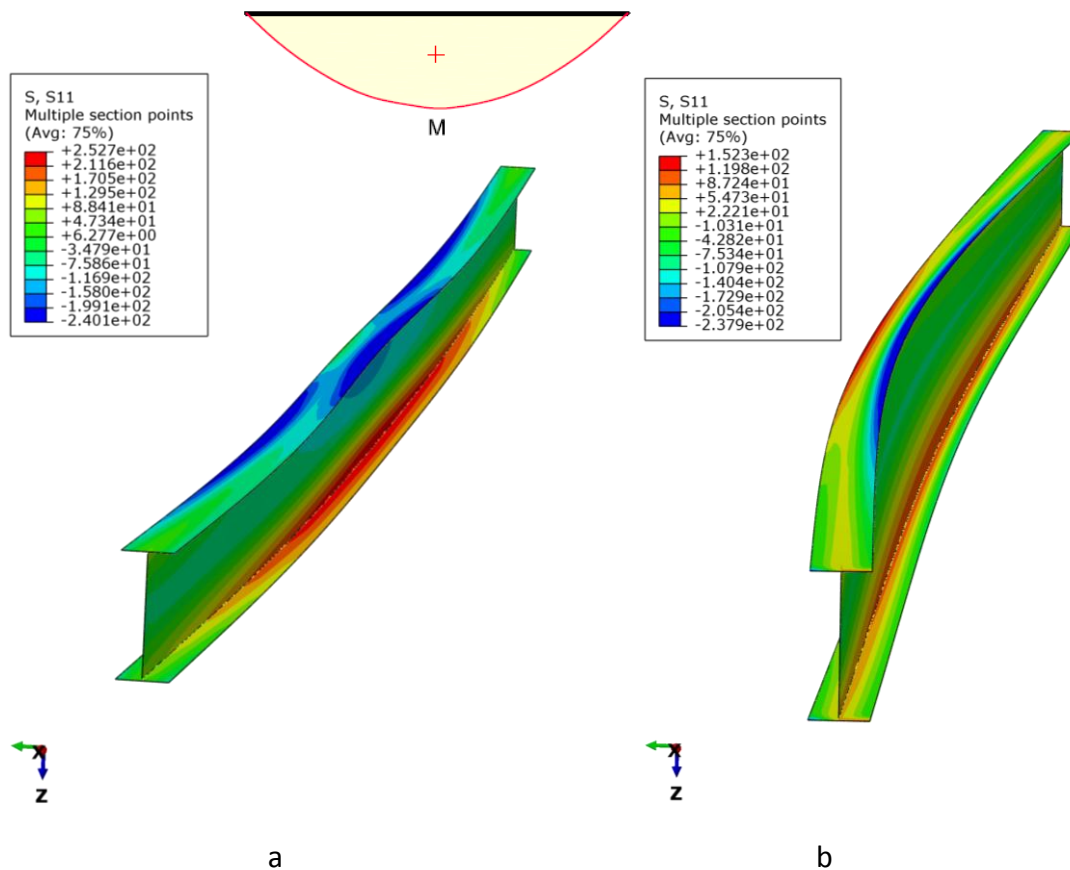


Abbildung 6-9: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (positiver parabolischer Momentenverlauf)

Wie zu erwarten war, kommt es in diesem Fall – ähnlich wie bei konstantem Moment – zu einer großen Erhöhung der Tragfähigkeit, da der Druckgurt gehalten wird. Vergleicht man die Ergebnisse mit denen für konstantes Moment (Abbildung 6-2), so fällt auf, dass am Obergurt nicht zusätzlich gehaltene Stäbe bei Querbelastung und parabolischem Momentenverlauf eine geringere Tragfähigkeit aufweisen.

Am Obergurt zusätzlich gehaltene Stäbe weisen hingegen bei Querbelastung und parabolischem Momentenverlauf eine höhere Tragfähigkeit auf als bei Endmomentenbelastung und konstantem positiven Momentenverlauf.

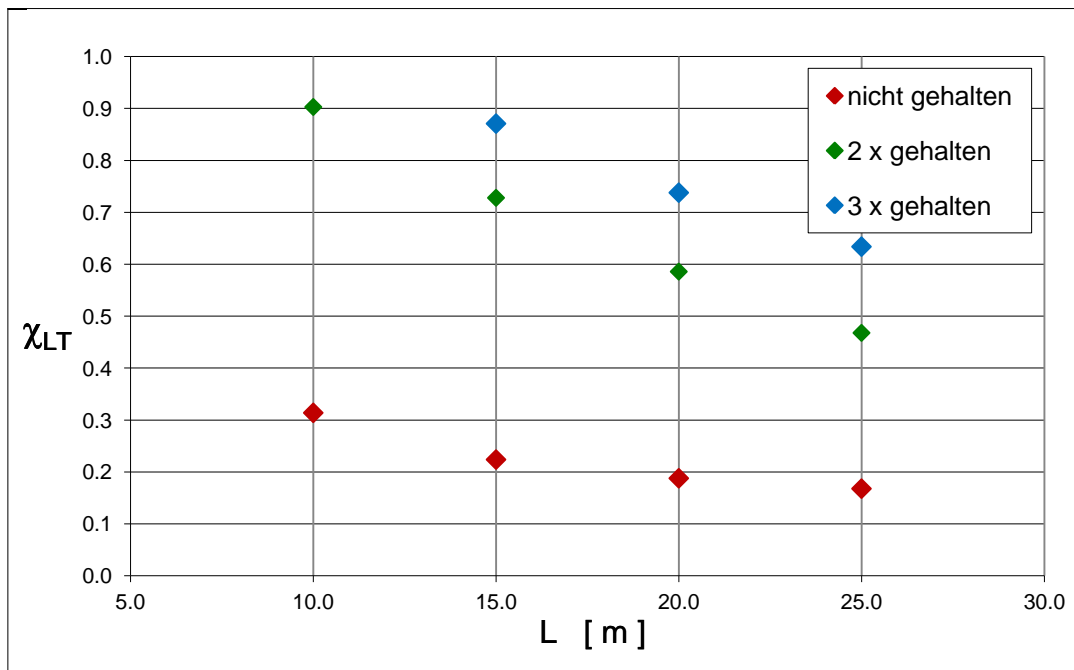


Abbildung 6-10: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger  
(positiver parabolischer Momentenverlauf)

(f) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1)

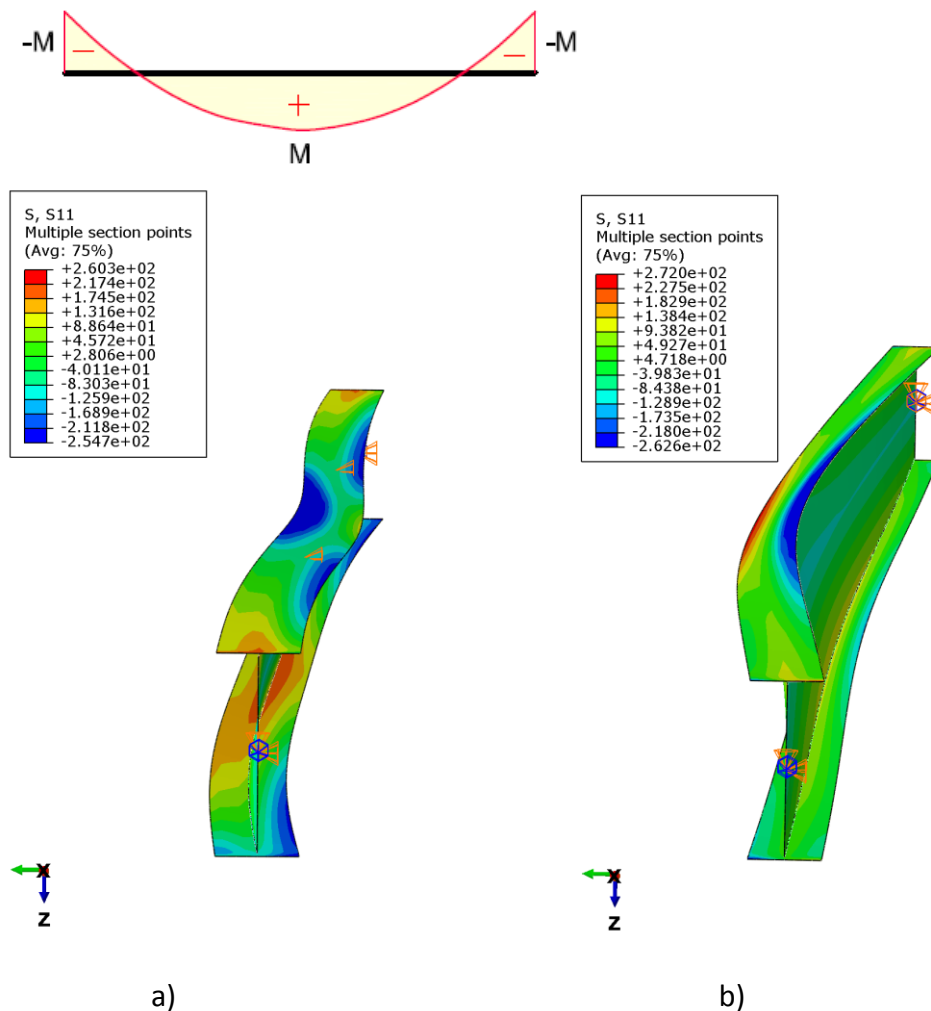


Abbildung 6-11: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1))

Vergleicht man die Ergebnisse mit denen für konstantes Moment (Abbildung 6-2) und parabolisches Moment (Abbildung 6-10), so fällt auf, dass am Obergurt nicht zusätzlich gehaltene Stäbe bei Querbelastung und parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf eine geringere Tragfähigkeit aufweisen.

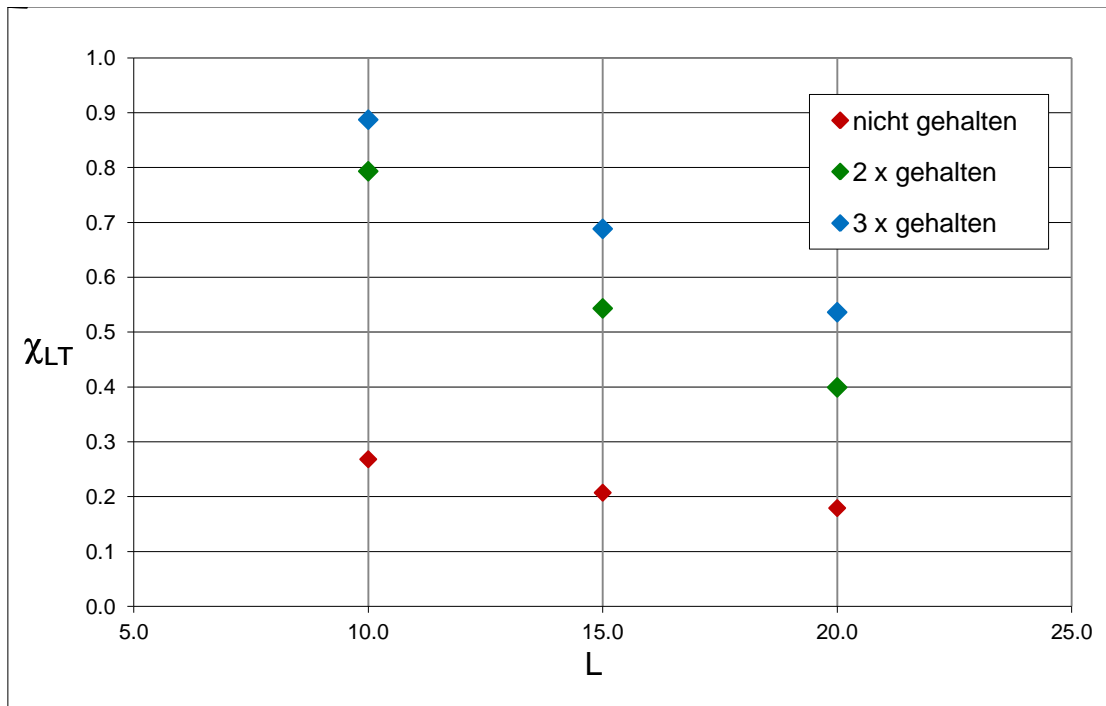


Abbildung 6-12: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1))

(g) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1)

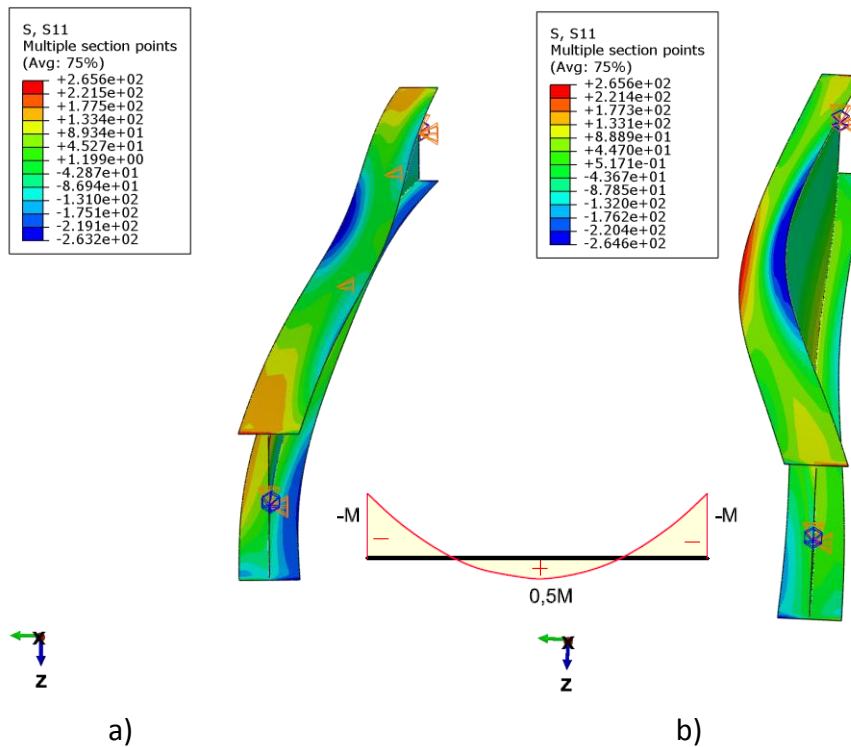


Abbildung 6-13: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1))

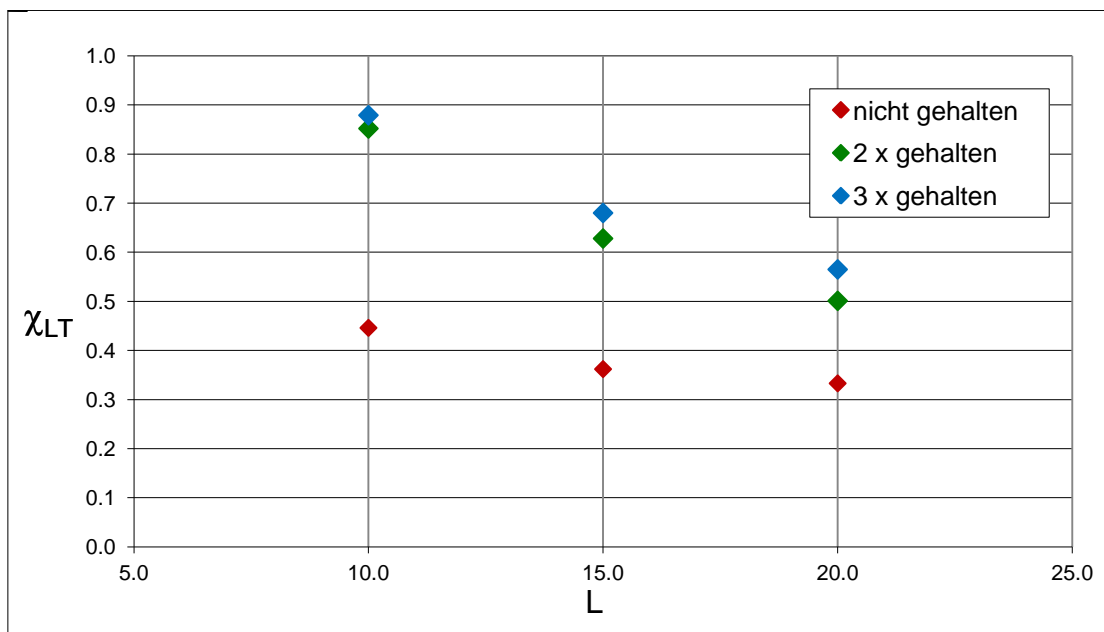


Abbildung 6-14: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1))



**(h) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch  
Momentenverlauf (-1/0/-1)**

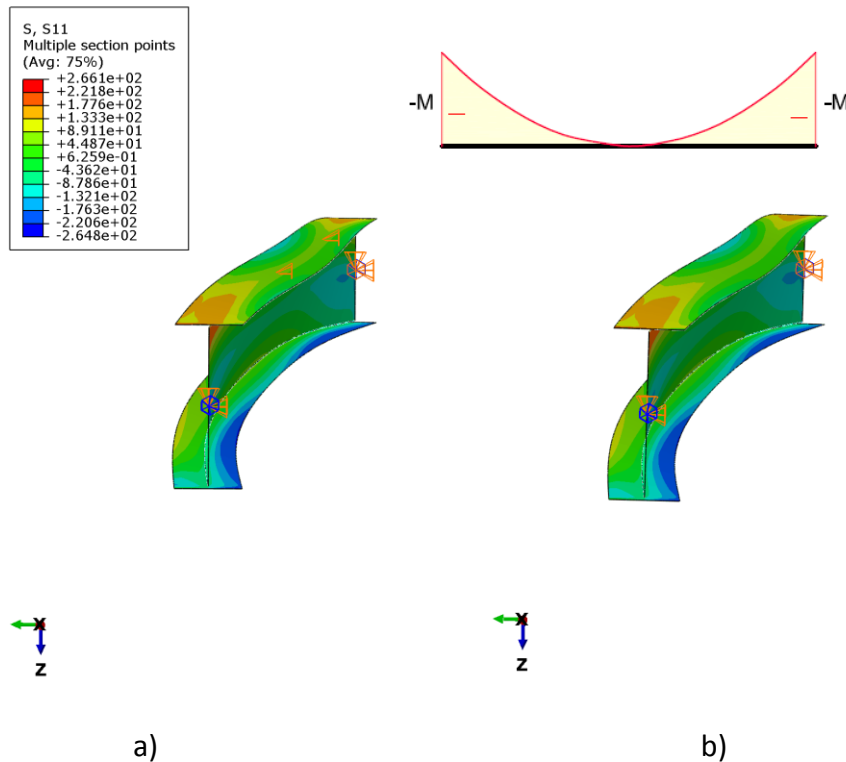


Abbildung 6-15: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (Endmomente und Querlast mit negativem parabolischem Momentenverlauf (-1/0/-1))

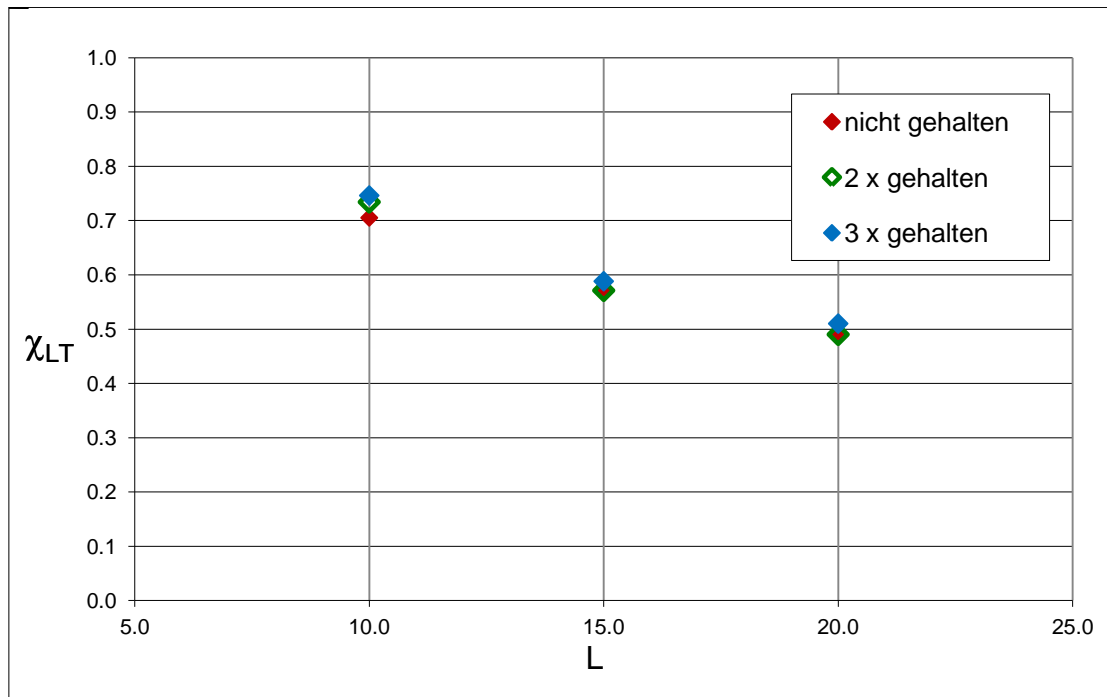


Abbildung 6-16: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0/-1))

## 7. Vergleich des Tragwiderstandes von Trägern mit Halterungen an nur einem Gurt mit den Biegedrillknickspannungslinien gemäß Eurocode EN 1993-1-1

### 7.1. Grundlagen für die durchgeführten Berechnungen

Für Träger mit Halterungen an nur einem Gurt stellt der Eurocode derzeit nur das in Kapitel 4.2.3 und Kapitel 5.2 behandelte vereinfachte Bemessungsverfahren – Nachweis N3 – für Träger mit Biegedrillknickbehinderung zur Verfügung. Dieses entspricht einem Nachweis des gedrückten Gurtes. Das Ziel dieser Arbeit ist allerdings, auch für Träger mit zusätzlichen Halterungen an nur einem Gurt einen Biegedrillknicknachweis auf Basis von Biegedrillknickspannungslinien in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  zu finden.

Einerseits werden nun die Knickspannungslinien des Eurocodes mit den Ergebnissen der GMNIA-Analyse verglichen, um festzustellen, ob und inwieweit die Ergebnisse auf der sicheren Seite liegen (Nachweis N1 Kapitel 4.2.1). Dabei werden die numerisch ermittelten idealen Kippmomente für die tatsächlich vorliegenden Zwischenhalterungen als Basis für die Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$  zugrunde gelegt. Hierfür wurden die GMNIA-Ergebnisse den Knickspannungslinien in Diagrammen gegenübergestellt.

Andererseits werden die eigens entwickelten Biegedrillknicklinien (Nachweis N2, siehe Kapitel 4.2.2) ebenfalls mit den GMNIA-Analysen verglichen. Auch hier wurde das ideale Kippmoment  $M_{cr}$  der LBA-Analyse verwendet.

Die Biegedrillknicklinien gemäß Eurocode Kapitel 3.2.3.3, die je nach Momentenverlauf eine Modifikation zulassen (siehe Kapitel 4.2.3 –  $\chi_{LT,mod}$  anstatt  $\chi_{LT}$ ), wurden hier bei den veränderlichen Momentenverläufen nicht angepasst. Dies deshalb, da sich die  $k_c$ -Werte des Gesamtsystems nicht mit den  $k_c$ -Werten des Gurtes zwischen den Halterungen deckten (unterschiedliche Momentenverläufe).

Die Modifikation wurde nur bei negativem linearem Momentenverlauf vorgenommen, da der Druckgurt mit und ohne Halterungen annähernd das gleiche Tragverhalten aufweist.

## 7.2. Lineare Momentenverläufe

### (a) Konstantes positives Moment

Die Abbildung 7-2 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem positivem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-1). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ )

gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:

Eigenspannungen IPE 500:

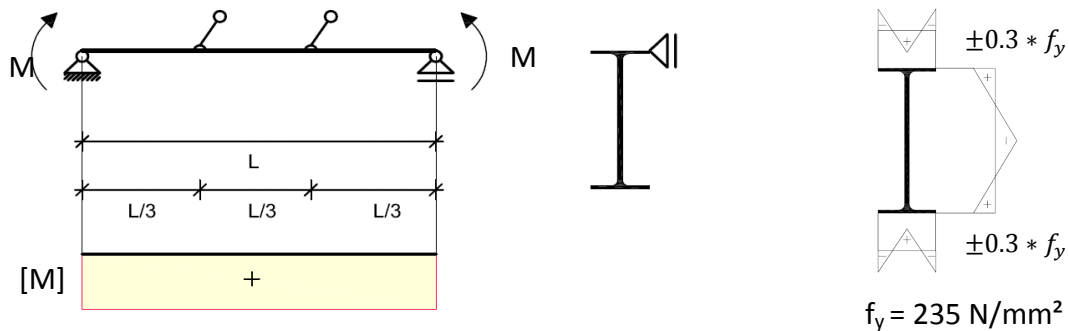


Abbildung 7-1: System und Belastung

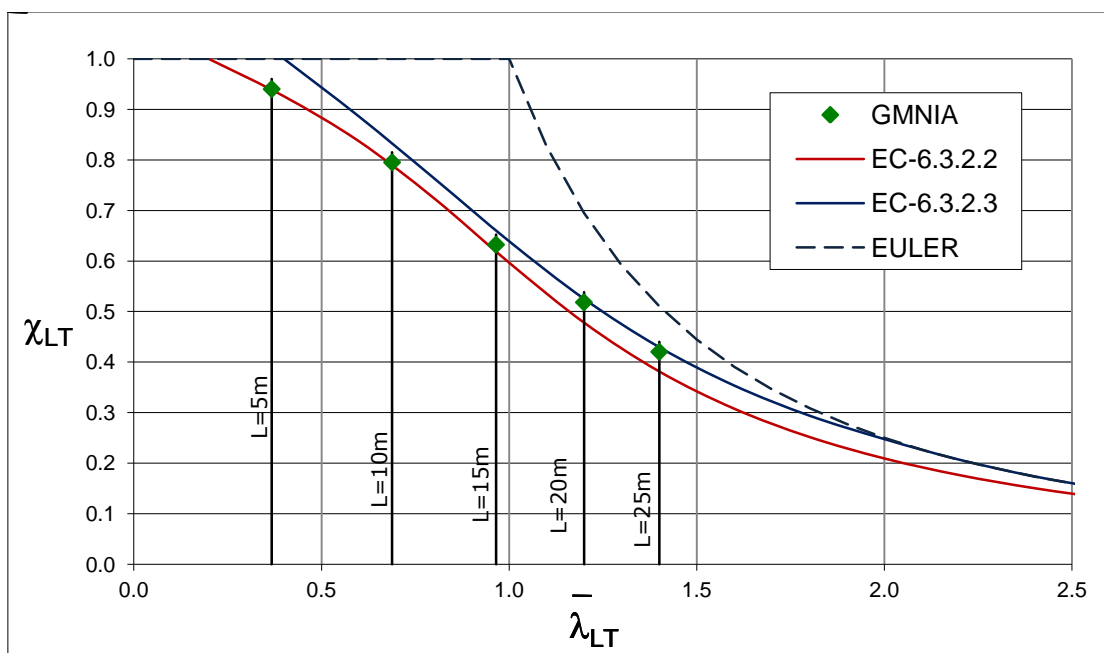


Abbildung 7-2: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf)

Da das Tragverhalten eines nicht gehaltenen Trägers annähernd dem Tragverhalten des Trägerteiles zwischen zwei Halterungen entspricht, passen für diesen Belastungsfall erwartungsgemäß die Ergebnisse der GMNIA-Analysen von zweifach zwischengestützten Trägern ähnlich gut mit beiden Knickspannungslinien (N1 und N2) überein wie die Ergebnisse nicht gehaltener Träger (Vergleiche mit Abbildung 5-2). Wie auch bei Trägern ohne Halterung wird die Tragfähigkeit von gedrunenen Trägern bei Anwendung des Nachweises gemäß Eurocode Kapitel 6.3.2.3 (Nachweis N2) leicht überschätzt. Die Knickspannungslinie gemäß Kapitel 6.2.2.2 (Nachweis N1) stimmt im gedrunenen Bereich sehr gut mit den GMNIA-Ergebnissen überein und liegt im schlankeren Bereich auf der sicheren Seite.

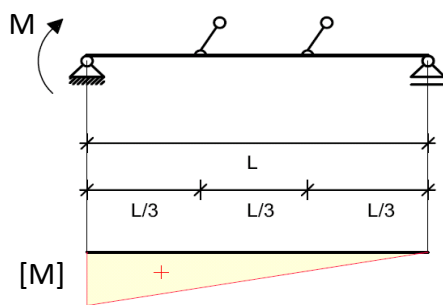
**(b) Positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )**

Die Abbildung 7-4 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit positivem dreiecksförmigen Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-3). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

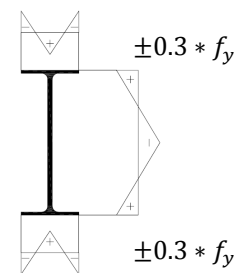
- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ , gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 7-3: System und Belastung

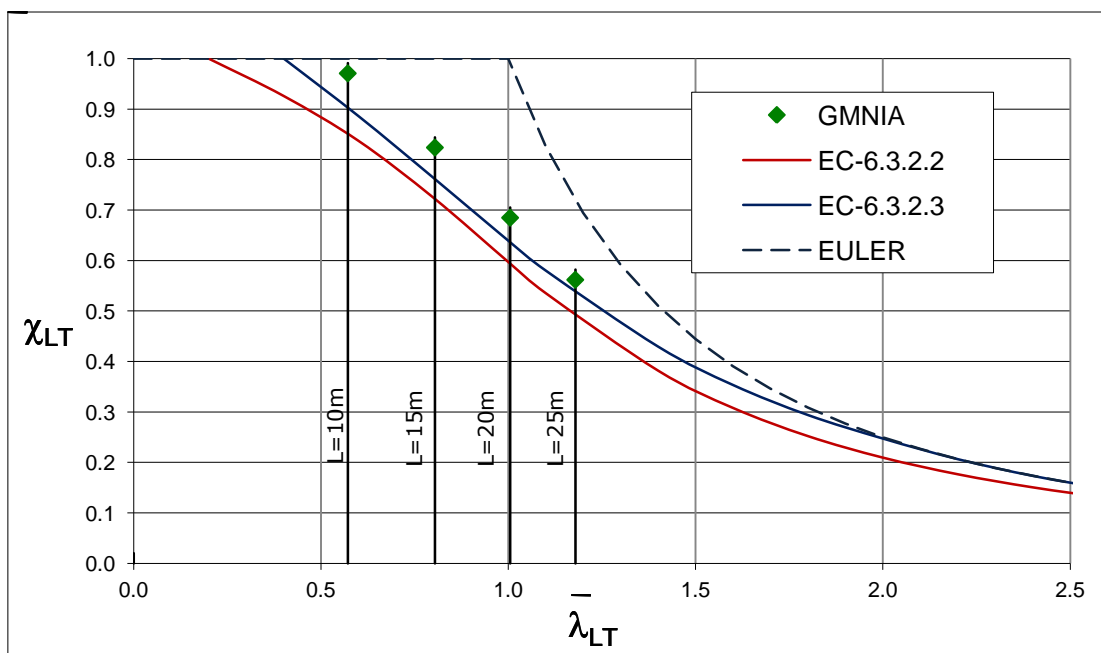
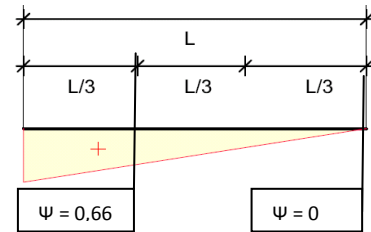


Abbildung 7-4: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))

Wird die Knickspannungslinie gemäß Eurocode 6.3.2.3 (Nachweis N2) nicht modifiziert (das heißt:  $k_c = 1,0$ ), so liegen beide Linien auf der sicheren Seite.

Auf Grund des in Kapitel 1 beschriebenen Tragverhaltens liegt es nahe, eine Modifikation bezogen auf das maßgebende erste Feld durchzuführen, also für den Momentenverlauf  $\psi = 0,66$ . Dies führt zu einem Momentenbeiwert  $k_c = 0,9$ .



Die Abbildung 7-5 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem positiven Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 7-3). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden wieder den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 0,9$ , gegenübergestellt.

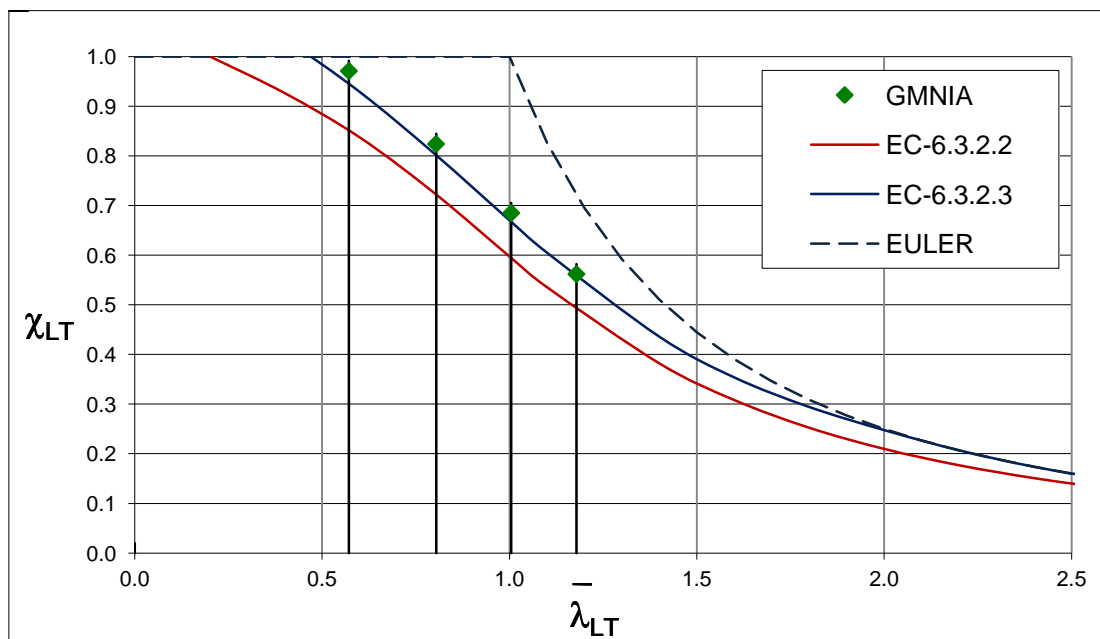


Abbildung 7-5: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf;  $k_c = 0,9$  berücksichtigt)

Wie man sieht, liefert diese Modifikation beim Nachweis N2 gute Übereinstimmungen mit der GMNIA-Analyse.

**Es ist aber Vorsicht geboten, da man auf keinen Fall eine Modifikation für den Momentenverlauf am Gesamtstab ( $\psi = 0$ ) durchführen darf, da diese auf der unsicheren Seite liegt.**

**(c) Linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )**

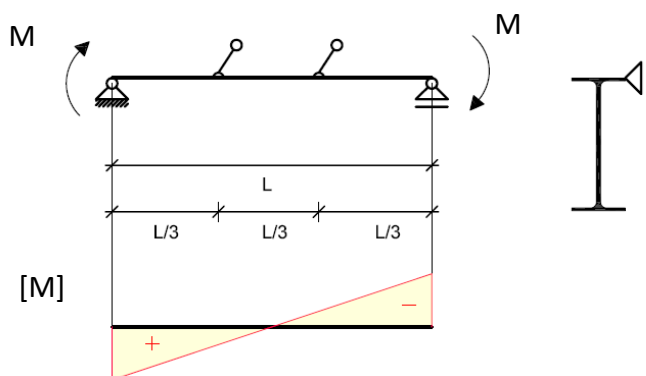
Die Abbildung 7-7 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem durchschlagendem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-6). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ ,

gegenübergestellt.

Die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier trotz der Zwischenhalterung mit  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der versagende Untergurt über die ganze Länge ungestützt ist.

System + Belastung: M



Eigenspannungen IPE 500:

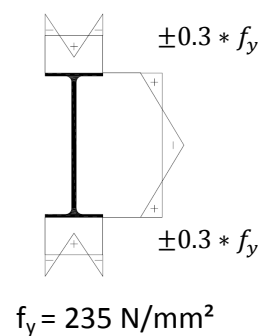


Abbildung 7-6: System und Belastung

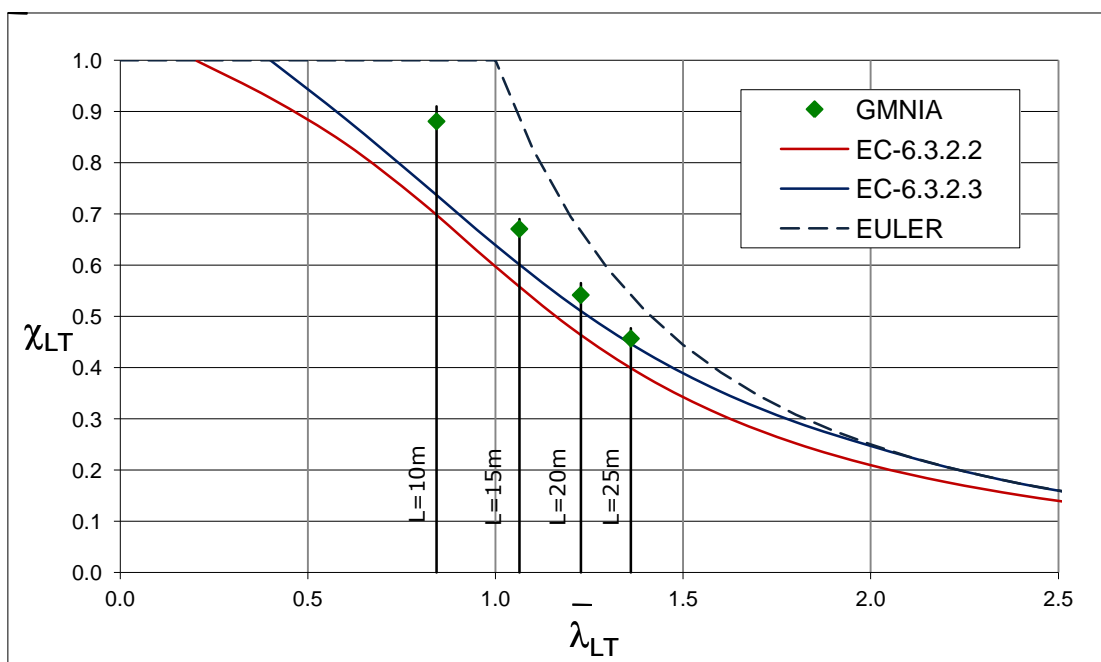


Abbildung 7-7: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

Wird die Knickspannungslinie gemäß Eurocode 6.3.2.3 (Nachweis N2) nicht modifiziert, so liegen beide Knickspannungslinien auf der sicheren Seite.

Auf Grund des in Kapitel 1 beschriebenen Tragverhaltens liegt es nahe, da der Untergurt versagt, eine Modifikation bezogen auf die Gesamtlänge durchzuführen, also für den Momentenverlauf  $\psi = -1$ , was zu einem Momentenbeiwert  $k_c = 0,6$  führt.

Die Abbildung 7-8 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem durchschlagendem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 7-6). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden wieder den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 0,6$  zufolge  $\psi = -1$

gegenübergestellt.

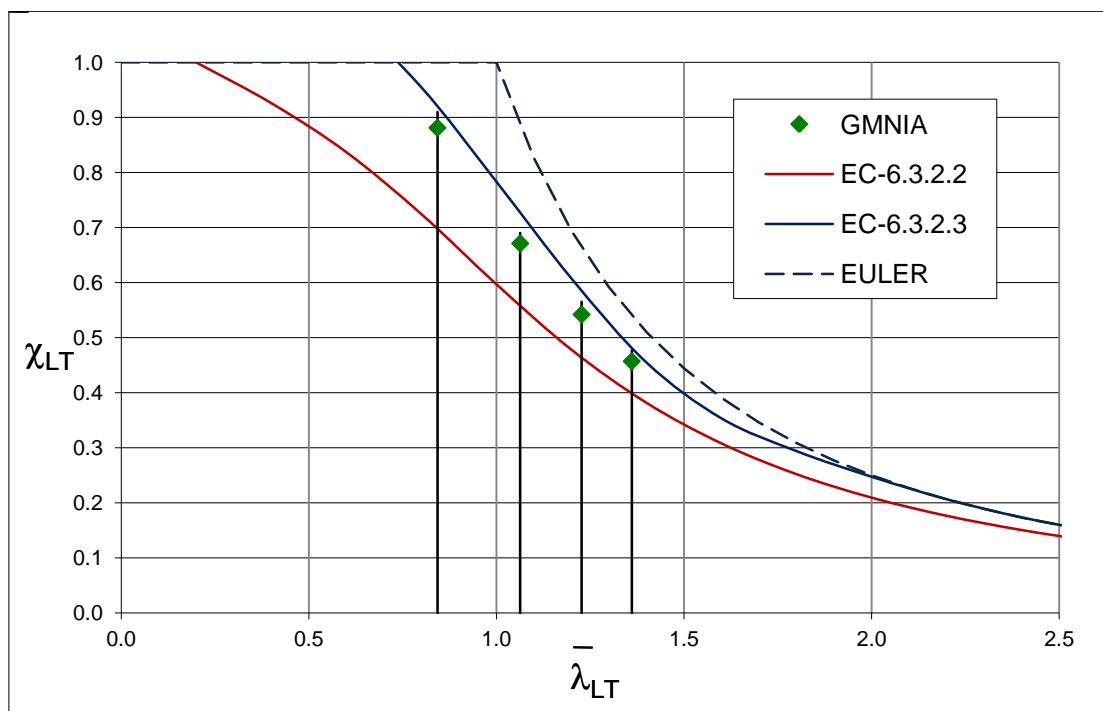


Abbildung 7-8: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )  $k_c = 0,6$  berücksichtigt)

Man sieht, dass die Ergebnisse der modifizierten Biegedrillknickspannungslinie nun auf der unsicheren Seite liegen. Allerdings ist dies auch beim Nachweis für Träger ohne Halterung bis zu einer bezogenen Schlankheit von 1,45 der Fall (siehe Abbildung 5-6).



