Marc May
Matthias Ruppert
Christoph Seeßelberg

DOI: 10.1002/stab.201410142

Zur wirtschaftlichen Bemessung von optimierten Walzprofil-Kranbahnträgern für Laufkrane nach Eurocode

Eine wirtschaftliche Standardanwendung von Walzprofilen sind Kranbahnträger für Laufkrane. In der bisherigen Bemessungspraxis wurden und werden überwiegend HE-Profile in der Stahlgüte S235 eingesetzt, welche eine zweckmäßige Lösung für Kranbahnträger kurzer bis mittlerer Spannweiten bei kleinen bis mittleren Radlasten darstellen. Sowohl für größere Spannweiten als auch für größere Radlasten und die Kombination aus beiden kommen HE-Profile an ihre Grenzen. Im folgenden Beitrag wird der Einsatz von HD- und HL-Walzprofilen aus S355 für Kranbahnträger untersucht und die Vorteile dieser weniger bekannten Profilreihen dargestellt.

On the economic design of optimized rolled section runway beams for top mounted overhead cranes. *Crane runway beams are an economic standard application of hot rolled sections. In today's design practice HE sections in grade S235 are commonly used, which represents a suitable solution for crane runway beams of short to intermediate spans and small to medium wheel loads. For bigger spans as well as for higher wheel loads and the combination of both HE sections arrive to their limits. In the following article the application of HD and HL rolled-sections in grade S355 for crane runway beams are examined and the advantages of this less known section ranges are presented.*

1 Einführung

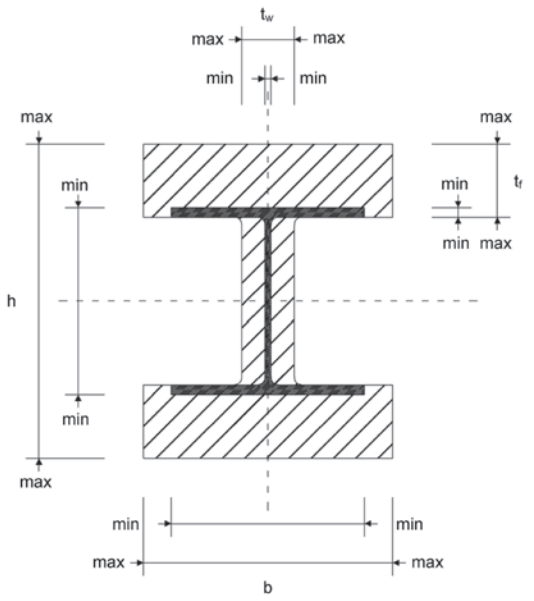
In früheren Untersuchungen [7] wurde bereits gezeigt, dass HE-Profile schon in der Stahlgüte S235 eine geeignete Lösung für die Kranbahnträger eines Laufkrans (Bild 1) darstellen. Darüber hinaus sind bereits seit Jahrzehnten statisch günstige, alternative Profilquerschnitte und höhere Festigkeiten auf dem deutschen Markt erhältlich:

Die ursprünglich aus Breitflanschträgern nach der amerikanischen Trägernorm ASTM A6/A6M entwickelten HD-Profile sind trotz ihrer für bestimmte Aufgaben sehr wirtschaftlichen Einsetzbarkeit und ihrer guten Verfügbarkeit bei deutschen Anwendern weniger bekannt. HD-Profile haben unter den Walzträgern die statisch effizienteste Materialverteilung für Beanspruchungen um die schwache Achse bzw. um beide Hauptachsen, wie sie insbesondere bei Kranbahnträgern oder auch bei vorwiegend zentrisch belasteten Stützen im Hoch- und Industriebau vorkommen [10]. Diese Vorteile sind bei den verschiedenen Profilen der HD360- und HD400-Profilreihen besonders ausgeprägt, welche heute von 134 kg/m (A = 170,6 cm^2) bis 1299 kg/m (A = 1650 cm^2) gewalzt werden [11].

Die ebenfalls ursprünglich aus amerikanischen Breitflanschträgern entwickelten HL-Träger mit besonders breiten Flanschen (Flanschbreiten ab 400 mm) ergänzen die bekannteren HE-Profilreihen im Bereich schwerer Walzträger und sind ab 920 mm Nennhöhe erhältlich. Sie werden beispielsweise häufig für Verbundbrücken eingesetzt. Auch diese Profile sind gut verfügbar und werden heute von 296 kg/m (A = 377,6 cm^2) bis 1377 kg/m (A = 1754 cm^2) gewalzt [11].

HD- und HL-Profile werden von verschiedenen europäischen Herstellern gewalzt und sind über den Stahlhandel unproblematisch erhältlich. In der Regel werden diese Profile direkt aus Walzungen bezogen und sind nicht im Stahlhandel vorrätig. Durch häufige, i. d. R. monatliche Walzzyklen der Hersteller resultiert dennoch eine sehr gute Verfügbarkeit dieser Profilreihen. Für die ausführenden

Bild 1. Kranbahnträger mit Brückenkran (© CTI Systems S.A.)
Fig. 1. Crane runway beam with overhead travelling crane (© CTI Systems S.A.)



	G	h	b	t_w	t_f
	[kg/m]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
HD360x134 – HD360x196	134 – 196	356 – 372	369 – 374	11,2 – 16,4	18 – 26,2
HD400x187 – HD400x1299	187 – 1299	368 – 600	391 – 476	15 – 100	24 – 140
HL920x344 – HL920x1377	344 – 1377	927 – 1093	418 – 473	19,3 – 76,7	32 – 115,1
HL1000AA – HL1000x976	296 – 976	982 – 1108	400 – 428	16,5 – 50	27,1 – 89,9
HL1100A – HL1100x607	343 – 607	1090 – 1138	400 – 411	18 – 31	31 – 55

Bild 2. Auszug aus den HD- und HL-Profilreihen
Fig. 2. Extract of HD and HL section ranges

Stahlbaubetriebe und anderen Projektpartner ergibt sich im Rahmen üblicher Projektausführungsfristen keinerlei Nachteil aus dem Einsatz von HD- und HL-Profilen.

