Christian Fauth Rainer Holz Daniel C. Ruff Thomas Ummenhofer

Neue Berechnungsverfahren für dünnwandige Stahlprofiltafeln – Ergebnisse aus dem europäischen Forschungsprojekt GRISPE

Im Metallleichtbau wurden in den letzten Jahren dünnwandige Stahlprofiltafeln entwickelt, für die in den aktuellen Regelwerken keine Berechnungsverfahren existieren oder die Anwendungsgrenzen der bestehenden Verfahren überschritten werden. Im Rahmen des europäischen RFCS-Forschungsvorhabens GRISPE wurden umfangreiche experimentelle Untersuchungen an Verbunddeckenprofilen mit diskreter Sickung der Stege, perforierten Trapezprofilen, Fassadenprofilen mit Steckverbindungen, bombierten Profilen, Wellprofilen, Trapezprofilstößen und Kassettenprofilen mit direkt befestigter Außenschale durchgeführt. Es wurden ausgehend von bestehenden Regelwerken und Verfahren praxistaugliche Berechnungsverfahren abgeleitet. Der vorliegende Beitrag stellt auszugsweise die Ergebnisse für Kassettenprofile mit direkt befestigter Außenschale für Befestigungsmittelabstände, die normativ nicht oder nur unzureichend abgedeckt sind, sowie für statisch wirksame Überdeckungen, Trapezprofil-Überlappungsstöße und lokal verstärkte Trapezprofile dar.

New calculation methods for thin-walled steel profiled sheets -**Results from the European Research Project GRISPE.** In recent years, thin-walled profiled steel sheets where developed in lightweight metal construction for which no calculation methods are available in current regulations, or application boundaries of existing methods are exceeded. Within the scope of the European RFCS Research Project GRISPE, extensive experimental investigations have been performed on composite floor profiles with discrete embossments in the webs, perforated trapezoidal profiles, façade profiles, curved profiles, corrugated profiles, trapezoidal joints and liner trays with directly fixed outer façade. Practicable calculation methods have been derived based on existing regulations and methods. This paper depicts in extracts the results for liner trays with directly fixed outer façade for fastener distances that are normatively not or insufficiently covered as well as for statically effective superimpositions, trapezoidal profile overlapping joints and locally stiffened trapezoidal profiles.

1 Einleitung

Im Zuge von Neu- und Weiterentwicklungen im Metallleichtbau entstanden dünnwandige Stahlprofiltafeln, für die die bestehenden Rechenverfahren in DIN EN 1993-1-3 [1] und DIN EN 1993-1-3/NA [2] nicht anwendbar sind bzw. Anwendungsgrenzen überschritten werden. Architektonische Belange, Systemoptimierungen aber auch Aspekte der Nachhaltigkeit sind die Treiber dieser Entwicklungen.

In dem europäischen RFCS-Forschungsvorhaben GRISPE "Guidelines and Recommendations for Integrating Specific Profiled Steel Sheets in the Eurocodes" (RFCS-CT-2013-00018), mitfinanziert durch den "Research Fund for Coal and Steel" der europäischen Union, war die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) Projektpartner. Es wurden Verbunddeckenprofile mit diskreter Sickung der Stege, perforierte Trapezprofile, Fassadenprofile mit Steckverbindungen, bombierte Profile, Wellprofile, Trapezprofilstöße und Kassettenprofile mit direkter Befestigung der Außenschale untersucht. Ausgehend von bestehenden Regelungen in DIN EN 1993-1-3 und DIN 18807-3 [3] wurden neue praxistaugliche Berechnungsverfahren für die genannten Profilformen erarbeitet. Diese Verfahren ergänzen die bereits bestehenden Bemessungsregeln des Eurocode 3.

Im vorliegenden Beitrag werden auszugweise die Forschungsergebnisse für Kassettenprofile mit direkter Befestigung der Außenschale vorgestellt, bei welchen die Abstände der Befestigungsmittel im schmalen Kassettengurt s_1 größer als die üblichen Abstände nach Verwendbarkeitsnachweis sind. Dabei wird auf das Tragverhalten unter Biegung und ein mögliches Nachweisverfahren eingegangen. Des Weiteren werden Ergebnisse von Untersuchungen zum Tragverhalten von statisch wirksamen Überdeckungen nach DIN 18807-3 bzw. DIN EN 1090-4 [4], Überlappungsstößen und lokal verstärkten Trapezprofilen sowie Berechnungsverfahren zum Nachweis dieser Ausführungsvarianten vorgestellt.

2 Stahlkassettenprofilkonstruktionen mit direkt befestigter Außenschale

2.1 Ermittlung der Tragfähigkeit von Stahlkassettenprofilen – Stand der Normung

Die Tragfähigkeit von Kassettenprofilen wird in der Regel durch Versuche nach DIN EN 1993-1-3 ermittelt. Dabei wird im Nationalen Anhang [2] auf DIN 18807-2 [5] und DIN 18807-2/A1 [6] (sowie die Ergänzenden Prüfgrundsätze für Kassettenprofiltafeln, abgedruckt in den "Mitteilungen des DIBt", Heft 2, 1998) verwiesen. Es werden Versuche sowohl zur Ermittlung des Bauteilwiderstands bei lokaler Lasteinleitung (Endauflagerversuch) als auch zur Ermittlung der Momententragfähigkeit (Einfeldträgerversuch) und der Tragfähigkeit am Zwischenauflager (Ersatzträgerversuch oder Zweifeldträgerversuch) für andrückende und abhebende Belastung durchgeführt. Da das Tragverhalten stark von der Stabilisierung der schmalen Kassettengurte abhängt, erfolgen die Versuche mit der entsprechenden Außenschale (Trapezprofil, Wellprofil, Lisene etc.) und einem definierten Abstand der Befestigung zwischen Außenschale und Kassettengurt. Je nach Außenschale kann der Abstand der Befestigungen zwischen $s_1 = 210 \text{ mm}$ und $s_1 = 2000 \text{ mm}$ variieren. An den Befestigungsstellen der quasi schubsteifen Außenschale – unmittelbar bei direkt anliegender Außenschale oder mittelbar bei Verwendung von Distanz-Z- oder -Hutprofilen - werden die schmalen Kassettengurte gegen seitliches Ausweichen stabilisiert. Je größer der Abstand der Befestigungen, desto geringer ist die stützende Wirkung. Daher sind die in den Verwendbarkeitsnachweisen aufgeführten Tragfähigkeitswerte nur für Abstände der Befestigungsmittel bis zum geprüften Abstand s₁ gültig. Die seitliche Stützung der schmalen Kassettengurte ist dann von Bedeutung, wenn diese im Biegedruckbereich liegen. Dies ist insbesondere bei Winddruck im Feld (positives Biegemoment aus positiver Belastung) und bei Windsog am Zwischenauflager (positives Biegemoment aus negativer Belastung) der Fall.