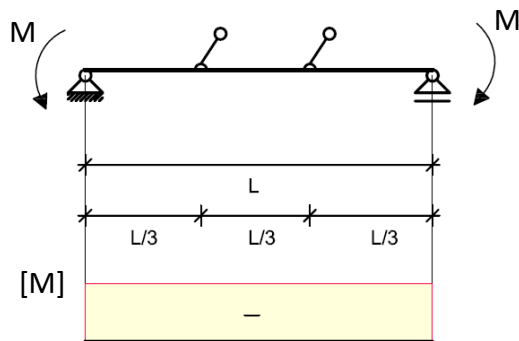
**(d) Negatives konstantes Moment**

Die Abbildung 7-10 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem negativem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-9). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) gegenübergestellt.

Die Vorverformung für die GMNIA wurde hier trotz der Zwischenhalterung mit  $L/1000$  eingesetzt, da der versagende Untergurt über die volle Länge ungestützt ist.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

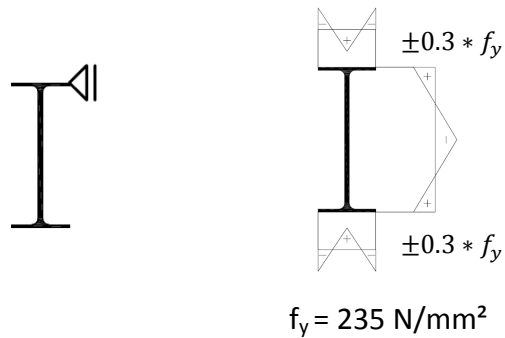


Abbildung 7-9: System und Belastung

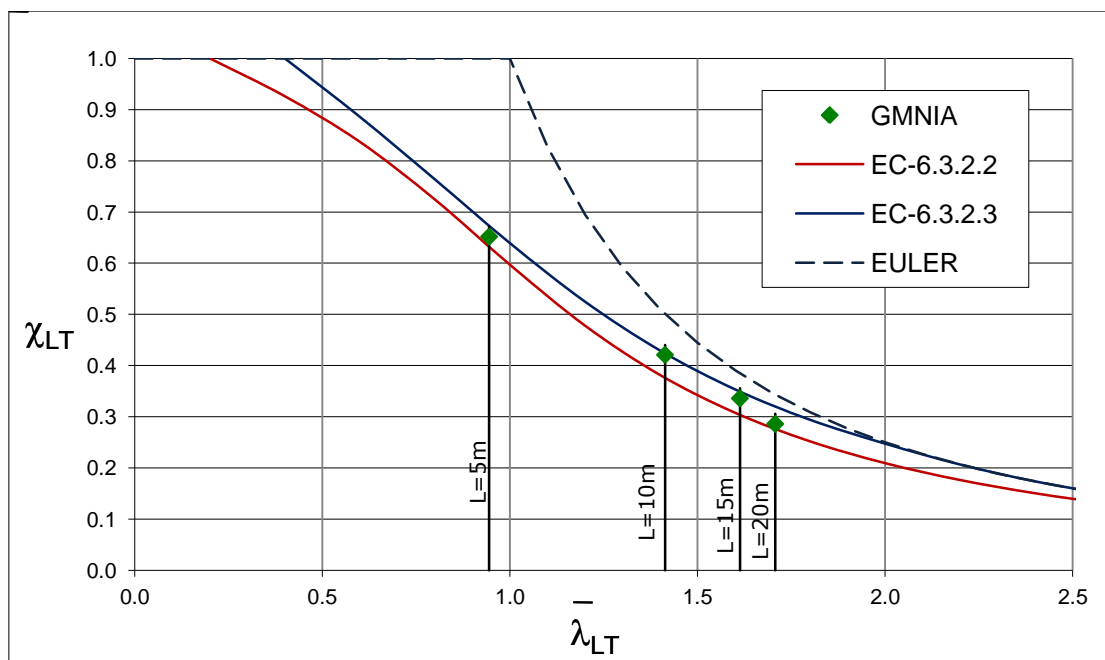


Abbildung 7-10: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf)

**(e) Negatives dreiecksförmiges Moment ( $\psi = 0$ )**

Die Abbildung 7-12 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit negativem dreiecksförmigen Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-11 ). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
  - N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ) und dem Korrekturbeiwert der Momentenverteilung  $k_c = 0,75$
- gegenübergestellt.

Die Vorverformung für die GMNIA wurde hier trotz der Zwischenhalterung mit  $L/1000$  eingesetzt, da der versagende Untergurt über die volle Länge ungestützt ist.

System + Belastung:

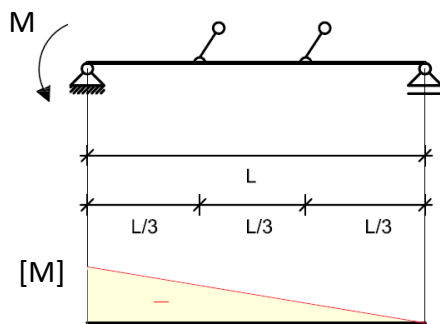
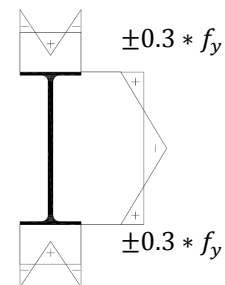


Abbildung 7-11: System und Belastung

Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

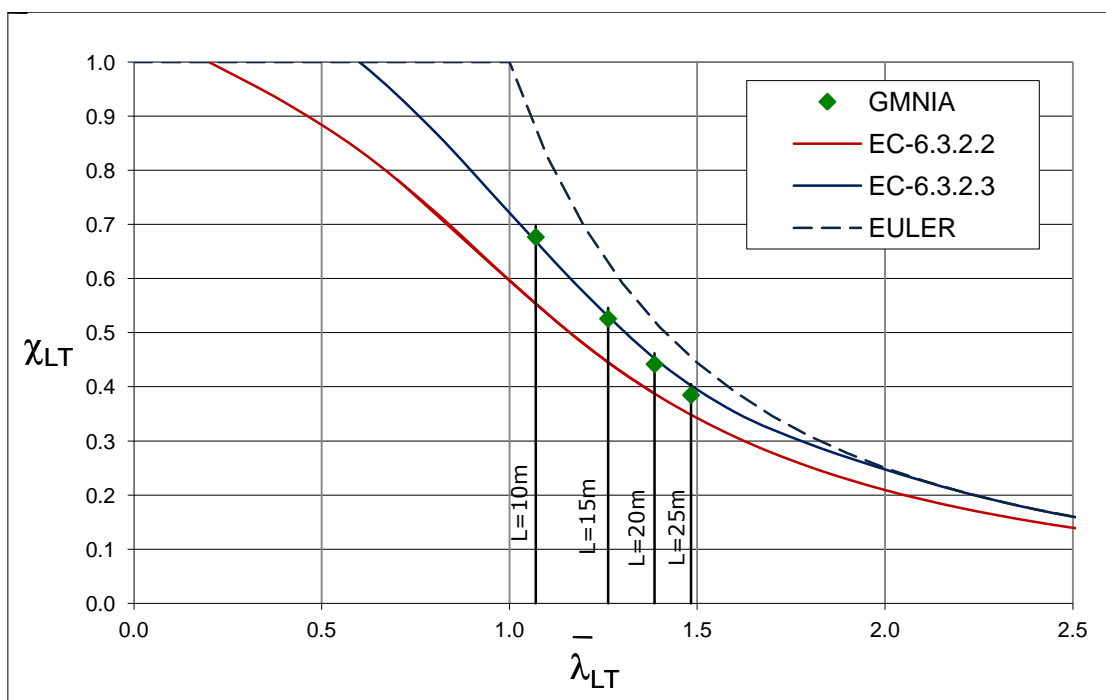


Abbildung 7-12: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; negativer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))

### 7.3. Parabolische Momentenverläufe

#### (a) Tragverhalten bei Querlast und parabolischem Momentenverlauf (0/1/0)

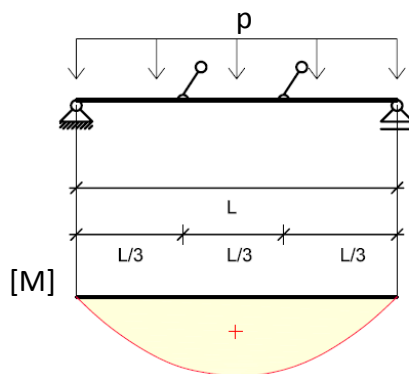
Die Abbildung 7-14 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-13). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
- N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ ,

gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

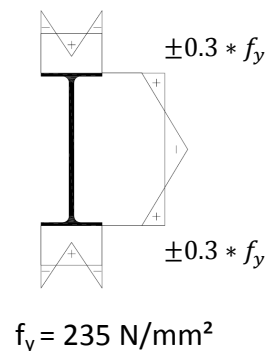


Abbildung 7-13: System und Belastung

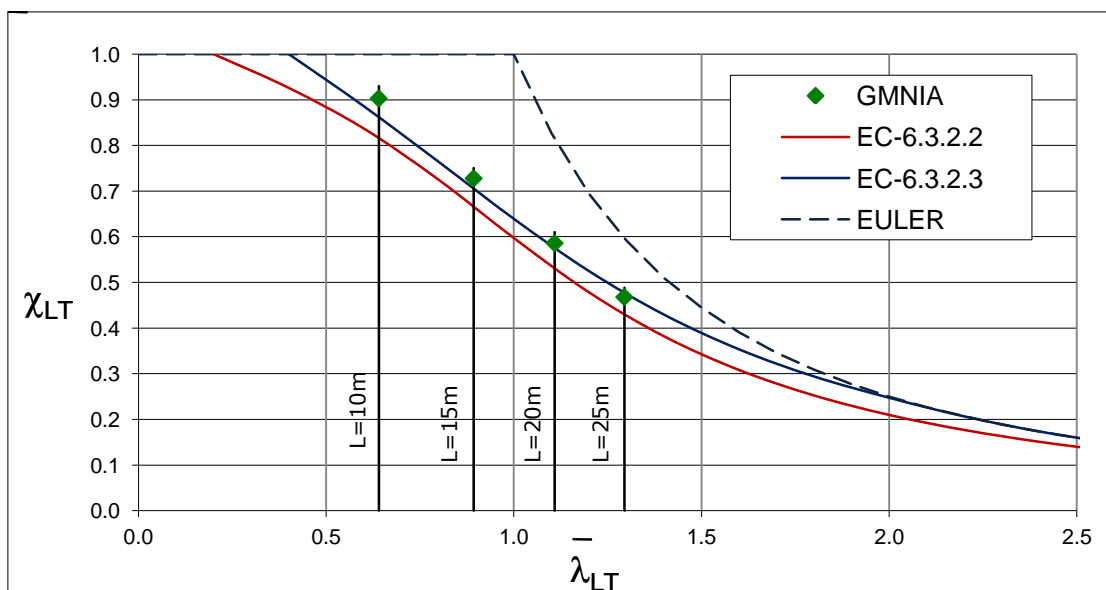


Abbildung 7-14: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolischer Momentenverlauf (0/1/0))

**(b) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1)**

Die Abbildung 7-16 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem Momentenverlauf und Randmomenten und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-15). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
  - N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ ,
- gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:

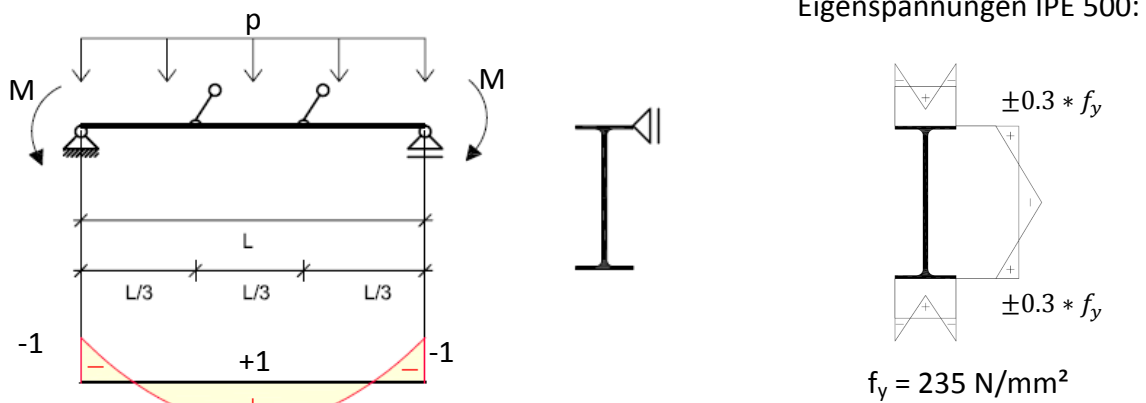


Abbildung 7-15: System und Belastung

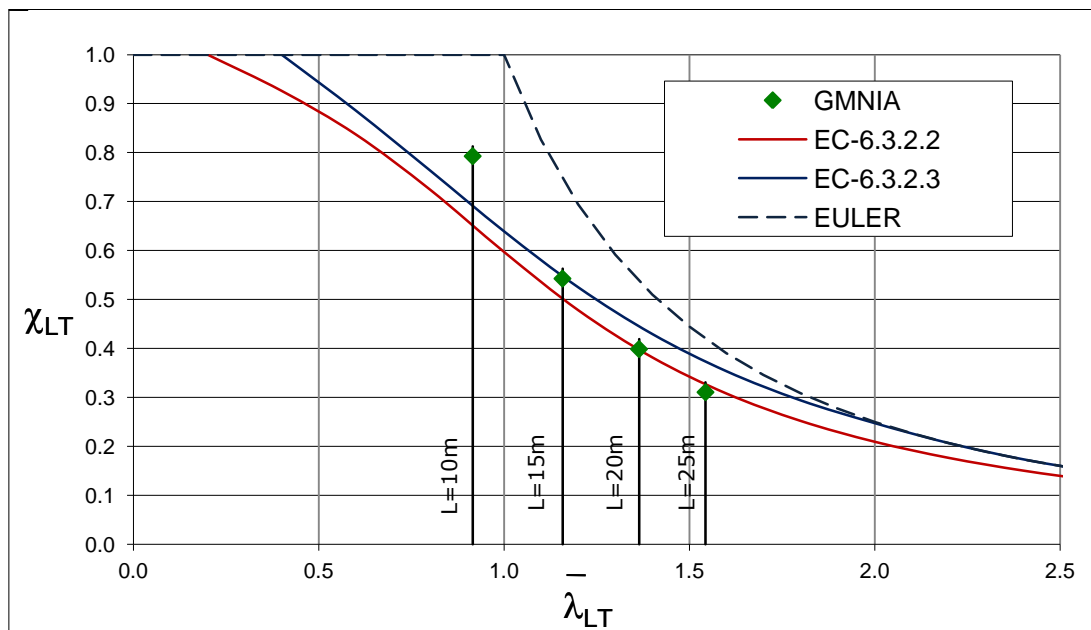


Abbildung 7-16: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/1/-1))

**(c) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1)**

Die Abbildung 7-18 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem Momentenverlauf und Randmomenten und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-17). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
  - N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ ,
- gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der versagende Untergurt die gesamte Länge aufweist.

# System + Belastung:

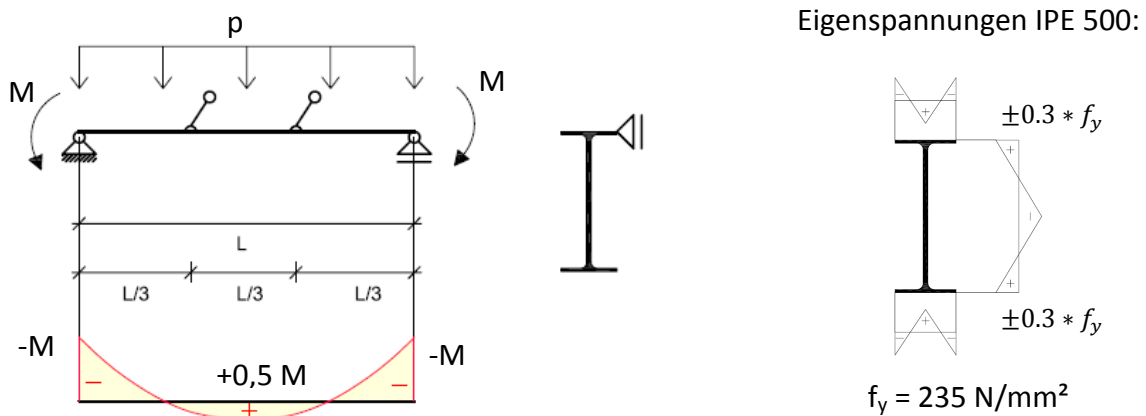


Abbildung 7-17: System und Belastung

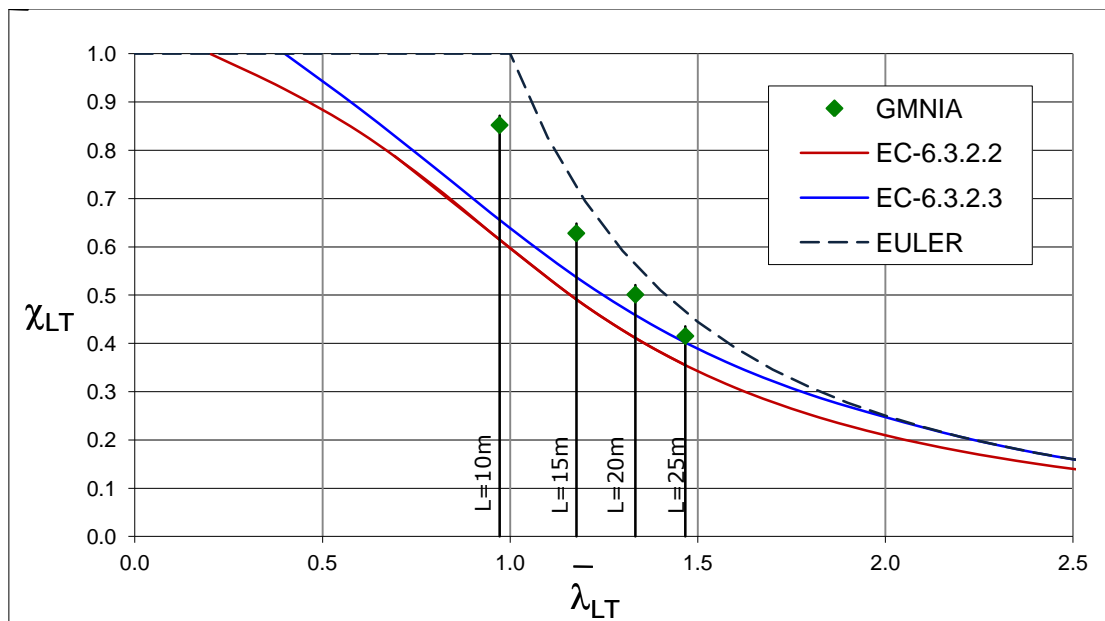


Abbildung 7-18: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/0,5/-1))

**(d) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolischem Momentenverlauf (-1/0/-1)**

Die Abbildung 7-20 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem Momentenverlauf und Randmomenten und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 7-19). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden den Nachweisen

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und
  - N2 mit der Biegedrillknickspannungslinie c (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,49$ ), jedoch dem Momentenbeiwert  $k_c = 1$ ,
- gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/1000$  bezogen auf die gesamte Länge eingesetzt, da der versagende Untergurt über die volle Länge ungestützt ist.

System + Belastung:

Eigenspannungen IPE 500:

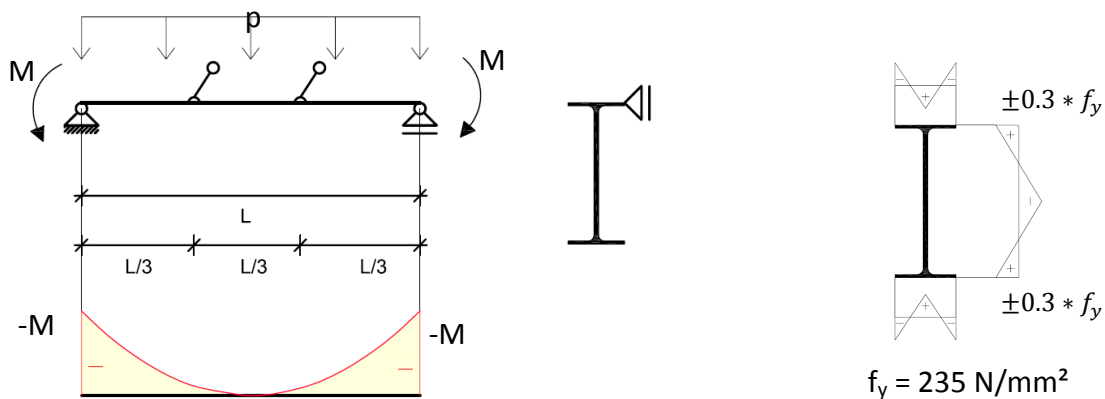


Abbildung 7-19: System und Belastung

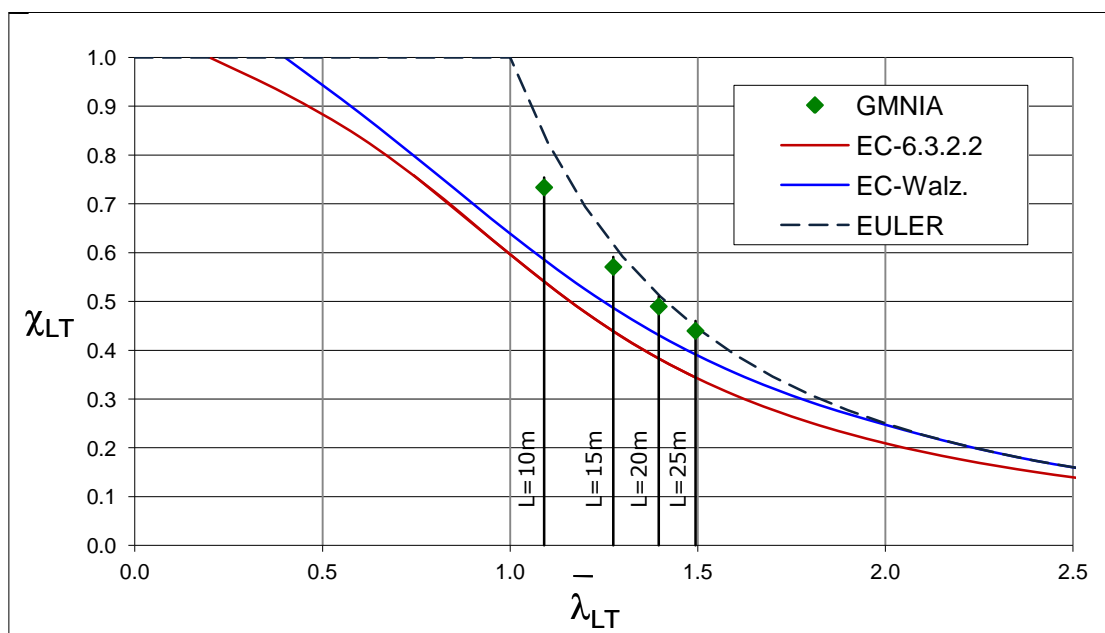


Abbildung 7-20: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1))

## 7.4. Zusammenfassung der dargestellten Berechnungen

Wie bereits erwähnt, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der GMNIA-Analysen für Träger mit zwei äquidistanten zusätzlichen Zwischenhalterungen am Obergurt mit den Nachweismethoden N1 (EC3 Kapitel 3.2.3.2) und N2 (EC3 Kapitel 3.2.3.3), die ja eigentlich für Träger ohne Zwischenhalterung gelten, verglichen. Dabei werden die numerisch gerechneten idealen Kippmomente für die tatsächlich vorliegenden Zwischenhalterungen als Basis für die Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$  zugrunde gelegt.

Für die Biegedrillknicklinien gemäß Nachweis N2 wurden für den unterschiedlichen Moment keine Modifikationen berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.3 –  $\chi_{LT,mod}$  anstatt  $\chi_{LT}$ ) Dies deshalb, da sich die  $k_c$ -Werte des Gesamtsystems nicht mit den  $k_c$ -Werten des Gurtes zwischen den Halterungen decken (unterschiedliche Momentenverläufe).

Nur bei negativem linearem Momentenverlauf wurde die Modifikation vorgenommen, da der Druckgurt mit und ohne Halterungen annähernd das gleiche Tragverhalten aufweist.

Die dargestellten Vergleiche zeigen, dass die allgemeinen Biegedrillknickspannungslinien (Nachweis N2) außer für lange Träger mit durchschlagendem parabolischem Momentenverlauf mit gleich großem Stützmoment wie Feldmoment (-1/1/-1) durchgehend konservative Ergebnisse liefern.

**Hervorzuheben ist jedoch, dass außer für rein negative Momentenverläufe (Druckgurt nicht zusätzlich gehalten) nicht die günstigen  $k_c$ -Werte für den Gesamtstab anwendbar sind, da dadurch teilweise die Tragfähigkeit überschätzt werden würde.**

Die Verwendung der Knickspannungslinie für zentrischen Druck – entsprechend Nachweis N1 – liefert demgegenüber mitunter deutlich konservativere Ergebnisse.

## 8. Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit Biegedrillknicklinien nach Taras/Greiner

### 8.1. Methode nach Taras/Greiner

Am Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz wurden von Prof. Dr. Richard Greiner und Dr. Andreas Taras neue Biegedrillknickspannungslinien entwickelt, die zukünftig eventuell das Kapitel 6.3.2.3 des Eurocodes ersetzen sollen (Nachweis N2). Es ist daher von großem Interesse zu wissen, inwieweit diese Linien auch für Träger mit Halterungen an nur einem Gurt anwendbar sind.

Die Formel für diese neue Biegedrillknickspannungslinie sieht wie folgt aus.

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \varphi * \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT} \leq 1 \quad (8-1)$$

Dabei ist

$$\phi_{LT} = 0,5 * \left[ 1 + \varphi * \left( \alpha_S * \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_z - 0,2) \right) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

$$\alpha_S = \frac{\bar{\lambda}_{LT}^2}{\bar{\lambda}_z^2}$$

$\alpha_{LT}$  der Imperfektionsbeiwert für die maßgebende Biegedrillknicklinie laut Tabelle 4-1 [EC3 – Abschnitt – 6.3.2.2 Tabelle 6.3]. Die Zuordnung der verschiedenen Querschnitte zu den maßgebenden Biegedrillknicklinien kann mit Hilfe der Tabelle 4-2 [EC3 – Abschnitt – 6.3.2.2 Tabelle 6.4] erfolgen (siehe Kapitel 4.2.1).

$\varphi$  der Korrekturbeiwert für unterschiedliche Momentenverläufe laut Tabelle 8-1




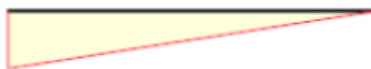
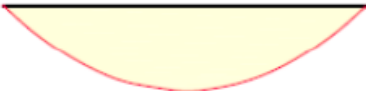

Momentenverteilung	$\varphi$
 <p style="text-align: center;"><math>\psi=1</math></p>	1
 <p style="text-align: center;"><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>	$1,25 - 0,1 * \psi - 0,15 * \psi^2$
	1.05
	$1,0 + 1,35 * \frac{M_0}{M_h} - 0,33 * \left(\frac{M_0}{M_h}\right)^3$

Tabelle 8-1: Korrekturbeiwerte  $\varphi$  für unterschiedliche Momentenverläufe

Diese neue Formel enthält nun auch die Schlankheit  $\bar{\lambda}_z$  für das Knicken um die vertikale Achse. Da es sich bei den hier betrachteten Trägern um an einem Gurt gehaltene Träger handelt, werden hier

- a) ein globaler Nachweis mit  $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf die Gesamtlänge und
- b) ein lokaler Nachweis mit  $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf den Abstand der Halterungen durchgeführt.

Des Weiteren werden auch die  $\varphi$ -Werte auf die jeweils zugehörigen lokal beziehungsweise global vorherrschenden Momentenverläufe bezogen.

Die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_{LT}$  wurde in beiden Fällen mittels einer linearen Eigenwertanalyse des tatsächlichen Systems berechnet (ideales Kippmoment  $M_{cr}$ ).

## 8.2. Lineare Momentenverläufe

### (a) Konstantes positives Moment

Die Abbildung 8-2 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem positivem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-1). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

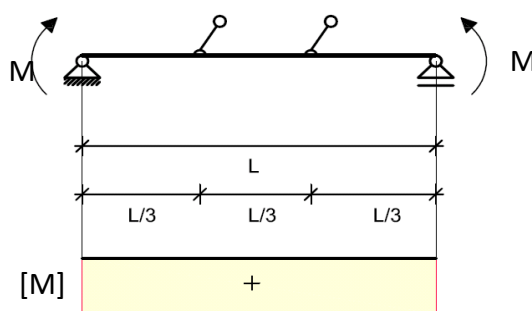
- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )

gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1$  (lokal)  
 $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$   
 $\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1$  (global)  
 $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$   
 $\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE500:

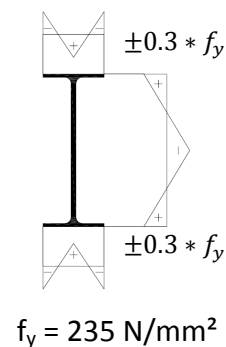


Abbildung 8-1: System und Belastung

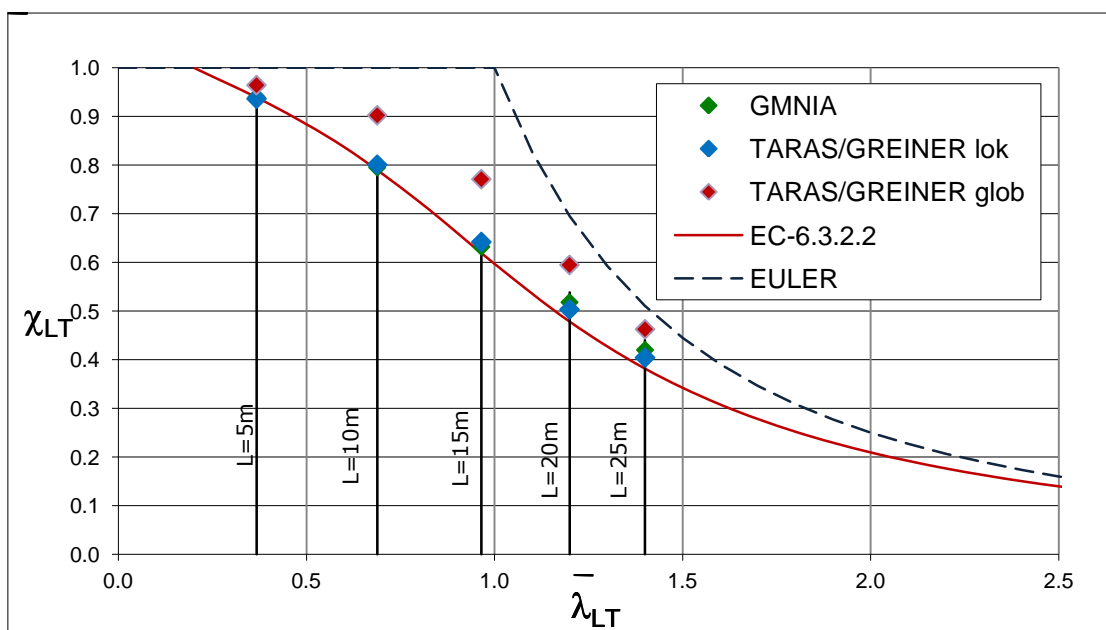


Abbildung 8-2: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf)

**(b) Positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )**

Die Abbildung 8-4 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit positivem dreiecksförmigem Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-3). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
  - lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )
- gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1,12$  (lokal)

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,25$  (global)

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

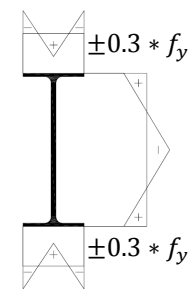
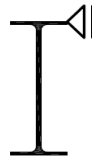
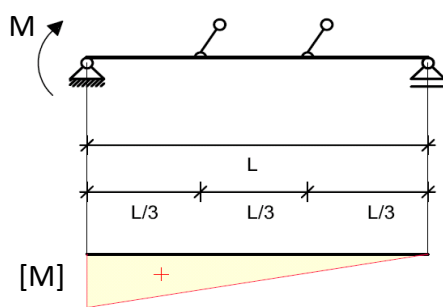
$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:

Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-3: System und Belastung

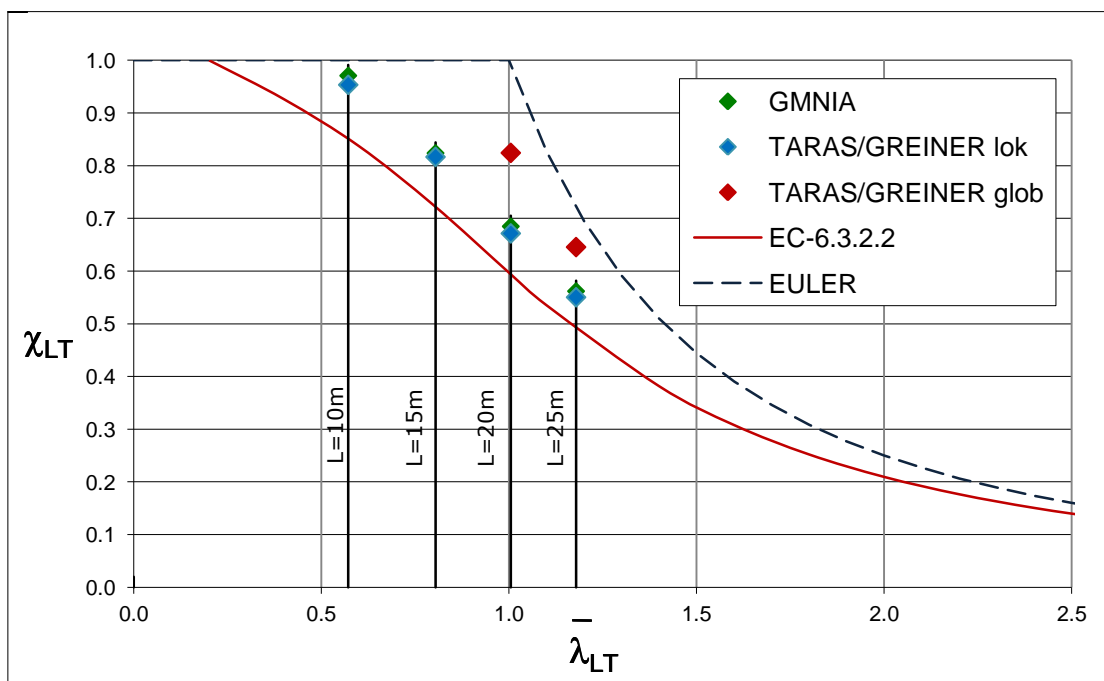


Abbildung 8-4: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))

**(c) Linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )**

Die Abbildung 8-6 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem durchschlagendem Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-5). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
  - lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )
- gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1,2$  (lokal)

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

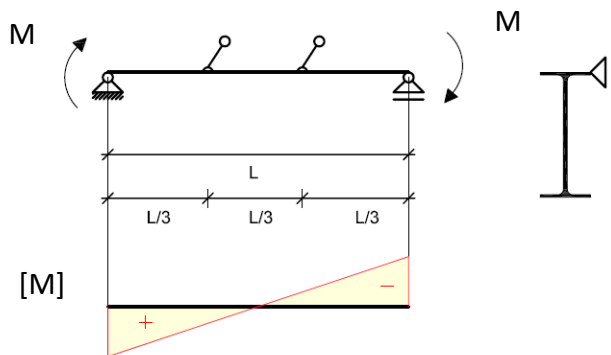
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,2$  (global)

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung: M



Eigenspannungen IPE 500:

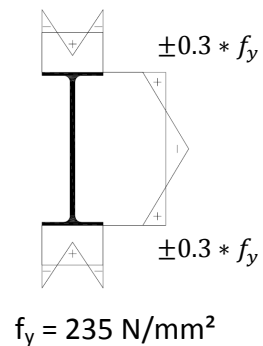


Abbildung 8-5: System und Belastung

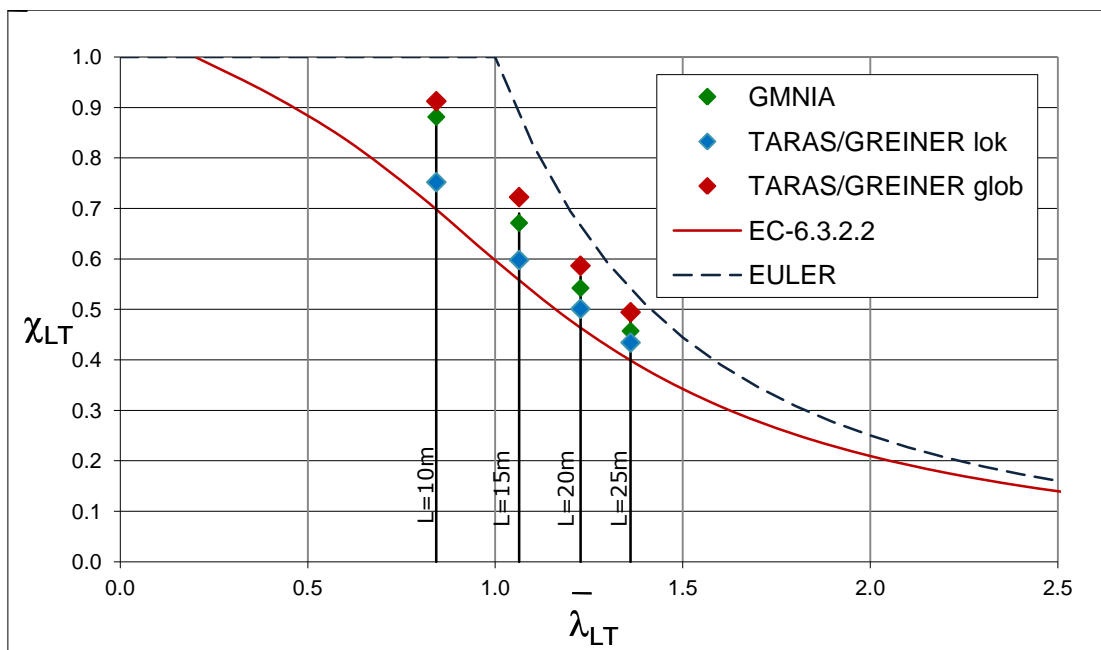


Abbildung 8-6: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

**(d) Konstantes negatives Moment**

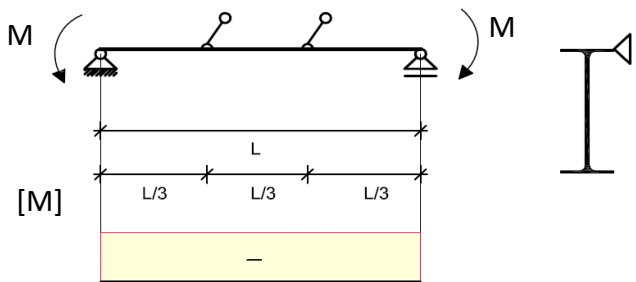
Die Abbildung 8-8 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem positiven Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-7). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) gegenübergestellt.