Durch die ständige Weiterentwicklung des Herstellungsprozesses von warmgewalztem Baustahl sind heute Walzträger in der Stahlgüte S355 oder höher (z. B. S460M nach EN10025-4) ausgesprochen wirtschaftlich herstellbar. Historisch bedingt wird in Deutschland heute noch vorwiegend die Stahlgüte S235 standardmäßig eingesetzt. Technische Ursachen zum bevorzugten Einsatz von S235 sind allerdings mit den aktuellen Stählen nicht mehr gegeben. Nach Meinung der Autoren wird sich auch in Deutschland S355 zur Standardgüte für Walzträger entwickeln, wie es bereits in Nordamerika mit Grade 50 (Streckgrenze 345 N/mm^2) und Großbritannien mit S355 der Fall ist. Die nur geringen Mehrkosten von S355 gegenüber S235 in Höhe von heute etwa 5 % bei Walzprofilen begründen den gesamteuropäischen Trend zur Stahlgüte S355. Schon bei einer Querschnittsreduktion um eine Profilstufe ist bei Walzträgern der Einsatz von S355 gegenüber S235 wirtschaftlich. Zusätzliche Kostenersparnisse in der Fertigung, z. B. durch geringere Schweißnahtdicken, sind häufig möglich. Nur dort, wo die Gebrauchstauglichkeit oder die Ermüdungssicherheit die Dimensionierung des Kranbahnträgers bedingt und nicht die Größe der aufzunehmenden Schnittgrößen, ist die erforderliche Querschnittsgröße von der Stahlgüte unabhängig. Zur Frage der Wahl der Stahlgüte bei Kranbahnträgern siehe auch [7], [9] und [12].

Das Optimierungspotential durch die höhere Tragfähigkeit bei gleichem Querschnitt bzw. durch einen kleineren Querschnitt bei gleicher Tragfähigkeit und folglich geringeren Kosten ist allgemein bekannt. Darüber hinaus rücken mit der Einführung von EN1993-1-1 auch Stähle bis S460 vermehrt in den Blickpunkt der Planer und Stahlbaubetriebe. Diese Stähle könnten in einigen Fällen eine weitere Optimierung von Materialeinsatz und Kosten ermöglichen, wenn die Dimensionierung des Kranbahnträgerquerschnitts nicht durch die Ermüdungsbeanspruchung oder durch die Durchbiegungsbegrenzungen bestimmt wird. Diese aktuellen Entwicklungen berücksichtigend, wurden in der dem Beitrag zugrundeliegenden Masterarbeit [9] ausschließlich Profile der Stahlgüte S355 untersucht.

Weiterhin wurde bereits früher gezeigt [7], dass Zweifeldträger vorteilhaft für die wirtschaftliche Bemessung von Kranbahnträgern sind. Kranbahnträger mit mehr als zwei Feldern sind gegenüber den Zweifeldträgern mit gleichen Auflagerabständen kaum im Vorteil und wurden daher nicht weiter untersucht.

Um eine möglichst allgemeingültige Aussage zum Tragverhalten der Kranbahnträger aus Walzprofilen zu erhalten, wurden in [9] vergleichende Berechnungen mit den bekannten DIN-Regelwerken und mit den sie ersetzenden Eurocodes durchgeführt. Um die Aussagekraft der Ergebnisse über die deutschen Grenzen hinaus zu gewährleisten, wurde jeweils das konservativste Kriterium aus den Eurocodes und dem deutschen Nationalen Anhang gewählt. Dadurch sind die Tragfähigkeitsdiagramme und Vorbemessungstabellen in den meisten Ländern des Euroraums auf der sicheren Seite liegend anwendbar. Im Einzelnen wurden für die Gebrauchstauglichkeitsnachweise die geforderten Durchbiegungsbegrenzungen auf $\delta_y = \delta_z \leq l/600$ und $\delta_z \leq 25$ mm festgelegt. Nach dem deutschen Nationalen Anhang [4] ist für die horizontale Verformung das weniger strenge Kriterium $\delta_z \leq l/500$ und $\delta_z \leq 25$ mm zulässig, womit die im Folgenden aufgeführten Profile in den Fällen, in denen dieses Kriterium maßgebend ist, weiter optimiert werden könnten. Für die Stabilitätsnachweise wurde der in Deutschland eingeführte Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M1} = 1{,}1$ verwendet [2]. In [1] wird $\gamma_{M1} = 1{,}0$ empfohlen und von vielen Nationalen Anhängen anderer Europäischer Mitgliedsstaaten bestätigt. Somit besteht die Möglichkeit einer weiteren Optimierung der im Folgenden aufgeführten Profile bei

Stahlbauprojekten in anderen EU-Staaten und in den Fällen, in denen Stabilitätsnachweise maßgebend sind.

2 Vergleich der Profilreihen

Zur Illustration sind in Bild 3 exemplarisch die Abmessungen und Materialdicken von Walzprofilen mit einer Querschnittsfläche von ca. 200 cm² der bekannten HE-Reihen und denen eines HD360-Profils maßstäblich dargestellt. Die Querschnittsflächen und Trägergewichte werden im Walzwerk eingestellt für unterschiedliche Profilnennhöhen durch Variation der Steg- und Flanschdicken. Es ist unmittelbar erkennbar, dass die Querschnittsform der HD-Reihe zu besonders günstigen Querschnittswerten um die schwache Achse und einem günstigen Verhältnis I_z/I_y führt.