Wenn keine entsprechenden Versuchsergebnisse vorliegen, kann die Ermittlung der Tragfähigkeit auch rechnerisch nach DIN EN 1993-1-3 erfolgen. Bei der Ermittlung der Momententragfähigkeit nach [1] Abschnitt 10.2 wird zwischen positiver und negativer Momentenbeanspruchung unterschieden. Die Unterscheidung erfolgt sowohl aufgrund der bereits beschriebenen stützenden Wirkung der Außenschale auf die schmalen druckbeanspruchten Kassettengurte bei positiven Biegemomenten als auch aufgrund der unterschiedlichen wirksamen Breiten des breiten Kassettengurtes unter Biegezugbeanspruchung (Berücksichtigung der Eigendurchbiegung des breiten Gurtes, d.h. der Gurt nähert sich der neutralen Achse des Biegeträgers an) und unter Biegedruckbeanspruchung (Berücksichtigung lokalen Beulens). Bei üblichen Kassettenprofilen können Schubverzerrungen vernachlässigt werden. Eine detaillierte Beschreibung der schrittweisen Berechnung erfolgte bereits in [7].

In DIN EN 1993-1-3 wird der Einfluss der seitlichen Stützung der schmalen Kassettengurte durch den Koeffizienten β_b berücksichtigt, der linear vom Befestigungsabstand s₁ abhängt.

$$\beta_{\rm b} = 1.15 - {\rm s_1}/2000 \,\,{\rm mm} \tag{1}$$

Dabei liegt die Annahme zugrunde, dass bei einem Befestigungsabstand $s_1 = 300$ mm die druckbeanspruchten schmalen Kassettengurte vollständig gestützt werden und somit ein seitliches Ausweichen verhindert ist ($\beta_b = 1,0$). Werden z. B. aufgrund von horizontal spannenden Außenschalen (Spannrichtung parallel zur Spannrichtung der Kassettenprofile) – was wiederum die Anwendung von Lisenen zwischen der Außenschale und den Kassettenprofilen bedingt – die Abstände der Befestigungen s₁ deutlich größer als 300 mm gewählt, so führt das vorgestellte Verfahren zu konservativen Bemessungsergebnissen. In DIN 18807 ist kein Berechnungsverfahren zur Abbildung der seitlichen Stützung der schmalen druckbeanspruchten Kassettengurte enthalten.

2.2 Forschungsergebnisse – Tragverhalten bei direkt befestigter Außenschale

Zur Ermittlung des Einflusses der Stabilisierung des schmalen Kassettengurtes durch die quasi schubsteife Außenschale (hier: Trapezprofil) wurden in GRISPE Untersuchungen an Kassettenprofiltafeln mit unterschiedlichen Abständen der Befestigungsmittel s_1 durchgeführt. Die Stabilisierungswirkung kommt nur bei einem positiven Biegemoment im Feld oder bei einem positiven Biegemoment über dem Zwischenauflager (schmaler Kassettengurt in Biegedruckzone) zum Tragen. Daher wurden Einfeldträgerversuche unter Auflast und Ersatzträgerversuche unter Windsog nach DIN EN 1993-1-3 unter Berücksichtigung von DIN EN 1993-1-3/NA durchgeführt.

Die Versuche erfolgten an zwei Kassettenprofil-Geometrien in der Stahlgüte S320GD nach DIN EN 10346 [8] mit Steghöhen h = 110 mm und h = 160 mm in jeweils zwei Nennblechdicken. Die Breite der Profile betrug jeweils $b_u = 600 \text{ mm}$. Als direkt befestigte Außenschale wurde dabei ein Trapezprofil in der Stahlgüte S320GD nach DIN EN 10346 mit der Höhe h = 35 mm bei einer Rippenbreite von $b_R = 207 \text{ mm}$ sowie einer Nennblechdicke von $t_N =$ 0,75 mm verwendet. Die Probekörper bestanden aus einem kompletten und zwei halben Kassettenprofilen, welche in den Stegen miteinander verschraubt wurden. Die Trapezprofilaußenschale spannte rechtwinklig zu den Kassettenprofilen und wurde im Abstand von \boldsymbol{s}_1 mit den schmalen Kassettengurten verschraubt. Die Trapezprofile wurden zusätzlich in den Längsstößen miteinander verschraubt. Der Versuchsumfang sowie die maßgebenden Parameter sind in Tabelle 1 wiedergegeben. Die Verbindung der Kassettenprofilprobekörper sowie die Befestigung der Außenschale erfolgte mit bauaufsichtlich zugelassenen Bohrschrauben 4,8 mm \times 20 mm aus nichtrostendem Stahl.

Aufgrund der Druckbeanspruchung in den schmalen Kassettengurten trat das Versagen bei den Einfeldträgersowie bei den Ersatzträgerversuchen durch lokales Beulen der schmalen Kassettenprofil-Gurte und des angrenzenden Steges sowie der Randversteifung ein (s. Bild 1). Bei größeren Befestigungsmittelabständen und höheren Stegen bildete sich anstelle der lokalen Verformung (örtliches Beulen und Forminstabilität) eine globale Verdrehung der Stege und der schmalen Gurte aus. Die Versuchsergebnisse wurden statistisch nach DIN EN 1993-1-3 ausgewertet und die charakteristischen Tragfähigkeiten des Feldmoments bei andrückender Belastung M_{c.Rk.F} und des Stützmoments bei abhebender Belastung M_{c,Rk,B} ermittelt. Die Werte wurden dabei auf einheitliche Werte der Streckgrenze und der Kernblechdicke normiert, um die unterschiedlichen Istwerte der verschiedenen Prüfkörper zu kompensieren.

