

**Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Markus Kuhnhenne**

Mies-van-der-Rohe-Str. 1
D-52074 Aachen

Telefon: +49 241 80-25177
Fax: +49 241 80-22140

mku@stb.rwth-aachen.de
www.stb.rwth-aachen.de

Abschlussbericht

Untersuchungen der Grenzstützweiten der Begehbarkeit von Stahltrapezprofilen

Prof. Dr.-Ing. M. Kuhnhenne

Gesa Pauli, M. Sc.

Bericht Nr.: MLB 2022/06 – 01

Aachen, 30. August 2022



Prof. Dr.-Ing. M. Kuhnhenne



Gesa Pauli, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

1	Allgemeines	1
1.1	Einleitung und Motivation	1
1.2	Problemstellung	1
2	Stand der Technik	2
2.1	Theoretische Berechnung von Grenzstützweiten	4
2.2	Versuchsgestützte Ermittlung von Grenzstützweiten	6
2.2.1	Versuchsablauf	7
2.2.2	Normierung	9
3	Arbeitspakete	10
3.1	Voruntersuchungen	10
3.2	Versuche	12
3.2.1	Begehbarkeitsversuche	13
3.2.2	Versuche zur Ermittlung der Momententragfähigkeit	14
3.2.3	Ermittlung der Materialkennwerte	15
3.2.4	Aufnahme der Profilgeometrie	17
3.3	Normierung und Auswertung	18
3.3.1	Begehbarkeitsversuche	18
3.3.2	Momententragfähigkeit	20
3.4	Bewertung und Vergleich	22
3.4.1	Vergleich der Grenzstützweiten	22
3.4.2	Vergleich der Momententragfähigkeiten	25
4	Zusammenfassung	26
5	Ausblick	27
	Literatur	29
	Anhang	30
	A.1 Versuchsergebnisse Begehbarkeit	30
	A.2 Versuchsergebnisse Momententragfähigkeit	35

1 Allgemeines

1.1 Einleitung und Motivation

Die Verwendung höherfester Materialien in der Produktion von Stahlprofilen bietet die Möglichkeit höherer Tragfähigkeiten bei gleichbleibendem Querschnitt. Alternativ können durch die verbesserten Festigkeitseigenschaften die Bauteildicken reduziert werden. Hinsichtlich der Nutzung von Stahltrapezprofilen ermöglicht dieser Fortschritt die Realisierung herkömmlicher Spannweiten mit Profiltafeln geringerer Blechdicken und erlaubt somit einen reduzierten Materialeinsatz.

Freispannende Profiltafeln sind grundsätzlich nicht begehbar. Ausnahmen hierfür liegen jedoch zum einen während der Montage und zum anderen im Falle von Wartungs- und Reinigungsarbeiten vor. Bis zu welcher Stützweite die Profiltafeln zu diesem Zweck ohne lastverteilende Maßnahmen begangen werden dürfen, legt die sogenannte Grenzstützweite der Begehbarkeit fest. Diese stellt im deutschsprachigen Raum einen wesentlichen Aspekt bei der Auslegung von Dachaufbauten aus Stahltrapezprofilen dar. Die Grenzwerte werden entsprechend DIN EN 1090-4:2020 [1] nach bestimmten Beurteilungskriterien in Prüfungen bestimmt. Ein Rechenverfahren ist laut dieser Norm nicht vorgesehen, jedoch im Bereich der Typenzulassung neuer Profilgeometrien üblich. Hierfür wird in der Regel ein Rechenverfahren angewandt, welches auf Tragfähigkeitsberechnungen und Nachweisen nach DIN EN 1993-1-3:2010 [2] beruht und Annahmen zur Querverteilung der anzusetzenden Einzellast nach der mittlerweile zurückgezogenen DIN 18807-3:1987 [3] trifft.

1.2 Problemstellung

Im Rahmen von Voruntersuchungen [4] hat sich gezeigt, dass das gängige Rechenverfahren für einige der untersuchten Profilbleche nicht geeignet ist. Besonders im Bereich geringer Blechdicken sowie hoher Festigkeiten sind erhebliche Abweichungen zwischen berechneten und experimentell ermittelten Werten festzustellen. Da die Rechenwerte in der Regel die Grenzstützweiten der Profilbleche überschätzen, ergibt sich aus der Angabe dieser Werte in Typenzulassungen ein mögliches Sicherheitsrisiko beim Begehen derartiger Dachkonstruktionen. Entsprechend ist hierfür zurzeit nur die versuchsgestützte Ermittlung der Grenzstützweite der Begehbarkeit als ausreichend sicher zu betrachten. Durch eine Überprüfung des Rechenverfahrens anhand von theoretischen und versuchsgestützten Untersuchungen können Aussagen zur Anwendbarkeit und zu möglichen Grenzen des Verfahrens getroffen werden.

2 Stand der Technik

Mit der Einführung der DIN 18807 wurde erstmals die Bemessung und Konstruktion von Trapezprofilen im Hochbau normativ geregelt. Die ersten drei Teile befassen sich dabei mit Trapezprofilen aus Stahlblech. Die Norm enthält allgemeine Anforderungen an diesen Profiltyp, Vorgaben zur Berechnung und versuchsgestützten Ermittlung von Tragfähigkeitswerten, erforderliche Bauteilnachweise sowie Angaben zur konstruktiven Ausbildung. Die Begehbarkeit wird in allen drei Teilen behandelt, demnach ist sowohl ein versuchsgestützter als auch ein rechnerischer Nachweis zulässig [5]. Mit der Einführung der im Folgenden beschriebenen europäischen Normen sind die Teile 1 und 2 der DIN 18807 zurückgezogen worden.

Die DIN EN 1993-1-3 [2] befasst sich seit ihrer Veröffentlichung 2007 im Allgemeinen mit ergänzenden Regeln der Bemessung und Konstruktion für kaltgeformte Bauteile und Bleche aus Stahl und stellt in Teilen eine Ablösung der zurückgezogenen DIN 18807 Teil 1 und 2 dar. Zu den in der Norm behandelten Bauteilen gehören auch die im Rahmen des Forschungsprojektes untersuchten Stahltrapezprofile. Anhand der genannten europäischen Norm können Tragfähigkeitswerte für derartige Bauteile innerhalb definierter Anwendungsgrenzen rechnerisch ermittelt werden und entsprechende Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit geführt werden. Im Anhang wird zudem die Durchführung von Versuchen an Profilblechen geregelt. Das Thema der Begehbarkeit wird in der aktuell geltenden Version DIN EN 1993-1-3:2010 jedoch nicht behandelt. Dies wird sich voraussichtlich mit der Einführung der zurzeit noch als Norm-Entwurf veröffentlichten prEN 1993-1-3:2022 [6] ändern.


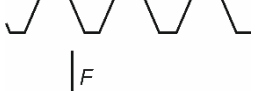
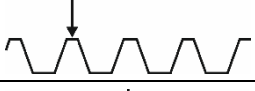
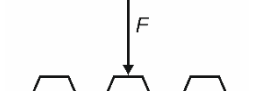
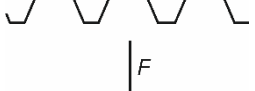
Da die Begehbarkeit vor allem im Bereich der Ausführung eine wichtige Rolle spielt, wird diesem Umstand in der 2018 erstmals veröffentlichten und 2020 aktualisierten DIN EN 1090-4 [1] Rechnung getragen. Diese behandelt die technischen Anforderungen an tragende, kaltgeformte Bauelemente im Bereich der Ausführung von Stahl- (und Aluminium-)Tragwerken. Die Norm stellt eine Ablösung der DIN 18807 Teil 3 dar und ergänzt somit die DIN EN 1993-1-3 um den Bereich der konstruktiven Ausbildung. Diese beinhaltet auch die Berücksichtigung der Begehbarkeit von Stahltrapezprofilen zu Montage- und Wartungszwecken. Hierzu wird festgelegt, dass Profiltafeln nur unter Anwendung lastverteilernder Maßnahmen begangen werden dürfen. Auf diese darf nur dann verzichtet werden, wenn die Stützweiten den Grenzwert unterschreiten [1]. Dieser Grenzwert wird anhand von in der Norm beschriebenen Prüfungen bestimmt. Die zugehörigen Beurteilungskriterien sind in Tabelle 1 aufgeführt. Es wird zwischen den folgenden zwei Belastungsmodi unterschieden:

- Begehbarkeit während der Montage (Fall I) durch Randbelastung
- Begehbarkeit nach der Montage (Fall II) durch Belastung einer Mittelrippe

Als wesentlich wird eine Verformung von 3 mm für die dauerhafte Verformung angenommen. Eine nicht wesentliche Gesamtverformung liegt dann vor, wenn das Profilblech bei Erreichen der Versagenslast von 2,0 kN eine maximale Durchbiegung von weniger als 1/100 der

Stützweite aufweist. Die Versagenslast ist laut DIN EN 1090-4 die größte bei der Prüfung gemessene Last ohne Berücksichtigung von Verformungen.

Tabelle 1 Kriterien zur Beurteilung der Begehrbarkeit nach DIN EN 1090-4 [1]

	Belastungsschema	Last F in kN	Beurteilungskriterium
Randbelastung Äußerste vollständig geformte Rippe in Verlegerichtung		1,2	Wesentliche dauerhafte Verformung
		1,5	Versagenslast
		2,0	Versagenslast mit plötzlichem Versagen ohne wesentliche Gesamtverformungen
Mittige Belastung	 	2,0	Versagenslast

Mit der Einführung einer aktualisierten Version der DIN EN 1993-1-3, welche zurzeit noch als Norm-Entwurf prEN 1993-1-3:2022 vorliegt, werden die oben beschriebenen Prüfungen der Begehrbarkeit in den Eurocode 3 aufgenommen. Dabei werden derzeit nur geringfügige Änderungen angestrebt, die zum Beispiel die Definition der Versagenslast bei mittlerer Belastung betreffen. Für diesen Fall ist es zulässig, das Beurteilungskriterium $F_{min} \geq 2,0 \text{ kN}$ auf die aufgrund von Membranwirkungen auftretende zweite Lastspitze anzuwenden, wenn ein zusätzliches Kriterium $F_{min} \geq 1,5 \text{ kN}$ bei der ersten Lastspitze erfüllt wird [6]. Für die Randbelastung werden keine weiteren Vorgaben an die Versagenslast gestellt. Zudem entfallen im aktuellen Entwurf die Erläuterungen hinsichtlich der zulässigen dauerhaften Verformung sowie des plötzlichen Versagens.

Die Grenzstützweiten der Begehrbarkeit werden neben den Widerstandsgrößen der Stahltrapezprofile in Typenblättern angegeben, welche für die Bauteilbemessung herangezogen werden können. Die Widerstandswerte werden in Bauteilversuchen oder durch Berechnung nach DIN EN 1993-1-3 [2] bestimmt. Die Grenzstützweiten der Begehrbarkeit werden nach DIN EN 1090-4 [1] unter Berücksichtigung der vorgestellten Beurteilungskriterien in Prüfungen ermittelt. Ein Rechenverfahren ist laut dieser Norm nicht vorgesehen, jedoch im Bereich der Typenzulassung neuer Profilgeometrien üblich. Hierfür wird in der Regel ein Rechenverfahren angewandt, welches auf der Tragfähigkeitsberechnung nach [2] beruht und im Folgenden erläutert wird.

2.1 Theoretische Berechnung von Grenzstützweiten

Ein Verfahren zur Berechnung der Grenzstützweite der Begehbarkeit ist normativ nicht geregelt. Eine gängige Variante ist jedoch die Berechnung anhand von Tragfähigkeitswerten. Diese lassen sich nach DIN EN 1993-1-3 [2] rechnerisch oder versuchsgestützt ermitteln. Für die Berechnung der Grenzstützweite werden diese Tragfähigkeitswerte den Einwirkungen aus den Belastungen nach Tabelle 1 gegenübergestellt. Hierfür wird das statische System eines Einfeldträgers angenommen, welcher in Feldmitte auf der jeweiligen Rippe belastet wird. Für die Untersuchung der Begehbarkeit während der Montage wird eine Belastung der Randrippe mit einer Kraft $F_I = 1,5 \text{ kN}$ angenommen, für die Begehbarkeit nach der Montage beträgt die Kraft auf eine Mittelrippe $F_{II} = 2,0 \text{ kN}$. Diese Annahmen entsprechen der durch die Norm vorgegebenen Beurteilungskriterien hinsichtlich der Versagenslast. Die Berücksichtigung der Begrenzung der dauerhaften Verformung sowie eines plötzlichen Versagens ohne wesentliche Gesamtverformung sollen im Folgenden zunächst vernachlässigt werden, da hierfür keine geeignete Berechnungsmethode vorliegt.

Zur Berechnung der Beanspruchungen aus den genannten Lastfällen ist eine Verteilung der lokal auf eine Rippe wirkenden Einzellast über die Breite des Profils erforderlich. Diese sogenannte Lastquerverteilung erfolgt in gängigen Berechnungen zur Grenzstützweite der Begehbarkeit nach DIN 18807 Teil 3 [3]. Der in dieser – seit 2018 zurückgezogenen – Norm enthaltene Ansatz zur Lastquerverteilung ohne lastverteilende Zwischenschichten ist in Abbildung 1 und Tabelle 2 dargestellt. Dieser Ansatz wird voraussichtlich auch in die aktualisierte Version der DIN EN 1993-1-3 aufgenommen und ist bereits im aktuellen Entwurf [6] enthalten.