Bild 3. Vergleich von Walzprofilen mit einer Querschnittsfläche von ca. 200 cm²
Fig. 3. Comparison of hot rolled sections with a section area of about 200 cm²

In den Tabellen 1 bis 4 werden die wichtigsten Querschnittswerte von verschiedenen Profiltypen verglichen. Zu den Querschnittswerten gehören Querschnittsfläche A, (h_w/t_w)-Verhältnis des Stegs, die Widerstandsmomente W_y und W_z und das Torsionsträgheitsmoment I_T. Zum Vergleich wurden verschiedene Profilreihen mit Querschnittsflächen von ca. 95 cm², ca. 200 cm², ca. 305 cm² und ca. 440 cm² ausgewählt. In einem Fall wurden die Mittelwerte benachbarter Profilgrößen verwendet, um die gewünschte theoretische Querschnittsfläche zu erreichen. Die angegebenen Querschnittswertverhältnisse beziehen sich auf die mit 100 % angegebenen Werte des ersten Profiltyps jeder Tabelle. Ein höherer Prozentwert bedeutet eine Verbesserung.

Tabelle 1. Vergleich der Querschnittswerte der Profilreihen HEA, HEB, HEM, HD (Profile mit ca. 95 cm² Querschnittsfläche)
Table 1. Comparison of the cross section properties of rolled section types HEA, HEB, HEM, HD (sections with cross section areas of approx. 95 cm²)

	A	$1/(h_w/t_w)$	W_y	W_z	I_T
HEA 280	97,3 cm²	100 %	100 %	100 %	100 %
(HEB 220 + HEB 240)/2	98,5 cm²	151 %	83 %	86 %	144 %
HEM 160	97,1 cm²	330 %	56 %	62 %	262 %
HD 320×74,2	94,6 cm²	87 %	108 %	97 %	90 %

Tabelle 2. Vergleich der Querschnittswerte der Profilreihen HEA, HEB, HEM, HD (Profile mit ca. 200 cm² Querschnittsfläche)
Table 2. Comparison of the cross section properties of rolled section types HEA, HEB, HEM, HD (sections with cross section areas of approx. 200 cm²)

	A	$1/(h_w/t_w)$	W_y	W_z	I_T
HEA 500	197,5 cm²	100 %	100 %	100 %	100 %
HEB 400	197,8 cm²	147 %	81 %	104 %	146 %
HEM 240	199,6 cm²	356 %	51 %	95 %	258 %
HD 360×162	206,3 cm²	149 %	80 %	145 %	121 %

Tabelle 3. Vergleich der Querschnittswerte der Profilreihen HEA, HEB, HEM, HD (Profile mit ca. 305 cm² Querschnittsfläche)
Table 3. Comparison of the cross section properties of rolled section types HEA, HEB, HEM, HD (sections with cross section areas of approx. 305 cm²)

	A	$1/(h_w/t_w)$	W_y	W_z	I_T
HEB 700	306,4 cm²	100 %	100 %	100 %	100 %
HEM 300	303,1 cm²	346 %	47 %	130 %	169 %
HD 400×237	300,9 cm²	224 %	56 %	163 %	99 %

Tabelle 4. Vergleich der Querschnittswerte der Profilreihen HEA, HEB, HEM, HD (Profile mit ca. 440 cm² Querschnittsfläche)
Table 4. Comparison of the cross section properties of rolled section types HEA, HEB, HEM, HD (sections with cross section areas of approx. 440 cm²)

	A	$1/(h_w/t_w)$	W_y	W_z	I_T
HEM 1000	444,2 cm²	100 %	100 %	100 %	100 %
HD 400×347	442,0 cm²	388 %	43 %	195 %	148 %
HL 920×344	437,2 cm²	97 %	97 %	153 %	68 %

3 Tragfähigkeitsvergleich

Bild 4 zeigt das Tragfähigkeitsdiagramm für einen zweifeldrigen Kranbahnträger in S355, Feldweite 7,0 m, der folgendermaßen befahren wird:

- Hubklasse HC2, Beanspruchungsklasse S_2
- Schiene A45 ohne elastische Unterlage
- zwei Achsen mit Kranfahrwerksystem IFF, Seitenführung über Spurkränze
- Radabstand a = 3,2 m
- Radlasten von Vorder- und Hinterachse sind gleich
- Schräglaufkraft ($S - H_{S,1,T}$) entspricht 25 % einer maximalen Radlast $Q_{r,max}$
- Hubgeschwindigkeit 5 m/min

Als Horizontallast werden 25 % der vertikalen Radlast angesetzt. Dies ist ein Durchschnittswert bei Seitenführung über Spurkränze, aber kein Maximalwert. Alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit sind erfüllt. Die horizontalen und vertikalen Durchbiegungen dürfen maximal l/600 betragen. Die maximal zulässige Radlast ist über der Querschnittsfläche der jeweiligen Profile der Querschnittsreihen HEA, HEB, HEM, HD360, HD400 und HL920 aufgetragen. Zur besseren Erkennbarkeit der dargestellten Profilreihen sind die einzelnen Punkte der Walzprofile einer Profilreihe durch eine Linie miteinander verbunden.

Der deutlich sichtbare Knick in jeder der drei Tragfähigkeitskurven der HE-Profile resultiert aus einem Übergang: Für die Profile links des Knicks sind die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) maßgebend, für die Profile rechts vom Knick ist der Durchbiegungsnachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) dimensionierend. Der Einfluss der horizontalen Durchbiegungsbegrenzung auf die Trägerbemessung von HE-Profilen nimmt mit zunehmender Trägerhöhe zu, d. h. die Ausnutzung im GZT wird rechts des Knicks immer geringer. Ursache dafür ist die Begrenzung der Breite der HE-Profile auf etwa 300 mm. Die Querschnittswerte um die schwache Achse steigen ab ca. 300 mm Flanschbreite für größer werdende Profile nur noch geringfügig an, bei HEM-Profilen fallen sie sogar geringfügig ab. Da bei HD- und HL-Profilen sowohl Flanschbreiten als auch -dicken mit jedem Profilschritt weiter ansteigen, gibt es in den zugehörigen Kurven keinen ausgeprägten Knick.