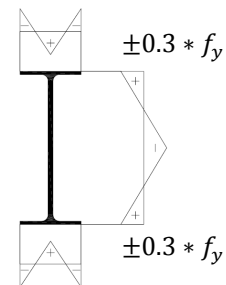
lokaler Nachweis:  $\varphi = 1$  (lokal)  
 $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$   
 $\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1$  (global)  
 $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$   
 $\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenstressungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-7: System und Belastung

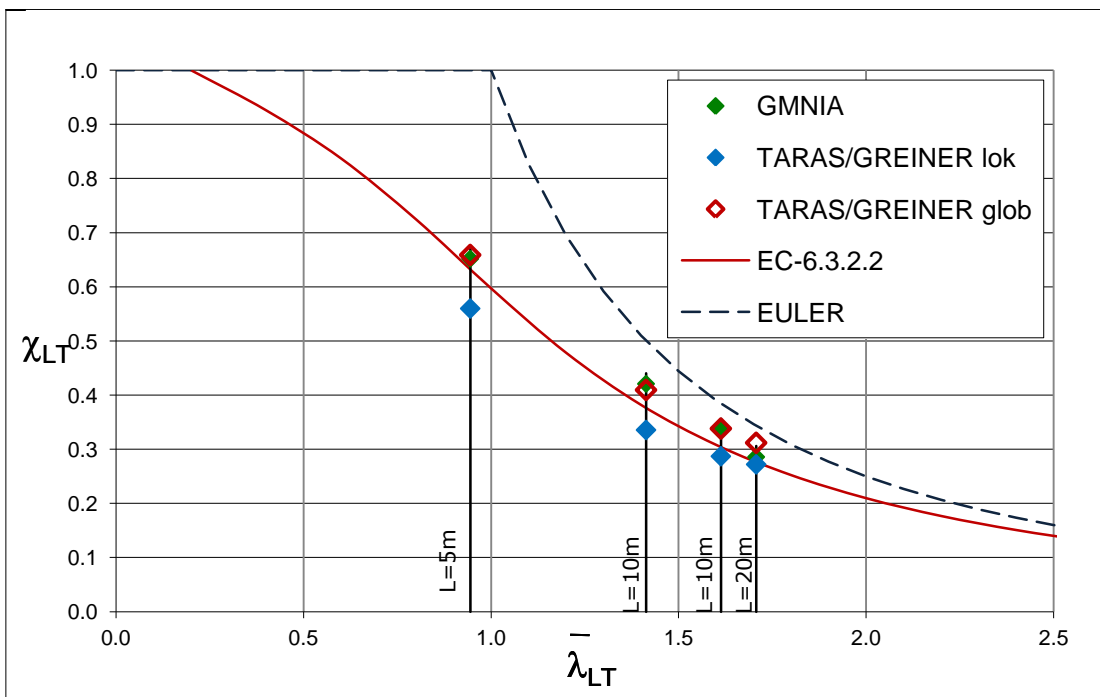


Abbildung 8-8: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf)

**(e) Negative dreiecksförmige Momente ( $\psi = 0$ )**

Die Abbildung 8-10 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem positivem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-9). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1,12$  (lokal)

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

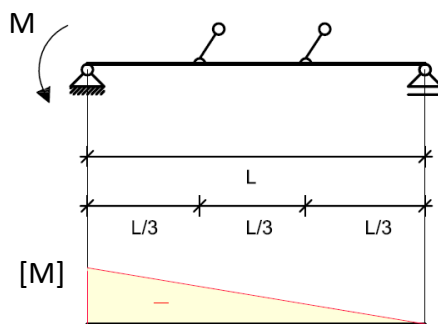
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,25$  (global)

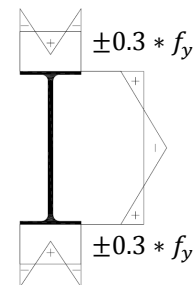
$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-9: System und Belastung

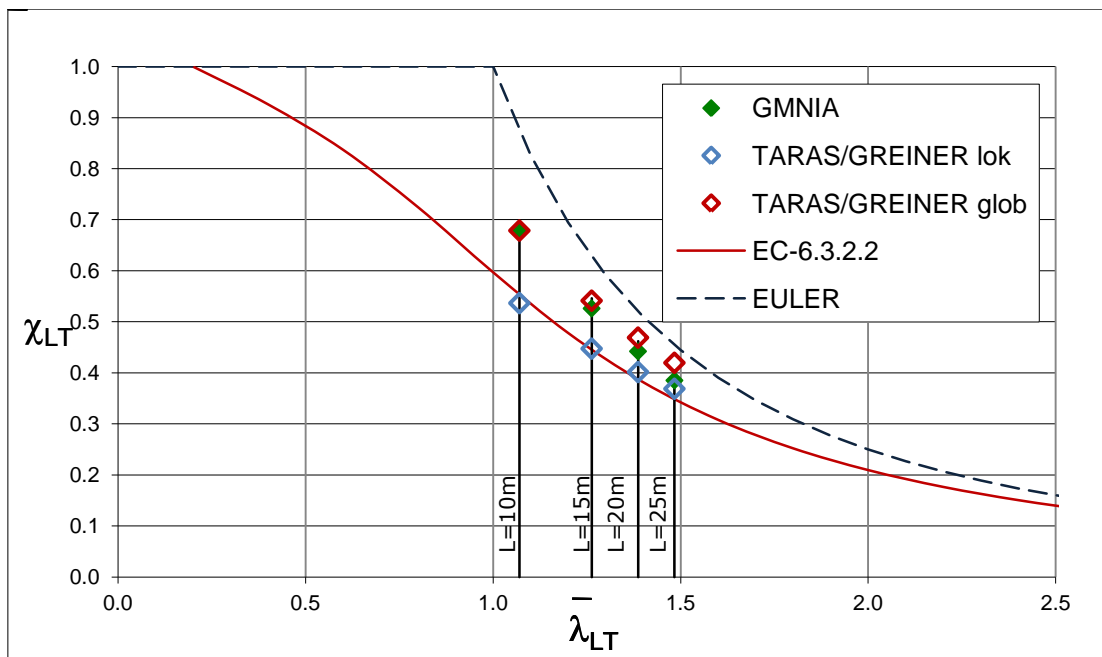


Abbildung 8-10: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))

### 8.3. Parabolische Momentenverläufe

#### (a) Tragverhalten bei Querlast und parabolischem Momentenverlauf (0/1/0)

Die Abbildung 8-12 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem positivem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 8-11). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
  - lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )
- gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1,05$

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

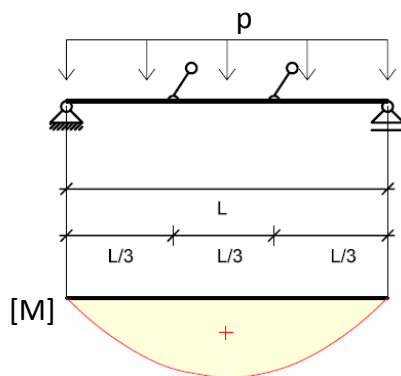
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,05$

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

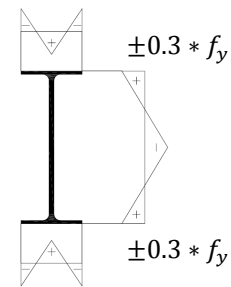


Abbildung 8-11: System und Belastung

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

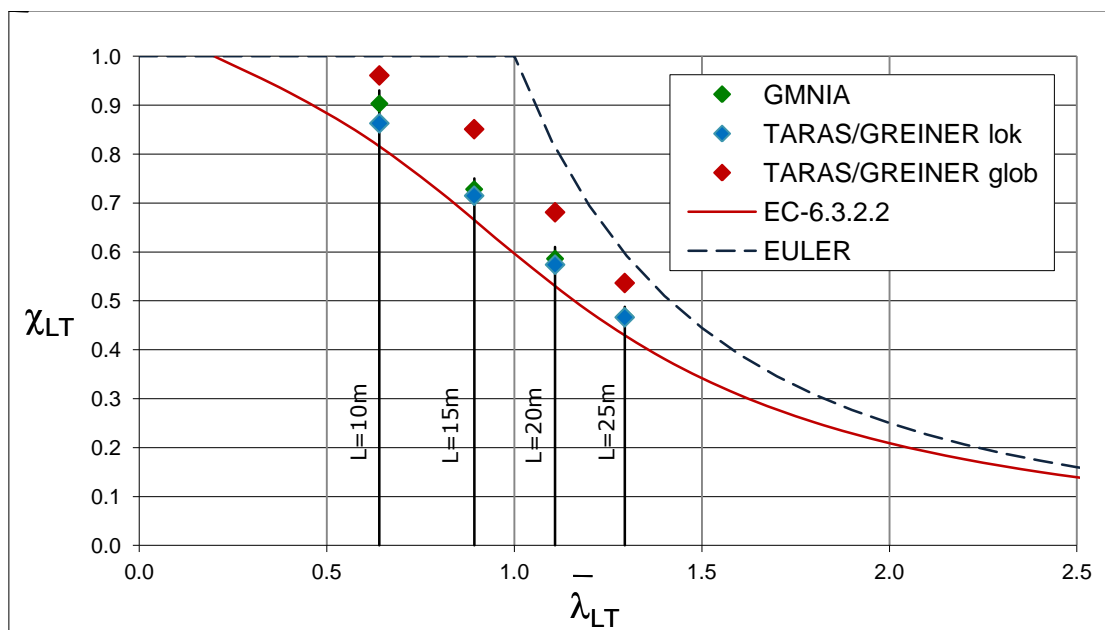


Abbildung 8-12: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (0/1/0))

**(b) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1)**

Die Abbildung 8-14 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-13). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1$

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf L/3

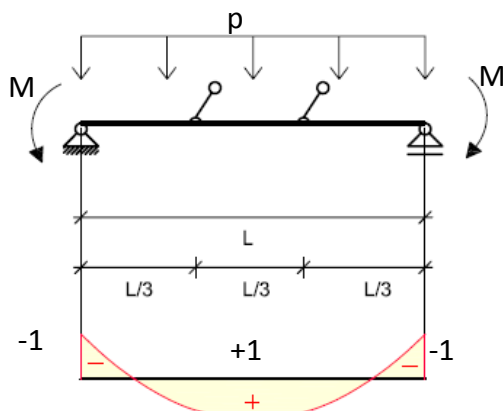
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,06$

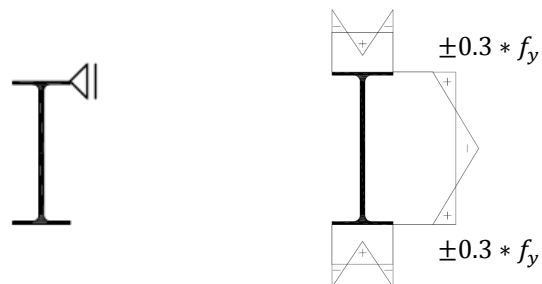
$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf L

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-13: System und Belastung

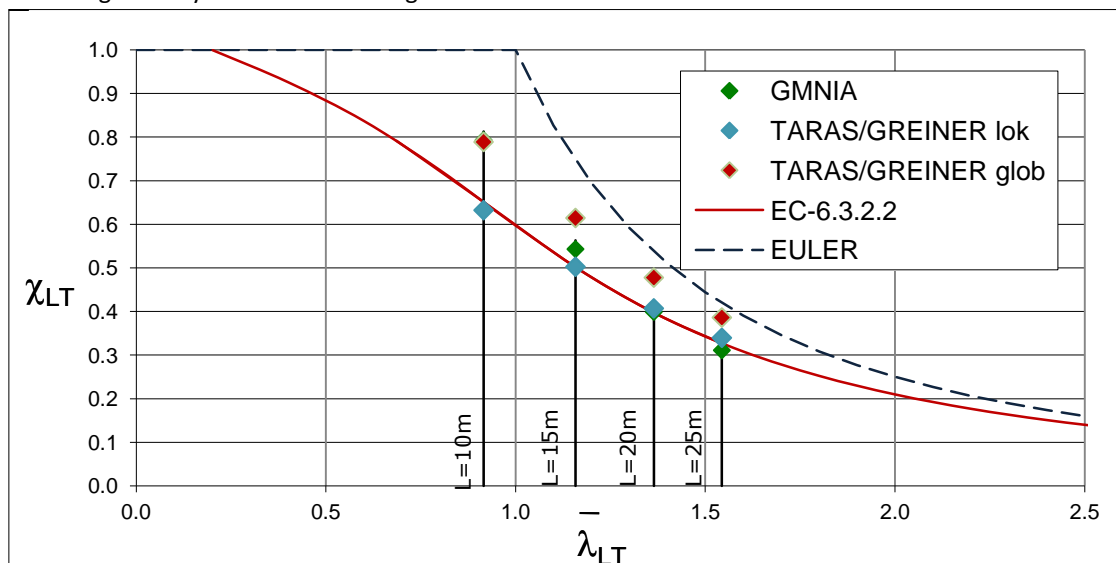


Abbildung 8-14: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/1/-1))



**(c) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1)**

Die Abbildung 8-16 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 8-15). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1$

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

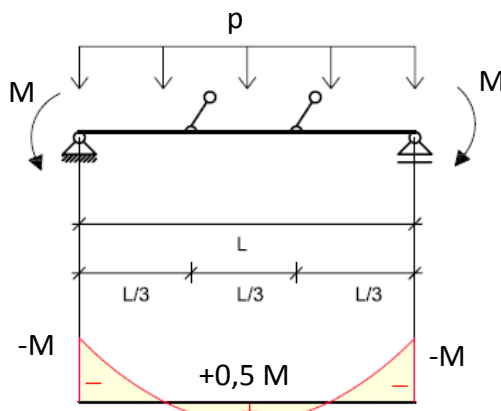
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 1,9$

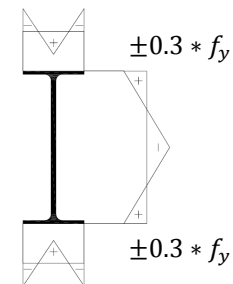
$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-15: System und Belastung

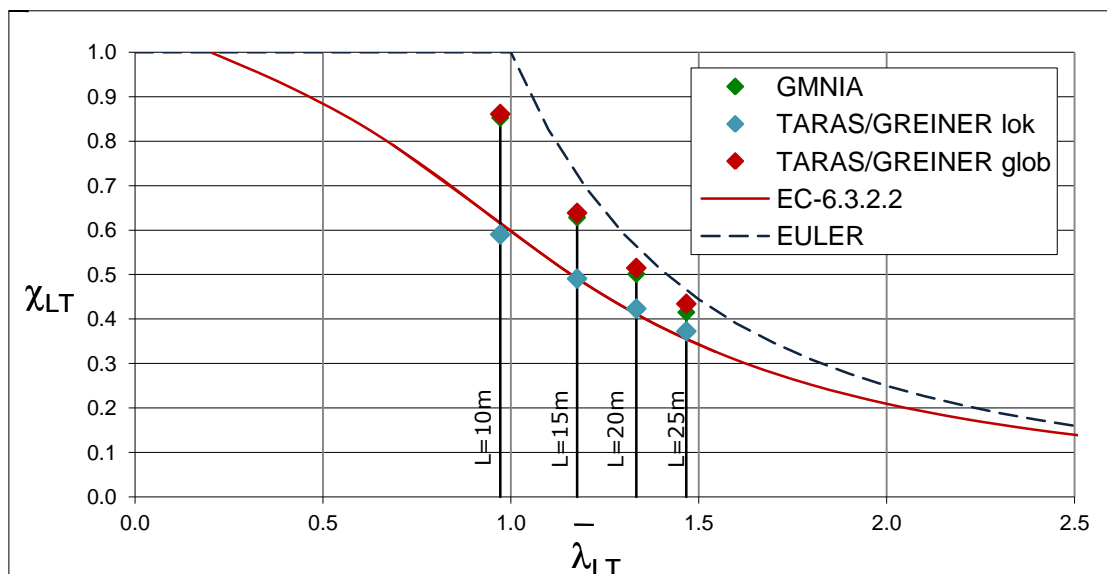


Abbildung 8-16: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/0,5/-1))

**(d) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolischem Momentenverlauf (-1/0/-1)**

Die Abbildung 8-18 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem negativem Momentenverlauf (-1/0/-1) und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 8-17). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und den
- lokalen und globalen Nachweisen nach Taras/Greiner mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) gegenübergestellt.

lokaler Nachweis:  $\varphi = 1$

$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L/3$

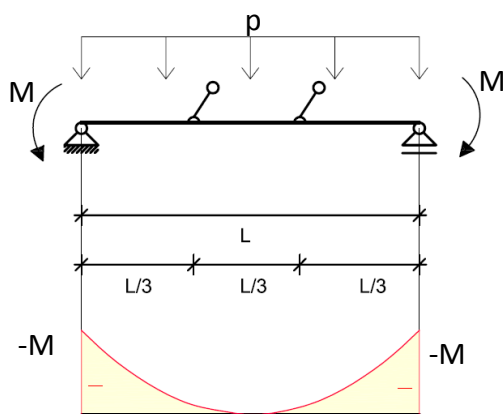
$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

globaler Nachweis:  $\varphi = 2,2$

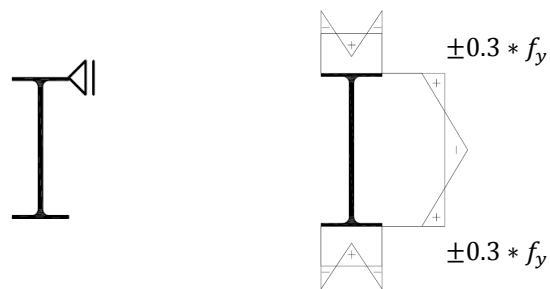
$\bar{\lambda}_z$  bezogen auf  $L$

$\bar{\lambda}_{LT}$  ABAQUS

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

Abbildung 8-17: System und Belastung

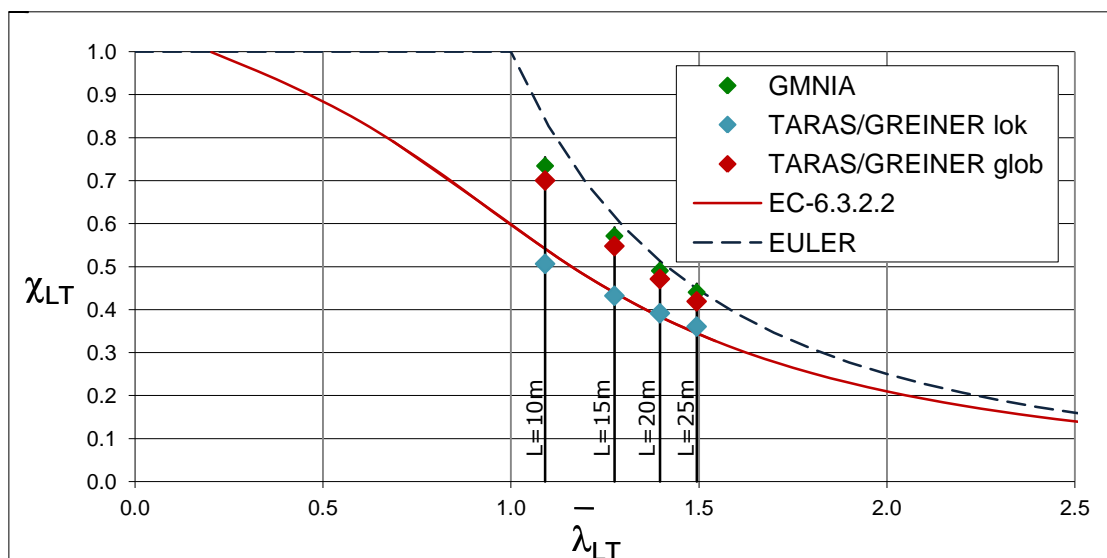


Abbildung 8-18: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1))

## 8.4. Zusammenfassende Beurteilung

Bei **rein positiven Momentenverläufen** stimmen die Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen gut mit den **lokalen Nachweisen** überein. Die globalen Nachweisführungen liegen auf der unsicheren Seite.

Für **rein negative Momentenverläufe** kann der **globale Nachweis** herangezogen werden. Hervorzuheben ist, dass für rein negative Momentenverläufe der lokale Nachweis viel zu konservative Ergebnisse liefert und daher nicht zu führen ist.

Für diese beiden Fälle kann auch ohne Berechnungen eine klare Aussage getroffen werden, ob der Obergurt oder der Untergurt für die Gesamttragfähigkeit maßgebend ist. Demnach kann auch die Wahl des Nachweises begründet werden.

Problematisch ist es jedoch bei durchschlagenden Momentenverläufen. In diesen Fällen liegen die Ergebnisse der GMNIA-Analyse zwischen dem lokalen und dem globalen Nachweis. Bei geringerem positivem Momentenanteil nähern sich die Ergebnisse dem globalen Nachweis. Bei einem durchschlagenden parabolischen Momentenverlauf mit dem Verhältnis des Feldmomentes zum Stützmoment ( $-1/0,5/-1$ , siehe Abbildung 8-15) entsprechen die Ergebnisse der GMNIA-Analyse annähernd dem globalen Nachweis.

Dies spiegelt das Tragverhalten von Trägern mit Halterungen an nur einem Gurt insofern wider, als dass bei durchgehend positiven oder negativen Momentenverläufen eindeutig ein Gurt auf Stabilität versagt, während hingegen bei durchschlagenden Momentenverläufen ein kombiniertes Versagen der beiden Gurte auftritt.

## **9. Vergleich der GMNIA-Ergebnisse mit Biegedrillknicklinien nach neuem Vorschlag Tappauf**

### **9.1. Grundlegende Überlegungen**

In diesem Kapitel möchte ich einen eigenen Vorschlag einbringen. Für eine reale Beurteilung müssen allerdings die linearen und parabolischen Momentenverläufe getrennt betrachtet werden.

In den folgenden Kapiteln werden sehr einfach anwendbare Biegedrillknicklinien für die einzelnen Momentenverläufe dargestellt. In Kapitel 9.2 finden sich die Biegeknickspannungslinien für lineare, in Kapitel 9.3 für parabolische Biegedrillknickspannungsverläufe.

## 9.2. Lineare Momentenverläufe

Für lineare Momentenverläufe werden die Biegedrillknickspannungslinien wie folgt berechnet. Der Index „2rest“ steht dabei für zwei äquidistante Halterungen an nur einem Gurt (2 restraint).

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta_{2,rest} \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \left\{ \begin{array}{l} \chi_{LT} \leq 1 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{array} \right. \quad (9-1)$$

Dabei ist

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0;2rest}) + \beta_{2rest} \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

$\alpha_{LT}$  der Imperfektionsbeiwert für die maßgebende Biegedrillnicklinie. Für den Querschnitt IPE 500 wird  $\alpha_{LT}$  laut Tabelle 4-1 [EC3 – Abschnitt - 6.3.2.2 Tabelle 6.3] berücksichtigt. Die Zuordnung des Querschnittes IPE 500 zu den maßgebenden Biegedrillknicklinien erfolgt mit Hilfe der Tabelle 4-2 [EC3 – Abschnitt – 6.3.2.2 Tabelle 6.4](siehe Kapitel 4.2.1).

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_{pl}}{M_{cr}}}$$

$M_{cr}$  das ideale Biegedrillknickmoment für das tatsächliche System mit Zwischenhalterungen an einem Gurt

$$\bar{\lambda}_{LT,0;2rest.} = 0,2$$

$$\beta_{2rest.} = 0,9$$

Um den positiven Effekt von nicht konstanten Momentenverläufen berücksichtigen zu können, werden die Abminderungsfaktoren  $\chi_{LT}$  wie folgt modifiziert.

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \text{jedoch} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1 \quad (9-2)$$

Dabei ist

$$f = 1 - 0,5 * (1 - k_{c,2rest.}) * [1 - 2,0 * (\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2]$$

$$k_{c,2rest.} = k_c + 0,05 \quad \text{jedoch} \quad k_{c,2rest.} \leq 1$$

$k_c$  der Korrekturbeiwert für unterschiedliche Momentenverläufe laut Tabelle 4-4. Hier gilt immer der Momentenverlauf am Gesamtstab.



Momentenverteilung	$k_c$
 $\psi = 1$	1,0
 $-1 \leq \psi \leq 1$	$\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$

Tabelle 4-4 [6.6]: Empfohlene Korrekturbeiwerte  $k_c$

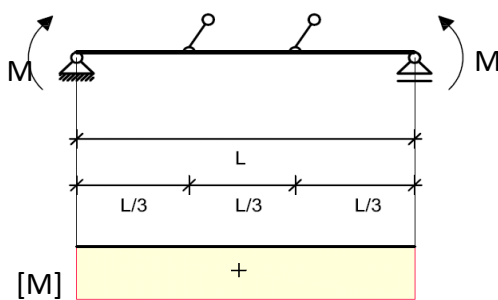
**(a) Konstantes positives Moment**

Die Abbildung 9-2 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit konstantem positivem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-1). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-1) und Formel (9-2) mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem Momentenbeiwert  $k_{c,2rest} = 1$  gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

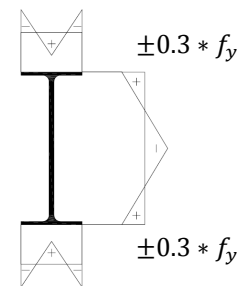


Abbildung 9-1: System und Belastung

$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

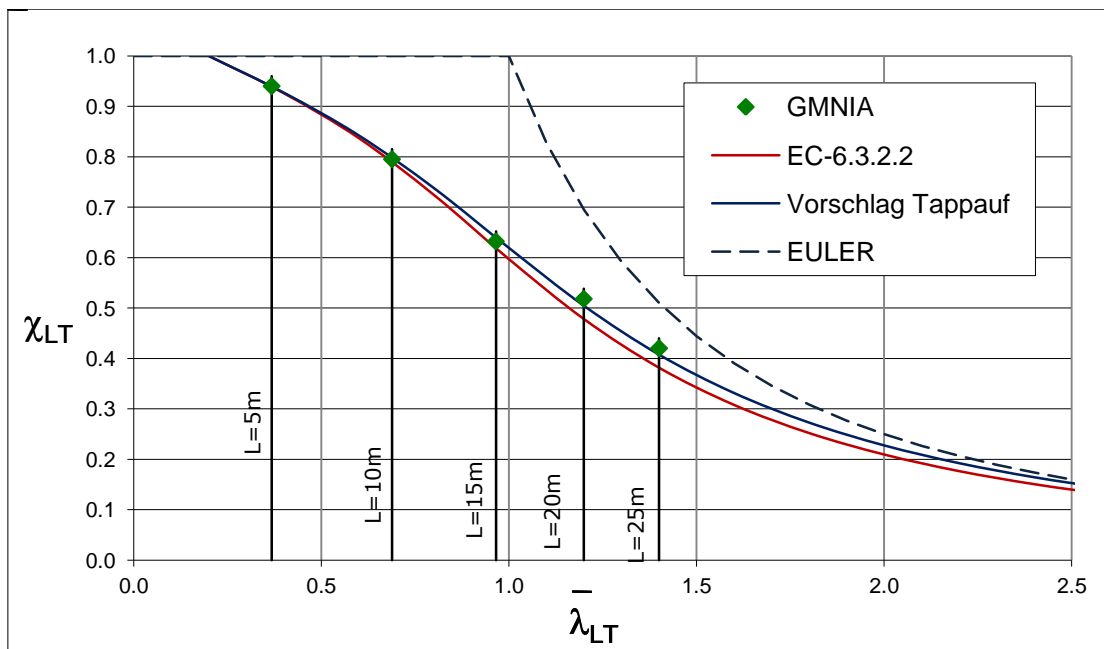


Abbildung 9-2: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf)

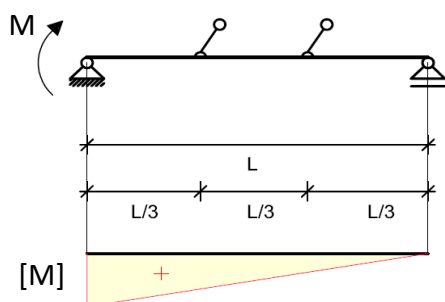
**(b) Positives dreiecksförmiges Moment ( $\psi = 0$ )**

Die Abbildung 9-4 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit positivem dreiecksförmigem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (siehe Abbildung 9-3). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-1) und Formel (9-2) mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem Momentenbeiwert  $k_{c,2rest} = 0,8$  gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

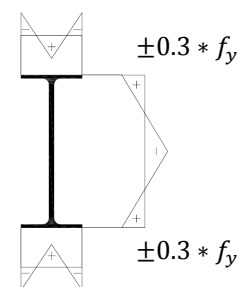


Abbildung 9-3: System und Belastung

$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$

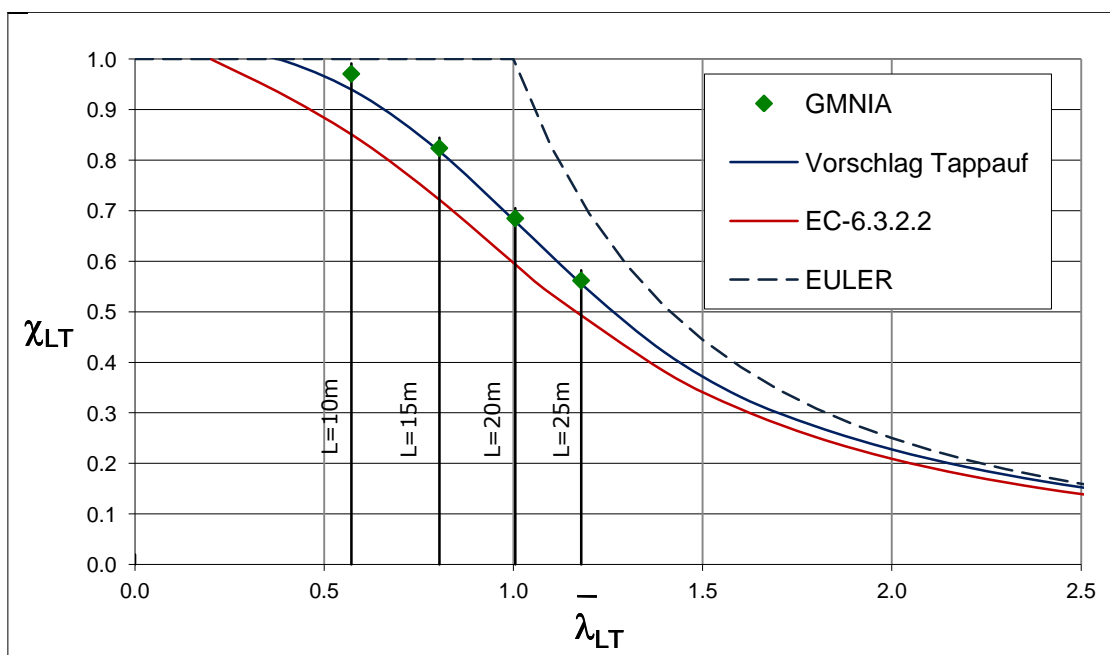


Abbildung 9-4: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ ))



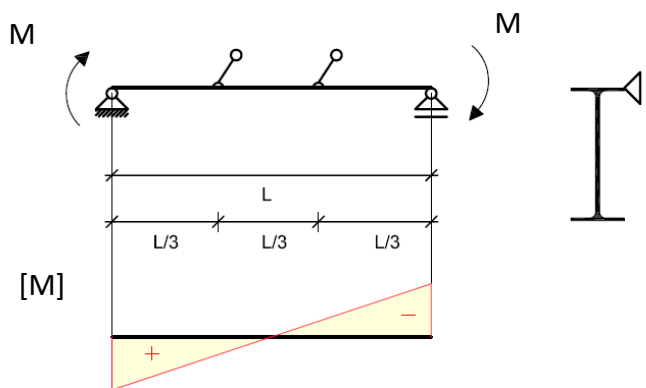
**(c) Linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )**

Die Abbildung 9-6 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit linearem durchschlagendem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-5). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-1) und Formel (9-2) mit der Biegedrillknickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem Momentenbeiwert  $k_{c,2rest} = 0,65$  gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung: M



Eigenspannungen IPE 500:

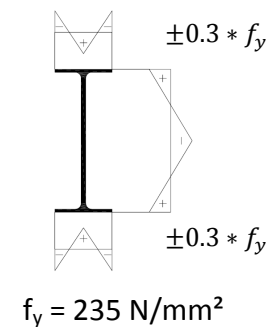


Abbildung 9-5: System und Belastung

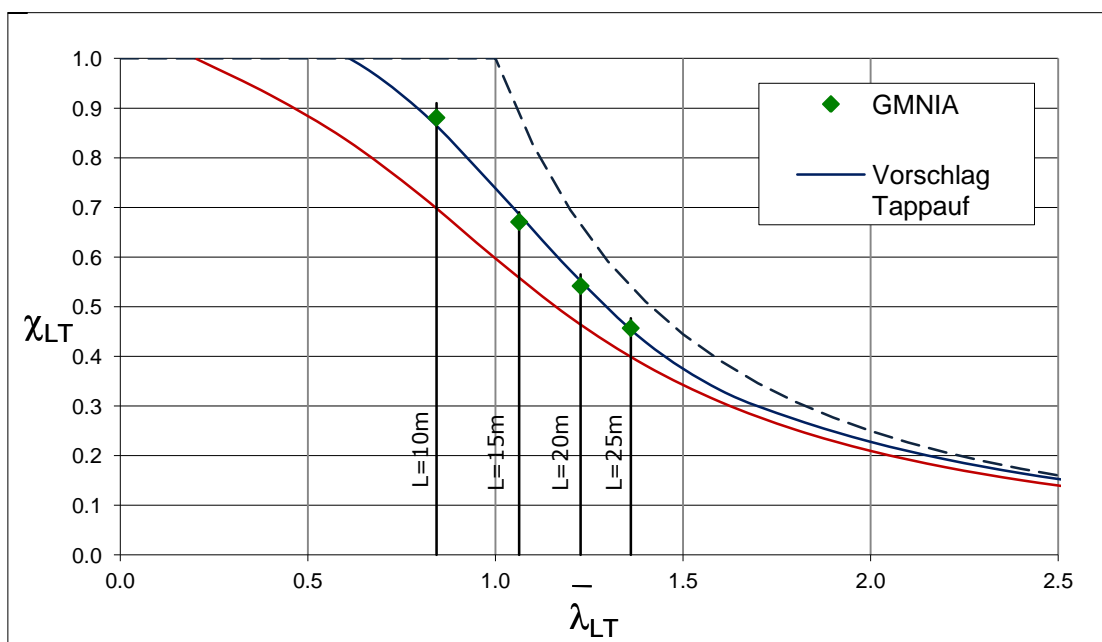


Abbildung 9-6: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ))

### 9.3. Parabolische Momentenverläufe

#### 9.3.1. Ermittlung der Erhöhungsfaktoren $\zeta_{2rest}$ für die einzelnen Lastfälle

Zur Berücksichtigung der lasterhöhenden Wirkung zufolge der zusätzlichen Abstützungen am Obergurt erfolgt eine Modifizierung der Knickspannungslinie für den allgemeinen Fall gemäß EC3 Kapitel 6.2.3.2 mit  $\zeta_{2rest}$  nach Formel (9-3). Die Untersuchungen des Verfassers beschränken sich auf den Querschnitt IPE 500 mit Stützweiten bis 25 m.

Für parabolische Momentenverläufe beschreibt diese das Tragverhalten eines IPE 500-Trägers mit zwei Halterungen.

$$\chi_{LT} = \chi_{LT,N1} * \zeta_{2rest} \quad \text{jedoch} \quad \left\{ \begin{array}{l} \chi_{LT} \leq 1 \\ \zeta_{2rest} \geq 1 \end{array} \right. \quad (9-3)$$

Dabei ist

$\chi_{LT,N1}$  der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (siehe Abschnitt 4.2.1 – Nachweis N1)

$\zeta_{2rest}$  der Erhöhungsfaktor abhängig von Momentenverläufen laut Tabelle 9-1.

Die Ermittlung des Erhöhungsfaktors  $\zeta_{2rest}$  erfolgt durch den Vergleich der realitätsnahen GMNIA-Analysen mit der Nachweismethode N1 gemäß Eurocode EN 1993-1-1 Abschnitt 6.2.3.2 (siehe Kapitel 4.2.1).

$\zeta_{2rest}$  ist dabei das Verhältnis von  $\chi_{LT,GMNIA}/\chi_{LT,N1}$ .

$$\zeta_{2rest} = \frac{\chi_{LT,GMNIA}}{\chi_{LT,N1}}$$

$\chi_{LT,N1}$  ist der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (siehe Abschnitt 4.2.1 – Nachweis N1)

$\chi_{LT,GMNIA}$  ist der mit der realitätsnahen GMNIA-Analyse ermittelte Abminderungsfaktor

Auf Basis der ermittelten Einzelergebnisse wurden für die einzelnen unterschiedlichen Momentenverläufe einfache Beziehungen für die Ermittlung der  $\zeta_{2rest}$ -Werte abgeleitet. Die Ergebnisse werden in Tabelle 9-1 dargestellt.

**(a) Tragverhalten bei Querlast und parabolischem Momentenverlauf (0/1/0)**

In Abbildung 9-7 ist das Verhältnis der Ergebnisse der GMNIA-Analyse  $\chi_{LT,GMNIA}$  zu den Werten der vereinfachten Knickspannungslinie gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (Nachweis N1)  $\chi_{LT,N1}$  für positiven parabolischen Momentenverlauf (0/1/0) (siehe Abbildung 9-8) dargestellt.

Die Funktion  $\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT})$  erfasst annähernd diese Verhältniswerte in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  bis zu einem Längen-Höhen-Verhältnis von  $L/h = 50$ . Es ist ersichtlich, dass in diesem Fall die Werte von  $\zeta_{2rest}$  annähernd auf einer horizontalen Geraden liegen.

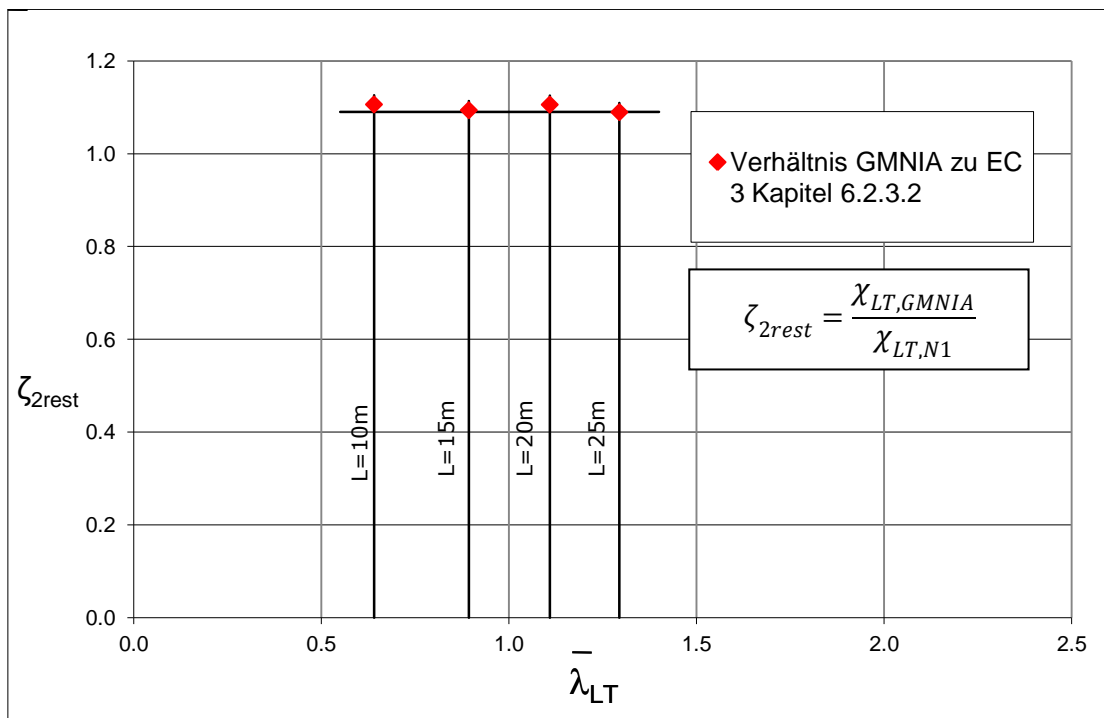


Abbildung 9-7: Verhältnis der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-8)

Vereinfacht gilt:

$$\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT}) = 1,09 \tag{9-4}$$

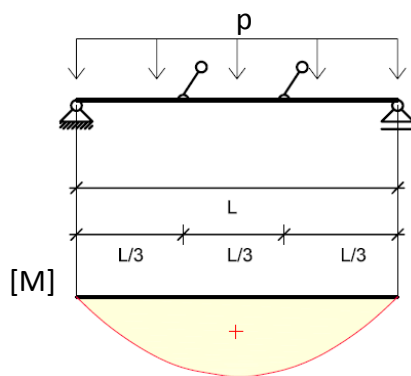
Die Abbildung 9-9 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit positivem parabolischem Momentenverlauf und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-8). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-3) und Formel (9-4) (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )

gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

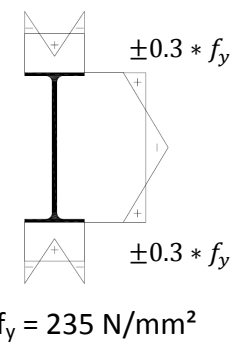


Abbildung 9-8: System und Belastung

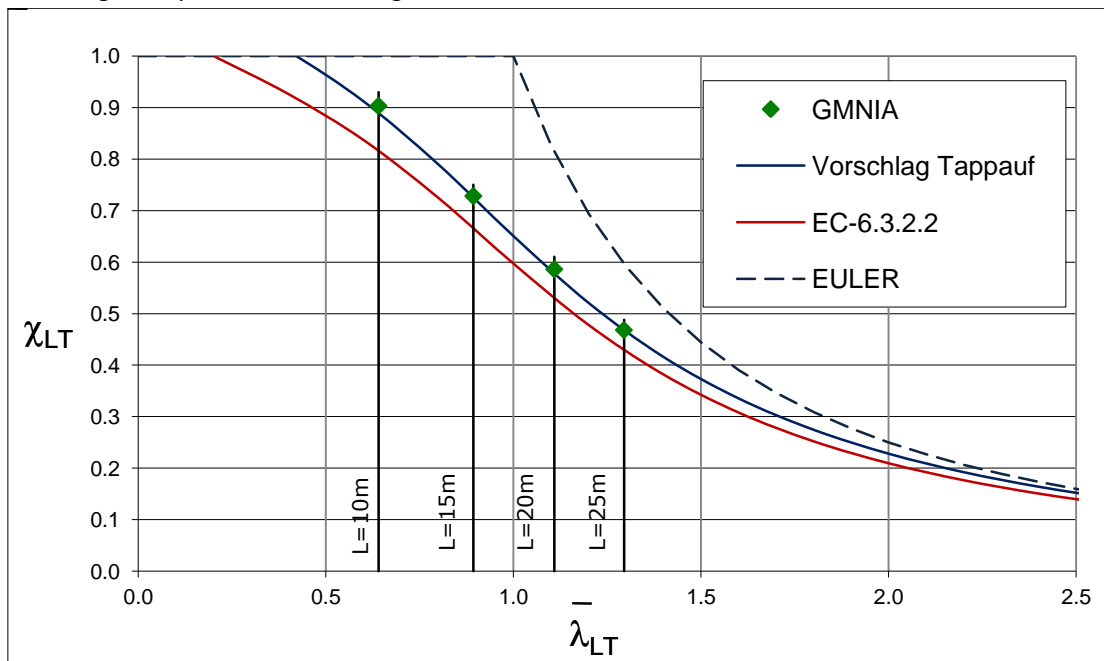


Abbildung 9-9: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (0/1/0))

**(b) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1)**

In Abbildung 9-10 ist das Verhältnis der Ergebnisse der GMNIA-Analyse  $\chi_{LT,GMNIA}$  zu den Werten der vereinfachten Knickspannungslinie gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (Nachweis N1)  $\chi_{LT,N1}$  für parabolisch durchschlagenden Momentenverlauf (-1/1/-1) (siehe Abbildung 9-11) dargestellt.