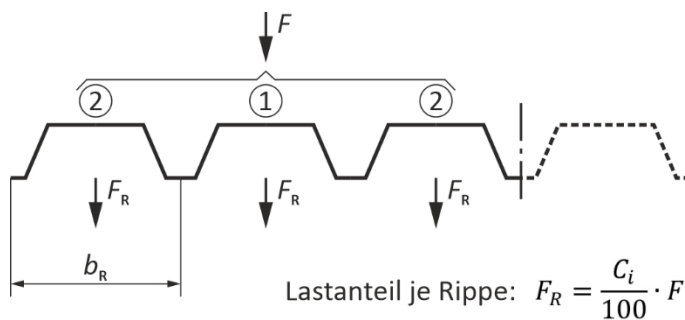


Abbildung 1 Lastquerverteilung ohne lastverteilende Zwischenschichten nach DIN 18807 Teil 3 [3]

Tabelle 2 Berechnung der Lastquerverteilung nach DIN 18807 Teil 3 [3]

Einzellast- verteilung zu	belastete Profilrippe C_1 [%]	1. benachbarte Profilrippe C_2 [%]
beiden Seiten	$(352 - 0,8 \cdot b_R) \cdot \left(\frac{x}{l} - 0,5\right)^2 + (12 + 0,2 \cdot b_R)$	$(44 - 0,1 \cdot b_R) \cdot \left[1 - 4 \left(\frac{x}{l} - 0,5\right)^2\right]$
einer Seite	$(240 - 0,6 \cdot b_R) \cdot \left(\frac{x}{l} - 0,5\right)^2 + (40 + 0,15 \cdot b_R)$	$(60 - 0,15 \cdot b_R) \cdot \left[1 - 4 \left(\frac{x}{l} - 0,5\right)^2\right]$
l	Stützweite der Profiltafel in [m]	
x	Abstand der Einzellast vom Auflager in [m]	
b_R	Rippenbreite in [mm]	

Da es sich für die Untersuchung der Begehbarkeit um Belastungen in Feldmitte eines Einfeldträgers handelt, ist der Abstand der Einzellast vom Auflager $x = l/2$. Damit ergeben sich für die beiden Belastungssituationen die folgenden Linienlasten, welche über die gesamte Profilbreite anzusetzen sind:

$$F_{I,m} = (0,40 + 1,5b_R) \cdot \frac{F_I}{b_R} \quad [\text{kN/m}] \quad (2.1)$$

$$F_{II,m} = (0,12 + 2,0b_R) \cdot \frac{F_{II}}{b_R} \quad [\text{kN/m}] \quad (2.2)$$

mit

F_i Einzellast in Belastungssituation I oder II [kN]

b_R Rippenbreite [m]

Die Grenzstützweiten der Begehbarkeit L_{gr} werden aus den Anforderungen an die Querschnittstragfähigkeit nach DIN EN 1993-1-3 [2] ermittelt. Hierbei werden die charakteristischen Werte der Tragfähigkeiten $M_{c,Rk}$ und $R_{w,Rk}$ angesetzt.

Es muss gelten:

- Für Biegung: $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk}} \leq 1$
- Für örtliche Lasteinleitung: $\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rk}} \leq 1$
- Für kombinierte Beanspruchung bei linearer Interaktion: $\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rk}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rk}} \leq 1,25$

Es ergeben sich mit der Biegebeanspruchung $M_{Ed} = \frac{4P_i m}{L_{gr}}$ und der örtlichen Lasteinleitung $F_{Ed} = P_i$ in Feldmitte die Grenzstützweiten wie folgt:

$$L_{gr,i} = \min \left(\begin{array}{l} L_{gr,i(M)} = 4 \cdot \frac{M_{c,Rk}}{F_{i,m}} \\ L_{gr,i(M+R)} = 4 \cdot \frac{1,25M_{c,Rk}}{F_{i,m}} \left(1 - \frac{F_i}{1,25R_{w,Rk} \cdot b_R} \right) \end{array} \right) \quad [m] \quad (2.3)$$

Die maßgebende Grenzstützweite ergibt sich schließlich aus dem Minimum der für Fall I und Fall II getrennt berechneten maximal möglichen Stützweiten:

$$L_{gr} = \min \left(\begin{array}{l} L_{gr,I} \\ L_{gr,II} \end{array} \right) \quad [m] \quad (2.4)$$

Die für den Einfeldträger ermittelten Grenzstützweiten dürfen für die Anwendung bei Mehrfeldträgern mit dem Faktor 1,25 erhöht werden [1].

2.2 Versuchsgestützte Ermittlung von Grenzstützweiten

Die versuchsgestützte Prüfung erfolgt nach DIN EN 1090-4 [1]. Da in dieser Norm die Randbedingungen der Prüfungen wenig detailliert vorgegeben werden, wird zudem die zurückgezogene DIN 18807 Teil 2 [7] herangezogen, welche ergänzende Vorgaben zum Versuchsaufbau und zur Durchführung bietet.

Das zu wählende statische System ist ein Einfeldträger, welcher in Feldmitte durch eine senkrecht wirkende Einzellast belastet wird. Die Lasteinleitung erfolgt quasistatisch über eine Fläche von 100 x 150 mm in den Obergurt einer Profilrippe. Die längere Seite der Fläche ist parallel zur Stützweite anzuordnen. Bei Profilgeometrien mit einer Obergurtbreite $b_o < 100 \text{ mm}$ verringert sich die Lasteinleitungsfläche entsprechend auf eine Größe von $b_o \times 150 \text{ mm}$. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen wird die Kraft über eine etwa 10 mm dicke weiche Schicht eingeleitet. In Abhängigkeit der in Abschnitt 2 erläuterten Anwendungsfälle „Begehbarkeit während der Montage“ und „Begehbarkeit nach der Montage“ wird eine Rand- oder Mittelrippe belastet. Bei der Randbelastung ist entsprechend Abbildung 2 immer die äußerste vollständig geformte Rippe in Verlegerichtung zu belasten.

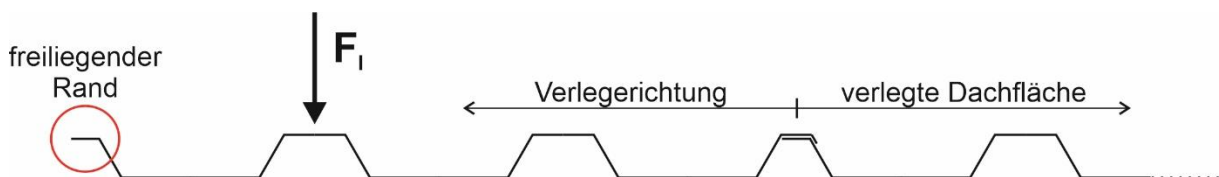


Abbildung 2 Belastung der äußersten vollständig geformten Rippe in Verlegerichtung

Die Profiltafel wird über die zu untersuchende Stützweite L beidseitig frei drehbar auf Flachstahlstreifen gelagert. Die Auflagerbreite sollte mindestens 40 mm betragen. Die schematische Darstellung der Versuchsaufbauten ist Abbildung 3 zu entnehmen.

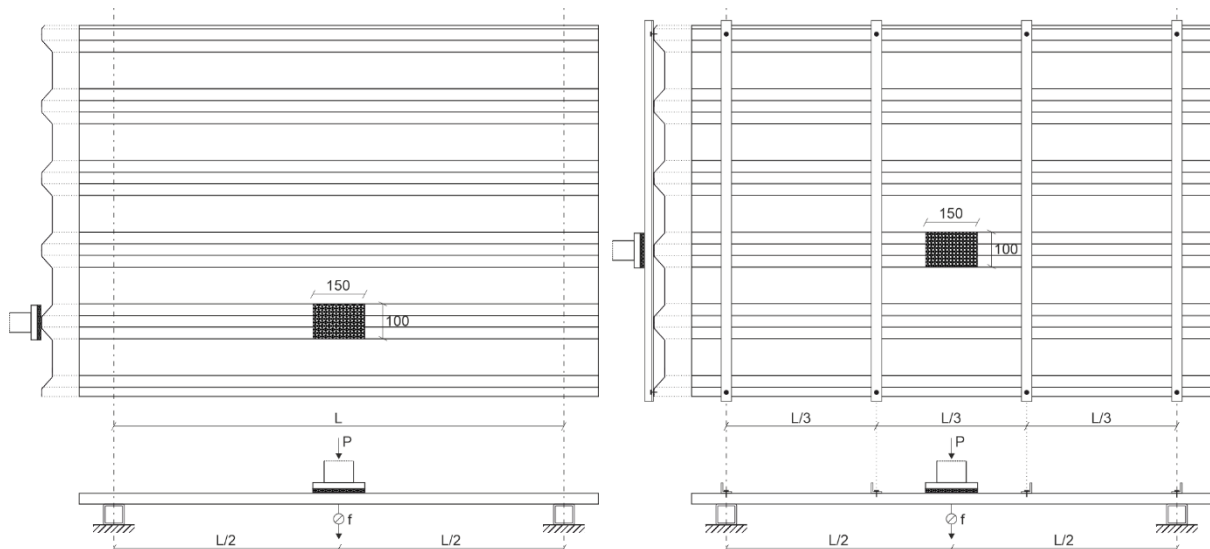


Abbildung 3 Versuchsaufbau „während der Montage“ (links) und „nach der Montage“ (rechts)

Um eine realitätsnahe Lagerung abzubilden und eine Prüfung auf der sicheren Seite zu gewährleisten, ist bei der Prüfung der Begehbarkeit während der Montage weder eine Verbindung zur Unterkonstruktion noch eine Hilfskonstruktion zur seitlichen Halterung zulässig. Im Falle der Prüfung der Begehbarkeit nach der Montage kann eine Sicherung gegen seitliches Ausweichen an den Auflagern und in den Drittelpunkten der Stützweite erfolgen, da einzelne Profiltafeln bei diesem Anwendungsfall durch ihre benachbarten Profile gesichert werden. Diese Angaben zu Hilfskonstruktionen sind der zurückgezogenen DIN 18807-2 entnommen, da sie in der aktuellen DIN EN 1090-4 nicht enthalten sind.

2.2.1 Versuchsablauf

Während der Prüfung sind die aufgebrachte Belastung und die vertikale Verformung der Profiltafel an oder in unmittelbarer Nähe zur Lasteinleitung aufzunehmen. Die Belastungsgeschwindigkeit ist über die Prüfung konstant zu halten und sollte entsprechend DIN 18807 Teil 2 maximal $1/50$ der Stützweite pro Minute betragen. Somit ergibt sich die Notwendigkeit einer weggesteuerten Belastung. In Abbildung 4 ist beispielhaft der Weg-Zeit-Verlauf in der Farbe Rot und der resultierende Kraft-Zeit-Verlauf in der Farbe Blau dargestellt. Bei Belastung der Randrippe wird die zu untersuchende Profiltafel zunächst in einem ersten Belastungsschritt bis zum Erreichen einer Kraft $F = 1,2 \text{ kN}$ belastet ① und anschließend wieder vollständig entlastet ②, um die bleibende vertikale Verformung unterhalb der Lasteinleitung aufzunehmen. Im zweiten Belastungsschritt wird die Last bis zum Versagen gesteigert ③. Bei der Belastung der Mittelrippe wird in einem Belastungsschritt bis zum Versagen geprüft.

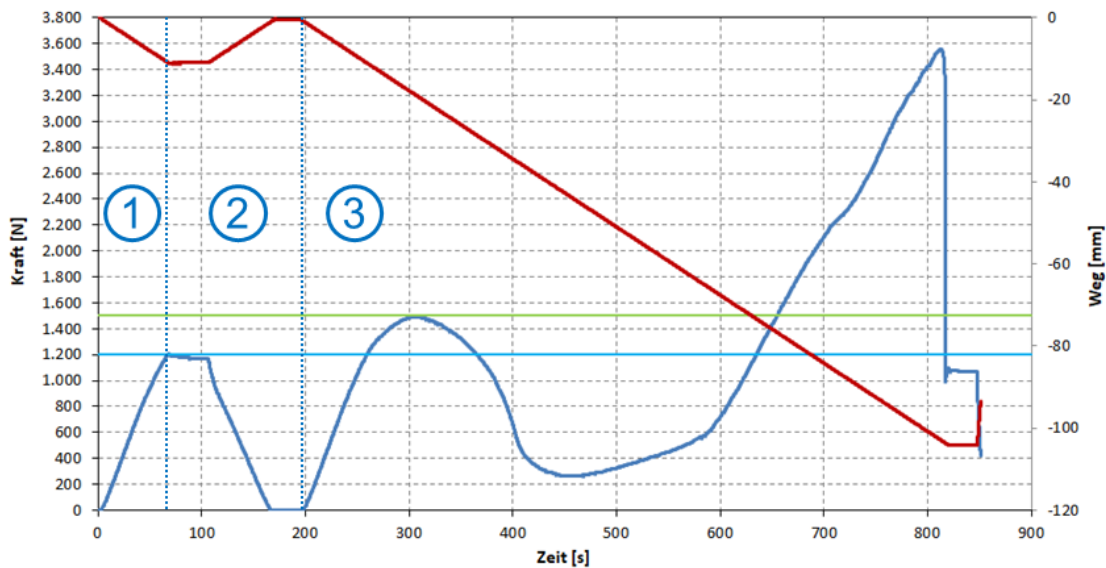


Abbildung 4 Weg-Zeit-Verlauf (rot) und Kraft-Zeit-Verlauf (blau) einer Prüfung

Nach DIN EN 1090-4 gilt als Versagenslast die größte bei der Prüfung gemessene Last ohne Berücksichtigung von Verformungen. Dies schließt eine mögliche Kraftumlagerung durch Membranwirkung nach Erreichen eines ersten Kraftmaximums ein. Dies ist jedoch teils mit sehr großen Verformungen verbunden, wie in Abbildung 5 (roter Verlauf) zu erkennen ist. Aus diesem Grund wird das Beurteilungskriterium an die Versagenslast $F_{min} \geq 1,5 \text{ kN}$ bei der Belastung einer Randrippe auf das erste auftretende Kraftmaximum $F_{max,1}$ gestellt. Bei mittlerer Belastung ist hingegen eine Kraftumlagerung zulässig. Nach Erreichen eines ersten Kraftmaximums und eines anschließenden Kraftabfalls ist eine weitere Laststeigerung möglich. Das Beurteilungskriterium $F_{min} \geq 2,0 \text{ kN}$ darf somit auf das zweite Kraftmaximum $F_{max,u}$ angewendet werden, wenn das erste Kraftmaximum $F_{max,1} \geq 1,5 \text{ kN}$ erfüllt (grüner Verlauf in Abbildung 5).