In Bild 2 wurde das Verhältnis zwischen dem charakteristischen Feldmoment für unterschiedliche Abstände der Befestigungsmittel (seitliche Stützung) zwischen Trapezprofil und schmalem Kassettengurt $M_{c,Rk,F,s1}$, bezogen auf den Referenzwert des charakteristischen Feldmoments $M_{c,Rk,F,621mm}$ bei $s_1 = 621$ mm für die vier untersuchten Kassettentypen über den Abstand der Befestigungsmittel aufgetragen. Die Reduktion der Biegetragfähigkeit kann in Abhängigkeit der Befestigungsmittelabstände und der Schlankheit der Stege sowie der angrenzenden schmalen C. Fauth/R. Holz/D. C. Ruff/T. Ummenhofer · Neue Berechnungsverfahren für dünnwandige Stahlprofiltafeln – Ergebnisse aus dem europäischen Forschungsprojekt GRISPE

Tabelle 1. Versuchsumfang an Kassettenprofilen zur Ermittlung des Tragverhaltens bei unterschiedlichen Befestigungsmittelabständen s_1 Table 1. Test scope of liner trays for determining the load bearing behavior of different fixation distances s_1

Profile	Versuchstyp	Nenndicke t _N in mm	Stützweite L in mm	Abstand der Befestigungsmittel s ₁ in mm	
Kassettenprofile: 110/600 und 160/600	Einfeldträgerversuche Auflast	0,75 und 1,00	6 000	621	
				1242	
				1863	
				> 6000 (ohne Befestigungsmittel)	
Trapezprofil: 35/207-0,75	Ersatzträgerversuche Windsog	0,75 und 1,00	2000	621	
				1242	
				1 863	
				> 2000 (ohne Befestigungsmittel)	



Bild 1. Lokales Beulen des druckbeanspruchten schmalen Kassettengurtes zwischen den Befestigungen zur Außenschale – Einfeldträgerversuch unter andrückender Belastung Fig. 1. Local buckling of the narrow flange of the liner tray between the fixations of the outer cladding – single span test under downward load



Bild 2. Verhältnis $M_{c,Rk,F,s1}$ zu $M_{c,Rk,F,621mm}$ in Abhängigkeit des Abstands der Befestigungsmittel s_1 Fig. 2. $M_{c,Rk,F,s1}$ to $M_{c,Rk,F,621mm}$ ratio dependent on the distance of the fixation s_1

Gurte beschrieben werden. Je größer der Abstand der Befestigungsmittel und je höher die Schlankheit der druckbeanspruchten Querschnittsteile, desto geringer die Biegetragfähigkeit (Bild 2). Die Biegetragfähigkeit des Kassettenprofils ohne stützende Trapezprofilaußenschale stellt die untere Schranke dar.

Die Abnahme der Biegetragfähigkeit mit größerem Befestigungsabstand s_1 ist damit zu erklären, dass ein größerer Abstand s_1 eine geringere seitliche Stützung des schmalen Gurtes und somit ein frühzeitigeres seitliches Ausweichen der druckbeanspruchten Querschnittsteile ermöglicht (Versagensmodus: Biegedrillknicken des Ersatzdruckstabes). Die vom schmalen Kassettengurt und dem angrenzenden Steg aufnehmbare Beanspruchung beschränkt somit die Biegetragfähigkeit des Kassettenprofils.

2.3 Berechnungsverfahren für unterschiedliche Befestigungsabstände s₁ bei direkt befestigter Außenschale

Im Zuge von GRISPE wurde auf Grundlage der DIN EN 1993-1-3 ein Berechnungsverfahren abgeleitet, mit dem Ziel der Umrechnung bekannter Tragfähigkeitswerte bei definiertem Abstand der seitlichen Stützung s_{1.1} (Abstand der Befestigung des schmalen Gurtes im zugrundeliegenden Bauteilversuch) auf abweichende Befestigungsabstände s_{1,2}. In diesem Verfahren werden die aufnehmbaren Druckkräfte der Kassettengurte N_{Rk,i,s1,1} für den Referenzabstand der seitlichen Stützung s_{1,1} des elastisch gebetteten Ersatzdruckstabes (schmaler Gurt und angrenzender Steg) unter Berücksichtigung von lokalem Beulen der ebenen Querschnittsteile und Ausknicken der Randversteifung berechnet. Die elastische Bettung wird durch die Steifigkeit des Kassettenprofils in Querrichtung berücksichtigt. Der Abstand der Befestigungsmittel s₁₁ wird durch die Lagerung des elastisch gebetteten Ersatzdruckstabes orthogonal zum Kassettensteg abgebildet. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrie müssen beide schmalen Gurte getrennt berechnet werden. Danach werden die Beanspruchbarkeiten $N_{\text{Rk},i,\text{s}1,2}$ für den gesuchten Abstand s1,2 berechnet. Die Beanspruchbarkeit der schmalen Gurte bei identischem Befestigungsmittelabstand s_{1,i} werden anschließend addiert und ins Verhältnis gesetzt. Dieses Verhältnis beschreibt nun die Abminderung der aufnehmbaren Druckkraft der schmalen Kassettengurte bezogen auf den Referenzwert. In gleichem Maße wie die aufnehmbare Gurt-Druckkraft vermindert sich die Biegetragfähigkeit des Gesamtkassettenquerschnitts (hier: z. B.

charakteristischer Wert des Feldmoments bei Abstand $s_{1,1}$). Die Biegetragfähigkeit bei Abstand $s_{1,2}$ ergibt sich zu

$$\mathbf{M}_{c,\mathbf{R}_{k,2}} = \mathbf{M}_{c,\mathbf{R}_{k,1}} \cdot \boldsymbol{\beta} = \mathbf{M}_{c,\mathbf{R}_{k,1}} \cdot \frac{\sum \mathbf{N}_{\mathbf{R}_{k,i},\mathbf{s}_{1,2}}}{\sum \mathbf{N}_{\mathbf{R}_{k,i},\mathbf{s}_{1,1}}}$$
(2)

Somit können die charakteristischen Werte des Feldmoments unter andrückender Belastung oder des Stützmoments bei abhebender Belastung für einen Abstand $s_{1,2}$, ausgehend von bereits bekannten Werten für einen gegebenen Abstand $s_{1,1}$ (z. B. aus Verwendbarkeitsnachweisen) berechnet werden. Die Schritte des Verfahrens werden im Folgenden nochmals detailliert beschrieben, aufgrund der unterschiedlichen Geometrien müssen die Schritte 1 bis 3 für beide schmalen Gurte getrennt angewandt werden.