Die Funktion  $\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT})$  erfasst annähernd diese Verhältniswerte in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  bis zu einem Längen-Höhen-Verhältnis von  $L/h = 50$ .

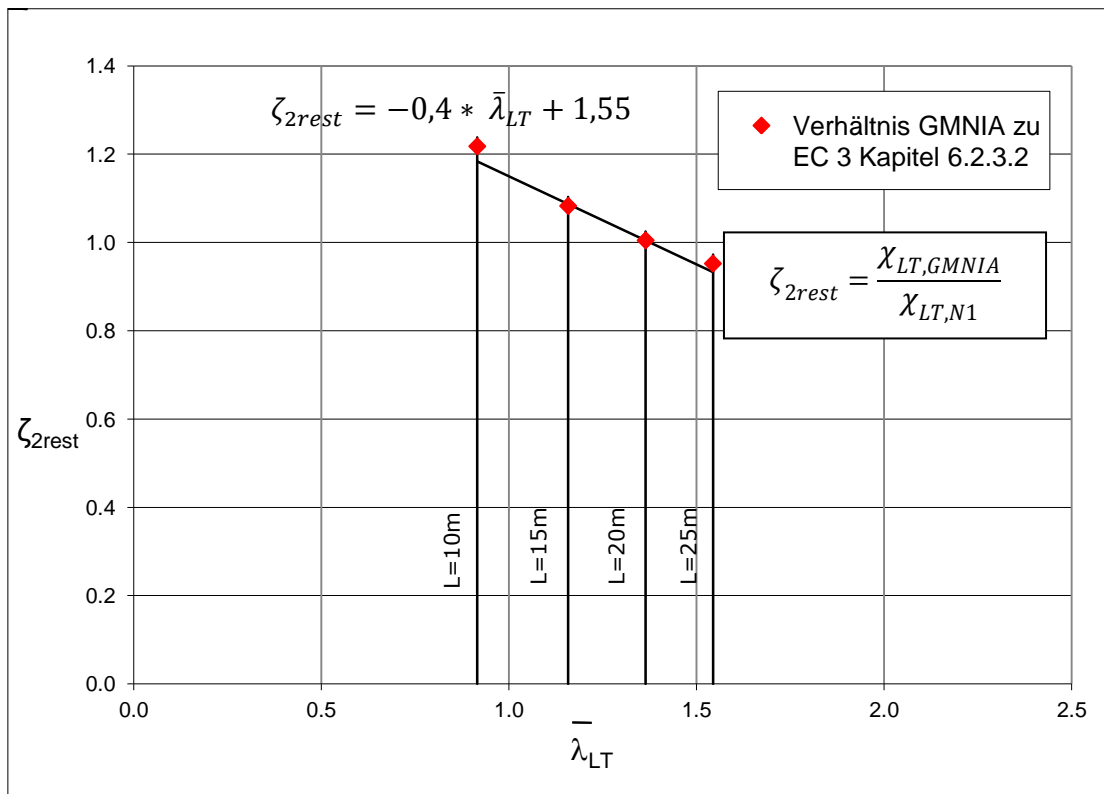


Abbildung 9-10: Verhältnis der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-11)

Vereinfacht gilt:

$$\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT}) = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,55 \quad (9-5)$$

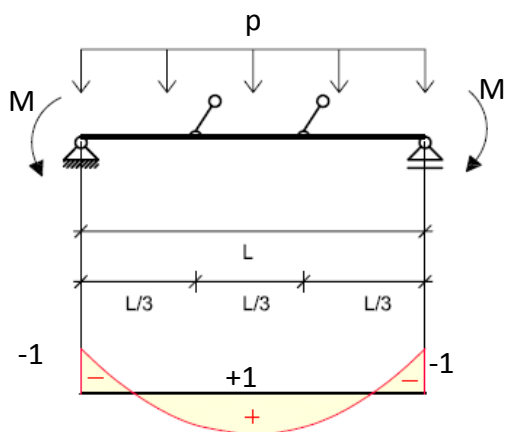
Die Abbildung 9-12 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-11). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-3) und Formel (9-5) (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )

gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA-Analyse wurde hier  $L/3000$  bezogen auf die Gesamtlänge, das heißt:  $L/1000$  bezogen auf die Knicklänge des Obergurtes, eingesetzt, da der gehaltene Obergurt versagt.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

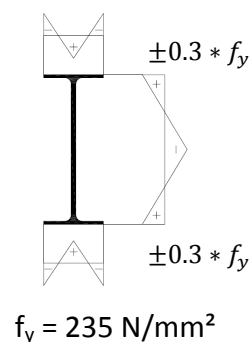


Abbildung 9-11: System und Belastung

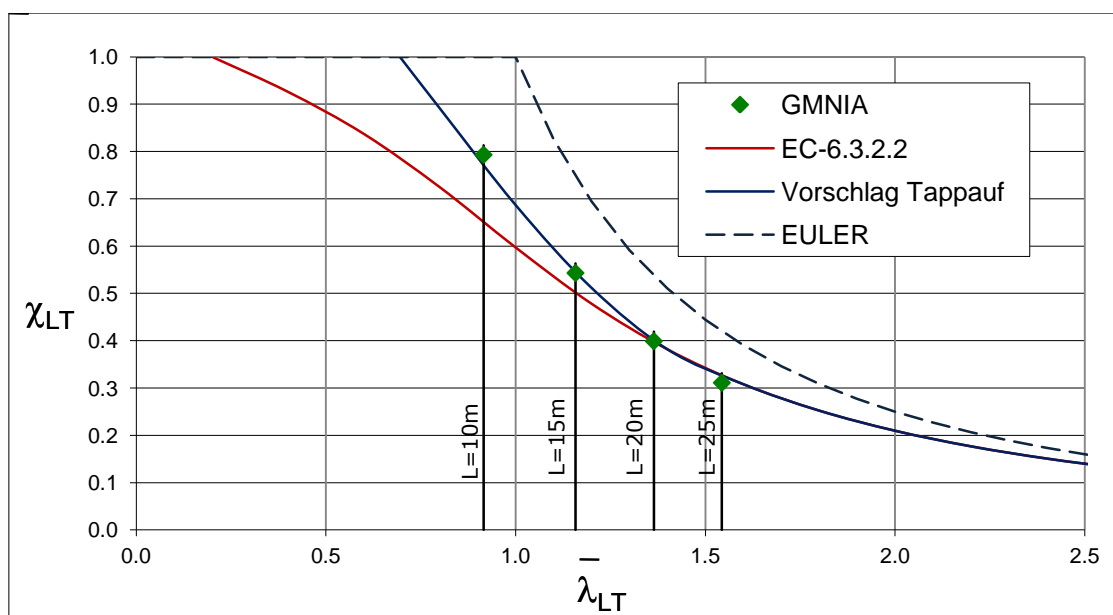


Abbildung 9-12: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/1/-1))

**(c) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1)**

In Abbildung 9-13 ist das Verhältnis der Ergebnisse der GMNIA-Analyse  $\chi_{LT,GMNIA}$  zu den Werten der vereinfachten Knickspannungslinie gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (Nachweis N1)  $\chi_{LT,N1}$  für parabolisch durchschlagenden Momentenverlauf (-1/0,5/-1), (siehe Abbildung 9-14) dargestellt.

Die Funktion  $\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT})$  erfasst annähernd diese Verhältniswerte in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  bis zu einem Längen-Höhen-Verhältnis von  $L/h = 50$ .

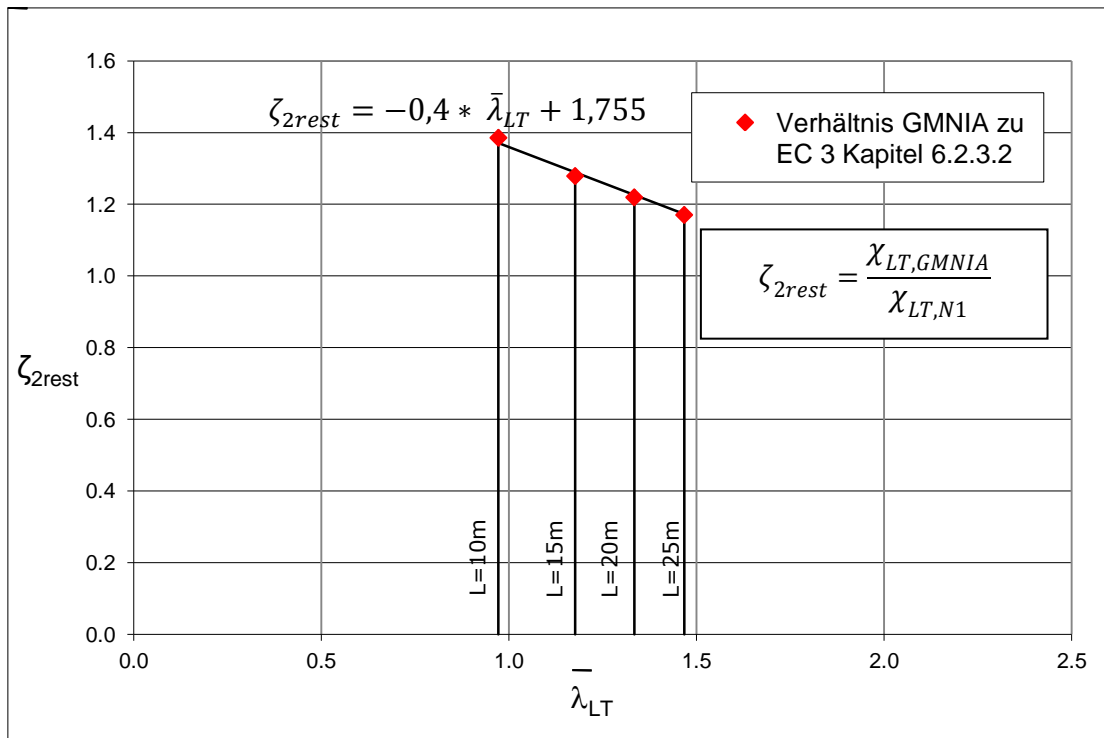


Abbildung 9-13: Verhältnisse der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-14)

Vereinfacht gilt:

$$\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT}) = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,755 \quad (9-6)$$

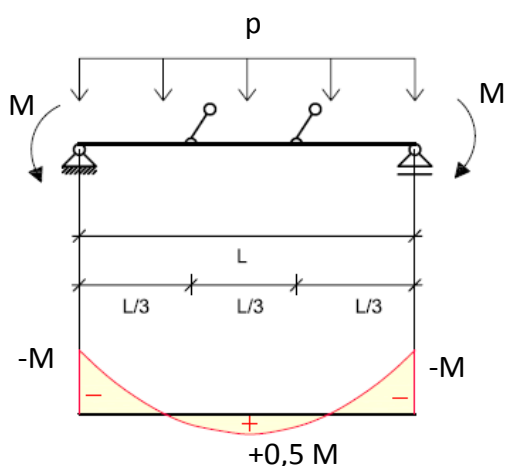
Die Abbildung 9-15 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/1/-1) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-14). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-3) und Formel (9-6) (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )

gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der versagende Untergurt die gesamte Länge aufweist.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

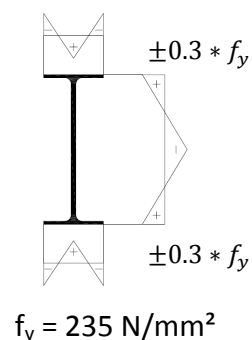


Abbildung 9-14: System und Belastung

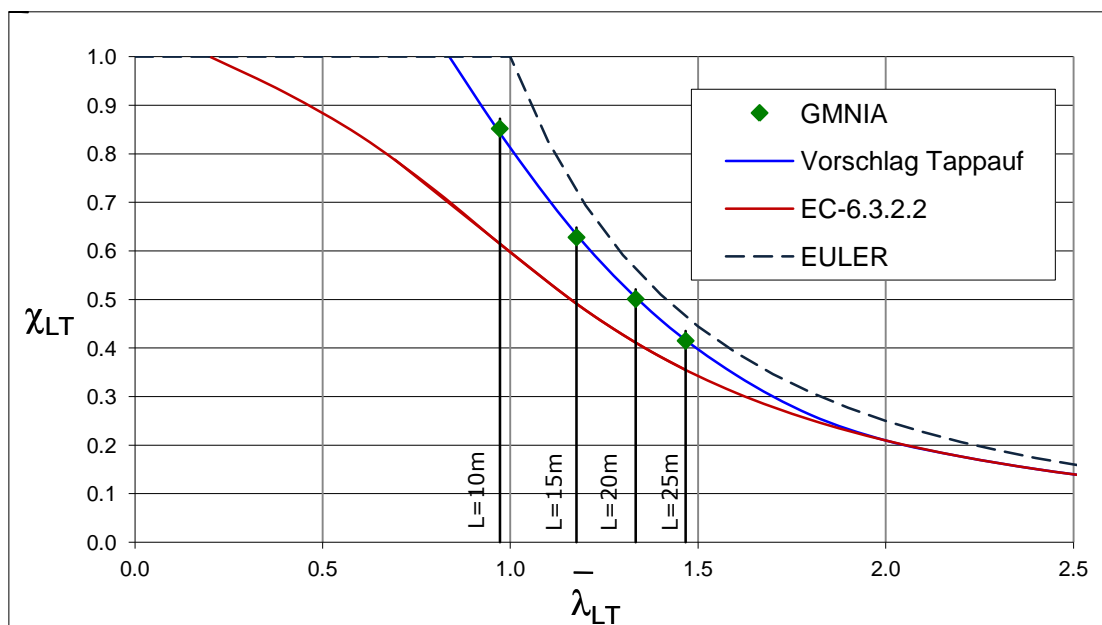


Abbildung 9-15: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/0,5/-1))



**(d) Tragverhalten bei Endmomenten und Querlast mit parabolischem  
Momentenverlauf (-1/0/-1)**

In Abbildung 9-16 ist das Verhältnis der Ergebnisse der GMNIA-Analyse  $\chi_{LT,GMNIA}$  zu den Werten der vereinfachten Knickspannungslinie gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (Nachweis N1)  $\chi_{LT,N1}$  für parabolischen Momentenverlauf (-1/0/-1) (siehe Abbildung 9-17) dargestellt.

Die Funktion  $\zeta_{2rest}(\bar{\lambda}_{LT})$  erfasst annähernd diese Verhältnismerte in Abhängigkeit von  $\bar{\lambda}_{LT}$  bis zu einem Längen-Höhen-Verhältnis von  $L/h = 50$ .

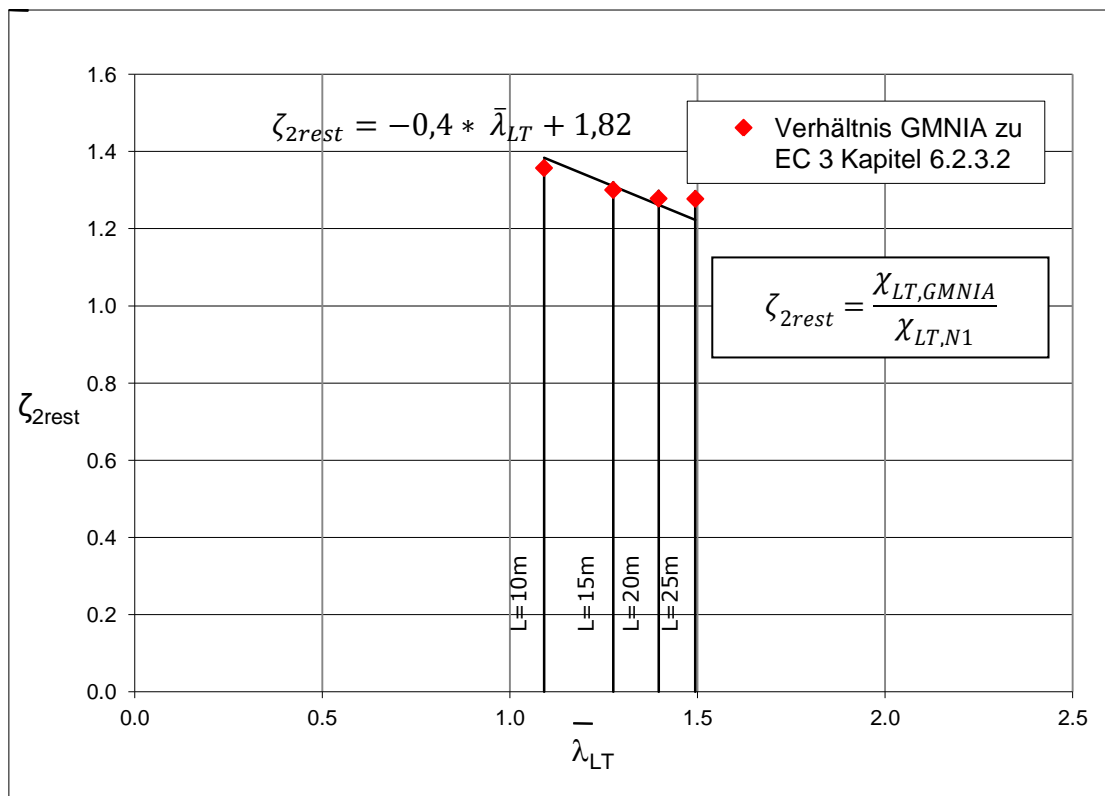


Abbildung 9-16: Verhältnisse der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-17)

Vereinfacht gilt:

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,82 \quad (9-7)$$

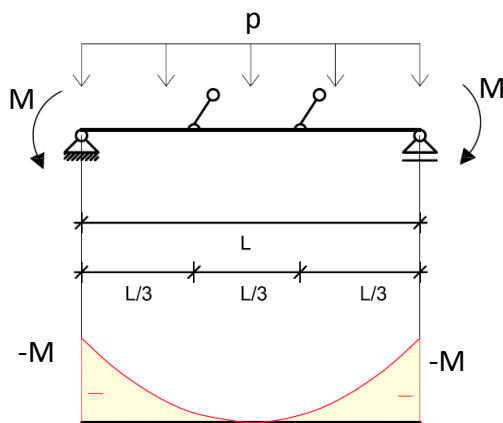
Die Abbildung 9-18 zeigt das Tragverhalten für einen Querschnitt IPE 500 mit parabolischem Momentenverlauf (-1/0/-1) und unterschiedlichen Längen (System siehe Abbildung 9-17). Die Ergebnisse der GMNIA-Analyse werden dem Nachweis

- N1 mit der Knickspannungslinie b (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ ) und dem
- Vorschlag Tappauf gemäß Formel (9-3) und Formel (9-7) (Imperfektionsbeiwert  $\alpha_{LT} = 0,34$ )

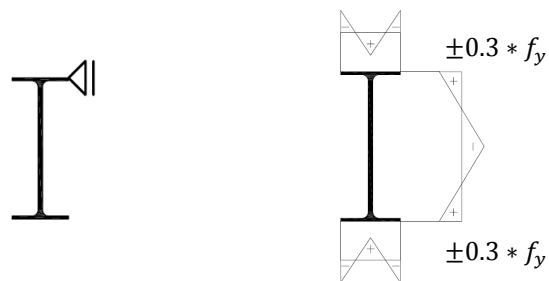
gegenübergestellt.

Für die Vorverformung für die GMNIA wurde hier  $L/1000$  bezogen auf die Gesamtlänge eingesetzt, da der versagende Untergurt die gesamte Länge aufweist.

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:



$$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$$

Abbildung 9-17: System und Belastung

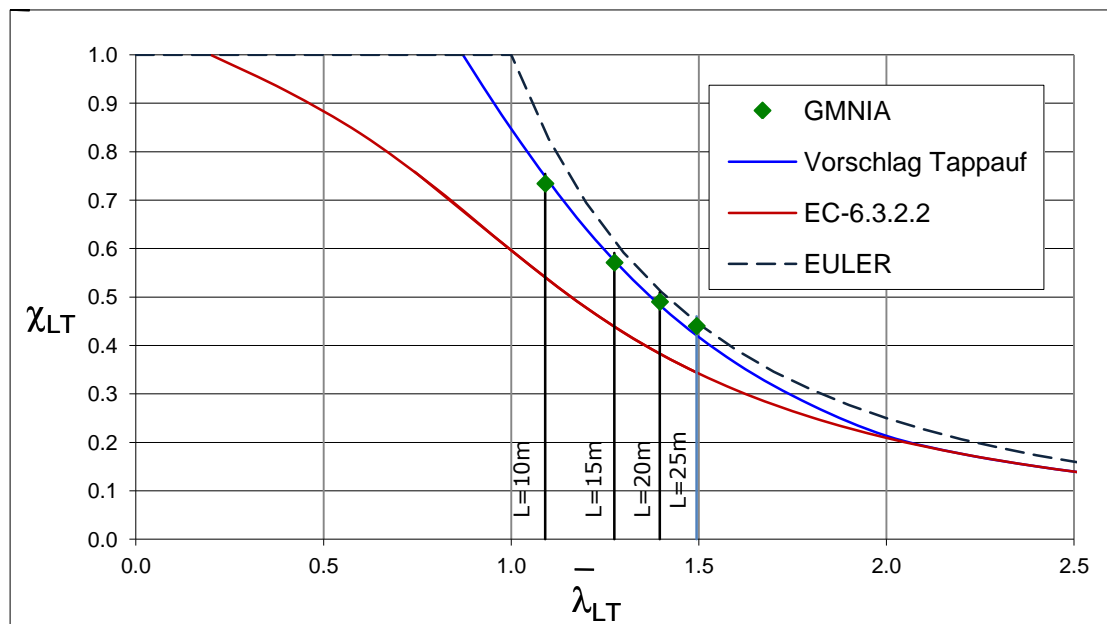


Abbildung 9-18: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; negativer parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1))

### 9.3.2. Zusammenfassung der ermittelten Erhöhungsfaktoren $\zeta_{2rest}$

Wenn man die Modifikationsformeln für  $\zeta(\bar{\lambda}_{LT})$  – dies sind die Formeln (9-5), (9-6) und (9-7) – vergleicht, kann man erkennen, dass sich lediglich die Konstante ändert. Diese Konstante kann nun, wie in Abbildung 9-19 dargestellt, in Abhängigkeit zum Verhältnis  $M_{Feld}/M_{Stütz}$  gebracht werden, wobei  $M_{Feld} \leq M_{Stütz}$  gelten muss.

$M_{Feld}/M_{Stütz} = 1,0$  Fall (-1/1/-1):

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,55 \quad (9-5)$$

$M_{Feld}/M_{Stütz} = 0,5$  Fall (-1/0,5/-1):

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,76 \quad (9-6)$$

$M_{Feld}/M_{Stütz} = 0,0$  Fall (-1/0/-1):

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + 1,82 \quad (9-7)$$

Somit gilt generell:

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} + C \quad (9-8)$$

Den Verlauf von C für die untersuchten Fälle zeigt die  
Abbildung 9-19.

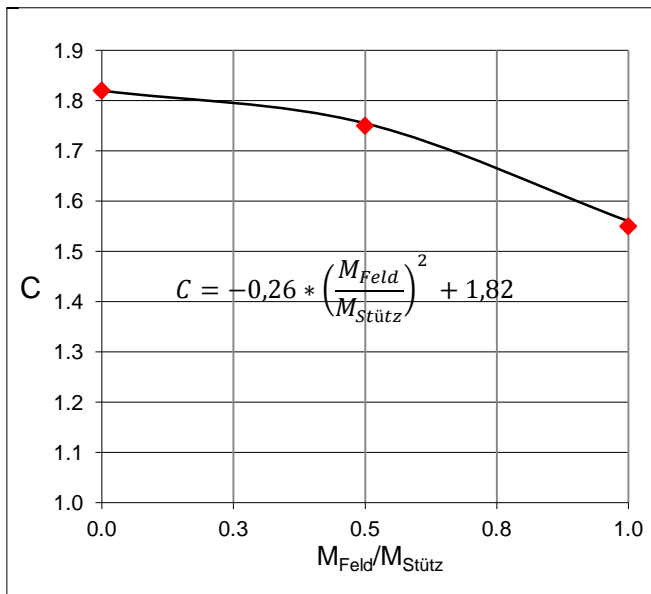


Abbildung 9-19: Werte für die Konstante C

Als Ausgleichsfunktion der Konstanten C ergibt sich Formel (9-9).

$$C = -0,26 * \left(\frac{M_{Feld}}{M_{Stütz}}\right)^2 + 1,82 \quad (9-9)$$

Damit gilt für IPE-Träger bis zu einer Höhe  $h = 500$  mm, mit zwei Zwischenhalterungen in den Drittelpunkten am Obergurt und bis zu einer Länge von 25 m:

$$\zeta_{2rest} = -0,4 * \bar{\lambda}_{LT} - 0,26 * \left(\frac{M_{Feld}}{M_{Stütz}}\right)^2 + 1,82 \quad (9-10)$$

Die Ermittlung der Knickspannungslinie für die untersuchten parabolischen Momentenverläufe kann somit sehr einfach durch eine Modifizierung der Knickspannungslinie gemäß EC 3 Kapitel 6.2.3.2 durch Multiplikation von  $\zeta_{2rest}$  erfolgen.

$$\chi_{LT} = \chi_{LT,N1} * \zeta_{2rest} \quad \text{jedoch} \quad \left\{ \begin{array}{l} \chi_{LT} \leq 1 \\ \zeta_{2rest} \geq 1 \end{array} \right. \quad (9-11)$$

Dabei ist

$\chi_{LT,N1}$  der Abminderungsfaktor  $\chi_{LT}$  gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (siehe Abschnitt 4.2.1 – Nachweis N1)

$\zeta_{2rest}$  der Erhöhungsfaktor abhängig von den Momentenverläufen laut Tabelle 9-1.


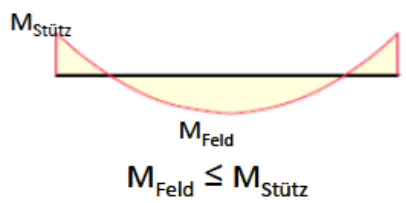
Momentenverteilung	$\zeta_{2rest}$
	1.09
	$-0,4 * \bar{\lambda}_{LT} - 0,26 * \left(\frac{M_{Feld}}{M_{Stütz}}\right)^2 + 1,82$

Tabelle 9-1: mit Hilfe der GMNIA-Analyse abgeleitete Werte für  $\zeta_{2rest}$

## 10. Zusammenfassung

In dieser Arbeit wird das Biegedrillknicken von Stäben mit zusätzlichen Zwischenhalterungen an nur einem Gurt untersucht.

Um Untersuchungen im Hinblick auf Stabilitätsversagen durchzuführen, ist es unabdingbar, die realitätsnahen Traglasten zu ermitteln. Diese werden in dieser Arbeit mit realitätsnahen numerischen Berechnungen mittels der FE-Methode mit der Software ABAQUS berechnet. Bei diesen numerischen Berechnungen handelt es sich um sogenannte GMNIA-Analysen (Geometrically and Materially Non-linear Analysis with Imperfections).

Alle Berechnungen dieser Arbeit wurden für Träger des Querschnittes IPE 500 durchgeführt, da dieser schlanke Träger für die Vielzahl anderer eingesetzter Walzprofile (IPE- beziehungsweise HEA-Profile) repräsentativ ist. Die wichtigsten Parameter für die GMNIA-Analysen sind im Folgenden noch einmal zusammengestellt.

- (a) Der Biegeträger wurde in Form eines Schalenmodells abgebildet. Dabei werden rechteckige Schalenelemente mit linearer Ansatzfunktion verwendet. Für alle Berechnungen wurde die gleiche Netzteilung angewandt. Da die Berechnungen für unterschiedliche Trägerlängen durchgeführt werden, variieren die Seitenverhältnisse der Elementlänge  $l_{el}$  zur Elementbreite zwischen  $l_{el}/b_{el} = 0,5$  und  $2,5$ .  
Die Ausrundungen des IPE 500 werden ersatzweise je Gurt mit einem zusätzlichen äquivalenten Hohlkastenquerschnitt berücksichtigt.
- (b) Alle Berechnungen erfolgen für den Baustahl S235 mit einer Streckgrenze von  $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$  und einem Elastizitätsmodul von  $E = 210000 \text{ N/mm}^2$ . Die Querdehnungszahl wird mit  $\nu = 0,3$  berücksichtigt. Die Berechnungen erfolgen für ein ideal elastisch-plastisches Materialverhalten (Abbildung 3-2), wobei die Wiederverfestigung des Materials im plastischen Bereich nicht berücksichtigt wird.
- (c) Die produktionsbedingten Eigenspannungen werden vereinfacht – wie in Abbildung 3-3 dargestellt – berücksichtigt.

- (d) Bei allen Berechnungen wird die Eigenform der kleinsten idealen Verzweigungslast (ideales Biegedrillknickmoment) als Vorverformung berücksichtigt. Diese wird zunächst in einem ersten Berechnungsschritt in Form einer LBA-Analyse (Linear Buckling Analysis) ermittelt und derart skaliert, dass in allen Fällen dieselbe Imperfektionsamplitude  $e_0 = L^*/1000$  bezogen auf die Knicklänge  $L^*$  des maßgebenden Gurtes vorliegt, wie beispielhaft in Abbildung 3-4 dargestellt ist.

In **Kapitel 4** werden nun für Fälle reiner Biegung folgende drei im EC geregelte Nachweisführungen gezeigt und anschließend in **Kapitel 5** mit den realitätsnahen GMNIA-Analysen verglichen.

- N1 Biegedrillknicknachweis mit Knicklinien für das Biegedrillknicken – Allgemeiner Fall gemäß Eurocode EN 1993-1-1, Kapitel 6.3.2.2
- N2 Biegedrillknicknachweis mit Knicklinien für das Biegedrillknicken gewalzter oder gleichartiger Querschnitte gemäß Eurocode EN 1993-1-1, Kapitel 6.3.2.3
- N3 Vereinfachtes Bemessungsverfahren für Träger mit Biegedrillknickbehinderung im Hochbau gemäß Eurocode EN 1993-1-1, Kapitel 6.3.2.4

Bei diesen Vergleichen lässt sich erkennen, dass der Nachweis N1 auf Basis der Knickspannungslinien für zentrischen Druck für konstanten und positiven parabolischen Momentenverlauf das Tragverhalten recht gut widerspiegelt. Für andere Momentenverläufe liegen die Ergebnisse teils weit auf der sicheren Seite.

Das Nachweisverfahren N2 auf Basis der für Biegedrillknicken entwickelten Biegedrillknickkurven kann das reale Tragverhalten für alle Momentenverläufe sehr gut wiedergeben.

Der Nachweis N3 liefert immer die konservativsten Ergebnisse, besonders bei längeren Trägern liefert der Nachweis N3 Ergebnisse, die nicht einmal mehr 50 % der realitätsnahen GMNIA-Analyse erreichen.

In **Kapitel 6** wird nun der Einfluss von zusätzlichen Halterungen an nur einem Gurt bei unterschiedlichen Momentenverläufen untersucht. Hierfür werden die Ergebnisse der realitätsnahen GMNIA-Analysen von beidseits gelenkig gabelgelagerten Einfeldträgern mit einem Querschnitt IPE 500 und Längen von 5-25 m mit und ohne zusätzliche Zwischenabstützungen untersucht und verglichen.

- System A: Einfeldträger ohne Zwischenhalterungen
- System B: Einfeldträger mit zusätzlich zwei äquidistanten Zwischenhalterungen am Obergurt
- System C: Einfeldträger mit zusätzlich drei äquidistanten Zwischenhalterungen am Obergurt

Erwartungsgemäß kann beobachtet werden, dass es, wenn der Druckgurt zusätzlich gehalten wird, zu erheblichen Tragwiderstandssteigerungen zufolge der Halterungen kommt.

So hat zum Beispiel bei konstantem Momentenverlauf ein nicht gehaltener Stab mit 5 m Länge die gleiche Tragfähigkeit wie ein 15 m langer, 2 Mal am Druckgurt gehaltener Stab (die Länge zwischen den Halterungen ist dann ebenfalls 5 m) und wie ein 20 m langer Stab mit 3 Halterungen (die Länge zwischen den Halterungen ist 5 m).

Bei zunehmenden Anteilen der negativen Momente (nicht gehaltener Untergurt wird auf Druck beansprucht) verringert sich die Erhöhung der Tragfähigkeit zufolge der Zwischenhalterungen. Bei konstantem negativen Momentenverlauf (ohnehin stabilisierender Zuggurt zusätzlich gehalten) kommt es zufolge der zusätzlichen Halterungen zu einer Steigerung der Tragfähigkeit, da durch die zusätzlichen horizontalen Halterungen in diesen Punkten nur noch eine Verdrehung und eine Verschiebung in vertikaler Richtung auftreten kann. Dadurch ergibt sich auch für den Druckgurt eine geringere Horizontalverformung, die wiederum eine Erhöhung der Tragfähigkeit bewirkt. Je länger der Stab ist, desto größer ist die Erhöhung der Tragfähigkeit.

Auffällig ist auch, dass am Obergurt nicht zusätzlich gehaltene Träger bei Querbelastung und parabolischem Momentenverlauf eine geringere Tragfähigkeit aufweisen als Träger, die nur mit Endmomenten (konstantem Momentenverlauf) belastet sind, während zusätzlich gehaltene Stäbe bei Querbelastung und parabolischem Momentenverlauf (0/1/0) eine höhere Tragfähigkeit aufweisen.

Bei Endmomenten und Querbelastung – parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf mit gleich großem Stütz- wie Randmoment(-1/1/-1) – weisen sowohl nicht gehaltene als auch zusätzlich gehaltene Stäbe geringere Tragfähigkeiten auf als zufolge von Endmomenten und konstantem Momentenverlauf.



In **Kapitel 7** werden die Ergebnisse der GMNIA-Analysen für Träger mit zwei äquidistanten zusätzlichen Zwischenhalterungen am Obergurt mit den Nachweismethoden N1 (EC 3 Kapitel 3.2.3.2) und N2 (EC 3 Kapitel 3.2.3.3), die eigentlich für Träger ohne Zwischenhalterung gelten, verglichen. Dabei werden die numerisch gerechneten idealen Kippmomente für die tatsächlich vorliegenden Zwischenhalterungen als Basis für die Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$  zugrunde gelegt.

Für die Biegedrillknicklinien gemäß Nachweis N2 wurden für den unterschiedlichen Momentenverlauf keine Modifikationen berücksichtigt (siehe Kapitel 4.2.3 –  $\chi_{LT,mod}$  anstatt  $\chi_{LT}$ ). Dies deshalb, da sich die  $k_c$ -Werte des Gesamtsystems nicht mit den  $k_c$ -Werten des Gurtes zwischen den Halterungen decken (unterschiedliche Momentenverläufe).

Nur bei negativem linearem Momentenverlauf wurde die Modifikation vorgenommen, da der Druckgurt mit und ohne Halterungen annähernd das gleiche Tragverhalten aufweist.

Die dargestellten Vergleiche zeigen, dass die allgemeinen Biegedrillknickspannungslinien (Nachweis N2) außer für lange Träger mit durchschlagendem parabolischem Momentenverlauf mit gleich großem Stützmoment wie Feldmoment (-1/1/-1) durchgehend konservative Ergebnisse liefern.

**Hervorzuheben ist jedoch, dass nicht die günstigen  $k_c$ -Werte für den Gesamtstab anwendbar sind, da dadurch teilweise die Tragfähigkeit überschätzt werden würde.**

Die Verwendung der Knickspannungslinie für zentrischen Druck – entsprechend Nachweis N1 – liefert demgegenüber mitunter deutlich konservativere Ergebnisse.

In **Kapitel 8** werden die Ergebnisse der GMNIA-Analysen für Träger mit zwei äquidistanten zusätzlichen Zwischenhalterungen am Obergurt mit den am Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz von Prof. Dr. VORNAME Greiner und Dr. Andreas Taras neu entwickelten Biegedrillknickspannungslinien verglichen.

Diese neue Formel enthält nun auch die Schlankheit  $\bar{\lambda}_z$  für das Knicken um die vertikale Achse. Da es sich bei den hier betrachteten Trägern um an einem Gurt gehaltene Träger handelt, werden hier a) ein globaler Nachweis mit  $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf die Gesamtlänge und b) ein lokaler Nachweis mit  $\bar{\lambda}_z$  bezogen auf den Abstand der zusätzlichen Halterungen durchgeführt. Des Weiteren werden auch die Momentenbeiwerte  $\varphi$  jeweils auf die lokal beziehungsweise global vorherrschenden Momentenverläufe bezogen. Die bezogene Schlankheit  $\bar{\lambda}_{LT}$  wurde in beiden Fällen mittels einer linearen Eigenwertanalyse des tatsächlichen Systems berechnet (ideales Kippmoment  $M_{cr}$ ).

Bei **rein positiven Momentenverläufen** (Druckgurt zusätzlich gehalten) stimmen die Ergebnisse der GMNIA-Berechnungen gut mit den **lokalen Nachweisen** überein. Für **rein negative Momentenverläufe (Zuggurt zusätzlich gehalten)** kann der **globale Nachweis** verwendet werden.

Für diese beiden Fälle kann auch ohne Berechnungen eine klare Aussage getroffen werden, ob der Obergurt oder der Untergurt für die Gesamttragfähigkeit maßgebend ist, und demnach kann auch die Wahl des Nachweises begründet werden.

Bei durchschlagenden Momentenverläufen liegen die Ergebnisse der GMNIA-Analyse jedoch zwischen dem lokalen und dem globalen Nachweis, wobei sich die Ergebnisse bei geringerem positivem Momentenanteil dem globalen Nachweis nähern. Bei einem durchschlagenden Momentenverlauf mit dem Verhältnis des Feldmomentes zum Stützmoment von 0,5 (siehe Abbildung 8-15; -1/0,5/-1) entsprechen die Ergebnisse der GMNIA-Analyse annähernd dem globalen Nachweis.

Dies spiegelt das Tragverhalten von Trägern mit Halterungen an nur einem Gurt insofern wider, als dass bei durchgehend positiven oder negativen Momentenverläufen eindeutig ein Gurt auf Stabilität versagt, während hingegen bei durchschlagenden Momentenverläufen ein kombiniertes Versagen der beiden Gurte auftritt. **In der Praxis müsste man in diesen Fällen den konservativen lokalen Nachweis führen.**

Im **Kapitel 9** wird ein selbst entwickelter Vorschlag des Verfassers für die Ermittlung von Biegedrillknickspannungslinien vorgestellt und mit den Ergebnissen der GMNIA-Analysen verglichen. Bei diesem Vorschlag wird zwischen linearen und parabolischen Momentenverläufen unterschieden und es gibt jeweils eine Knickspannungslinie. Wie die Vergleiche in diesem Kapitel zeigen, spiegelt dieser Vorschlag das Tragverhalten der untersuchten Träger des Querschnitts IPE 500, mit zwei Zwischenhalterungen in den Drittelpunkten am Obergurt, bis zu einer Länge von 25 m sehr gut wider.