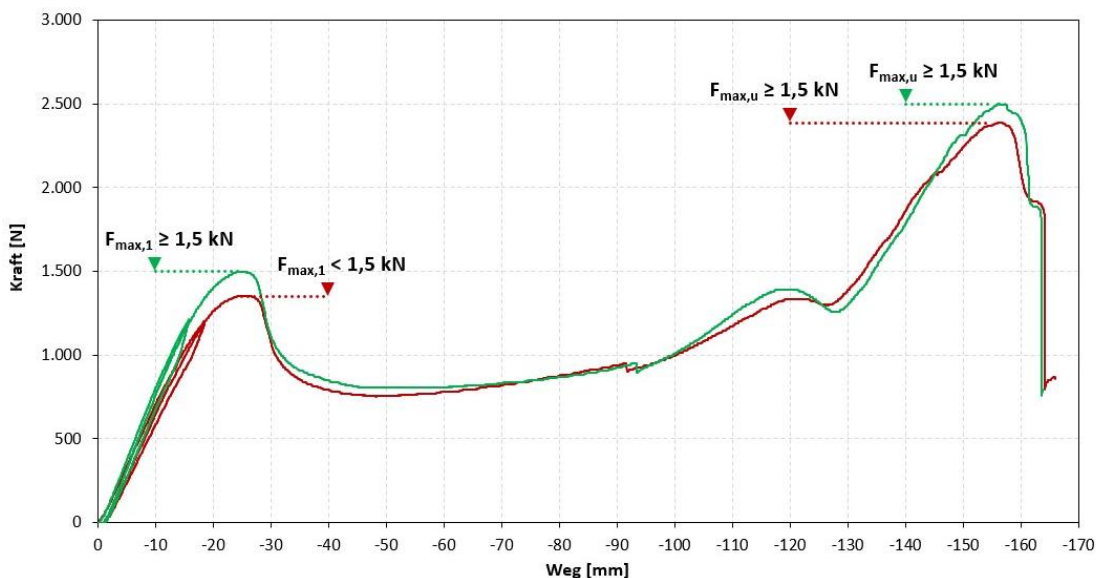


Abbildung 5 Anwendung der Beurteilungskriterien an die Versagenslast

Bei der Prüfung der Begehbarkeit sollte mit der für den Anwendungsfall avisierten Stützweite begonnen werden [1]. Für jede Stützweite sind sämtliche Beurteilungskriterien nach Tabelle 1 heranzuziehen. Ist nur ein Kriterium nicht erfüllt, muss die Stützweite verringert werden, bis alle Kriterien in der Mindestanzahl an Prüfungen entsprechend Tabelle 3 erfüllt werden.

Tabelle 3 Mindestanzahl der Prüfungen nach DIN EN 1090-4 [1]

Anzahl der zu prüfenden Mindestnennblechdicken		Anzahl der Prüfungen
Für $t_N \geq 0,60 \text{ mm}$	≥ 3	≥ 2
	2	≥ 3
	1	≥ 4
Für $t_N < 0,60 \text{ mm}$		≥ 4

2.2.2 Normierung

Die in Prüfungen ermittelten Versuchsergebnisse $R_{obs,i}$ sind mittels eines Normierungsfaktors μ_R zu korrigieren. Die Normierung berücksichtigt die tatsächlichen Werte der Kernblechdicke $t_{cor,obs}$ und Streckgrenze $f_{yb,obs}$. Diese sind mittels Schichtdickenmessung und Zugprüfungen an Proben der getesteten Profiltafeln zu bestimmen. Die Materialkennwerte werden entsprechend der folgenden Gleichungen nach DIN EN 1993-1-3 [2] berücksichtigt:

$$R_{adj,i} = \frac{R_{obs,i}}{\mu_R} \quad (2.5)$$

$$\mu_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{t_{cor,obs}}{t_{cor}} \right)^\beta \quad (2.6)$$

Mit

$$\alpha = 0,5$$

$$\beta = \begin{cases} 1 & \text{für } t_{cor,obs} \leq t_{cor} \\ 2 & \text{für } t_{cor,obs} > t_{cor} \end{cases}$$

Um die Grenzstützweite der Begehbarkeit zu ermitteln, wird die Versuchsstützweite L_V mittels Korrekturbeiwert μ_R normiert und außerdem mit einem Lastfaktor f_L multipliziert, der geringe Abweichungen der Versagenslast F_u von der Anforderungslast F_{soll} berücksichtigt:

$$L_n = \frac{1}{\mu_R} \cdot L_V \cdot f_L \quad [\text{m}] \quad (2.7)$$

Mit

$$f_L = \frac{F_u}{F_{soll}} \leq 1,0$$

Die Grenzstützweite L_{gr} ergibt sich schließlich aus der kleinsten resultierenden Stützweite nach Normierung.

3 Arbeitspakete

3.1 Voruntersuchungen

Das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Rechenverfahren wurde in dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel implementiert. Hierfür werden zunächst die Bruttoquerschnittswerte berechnet. Anschließend erfolgt die Berechnung der Nettoquerschnittswerte und der resultierenden Tragfähigkeiten nach DIN EN 1993-1-3. Diese Tragfähigkeiten werden den Beanspruchungen aus der Belastung mit einer Einzellast auf eine Rand- oder Mittelrippe gegenübergestellt. Hierbei werden Berechnungen mit und ohne Lastquerverteilung durchgeführt und jeweils die Stützweite ermittelt, für welche alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit erfüllt werden. Der maßgebende Nachweis stellt in diesem Fall immer die kombinierte Beanspruchung aus Biegemoment und örtlicher Lasteinleitung dar.

Des Weiteren wurden weitere, weniger verbreitete Rechenansätze aufgearbeitet und ebenfalls in Excel implementiert. Hierbei handelt es sich zum einen um ein Berechnungsverfahren nach J. Buca und R. Baehre [8] und zum anderen auf ein Verfahren von F. Gong und R. Baehre [9]. Beide Ansätze verfolgen ein iteratives Vorgehen zur Berechnung der Grenzstützweiten. Anders als das in Abschnitt 2.1 vorgestellte Rechenverfahren, werden bei diesen Ansätzen auch Querschnittsverformungen unter Lasteinwirkung berücksichtigt. Die belastete Rippe erfährt unter der Belastung mit einer Einzellast eine Verformung. Diese zeigt sich vor allem in einer Rippenaufweitung und infolgedessen einer Reduzierung der Profilhöhe. Da die Profilhöhe einen maßgeblichen Einflussfaktor für die Momententragfähigkeit darstellt, wird diese durch die Querschnittsverformung ebenfalls reduziert. Um diesen Umstand in der Berechnung der Grenzstützweiten zu berücksichtigen, wird eine reduzierte Tragfähigkeit infolge der Verformung ermittelt und für die Gegenüberstellung zwischen Beanspruchung und Widerstand herangezogen. Die Beanspruchung ergibt sich unter Berücksichtigung einer Lastquerverteilung, welche durch die mittragende Wirkung der Nachbarrippen bestimmt wird. Buca berücksichtigt die Querverteilung durch sogenannte Lastverteilungskoeffizienten, welche auf einem Modell von Johansson [10] für die Berechnung von Momenten und Durchbiegungen einer Trapezprofils unter Einzellast beruhen. Der Berechnungsansatz von Gong betrachtet zur Ermittlung der Beanspruchungen die belastete Rippe als elastisch gebetteten Balken, wobei die Bettung durch die Wirkung der Nachbarrippen bestimmt wird.

Die Grenzstützweiten der Begehrbarkeit werden nach den vorgestellten Verfahren für die in Tabelle 5 dargestellten Profilgeometrien in Negativlage berechnet. Dabei werden verschiedene Blechdicken und Streckgrenzen untersucht. Es ist zu beachten, dass die Berechnung der Tragfähigkeiten nach DIN EN 1993-1-3 laut nationalem Anhang [11] bis zu einer Stahlsorte von S450GD möglich ist. Im Rahmen des Projekts wurden jedoch auch Profilbleche der Stahlsorte S550GD untersucht. Trotz der Überschreitung der zulässigen Streckgrenze wurden die Berechnungen und Nachweise nach DIN EN 1993-1-3 angewandt.

Die Ergebnisse sind Tabelle 4 zu entnehmen. Es wird nach der jeweiligen Belastungssituation für die Begehbarkeit während (I) und nach (II) der Montage unterschieden. Für einige Kombinationen aus Profilgeometrie, Streckgrenze und Blechdicke ist nach dem Verfahren nach Gong kein Wert für die Grenzstützweite der Begehbarkeit während der Montage zu ermitteln.

Tabelle 4 Ergebnisse der berechneten Grenzstützweiten in Metern

Profil	Streckgrenze [N/mm ²]	Blechdicke [mm]	Lastfall	DIN EN 1993-1-3 + 1090-4		Buca/Baehre	Gong/Baehre	
				mit LQV*	ohne LQV*			
M 35.1/207	320	0,63	I	0,91	0,65	0,67	-	
			II	0,79	0,42	0,51	0,51	
		0,75	I	1,30	0,93	0,92	-	
			II	1,19	0,64	0,69	0,76	
	435	0,63	I	1,21	0,86	0,80	-	
			II	1,08	0,58	0,60	0,64	
		0,75	I	1,74	1,24	1,18	-	
			II	1,62	0,86	0,87	1,00	
	550	0,63	I	1,41	1,00	0,92	-	
			II	1,28	0,68	0,69	0,76	
	M 50/250	320	0,63	I	1,34	1,04	1,06	-
				II	1,06	0,66	0,82	0,66
0,75			I	2,12	1,65	1,58	1,21	
			II	1,80	1,12	1,19	1,09	
435		0,63	I	1,67	1,29	1,26	-	
			II	1,37	0,85	0,97	0,85	
		0,75	I	2,69	2,09	1,93	1,56	
			II	2,33	1,44	1,42	1,34	
550		0,63	I	1,95	1,51	1,44	-	
			II	1,63	1,01	1,11	1,00	
M 35/207		550	0,63	I	1,54	1,09	0,98	-
				II	1,40	0,75	0,74	0,82
EL 35/207	550	0,63	I	1,65	1,17	1,05	-	
			II	1,51	0,81	0,79	0,87	

* LQV = Lastquerverteilung nach DIN 18807-3

3.2 Versuche

In mehreren Versuchsreihen werden Versuche zur Ermittlung der Grenzstützweiten der Begehrbarkeit sowie der Momententragfähigkeit im Feld durchgeführt. Gegenstand der Untersuchungen sind Trapezprofile in Negativlage mit verschiedenen Querschnitten, Blechdicken und Streckgrenzen. Die Querschnitte der untersuchten Profile sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 **Untersuchte Profilgeometrien entsprechend der Herstellerangaben**

Versuchsreihe	Profil	Querschnitt
1	M 35.1/207	
2	M 50/250	
3	M 35/207	
4	EL 35/207	

Es ergibt sich das folgende Prüfprogramm nach Tabelle 6. Die Anzahl der Versuche ergibt sich aus der Summe der voraussichtlich zu prüfenden Stützweiten bis zum Erfüllen der Anforderungen und der Mindestanzahl an Prüfungen für Rand- und Mittenbelastung sowie für die Ermittlung der Momententragfähigkeit im Feld. Letztere wird nur für Versuchsreihe 1 und 2 durchgeführt.

Tabelle 6 Prüfprogramm

Versuchsreihe	Profil	Streckgrenze f_{yb} [N/mm ²]	Blechdicke t_N [mm]	Anzahl Versuche	
				Begehbarkeit	Tragfähigkeit
1	M 35.1/207	320	0,63	14	3
			0,75	14	3
		435	0,63	14	3
			0,75	14	3
		550	0,63	16	4
		2	M 50/250	320	0,63
0,75	14				3
435	0,63			14	3
	0,75			14	3
550	0,63			16	4
3	M 35/207			550	0,63
4	EL 35/207	550	0,63	16	-
Summe der Versuche				176	32
				208	

3.2.1 Begehbarkeitsversuche

Die versuchsgestützte Ermittlung der Grenzstützweiten der Begehbarkeit erfolgt nach dem in Abschnitt 2.2 vorgestelltem Verfahren. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 dargestellt. Zunächst werden Versuche unter Belastung der Randrippe durchgeführt, da zu erwarten ist, dass diese maßgebend werden. Begonnen wird mit einer Stützweite im Bereich der zuvor in Arbeitspaket 1 theoretisch berechneten Grenzstützweiten. Werden die Anforderung nach Tabelle 1 nicht erfüllt, wird die Stützweite verringert. Dies erfolgt solange, bis die Anforderungen in der Mindestanzahl der Prüfungen nach Tabelle 3 mit gleicher Stützweite erfüllt werden können. Die untersuchten Stützweiten und zugehörige Versagenslasten sind in Anhang A.1 aufgeführt.