- Schritt: Berechnung des Bruttoquerschnitts des druckbeanspruchten Ersatzquerschnitts (schmaler Gurt, Randversteifung und 1/5 des Steges) analog zu DIN EN 1993-1-3.
- 2. Schritt: Berechnung des effektiven Querschnitts des druckbeanspruchten Ersatzquerschnitts unter Berücksichtigung von lokalem Beulen (reduzierte Breiten der ebenen Teilquerschnitte) und Forminstabilitäten (reduzierte Dicken der Randversteifung) analog zu DIN EN 1993-1-3. Die Berechnung ist für eine (anfangs gewählte, durch Iteration verbesserte) Randspannung $\sigma_{com,Ed}$ durchzuführen.
- 3. Schritt: Berechnung der aufnehmbaren Druckkraft des Ersatzquerschnitts unter Berücksichtigung des seitlichen Ausweichens an einem elastisch gebetteten Stab mit Festhalterungen im Abstand s_1 . Die Festhalterungen sowie die Bettung werden quer zur Spannrichtung des Kassettenprofils angeordnet. Die elastische Bettung des schmalen Kassettenstegs wird unter der Annahme einer symmetrischen Verformung des breiten Kassettengurtes wie folgt ermittelt:

$$K_{fz} = \frac{E \cdot t^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \frac{6}{(2 \cdot H^3 + 3 \cdot B \cdot H^2)}$$
(3)

μ Querkontraktionszahl, für Stahl 0,3

- t Stahlkerndicke
- H,B Höhe/Breite des Kassettenquerschnitts

Die kritische Drucknormalkraft N_{cr} für einen elastisch gebetteten Stab mit diskreten Festhalterungen im Abstand s_1 ergibt sich zu

$$N_{cr} = \frac{n^2 \cdot \pi^2 \cdot E \cdot I_{fz}}{s_1^2} + \frac{K_{fz} \cdot s_1^2}{n^2 \cdot \pi^2}$$
(4)

In der Regel ergibt sich das Minimum für n = 1 (eine Halbwelle zwischen den Befestigungen), bei größeren Befestigungsabständen muss aber auch die 2. Eigenform mit n = 2 (zwei Halbwellen zwischen den Befestigungen) untersucht werden. Die Berechnung der aufnehmbaren Druckkraft erfolgt analog zu DIN EN 1993-1-3, wobei alternativ die Knickspannungslinien a_0 und c untersucht wurden.

Mit dem so ermittelten Abminderungsbeiwert χ wird nun die tatsächliche Randspannung σ_{Ed} berechnet. Insofern die Randspannung σ_{Ed} von der in Schritt 2 gewählten Randspannung $\sigma_{com,Ed}$ abweicht, sind die Schritte 2 und 3 mit der Spannung $\sigma_{com,Ed} = \sigma_{Ed}$ zu wiederholen, bis die gewählte Randspannung von Schritt 2 und die errechnete Spannung σ_{Ed} von Schritt 3 übereinstimmen (iteratives Vorgehen).

4. Schritt: Bestimmung des Abminderungsbeiwertes durch Addition der aufnehmbaren Druckkräfte für beide Ersatzquerschnitte bei identischen Abständen der Befestigungen $s_{1,i}$. Der Abminderungsbeiwert für den Abstand $s_{1,2}$ ergibt sich somit zu

$$\beta = \frac{N_{R_{k,1}, S_{1,2}} + N_{R_{k,2}, S_{1,2}}}{N_{R_{k,1}, S_{1,1}} + N_{R_{k,2}, S_{1,1}}}$$
(5)

Der charakteristische Wert des aufnehmbaren Biegemoments für den Abstand der Befestigungsmittel $s_{1,2}$ berechnet sich dann wie folgt

$$\mathbf{M}_{c,\mathbf{R}_{k,2}} = \mathbf{M}_{c,\mathbf{R}_{k,1}} \cdot \boldsymbol{\beta} \tag{6}$$

Im Bild 3 sind die Ergebnisse dieses Berechnungsverfahrens, die berechneten Abminderungen nach DIN EN 1993-1-3 Abschnitt 10.2.2.2, sowie die Versuchsergebnisse, jeweils bezogen auf den Referenzwert ($s_1 = 621 \text{ mm}$), dargestellt. Die Ergebnisse des Rechenverfahrens liegen, bei Wahl der Knickspannungslinie c in Schritt 3, zwischen den Versuchswerten und der Abminderung nach EC3. Bei Zugrundelegung von Knickspannungslinie a₀ in Schritt 3 liegen die berechneten Werte für das Kassettenprofil 110/600 ebenfalls zwischen den Versuchswerten und den Werten nach EC3. Bei dem Kassettenprofil 160/600 liegen die Werte zum Teil über den Versuchswerten, die Tragfähigkeiten werden somit geringfügig überschätzt, was zum einen mit der Versuchsstreuung bei dem Kassettenprofil 160/600-0,75 und zum anderen mit der spezifischen Erfassung der elastischen Bettung in Schritt 3 des Ersatzdruckstabes erklärt werden kann.

3 Biegesteife Trapezprofilstöße 3.1 Ermittlung der Tragfähigkeit – Stand der Normung

Biegesteife Trapezprofilstöße sind in der aktuellen Fassung der DIN EN 1993-1-3 nicht geregelt. In Zukunft sollen biegesteife Trapezprofilstöße in DIN EN 1090-4 Anhang B geregelt werden. Die baurechtliche Einführung dieses Dokuments steht jedoch noch aus. Auf nationaler Ebene waren diese Stöße unter dem Begriff "statisch wirksame Überdeckungen" in DIN 18807-3 Abschnitt 3.5 und 4.6.3 aufgeführt und entsprechen in Deutschland dem Stand der Technik. Die Regelungen in beiden Dokumenten sind nahezu identisch. Im Folgenden werden die Gemeinsamkeiten und abweichende Regelungen betrachtet.

Die Berücksichtigung statisch wirksamer Überdeckungen ist ausschließlich im Auflagerbereich von Trapezprofilen zulässig. Ihr Zweck liegt in der Herstellung von



Bild 3. Vergleich des Rechnungsverfahrens mit den Versuchsergebnissen und der Abminderung nach DIN EN 1993-1-3 Fig. 3. Comparison of the calculation method with the test results and the reduction according to DIN EN 1993-1-3

Kontinuität zwischen angrenzenden statischen Systemen ohne Tragfähigkeitssteigerung gegenüber der durchlaufenden Profiltafel. Durch diese Art von biegesteifen Stößen können auch bei großen Stützweiten und/oder begrenzten Tafellängen statisch ungünstige Einfeld- und Zweifeldsysteme vermieden werden, indem diese Teilsysteme zu Mehrfeldsystemen über mindestens drei Felder gekoppelt werden. Die Trapezprofile werden ohne Berücksichtigung des Stoßes mit den Tragfähigkeitswerten des Einzelprofils nachgewiesen. Die in den genannten Vorschriften aufgeführten ergänzenden Nachweise betreffen die Dimensionierung der Koppelschrauben, die für die am Auflager auftretenden globalen Schnittgrößen (Stützmoment M_B und Querkraft V_L) auszulegen sind. Weitergehende Nachweise wie z.B. Versagen des Trapezprofilquerschnitts aus der lokalen Lasteinleitung der Koppelkräfte (Stegkrüppeln des freien Profilendes) werden als nicht maßgebend betrachtet und deshalb auch nicht gefordert (Anmerkung: Die Annahme ist bei ausreichend groß gewählter Überlappungslänge zutreffend.). Die Kraft K_i je Verbindung und Steg in Abhängigkeit der Rippenbreite b_R, des Stegneigungswinkels φ und der Überlappungslänge a ergibt sich zu

$$K = \max K_{i} = \frac{\left| M_{B} \right|}{2 \cdot a \cdot \sin \phi} \cdot b_{R}$$