Erst auf den zweiten Blick fällt ein erhöhter Tragfähigkeitsanstieg in der HD360-Profilreihe zwischen HD360×147 (A = 187,9 cm², zweiter Punkt von links in der HD360-Linie) und HD360×162 (A = 206,3 cm², dritter Punkt von links in der HD360-Linie) ins Auge. Ursache dafür ist die Zuordnung zu Querschnittsklassen nach DIN EN 1993-1-1: Die beiden leichtesten HD360-Profile fallen noch in Querschnittsklasse 3, die folgenden HD360- und alle HD400-Profile fallen in Querschnittsklasse 2 oder in Querschnittsklasse 1. Während bei den beiden kleinsten HD360-Profilen also nur die elastischen Grenzschnittgrößen angesetzt werden können, dürfen für alle anderen Profile plastische Querschnittsreserven ausgenutzt werden. Auch für Kranbahnträger ist dies sinnvoll, üblich und empfehlenswert, wenn sich gleichzeitig zeigen lässt, dass die Spannungen unter Gebrauchslasten die Fließgrenze nicht übersteigen.

Die Tragfähigkeitskurven in Bild 4 gelten natürlich nur für das im Bild dargestellte Beispiel. Im Rahmen einer Parameterstudie [9] wurden solche Diagramme auch für andere Spannweiten und jeweils DIN- oder EN-Bemessung angefertigt. Die ermittelten Kurven sind denen aus Bild 4 ähnlich und folgende Aussagen lassen sich ableiten:

- Kleine und mittelgroße HEA und HEB-Profile bis ca. 170 cm² Querschnittsfläche (bis HEA 450 oder HEB 340) in der Stahlgüte S355

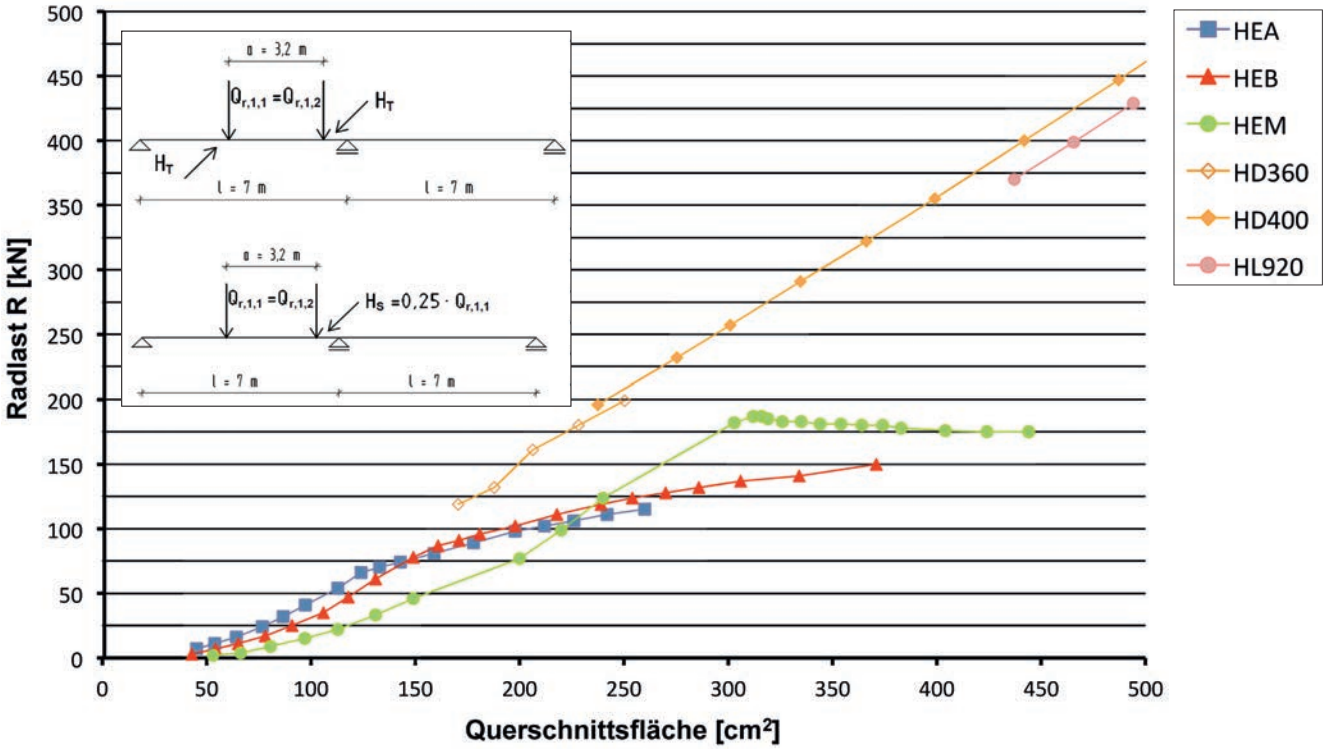


Bild 4. Maximale Radlast der Profilreihen HEA, HEB, HEM, HD360, HD400 und HL920 aus [9]
Fig. 4. Allowable wheel load of the section ranges HEA, HEB, HEM, HD360, HD400 and HL920 from [9]

sind als Kranbahnträger ähnlich gut geeignet.