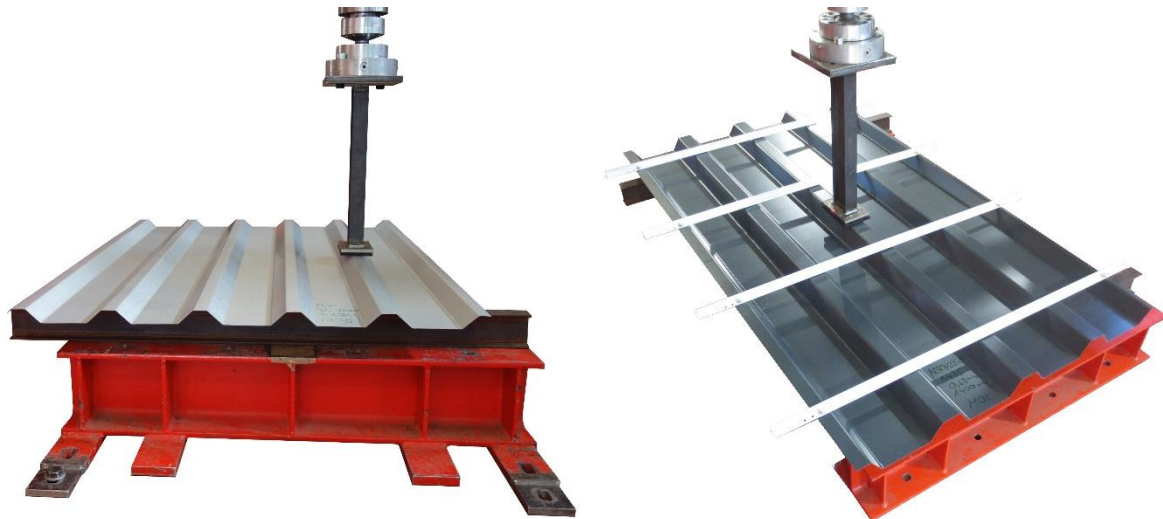


Abbildung 6 Versuchsaufbauten für Randbelastung (links) und Mittenbelastung (rechts)

Die Belastung der Stahltrapezprofile erfolgt weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min über eine servohydraulische Prüfmaschine, welche eine maximale Kraft von 100 kN aufbringen kann. Der Kraft-Wegverlauf des Zylinders wird über die Zylindersteuerung aufgenommen. Die vertikale Durchbiegung der Profiltafeln wird über Wegaufnehmer in Feldmitte gemessen. Neben der Messung der Verformung unterhalb der Lasteinleitung werden auch in allen anderen schmalen Gurten Wegaufnehmer angebracht, um die Querverformung des Prüfkörpers aufzunehmen. Die Anordnung der Wegaufnehmer ist Abbildung 7 zu entnehmen. Die Nummerierung unterscheidet sich je nach Belastungssituation, da Seilzug 1 immer unterhalb der Lasteinleitung positioniert wird.

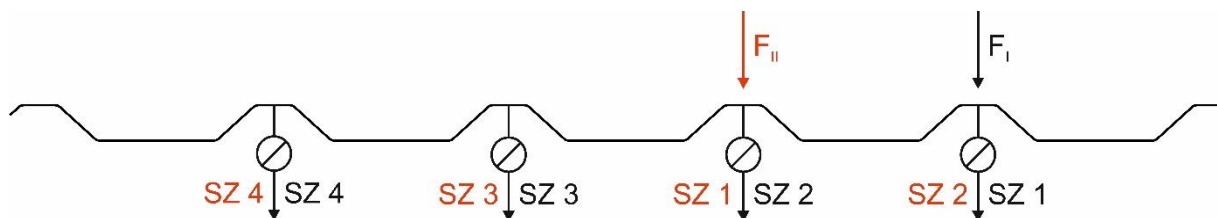


Abbildung 7 Anordnung der Wegaufnehmer (Seilzüge) für Rand- (schwarz) und Mittenbelastung (rot)

3.2.2 Versuche zur Ermittlung der Momententragfähigkeit

Die Ermittlung der Momententragfähigkeit erfolgt in Versuchen nach DIN EN 1993-1-3 Anhang A.2. Die Prüfungen werden am Einfeldträger durchgeführt, wobei die gleichmäßig verteilte Belastung durch Linienlasten über Querträger simuliert wird. Die Stützweite wird so gewählt, dass sie der zuvor in Versuchen ermittelten Grenzstützweite der Begehbarkeit des jeweiligen Profils entspricht. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 8 dargestellt. Für jeden Profiltyp werden mindestens vier Prüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Anhang A.2 aufgeführt. Das auf die Profiltafel wirkende Eigengewicht der Lasteinleitungsstruktur wird dabei mittels einer Vorlast berücksichtigt.

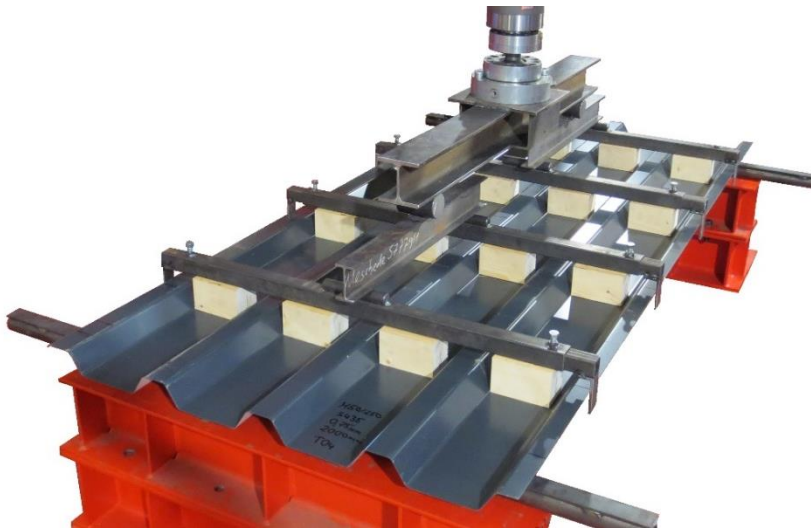


Abbildung 8 Versuchsaufbau zur Ermittlung der Momententragfähigkeit

Die Belastung erfolgt erneut weggesteuert mit einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 mm/min. Der Kraft-Wegverlauf des Zylinders wird über die Zylindersteuerung aufgenommen. Die vertikale Durchbiegung der Profiltafeln wird über Wegaufnehmer in Feldmitte gemessen. Die Anordnung dieser entspricht der Anordnung für Fall II in Abbildung 7.

3.2.3 Ermittlung der Materialkennwerte

Es werden Zugversuche nach DIN EN ISO 6892-1 [12] an Zugproben der Probenform 2 entsprechend Anhang B der Norm durchgeführt. Dafür werden aus jedem Coil mindestens fünf Materialproben entnommen. Die Nennstreckgrenzen und die ermittelten Festigkeiten R_{eH} sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7 Ergebnisse der Zugversuche

Profile	Nennstreckgrenze f_{yb} [N/mm ²]	Nennblechdicke t_N [mm]	gemessene Streckgrenze $f_{yb,obs}$ [N/mm ²]
M 35.1/207	320	0,63	361,52
		0,75	357,67
M 50/250	435	0,63	442,49
M 35/207		0,75	432,64
		550	533,20
EL 35/207	550	0,63	661,19

Die verwendeten Werkstoffe weisen unterschiedliche Beschichtungen auf. Alle Coils verfügen über eine Korrosionsschutzschicht aus Zink, welche in der Nennblechdicke enthalten ist. Die Zusammensetzung und Dicke variiert jedoch. Einige Profilbleche sind zudem mit einer teils farbigen Polyesterbeschichtung überzogen, welche jedoch nicht in der Nennblechdicke enthalten ist. Eine Übersicht der Beschichtungen zeigt Tabelle 8.

Tabelle 8 Übersicht über die Beschichtungen der untersuchten Profilbleche nach Herstellerangaben

Profile	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	Korrosionsschutz		Polyesterbeschichtung	
			Bez.	t_{zinc} [mm je Seite]	$t_{coat,1}$ [mm]	$t_{coat,2}$ [mm]
M 35.1/207	320	0,63	AZ 185	0,025	-	-
		0,75	AZ 185	0,025	-	-
M 50/250	435	0,63	ZM 120	0,009	0,025	0,01
M 35/207		0,75	ZM 120	0,009	0,025	0,01
		550	ZM 140	0,011	0,025	0,01
EL 35/207	550	0,63	AZ 185	0,025	-	-

Für die Überprüfung der Nenn- und Kernblechdicken werden metallographische Schriffe unter dem Mikroskop betrachtet und die einzelnen Schichtdicken gemessen. Beispielhafte Aufnahmen sind in Abbildung 9 dargestellt. Die gemessenen Schichtdicken sind Tabelle 9 zu entnehmen. Es zeigen sich teils deutliche Abweichungen (rot markiert) von den Herstellerangaben, besonders im Bereich der Polyesterbeschichtungen und Kernblechdicken. Da erstere aus statischer Sicht nicht relevant sind, können diese im Folgenden vernachlässigt werden. Die Abweichung der Kernblechdicken geht hingegen in die Normierung der Versuchsergebnisse ein.

Tabelle 9 Gemessene Schichtdicken

Profile	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	$t_{cor,nom}$ [mm]	$t_{total,obs}$ [mm]	$t_{zinc,1,obs}$ [mm]	$t_{zinc,2,obs}$ [mm]	$t_{coat,1,obs}$ [mm]	$t_{coat,2,obs}$ [mm]	$t_{cor,obs}$ [mm]
M 35.1/207	320	0,63	0,59	0,618	0,020	0,030	-	-	0,568
		0,75	0,71	0,748	0,024	0,039	-	-	0,685
M 50/250	435	0,63	0,59	0,629	0,010	0,011	0,010	0,006	0,592
M 35/207		0,75	0,71	0,726	0,011	0,011	0,012	0,008	0,685
		550	0,63	0,59	0,656	0,011	0,012	0,040	0,009
EL 35/207	550	0,63	0,59	0,632	0,029	0,022	-	-	0,580

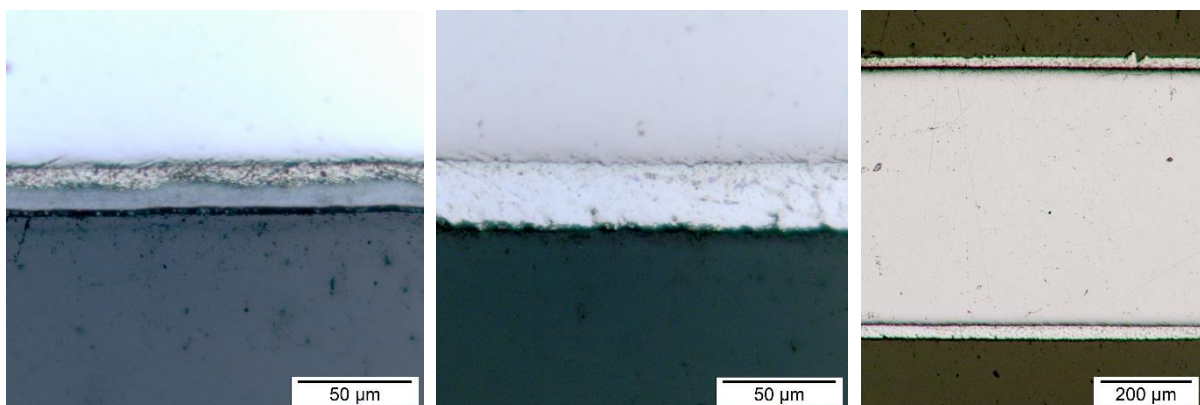


Abbildung 9 Aufnahmen metallographischer Schriffe von Blechen mit verschiedenen Beschichtungen

3.2.4 Aufnahme der Profilgeometrie

Für jeden Profiltyp aus jedem Werkstoff wird die Profilgeometrie an vier Prüfkörpern aufgenommen. Tabelle 10 zeigt die Mittelwerte der Messwerte und die entsprechenden Sollwerte, welche sich aus den Herstellerangaben unter Berücksichtigung der Blech- und Beschichtungsdicken ergeben. Die Nennwerte der Abmessungen (vgl. Tabelle 5) beziehen sich auf die Profilmittellinien und die Nennblechdicke beinhaltet lediglich metallische Überzüge. Nahezu alle Abmessungen erfüllen die Anforderungen an geometrische Toleranzen nach DIN 1090-4 [1]. Geringe Abweichungen von den zulässigen geometrischen Toleranzen zeigten sich bei den Profilblechen, an denen die Breite des verwendeten Coils geringfügig von der erforderlichen Einlaufbreite abwich. Diese sind in der Tabelle rot markiert.