(überkragendes Ende der Profiltafel liegt unten) (7)

bzw.

$$K = \max K_{i} = \frac{\left| \frac{M_{B}}{a} + V_{L} \right|}{2 \cdot \sin \varphi} \cdot b_{R}$$

(überkragendes Ende der Profiltafel liegt oben). (8)

(überkragendes Ende der Profiltatel liegt oben).

Die Loch- und Randabstände der Koppelschrauben sowie die Regelung, dass bei jeder Verbindung maximal zwei Verbindungselemente in horizontaler und vertikaler Richtung (maximal vier insgesamt) je Steg rechnerisch berücksichtigt werden dürfen, wurden gleichlautend von DIN 18807-3 in DIN EN 1090-4 übernommen. Eine Übertragung der Koppelkräfte durch Kontaktwirkung ist durch Versuche nachzuweisen. Die Überlappungslänge kann nach DIN EN 1090-4 zwischen 0.08L bzw. 0.065L und 0,11L gewählt werden (mit L = größere der beiden angrenzenden Stützweiten), jedoch nicht größer als das 0,15-Fache der kürzeren der beiden angrenzenden Stützweiten. In DIN 18807-3 wird die Überlappungslänge mit "ungefähr 0,1L" angegeben. Somit sind beide Regelungen nahezu identisch.

DIN EN 1090-4 schließt analog zu DIN 18807-3/A1 [9] biegesteife Stöße bei Kassettenprofiltafeln aus. Weiterhin enthält DIN EN 1090-4 Anforderungen bei Verwendung von stegperforierten Trapezprofilen.

3.2 Forschungsergebnisse – Tragverhalten am Zwischenauflager

Im Rahmen der Untersuchungen von GRISPE standen zwei Fragestellungen im Fokus:

- a). Sind Bemessungsregeln für den biegesteifen Trapezprofilstoß nach EN 1090-4 zutreffend und ausreichend?
- b). Bemessungsregeln für andere Stoßausführungen bzw. Trapezprofil-Konstruktionen, bei denen neben der Herstellung der Kontinuität auch eine erhöhte Tragfähigkeit der Trapezprofile im Zwischenauflagerbereich hergestellt und in Anspruch genommen werden soll.



Bild 4. Schematische Darstellung der untersuchten Trapezprofilstöße

Fig. 4. Schematic representation of the examined trapezoidal sheet joint

Dieser Teil befasste sich mit biegesteifen Überlapp-Stößen mit Überlappung auf beiden Seiten des Auflagers (OL) sowie mit durchlaufenden Profiltafeln mit lokaler Verstärkung durch Aufdopplung (CR).

In den umfangreichen Untersuchungen wurden Ersatzträgerversuche mit zwei unterschiedlichen Stützweiten und Auflagerbreiten b_u nach DIN EN 1993-1-3 in Verbindung mit DIN EN 1993-1-3/NA zur Ermittlung des Tragverhaltens am Zwischenauflager durchgeführt. Die Versuche wurden an Trapezprofilstößen nach DIN 18807-3 (DIN), an Überlappungsstößen (OL) sowie an lokal verstärkten Trapezprofilen (CR) durchgeführt (eine schematische Darstellung der unterschiedlichen Stöße ist in Bild 4 wiedergegeben). Die Referenz stellten Versuche an durchlaufenden Profilen (C) dar.

Es wurden jeweils zwei unterschiedliche Trapezprofil-Geometrien in der Stahlgüte S320GD nach DIN EN 10346 in den Höhen h = 137 mm bzw. h = 158 mm mit einer Rippenbreite von b_R = 310 mm bzw. b_R = 250 mm in zwei Nennblechdicken (t_{N1} = 0,75 mm und t_{N2} = 1,00 mm) geprüft. Die Versuchsmatrix ist in Tabelle 2 dargestellt. Die Verbindung in der Stoßüberlappung erfolgte mit bauaufsichtlich zugelassenen Bohrschrauben 4,8 mm × 20 mm aus nichtrostendem Stahl. Die Loch- und Randabstände wurden analog zu den nach DIN 18807-3 und DIN EN 1090-4 zulässigen Mindestwerten gewählt.

Das Versagen trat durch eine Kombination aus lokaler Eindrückung (Stegkrüppeln) und Biegeversagen (Beulen der druckbeanspruchten Querschnittsteile) der Trapezprofile ein (s. Bilder 5 und 6). In Abhängigkeit der Versuchsstützweite dominierte entweder das Stegkrüppeln (kurze Stützweite, kurze Überlappung) oder das Biegeversagen (große Stützweite). Die Versuchsergebnisse wurden statistisch nach DIN EN 1993-1-3 ausgewertet und auf einheitliche Mittelwerte der Streckgrenze und der Kernblech-

Tabelle 2. Versuchsumfang der Ersatzträgerversuche unter andrückender Belastung Table 2. Test scope of internal support test under downward load

Stoß	Nenndicke t _N	Auflagerbreite b _u	Überlappungs	länge a in mm	Stützweiten L in mm	
	in mm	in mm	TRP 137/310	TRP 158/250	TRP 137/310	TRP 158/250
Referenz (C)	0,75	60 und 160	-	_	800	800
					2400	2800
	1,00				800	800
					2800	3200
statisch wirksame Überdeckung nach DIN 18807-3 (DIN)	0,75	60 und 160	500	600	800	800
					2400	2800
		160	700	800	2400	2800
	1,00	60 und 160	500	600	800	800
					2800	3 2 0 0
Überlappungs- stoß (OL)	0,75	60	500	600	800	800
					1 300	-
					2400	2800
		160	500	600	800	800
					2400	2800
			700	800	2400	2800
	1,00	60 und 160	500	600	800	800
					2800	3 2 0 0
		160	700	800	2800	3200
lokal verstärktes Trapezprofil (CR)	0,75	60 und 160	500	600	800	800
					2400	2800
	1,00				800	800
					2800	3200