- HEM-Profile sind i. d. R. keine wirtschaftliche Lösung für Kranbahnträger, wenn HEA-, HEB-, HD- und HL-Profile zur Verfügung stehen. Denn kleine HEM-Profile können nur geringere Radlasten als HEA- und HEB-Profile mit vergleichbarer Querschnittsfläche aufnehmen, während große HEM-Profile im Hinblick auf ihre Tragfähigkeit von HD- und HL-Profilen mit vergleichbarer Querschnittsfläche deutlich übertroffen werden.
- Die Walzprofile der Profilreihen HD360 und HD400 in der Stahlgüte S355 haben stets eine größere aufnehmbare Radlast als ein HE-Profil mit vergleichbarer Querschnittsfläche. Sie sind, beginnend mit dem kleinsten verfügbaren Profil (HD360×134 mit ca. 170 cm^2 Querschnittsfläche), stets wirtschaftlicher als ein HE-Profil mit vergleichbarer Querschnittsfläche und mit vergleichbarem Trägergewicht.
- Kleinere HD-Profile sind aus Übersichtlichkeitsgründen in Bild 4 nicht dargestellt. Die zulässigen Radlasten sind bezogen auf die Querschnittsflächen vergleichbar hoch wie jene der HEA- und HEB-Profile. In den nachfolgenden Vorbemessungstabellen wurden alle Profile untersucht und verglichen. Dargestellt ist jeweils das Profil mit der kleinsten Querschnittsfläche. In vielen Fällen liegt ein leichtes Profil der Profilreihen HD260 oder HD320 vorne, in anderen Fällen ein HEA- oder HEB-Profil.
- Ihre Tragfähigkeitsausnutzung erreichen HD360- und HD400-Profile bei hohen Radlasten und kurzen Spannweiten. Häufig sind die Nachweise im GZT dimensionierend, während die Durchbiegungsgrenzen noch nicht ausgeschöpft sind. Im Rahmen der Bemessung wird daher die Prüfung einer weiteren Querschnittsoptimierung der HD-Profile mit S460 empfohlen.
- Bei besonders hohen Radlasten und größeren Spannweiten können insbesondere HL920-Profile wirtschaftlich sehr interessant sein.

4 Vergleich mit Schweißträgern

Grundsätzlich erlauben Schweißprofile für Kranbahnträger eine weitere Querschnittsoptimierung, besonders dann, wenn der Obergurt stärker als der Untergurt ausgebildet werden kann [7]. Einer möglichen Materialeinsparung stehen aber höhere Fertigungskosten und ein höherer Prüfaufwand zur Sicherstellung der Qualität der erforderlichen Schweißnähte, aber auch ein zusätzlicher Bemessungsaufwand (z. B. Ermüdungssicherheitsnachweise der Halsnähte) gegenüber. Auch die Auswahl des Grundmaterials im Hinblick auf die Eigenschaften in Dickenrichtung ist anspruchsvoller, da die erforderlichen Bleche zur Fertigung des Schweißträgers nach [5] und [6] auf ihre Terrassenbruch-Empfindlichkeit zu untersuchen sind. Bei Walzprofilen ist die zugrundeliegende Steg-Flansch-Verbindung herstellungsbedingt gewalzt und nicht geschweißt. Da keine Schweißnähte vorhanden sind, ist bei Walzprofilen der Ermüdungsnachweis an der Steg-Flansch-Verbindung in der Regel unkritisch. Für die Werkstoffe von Walzprofilquerschnitten entfällt außerdem auch die Festlegung von Z-Werten.

Unabhängig vom Profiltyp ist nach DIN EN 1993-1-1 Abschnitt 6.26 (6) [1] der Nachweis gegen Schubbeulen für unausgesteifte Stegbleche zu führen, wenn

$$h_w/t_w > 72\ \varepsilon/\eta.$$

Bei sehr hohen, dünnen Stegen und hoher Festigkeit kann der Schubbeulnachweis bedeutsam werden. Die Stegdicken von Walzprofilen sind i. d. R. ausreichend und erfordern keinen Schubbeulnachweis. Der Einsatz von Quersteifen ist eine Möglichkeit zur Reduzierung der Stegdicke, verursacht aber höhere Fertigungskosten. Die Wirtschaftlichkeit von Quersteifen ist daher sorgfältig zu prüfen. Bei Beanspruchungsklassen ab S_5 ist es unzulässig, Quersteifen am Obergurt mit Schweißnähten zu befestigen.

Wenn in der konkreten Situation sowohl der Einsatz eines Walzprofils als auch der Einsatz eines Dreiblech-Querschnitts für den Kranbahnträger in Frage kommt, sollte der wirtschaftlichste Querschnittstyp mit einer detaillierten Gegenüberstellung der Material- und Fertigungskosten von Walz- und Schweißprofil ermittelt werden. Walzprofile ergeben sich aus solchen Vergleichen auch trotz der erforderlichen, größeren Stahlmenge häufig als die wirtschaftlichere Lösung. Für Kranbahnträger mit sehr großen Spannweiten und Radlasten, für die auch die größten HD- und HL-Profile nicht mehr ausreichend tragfähig sind, kommen weiterhin nur Schweißprofile in Frage.

5 Vorbemessungstabellen für Walzprofil-Kranbahnträger nach Eurocode

Zur überschlägigen Vorbemessung von Kranbahnträgern aus Walzprofilen wurden Tabelle 5 und 6 erstellt. Tabelle 6 kann auch bei mehr als zweifeldrigen Trägern angewendet werden. Die in den beiden Tabellen angegebenen Profile erlauben eine Vorbemessung, sie ersetzen jedoch keinesfalls den normgerechten Nachweis der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit.

Die Berechnungen wurden mit folgenden Parametern durchgeführt:

- Stahlgüte S355
- Hubklasse HC2, Beanspruchungsklasse S_2
- Flachstahlschiene b/h = 5 cm/3 cm
- zwei Achsen mit Kranfahrwerksystem IFF, Seitenführung über Spurkränze
- Radlasten von Vorder- und Hinterachse sind gleich
- Horizontallast aus Schräglauf H_S entspricht 30 % einer maximalen Radlast $Q_{r,max}$ (theoretisch möglicher Maximalwert)
- Hubgeschwindigkeit 5 m/min
- vertikale Durchbiegungsbegrenzung l/600
- horizontale Durchbiegungsbegrenzung l/600
- Spurmittenmaß 20,00 m
- minimaler Abstand des Katzschwerpunkts von den Kranbahnträgerachsen 1,00 m

Für Kraneigengewicht $Q_{r,c}$, Hublast $Q_{r,h}$ und Massenkraft H_{T1} wurden linear genäherte Radlastanteile in Abhängigkeit von der Krantragfähigkeit ermittelt [9].