Tabelle 10 Mittel- und Sollwerte der aufgenommenen Abmessungen

Profil	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	b_u [mm]	b_o [mm]	h [mm]
M 35.1/207	320	0,63	33,25	105,75	32,25
Sollwert			33,57	106,57	31,63
M 35.1/207	320	0,75	32,75	105,75	32,25
Sollwert			33,68	106,68	31,75
M 35.1/207	435	0,63	32,75	105,75	32,25
Sollwert			33,61	106,61	31,67
M 35.1/207	435	0,75	32,75	105,75	31,75
Sollwert			33,72	106,72	31,79
M 35.1/207	550	0,63	32,75	105,75	31,00
Sollwert			33,61	106,61	31,67
M 50/250	320	0,63	54,25	135,25	49,50
Sollwert			55,00	136,00	49,13
M 50/250	320	0,75	53,75	136,00	50,00
Sollwert			55,19	136,19	49,25
M 50/250	435	0,63	54,25	135,00	49,75
Sollwert			55,06	136,06	49,17
M 50/250	435	0,75	54,25	135,25	50,25
Sollwert			55,25	136,25	49,29
M 50/250	550	0,63	54,00	134,50	48,00
Sollwert			55,06	136,06	49,17
M 35/207	550	0,63	40,25	118,75	33,75
Sollwert			40,91	119,91	33,67
EL 35/207	550	0,63	41,50	119,50	34,00
Sollwert			40,87	119,87	33,63

3.3 Normierung und Auswertung

Die aufgenommenen Versuchsdaten aus den Begebarkeits- und Tragfähigkeitsversuchen werden hinsichtlich Stützweiten, Versagenslasten und Verformungen ausgewertet. Hierfür werden die untersuchten Stützweiten mit den ermittelten Versagenslasten und den Materialkennwerten entsprechend Abschnitt 2.2.2 normiert.

3.3.1 Begebarkeitsversuche

Die Grenzstützweiten der Begebarkeit für die zwei Fälle „vor“ und „während der Montage“ ergeben sich aus den normierten Versuchsergebnissen. Der jeweils kleinste Wert wird maßgebend, wobei sich dieser in fast allen Versuchsreihen aus den Prüfungen unter Belastung der Randrippe ergibt. Einzig für das Profil M 35/207 werden die Ergebnisse der Versuche mit Mittelbelastung maßgebend, wobei in diesem Fall ein seitliches Ausweichen durch die gewählte Hilfskonstruktion nicht ausreichend verhindert wurde. In den anderen Versuchsreihen wurde die Hilfskonstruktion entsprechend so angepasst, dass die Begebarkeit von befestigten Profiltafeln nach der Montage realitätsnah abgebildet wird. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11 Normierte Ergebnisse der Begebarkeitsversuche

Profil	Streckgrenze		(Kern-)Blechdicke			Stützweite	Normierung		
	f_{yb} [N/mm ²]	$f_{yb,obs}$ [N/mm ²]	t_N [mm]	t_{cor} [mm]	$t_{cor,obs}$ [mm]	L_V [m]	μ_R	$\min f_L$	L_n [m]
M 35.1/207	320	361,52	0,63	0,59	0,568	0,55	1,02320	-	0,27*
		357,67	0,75	0,71	0,685	0,95	1,02050	0,973	0,91
	435	442,49	0,63	0,59	0,592	0,62	1,01429	0,984	0,60
		432,64	0,75	0,71	0,685	1,15	0,96196	0,981	1,17
	550	533,20	0,63	0,59	0,584	0,61	0,97431	0,995	0,62
	M 50/250	320	361,52	0,63	0,59	0,568	0,95	1,02320	0,981
357,67			0,75	0,71	0,685	1,75	1,02050	0,979	1,68
435		442,49	0,63	0,59	0,592	1,40	1,01429	0,976	1,35
		432,64	0,75	0,71	0,685	2,10	0,96196	0,968	2,11
550		533,20	0,63	0,59	0,584	1,40	0,97431	0,989	1,42
M 35/207		550	533,20	0,63	0,59	0,584	0,95	1,02320	0,981
EL 35/207	550	661,19	0,63	0,59	0,580	1,10	1,07841	1,000	1,02

* Die ermittelte Grenzstützweite ergibt sich aus der Extrapolation der in den Prüfungen kleinstmöglichen Stützweite und der darin erzielten Versagenslast.

Für die Prüfungen unter Belastung der Randrippe wird neben dem Verlauf der Kraft auch die bleibende Verformung unterhalb der Lasteinleitung nach einer Belastung mit $F = 1,2 \text{ kN}$ und anschließender Entlastung aufgezeichnet. Die Anforderung an eine maximale bleibende Verformung von 3 mm wird jedoch für keines der getesteten Profile maßgebend. In den Prüfungen, in denen die Anforderungen an das erste Kraftmaximum erfüllt werden konnten, betragen die bleibenden Verformungen maximal 1 mm, die Entlastung erfolgte im nahezu rein elastischen Bereich, wie in Abbildung 10 zu erkennen ist.

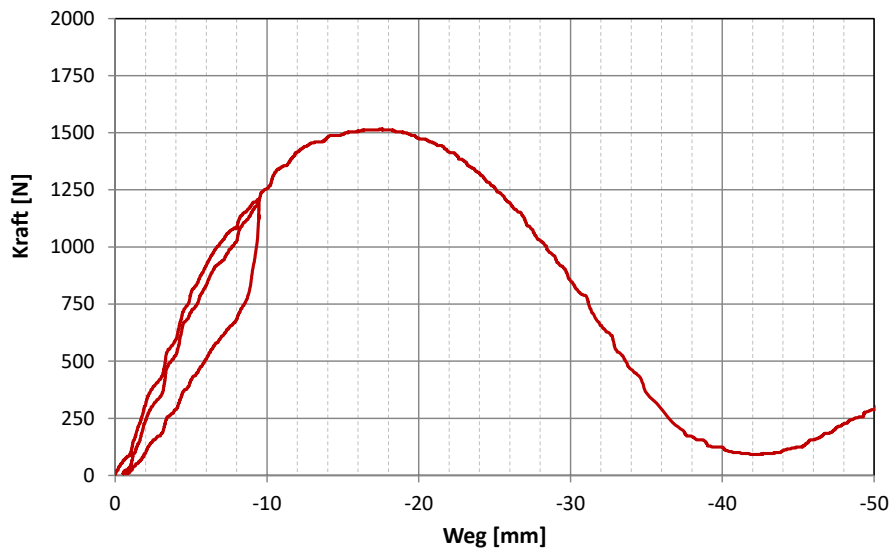


Abbildung 10 Ausschnitt eines Kraft-Weg-Verlaufs im Bereich des ersten Kraftmaximums

Die auftretenden Querverformungen sind stützweitenabhängig. Bei der Randbelastung stellt sich bis nach Erreichen des ersten Kraftmaximums eine Verdrehung der Untergurte und ein Abheben der unbelasteten Rippen und des freiliegenden Randes ein. Da letzterer nur durch das Eigengewicht einer halben Rippe und nicht durch weitere Rippen gegen Abheben gehalten wird, erfährt dieser die größte Verformung. Auf der anderen Seite der belasteten Rippe nehmen die Verformungen mit zunehmendem Abstand zur Lasteinleitung ab. Je größer die Stützweite, desto geringfügiger fällt die Verformung der unbelasteten Rippen aus, da das entgegenwirkende Gewicht der Profiltafel zunimmt. Auch eine erhöhte Blechdicke stellt deswegen eine größere Behinderung des Abhebens dar. Erst nach dem Kraftabfall und bei erneuter Laststeigerung tritt eine Durchbiegung der unbelasteten Rippen und somit eine mittragende Wirkung auf. Abbildung 11 zeigt die Querverformungen bei Erreichen des ersten Kraftmaximums $F_{max,1} = 1,5 \text{ kN}$ sowie den Verlauf der Verformungen in Feldmitte in Abhängigkeit der Belastung an zwei verschiedenen Stützweiten. Es zeigt sich, dass die Nachbarrippen bei kleiner Stützweite bis nach dem ersten Kraftmaximum deutlich abheben (links), während die unbelasteten Rippen bei großer Stützweite kaum Verformung erfahren (rechts).

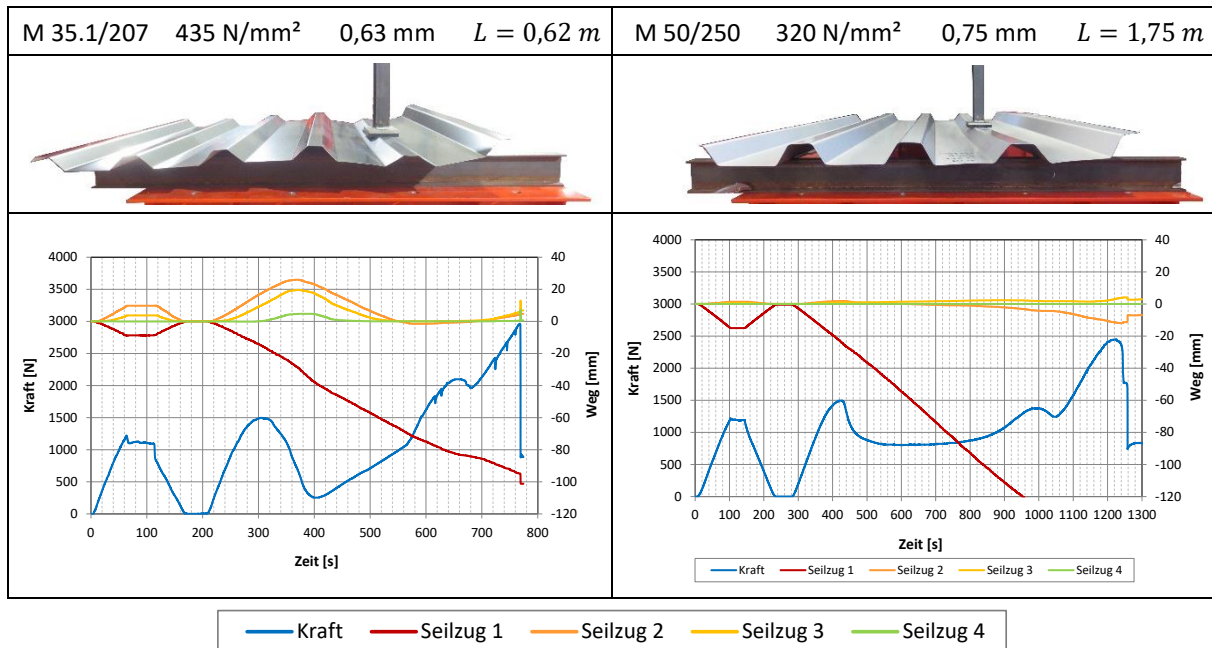


Abbildung 11 Querverformungen bei Belastung der Randrippe

Neben den vertikalen Verformungen zeigt sich auch eine Aufweitung der belasteten Rippe in horizontaler Richtung. Diese Verformung wird im Auflagerbereich durch Reibung im Kontaktbereich zwischen Profiltafel und Auflager gehemmt. Das zuvor beschriebene Abheben der unbelasteten Rippen reduziert jedoch den Kontakt und führt somit zu einer verstärkten Rippenaufweitung. Am freiliegenden Rand kann die Verformung in horizontaler Richtung nahezu uneingeschränkt stattfinden. Durch die Rippenaufweitung wird die Höhe der belasteten Rippe reduziert, woraus eine Abminderung der Tragfähigkeit resultiert.

Ein ähnliches Verformungsbild zeigt sich bei der Betrachtung der Verformungen bei Belastung einer Mittelrippe. Auch hier tritt zunächst ein Abheben der Nachbarrippen auf, welches mit zunehmender Stützweite weniger ausgeprägt ist. Erst nach dem ersten Kraftabfall kommt es zu Verformungen der Nachbarrippen in Belastungsrichtung und somit zu einer mittragenden Wirkung. Dies erklärt auch, dass das erste Kraftmaximum bei Rand- und Mittelbelastung ähnlich hoch ist. Bis zum Erreichen dieses Maximums findet der Lastabtrag fast ausschließlich über die belastete Rippe statt. Aufgrund der verwendeten Hilfskonstruktion zur Verhinderung des seitlichen Ausweichens fällt die Rippenaufweitung bei Belastung einer Mittelrippe jedoch geringer aus, sodass eine höhere Tragfähigkeit erhalten bleibt. Dies spiegelt sich auch in dem etwas höherem ersten Kraftmaximum wider.

3.3.2 Momententragfähigkeit

Aus den aufgenommenen Versagenlasten F_{max} unter Berücksichtigung der Vorlast der Lasteinleitungsstruktur kann die erreichte Tragfähigkeit im Feld berechnet werden. Dabei geht auch die Anzahl der Rippen n einer Profiltafel sowie die Rippenbreite b_R ein, sodass sich die Momententragfähigkeit pro Meter wie folgt ergibt:

$$M_{max} = \frac{F_{max} \cdot L_V}{8 \cdot n \cdot b_R} \quad [\text{kNm/m}] \quad (3.1)$$

Die Versuchstützweite L_V richtet sich nach der für das jeweilige Profil ermittelten Grenzstützweite L_{Grenz} ohne Berücksichtigung der Normierung. Für jedes Profil wurden zwei verschiedene Stützweiten gewählt, um einen möglichen Einfluss zu untersuchen. Dabei wurden zudem die Profillängen und somit der Überstand an den Auflagern variiert. Es zeigt sich, dass die Stützweite im untersuchten Bereich keinen nennenswerten Einfluss auf die Momententragfähigkeit hat. Es lässt sich jedoch ein Einfluss des Überstands feststellen. Wird bei gleicher Stützweite ein längeres Profil gewählt, hat dies einen positiven Einfluss auf die erreichte Tragfähigkeit. Im Falle der im Rahmen des Projekts durchgeführten Prüfungen variiert der Überstand je nach Profil zwischen 50 und 250 mm und der prozentuale Einfluss liegt bei bis zu 7 %.