Bild 5. Lokales Beulen der druckbeanspruchten Gurte und des angrenzenden Stegbereichs Fig. 5. Local buckling of the compressed flange and the adjacent web



Bild 6. Stegkrüppeln am Ende der Überlappung am überkragenden Profilende Fig. 6. Web crippling at the end of the overlap at the cantilever end above

dicke normiert, um diesbezügliche Streuungen der Versuchskörper weitgehend zu eliminieren. Es wurden die charakteristischen Tragfähigkeiten für das Stützmoment $M_{c,Rk,B}$ und für die Auflagerkraft $R_{W,Rk,B}$ bestimmt. Durch Variation der Versuchsstützweiten wurden unterschiedliche Momenten-Querkraft- bzw. Momenten-Auflagerreaktion-Verhältnisse erzeugt und damit unterschiedliche Wertepaare $M_{c,Rk,B}$ und $R_{W,Rk,B}$. Diese Wertepaare wurden in einem Interaktionsdiagramm aufgetragen. Die Interaktionsbeziehung wird durch eine lineare Interpolation zwischen den Versuchspunkten angenähert und durch die in den Versuchen geprüfte minimale und maximale Stützweite beschränkt. Zur Beschreibung der Interaktionskurve wurden zusätzlich die Schnittpunkte der Interaktionskurve mit der Ordinate ($M_{0,Rk,B}$) und der Abszisse ($R_{0,Rk,B}$) ermittelt. Diese Werte haben keine mechanische Bedeutung und dienen nur der Beschreibung der Interaktionsbeziehung.

Es wurden jeweils die unterschiedlichen Stöße mit identischen Profil-Geometrien und Auflagerbreiten miteinander verglichen und ausgewertet. In Bild 7 sind die Inter-



Bild 7. M/R-Interaktionskurven am Zwischenauflager für Auflagerbreite $b_u = 160 \text{ mm}$ Fig. 7. M/R-interaction curves at intermediate support for support width $b_u = 160 \text{ mm}$

aktionsdiagramme für eine Auflagerbreite $b_u = 160 \text{ mm}$ dargestellt. Identische Stoßanordnungen mit unterschiedlichen Überlappungslängen wurden separat dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Ordinaten der Kurven der Überlappungsstöße (OL) und der lokal verstärkten Trapezprofile (CR) im Verhältnis 1:2 skaliert, d. h. es wurde nur die halbe Tragfähigkeit des Versuchs dargestellt. Dieser Skalierung liegt die Annahme zu Grunde, dass – bei hinreichend großer Überlappungslänge – die Tragfähigkeit dieser Stoßausführungen annähernd doppelt so hoch ist wie die des Referenzfalls (durchlaufendes Einzelprofil).

Die statisch wirksame Überdeckung nach DIN 18807-3 mit einer Überlappungslänge 500 mm (TRP 137/310) bzw. 600 mm (TRP 158/250) erreicht bei beiden Profiltypen mit Nennblechdicke 0,75 mm nicht das Referenzniveau, im Gegensatz zur Nennblechdicke 1,00 mm. Die Ursache liegt in den schlankeren Stegen, welche vor Erreichen des Tragniveaus der Referenzprofile, aufgrund der durch die Verbindungselemente verursachten lokalen Lasteinleitung in die Stege der Profile am Überlappungsende, lokal durch Stegkrüppeln versagen. Bei Vergrößerung der Überlappung um 40% (TRP 137/310) bzw. 33% (TRP 158/250) und somit Verringerung der in die Stege eingeleiteten Befestigungsmittelkräfte wird dieses Versagenskriterium nicht mehr maßgebend. Das Referenzniveau des Stützmoments wird erreicht und bezüglich der Auflagerreaktion sogar deutlich überschritten. Unter Voraussetzung einer hinreichend großen Überlappungslänge, die ein Stegkrüppeln am Profilende ausschließt, ist der Profilnachweis mit den Tragfähigkeitswerten des Einzelprofils, wie er dem aktuellen Regelungsstand entspricht, konservativ.

Auch die Überlappungsstöße (OL) erreichen bei beiden gewählten Überlappungslängen nicht das Referenzniveau. Dies liegt einerseits daran, dass bei der kurzen Überlappung ebenfalls lokales Stegkrüppeln am Überlappungsende, verursacht durch die eingeleiteten Koppelkräfte, eintrat. Außerdem werden infolge der Nachgiebigkeiten in den Verbindungen die beiden Profile nicht ideal gleichmäßig beansprucht. Die lokal verstärkten Trapezprofile zeigten ein analoges Verhalten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die statisch wirksame Überdeckung bei ausreichend großer Überlappungslänge die Tragfähigkeit eines durchlaufenden Profils erreicht. Der Überlappungsstoß ebenso wie das lokal verstärkte Trapezprofil erreicht auch bei ausreichend großer Überlappungslänge nicht die erwartete doppelte Tragfähigkeit eines durchlaufenden Einzelprofils, sondern nur den 1,8-fachen Wert. Die Ursache kann hier in der Nachgiebigkeit der Verbindungselemente gesehen werden. Dadurch liegen die Last-Verformungskurven der Einzelprofile zueinander versetzt und erreichen nicht zum selben Zeitpunkt ihren jeweiligen globalen Hochpunkt.

Zur Vermeidung des vorzeitigen Versagens der Stöße durch Stegkrüppeln müssen die Überlappungslängen ausreichend groß gewählt werden, sodass die am freien Ende der Überlappung in die Stege eingeleiteten Koppelkräfte geringer als die Stegkrüppelwiderstände sind. Die Kräfte werden über die Verbindungselemente auf Seiten des breiten Gurtes der Profile eingeleitet. Die Kräfte F_i ergeben sich aus dem einwirkenden Biegemoment $M_{B,Ed}$, welches von den Verbindungselementgruppen mit dem Abstand a (Überlappungsabstand) abgetragen wird.

Für den Nachweis gegen Stegkrüppeln an den Stoßenden wird ein Widerstandswert benötigt, welcher jedoch nicht Bestandteil der bestehenden Verwendungsnachweise ist. Im Rahmen der Bearbeitung des Projekts GRISPE wurde entschieden, auf bestehende Widerstandsgrößen zurückzugreifen, um ein möglichst einfaches und praxisnahes Bemessungsverfahren zu entwickeln. Daher wird der Widerstandswert R_{w,Rk,B} für das Zwischenauflager mit maximaler Auflagerbreite in der entgegengesetzten Profillage als Abschätzung für die gesuchte Beanspruchungsgrenze verwendet. Da das Trapezprofil am Rand der Überlappung nicht durchgängig ist, wird der Tragfähigkeitswert um 50% reduziert. Die günstigere Lasteinleitung über die Verbindungselemente direkt in den Steg, an Stelle über Kontakt in die Ausrundungen am Übergang vom Gurt zum Steg, rechtfertigt ebenfalls die Wahl des Widerstandswerts für die maximale Auflagerbreite. Die Versuchsdaten aus GRISPE bestätigen diese Festlegung.