Die Profile in den Vorbemessungstabellen in der Stahlgüte S355 sind für die geforderten Gebrauchstauglichkeitskriterien im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und gleichzeitig für alle Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit sehr gut ausgenutzt und damit besonders wirtschaftlich. Es ist an dieser Stelle nochmals darauf hinzuweisen, dass

Tabelle 5. Auswahl des Walzprofils für Einfeldträger
Table 5. Selection of rolled section size for single-span runway beam

Q_r	a	Vorbemessungstabelle nach EC für Einfeldträger mit HE-, HD-, HL-Profilen; S 355					
in kN	in m	l = 5 m	l = 6 m	l = 7 m	l = 8 m	l = 10 m	l = 12 m
20	1,6	HD260×54,1	HEA260 *	HD320×74,2	HEA300 *	HEA400	HD360×147 *
20	2,0	HEA220 *	HEA240 *	HD320×74,2	HEA300 *	HEA400	HD360×147 *
20	2,5	HEA220 **	HD260×54,1	HD320×74,2	HD320×74,2	HEA360	HD360×147 *
25	1,6	HD260×54,1	HD320×74,2	HEA300	HEA320	HD360×134 *	HD360×179 *
25	2,0	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2	HEA320	HD360×134 *	HD360×179 *
25	2,5	HD260×54,1 **	HEA260	HD320×74,2	HEA320	HD360×134 *	HD360×179 *
30	1,6	HEA260	HD320×74,2	HEA300	HEA340	HD360×134 *	HD360×196 *
30	2,0	HEA240 **	HD320×74,2	HEA300	HEA340	HD360×134 *	HD360×196 *
30	2,5	HD260×54,1 **	HD320×74,2	HEA300	HEA340 **	HD360×134 *	HD360×196 *
30	3,2	HD260×54,1	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEA320 **	HD360×134 *	HD400×187 *
30	4,0	HEA240	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEA320 **	HD360×134 *	HD360×179 *
35	1,6	HEA260	HEA300	HEA320	HEA400 **	HD360×147 *	HD400×237 *
35	2,0	HEA260	HD320×74,2	HEA320	HEA400 **	HD360×147 *	HD400×237 *
35	2,5	HEA260 **	HD320×74,2	HEA320 **	HEA400 **	HD360×147 *	HD400×237 *
35	3,2	HEA260 **	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEB300 *	HD360×147 *	HD400×216 *
35	4,0	HEA260	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEB300 **	HD360×134 *	HD360×196 *
40	2,0	HD320×74,2	HEA300	HEA340 **	HD360×134 *	HD360×162 *	HD400×262 *
40	2,5	HEA260 **	HEA300	HEA340 **	HEB320	HD360×162 *	HD400×262 *
40	3,2	HEA260	HEA300 **	HEA340 **	HEB320 **	HD360×162 *	HD400×237 *
40	4,0	HD320×74,2	HEA300 **	HEA340 **	HEB320 **	HD360×147 *	HD400×237 *
50	2,0	HD320×74,2	HEA320	HEB320	HD360×134 *	HD400×216 *	HD400×314 *
50	2,5	HD320×74,2	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134 *	HD360×196 *	HD400×314 *
50	3,2	HD320×74,2	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134 *	HD400×187 *	HD400×287 *
50	4,0	HEA300	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134 **	HD360×179 *	HD400×262 *
60	2,0	HEA300	HEA360 **	HD360×134	HD360×147	HD400×237 *	HL920×344
60	2,5	HEA300	HEA360 **	HD360×134	HD360×147 *	HD400×237 *	HL920×344
60	3,2	HEA300	HEA360 **	HD360×134	HD360×134	HD400×216 *	HL920×344
60	4,0	HEA320 **	HEA360 **	HD360×134 **	HD360×134 **	HD400×216 *	HD400×314 *
70	2,0	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134	HD360×179 *	HD400×262 *	HL920×344 **
70	2,5	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134	HD360×162 *	HD400×262 *	HL920×344 **
70	3,2	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134	HD360×162 *	HD400×262 *	HL920×344 **
70	4,0	HEA320	HEB320 **	HD360×134 **	HD360×147 **	HD400×237 *	HL920×344 **
80	2,5	HEA340 **	HD360×134	HD360×147	HD360×179 *	HD400×287 *	HL920×368 **
80	3,2	HEA340 **	HD360×134	HD360×134	HD360×179 *	HD400×287 *	HL920×368 **
80	4,0	HEA340 **	HD360×134	HD360×134 **	HD360×162 **	HD400×262 *	HL920×368 **
80	4,6	HEA360	HD360×134	HD360×134	HD360×162 **	HD400×262 *	HL920×368 **
90	2,5	HEB300 **	HD360×134	HD360×162 *	HD360×196 *	HD400×314 *	HL920×420 **
90	3,2	HEB300 **	HD360×134	HD360×147	HD400×187 *	HD400×314 *	HL920×420 **
90	4,6	HEA400 **	HD360×134	HD360×147	HD360×179 **	HD400×262 *	HL920×420 **
100	2,5	HEB320 **	HD360×134	HD360×162	HD400×216 *	HL920×344	HL920×449 **
100	3,2	HEB320 **	HD360×134	HD360×162 **	HD400×216 *	HL920×344	HL920×449 **
120	2,9	HD360×134	HD360×147	HD400×187 *	HD400×262 *	HD400×382	HL920×537 **
140	2,9	HD360×134	HD360×162 **	HD400×216 *	HD400×287 *	HL920×420 **	HL920×588 **
160	3,2	HD360×162	HD360×179 **	HD400×237 *	HD400×314 *	HL920×491 **	HL920×656 **
180	3,2	HD360×162	HD400×187 **	HD400×262 *	HD400×347	HL920×537 **	HL920×725 **
200	3,2	HD360×162	HD400×216 **	HD400×262 *	HD400×382	HL920×588 **	HL920×787 **

Tabelle 6. Auswahl des Walzprofils für Zweifeldträger
Table 6. Selection of rolled section size for two-span runway beam