Aus den ermittelten Momententragfähigkeiten wird der Mittelwert \bar{M}_{max} gebildet und dieser mit dem Korrekturfaktor μ_R belegt, um den Einfluss der Materialkennwerte zu berücksichtigen. Auf eine statistische Auswertung und die Berechnung charakteristischer Widerstandswerte wurde an dieser Stelle jedoch verzichtet.

$$M_n = \frac{\bar{M}_{max}}{\mu_R} \quad [\text{kNm/m}] \quad (3.2)$$

Die Ergebnisse sind Tabelle 12 zu entnehmen.

Tabelle 12 Versuchsergebnisse und Normierung der Momententragfähigkeiten

Profil	Streckgrenze	Blechdicke	Stützweite			Momententragfähigkeit		
	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	L_{Grenz} [m]	$L_{V,1}$ [m]	$L_{V,2}$ [m]	\bar{M}_{max} [kNm/m]	μ_R	M_n [kNm/m]
M 35.1/207	320	0,63	0,55	0,62	0,55	1,40	1,02320	1,37
		0,75	0,95	1,05	0,95	2,26	1,02050	2,22
	435	0,63	0,62	0,75	0,62	1,58	1,01429	1,56
		0,75	1,15	1,15	1,05	2,63	0,96196	2,73
	550	0,63	0,61	0,75	0,61	1,98	0,97431	2,03
	M 50/250	320	0,63	0,95	1,20	0,95	2,07	1,02320
0,75			1,75	2,00	1,75	2,20	1,02050	2,15
435		0,63	1,40	1,40	1,20	2,12	1,01429	2,09
		0,75	2,10	2,10	2,00	3,33	0,96196	3,47
550		0,63	1,40	1,60	1,40	2,26	0,97431	2,32

3.4 Bewertung und Vergleich

Vergleicht man die ermittelten Grenzstützweiten und die zugehörigen erreichten Momententragfähigkeiten, so zeigt sich eine nicht immer passende Korrelation. Einige der Profile weisen eine geringe Grenzstützweite auf, obwohl sie eine vergleichsweise gute Tragfähigkeit erzielen konnten. Dies ist zum Beispiel im Vergleich des Profils M 35.1/207 mit einer Nennblechdicke von 0,63 mm ersichtlich. Je höher die Streckgrenze, desto größer ist die erreichte Momententragfähigkeit, wobei die Grenzstützweiten diese Steigerung nicht widerspiegeln. Die Profile der Streckgrenzen 435 N/mm² und 550 N/mm² weisen eine ähnliche Grenzstützweite auf, durch die erhöhte Streckgrenze konnte jedoch eine Verbesserung der Tragfähigkeit von 30 % erreicht werden. Dies bestätigt sich auch für die gleichen Streckgrenzen und Nennblechdicken des Profils M 50/250. Auch hier konnte trotz Steigerung der Momententragfähigkeit nur eine geringfügig größere Grenzstützweite erzielt werden. Im Vergleich der Streckgrenzen 320 und 435 N/mm² bestätigt sich dies allerdings für keine der untersuchten Profile und Blechdicken. Hier konnten durch die erhöhte Streckgrenze sowohl bessere Grenzstützweiten als auch höhere Momententragfähigkeiten erreicht werden. Daraus lässt sich ein möglicher Einfluss der örtlichen Lasteinleitung ableiten, welcher einen kombinierten, nicht gleichmäßigen Einfluss von Profilgeometrie, Streckgrenze und Blechdicke erklärt.

3.4.1 Vergleich der Grenzstützweiten

Nachfolgend werden zunächst die Versuchsergebnisse mit den Berechnungen nach Abschnitt 2.1 verglichen. Der Vergleich ist Tabelle 13 zu entnehmen. Es zeigen sich teils deutliche Abweichungen der versuchsgestützt ermittelten Grenzstützweiten der Begehbarkeit und der berechneten Werte. Besonders große Differenzen treten bei geringen Blechdicken und hohen Streckgrenzen auf. Außerdem fällt auf, dass in den Berechnungen der Fall II „nach der Montage“ maßgebend für die Begehbarkeit ist, während sich bei den Versuchen in der Regel die Randbelastung als maßgebend erwiesen hat. Dies lässt sich auf die Anwendung der theoretischen Lastquerverteilung und die Vernachlässigung der Querschnittsverformung der belasteten Rippe in der theoretischen Berechnung zurückführen. Aus diesem Grund wird die Lastquerverteilung für die Randbelastung ausgesetzt. Aufgrund der günstigeren Randbedingungen durch die Hilfskonstruktion ist damit auch die Erfüllung der Anforderungen an das erste Kraftmaximum bei Belastung der Mittelrippe gewährleistet. Für die Anforderung an die Versagenslast $F_{max,u} \geq 2,0 \text{ kN}$ wird die Lastquerverteilung weiterhin berücksichtigt, da es nach Erreichen des ersten Maximums und dem anschließenden Kraftabfall zu einer Umverteilung der Last auf die Nachbarrippen kommt. Es zeigt sich, dass die mit diesem Ansatz berechneten Ergebnisse die Versuchsergebnisse besser abbilden, jedoch bei geringen Blechstärken und vor allem für niedrigere Profile ebenfalls auf der unsicheren Seite liegen. Dies lässt sich mit der nach wie vor nicht berücksichtigten Querschnittsverformung der belasteten Rippe erklären, welche mit abnehmender Profilhöhe größer ausfällt. Dies ist auch in Abbildung 11 deutlich zu erkennen. Die belastete Rippe des Profils M 35/207 erfährt bei gleicher Belastung größere

Verformungen als beim M 50/250, da der geringe Stegwinkel die Rippenaufweitung begünstigt.

Tabelle 13 Vergleich der rechnerischen und versuchsgestützt ermittelten Grenzstützweiten

Profil	Streckgrenze	Blechdicke	Versuch normiert	Fall I (LQV)		Fall II (LQV)		Fall I (ohne LQV)	
	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	L_n [m]	$L_{calc,I}$ [m]		$L_{calc,II}$ [m]		$L_{calc,I}$ [m]	
M 35.1/207	320	0,63	0,27	0,91	-70%	0,79	-66%	0,65	-58%
		0,75	0,91	1,30	-30%	1,19	-24%	0,93	-2%
	435	0,63	0,60	1,21	-50%	1,08	-44%	0,86	-30%
		0,75	1,17	1,74	-33%	1,62	-28%	1,24	-6%
	550	0,63	0,62	1,41	-56%	1,28	-52%	1,00	-38%
		0,75	1,17	1,74	-33%	1,62	-28%	1,24	-6%
M 50/250	320	0,63	0,91	1,34	-32%	1,06	-14%	1,04	-13%
		0,75	1,68	2,12	-21%	1,80	-7%	1,65	2%
	435	0,63	1,35	1,67	-19%	1,37	-1%	1,29	5%
		0,75	2,11	2,69	-22%	2,33	-9%	2,09	1%
	550	0,63	1,42	1,95	-27%	1,63	-13%	1,51	-6%
		0,75	2,11	2,69	-22%	2,33	-9%	2,09	1%
M 35/207	550	0,63	0,97	1,54	-37%	1,40	-31%	1,09	-11%
EL 35/207	550	0,63	1,02	1,65	-38%	1,51	-33%	1,17	-13%
Abs. Abweichungen der Versuchsergebnisse:				≤ 10 %		10 – 25 %		≥ 25 %	

Die Berechnungsverfahren nach Buca und Gong berücksichtigen neben der Lastquerverteilung auch die Querschnittsverformung. Dabei wird die Momententragfähigkeit der belasteten Rippe am verformten Querschnitt berechnet. Hierfür wird zunächst die Rippenaufweitung aufgrund der im Querschnitt durch die örtliche Lasteinleitung herrschenden Schubkräfte ermittelt, wobei die Behinderung der horizontalen Verformung durch die Nachbarrippen anhand von Abtriebskräften bzw. Federsteifigkeiten berücksichtigt wird. Die mittragende Wirkung in vertikaler Richtung und die damit einhergehende Lastquerverteilung wird durch eine elastische Bettung abgebildet, dessen Steifigkeit sich aus der Verformung der Nachbarrippen ergibt. Für die Ausführung der Berechnungsmethoden zur Ermittlung der Federsteifigkeiten wird an dieser Stelle auf [8] und [9] verwiesen. Der Vergleich der Ergebnisse ist in Tabelle 14 dargestellt. Auch nach diesen Rechenverfahren stellt sich die Mittenbelastung als maßgebend heraus, da die höhere Lasteinwirkung von $F_{II} = 2,0 \text{ kN}$ einen größeren Einfluss hat als die erhöhte mittragende Wirkung durch beidseitige Nachbarrippen. Es zeigt sich, dass auch diese Verfahren die Versuchsergebnisse nicht abbilden können. Teils entsprechen die berechneten Werte für Fall I zwar annähernd den versuchsgestützt ermittelten Grenzstützweiten, welche durch die Prüfung unter Randbelastung bestimmt werden, allerdings trifft dies nicht auf alle

Profilgeometrien, Streckgrenzen und Blechdicken zu. In einigen Fällen werden die Versuchsergebnisse deutlich über- oder untertroffen.

Tabelle 14 Vergleich mit Berechnungsmethoden nach Buca und Gong

Profil	Streckgrenze	Blechdicke	Versuch normiert	Buca				Gong			
	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	L_n [m]	L_I [m]		L_{II} [m]		L_I [m]		L_{II} [m]	
M 35.1/207	320	0,63	0,27	0,67	-60%	0,51	-47%	-	-	0,51	-47%
		0,75	0,91	0,92	-1%	0,69	32%	-	-	0,76	19%
	435	0,63	0,60	0,80	-25%	0,60	-1%	-	-	0,64	-7%
		0,75	1,17	1,18	-1%	0,87	34%	-	-	1,00	17%
	550	0,63	0,62	0,92	-32%	0,69	-10%	-	-	0,76	-18%
M 50/250	320	0,63	0,91	1,06	-14%	0,82	11%	-	-	0,66	37%
		0,75	1,68	1,58	6%	1,19	42%	1,21	39%	1,09	54%
	435	0,63	1,35	1,26	7%	0,97	39%	-	-	0,85	60%
		0,75	2,11	1,93	9%	1,42	48%	1,56	35%	1,34	57%
	550	0,63	1,42	1,44	-2%	1,11	29%	-	-	1,00	42%
M 35/207	550	0,63	0,97	0,98	-1%	0,74	31%	-	-	0,82	18%
EL 35/207	550	0,63	1,02	1,05	-3%	0,79	29%	-	-	0,87	18%

Eine Verbesserung der realitätsnahen Abbildung der Versuchsergebnisse stellt möglicherweise die Kombination verschiedener Ansätze dar. Da die Belastung der Randrippe als in der Regel maßgebend betrachtet werden kann und die Anforderung an das erste Kraftmaximum ohne mittragende Wirkung der Nachbarrippen gestellt wird, kann auf den Ansatz einer Lastquerverteilung womöglich vollständig verzichtet werden, da diese Anforderung in der Regel maßgebend wird. Die Querschnittsverformung der belasteten Rippe und die daraus resultierende Reduzierung der Momenten Tragfähigkeit ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Hierfür spielt die Rippenaufweitung unterhalb der Lasteinleitung eine entscheidende Rolle, wobei die Verformungsbehinderung durch die Nachbarrippen berücksichtigt werden sollte.

3.4.2 Vergleich der Momententragfähigkeiten

Der Vergleich versuchsgestützt ermittelter Momententragfähigkeiten zeigt größtenteils geringere Abweichungen von den berechneten Querschnittswerten, wie Tabelle 15 zu entnehmen ist. Einige der in Versuchen ermittelten Werte übertreffen jedoch die Berechnung deutlich. Die Momententragfähigkeiten unterliegen, anders als die Begehbarkeit, nicht dem Einfluss einer lokalen Lasteinleitung in den Obergurt und den damit verbundenen Querschnittsverformungen einer Rippe. Es lässt sich somit vermuten, dass vor allem diese lokalen Einflüsse die Grenzstützweiten der Begehbarkeit maßgeblich bestimmen.

Tabelle 15 Vergleich der Momententragfähigkeiten

Profil	Streckgrenze	Blechdicke	Versuch normiert	Berechnung	
	f_{yb} [N/mm ²]	t_N [mm]	M_n [kNm/m]	M_{calc} [kNm/m]	
M 35.1/207	320	0,63	1,37	1,32	4%
		0,75	2,22	1,69	31%
	435	0,63	1,56	1,65	-5%
		0,75	2,73	2,18	26%
	550	0,63	2,03	1,86	9%
M 50/250	320	0,63	2,02	1,83	10%
		0,75	2,15	2,54	-15%
	435	0,63	2,09	2,13	-2%
		0,75	3,47	3,09	12%
	550	0,63	2,32	2,40	-3%

4 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts wurden theoretische und praktische Untersuchungen zu Grenzstützweiten der Begehbarkeit sowie zur Momententragfähigkeit von Stahltrapezprofilen in Negativlage durchgeführt. Dabei wurden verschiedene Profilgeometrien, Blechdicken und Streckgrenzen untersucht.