## 11. Verweise

### 11.1. Bilderverzeichnis

Abbildung 1-1: System A – beidseits gelenkig gelagerter Einfeldbalken .....	5
Abbildung 1-3: System C – Einfeldbalken mit drei zusätzlichen Halterungen am Obergurt .....	6
Abbildung 1-4: untersuchter Momentenverlauf M1 .....	7
Abbildung 1-5: untersuchter Momentenverlauf M2 .....	7
Abbildung 1-6: untersuchter Momentenverlauf M3 .....	7
Abbildung 1-7: untersuchter Momentenverlauf M4 .....	7
Abbildung 1-8: untersuchter Momentenverlauf M5 .....	7
Abbildung 1-10: untersuchter Momentenverlauf M7 .....	8
Abbildung 1-11: untersuchter Momentenverlauf M8 .....	8
Abbildung 1-12: untersuchter Momentenverlauf M9 .....	9
Abbildung 2-1: Euler Knickstab (Bild aus Stahlbau Fritsch) .....	10
Abbildung 2-2: $\sigma_{cr}$ - $\lambda$ -Diagramm .....	13
Abbildung 2-3: dimensionslose Darstellung der Eulerhyperbel .....	14
Abbildung 3-3: Eigenspannungen .....	18
Abbildung 3-4: skalierte Eigenformen mit maximalen Amplituden – Beispiel für M1 ...	19
Abbildung 4-1: Eulerhyperbel verglichen mit Knickspannungslinien .....	21
Abbildung 4-2: System und Belastung .....	29
Abbildung 5-1: System und Belastung .....	36
Abbildung 5-2: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; M = konstant) .....	36
Abbildung 5-3: System und Belastung .....	37
Abbildung 5-4: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )) .....	37
Abbildung 5-5: System und Belastung .....	38
Abbildung 5-6: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )) .....	38
Abbildung 5-7: System und Belastung .....	39
Abbildung 5-8 : Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; positiver parabolischer Momentenverlauf) .....	39
Abbildung 5-9: System und Belastung .....	41
Abbildung 5-10: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; M = konstant) .....	41
Abbildung 5-11: System und Belastung .....	42

Abbildung 5-12: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )).....	42
Abbildung 5-13: System und Belastung.....	43
Abbildung 5-14: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )).....	43
Abbildung 5-15: System und Belastung.....	44
Abbildung 5-16: Vergleich EC 3 Kapitel 6.2.3.4 (N3) mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; positiver parabolischer Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )).....	44
Abbildung 6-2: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; konstantes positives Moment) .....	48
Abbildung 6-3: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (konstantes negatives Moment) .....	49
Abbildung 6-4: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; konstantes negatives Moment).....	50
Abbildung 6-5: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf) .....	51
Abbildung 6-6: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (IPE 500; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf) .....	52
Abbildung 6-7: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (linearer durchschlagender Momentenverlauf) .....	53
Abbildung 6-8: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (linearer durchschlagender Momentenverlauf) .....	53
Abbildung 6-9: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (positiver parabolischer Momentenverlauf) .....	54
Abbildung 6-10: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (positiver parabolischer Momentenverlauf) .....	55
Abbildung 6-11: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf ( $-1/1/-1$ )).....	57
Abbildung 6-5: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (Endmomente und	

Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (- 1/0,5/-1)) .....	58
Abbildung 6-12: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0,5/-1)).....	58
Abbildung 6-5: Verformungen und Spannungen im Traglastzustand am a) zwei Mal gehaltenen Stab und b) nicht gehaltenen Stab (Endmomente und Querlast mit negativem parabolischen Momentenverlauf (- 1/0/-1)) .....	59
Abbildung 6-13: Vergleich der GMNIA-Ergebnisse für nicht gehaltene, 2 x und 3 x gehaltene Träger (Endmomente und Querlast mit parabolisch durchschlagendem Momentenverlauf (-1/0/-1)).....	59
Abbildung 7-1: System und Belastung.....	62
Abbildung 7-2: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf) .....	62
Abbildung 7-3: System und Belastung.....	63
Abbildung 7-4: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )) .....	63
Abbildung 7-5: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf; $k_c = 0,9$ berücksichtigt) .....	64
Abbildung 7-6: System und Belastung.....	65
Abbildung 7-7: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )) .....	65
Abbildung 7-8: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ ) $k_c = 0,6$ berücksichtigt).....	66
Abbildung 7-9: System und Belastung.....	67
Abbildung 7-10: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf) .....	67
Abbildung 7-11: System und Belastung.....	68
Abbildung 7-12: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; negativer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )) .....	68
Abbildung 7-13: System und Belastung.....	69

Abbildung 7-14: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolischer Momentenverlauf (0/1/0)) .....	69
Abbildung 7-15: System und Belastung.....	70
Abbildung 7-16: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/1/-1)) .....	70
Abbildung 7-17: System und Belastung.....	71
Abbildung 7-18: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/0,5/-1)) .....	71
Abbildung 7-19: System und Belastung.....	72
Abbildung 7-20: Vergleich EC mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1)) .....	72
Abbildung 8-1: System und Belastung.....	76
Abbildung 8-2: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf) .....	76
Abbildung 8-3: System und Belastung.....	77
Abbildung 8-4: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )).....	77
Abbildung 8-5: System und Belastung.....	78
Abbildung 8-6: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )) .....	78
Abbildung 8-7: System und Belastung.....	79
Abbildung 8-8: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf) .....	79
Abbildung 8-9: System und Belastung.....	80
Abbildung 8-10:Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )).....	80
Abbildung 8-11: System und BelastungEigenspannungen IPE 500:.....	81
Abbildung 8-12:Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (0/1/0)) .....	81
Abbildung 8-13: System und BelastungEigenspannungen IPE 500:.....	82

Abbildung 8-14: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/1/-1)) .....	82
Abbildung 8-15: System und Belastung.....	83
Abbildung 8-16: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/0,5/-1)) .....	83
Abbildung 8-17: System und Belastung.....	84
Abbildung 8-18: Vergleich Taras/Greiner mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1)) .....	84
Abbildung 9-1: System und Belastung.....	89
Abbildung 9-2: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter positiver Momentenverlauf) .....	89
Abbildung 9-3: System und Belastung.....	90
Abbildung 9-4: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )) .....	90
Abbildung 9-5: System und Belastung.....	91
Abbildung 9-6: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )) .....	91
Abbildung 9-7: Verhältnis der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-8).....	93
Abbildung 9-8: System und Belastung.....	94
Abbildung 9-9: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; positiver parabolischer Momentenverlauf (0/1/0)).....	94
Abbildung 9-10: Verhältnis der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-11).....	95
Abbildung 9-11: System und Belastung.....	96
Abbildung 9-12: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/1/-1)) .....	96
Abbildung 9-13: Verhältnisse der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-14).....	97
Abbildung 9-14: System und Belastung.....	98



Abbildung 9-15: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; parabolisch durchschlagender Momentenverlauf (-1/0,5/-1)) .....	98
Abbildung 9-16: Verhältnisse der GMNIA zu EC 3 Kapitel 6.2.3.2 (System und Belastung siehe Abbildung 9-17) .....	99
Abbildung 9-17: System und Belastung .....	100
Abbildung 9-18: Vergleich Vorschlag Tappauf mit GMNIA-Analysen (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; negativer parabolischer Momentenverlauf (-1/0/-1)) .....	100
Abbildung 9-19: Werte für die Konstante C .....	102
Abbildung A-0-1: System und Belastung .....	2
Abbildung A-0-2: Vergleich dreier FE-Netze (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf) .....	2

## 11.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1 [6.3]: Empfohlene Imperfektionsbeiwerte der Knicklinien für das Biegedrillknicken .....	23
Tabelle 4-2 [6.4]: Empfohlene Knicklinien für das Biegedrillknicken .....	23
Tabelle 4-3 [6.5]: Empfohlene Biegedrillknicklinien.....	24
Tabelle 4-4 [6.6]: Empfohlene Korrekturbeiwerte $k_c$ .....	25
Tabelle 4-5: Endmomentenbelastungen, Werte für $C_1$ und $C_3$ (ÖNORM B 1993-1-1, Tabelle 2) .....	33
Tabelle 4-6: Querbelastung, Werte für $C_1$ , $C_2$ und $C_3$ (ÖNORM B 1993-1-1, Tabelle 3) .	33
Tabelle 8-1: Korrekturbeiwerte $\varphi$ für unterschiedliche Momentenverläufe .....	75
Tabelle 9-1: mit Hilfe der GMNIA-Analyse abgeleitete Werte für $\zeta_{2rest}$ .....	103

## 11.3. Literaturverzeichnis

- [1] ABAQUS, v.6v9, Dassault Systems/Simula, Providence, RA, USA, 2009.
- [2] Beer, G.: Vorlesungsskriptum – Finite Elemente, Institut für Baustatik der TU Graz, 2009.
- [3] Beer, G.: Vorlesungsskriptum – Finite Elemente VU, Introduction to nonlinear finite element analysis, Institut für Baustatik der TU Graz, 2009.
- [4] ECCS: Ultimate Limit State Calculation of Sway Frames with Rigid Joints. Editor: Vogel, U.; European Conference for Constructural Steelwork, Brussel, 1984.
- [5] Fritsch, R., Pasternak, H.: Stahlbau – Grundlagen und Tragwerke, Verlag Vieweg Braunschweig/Wiesbaden, 1999.
- [6] Greiner, R.: Neue Erkenntnisse zum Tragverhalten von Stäben und Angepasste EC3-Bemessungsregeln – Teil 1: Biegeknicken 23. Stahlbauseminar 2001, Veröffentlichung der Fachhochschule Biberach.
- [7] Greiner, R., Neue Erkenntnisse zum Tragverhalten von Stäben und Angepasste EC3-Bemessungsregeln – Teil2: Biegedrillknicken 23. Stahlbauseminar 2001, Veröffentlichung der Fachhochschule Biberach
- [8] Greiner, R.: Vorlesungsskriptum – Stahlbau GL, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz, 2007.

- [9] Greiner, R., Unterweger, H.: Vorlesungsskriptum – Stahlbau, Institut für Stahlbau und Flächentragwerke der TU Graz, 2007.
- [10] Kindmann, R., Kraus, M., Niebuhr J.: Stahlbau kompakt. Bemessungshilfen und Profiltabellen, Verlag Stahleisen, Düsseldorf, 2008.
- [11] Kindmann, R.: Stahlbau Teil 2: Stabilität und Theorie 2. Ordnung, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2008.
- [12] Krüger U.: Stahlbau Teil 2: Stabilitätslehre, Stahlhochbau und Industriebau, Verlag Ernst und Sohn, Berlin, 2000.
- [13] ÖNORM EN 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln für den Hochbau, 2006.
- [14] ÖNORM B 1993-1-1: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln, 2007.
- [15] Petersen, C.: Statik und Stabilität der Baukonstruktionen, Verlag Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1982.
- [16] Taras, A.: Contribution to the Development of Consistent Stability Design Rules for Steel Members, Institutsveröffentlichung der Dissertation, 2010.
- [17] Taras, A.: Entwicklung realitätsnaher Abminderungsfaktoren für das Biegedrillknicken, 1. Grazer Stahlbautag, 2012.
- [18] Wagenknecht, G.: Stahlbau Praxis – Band 1, Verlag Bauwerk, ORT, 2005.



## Anhang A

### A1 – Vergleich dreier FE-Netze für ein Anwendungsbeispiel

#### Netz 1:

Gurte: **16** Schalenelemente über die Breite ( $b_{el} = 1,25$  cm)

Steg: **32** Schalenelemente über die Höhe ( $b_{el} = 1,46$  cm)

Die Länge des Trägers wurde gleichmäßig auf **100** Elemente aufgeteilt.

#### Netz 2:

Gurte: **16** Schalenelemente über die Breite ( $b_{el} = 1,25$  cm)

Steg: **32** Schalenelemente über die Höhe ( $b_{el} = 1,46$  cm)

Die Länge des Trägers wurde gleichmäßig auf **1000** Elemente aufgeteilt.

#### Netz 3:

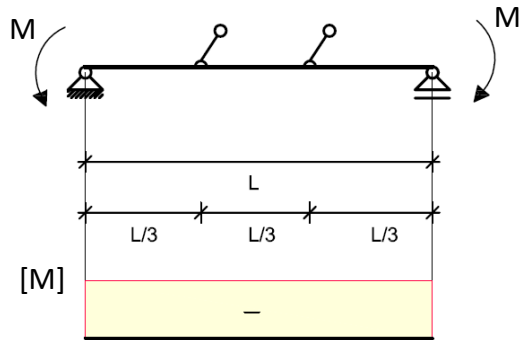
Gurte: **8** Schalenelemente über die Breite ( $b_{el} = 2,5$  cm)

Steg: **20** Schalenelemente über die Höhe ( $b_{el} = 2,34$  cm)

Die Länge des Trägers wurde gleichmäßig auf **400** Elemente aufgeteilt.

Der Vergleich der drei FE-Netze erfolgte für einen 12,5 m langen Einfeldträger des Querschnittes IPE 500 mit zwei zusätzlichen Halterungen am Obergurt unter konstanter negativer Momentenbelastung (Zuggurt gehalten).

System + Belastung:



Eigenspannungen IPE 500:

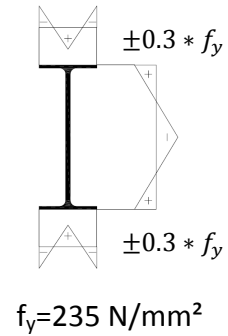


Abbildung A-0-1: System und Belastung

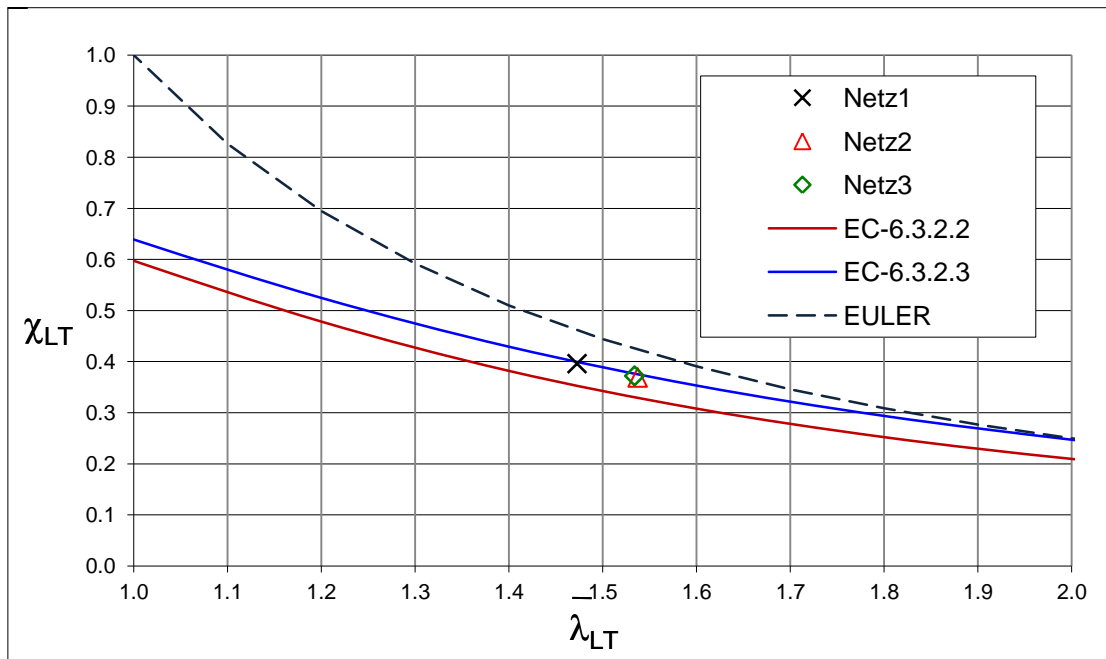


Abbildung A-0-2: Vergleich dreier FE-Netze (Querschnitt IPE 500; 2 zusätzliche Halterungen am Obergurt; konstanter negativer Momentenverlauf)

L	FE-Netz 1		FE-Netz 2		FE-Netz 3	
	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$
[m]	[m]	[-]	[m]	[-]	[m]	[-]
<b>12.5</b>	1.473	<b>0.396</b>	1.537	<b>0.369</b>	1.535	<b>0.372</b>

## A2 – Ergänzungen zu Kapitel 5.1

### A 2.1 Ergänzungen zu Kapitel 5.1.1

Die Berechnungen in Kapitel 5.1 werden mit folgenden Eingangsparametern durchgeführt.

Anwendung von Formel (4-10) zur Ermittlung von  $M_{cr}$

L            Stablänge zwischen Punkten mit seitlicher Halterung – ident zur Länge des Gesamtstabes (hier keine zusätzlichen Zwischenhalterungen)

$k_z =$         1,0                            für gelenkige Lagerung

$k_w =$         1,0                            für freie Verwölbbarkeit

$z_g =$         25 cm

$C_1$             Beiwert gemäß Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 für verschiedene Lastfälle (jeweils in der Ergebnistabelle angegeben)

$C_2$             Beiwert gemäß Tabelle 4-5 und Tabelle 4-6 für verschiedene Lastfälle (jeweils in der Ergebnistabelle angegeben)

$k_c$             Beiwert gemäß Tabelle 4-4 (jeweils in der Ergebnistabelle angegeben)

IPE 500:

$I_z =$         2142         $\text{cm}^4$

$I_y =$         48199      $\text{cm}^4$

$I_t =$         88,62       $\text{cm}^4$

$E =$         210000     $\text{N/mm}^2$

$G =$         80769      $\text{N/mm}^2$

Anwendung von Formel (4-10) zur Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$

$M_R = M_{pl} = 515 \text{ kNm}$

Anwendung Nachweis N1:

Profil IPE 500                       $h/b > 2$                       Knicklinie b ( $\alpha_{LT} = 0,34$ )

Anwendung Nachweis N2:

Profil IPE 500                       $h/b > 2$                       Biegedrillknicklinie c ( $\alpha_{LT} = 0,49$ )

Zahlenwerte zu Abbildung 5-2 – konstanter positiver Momentenverlauf

Abaqus				EC ÖNORM B1993-1-1		EN 1993-1-1	
				6.7.1		6.3.2.2	6.3.2.3
LBA		GMNIA	$C_1$	1	$\alpha_{LT} = 0.34$	$\alpha_{LT} = 0.49$	
			$C_2$	0		$k_c = 1$	
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$ (N1)	$\chi$ (N2)
[m]	[kNm]	[-]	[-]	[kNm]	[-]	[-]	[-]
5	554.58	<b>0.96</b>	<b>0.63</b>	557.71	<b>0.96</b>	<b>0.62</b>	<b>0.66</b>
10	207.35	<b>1.58</b>	<b>0.35</b>	208.02	<b>1.57</b>	<b>0.32</b>	<b>0.36</b>
15	127.66	<b>2.01</b>	<b>0.24</b>	128.04	<b>2.01</b>	<b>0.21</b>	<b>0.25</b>
20	92.85	<b>2.36</b>	<b>0.19</b>	93.07	<b>2.35</b>	<b>0.16</b>	<b>0.18</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 5-4 – positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf

Abaqus				EC ÖNORM B1993-1-1		EN 1993-1-1	
				6.7.1		6.3.2.2	6.3.2.3
LBA		GMNIA	$C_1$	1.85	$\alpha_{LT} = 0.34$	$\alpha_{LT} = 0.49$	
			$C_2$	0		$k_c = 0.75$	
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$ (N1)	$\chi$ (N2)
[m]	[kNm]	[-]	[-]	[kNm]	[-]	[-]	[-]
5	1010.17	<b>0.71</b>	<b>0.94</b>	1030.10	<b>0.71</b>	<b>0.78</b>	<b>0.94</b>
10	377.70	<b>1.17</b>	<b>0.60</b>	384.22	<b>1.16</b>	<b>0.49</b>	<b>0.60</b>
15	230.61	<b>1.50</b>	<b>0.41</b>	236.49	<b>1.48</b>	<b>0.34</b>	<b>0.40</b>
20	166.74	<b>1.76</b>	<b>0.32</b>	171.91	<b>1.73</b>	<b>0.26</b>	<b>0.31</b>



Zahlenwerte zu Abbildung 5-6 – durchschlagender linearer Momentenverlauf

Abaqus				EC ÖNORM B1993-1-1		EN 1993-1-1	
				6.7.1		6.3.2.2	6.3.2.3
LBA		GMNIA	C <sub>1</sub>	2.73	$\alpha_{LT} = 0.34$	$\alpha_{LT} = 0.49$	
			C <sub>2</sub>	0		$k_c = 0.60$	
L	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$ (N1)	$\chi$ (N2)
[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	555.56	<b>0.96</b>	<b>0.77</b>	568.52	<b>0.95</b>	<b>0.61</b>	<b>0.83</b>
15	340.28	<b>1.23</b>	<b>0.55</b>	349.93	<b>1.21</b>	<b>0.46</b>	<b>0.60</b>
20	245.37	<b>1.45</b>	<b>0.43</b>	254.37	<b>1.42</b>	<b>0.36</b>	<b>0.44</b>
25	192.11	<b>1.64</b>	<b>0.36</b>	200.44	<b>1.60</b>	<b>0.29</b>	<b>0.35</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 5-8 – parabolischer Momentenverlauf zufolge Querlast am Obergurt

Abaqus				EC ÖNORM B1993-1-1		EN 1993-1-1	
				6.7.1		6.3.2.2	6.3.2.3
LBA		GMNIA	C <sub>1</sub>	1.13	$\alpha_{LT} = 0.34$	$\alpha_{LT} = 0.49$	
			C <sub>2</sub>	0.46		$k_c = 0.94$	
L	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi$ (N1)	$\chi$ (N2)
[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	186.24	<b>1.66</b>	<b>0.31</b>	184.77	<b>1.67</b>	<b>0.29</b>	<b>0.33</b>
15	122.19	<b>2.05</b>	<b>0.22</b>	121.56	<b>2.06</b>	<b>0.20</b>	<b>0.24</b>
20	92.22	<b>2.36</b>	<b>0.19</b>	91.92	<b>2.37</b>	<b>0.15</b>	<b>0.18</b>

## A 2.2 Ergänzungen zu Kapitel 5.1.2

Hinweise zu Nachweis N3

$$\bar{\lambda}_f = \frac{k_c L_c}{i_{f,z} \lambda_1} \quad (4-6) [6.59]$$

$L_c$  Stablänge zwischen Punkten mit seitlicher Halterung – ident zur Länge des Gesamtstabes (hier keine zusätzlichen Zwischenhalterungen)

$k_c$  Beiwert gemäß Tabelle 4-4 (jeweils in der Ergebnisstabelle angegeben)

$\lambda_1$  93,9

Profil IPE 500

$i_{f,z}$  4,96 cm (Berücksichtigung von Gurt + 1/5 des Steges)

$h/b > 2$  Biegedrillknicklinie c ( $\alpha_{LT} = 0,49$ )

$$\chi^* = k_{fl} * \chi$$

Zahlenwerte zu Abbildung 5-10 – konstanter positiver Momentenverlauf

	Abaqus		Nachweis N3 EN 1993-1-1 6.2.3.4			
	LBA	GMNIA	$k_c = 1$	$\alpha_{LT} = 0.49$	$k_{fl} = 1.1$	
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\bar{\lambda}_f$	$\Phi$	$\chi^*$
[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
<b>5</b>	554.58	0.96	<b>0.63</b>	1.07	1.29	<b>0.55</b>
<b>10</b>	207.35	1.58	<b>0.35</b>	2.15	3.28	<b>0.19</b>
<b>15</b>	127.66	2.01	<b>0.24</b>	3.22	6.42	<b>0.09</b>
<b>20</b>	92.85	2.36	<b>0.19</b>	4.29	10.71	<b>0.05</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 5-12 – positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf

		Abaqus		Nachweis N3 EN 1993-1-1 6.2.3.4		
		LBA	GMNIA	$k_c = 0.75$	$\alpha_{LT} = 0.49$	$k_{fl} = 1.1$
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\bar{\lambda}_f$	$\Phi$	$\chi^*$
[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
<b>5</b>	1010.17	0.71	<b>0.94</b>	0.81	0.97	<b>0.72</b>
<b>10</b>	377.70	1.58	<b>0.60</b>	1.61	2.15	<b>0.31</b>
<b>15</b>	230.61	2.01	<b>0.41</b>	2.42	3.97	<b>0.15</b>
<b>20</b>	166.74	2.36	<b>0.32</b>	3.23	6.45	<b>0.09</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 5-14 – durchschlagender linearer Momentenverlauf

		Abaqus		Nachweis N3 EN 1993-1-1 6.2.3.4		
		LBA	GMNIA	$k_c = 0.6$	$\alpha_{LT} = 0.49$	$k_{fl} = 1.1$
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\bar{\lambda}_f$	$\Phi$	$\chi^*$
[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
<b>5</b>				0.65	0.82	<b>0.83</b>
<b>10</b>	555.56	0.96	<b>0.77</b>	1.29	1.60	<b>0.43</b>
<b>15</b>	340.28	1.23	<b>0.55</b>	1.94	2.81	<b>0.23</b>
<b>20</b>	245.37	1.45	<b>0.43</b>	2.59	4.43	<b>0.14</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 5-16 – parabolischer Momentenverlauf zufolge Querlast am Obergurt

		Abaqus		Nachweis N3 EN 1993-1-1 6.2.3.4		
		LBA	GMNIA	$k_c = 0.94$	$\alpha_{LT} = 0.49$	$k_{fl} = 1.1$
L	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\bar{\lambda}_f$	$\Phi$	$\chi^*$
[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
<b>10</b>	555.56	1.66	<b>0.31</b>	2.02	2.98	<b>0.21</b>
<b>15</b>	340.28	2.05	<b>0.22</b>	3.03	5.77	<b>0.10</b>
<b>20</b>	245.37	2.36	<b>0.19</b>	4.03	9.58	<b>0.06</b>

## A3 – Zusätzliche Ergänzungen zu Kapitel 1

Zahlenwerte zu Abbildung 6-2 – konstanter positiver Momentenverlauf

	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
L	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>5</b>	5.00	<b>0.63</b>	1.67	<b>0.94</b>	1.25	<b>1.00</b>
<b>10</b>	10.00	<b>0.35</b>	3.33	<b>0.80</b>	2.50	<b>0.88</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.24</b>	5.00	<b>0.63</b>	3.75	<b>0.75</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.19</b>	6.67	<b>0.52</b>	5.00	<b>0.63</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-4 – konstanter negativer Momentenverlauf

	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
L	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>5</b>	5.00	<b>0.63</b>	1.67	<b>0.65</b>	1.25	<b>0.65</b>
<b>10</b>	10.00	<b>0.35</b>	3.33	<b>0.42</b>	2.50	<b>0.42</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.24</b>	5.00	<b>0.34</b>	3.75	<b>0.34</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.19</b>	6.67	<b>0.29</b>	5.00	<b>0.29</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-6 – positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf

	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
L	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.35</b>	3.33	<b>0.97</b>	2.50	<b>0.99</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.24</b>	5.00	<b>0.82</b>	3.75	<b>0.92</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.19</b>	6.67	<b>0.69</b>	5.00	<b>0.79</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-8 – linearer durchschlagender Momentenverlauf

	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
L	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.77</b>	3.33	<b>0.88</b>	2.50	<b>0.89</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.55</b>	5.00	<b>0.67</b>	3.75	<b>0.70</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.43</b>	6.67	<b>0.54</b>	5.00	<b>0.58</b>
<b>25</b>	25.00	<b>0.36</b>	8.33	<b>0.46</b>	1.64	<b>0.50</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-10 – positiver parabolischer Momentenverlauf

L	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.31</b>	3.33	<b>0.90</b>	2.50	
<b>15</b>	15.00	<b>0.22</b>	5.00	<b>0.73</b>	3.75	<b>0.87</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.19</b>	6.67	<b>0.59</b>	5.00	<b>0.74</b>
<b>25</b>	25.00	<b>0.17</b>	8.33	<b>0.47</b>	6.25	<b>0.63</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-12 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/1/-1)

L	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.27</b>	3.33	<b>0.79</b>	2.50	<b>0.89</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.21</b>	5.00	<b>0.54</b>	3.75	<b>0.69</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.18</b>	6.67	<b>0.40</b>	5.00	<b>0.54</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-14 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/05/-1)

L	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.45</b>	3.33	<b>0.85</b>	2.50	<b>0.88</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.36</b>	5.00	<b>0.63</b>	3.75	<b>0.68</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.33</b>	6.67	<b>0.50</b>	5.00	<b>0.57</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 6-16 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0/-1)

L	keine Halterungen		2 Halterungen		3 Halterungen	
	$L_c$	$\chi_{free}$	$L_c$	$\chi_{2rest}$	$L_c$	$\chi_{3rest}$
[m]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]	[m]	[ - ]
<b>10</b>	10.00	<b>0.71</b>	3.33	<b>0.73</b>	2.50	<b>0.75</b>
<b>15</b>	15.00	<b>0.57</b>	5.00	<b>0.57</b>	3.75	<b>0.59</b>
<b>20</b>	20.00	<b>0.49</b>	6.67	<b>0.49</b>	5.00	<b>0.51</b>

## A4 - Ergänzungen zu Kapitel 7

Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_R}{M_{cr}}}$$

$M_R = M_{pl} = 515 \text{ kNm}$  (IPE 500)

$M_{cr}$  numerisch mithilfe des Softwarepakets ABAQUS ermittelt (LBA)

Anwendung Nachweis N1:

Profil IPE 500       $h/b > 2$       Knicklinie b ( $\alpha_{LT} = 0,34$ )

Anwendung Nachweis N2:

Profil IPE 500       $h/b > 2$       Biegedrillknicklinie c ( $\alpha_{LT} = 0,49$ )

Anmerkung:  $k_c$  nur vereinzelt berücksichtigt

### A 4.1 Ergänzungen zu Kapitel 7.2

Zahlenwerte zu Abbildung 7-2 – konstantes positives Moment

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
5	1.67	381842	<b>0.37</b>	<b>0.94</b>	0.60	<b>0.94</b>	0.54	<b>1.00</b>
10	3.33	108812	<b>0.69</b>	<b>0.80</b>	0.82	<b>0.79</b>	0.75	<b>0.83</b>
15	5.00	55344	<b>0.97</b>	<b>0.63</b>	1.10	<b>0.62</b>	0.99	<b>0.66</b>
20	6.67	35831	<b>1.20</b>	<b>0.52</b>	1.39	<b>0.48</b>	1.24	<b>0.53</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-4 – Positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	157748	<b>0.57</b>	<b>0.97</b>	0.73	<b>0.85</b>	0.66	<b>0.90</b>
15	5.00	79689	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	0.93	<b>0.72</b>	0.84	<b>0.76</b>
20	6.67	51043	<b>1.01</b>	<b>0.69</b>	1.14	<b>0.59</b>	1.03	<b>0.64</b>
25	8.33	37090	<b>1.18</b>	<b>0.56</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.21	<b>0.54</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-5 – Positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )  
( $k_c$  berücksichtigt)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=0.9$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	157748	<b>0.57</b>	<b>0.97</b>	0.73	<b>0.85</b>	0.66	<b>0.94</b>
15	5.00	79689	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	0.93	<b>0.72</b>	0.84	<b>0.80</b>
20	6.67	51043	<b>1.01</b>	<b>0.69</b>	1.14	<b>0.59</b>	1.03	<b>0.67</b>
25	8.33	37090	<b>1.18</b>	<b>0.56</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.21	<b>0.56</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-7 – linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	725.48	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>	0.96	<b>0.70</b>	0.88	<b>0.74</b>
15	5.00	455.71	<b>1.06</b>	<b>0.67</b>	1.21	<b>0.56</b>	1.09	<b>0.60</b>
20	6.67	342.25	<b>1.23</b>	<b>0.54</b>	1.43	<b>0.46</b>	1.27	<b>0.51</b>
25	8.33	278.35	<b>1.36</b>	<b>0.46</b>	1.62	<b>0.40</b>	1.43	<b>0.45</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-8 – linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )  
( $k_c$  berücksichtigt)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=0.6$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	725.48	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>	0.96	<b>0.70</b>	0.88	<b>0.92</b>
15	5.00	455.71	<b>1.06</b>	<b>0.67</b>	1.21	<b>0.56</b>	1.09	<b>0.73</b>
20	6.67	342.25	<b>1.23</b>	<b>0.54</b>	1.43	<b>0.46</b>	1.27	<b>0.58</b>
25	8.33	278.35	<b>1.36</b>	<b>0.46</b>	1.62	<b>0.40</b>	1.43	<b>0.48</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-10 – konstanter negativer Momentenverlauf

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
5	1.67	577.78	<b>0.94</b>	<b>0.65</b>	1.07	<b>0.63</b>	0.97	<b>0.67</b>
10	3.33	258.07	<b>1.41</b>	<b>0.42</b>	1.71	<b>0.38</b>	1.50	<b>0.42</b>
15	5.00	198.16	<b>1.61</b>	<b>0.34</b>	2.04	<b>0.30</b>	1.77	<b>0.35</b>
20	6.67	176.91	<b>1.71</b>	<b>0.29</b>	2.21	<b>0.28</b>	1.91	<b>0.32</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-12 – negativer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )  
( $k_c$  berücksichtigt)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=0.75$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	450.08	<b>1.07</b>	<b>0.68</b>	1.22	<b>0.55</b>	1.09	<b>0.67</b>
15	5.00	323.27	<b>1.26</b>	<b>0.53</b>	1.48	<b>0.45</b>	1.31	<b>0.53</b>
20	6.67	268.18	<b>1.39</b>	<b>0.44</b>	1.66	<b>0.39</b>	1.46	<b>0.45</b>
25	8.33	234.23	<b>1.48</b>	<b>0.39</b>	1.82	<b>0.35</b>	1.59	<b>0.40</b>



## A 4.2 Ergänzungen zu Kapitel 7.3

Zahlenwerte zu Abbildung 7-14 – positiver parabolischer Momentenverlauf

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	1257.68	<b>0.64</b>	<b>0.90</b>	0.78	<b>0.82</b>	0.71	<b>0.86</b>
15	5.00	646.40	<b>0.89</b>	<b>0.73</b>	1.02	<b>0.67</b>	0.92	<b>0.71</b>
20	6.67	419.34	<b>1.11</b>	<b>0.59</b>	1.27	<b>0.53</b>	1.13	<b>0.57</b>
25	8.33	307.68	<b>1.29</b>	<b>0.47</b>	1.52	<b>0.43</b>	1.35	<b>0.48</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-16 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/1/-1)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	614.90	<b>0.92</b>	<b>0.79</b>	1.04	<b>0.65</b>	0.94	<b>0.69</b>
15	5.00	384.50	<b>1.16</b>	<b>0.54</b>	1.33	<b>0.50</b>	1.19	<b>0.55</b>
20	6.67	276.92	<b>1.36</b>	<b>0.40</b>	1.63	<b>0.40</b>	1.43	<b>0.44</b>
25	8.33	216.31	<b>1.54</b>	<b>0.31</b>	1.92	<b>0.33</b>	1.67	<b>0.37</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-18 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0,5/-1)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	545.71	<b>0.97</b>	<b>0.85</b>	1.10	<b>0.61</b>	0.99	<b>0.66</b>
15	5.00	372.49	<b>1.18</b>	<b>0.63</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.21	<b>0.54</b>
20	6.67	289.71	<b>1.33</b>	<b>0.50</b>	1.58	<b>0.41</b>	1.40	<b>0.46</b>
25	8.33	239.51	<b>1.47</b>	<b>0.42</b>	1.79	<b>0.35</b>	1.57	<b>0.40</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 7-20 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0/-1)

		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 $\alpha_{LT} = 0.49$ ( $k_c=1$ )	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	433.23	<b>1.09</b>	<b>0.73</b>	1.25	<b>0.54</b>	1.12	<b>0.59</b>
15	5.00	317.02	<b>1.28</b>	<b>0.57</b>	1.50	<b>0.44</b>	1.32	<b>0.49</b>
20	6.67	264.45	<b>1.40</b>	<b>0.49</b>	1.68	<b>0.38</b>	1.48	<b>0.43</b>
25	8.33	230.93	<b>1.49</b>	<b>0.44</b>	1.84	<b>0.34</b>	1.61	<b>0.39</b>

## A5 – Ergänzungen zu Kapitel 8

### A 5.1 – Ergänzungen zu Kapitel 8.2

Zahlenwerte zu Abbildung 8-2 – konstantes positives Moment

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
5	1.67	381842	<b>0.37</b>	<b>0.94</b>	0.60	<b>0.94</b>	0.58	<b>0.96</b>
10	3.33	108812	<b>0.69</b>	<b>0.80</b>	0.81	<b>0.80</b>	0.77	<b>0.90</b>
15	5.00	55344	<b>0.97</b>	<b>0.63</b>	1.08	<b>0.64</b>	1.01	<b>0.77</b>
20	6.67	35831	<b>1.20</b>	<b>0.52</b>	1.36	<b>0.50</b>	1.27	<b>0.59</b>
25	8.33	26295	<b>1.40</b>	<b>0.42</b>	1.63	<b>0.40</b>	1.53	<b>0.46</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-4 – positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.16$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.25$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	3.33	157748	<b>0.57</b>	<b>0.97</b>	0.74	<b>0.95</b>	0.73	<b>1.15</b>
15	5.00	79689	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	0.95	<b>0.82</b>	0.94	<b>1.03</b>
20	6.67	51043	<b>1.01</b>	<b>0.69</b>	1.17	<b>0.67</b>	1.17	<b>0.82</b>
25	8.33	37090	<b>1.18</b>	<b>0.56</b>	1.40	<b>0.55</b>	1.42	<b>0.65</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-6 – linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.2$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.2$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	3.33	725.48	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>	1.07	<b>0.75</b>	0.98	<b>0.91</b>
15	5.00	455.71	<b>1.06</b>	<b>0.67</b>	1.34	<b>0.60</b>	1.24	<b>0.72</b>
20	6.67	342.25	<b>1.23</b>	<b>0.54</b>	1.58	<b>0.50</b>	1.47	<b>0.59</b>
25	8.33	278.35	<b>1.36</b>	<b>0.46</b>	1.79	<b>0.43</b>	1.67	<b>0.49</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-8 – konstanter negativer Momentenverlauf

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1$	$\lambda_z$ für L/3	$\varphi=1$	$\lambda_z$ für L
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
5	1.67	577.78	<b>0.94</b>	<b>0.65</b>	1.14	<b>0.56</b>	1.05	<b>0.66</b>
10	3.33	258.07	<b>1.41</b>	<b>0.42</b>	1.82	<b>0.34</b>	1.63	<b>0.41</b>
15	5.00	198.16	<b>1.61</b>	<b>0.34</b>	2.11	<b>0.29</b>	1.92	<b>0.34</b>
20	6.67	176.91	<b>1.71</b>	<b>0.29</b>	2.23	<b>0.27</b>	2.06	<b>0.31</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-10 – negativer dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.12$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.25$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	3.33	450.08	<b>1.07</b>	<b>0.68</b>	1.35	<b>0.54</b>	1.31	<b>0.68</b>
15	5.00	323.27	<b>1.26</b>	<b>0.53</b>	1.61	<b>0.45</b>	1.59	<b>0.54</b>
20	6.67	268.18	<b>1.39</b>	<b>0.44</b>	1.78	<b>0.40</b>	1.78	<b>0.47</b>
25	8.33	234.23	<b>1.48</b>	<b>0.39</b>	1.92	<b>0.37</b>	1.95	<b>0.42</b>

## A 5.2 – Ergänzungen zu Kapitel 8.3

Zahlenwerte zu Abbildung 8-12 – positiver parabolischer Momentenverlauf

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
		$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.05$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.25$	$\bar{\lambda}_z$ für L
L	L/3				$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	1257.68	<b>0.64</b>	<b>0.90</b>	0.79	<b>0.86</b>	0.74	<b>0.96</b>
15	5.00	646.40	<b>0.89</b>	<b>0.73</b>	1.02	<b>0.71</b>	0.96	<b>0.85</b>
20	6.67	419.34	<b>1.11</b>	<b>0.59</b>	1.27	<b>0.57</b>	1.19	<b>0.68</b>
25	8.33	307.68	<b>1.29</b>	<b>0.47</b>	1.52	<b>0.47</b>	1.43	<b>0.54</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-14 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/1/-1)

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
		$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.05$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L
L	L/3				$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	614.90	<b>0.92</b>	<b>0.79</b>	1.06	<b>0.63</b>	1.00	<b>0.79</b>
15	5.00	384.50	<b>1.16</b>	<b>0.54</b>	1.33	<b>0.50</b>	1.27	<b>0.61</b>
20	6.67	276.92	<b>1.36</b>	<b>0.40</b>	1.61	<b>0.41</b>	1.55	<b>0.48</b>
25	8.33	216.31	<b>1.54</b>	<b>0.31</b>	1.88	<b>0.34</b>	1.83	<b>0.39</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-16 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0,5/-1)

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
		$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.9$	$\bar{\lambda}_z$ für L
L	L/3				$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	545.71	<b>0.97</b>	<b>0.85</b>	1.13	<b>0.59</b>	1.52	<b>0.85</b>
15	5.00	372.49	<b>1.18</b>	<b>0.63</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.93	<b>0.64</b>
20	6.67	289.71	<b>1.33</b>	<b>0.50</b>	1.56	<b>0.42</b>	2.31	<b>0.51</b>
25	8.33	239.51	<b>1.47</b>	<b>0.42</b>	1.74	<b>0.37</b>	2.66	<b>0.43</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 8-18 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0/-1)

		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=2.2$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	3.33	433.23	<b>1.09</b>	<b>0.73</b>	1.29	<b>0.51</b>	1.86	<b>0.70</b>
15	5.00	317.02	<b>1.28</b>	<b>0.57</b>	1.51	<b>0.43</b>	2.29	<b>0.55</b>
20	6.67	264.45	<b>1.40</b>	<b>0.49</b>	1.66	<b>0.39</b>	2.60	<b>0.47</b>
25	8.33	230.93	<b>1.49</b>	<b>0.44</b>	1.79	<b>0.36</b>	2.88	<b>0.42</b>

## A6 – Anhang zu Kapitel 9

### A 6.1 – Ergänzungen zu Kapitel 9.2

Ermittlung von  $\bar{\lambda}_{LT}$ :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{M_R}{M_{cr}}}$$

$$M_R = M_{pl} = 515 \text{ kNm}$$

$M_{cr}$  das ideale Biegedrillknickmoment für das tatsächliche System mit Zwischenhalterungen an einem Gurt wird numerisch mithilfe des Softwarepakets ABAQUS ermittelt (LBA)

Anwendung Nachweis N1:

Profil IPE 500                       $h/b > 2$                       Knicklinie b ( $\alpha_{LT} = 0,34$ )

Anwendung Vorschlag Tappauf:

Profil IPE 500                       $h/b > 2$                       Biegedrillknicklinie c ( $\alpha_{LT} = 0,34$ )

Anmerkung:                               $k_{C,2rest} = k_C + 0,05$  berücksichtigt; daher  $\chi_{mod}$

Zahlenwerte zu Abbildung 9-2 – konstantes positives Moment

		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		$k_{C,2rest}=1$ $\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
5	1.67	3818.42	<b>0.37</b>	<b>0.94</b>	0.60	<b>0.94</b>	0.59	<b>0.94</b>
10	3.33	1088.12	<b>0.69</b>	<b>0.80</b>	0.82	<b>0.79</b>	0.80	<b>0.80</b>
15	5.00	553.44	<b>0.97</b>	<b>0.63</b>	1.10	<b>0.62</b>	1.05	<b>0.64</b>
20	6.67	358.31	<b>1.20</b>	<b>0.52</b>	1.39	<b>0.48</b>	1.32	<b>0.50</b>
25	8.33	262.95	<b>1.40</b>	<b>0.42</b>	1.68	<b>0.38</b>	1.59	<b>0.41</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 9-4 – positiver dreiecksförmiger Momentenverlauf ( $\psi = 0$ )

		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		$k_{c,2rest}=0.8$	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	1577.48	<b>0.57</b>	<b>0.97</b>	0.73	<b>0.85</b>	0.71	<b>0.94</b>
15	5.00	796.89	<b>0.80</b>	<b>0.82</b>	0.93	<b>0.72</b>	0.89	<b>0.82</b>
20	6.67	510.43	<b>1.01</b>	<b>0.69</b>	1.14	<b>0.59</b>	1.09	<b>0.68</b>
25	8.33	370.90	<b>1.18</b>	<b>0.56</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.29	<b>0.56</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 9-6 – linearer durchschlagender Momentenverlauf ( $\psi = -1$ )

		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		$k_{c,2rest}=0.65$	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	725.48	<b>0.84</b>	<b>0.88</b>	0.96	<b>0.70</b>	0.93	<b>0.86</b>
15	5.00	455.71	<b>1.06</b>	<b>0.67</b>	1.21	<b>0.56</b>	1.16	<b>0.68</b>
20	6.67	342.25	<b>1.23</b>	<b>0.54</b>	1.43	<b>0.46</b>	1.35	<b>0.55</b>
25	8.33	278.35	<b>1.36</b>	<b>0.46</b>	1.62	<b>0.40</b>	1.53	<b>0.45</b>



## A – 6.2 Ergänzungen zu Kapitel 9.3

$$\chi_{LT} = \chi_{LT,N1} * \zeta_{2rest} \quad \text{jedoch} \quad \left\{ \begin{array}{l} \chi_{LT,2rest.} \leq 1 \\ \chi_{LT,2rest.} \geq \chi_{LT} \end{array} \right. \quad (0-1)$$

Dabei ist

$\chi_{LT,N1}$  der Abminderungsfaktor gemäß EC 3 Kapitel 6.3.2.2 (Nachweis N1)

Zahlenwerte zu Abbildung 9-9 – positiver parabolischer Momentenverlauf

		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2			
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi_{LT,N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi_{LT}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	1257.68	<b>0.64</b>	<b>0.90</b>	0.78	<b>0.82</b>	1.09	<b>0.89</b>
15	5.00	646.40	<b>0.89</b>	<b>0.73</b>	1.02	<b>0.67</b>	1.09	<b>0.73</b>
20	6.67	419.34	<b>1.11</b>	<b>0.59</b>	1.27	<b>0.53</b>	1.09	<b>0.58</b>
25	8.33	307.68	<b>1.29</b>	<b>0.47</b>	1.52	<b>0.43</b>	1.09	<b>0.47</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 9-12 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/1/-1)

		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2			
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi_{LT,N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi_{LT}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	614.90	<b>0.92</b>	<b>0.79</b>	1.04	<b>0.65</b>	1.18	<b>0.77</b>
15	5.00	384.50	<b>1.16</b>	<b>0.54</b>	1.33	<b>0.50</b>	1.09	<b>0.55</b>
20	6.67	276.92	<b>1.36</b>	<b>0.40</b>	1.63	<b>0.40</b>	1.00	<b>0.40</b>
25	8.33	216.31	<b>1.54</b>	<b>0.31</b>	1.92	<b>0.33</b>	0.93	<b>0.33</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 9-15 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0,5/-1)

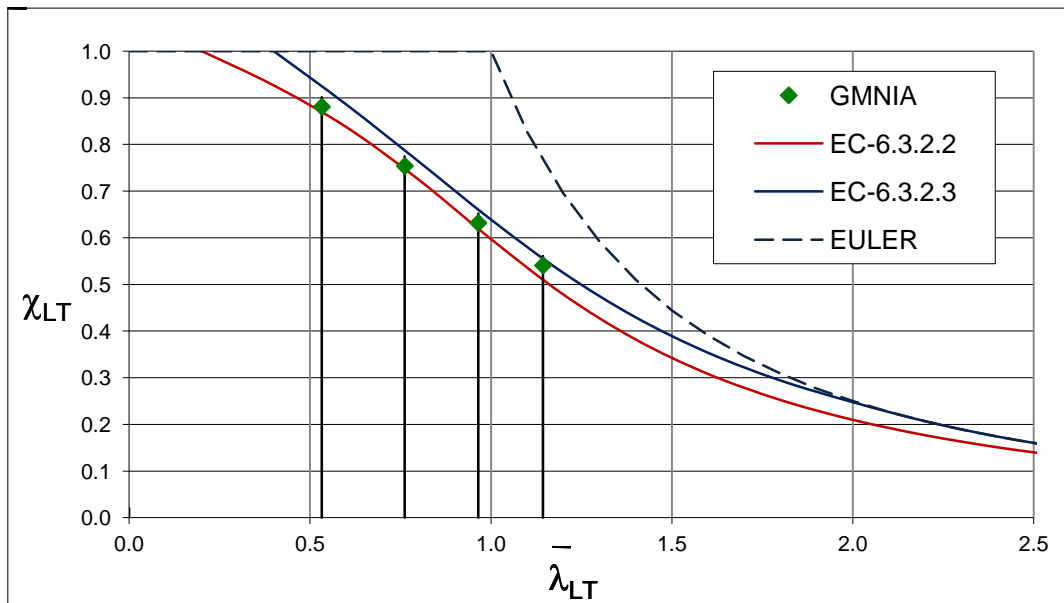
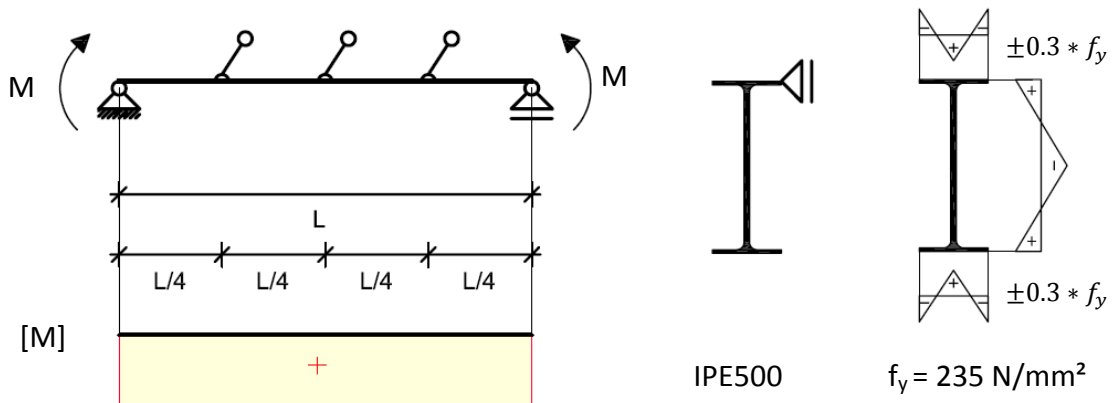
		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2			
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{Cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi_{LT,N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi_{LT}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	545.71	<b>0.97</b>	<b>0.85</b>	1.10	<b>0.61</b>	1.37	<b>0.84</b>
15	5.00	372.49	<b>1.18</b>	<b>0.63</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.29	<b>0.63</b>
20	6.67	289.71	<b>1.33</b>	<b>0.50</b>	1.58	<b>0.41</b>	1.23	<b>0.50</b>
25	8.33	239.51	<b>1.47</b>	<b>0.42</b>	1.79	<b>0.35</b>	1.17	<b>0.42</b>

Zahlenwerte zu Abbildung 9-18 – parabolisch durchschlagender Momentenverlauf  
(-1/0/-1)

		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2			
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{Cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi_{LT,N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi_{LT}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	433.23	<b>1.09</b>	<b>0.73</b>	1.25	<b>0.54</b>	1.38	<b>0.75</b>
15	5.00	317.02	<b>1.28</b>	<b>0.57</b>	1.50	<b>0.44</b>	1.31	<b>0.58</b>
20	6.67	264.45	<b>1.40</b>	<b>0.49</b>	1.68	<b>0.38</b>	1.26	<b>0.48</b>
25	8.33	230.93	<b>1.49</b>	<b>0.44</b>	1.84	<b>0.34</b>	1.22	<b>0.42</b>

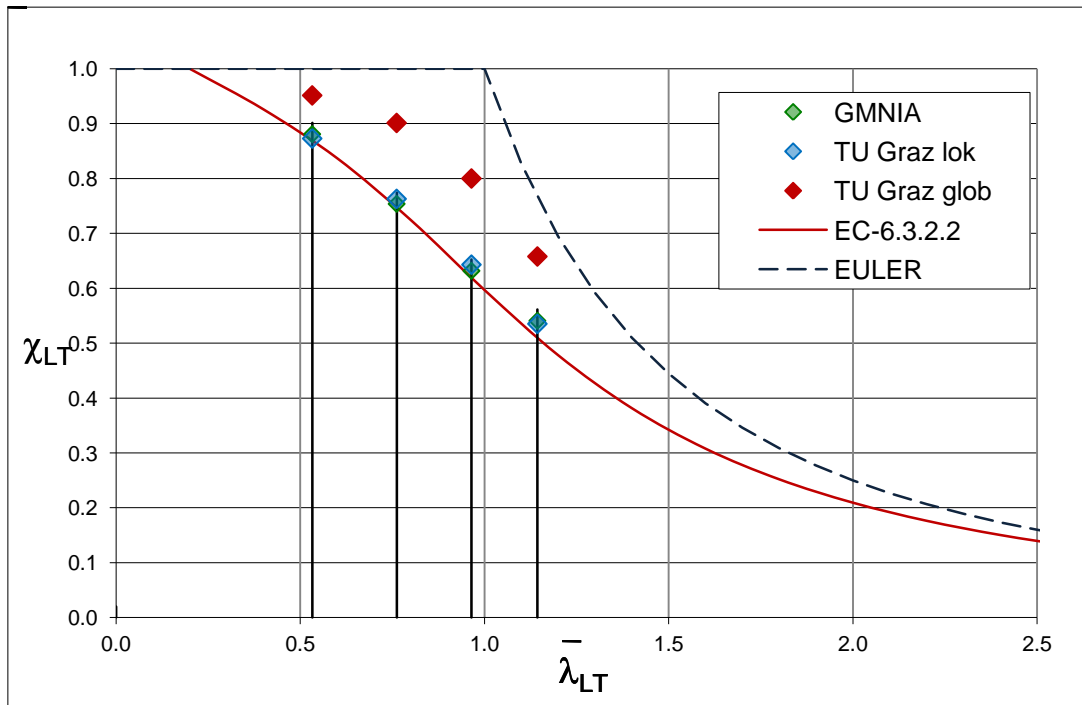
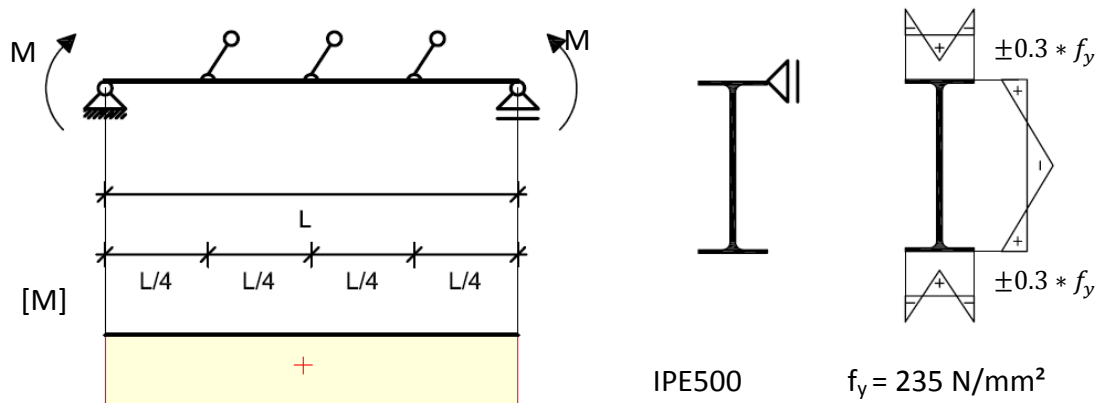
## A7 – Ergebnisse für drei Mal zusätzlich gehaltene Träger

### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



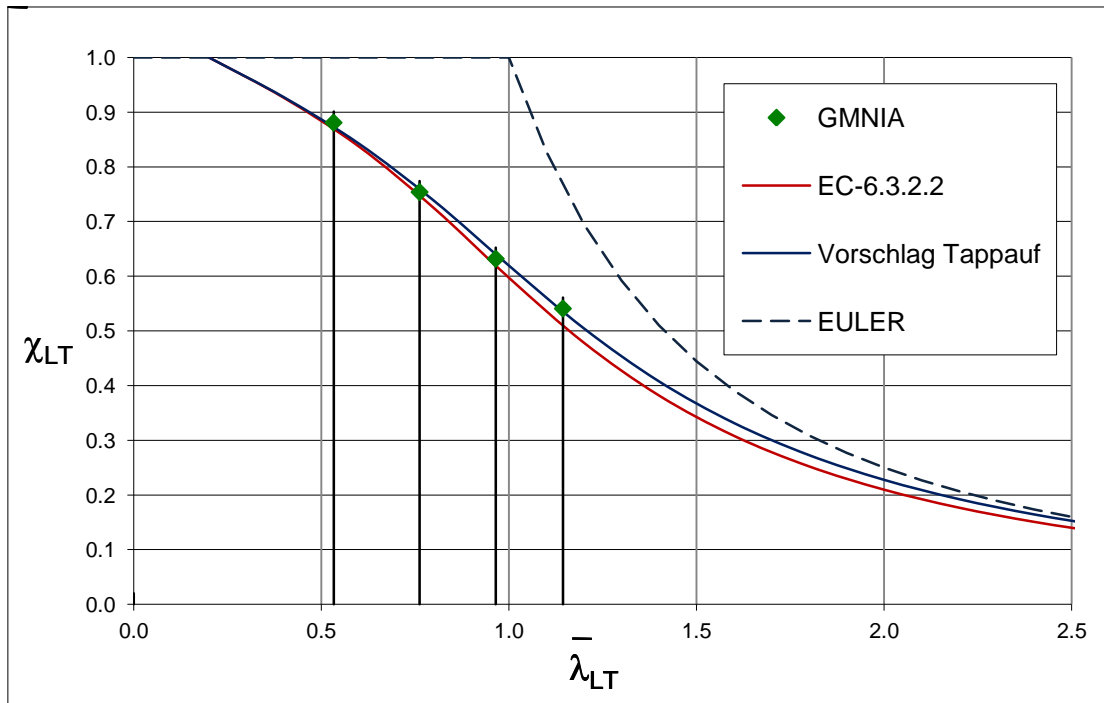
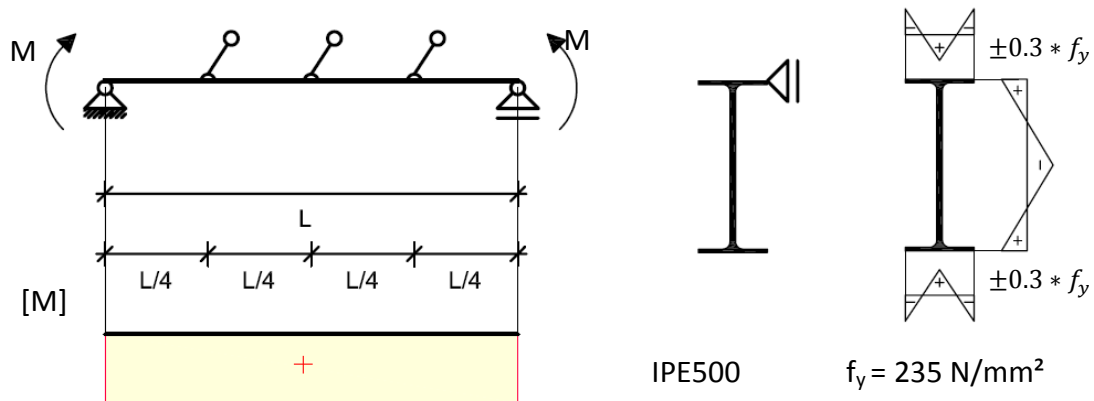
		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 ( $k_c=1$ ) $\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	1817.57	<b>0.53</b>	<b>0.88</b>	0.70	<b>0.87</b>	0.64	<b>0.93</b>
15	3.75	888.40	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>	0.89	<b>0.75</b>	0.81	<b>0.79</b>
20	5.00	553.75	<b>0.96</b>	<b>0.63</b>	1.10	<b>0.62</b>	0.99	<b>0.66</b>
25	6.25	394.03	<b>1.14</b>	<b>0.54</b>	1.31	<b>0.51</b>	1.17	<b>0.56</b>

**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



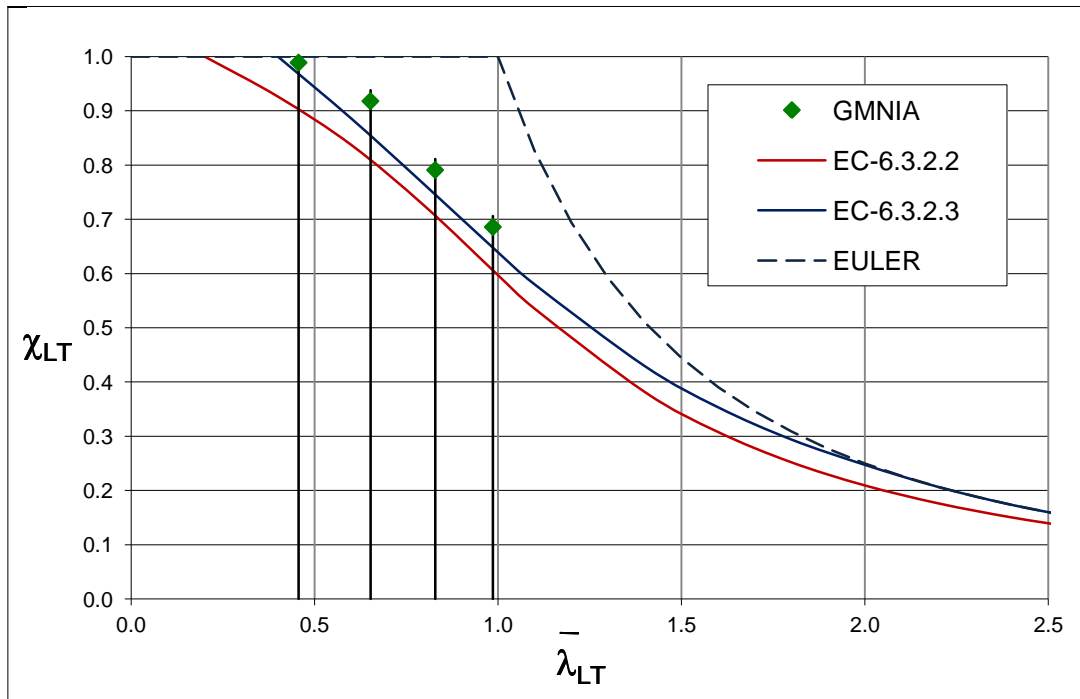
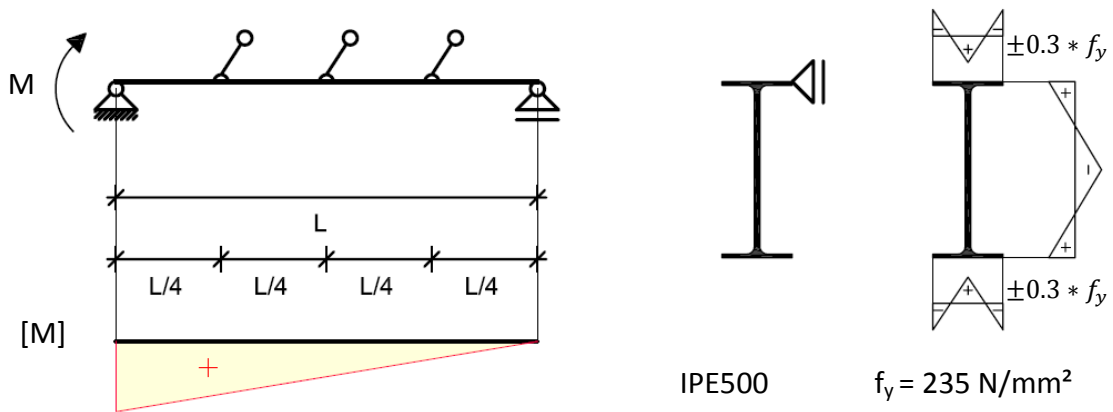
		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	2.50	1817.57	<b>0.53</b>	<b>0.88</b>	0.81	<b>0.80</b>	0.77	<b>0.90</b>
15	3.75	888.40	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>	1.08	<b>0.64</b>	1.01	<b>0.77</b>
20	5.00	553.75	<b>0.96</b>	<b>0.63</b>	1.36	<b>0.50</b>	1.27	<b>0.59</b>
25	6.25	394.03	<b>1.14</b>	<b>0.54</b>	1.63	<b>0.40</b>	1.53	<b>0.46</b>

### Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf



		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		$k_{c,2rest}=1$	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi(N1)$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	3.33	1817.57	<b>0.53</b>	<b>0.88</b>	0.70	<b>0.87</b>	0.68	<b>0.87</b>
15	5.00	888.40	<b>0.76</b>	<b>0.75</b>	0.89	<b>0.75</b>	0.86	<b>0.76</b>
20	6.67	553.75	<b>0.96</b>	<b>0.63</b>	1.10	<b>0.62</b>	1.05	<b>0.64</b>
25	8.33	394.03	<b>1.14</b>	<b>0.54</b>	1.31	<b>0.51</b>	1.25	<b>0.54</b>

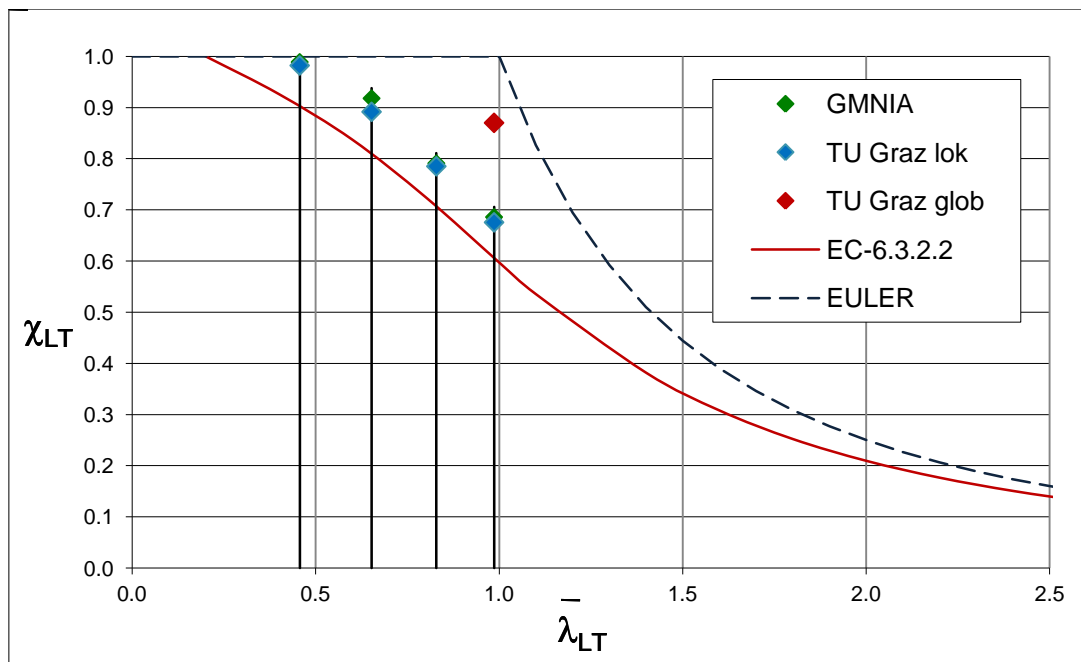
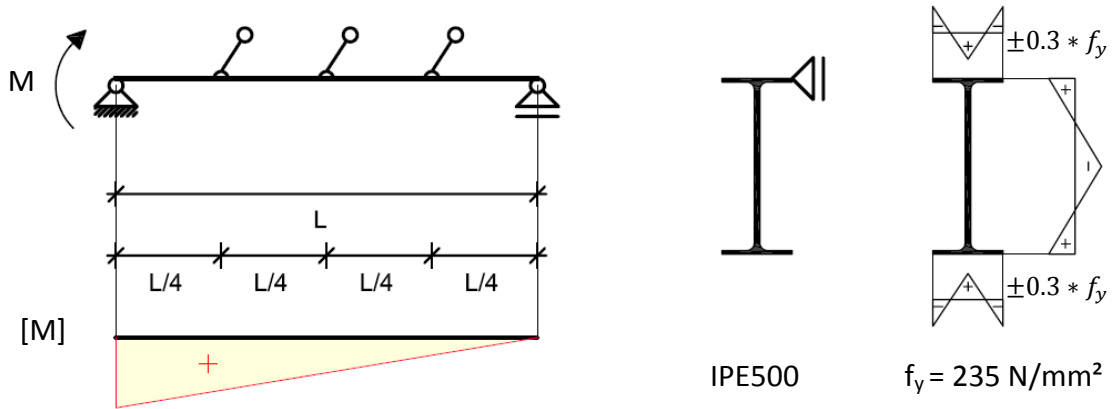
### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		6.3.2.3 (k <sub>c</sub> =1)	
					α <sub>LT</sub> = 0.34		α <sub>LT</sub> = 0.49	
L	L/3	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	χ <sub>GMNIA</sub>	Φ	χ (N1)	Φ	χ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	2472.01	<b>0.46</b>	<b>0.99</b>	0.65	<b>0.90</b>	0.59	<b>0.97</b>
15	3.75	1210.77	<b>0.65</b>	<b>0.92</b>	0.79	<b>0.81</b>	0.72	<b>0.85</b>
20	5.00	750.18	<b>0.83</b>	<b>0.79</b>	0.95	<b>0.71</b>	0.86	<b>0.75</b>
25	6.25	530.04	<b>0.99</b>	<b>0.69</b>	1.12	<b>0.61</b>	1.01	<b>0.65</b>

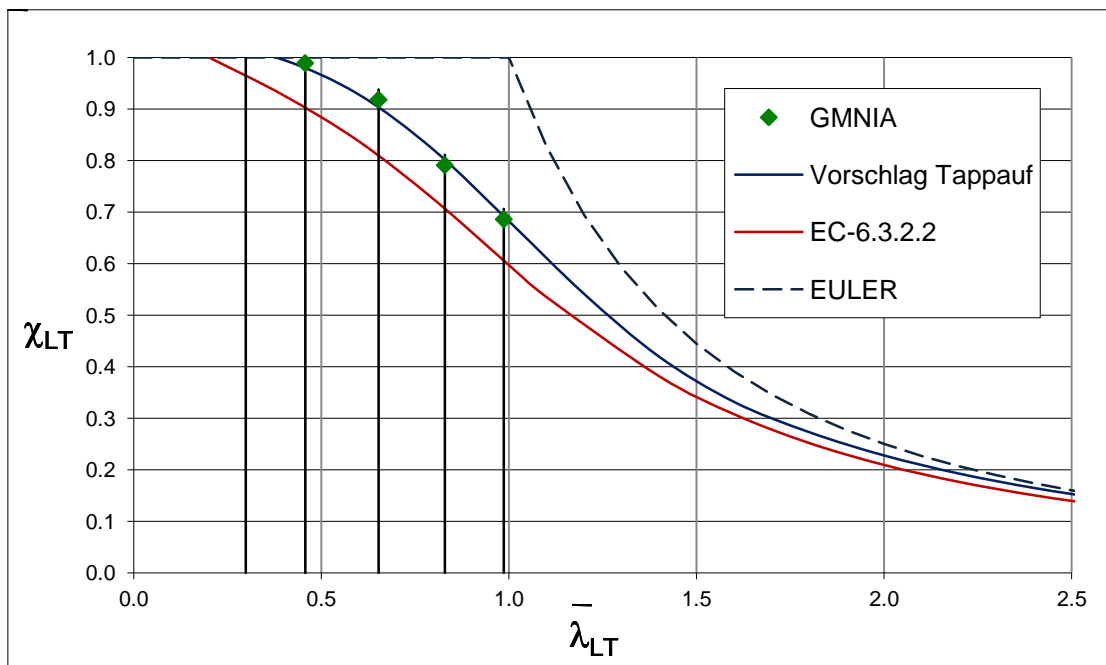
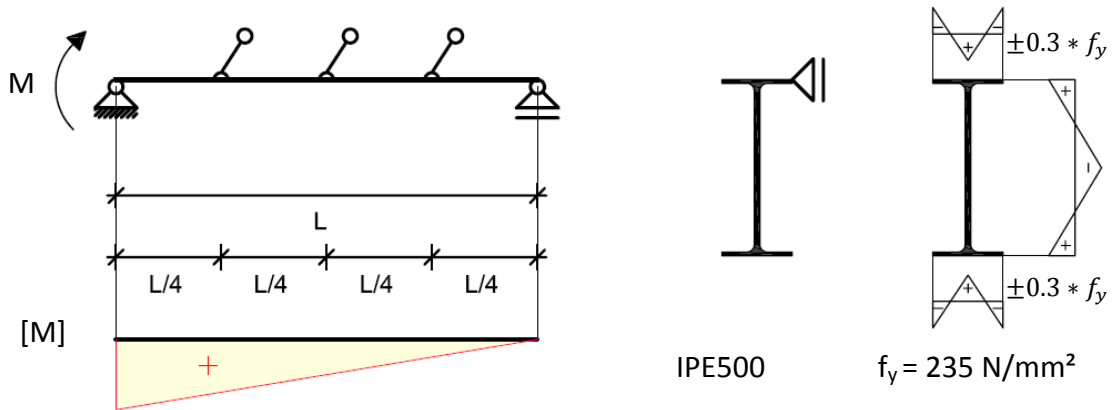
Anmerkung: Momentenbeiwert k<sub>c</sub> nicht berücksichtigt

**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	[-]	$\chi$ (lok)	[-]	$\chi$ (glob)
10	2.50	2472.01	<b>0.46</b>	<b>0.99</b>	0.66	<b>0.98</b>	0.65	<b>1.20</b>
15	3.75	1210.77	<b>0.65</b>	<b>0.92</b>	0.80	<b>0.89</b>	0.79	<b>1.14</b>
20	5.00	750.18	<b>0.83</b>	<b>0.79</b>	0.96	<b>0.79</b>	0.96	<b>1.04</b>
25	6.25	530.04	<b>0.99</b>	<b>0.69</b>	1.14	<b>0.68</b>	1.14	<b>0.87</b>

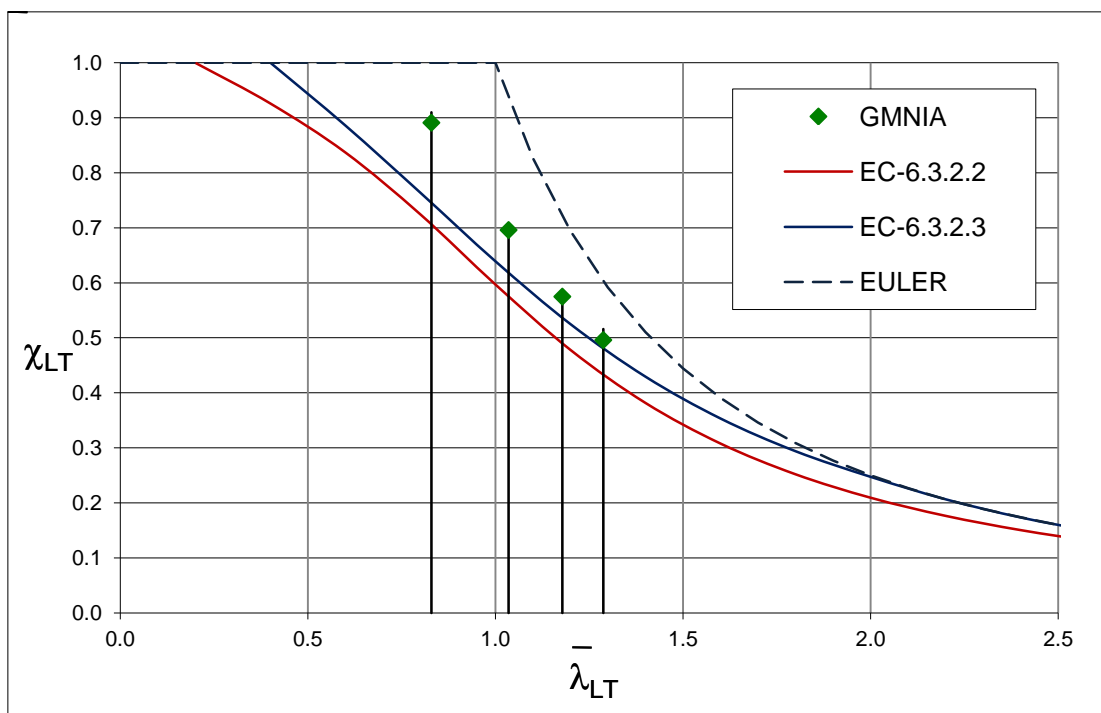
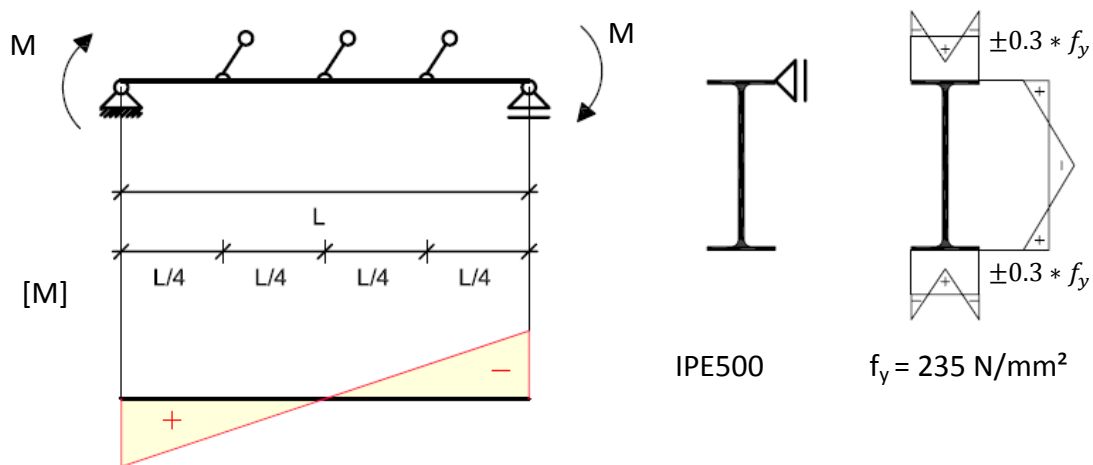
### Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf



		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		$k_{c,2rest}=0.8$	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi (N1)$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	3.33	2472.01	<b>0.46</b>	<b>0.99</b>	0.65	<b>0.90</b>	0.64	<b>0.98</b>
15	5.00	1210.77	<b>0.65</b>	<b>0.92</b>	0.79	<b>0.81</b>	0.77	<b>0.90</b>
20	6.67	750.18	<b>0.83</b>	<b>0.79</b>	0.95	<b>0.71</b>	0.92	<b>0.80</b>
25	8.33	530.04	<b>0.99</b>	<b>0.69</b>	1.12	<b>0.61</b>	1.07	<b>0.69</b>



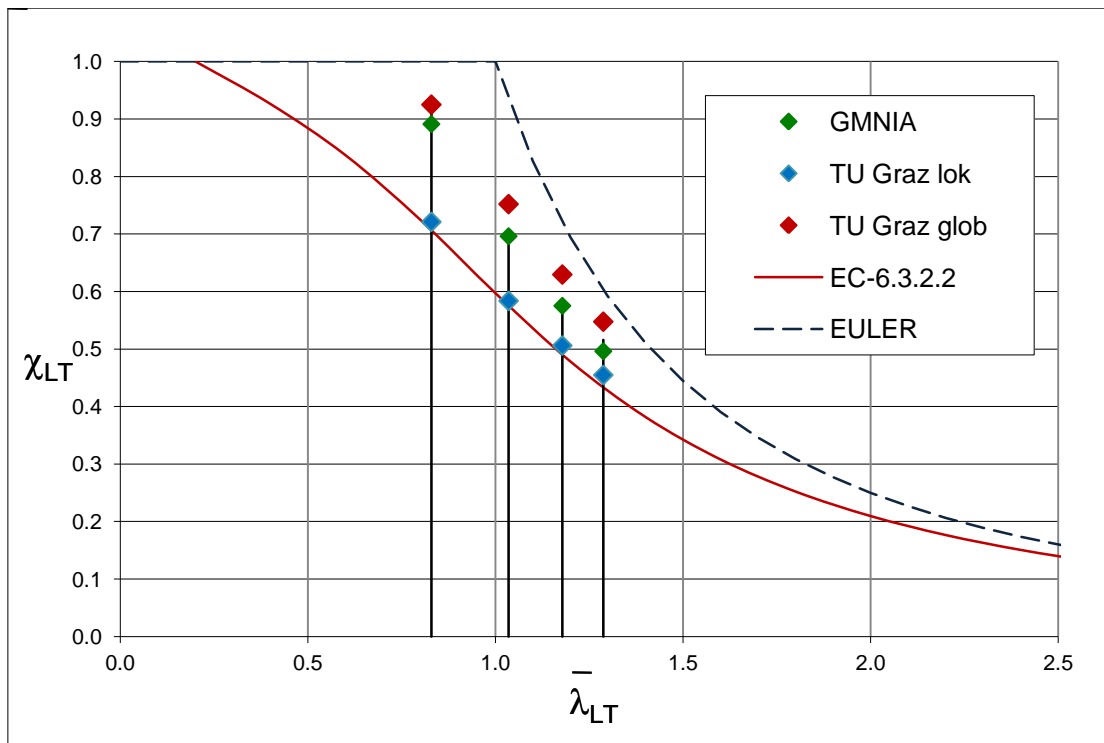
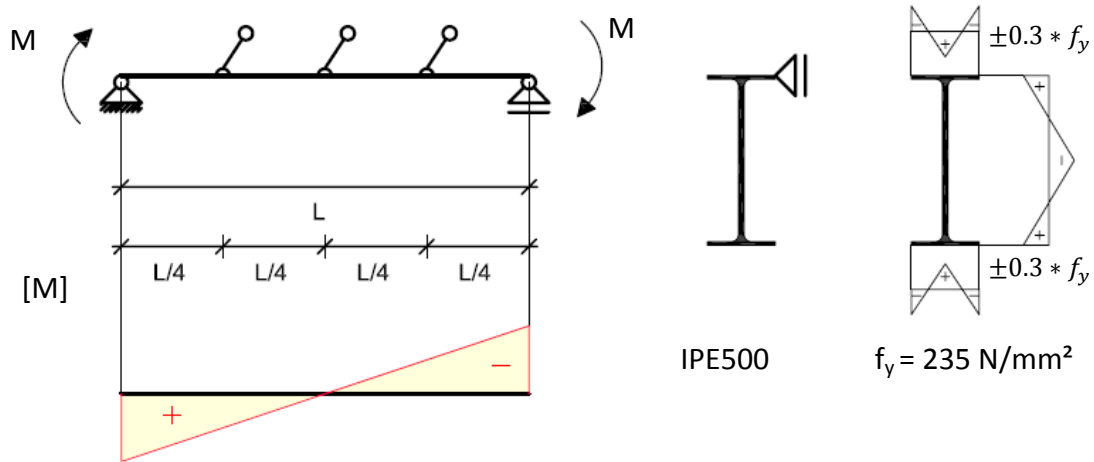
### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		6.3.2.3 ( $k_c=1$ )	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	749.04	<b>0.83</b>	<b>0.89</b>	0.95	<b>0.71</b>	0.86	<b>0.75</b>
15	3.75	480.88	<b>1.04</b>	<b>0.70</b>	1.18	<b>0.57</b>	1.06	<b>0.62</b>
20	5.00	371.12	<b>1.18</b>	<b>0.58</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.21	<b>0.54</b>
25	6.25	310.83	<b>1.29</b>	<b>0.50</b>	1.51	<b>0.43</b>	1.34	<b>0.48</b>