Q_r	a	Vorbemessungstabelle nach EC für Zweifeldträger mit HE-, HD-, HL-Profilen, S 355			
in kN	in m	l = 5 m	l = 6 m	l = 7 m	l = 8 m
20	1,6	HEA220 *	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2
20	2,0	HEA200 **	HEA220 *	HD260×54,1	HD320×74,2
20	2,5	HEA200 **	HEA220 **	HD260×54,1	HEA260 *
25	1,6	HEA220 *	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2
25	2,0	HEA220 **	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2
25	2,5	HEA220 **	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2
30	1,6	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2	HEA300
30	2,0	HEA220 **	HEA260	HD320×74,2	HEA300
30	2,5	HEA220 **	HEA260	HD320×74,2	HEA300
30	3,2	HEA220 **	HD260×54,1 **	HD320×74,2 **	HD320×74,2 **
30	4,0	HEA220 **	HD260×54,1 **	HD320×74,2 **	HD320×74,2 **
35	1,6	HD260×54,1	HD320×74,2	HEA300	HEA320
35	2,0	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2	HEA320 **
35	2,5	HD260×54,1	HEA260	HD320×74,2	HEA300
35	3,2	HD260×54,1 **	HEA260 **	HD320×74,2 **	HEA300 **
35	4,0	HD260×54,1 **	HEA260 **	HD320×74,2 **	HEA300 **
40	2,0	HEA240 **	HD320×74,2	HEA300	HEA320
40	2,5	HD260×54,1	HD320×74,2	HEA300	HEA320 **
40	3,2	HD260×54,1 **	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEA320 **
40	4,0	HD260×54,1 **	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEA320 **
50	2,0	HEA260	HEA300	HEA320 **	HEA400 **
50	2,5	HEA260	HD320×74,2	HEA320 **	HEB300 *
50	3,2	HEA260 **	HD320×74,2 **	HEA320 **	HEB300 **
50	4,0	HEA260 **	HD320×74,2 **	HEA320 **	HEB300 **
60	2,0	HD320×74,2	HEA320 **	HEA360 **	HD360×134
60	2,5	HD320×74,2	HEA300	HEA360 **	HD360×134
60	3,2	HD320×74,2	HEA300	HEA360 **	HD360×134
60	4,0	HD320×74,2 **	HEA300 **	HEA360 **	HD360×134 **
70	2,0	HEA300	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134
70	2,5	HEA300	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134
70	3,2	HD320×74,2	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134
70	4,0	HD320×74,2 **	HEA320 **	HEB320 **	HD360×134 **
80	2,5	HEA300	HEA340 **	HD360×134	HD360×134
80	3,2	HEA300	HEA340 **	HD360×134	HD360×134
80	4,0	HEA300 **	HEA340 **	HD360×134 **	HD360×134 **
80	4,6	HEA300 **	HEA340 **	HD360×134 **	HD360×134 **
90	2,5	HEA320 **	HEB300 **	HD360×134	HD360×147
90	3,2	HEA300	HEB300 **	HD360×134	HD360×147
90	4,6	HEA300 **	HEB300 **	HD360×134 **	HD360×134 **
100	2,5	HEA320 **	HD360×134	HD360×134	HD360×162 *
100	3,2	HEA320 **	HD360×134	HD360×134	HD360×162 **
120	2,9	HEA360 **	HD360×134	HD360×162 **	HD360×179
140	2,9	HEB320 **	HD360×147	HD360×162 **	HD400×216 *
160	3,2	HD360×134	HD360×162 **	HD360×179 **	HD400×216 *
180	3,2	HD360×134	HD360×162 **	HD400×187	HD400×237 *
200	3,2	HD360×147	HD360×179 **	HD400×216	HD400×262 *

alle Tabellenwerte unter Ansatz der maximal möglichen Horizontalkraft (Schräglaufkraft) ermittelt wurden. Besonders bei Seitenführung über Seitenführungsrollen können die Horizontallasten deutlich geringer sein. Dadurch können sich im konkreten Einzelfall geringere Profilgrößen ergeben.

Oft sind die Durchbiegungsbegrenzungen (s. dazu auch Abschnitt 1) dimensionierend für die Profile und nicht die Nachweise im GZT. In der Tabelle sind solche Profile mit Sternchen markiert, die im Einzelnen bedeuten:

* die in den Berechnungen berücksichtigte vertikale Durchbiegungsbegrenzung $\delta_z = l/600$ ist maßgebend

** die in den Berechnungen berücksichtigte horizontale Durchbiegungsbegrenzung $\delta_y = l/600$ ist maßgebend

Besonders für Kranbahnträger mit hohen Ermüdungsbeanspruchungen können die Ermüdungsnachweise kritisch werden. Die in den Tabellen 5 und 6 angegebenen Vorbemessungsergebnisse wurden unter Annahme der niedrigen Beanspruchungsklasse S_2 ermittelt.

6 Vergleich Bemessung nach DIN mit Eurocode

Die vergleichenden Berechnungen von DIN und Eurocode [9] für Ein- und Zweifeldträger mit Spannweiten von 5,0 m bis 12,0 m zeigen eine sehr gute Übereinstimmung der aufnehmbaren Radlasten der untersuchten Walzprofile. Dies gilt für die Stahlgüte S355 unter Ansatz identischer Durchbiegungsbegrenzungen $\delta_y = \delta_z \leq l/600$ und einem Teilsicherheitsbeiwert $\gamma_{M1} = 1{,}1$. In der überwiegenden Anzahl der untersuchten Fälle wurden übereinstimmende Ergebnisse nach DIN und nach EC festgestellt. Nur für ca. 10 % der Angaben in den Vorbemessungstabellen ergab die Bemessung nach Eurocode um eine Profilstufe größere Profile [9]. Den mit anderen Parametern (z. B. S 235) berechneten Beispielen aus [7] ist zu entnehmen, dass es auch Fälle geben kann, bei denen sich eine um eine Stufe geringere Profilgröße ergibt.