Den Verfassern ist bewusst, dass es sich hierbei um eine ingenieurmäßige Vereinfachung handelt, die zu einer gewissen Unschärfe im Bemessungsverfahren führt, der Aspekt der Anwendbarkeit der bereits bestehenden Verwendungsnachweise wog hier jedoch schwerer. Im folgenden Abschnitt wird auf die Bemessungsverfahren der drei Stoßvarianten eingegangen.

3.3 Bemessungsverfahren für unterschiedliche biegesteife Trapezprofilstöße

Die in GRISPE erarbeiteten Bemessungsverfahren für die untersuchten Trapezprofilstöße lassen sich in vier Schritte unterteilen. Zu Beginn erfolgen die Ermittlung der Beanspruchung und der Nachweis der Profile am Zwischenauflager. Danach werden für die Varianten OL und CR am Überlappungsende die Profilnachweise mit den an diesen Stellen einwirkenden Beanspruchungen sowie der zusätzlich wirkenden Querkraft Fi durchgeführt. Anschließend erfolgt der Nachweis gegen Stegkrüppeln am freien Ende der Überlappung, sofern die einzuleitenden Kräfte F_i die Profilstege auf Querdruck beanspruchen und an dieser Stelle Stegkrüppeln erzeugen. Die umgekehrte Kraftrichtung würde Schubbeulen erzeugen, was eine unkritische, weil sehr hohe Beanspruchbarkeit, darstellt. Den Abschluss bildet der Nachweis der Verbindungselemente mit den einwirkenden Koppelkräften Ki. Im Folgenden wird das Vorgehen für den DIN- und den OL-Stoß dargestellt. Das Vorgehen beim CR-Stoß kann wiederum analog zum Überlappungsstoß (OL) erfolgen.

3.3.1 Statisch wirksame Überdeckung (DIN)

 Schritt: Nachweis der Profiltafeln am Zwischenauflager mit den charakteristischen Widerstandswerten M_{c,Rk,B} und R_{w,Rk,B} bzw. V_{w,Rk} unter Berücksichtigung der Biegemomenten-Auflagerkraft-Interaktion M/R oder der Biegemomenten-Querkraft-Interaktion M/V (M_{0,Rk,B} und R_{0,Rk,B} oder M_{c,Rk,B} und V_{w,Rk}) für andrückende oder abhebende Belastung: Bei der Ermittlung der Beanspruchung wird von einem



Bild 8. Schematische Darstellung eines DIN-Stoßes, links: überkragendes Profilende liegt oben, rechts: überkragendes Profilende liegt unten

Fig. 8. Schematic representation of a DIN-joint, left: cantilever end above, right: cantilever end underneath

durchlaufenden Profil ausgegangen, d.h. ein Steifigkeitssprung im Bereich der Überlappung, ebenso wie Verformungen in den Verbindungen, werden nicht berücksichtigt. Der erste Schritt ist für beide Varianten identisch. Nachweis gegen Stegkrüppeln am freien Ende

2. Schritt:

der Überlappung: Fall a) überkragendes Profilende liegt oben: Der Nachweis ist nur bei andrückender Belastung zu führen, bei abhebender Belastung ist dieser nicht erforderlich, da die Stege nicht auf Krüppeln beansprucht werden.

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{a} \le 0.5 \cdot R_{W,Rd,B}$$
(9)

Die Beanspruchung ergibt sich aus dem einwirkenden Biegemoment $M_{B,Ed}$, welches die Linienlast F_{Ed} am Stoßende verursacht. Die Beanspruchbarkeit ergibt sich entsprechend dem vorherigen Abschnitt 3.2 zu 50% der Auflagertragfähigkeit $R_{w,Rk,B}$ für die maximale Auflagerbreite der entgegengesetzten Profillage. Fall b) überkragendes Profilende liegt unten: Kein Nachweis erforderlich, weder für andrückende noch für abhebende Belastung.

3. Schritt: Nachweis der Verbindungselemente je Steg: Fall a) überkragendes Profilende liegt oben:

$$K = \max K_{i} = \frac{\left|\frac{M_{B.Ed}}{a} + V_{L,Ed}\right|}{2 \cdot \sin \phi} \cdot b_{R} \le \Sigma F_{V,Rd}$$
(10)

Fall b) überkragendes Profilende liegt unten:

$$K = \max K_{i} = \frac{\left|\frac{M_{B.Ed}}{a}\right|}{2 \cdot a \cdot \sin \phi} \cdot b_{R} \le \Sigma F_{V,Rd}$$
(11)

Die Koppelkraft K setzt sich aus Anteilen des Biegemoments $M_{B,Ed}$ und der Querkraft $V_{L,Ed}$ (überkragendes Profilende liegt oben) zusammen, welche mit der Rippenbreite und dem Stegneigungswinkel auf einen Steg umgerechnet werden. Die Beanspruchbarkeit ergibt sich aus der Summe der Querkraftwiderstände $\Sigma F_{v,Rd}$ der Verbindungselemente je Steg.

3.3.2 Überlappungsstoß (OL)

- 1. Schritt: Nachweis der Profiltafeln am Zwischenauflager mit den 1,8fachen charakteristischen Widerstandwerten $M_{c,Rk,B}$ und $R_{w,Rk,B}$ bzw. $V_{w,Rk}$ unter Berücksichtigung der Biegemomenten-Auflagerkraft-Interaktion M/R oder der Biegemomenten-Querkraft-Interaktion M/V ($M_{0,Rk,B}$ und $R_{0,Rk,B}$ oder $M_{c,Rk,B}$ und $V_{w,Rk}$) für andrückende oder abhebende Belastung: Bei der Ermittlung der Beanspruchung wird von einem durchlaufenden Profil ausgegangen, d.h. ein Steifigkeitssprung im Bereich der Überlappung ebenso wie Verformungen in den Verbindungen werden nicht berücksichtigt.
- 2. Schritt: Nachweis der durchlaufenden Profiltafel am Überlappungsende mit den in Schnitt I oder II auftretenden Schnittgrößen $M_{i,Ed}$ und F_{Ed} unter Berücksichtigung der M/R- oder M/V-Interaktion ($M_{0,Rk,B}$ und $R_{0,Rk,B}$ oder $M_{c,Rk,B}$ und $V_{w,Rk}$) für andrückende oder abhebende Belastung: Aufgrund der Beanspruchungen in den Schnitten I und II der durchlaufenden Profiltafel erfolgt der Interaktionsnachweis im Gegensatz zu Schritt 1 für andrückende Belastungen anhand M/V- und für abhebende Belastungen anhand M/V-