Die Auswertung der Begehbarkeitsversuche zeigt einen deutlichen Einfluss der Profilgeometrie und der Blechdicken, während der Einfluss der Streckgrenze weniger ausgeprägt ist. Teils konnten für Profilbleche mit einer Streckgrenze von 550 N/mm² nur geringfügig bessere Werte erzielt werden als mit einer Streckgrenze von 435 N/mm². Im Falle der Versuche zur Ermittlung der Momententragfähigkeiten zeigt sich hingegen ein deutlicher Einfluss auch hinsichtlich der Streckgrenzen.

Für den Vergleich der Versuchsergebnisse wurden neben dem gängigen Berechnungsverfahren, welches auf Tragfähigkeitswerten und Nachweisen nach DIN EN 1993-1-3 beruht, weitere Rechenmodelle herangezogen. Bei den Grenzstützweiten zeigten sich deutliche Abweichungen der versuchsgestützt ermittelten von den berechneten Werten. Die Versuchsergebnisse konnten durch keines der Verfahren zuverlässig abgebildet werden. Es zeigt sich jedoch beim Vergleich der Momententragfähigkeiten, welche weniger große Abweichungen aufweisen, dass vor allem der Einfluss der lokalen Lasteinleitung bei den Begehbarkeitsversuchen eine entscheidende Rolle spielt. Durch diese Form der Lasteinleitung in den Obergurt der Profile erfährt die belastete Profilrippe eine erhebliche Querschnittsverformung, welche zu einer reduzierten Tragfähigkeit führt. Für das, in der Regel maßgebende, Anforderungskriterium an das erste Kraftmaximum $F_{max,1} \geq 1,5 \text{ kN}$ für Rand- und Mittenbelastung wird eine Umlagerung der Kräfte auf Nachbarrippen ausgeschlossen, da eine mittragende Wirkung erst nach Erreichen dieser Lastspitze und anschließender Entlastung eintritt. Für das zusätzliche Kriterium an die Versagenslast $F_{max,u} \geq 2,0 \text{ kN}$ bei mittlerer Belastung ist die Kraftumlagerung jedoch zulässig. Da dieses Kriterium jedoch für keinen untersuchten Fall maßgebend wurde, kann auf die Anwendung einer Lastquerverteilung im Berechnungsverfahren möglicherweise verzichtet werden.

Zusammenfassend wird durch die durchgeführten Untersuchungen die anfangs beschriebene Problematik der stark voneinander abweichenden Grenzstützweiten in Abhängigkeit der Ermittlungsmethode – rechnerisch oder versuchsgestützt – bestätigt. Nach aktuellem Stand ist keines der bekannten Rechenverfahren in der Lage die Grenzstützweiten der Begehbarkeit für die untersuchten Profile ausreichend realitätsnah abzubilden. Aufgrund der sich daraus möglicherweise ergebenden Sicherheitsrisiken beim Begehen von Dächern aus diesen Stahltrapezprofilen wird unbedingt empfohlen, die versuchsgestützte Ermittlung der Grenzstützweiten anzuwenden oder im Allgemeinen auf lastverteilende Maßnahmen beim Begehen zurückzugreifen. Bei den untersuchten Profilgeometrien handelte es sich um Profile mit Steghöhen von maximal 50 mm, eine Aussage zur Begehbarkeit von Profilen mit höheren Querschnitten ist somit nicht möglich. Hierfür bedarf es weiterer Untersuchungen.

5 Ausblick

Ein quantifizierbarer Zusammenhang der untersuchten Einflussfaktoren auf die Grenzstützweiten der Begehbarkeit konnte im Rahmen des Forschungsprojekts nicht ermittelt werden. Die Anwendungsgrenzen des häufig genutzten Rechenverfahrens auf Basis von Tragfähigkeitswerten nach DIN EN 1993-1-3 liegen zudem außerhalb des untersuchten Bereichs. Für die Festlegung solcher Grenzen der Anwendbarkeit sind weitere Untersuchungen an unterschiedlichen Profilgeometrien erforderlich. Mit einer dadurch ebenfalls verbesserten Datenbasis ist auch die Erstellung und Validierung numerischer Modelle denkbar. Durch die Möglichkeit der Parametrisierung eines solchen Modells könnten die Einflussfaktoren im Detail und unabhängig voneinander untersucht werden und somit möglicherweise definierbare Abhängigkeiten geschlussfolgert werden. Somit wäre durch Anpassung des aktuellen Rechenverfahrens oder durch die Entwicklung eines neuen Ansatzes in Zukunft auch die zuverlässige Berechnung der Grenzstützweiten denkbar.

Die während der experimentellen Untersuchungen aufgetretenen offenen Fragstellungen bezüglich Auslegung des Versuchsaufbaus und Durchführung der Prüfungen, sollen in Zukunft durch detaillierte Vorgaben in DIN EN 1993-1-3 geklärt werden. Im Zuge der Überarbeitung dieser Norm liegt zurzeit ein Normentwurf vor, welcher die Aufnahme des Themas der Begehbarkeit in diese Norm vorsieht. Das bisher in DIN EN 1090-4 behandelte Verfahren zur Prüfung der Begehbarkeit enthält neben den Beurteilungskriterien auch Angaben zum Versuchsaufbau und zur Durchführung. Es fehlen jedoch relevante Informationen zur realitätsnahen Abbildung der Belastungs- und Einbausituation, so z. B. die Anwendung von Hilfskonstruktionen, welche bereits in DIN 18807 enthalten war, sowie die Definition der Versagenslast für die Auslegung der Beurteilungskriterien. Diese Details sollen bei der Aufnahme der Begehbarkeit in DIN EN 1993-1-3 ergänzt werden. Hierfür werden konkrete Vorschläge formuliert und beim DIN-Normenausschuss eingereicht.

Literatur

- [1] *DIN EN 1090-4: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 4: Technische Anforderungen an tragende, kaltgeformte Bauelemente aus Stahl und tragende, kaltgeformte Bauteile für Dach-, Decken-, Boden- und Wandanwendungen*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2020.
- [2] *DIN EN 1993-1-3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.
- [3] *DIN 18807 Teil 3: Stahltrapezprofile – Festigkeitsnachweis und konstruktive Ausbildung*, Deutsches Institut für Normung e.V., 1987.
- [4] M. Kuhnhenne, D. Pyschny und G. Pauli, „Zur Ermittlung der Grenzstützweiten der Begehrbarkeit von Stahltrapezprofilen,“ *Stahlbau*, Bd. Heft 11, 2020.
- [5] *DIN 18807 Teil 1: Stahltrapezprofile – Allgemeine Anforderungen, Ermittlung der Tragfähigkeitswerte durch Berechnung*, Deutsches Institut für Normung e.V., 1987.
- [6] *prEN 1993-1-3:2022: Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting*, CEN - EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2022.
- [7] *DIN 18807 Teil 2: Stahltrapezprofile – Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen*, Deutsches Institut für Normung e.V., 1987.
- [8] R. Baehre und J. Buca, „Ein Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Begehrbarkeit von Trapezprofilen,“ *Stahlbau* 58, 1989.
- [9] R. Baehre und F. Gong, „Ein neues Berechnungsverfahren zur Beurteilung der Begehrbarkeit von dünnwandigen Trapezprofilen,“ *Stahlbau* 65, 1996.
- [10] G. Johansson, „Single Load on Trapezoidal Steel Sheet,“ IABSE Reports, 1986.
- [11] *Nationaler Anhang – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2017.
- [12] *DIN EN ISO 6892-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*, Deutsches Institut für Normung e.V., 2020.

Anhang

A.1 Versuchsergebnisse Begehrbarkeit

Versuchsreihe 1: Profil M 35.1/207

Versuch	Belastung	Profillänge	Stützweite	bleibende Verformung	1. Kraftmaximum	Versagenslast
		L_{ges} [m]	L_v [m]	$u_{bleibend}$ [mm]	$F_{max,1}$ [N]	$F_{max,u}$ [N]
M351_BRN_320_63/1	Rand	1,25	1,00	47,93	996	1936
M351_BRN_320_63/2	Rand	1,25	0,80	46,31	1192	3264
M351_BRN_320_63/3	Rand	1,00	0,70	40,00	1176	3584
M351_BRN_320_63/4	Rand	1,00	0,62	1,80	1244	2380
M351_BRN_320_63/5	Rand	1,00	0,55	0,83	1296	2216
M351_BRN_320_63/6	Rand	0,75	0,50	30,98	1152	4624
M351_BMN_320_63/1	Mitte	1,00	0,62	-	1296	10460
M351_BMN_320_63/2	Mitte	1,00	0,55	-	1368	10052
M351_BMN_320_63/3	Mitte	0,75	0,50	-	1144	10680

M351_BRN_435_63/1	Rand	1,25	1,10	44,92	1132	1668
M351_BRN_435_63/2	Rand	1,25	1,00	0,33	1244	2320
M351_BRN_435_63/3	Rand	1,25	0,90	0,15	1332	3172
M351_BRN_435_63/4	Rand	1,00	0,75	0,29	1388	3968
M351_BRN_435_63/5	Rand	1,00	0,70	0,24	1420	3496
M351_BRN_435_63/6a	Rand	1,00	0,62	0,03	1496	2964
M351_BRN_435_63/6b	Rand	1,00	0,62	0,18	1488	2732
M351_BRN_435_63/6c	Rand	1,00	0,62	0,09	1476	2720
M351_BMN_435_63/1	Mitte	1,00	0,62	-	1564	10168
M351_BMN_435_63/2	Mitte	1,00	0,62	-	1584	11320
M351_BMN_435_63/4	Mitte	1,00	0,62	-	1592	10044

M351_BRN_550_63/1	Rand	1,50	1,25	60,89	964	1312
M351_BRN_550_63/2	Rand	1,50	1,10	57,18	1096	1988
M351_BRN_550_63/3	Rand	1,25	0,95	55,66	1180	2420
M351_BRN_550_63/4	Rand	1,25	0,90	1,27	1216	2736
M351_BRN_550_63/5	Rand	1,25	0,75	0,42	1416	3464
M351_BRN_550_63/6	Rand	1,00	0,65	0,62	1460	3452
M351_BRN_550_63/7	Rand	1,00	0,61	0,50	1492	2528
M351_BRN_550_63/8	Rand	1,00	0,61	0,53	1516	2436
M351_BRN_550_63/9	Rand	1,00	0,61	0,39	1528	2636
M351_BMN_550_63/1	Mitte	1,00	0,61	-	1604	12204
M351_BMN_550_63/2	Mitte	1,00	0,61	-	1588	11284
M351_BMN_550_63/3	Mitte	1,25	0,61	-	1724	11880
M351_BMN_550_63/4	Mitte	1,00	0,61	-	1596	10376
M351_BMN_550_63/5	Mitte	1,00	0,61	-	1580	16004

M351_BRN_320_75/1	Rand	1,75	1,50	38,01	1008	-
M351_BRN_320_75/2	Rand	1,75	1,35	36,38	1116	-
M351_BRN_320_75/3	Rand	1,50	1,25	2,69	1200	1752
M351_BRN_320_75/4	Rand	1,50	1,20	1,30	1264	1936
M351_BRN_320_75/5	Rand	1,50	1,15	1,15	1300	2024
M351_BRN_320_75/6	Rand	1,50	1,10	0,97	1336	2424
M351_BRN_320_75/7	Rand	1,50	1,00	0,60	1464	3168
M351_BRN_320_75/8	Rand	1,25	1,00	0,76	1404	2824
M351_BRN_320_75/9	Rand	1,25	0,95	0,65	1492	3556
M351_BRN_320_75/10	Rand	1,25	0,95	0,65	1460	3276
M351_BRN_320_75/11	Rand	1,25	0,95	0,68	1472	3176
M351_BMN_320_75/1	Mitte	1,25	0,95	-	1584	8040
M351_BMN_320_75/2	Mitte	1,25	0,95	-	1572	7328
M351_BMN_320_75/3	Mitte	1,25	0,95	-	1572	7284

M351_BRN_435_75/1	Rand	2,00	1,60	35,24	1096	0
M351_BRN_435_75/2	Rand	1,75	1,50	37,92	1156	0
M351_BRN_435_75/3	Rand	1,75	1,25	0,26	1428	2168
M351_BRN_435_75/4	Rand	1,50	1,20	0,11	1452	1868
M351_BRN_435_75/5	Rand	1,50	1,20	0,17	1448	1948
M351_BRN_435_75/6	Rand	1,50	1,15	0,18	1472	2028
M351_BRN_435_75/7	Rand	1,50	1,15	0,20	1508	2112
M351_BRN_435_75/8	Rand	1,50	1,15	0,20	1496	2112
M351_BMN_435_75/1	Mitte	1,50	1,15	-	1588	7804
M351_BMN_435_75/2	Mitte	1,50	1,15	-	1600	8376
M351_BMN_435_75/3	Mitte	1,50	1,15	-	1620	8372
M351_BMN_435_75/4	Mitte	1,25	1,15	-	1532	6688