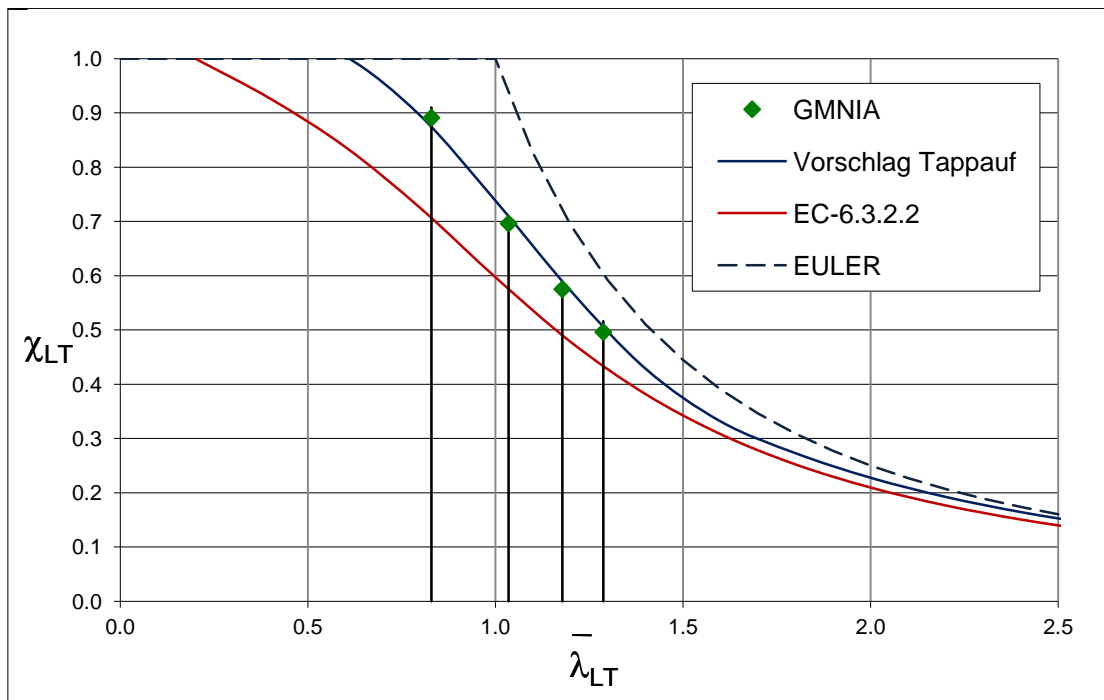
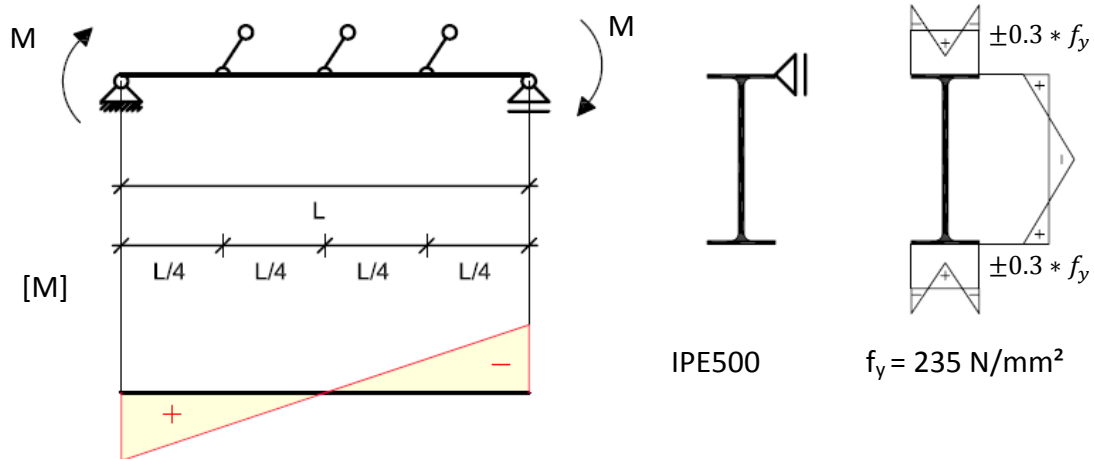
Anmerkung: Momentenbeiwert  $k_c$  nicht berücksichtigt

**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



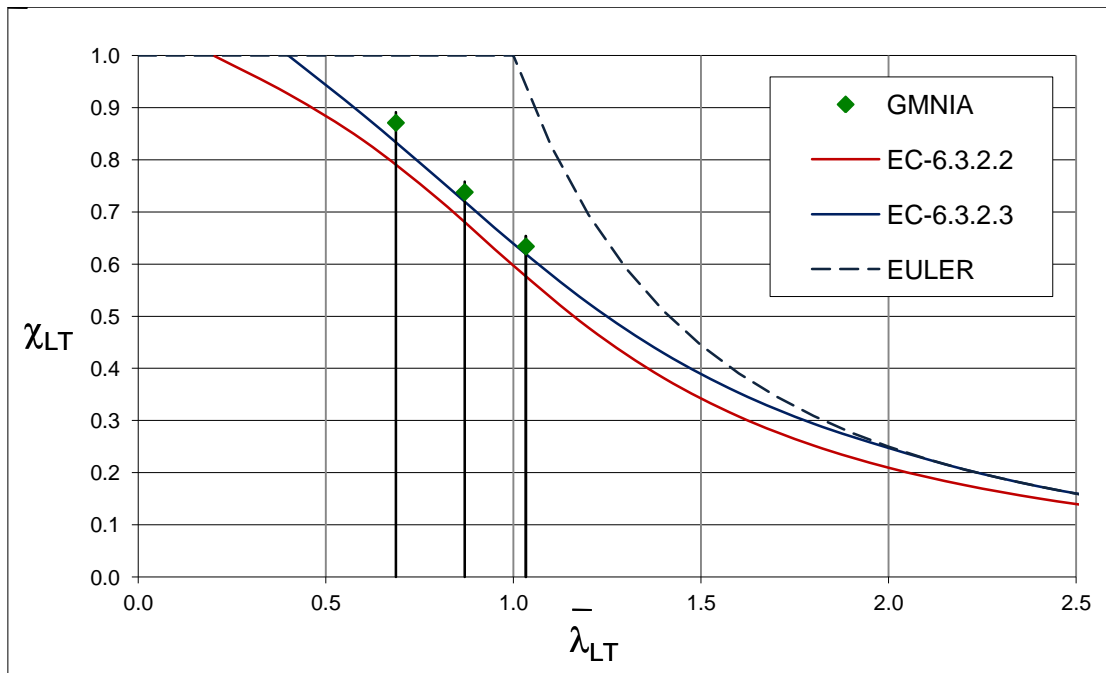
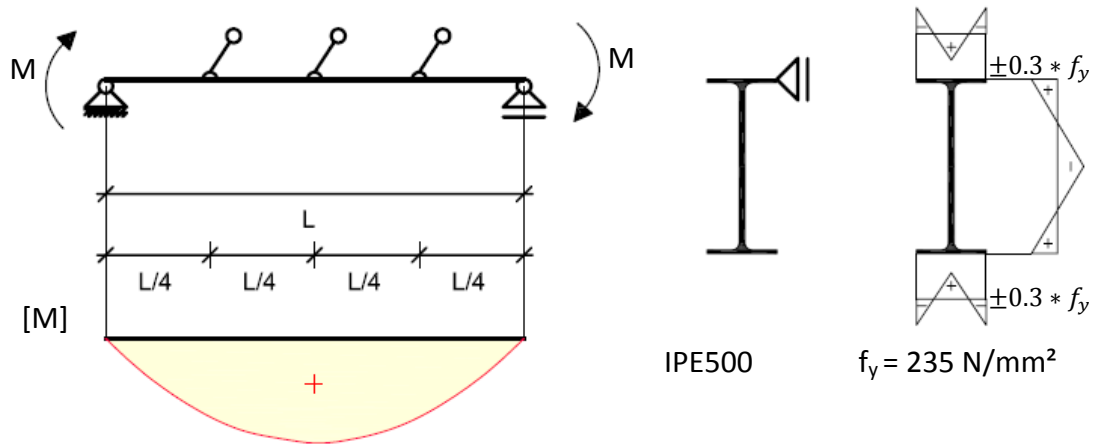
		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.16$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=1.25$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	$\Phi$	$\chi$ (lok)	$\Phi$	$\chi$ (glob)
10	2.50	749.04	<b>0.83</b>	<b>0.89</b>	1.05	<b>0.72</b>	0.97	<b>0.92</b>
15	3.75	480.88	<b>1.04</b>	<b>0.70</b>	1.31	<b>0.58</b>	1.20	<b>0.75</b>
20	5.00	371.12	<b>1.18</b>	<b>0.58</b>	1.50	<b>0.51</b>	1.39	<b>0.63</b>
25	6.25	310.83	<b>1.29</b>	<b>0.50</b>	1.66	<b>0.45</b>	1.55	<b>0.55</b>

**Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf**



		Abaqus			Eurocode		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	6.3.2.2		$k_{c,2rest}=0.65$	
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi(N1)$	$\Phi$	$\chi_{mod}$
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	3.33	749.04	<b>0.83</b>	<b>0.89</b>	0.95	<b>0.71</b>	0.92	<b>0.87</b>
15	5.00	480.88	<b>1.04</b>	<b>0.70</b>	1.18	<b>0.57</b>	1.12	<b>0.71</b>
20	6.67	371.12	<b>1.18</b>	<b>0.58</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.29	<b>0.59</b>
25	8.33	310.83	<b>1.29</b>	<b>0.50</b>	1.51	<b>0.43</b>	1.43	<b>0.51</b>

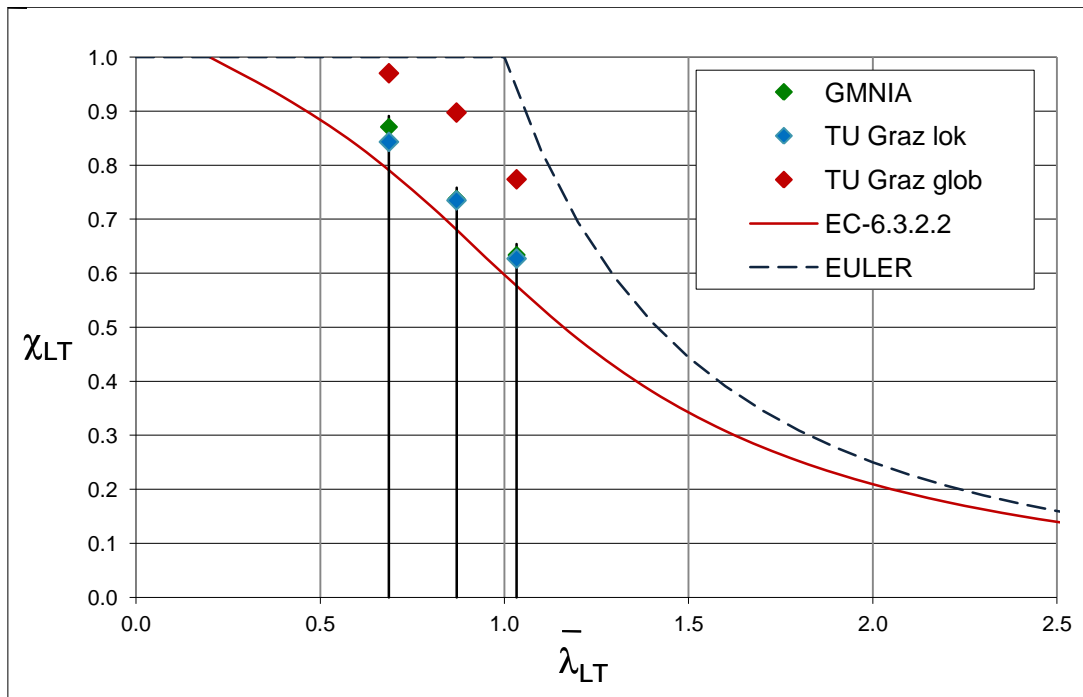
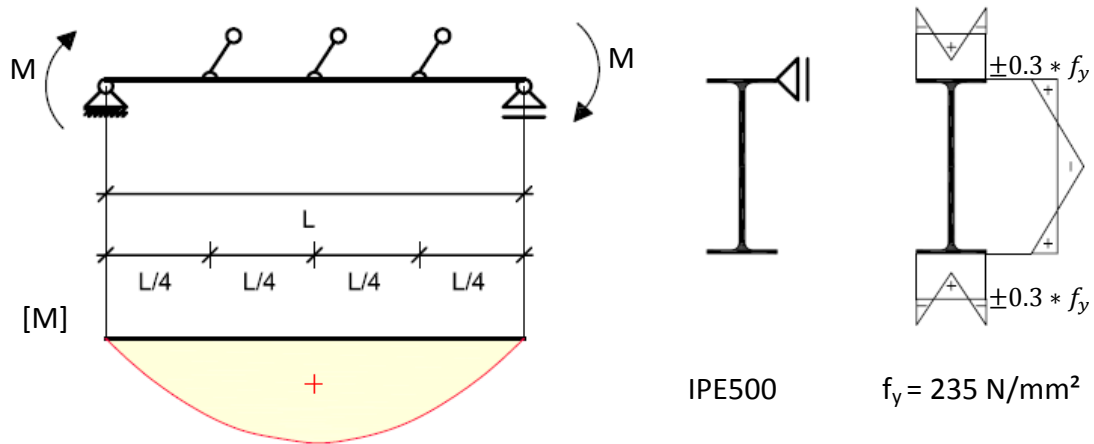
### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 ( $k_c=1$ ) $\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
15	3.75	1093.17	<b>0.69</b>	<b>0.87</b>	0.82	<b>0.79</b>	0.75	<b>0.83</b>
20	5.00	680.78	<b>0.87</b>	<b>0.74</b>	0.99	<b>0.68</b>	0.90	<b>0.72</b>
25	6.25	482.82	<b>1.03</b>	<b>0.63</b>	1.18	<b>0.58</b>	1.06	<b>0.62</b>

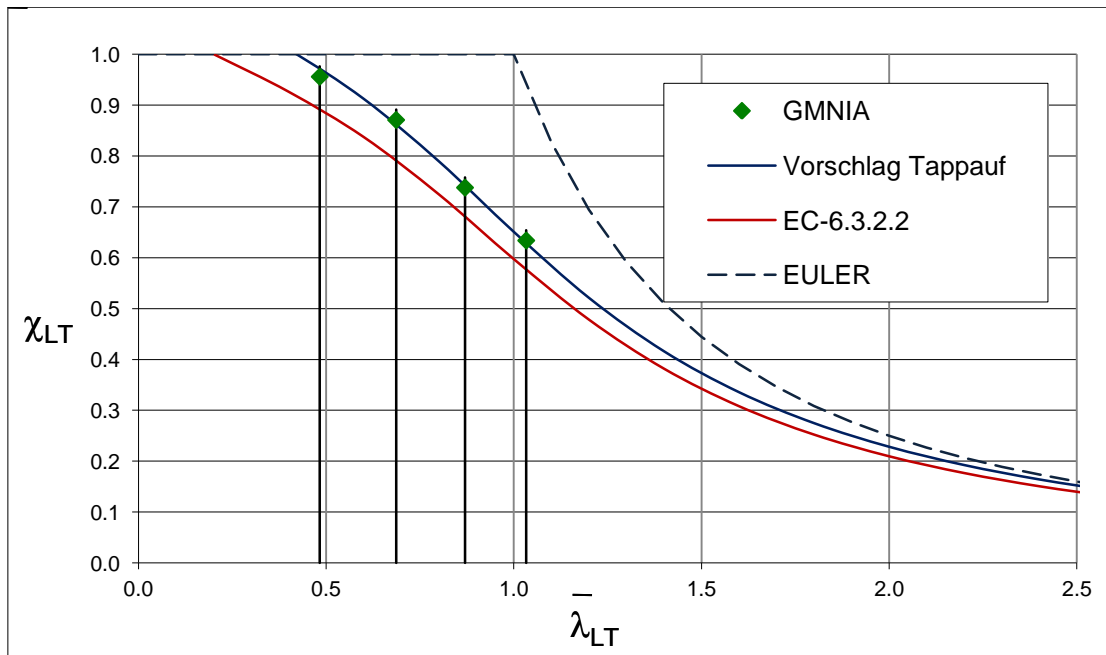
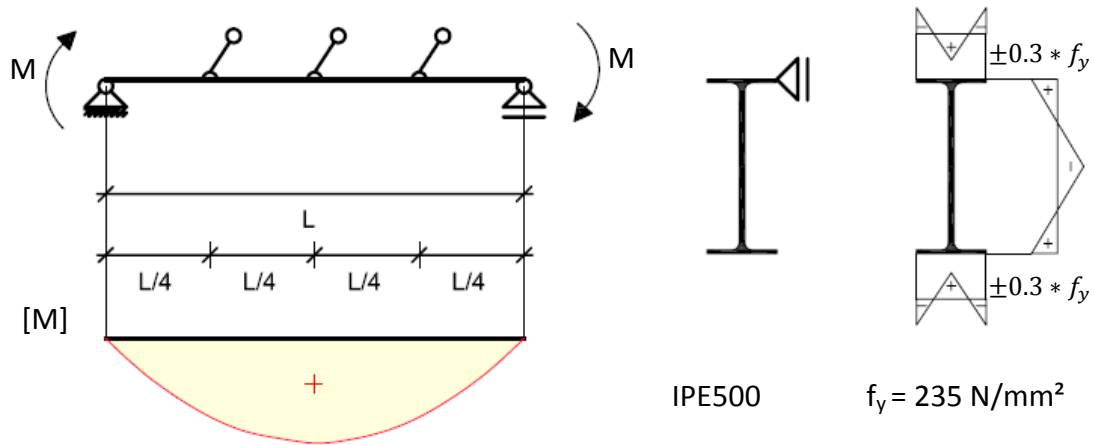
Anmerkung: Momentenbeiwert  $k_c$  nicht berücksichtigt

Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz



		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	M <sub>cr,LT</sub>	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
15	3.75	1093.17	<b>0.69</b>	<b>0.87</b>	0.82	<b>0.84</b>	0.77	<b>0.97</b>
20	5.00	680.78	<b>0.87</b>	<b>0.74</b>	0.99	<b>0.74</b>	0.92	<b>0.90</b>
25	6.25	482.82	<b>1.03</b>	<b>0.63</b>	1.17	<b>0.63</b>	1.09	<b>0.77</b>

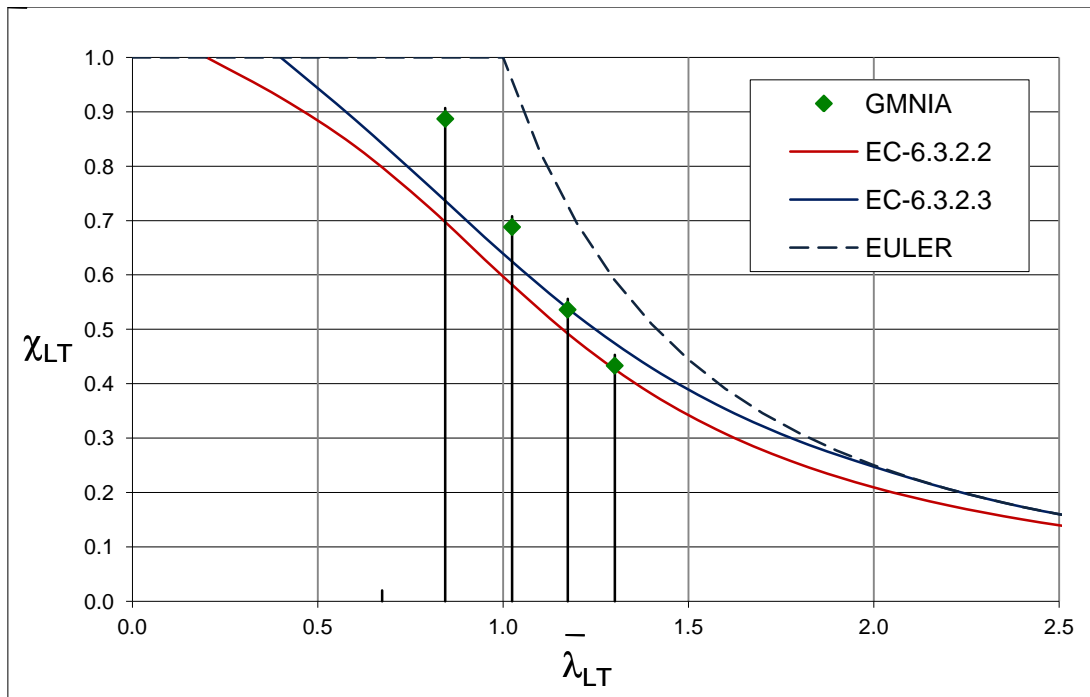
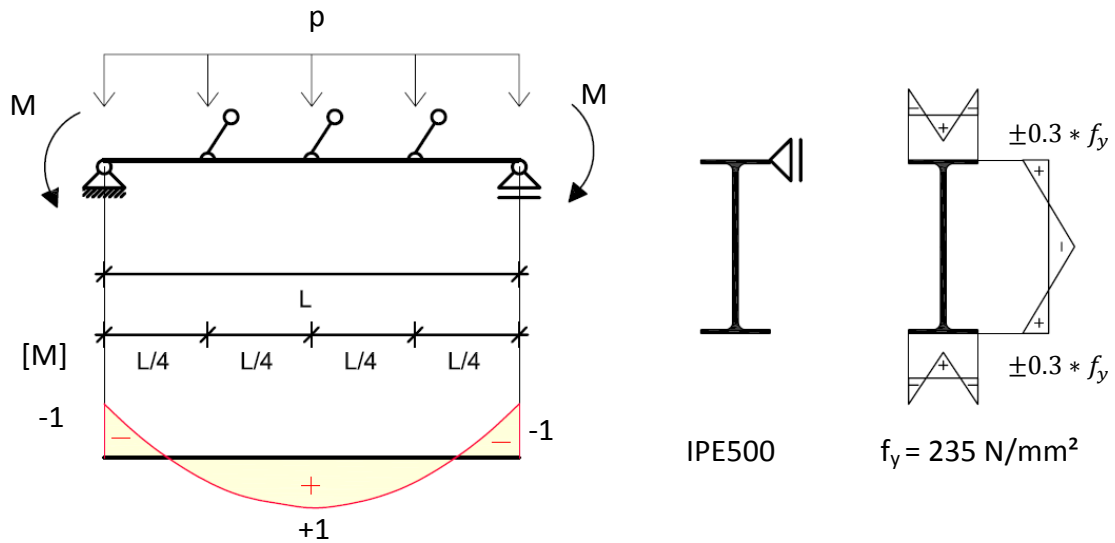
**Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf**



		Abaqus			Nachweis N1 EC 6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		Vorschlag Tappauf $\alpha_{LT} = 0.34$	
		LBA		GMNIA	$\Phi$	$\chi_{N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi$
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$				
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	3.33	2207.53	<b>0.48</b>	<b>0.96</b>	0.66	<b>0.89</b>	1.09	<b>0.97</b>
15	5.00	1093.17	<b>0.69</b>	<b>0.87</b>	0.82	<b>0.79</b>	1.09	<b>0.86</b>
20	6.67	680.78	<b>0.87</b>	<b>0.74</b>	0.99	<b>0.68</b>	1.09	<b>0.74</b>
25	8.33	482.82	<b>1.03</b>	<b>0.63</b>	1.18	<b>0.58</b>	1.09	<b>0.63</b>

Anmerkung:  $\chi = \chi_{N1} * \zeta_{2rest}$

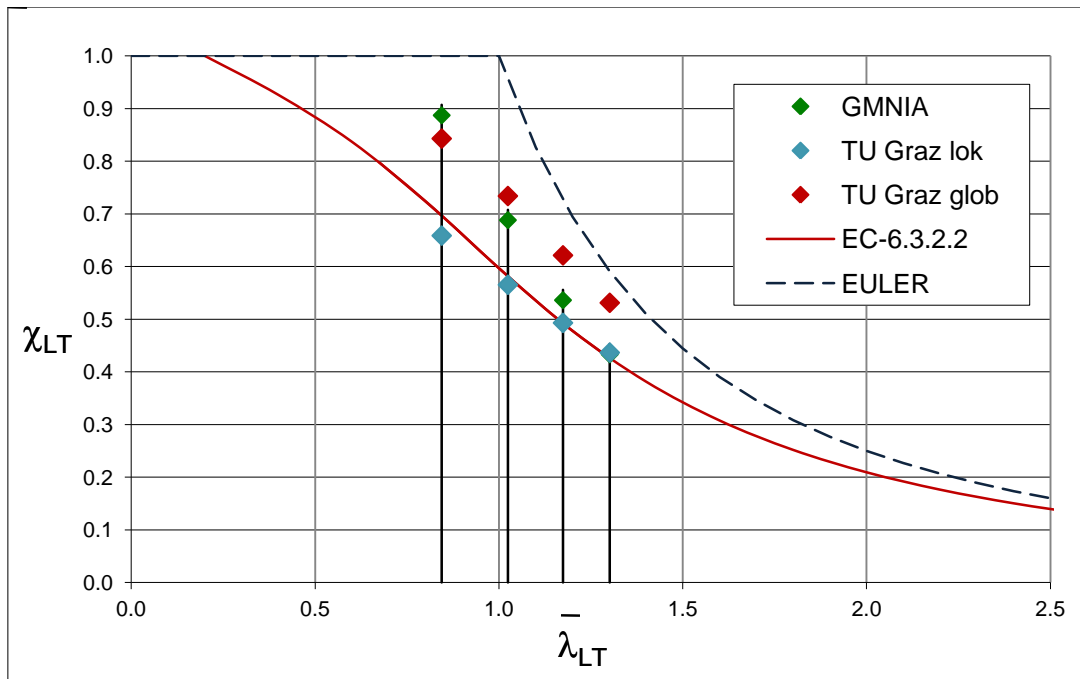
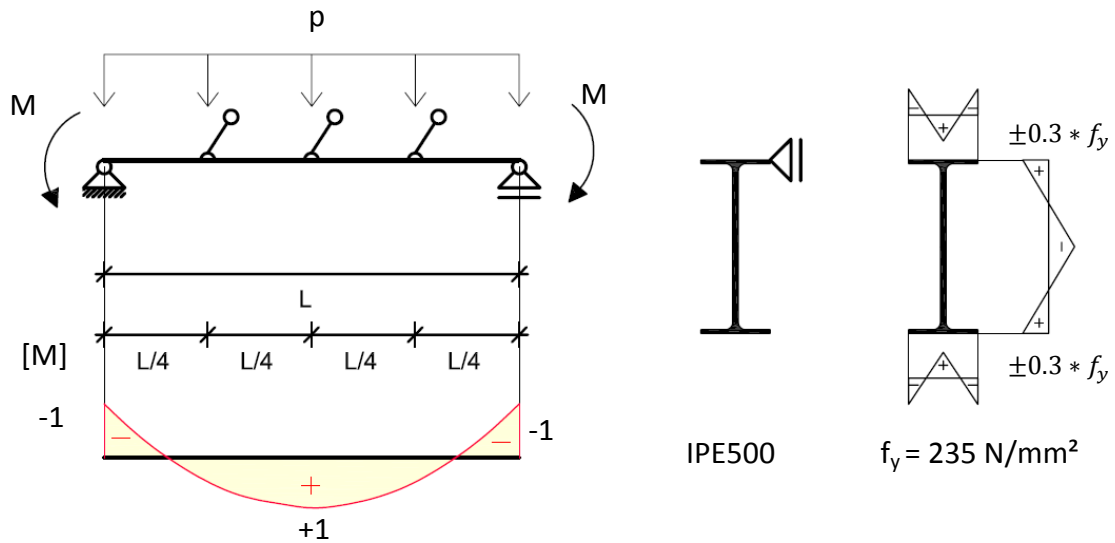
### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 ( $k_c=1$ ) $\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]	[ - ]
10	2.50	586.34	<b>0.94</b>	<b>0.88</b>	1.07	<b>0.64</b>	0.96	<b>0.68</b>
15	3.75	415.72	<b>1.11</b>	<b>0.68</b>	1.28	<b>0.53</b>	1.14	<b>0.57</b>
20	5.00	334.57	<b>1.24</b>	<b>0.57</b>	1.45	<b>0.46</b>	1.28	<b>0.50</b>
25	6.25	285.20	<b>1.34</b>	<b>0.49</b>	1.60	<b>0.41</b>	1.41	<b>0.45</b>

Anmerkung: Momentenbeiwert  $k_c$  nicht berücksichtigt

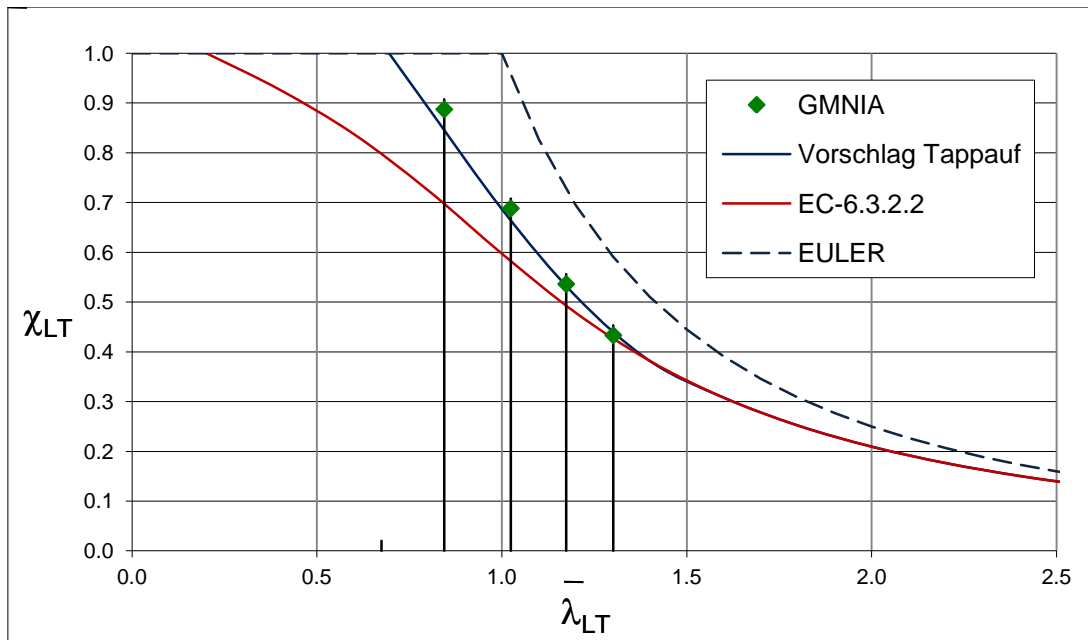
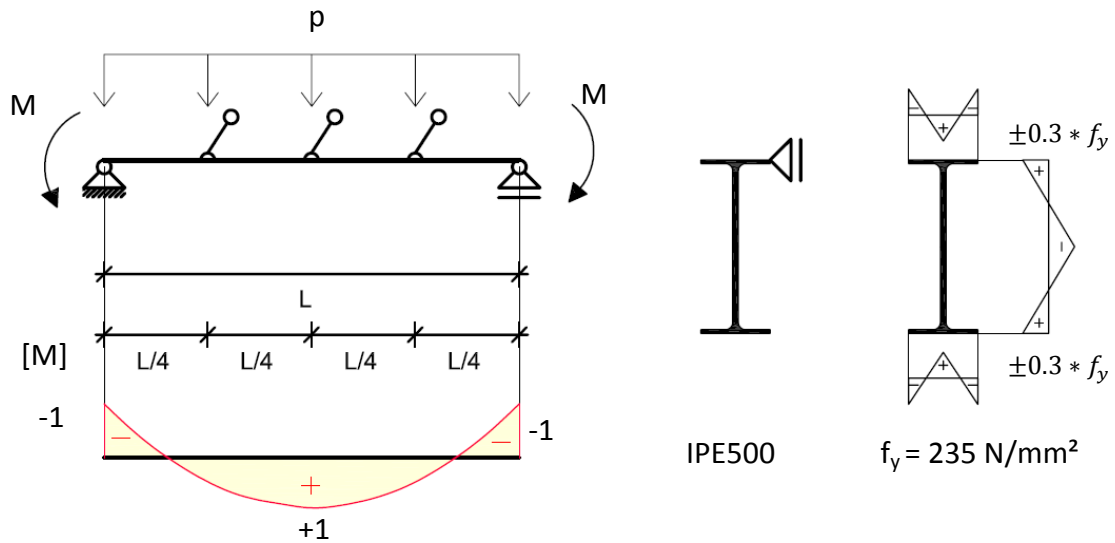
**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\Phi$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	[-]	$\chi$ (lok)	[-]	$\chi$ (glob)
10	2.50	723.01	<b>0.84</b>	<b>0.89</b>	0.99	<b>0.66</b>	0.92	<b>0.84</b>
15	3.75	491.23	<b>1.02</b>	<b>0.69</b>	1.18	<b>0.57</b>	1.10	<b>0.73</b>
20	5.00	373.83	<b>1.17</b>	<b>0.54</b>	1.35	<b>0.49</b>	1.27	<b>0.62</b>
25	6.25	304.32	<b>1.30</b>	<b>0.43</b>	1.52	<b>0.44</b>	1.44	<b>0.53</b>



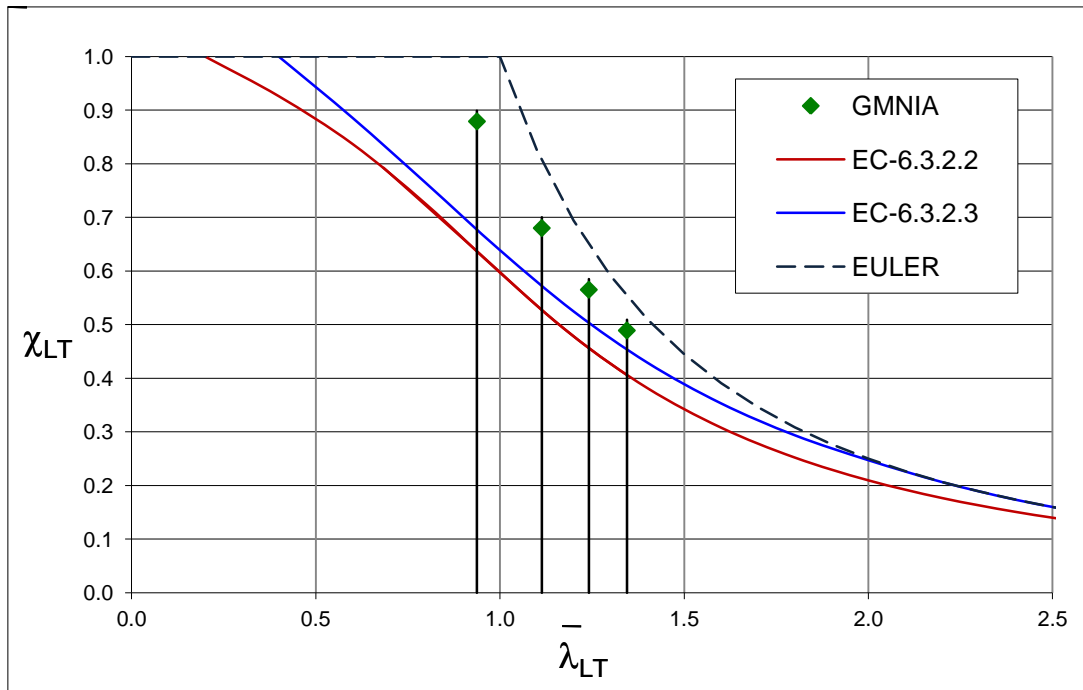
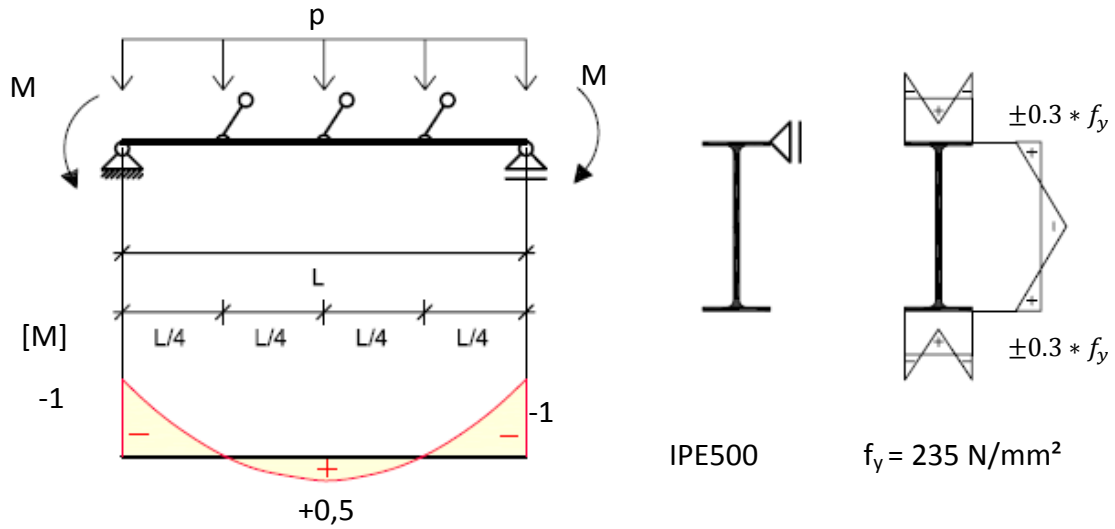
### Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf



		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2			
					$\alpha_{LT} = 0.34$		$\alpha_{LT} = 0.34$	
L	L/4	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi_{N1}$	$\zeta_{2rest}$	$\chi$
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	723.01	<b>0.84</b>	<b>0.89</b>	0.97	<b>0.70</b>	1.21	<b>0.84</b>
15	3.75	491.23	<b>1.02</b>	<b>0.69</b>	1.16	<b>0.58</b>	1.14	<b>0.66</b>
20	5.00	373.83	<b>1.17</b>	<b>0.54</b>	1.36	<b>0.49</b>	1.08	<b>0.53</b>
25	6.25	304.32	<b>1.30</b>	<b>0.43</b>	1.53	<b>0.43</b>	1.03	<b>0.44</b>

Anmerkung:  $\chi = \chi_{N1} * \zeta_{2rest}$

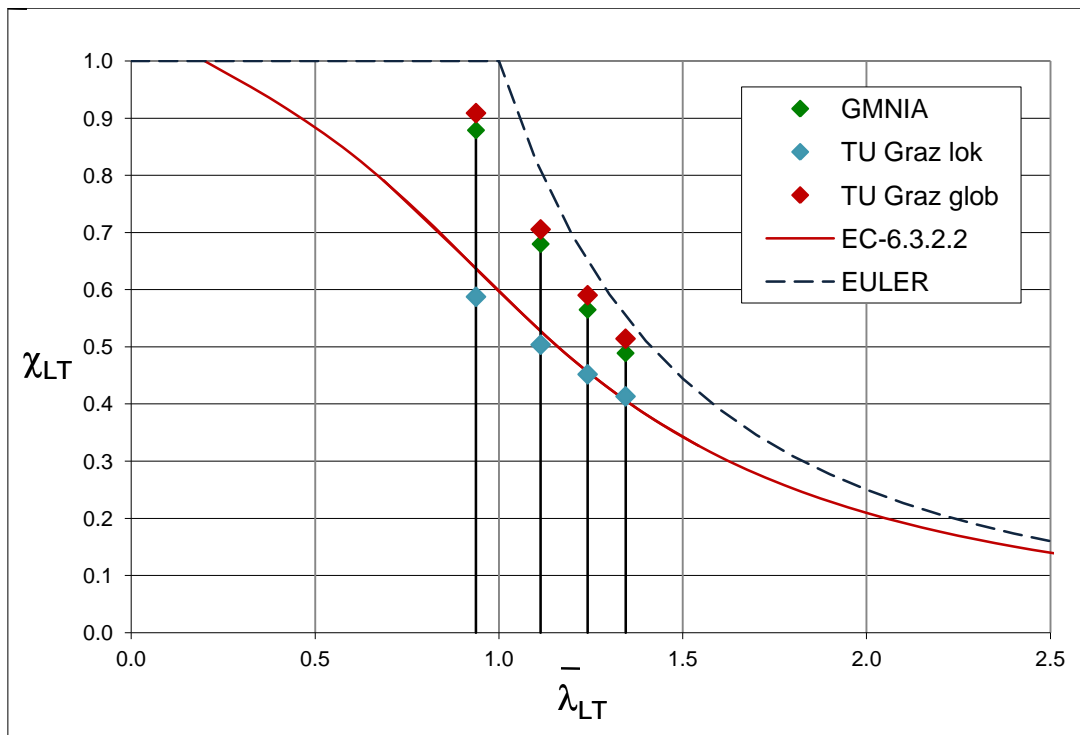
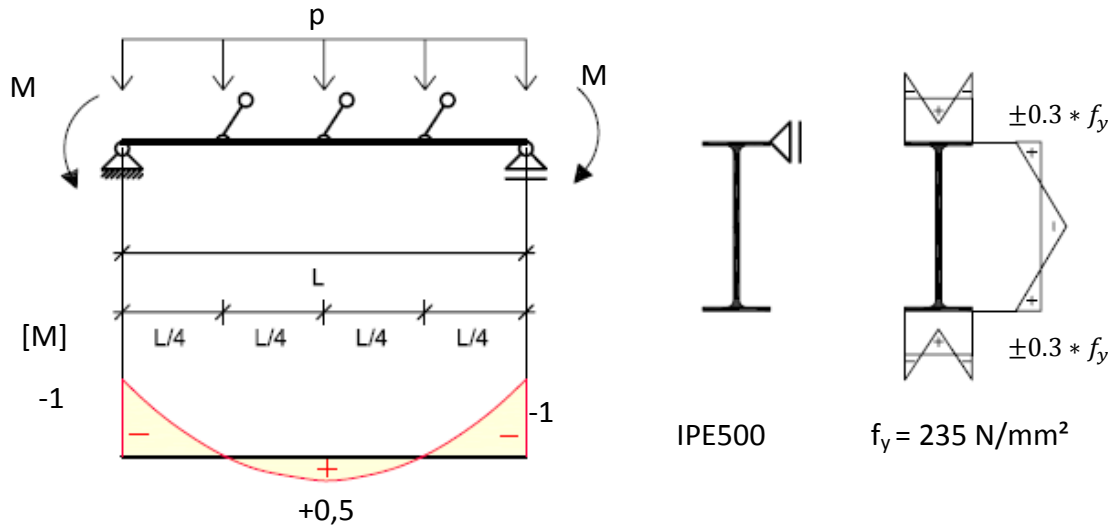
**Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode**