Bild 9. Schematische Darstellung eines Überlappungsstoßes mit exemplarischer Darstellung des Biegemomentenverlaufes für andrückende Belastung

Fig. 9. Schematic representation of an overlapping joint with exemplary representation of bending moment distribution for downward load

gen anhand M/R-Interaktion (in Abhängigkeit der Lastrichtung von F_{Ed} bezogen auf die Stege der Profiltafel).

3. Schritt: Nachweis gegen Stegkrüppeln am freien Ende der Überlappung:

Fall a) für das oben liegende überkragende Profilende:

Der Nachweis ist nur bei andrückender Belastung zu führen. Bei abhebender Belastung ist dieser nicht erforderlich, da die Stege nicht auf Krüppeln beansprucht werden.

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} \le 0.5 \cdot R_{W,Rd,B}$$
 (12)

Die Beanspruchung ergibt sich aus dem einwirkenden Biegemoment $M_{B,Ed}$, welches die Linienlast F_{Ed} am Stoßende verursacht. Im Gegensatz zum DIN-Stoß geht hier die doppelte Überlappungslänge a ein. Die Beanspruchbarkeit ergibt sich gemäß dem vorherigem Abschnitt 3.2 zu 50% der Auflagertragfähigkeit $R_{w,Rk,B}$ für die maximale Auflagerbreite der entgegengesetzten Profillage.

Fall b) für das unten liegende überkragende Profilende:

Kein Nachweis erforderlich, weder für andrückende noch für abhebende Belastung.

4. Schritt: Nachweis der Verbindungselemente je Steg:

$$K = \max K_{i} = \frac{\left|M_{B,Ed}\right|}{4 \cdot a \cdot \sin \phi} \cdot b_{R} \le \Sigma F_{V,Rd}$$
(13)

Die Koppelkraft K ergibt sich aus dem Biegemoment $M_{B,Ed}$, welches mit der Rippenbreite und dem Stegneigungswinkel auf einen Steg umgerechnet wird. Die Beanspruchbarkeit ergibt sich aus der Summe der Querkraftwiderstände Σ F_{v,Rd} der Verbindungselemente je Steg.

4 Zusammenfassung und Danksagung

Im vorliegenden Beitrag wurden auszugsweise Ergebnisse des europäischen RFCS-Forschungsvorhabens GRISPE dargestellt. Zunächst wurde die Umrechnung von bereits vorhandenen Tragfähigkeitswerten für Kassettenprofile mit Befestigungsmittelabständen $s_{1,1}$ aus Verwendbarkeitsnachweisen auf abweichende Abstände $s_{1,2}$ vorgestellt. Anschließend erfolgte die Darstellung der Ergebnisse der Untersuchungen von unterschiedlichen Trapezprofilstößen. Bei den Stößen handelt es sich um statisch wirksame Überdeckungen gemäß DIN 18807-3, Überlappungsstöße sowie lokal verstärkte durchlaufende Trapezprofile, für die ein Berechnungsverfahren zur Ermittlung der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Überlappungslänge a vorgestellt wurde.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse und Rechenverfahren wurden unter anderem in Untersuchungen erarbeitet, die im Rahmen des europäischen RFCS-Forschungsvorhabens GRISPE (RFCS-CT-2013-00018), mitfinanziert durch den "Research Fund for Coal and Steel" der europäischen Union, in welchem die Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und das Ingenieurbüro für Leichtbau Forschungspartner waren, durchgeführt wurden. Für die finanzielle Unterstützung sei an dieser Stelle ausdrücklich gedankt. Bedanken möchten wir uns ebenso für die sehr gute und stets konstruktive Zusammenarbeit mit den weiteren Forschungspartnern L'enveloppe Métallique du Bâtiment (EMB), Bacacier Profilage SAS, Société Bretonne de Profilage SAS (Joris Ide) und Sokol Palisson Consultants SARL.

Literatur

- DIN EN 1993-1-3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Dezember 2010.
- [2] DIN EN 1993-1-3: Nationaler Anhang National festgelegte Parameter – Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-3: Allgemeine Regeln – Ergänzende Regeln für kaltgeformte Bauteile und Bleche. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2017.
- [3] DIN 18807-3: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Festigkeitsnachweis und konstruktive Ausbildung. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 1987.
- [4] DIN EN 1090-4: Ausführung von Stahltragwerken und Aluminiumtragwerken – Teil 4: Technische Anforderungen an kaltgeformte, tragende Bauelemente aus Stahl und kaltgeformte Bauteile für Dach-, Decken-, Boden- und Wandanwendungen – Entwurf. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., November 2015.
- [5] DIN 18807-2: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Juni 1987.
- [6] DIN 18807-2/A1: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Durchführung und Auswertung von Tragfähigkeitsversuchen; Änderung A1. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2001.
- [7] Misiek, T., Käpplein, S.: Tragverhalten von Stahlkassettenprofilen mit direkt oder indirekt befestigter Außenschale. Stahlbau 84 (2015), H. 11, S. 875–889. DOI: 10.1002/ stab.201510328
- [8] DIN EN 10346: Kontinuierlich schmelztauchveredelte Flacherzeugnisse aus Stahl zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen. Berlin, Deutsches Institut f
 ür Normung e.V., Oktober 2015.
- [9] DIN 18807-3/A1: Trapezprofile im Hochbau; Stahltrapezprofile; Festigkeitsnachweis und konstruktive Ausbildung. Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V., Mai 2001.

Autoren dieses Beitrages:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer, thomas.ummenhofer@kit.edu, Dr.-Ing. Daniel C. Ruff, daniel.ruff@kit.edu, Dipl.-Ing. Christian Fauth, christian.fauth@kit.edu,

KIT Stahl- und Leichtbau, Versuchsanstalt für Stahl, Holz und Steine, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Otto-Ammann-Platz 1, 5 & 7, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Rainer Holz, Ingenieurbüro für Leichtbau, Rehbuckel 7, 76228 Karlsruhe, rainer.holz@ifleichtbau.de