Versuchsreihe 2: Profil M 50/250

Versuch	Belastung	Profillänge	Stützweite	bleibende Verformung	1. Kraftmaximum	Versagenslast
		L_{ges} [m]	L_v [m]	$u_{bleibend}$ [mm]	$F_{max,1}$ [N]	$F_{max,u}$ [N]
M50_BRN_320_63/10	Rand	1,50	1,40	1,48	1232	3600
M50_BRN_320_63/11	Rand	1,50	1,30	1,01	1316	5460
M50_BRN_320_63/12	Rand	1,50	1,25	0,53	1340	4676
M50_BRN_320_63/13	Rand	1,50	1,20	0,38	1388	6020
M50_BRN_320_63/1	Rand	1,50	1,10	0,24	1464	8936
M50_BRN_320_63/14	Rand	1,50	1,10	0,83	1424	3464
M50_BRN_320_63/2	Rand	1,50	1,05	0,32	1504	8028
M50_BRN_320_63/3	Rand	1,25	1,05	0,44	1452	6724
M50_BRN_320_63/15	Rand	1,25	1,05	1,25	1432	5368
M50_BRN_320_63/4	Rand	1,25	1,02	0,71	1436	7180
M50_BRN_320_63/5	Rand	1,25	1,00	0,91	1476	7004
M50_BRN_320_63/6	Rand	1,25	1,00	0,59	1448	6792
M50_BRN_320_63/7	Rand	1,25	0,95	0,38	1492	4768
M50_BRN_320_63/8	Rand	1,25	0,95	0,95	1472	9036
M50_BRN_320_63/9	Rand	1,25	0,95	0,83	1476	8740
M50_BMN_320_63/1	Mitte	1,25	0,95	-	1584	7548
M50_BMN_320_63/2	Mitte	1,25	0,95	-	1588	7664
M50_BMN_320_63/3	Mitte	1,25	0,95	-	1600	7468
M50_BRN_435_63/9	Rand	1,75	1,65	0,71	1248	2148
M50_BRN_435_63/1	Rand	1,75	1,40	0,44	1468	3780
M50_BRN_435_63/2	Rand	1,75	1,40	0,73	1472	3904
M50_BRN_435_63/3	Rand	1,75	1,40	0,88	1480	3672
M50_BRN_435_63/3a	Rand	1,50	1,40	-0,01	1464	3536
M50_BRN_435_63/4	Rand	1,50	1,30	0,26	1508	3856
M50_BRN_435_63/5	Rand	1,50	1,25	0,59	1620	5012
M50_BRN_435_63/6	Rand	1,50	1,20	0,32	1612	5976
M50_BRN_435_63/7	Rand	1,50	1,10	0,50	1612	4004
M50_BRN_435_63/8	Rand	1,25	1,05	0,36	1712	6024
M50_BMN_435_63/1	Mitte	1,75	1,40	-	1564	6044
M50_BMN_435_63/2	Mitte	1,75	1,40	-	1576	6232
M50_BMN_435_63/3	Mitte	1,75	1,40	-	1584	6360
M50_BMN_435_63/4	Mitte	1,50	1,40	-	1520	5400

M50_BRN_550_63/1	Rand	1,75	1,65	1,57	1292	2308
M50_BRN_550_63/2	Rand	1,75	1,50	1,12	1428	3384
M50_BRN_550_63/3	Rand	1,75	1,40	1,04	1544	4340
M50_BRN_550_63/4	Rand	1,50	1,40	0,88	1484	3060
M50_BRN_550_63/5	Rand	1,50	1,40	1,00	1516	3168
M50_BRN_550_63/6	Rand	1,50	1,30	-	1608	4692
M50_BRN_550_63/7	Rand	1,50	1,20	0,71	1700	7152
M50_BRN_550_63/8	Rand	1,50	1,10	0,56	1800	10000
M50_BRN_550_63/9	Rand	1,25	1,10	0,85	1716	5160
M50_BMN_550_63/1	Mitte	1,75	1,40	-	1620	7060
M50_BMN_550_63/2	Mitte	1,75	1,40	-	1640	7016
M50_BMN_550_63/3	Mitte	1,50	1,40	-	1564	5972
M50_BMN_550_63/4	Mitte	1,50	1,40	-	1580	5928

M50_BRN_320_75/1	Rand	2,50	2,25	81,98	1168	1784
M50_BRN_320_75/9	Rand	2,50	2,10	0,97	1272	1956
M50_BRN_320_75/10	Rand	2,25	2,10	1,25	1256	1824
M50_BRN_320_75/2	Rand	2,50	2,00	0,83	1352	2388
M50_BRN_320_75/11	Rand	2,25	2,00	0,83	1320	1940
M50_BRN_320_75/3	Rand	2,25	1,80	0,80	1444	2556
M50_BRN_320_75/5	Rand	2,00	1,75	0,50	1492	2448
M50_BRN_320_75/6	Rand	2,00	1,75	0,79	1468	2476
M50_BRN_320_75/7	Rand	2,00	1,75	0,59	1496	2500
M50_BRN_320_75/4	Rand	2,00	1,70	0,76	1560	2724
M50_BRN_320_75/8	Rand	2,00	1,50	0,21	1724	3888
M50_BMN_320_75/1	Mitte	2,00	1,75	-	1528	5224
M50_BMN_320_75/2	Mitte	2,00	1,75	-	1548	5196
M50_BMN_320_75/3	Mitte	2,00	1,75	-	1544	5212

M50_BRN_435_75/1	Rand	2,75	2,50	0,79	1252	1700
M50_BRN_435_75/2	Rand	2,50	2,35	0,45	1332	1740
M50_BRN_435_75/3	Rand	2,50	2,25	0,59	1404	1752
M50_BRN_435_75/4	Rand	2,50	2,15	0,35	1444	1960
M50_BRN_435_75/5	Rand	2,50	2,10	0,33	1484	2064
M50_BRN_435_75/6	Rand	2,50	2,10	0,29	1492	2068
M50_BRN_435_75/7	Rand	2,50	2,10	0,47	1512	2096
M50_BRN_435_75/8	Rand	2,25	2,10	0,53	1452	1916
M50_BRN_435_75/9	Rand	2,25	2,00	0,41	1552	1872
M50_BMN_435_75/1	Mitte	2,50	2,10	-	1552	5760
M50_BMN_435_75/2	Mitte	2,50	2,10	-	1520	5580
M50_BMN_435_75/3	Mitte	2,25	2,10	-	1520	5000
M50_BMN_435_75/4	Mitte	2,25	2,10	-	1524	5236

Versuchsreihe 3: Profil M 35/207

Versuch	Belastung	Profillänge	Stützweite	bleibende Verformung	1. Kraftmaximum	Versagenslast
		L _{ges} [m]	L _v [m]	u _{bleibend} [mm]	F _{max,1} [N]	F _{max,u} [N]
M35_BRN_550_63/1	Rand	1,75	1,50	37,62	968	1596
M35_BRN_550_63/2	Rand	1,50	1,25	39,12	1156	2412
M35_BRN_550_63/3	Rand	1,50	1,15	1,10	1300	3328
M35_BRN_550_63/4	Rand	1,50	1,10	0,67	1348	3872
M35_BRN_550_63/5	Rand	1,25	1,00	0,50	1404	4236
M35_BRN_550_63/7	Rand	1,25	0,95	0,67	1512	5440
M35_BRN_550_63/8	Rand	1,25	0,95	0,54	1516	5156
M35_BRN_550_63/9	Rand	1,25	0,95	0,30	1532	5188
M35_BRN_550_63/6	Rand	1,25	0,90	0,65	1596	6304
M35_BMN_550_63/1	Mitte	1,25	0,95	-	1496	10540
M35_BMN_550_63/2	Mitte	1,50	0,95	-	1572	14668
M35_BMN_550_63/3	Mitte	1,25	0,95	-	1492	10732

Versuchsreihe 4: Profil EL 35/207

Versuch	Belastung	Profillänge	Stützweite	bleibende Verformung	1. Kraftmaximum	Versagenslast
		L _{ges} [m]	L _v [m]	u _{bleibend} [mm]	F _{max,1} [N]	F _{max,u} [N]
EL35_BRN_550_63/1	Rand	1,75	1,50	44,98	1072	1316
EL35_BRN_550_63/2	Rand	1,75	1,50	42,12	1087	1388
EL35_BRN_550_63/5	Rand	1,75	1,45	29,65	1196	1532
EL35_BRN_550_63/6	Rand	1,50	1,43	28,18	1184	1460
EL35_BRN_550_63/4	Rand	1,75	1,40	0,92	1256	1760
EL35_BRN_550_63/7	Rand	1,50	1,40	1,53	1204	1576
EL35_BRN_550_63/8	Rand	1,50	1,40	1,62	1196	1564
EL35_BRN_550_63/9	Rand	1,50	1,40	1,50	1200	1516
EL35_BRN_550_63/3	Rand	1,50	1,25	0,88	1320	2136
EL35_BRN_550_63/10	Rand	1,50	1,15	0,03	1512	2568
EL35_BRN_550_63/11	Rand	1,25	1,15	0,06	1436	2324
EL35_BRN_550_63/12	Rand	1,25	1,10	0,00	1508	2784
EL35_BRN_550_63/13	Rand	1,25	1,10	0,05	1528	2792
EL35_BRN_550_63/14	Rand	1,25	1,10	-0,02	1524	2668
EL35_BMN_550_63/1	Mitte	1,75	1,40	-	1272	5912
EL35_BMN_550_63/2	Mitte	1,75	1,40	-	1268	5816
EL35_BMN_550_63/3	Mitte	1,75	1,40	-	1256	5908
EL35_BMN_550_63/4	Mitte	1,25	1,10	-	1540	7476
EL35_BMN_550_63/5	Mitte	1,25	1,10	-	1568	7452
EL35_BMN_550_63/6	Mitte	1,25	1,10	-	1568	7536

A.2 Versuchsergebnisse Momententragfähigkeit

Versuchsreihe 1: Profil M 35.1/207

Versuch	Profillänge	Stützweite	Versagens- last	Moment	
	L_{ges} [m]	L_v [m]	$F_{max,u}$ [N]	M_{max} [kNm]	M_{max} [kNm/m]
M351_T_320_63/1	1,00	0,62	18451	1,430	1,382
M351_T_320_63/2	1,00	0,55	21274	1,463	1,413
M351_T_320_63/3	0,75	0,55	21168	1,455	1,406
M351_T_320_63/4	0,75	0,55	21070	1,449	1,400
M351_T_320_75/1	1,50	1,05	18205	2,389	2,309
M351_T_320_75/2	1,25	1,05	17009	2,232	2,157
M351_T_320_75/3	1,25	0,95	19557	2,322	2,244
M351_T_320_75/4	1,25	0,95	20368	2,419	2,337
M351_T_435_63/1	1,25	0,75	17718	1,661	1,605
M351_T_435_63/2	1,00	0,75	17544	1,645	1,589
M351_T_435_63/3	1,00	0,62	20707	1,605	1,551
M351_T_435_63/4	1,00	0,62	21614	1,675	1,618
M351_T_435_63/5	0,75	0,62	20770	1,610	1,555
M351_T_435_75/1	1,50	1,15	19350	2,782	2,688
M351_T_435_75/2	1,25	1,15	18560	2,668	2,578
M351_T_435_75/3	1,50	1,05	20202	2,652	2,562
M351_T_435_75/4	1,25	1,05	21151	2,776	2,682
M351_T_550_63/1	1,25	0,75	22883	2,145	2,073
M351_T_550_63/2	1,00	0,75	22021	2,064	1,995
M351_T_550_63/3	1,00	0,61	25560	1,949	1,883
M351_T_550_63/4	1,00	0,61	26754	2,040	1,971

Versuchsreihe 2: Profil M 50/250

Versuch	Profillänge	Stützweite	Versagens- last	Moment	
	L_{ges} [m]	L_v [m]	$F_{max,u}$ [N]	M_{max} [kNm]	M_{max} [kNm/m]
M50_T_320_63/1	1,50	1,20	13859	2,079	2,079
M50_T_320_63/2	1,50	1,20	13483	2,022	2,022
M50_T_320_63/3	1,25	0,95	17795	2,113	2,113
M50_T_320_63/4	1,25	0,95	17346	2,060	2,060
M50_T_320_75/1	2,25	2,00	8838	2,209	2,209
M50_T_320_75/2	2,25	2,00	8618	2,155	2,155
M50_T_320_75/3	2,00	1,75	9837	2,152	2,152
M50_T_320_75/4	2,00	1,75	10425	2,281	2,281
M50_T_435_63/1	1,75	1,40	11672	2,043	2,043
M50_T_435_63/2	1,50	1,40	11116	1,945	1,945
M50_T_435_63/3	1,50	1,20	14568	2,185	2,185
M50_T_435_63/4	1,50	1,20	15266	2,290	2,290
M50_T_435_75/1	2,25	2,10	12619	3,312	3,312
M50_T_435_75/2	2,25	2,10	12923	3,392	3,392
M50_T_435_75/3	2,25	2,00	14037	3,509	3,509
M50_T_435_75/4	2,25	2,00	12220	3,055	3,055
M50_T_435_75/5	2,25	2,00	13621	3,405	3,405
M50_T_550_63/1	1,75	1,60	10312	2,062	2,062
M50_T_550_63/2	1,75	1,40	13748	2,406	2,406
M50_T_550_63/3	1,50	1,40	12956	2,267	2,267
M50_T_550_63/4	1,50	1,40	13169	2,305	2,305