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 ( $k_c=1$ ) $\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	586.34	<b>0.94</b>	<b>0.88</b>	1.07	<b>0.64</b>	0.96	<b>0.68</b>
15	3.75	415.72	<b>1.11</b>	<b>0.68</b>	1.28	<b>0.53</b>	1.14	<b>0.57</b>
20	5.00	334.57	<b>1.24</b>	<b>0.57</b>	1.45	<b>0.46</b>	1.28	<b>0.50</b>
25	6.25	285.20	<b>1.34</b>	<b>0.49</b>	1.60	<b>0.41</b>	1.41	<b>0.45</b>

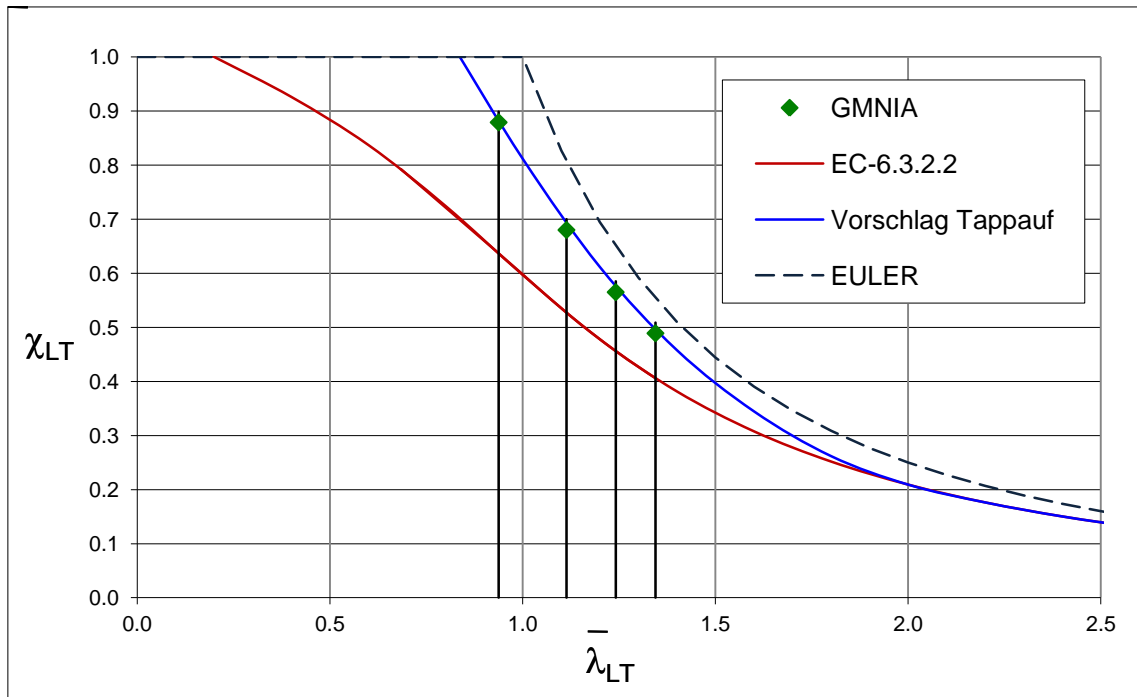
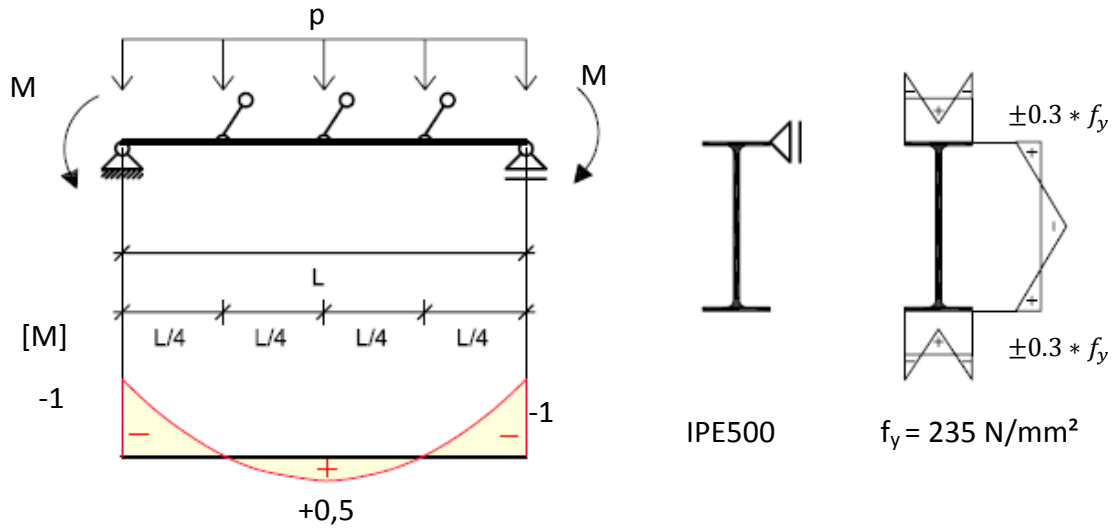
Anmerkung: Momentenbeiwert  $k_c$  nicht berücksichtigt

**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\lambda_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.0$	$\lambda_z$ für L/3	$\varphi=1.9$	$\lambda_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	$\Phi$	$\chi$	$\Phi$	$\chi$
10	2.50	586.34	<b>0.94</b>	<b>0.88</b>	1.11	<b>0.59</b>	1.44	<b>0.91</b>
15	3.75	415.72	<b>1.11</b>	<b>0.68</b>	1.30	<b>0.50</b>	1.78	<b>0.71</b>
20	5.00	334.57	<b>1.24</b>	<b>0.57</b>	1.45	<b>0.45</b>	2.06	<b>0.59</b>
25	6.25	285.20	<b>1.34</b>	<b>0.49</b>	1.58	<b>0.41</b>	2.31	<b>0.51</b>

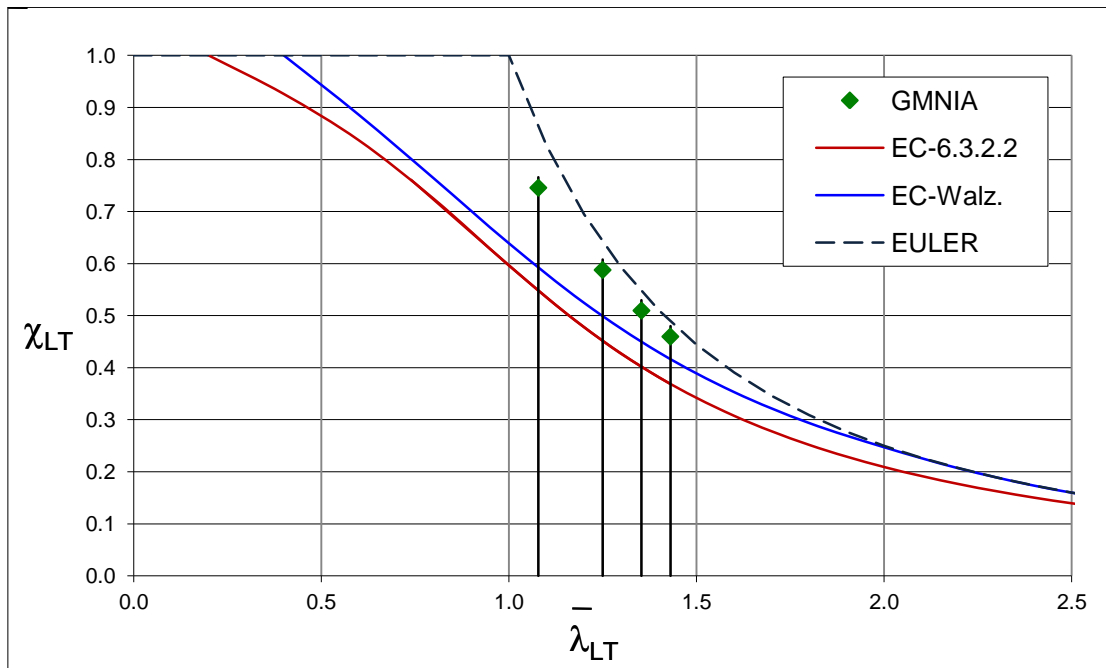
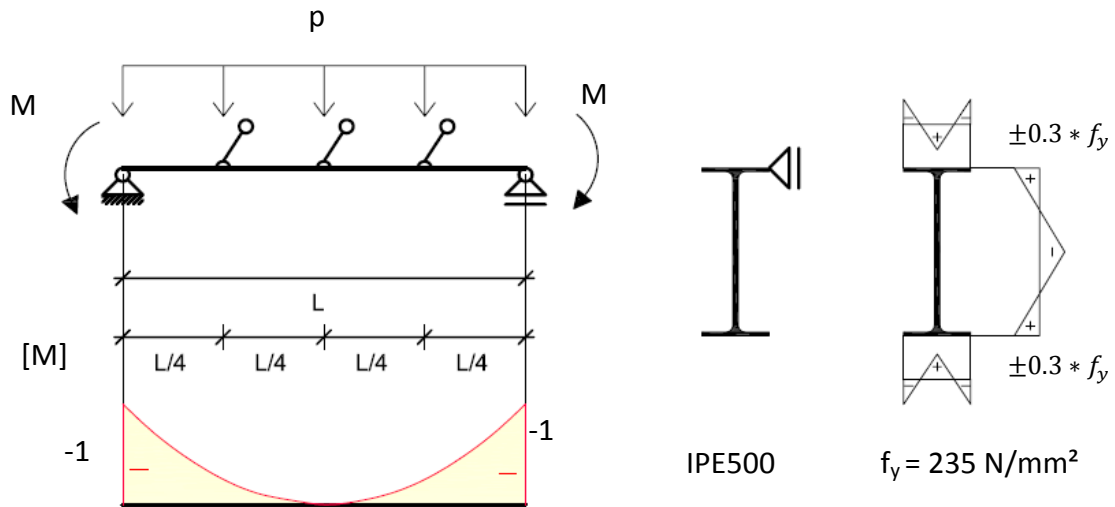
### Vergleich der GMNIA mit dem Vorschlag Tappauf



		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2		alpha_LT = 0.34	
L	L/3	M_cr,LT	lambda_bar_LT	chi_GMNIA	Phi	chi_N1	zeta_2rest	chi
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	3.33	586.34	<b>0.68</b>	<b>0.88</b>	0.82	<b>0.79</b>	1.49	<b>1.18</b>
15	5.00	415.72	<b>0.94</b>	<b>0.68</b>	1.07	<b>0.64</b>	1.38	<b>0.88</b>
20	6.67	334.57	<b>1.11</b>	<b>0.57</b>	1.28	<b>0.53</b>	1.31	<b>0.69</b>
25	8.33	285.20	<b>1.24</b>	<b>0.49</b>	1.45	<b>0.46</b>	1.26	<b>0.58</b>

Anmerkung:  $\chi = \chi_{N1} * \zeta_{2rest}$

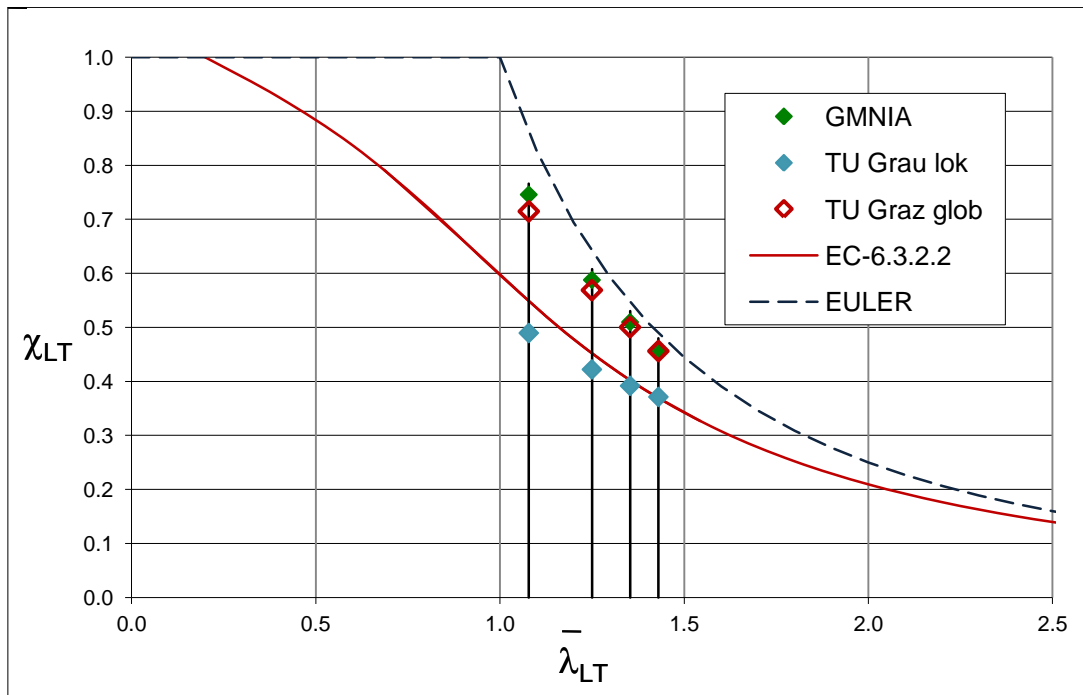
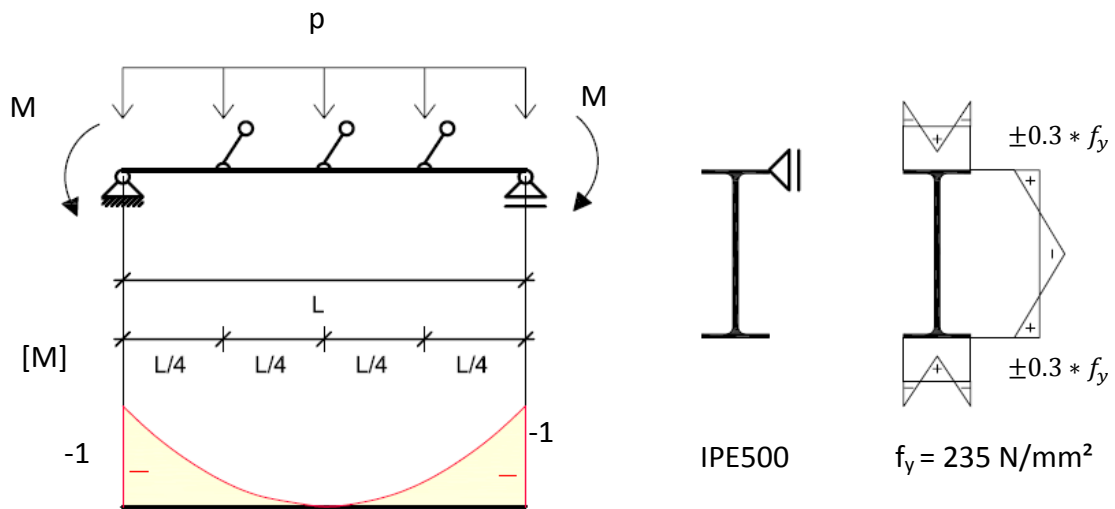
### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Eurocode			
		LBA		GMNIA	6.3.2.2 $\alpha_{LT} = 0.34$		6.3.2.3 ( $k_c=1$ ) $\alpha_{LT} = 0.49$	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\Phi$	$\chi$ (N1)	$\Phi$	$\chi$ (N2)
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	443.36	<b>1.08</b>	<b>0.75</b>	1.23	<b>0.55</b>	1.10	<b>0.59</b>
15	3.75	330.12	<b>1.25</b>	<b>0.59</b>	1.46	<b>0.45</b>	1.29	<b>0.50</b>
20	5.00	281.52	<b>1.35</b>	<b>0.51</b>	1.61	<b>0.40</b>	1.42	<b>0.45</b>
25	6.25	252.03	<b>1.43</b>	<b>0.46</b>	1.73	<b>0.37</b>	1.52	<b>0.42</b>

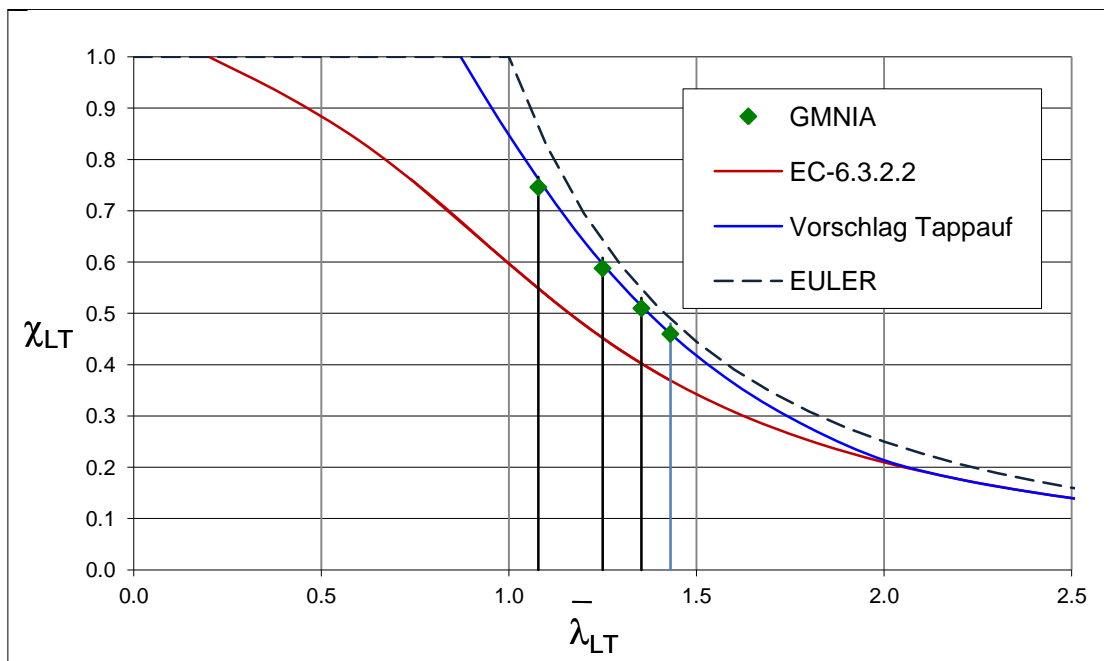
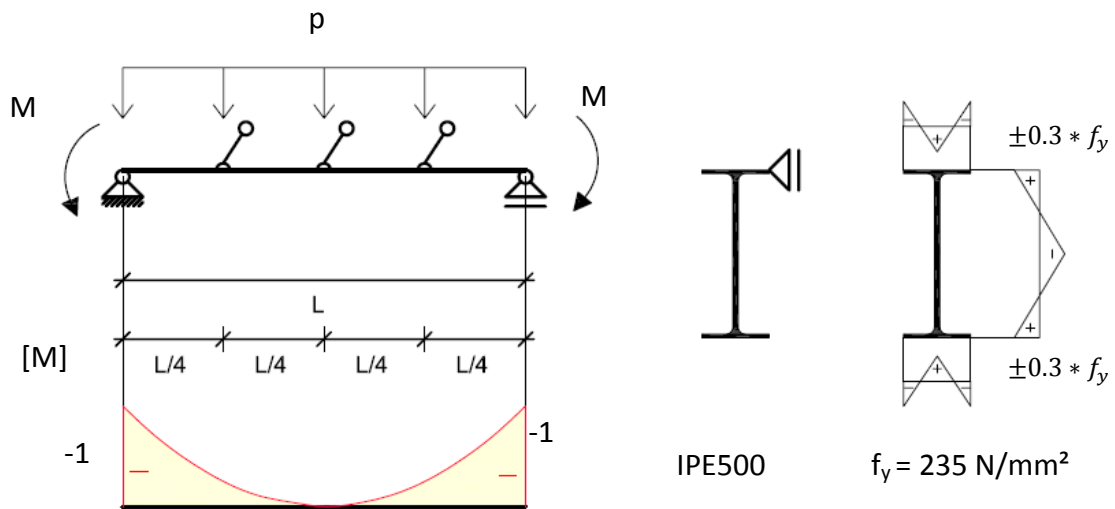
Anmerkung: Momentenbeiwert  $k_c$  nicht berücksichtigt

**Vergleich der GMNIA mit den Knickspannungslinien der TU Graz**



		Abaqus			Biegedrillknicklinien TU Graz			
		LBA		GMNIA	lokal		global	
L	L/3	$M_{cr,LT}$	$\bar{\lambda}_{LT}$	$\chi_{GMNIA}$	$\varphi=1.0$	$\bar{\lambda}_z$ für L/3	$\varphi=2.02$	$\bar{\lambda}_z$ für L
[m]	[m]	[kNcm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	2.50	443.36	<b>1.08</b>	<b>0.75</b>	1.31	<b>0.49</b>	1.31	<b>0.49</b>
15	3.75	330.12	<b>1.25</b>	<b>0.59</b>	1.51	<b>0.42</b>	1.51	<b>0.42</b>
20	5.00	281.52	<b>1.35</b>	<b>0.51</b>	1.63	<b>0.39</b>	1.63	<b>0.39</b>
25	6.25	252.03	<b>1.43</b>	<b>0.46</b>	1.73	<b>0.37</b>	1.73	<b>0.37</b>

### Vergleich der GMNIA mit Knickspannungslinien gemäß Eurocode



		Abaqus			Nachweis N1		Vorschlag Tappauf	
		LBA		GMNIA	EC 6.3.2.2		alpha_LT = 0.34	
L	L/3	M_cr,LT	lambda_bar_LT	chi_GMNIA	Phi	chi_N1	zeta_2rest	chi
[m]	[m]	[kNm]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
10	3.33	443.36	<b>1.08</b>	<b>0.75</b>	1.23	<b>0.55</b>	1.39	<b>0.76</b>
15	5.00	317.02	<b>1.25</b>	<b>0.59</b>	1.46	<b>0.45</b>	1.32	<b>0.60</b>
20	6.67	264.45	<b>1.35</b>	<b>0.51</b>	1.61	<b>0.40</b>	1.28	<b>0.51</b>
25	8.33	230.93	<b>1.43</b>	<b>0.46</b>	1.73	<b>0.37</b>	1.25	<b>0.46</b>

Anmerkung:  $\chi = \chi_{N1} * \zeta_{2rest}$

## A8 – Anhang Inputfile

Hier wird ein exemplarisches Inputfile für einen 25 m langen, beidseits gabelgelagerten zwei Mal zusätzlich am Obergurt gehaltenen Einfeldträger des Querschnittes IPE 500 unter konstantem positiven Momentenverlauf gezeigt.

```
*PARAMETER
L=25000
***** Nominal Calculation Parameters
fy=235.
SE=70.5
fu=360.
h=500
b=200
tf=16
tw=10.2
r=21
It=886200
E=210000
nu=0.3
G=E/(2*(1-nu))
pi=3.14159265359
L_e0=3000
**number of elements - longitudinal
n_elem=400
***** Geometric Parameters of smaller CSection
L05=L*0.5
Angle=-pi/2
d = h - tf
d05 = d * 0.5
hw = h - 2 * tf
hw05 = hw * 0.5
b05 = b * 0.5
MoveFl = tf * 0.5 + hw05
A=2*b*tf+hw*tw+4*r**2*(1-pi/4)
Iz=2*b**3*tf/12+hw*tw**3/12+0.03*r**4+0.2146*r**2*(tw+0.4468*r)**2
iz=(Iz/A)**0.5
Iy=h**3*b**1/12-(h-2*tf)**3*(b-tw)**1/12+0.03*r**4+0.2146*r**2*(h-2*tf-0.4468*r)**2
***Parameters for QHSections to compensate fillet radius
It_0=(hw*tw**3+2*b*tf**3)/3
delta_It = (It - It_0) / 2
delta_A=2*r**2*(1-pi/4)
a_QHS=(4*delta_It/delta_A)**0.5
t_QHS = delta_A / (4 * a_QHS)
```



```
a_QHS = a_QHS + t_QHS
*****
*****
Mpl=(2*(b*tf)*d/2+delta_A*hw+hw**2*tw/4)*fy*10
M_Left= -Mpl
M_Right= Mpl
Q=4*Mpl/L
p=8*Mpl/(L*n_elem)
p05=0.5*p
p2=8*Mpl*2/(L*n_elem)
*****
u=0
*****
e0=L/L_e0
***** RESIDUAL STRESS DISTRIBUTION
SE_FL1=SE*0.75
SE_FL2=SE*0.25
SE_FL3=SE*-0.25
SE_FL4=SE*-0.75
SE_W1=SE*-0.9
SE_W2=SE*-0.7
SE_W3=SE*-0.5
SE_W4=SE*-0.3
SE_W5=SE*-0.1
SE_W6=SE*0.1
SE_W7=SE*0.3
SE_W8=SE*0.5
SE_W9=SE*0.7
SE_W10=SE*0.9
*****
*****PARTS Beam NODES
*PART, name=Beam_ties
*NODE
10000, 0., 0., 0.
10200, <L05>, 0., 0.
10400, <L>, 0., 0.
*NGEN, LINE=P, NSET=Nbeam
10000, 10400, 1, 10200
***** BEAM ELEMENTS
*ELEMENT, TYPE=B31
10000, 10000, 10001
*ELGEN, ELSET=Ebeam
10000, 400, 1
***** SECTION
*BEAM SECTION, MATERIAL=STEEL, SECTION=BOX, ELSET=Ebeam
<a_QHS>, <a_QHS>, <t_QHS>, <t_QHS>, <t_QHS>, <t_QHS>
*****END PART
```

```
*End Part
*Part, name=Flange
*****nodes
*NODE
160000, 0., 0., -<b05>
160200, <L05>, 0., -<b05>
160400, <L>, 0., -<b05>
240000, 0., 0., <b05>
240200, <L05>, 0., <b05>
240400, <L>, 0., <b05>
*NGEN,LINE=P,NSET=Nfl_left
160000, 160400, 1, 160200
*NGEN,LINE=P,NSET=Nfl_right
240000, 240400, 1, 240200
*NFILL,NSET=Nfl
Nfl_left , Nfl_right, 8, 10000
*****Elements
*Element, type=S4
160000, 170000, 170001, 160001, 160000
*ELGEN,ELSET=Efl
160000,400,1,1,8,10000,10000
*****SECTION
**Section: Flange
*Shell Section, elset=Efl, material=STEEL
<tf>, 5
*End Part
*Part, name=WebP
*****nodes
*NODE
100000, 0., <hw05>, 0.
100200, <L05>, <hw05>, 0.
100400, <L>, <hw05>, 0.
300000, 0., -<hw05>, 0.
300200, <L05>, -<hw05>, 0.
300400, <L>, -<hw05>, 0.
*NGEN,LINE=P,NSET=Nw_up
100000, 100400, 1, 100200
*NGEN,LINE=P,NSET=Nw_down
300000, 300400, 1, 300200
*NFILL,NSET=Nw
Nw_up , Nw_down, 20 , 10000
*****Elements
*Element, type=S4
100000, 110000, 110001, 100001, 100000
*ELGEN,ELSET=Ew
100000,400,1,1,20,10000,10000
*****SECTION
```

```
**Section: Web
*Shell Section, elset=Ew, material=STEEL
<tw>, 5
*End Part
*****ASSEMBLY
*Assembly, name=Assembly
*Instance, name=Web, part=WebP
0., 0., 0.
0.,0.,0.,100.,0.,0.,-90.
*End Instance
*Instance, name=Fl_T, part=Flange
0., <MoveFl>, 0.
0.,0.,0.,100.,0.,0.,-90.
*End Instance
*Instance, name=Fl_D, part=Flange
0., -<MoveFl>, 0.
0.,0.,0.,100.,0.,0.,-90.
*End Instance
*Instance, name=B_T, part=Beam_ties
0., <hw05>, 0.
0.,0.,0.,100.,0.,0.,-90.
*End Instance
*Instance, name=B_D, part=Beam_ties
0., -<hw05>, 0.
0.,0.,0.,100.,0.,0.,-90.
*End Instance
*****TIES
*Nset, nset=WebTop, internal, instance=Web, GENERATE
100000, 100400, 1
*Nset, nset=WebDown, internal, instance=Web, GENERATE
300000, 300400, 1
*Nset, nset=FlangeTopM, internal, instance=Fl_T, GENERATE
200000, 200400, 1
*Nset, nset=FlangeDownM, internal, instance=Fl_D, GENERATE
200000, 200400, 1
*Nset, nset=BeamTop, internal, instance=B_T, GENERATE
10000, 10400, 1
*Nset, nset=BeamDown, internal, instance=B_D, GENERATE
10000, 10400, 1
*Surface, type=NODE, name=WebTop_Tie, internal
WebTop , 1
*Surface, type=NODE, name=WebDown_Tie, internal
WebDown , 1
*Surface, type=NODE, name=FlangeTopM_Tie, internal
FlangeTopM , 1
*Surface, type=NODE, name=FlangeDownM_Tie, internal
FlangeDownM , 1
```

```
*Surface, type=NODE, name=BeamTop_Tie, internal
BeamTop , 1
*Surface, type=NODE, name=BeamDown_Tie, internal
BeamDown , 1
*Tie, name=UpFl, adjust=no, POSITION TOLERANCE=<tf>
FlangeTopM_Tie , WebTop_Tie
*Tie, name=DFI, adjust=no, , POSITION TOLERANCE=<tf>
FlangeDownM_Tie , WebDown_Tie
*Tie, name=UpB, adjust=yes
BeamTop_Tie , WebTop_Tie
*Tie, name=DB, adjust=yes
BeamDown_Tie , WebDown_Tie
*****COUPLING
*Nset, nset=NW_Left, internal, instance=Web
200000,
*Nset, nset=NFT_Left, internal, instance=Fl_T
200000,
*Nset, nset=NFD_Left, internal, instance=Fl_D
200000,
*Nset, nset=NW_Right, internal, instance=Web
200400,
*Nset, nset=NFT_Right, internal, instance=Fl_T
200400,
*Nset, nset=NFD_Right, internal, instance=Fl_D
200400,
*Nset, nset=NW_Left-IT, internal, instance=Web, GENERATE
100000, 190000, 10000
*Nset, nset=NFT_Left-IB, internal, instance=Fl_T, GENERATE
160000, 190000, 10000
*Nset, nset=NFT_Left-IF, internal, instance=Fl_T, GENERATE
210000, 240000, 10000
*Nset, nset=NW_Left-ID, internal, instance=Web, GENERATE
210000, 300000, 10000
*Nset, nset=NFD_Left-IB, internal, instance=Fl_D, GENERATE
160000, 190000, 10000
*Nset, nset=NFD_Left-IF, internal, instance=Fl_D, GENERATE
210000, 240000, 10000
*Nset, nset=NW_Right-IT, internal, instance=Web, GENERATE
100400, 190400, 10000
*Nset, nset=NFT_Right-IB, internal, instance=Fl_T, GENERATE
160400, 190400, 10000
*Nset, nset=NFT_Right-IF, internal, instance=Fl_T, GENERATE
210400, 240400, 10000
*Nset, nset=NW_Right-ID, internal, instance=Web, GENERATE
210400, 300400, 10000
*Nset, nset=NFD_Right-IB, internal, instance=Fl_D, GENERATE
160400, 190400, 10000
```

```
*Nset, nset=NFD_Right-IF, internal, instance=FI_D, GENERATE
210400, 280400, 10000
*Surface, type=NODE, name=NW_Left-IT_C, internal
NW_Left-IT, 1
*Surface, type=NODE, name=NFT_Left-IB_C, internal
NFT_Left-IB, 1
*Surface, type=NODE, name=NFT_Left-IF_C, internal
NFT_Left-IF, 1
*Surface, type=NODE, name=NW_Left-ID_C, internal
NW_Left-ID, 1
*Surface, type=NODE, name=NFD_Left-IB_C, internal
NFD_Left-IB, 1
*Surface, type=NODE, name=NFD_Left-IF_C, internal
NFD_Left-IF, 1
*Surface, type=NODE, name=NW_Right-IT_C, internal
NW_Right-IT, 1
*Surface, type=NODE, name=NFT_Right-IB_C, internal
NFT_Right-IB, 1
*Surface, type=NODE, name=NFT_Right-IF_C, internal
NFT_Right-IF, 1
*Surface, type=NODE, name=NW_Right-ID_C, internal
NW_Right-ID, 1
*Surface, type=NODE, name=NFD_Right-IB_C, internal
NFD_Right-IB, 1
*Surface, type=NODE, name=NFD_Right-IF_C, internal
NFD_Right-IF, 1
*Coupling, constraint name=FTLB, ref node=NFT_Left, surface=NFT_Left-IB_C
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
*Coupling, constraint name=FTLF, ref node=NFT_Left, surface=NFT_Left-IF_C
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
*Coupling, constraint name=FBLB, ref node=NFD_Left, surface=NFD_Left-IB_C
*Kinematic
1, 1
3, 3
4, 4
5, 5
6, 6
```

\*Coupling, constraint name=FBLF, ref node=NFD\_Left, surface=NFD\_Left-IF\_C

\*Kinematic

1, 1

3, 3

4, 4

5, 5

6, 6

\*Coupling, constraint name=WLT, ref node=NW\_Left, surface=NW\_Left-IT\_C

\*Kinematic

1, 1

2, 2

4, 4

5, 5

\*Coupling, constraint name=WLB, ref node=NW\_Left, surface=NW\_Left-ID\_C

\*Kinematic

1, 1

2, 2

4, 4

5, 5

\*Coupling, constraint name=FTRB, ref node=NFT\_Right, surface=NFT\_Right-IB\_C

\*Kinematic

1, 1

3, 3

4, 4

5, 5

6, 6

\*Coupling, constraint name=FTRF, ref node=NFT\_Right, surface=NFT\_Right-IF\_C

\*Kinematic

1, 1

3, 3

4, 4

5, 5

6, 6

\*Coupling, constraint name=FDRB, ref node=NFD\_Right, surface=NFD\_Right-IB\_C

\*Kinematic

1, 1

3, 3

4, 4

5, 5

6, 6

\*Coupling, constraint name=FDRF, ref node=NFD\_Right, surface=NFD\_Right-IF\_C

\*Kinematic

1, 1

3, 3

4, 4

5, 5

6, 6

```
*Coupling, constraint name=WRT, ref node=NW_Right, surface=NW_Right-IT_C
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
*Coupling, constraint name=WRD, ref node=NW_Right, surface=NW_Right-ID_C
*Kinematic
1, 1
2, 2
4, 4
5, 5
*End assembly
*****METARIAL
*MATERIAL,NAME=STEEL
*ELASTIC
<E>,<nu>
*PLASTIC
<fy>,0.
*****INITIAL STRESSES
*ELSET,ELSET=FL4_Top, internal, instance=Fl_T, generate
160000,160399,1
230000,230399,1
*ELSET,ELSET=FL3_Top, internal, instance=Fl_T, generate
170000,170399,1
220000,220399,1
*ELSET,ELSET=FL2_Top, internal, instance=Fl_T, generate
180000,180399,1
210000,210399,1
*ELSET,ELSET=FL1_Top, internal, instance=Fl_T, generate
190000,190399,1
200000,200399,1
*ELSET,ELSET=FL4_Down, internal, instance=Fl_D, generate
160000,160399,1
230000,230399,1
*ELSET,ELSET=FL3_Down, internal, instance=Fl_D, generate
170000,170399,1
220000,220399,1
*ELSET,ELSET=FL2_Down, internal, instance=Fl_D, generate
180000,180399,1
210000,210399,1
*ELSET,ELSET=FL1_Down, internal, instance=Fl_D, generate
190000,190399,1
200000,200399,1
*ELSET,ELSET=W10, internal, instance=Web, generate
100000,100399,1
290000,290399,1
```

```
*ELSET,ELSET=W9, internal, instance=Web, generate
110000,110399,1
280000,280399,1
*ELSET,ELSET=W8, internal, instance=Web, generate
120000,120399,1
270000,270399,1
*ELSET,ELSET=W7, internal, instance=Web, generate
130000,130399,1
260000,260399,1
*ELSET,ELSET=W6, internal, instance=Web, generate
140000,140399,1
250000,250399,1
*ELSET,ELSET=W5, internal, instance=Web, generate
150000,150399,1
240000,240399,1
*ELSET,ELSET=W4, internal, instance=Web, generate
160000,160399,1
230000,230399,1
*ELSET,ELSET=W3, internal, instance=Web, generate
170000,170399,1
220000,220399,1
*ELSET,ELSET=W2, internal, instance=Web, generate
180000,180399,1
210000,210399,1
*ELSET,ELSET=W1, internal, instance=Web, generate
190000,190399,1
200000,200399,1
*INITIAL CONDITIONS,TYPE=STRESS
FL1_Top,<SE_FL1>
FL2_Top,<SE_FL2>
FL3_Top,<SE_FL3>
FL4_Top,<SE_FL4>
FL1_Down,<SE_FL1>
FL2_Down,<SE_FL2>
FL3_Down,<SE_FL3>
FL4_Down,<SE_FL4>
W1,<SE_W1>
W2,<SE_W2>
W3,<SE_W3>
W4,<SE_W4>
W5,<SE_W5>
W6,<SE_W6>
W7,<SE_W7>
W8,<SE_W8>
W9,<SE_W9>
W10,<SE_W10>
*****BOUNDARY CONDITIONS
```



```
*Nset, nset=NLeft,internal,instance=Web
200000,
*Nset,nset=NMiddle,internal,instance=Web
200200,
*Nset, nset=NRight,internal,instance=Web
200400,
*Nset, nset=NTopFl_1_3,internal,instance=Web
100133,
*Nset, nset=NTopFl_2_3,internal,instance=Web
100267,
*Nset,nset=NTopW,internal,instance=Web,generate
160000,160400,1
*Nset,nset=FLTopL05,internal,instance=Fl_T
200200,
*Nset,nset=FLTopL0,internal,instance=Fl_T
200000,
*Nset,nset=FLTopL1,internal,instance=Fl_T
200400,
*Nset,nset=FLTopL,internal,instance=Fl_T,generate
200000,200400,1
*Nset, nset=NCenterW, internal, instance=Web,generate
200000,200400,1
*Nset, nset=NDownW,internal,instance=Web,generate
300000,300400,1
*Nset, nset=NTopFl_L,internal,instance=Fl_T,generate
160000,160400,1
*Nset, nset=NTopFl_R,internal,instance=Fl_T,generate
240000,240400,1
*Nset, nset=NDownFl_L,internal,instance=Fl_D,generate
160000,160400,1
*Nset, nset=NDownFl_R,internal,instance=Fl_D,generate
240000,240400,1
*ELSET, ELSET=EMiddle,internal,instance=Web
200199,
*Nset,nset=WebAllN,internal,Instance=Web
Nw
*Nset, nset=FITopAllN,internal,instance=Fl_T
Nfl
*Nset, nset=FIDownAllN,internal,instance=Fl_D
Nfl
*Nset, nset=BeamTopAllN,internal,instance=B_T
Nbeam
*Nset, nset=BeamDownAllN,internal,instance=B_D
Nbeam
*Nset,nset=NALL
WebAllN , FITopAllN, FIDownAllN, BeamTopAllN, BeamDownAllN
*ELSET, ELSET=WebAllE,internal,instance=Web
```

```
Ew
*ELSET, ELSET=FITopAllE,internal,instance=FI_T
Efl
*ELSET, ELSET=FIDownAllE,internal,instance=FI_D
Efl
*ELSET, ELSET=BeamTopAllE,internal,instance=B_T
Ebeam
*ELSET, ELSET=BeamDownAllE,internal,instance=B_D
Ebeam
*Elset,elset=EALL
WebAllE , FITopAllE, FIDownAllE, BeamTopAllE, BeamDownAllE
*****SUPPORTS
*BOUNDARY
NLeft,2,4
NLeft,1
NRight,2,4
NTopFI_1_3,2
NTopFI_2_3,2
***** GEOMETRICAL IMPERFECTIONS
*IMPERFECTION,FILE=M_IPE500_LBA_5,STEP=1
3,<e0>
*****STEP 1
*STEP,NLGEOM,INC=100
*STATIC
.01,,0.00001,0.025
*****LOAD
*Cload
NLeft,5,<M_Left>
NRight,5,<M_Right>
*****REQUIRED INFO
*MONITOR,DOF=3,NODE=NMiddle,FREQ=1
*EL PRINT,SUMMARY=NO,ELSET=EMiddle
S
*NODE PRINT,NSET=NMiddle
U2 , U3, UR1
*OUTPUT,FIELD
*NODE OUTPUT,NSET=NALL
U
*ELEMENT OUTPUT,ELSET=EALL
S , SF, E
*OUTPUT,HISTORY
*NODE OUTPUT,NSET=NMiddle
U2 , U3, UR1
*NODE FILE
U
*End Step
```