In Tabelle 7 sind die ermittelten Profile für den in den Vorbemessungstabellen dieses Beitrags gegebenen Fall des Zweifeldträgers mit 7,00 m Spannweite verglichen mit sinngemäß entsprechenden Vorbemessungstabellen aus [7] und [9]. Für hohe Radlasten ist eine Bemessung mit HEB-Trägern nicht mehr ausreichend und somit auch keine Aussage über Einsparpotential möglich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die wirtschaftliche Bemessung von Kranbahnträger-Walzprofilen beginnt mit der Auswahl der am besten geeigneten Profilreihe. Im Allgemeinen sind dies bei Kranbahnträgern für Laufkrane entweder HEA-, HEB-, HD- oder HL-Profile. Der Einsatz von HEM-Profilen ist dagegen – verglichen mit den vorgenannten Profilreihen – meist unwirtschaftlich. Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen Walzprofile der Profilreihen HD und HL sind sehr gut verfügbar und im Kranbahnbau sehr wirtschaftlich einsetzbar.

Für die Standardfälle Einfeld- und Zweifeldträger, befahren durch einen einzigen Laufkran der Beanspruchungsklasse S_2, wurden Vorbemessungstabellen erstellt, die eine auf der sicheren Seite liegende Abschätzung der erforderlichen Profilgröße in der Stahlgüte S355 erlauben.

Als bestgeeignete Stahlgüte für die in diesem Beitrag untersuchten, nicht unter hohen Ermüdungsbeanspruchungen stehenden Kranbahnträger-Walzprofile wird S355 empfohlen. Die Stahlgüten S235 und S275 sind im Allgemeinen weniger wirtschaftlich. Darüber hinaus besteht für Profile der Profilreihen HD360 und HD400 in Fällen, bei denen weder Durchbiegungsbegrenzungen noch Ermüdungsnachweise dimensionierend wird (z. B. bei großen Radlasten und gleichzeitig kurzen Spannweiten) durch den Einsatz von S460 eine weitere Möglichkeit zur Querschnittsoptimierung.

Tabelle 7. Exemplarischer Vergleich DIN- mit Eurocode-Bemessung
Table 7. Exemplary comparison of DIN with Eurocode design

Radlast	DIN S235 [7]	A	DIN S355 [9]	A	EC S355 [9]	A	Flächenersparnis DIN (S235; HEB) / DIN (S355; HD)	Flächenersparnis DIN (S235; HEB) / EC (S355; HD)
in kN	Profil	in cm²	Profil	in cm²	Profil	in cm²	in %	in %
80	HEB 360	180,6	HD360×134 **	170,6	HD360×134	170,6	5,5 %	5,5 %
90	HEB 400	197,8	HD360×134 **	170,6	HD360×134	170,6	13,8 %	13,8 %
100	HEB 450	218,0	HD360×134	170,6	HD360×134	170,6	21,7 %	21,7 %
120	HEB 700	306,4	HD360×147 **	187,9	HD360×147	187,9	38,7 %	38,7 %
140	–	–	HD360×162 **	206,3	HD360×162 **	206,3	–	–
160	–	–	HD360×179 **	228,3	HD360×179 **	228,3	–	–
180	–	–	HD400×187	237,6	HD400×187	237,6	–	–
200	–	–	HD400×216	275,5	HD400×216	275,5	–	–

Literatur

[1] DIN EN1993-1-1: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Dezember 2010.

[2] DIN EN1993-1-1/NA: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Nationaler Anhang, Dezember 2010.

[3] DIN EN1993-6: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen, Dezember 2010.

[4] DIN EN1993-6/NA: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 6: Kranbahnen, Nationaler Anhang, Dezember 2010.

[5] DIN EN1993-1-10: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, Dezember 2010.

[6] DIN EN1993-1-10/NA: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1–10: Stahlsortenauswahl im Hinblick auf Bruchzähigkeit und Eigenschaften in Dickenrichtung, Nationaler Anhang, Dezember 2010.

[7] *Seeßelberg, C.:* Kranbahnen – Bemessung und konstruktive Gestaltung; 3. Auflage, Berlin: Bauwerk Verlag 2009.

[8] *Seeßelberg, C., Steigenberger, C.:* BEM10 – Programm zur Berechnung von Kranbahnen – Version 2.4; LSS Entwicklungs- und Vertriebs-GmbH & Co.KG, Dortmund 2001.

[9] *Ruppert, M.:* Wirtschaftliche Bemessung von idealen Walzprofil-Kranbahnträgern für Laufkrane nach Eurocode. Masterarbeit FH München 2013.

[10] *Hauke, B., Manganelli, E., Piccolin, G., May, M.:* Torre Diamante – ein flexibler Büroturm im Herzen Mailands. Bauingenieur VDI Jahresausgabe 2012/2013, S. 32–39.

[11] ArcelorMittal Long Carbon Europe, Profil- und Stabstahl, Verkaufsprogramm, www.arcelormittal.com/sections/de/bibliothek/verkaufsprogramm-broschueren.html

[12] *Podgorski, S.:* Spezielle Berechnungen und Bemessungshilfen für Kranbahnträger. Diplomarbeit, TU Dresden, 2010.

Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Marc May,
ArcelorMittal Long Carbon Europe,
66, rue de Luxembourg, L-4221 Esch/Alzette,
marc.may@arcelormittal.com

Matthias Ruppert,
Hochschule für angewandte Wissenschaften (FH) München, Fakultät 02 Bauingenieurwesen, Studienrichtung Stahlbau und Gestaltungstechnik STG, Karlstraße 6, D-80333 München

Prof. Dr.-Ing. Christoph Seeßelberg,
Fachhochschule Köln,
Claudiusstraße 1, D-50678 Köln

Vertrieb :
+49 (0)221 57 29 0
sections.deutschland@arcelormittal.com

Anarbeitung :
+352 5313 3057
cs.eurostructures@arcelormittal.com

Technische Beratung :
+352 5313 3010
sections.tecom@arcelormittal.com

Umwelt-Produktdeklaration
EPD-BFS-2010111-D

100% RECYCLABLE