

Berechnung von Profilblechen

Autor(en): **Crisinel, Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **104 (1986)**

Heft 49

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-76330>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Berechnung von Profilblechen

Von Michel Crisinel, Lausanne

Während der vergangenen zwei bis drei Jahrzehnte hat die Verwendung von Profilblechen im Stahlbau stark zugenommen. Man begegnet heute Profilblechen als Dachelemente (Warm- oder Kaldach), Fassadenelemente (äussere und innere Verkleidung oder Sandwichelement) und als Deckenelemente (verlorene Schalung, tragende Decke oder Verbunddecke). Das Profilblech wird von den Konstrukteuren wegen seines geringen Gewichts wie auch wegen der einfachen Handhabung und Verlegung geschätzt. Ausserdem erleichtert die Trapezform der Rippen das Ineinanderstapeln der Platten für den Transport und die Lagerung bei geringem Volumen.

Dem Architekten bietet das verzinkte, während der Herstellung lackierte Stahlblech dank der Vielfalt der Formen und Farben eine Fülle gestalterischer und dekorativer Möglichkeiten. Der Ingenieur betrachtet das dünne, kaltverformte Stahlblech heute als vollwertiges Bauelement, gleichberechtigt mit den warmgewalzten Profilen. Schliesslich hat das Profilblech dank der Feuerverzinkung einen guten Korrosionswiderstand und in der Kombination mit zusätzlichen Dämmstoffen eine gute Wärme- und Schalldämmung.

Kennwerte

Der Ingenieur und der Konstrukteur verfügen für dieses Bauelement jedoch nicht über Tabellen mit geometrischen und statischen Kennwerten. Dies hat folgende Gründe:

- Die Profilformen sind nicht genormt, was zu einer grossen Zahl von Profilblechen unterschiedlicher Herkunft und Qualität führt;
- die verfügbare Auswahl an Profilblechen hängt oft von den Forderungen der Anwender sowie von den Möglichkeiten der Hersteller und Importeure ab;
- die statischen Kennwerte sind Funktion der Stahlqualität und der Höhe der Beanspruchung.

Zur Verbesserung dieser Situation hat die Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau (SZS) in Zusammenarbeit mit den Herstellern und Importeuren von Profilblechen eine Arbeitsgruppe gebildet, deren Ziel die Veröffentlichung einheitlicher Tabellen war. Eine solche Veröffentlichung, die regelmässig auf den neuesten Stand zu bringen sein wird, sollte alle in der Schweiz angebotenen Profilbleche berücksichtigen. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, dass in den meisten europäischen Ländern die Tragfähigkeit der Profilbleche mit Hilfe von Versuchen bestimmt wird, während in der Schweiz nichts derartiges existiert. Die zur Ermittlung der Tragfähigkeit aus Versuchen verwendeten Kriterien sind in den einzelnen Ländern unterschiedlich, so dass die Darstellung von Werten verschiedenster Herkunft in einer einzigen Veröffentlichung nicht möglich war. Insbesondere war die Veröffentlichung von Belastungstabellen, deren Werte sehr von den in den einzelnen Ländern unterschiedlichen Sicherheitskonzepten abhängen, unmöglich.

Die Veröffentlichung basiert deshalb auf statischen Kennwerten, die mit Hilfe einer einheitlichen und in Europa allgemein anerkannten Theorie berechnet wurden. Es handelt sich um die «European Recommendations for the Design of Profiled Sheet» [1], herausgegeben von der Europäischen Stahlbaukonvention (EKS), die im folgenden als «Europäische Empfehlungen» bezeichnet sind.

Empfehlungen der EKS

Die EKS, zu deren 13 europäischen Mitgliedsländern auch die Schweiz gehört, hat sich seit 1975 im Rahmen der Kommission TC7 mit der Ausarbeitung von europäischen Empfehlungen für dünnwandige kaltverformte Stahlbleche befasst. Eine im Jahre 1983 erschienene Empfehlung [1] betrifft die Berechnung von Profilblechen. Damit werden die folgenden Ziele verfolgt:

- Bereitstellung einer einheitlichen, europäischen Berechnungsmethode für die in der Praxis tätigen Ingenieure und die mit Ausarbeitung von technischen Normen betrauten Gremien der einzelnen Länder;
- für die Hersteller von Profilblechen Bereitstellung eines Berechnungsverfahrens zur Vermeidung umfangreicher Versuche bei der Entwicklung eines neuen Produkts;
- Beitrag zur Vereinheitlichung der Kenntnisse und Berechnungsmethoden für derartige Bauelemente.

Tatsächlich stellt die Verwendung von Profilblechen dem Ingenieur Bemessungsprobleme, die bei den üblichen warmgewalzten Profilen nicht auftreten. Infolge der im Verhältnis zur Breite geringen Blechdicke tritt bei den ebenen, druckbeanspruchten Elementen

örtlich Beulen bereits bei unterhalb der Fließgrenze liegenden Spannungen ein. Das örtliche Beulen wird somit für die Bemessung zum massgebenden Kriterium.

Profilbleche verlieren beim Beginn des Ausbeulens, wie allgemein bekannt ist, nicht sofort ihre Tragfähigkeit, sondern können über die kritische Beulbeanspruchung hinaus weitere Laststeigerungen aufnehmen. Man bezeichnet dies als überkritische Tragfähigkeit. Die zur Ermittlung der Tragfähigkeit von druckbeanspruchten dünnen Profilblechen unter Berücksichtigung des örtlichen Beulens verwendeten Rechenverfahren bedienen sich des Begriffs der mitwirkenden Breite (Bild 1). Der durch eine ungleichmässig verteilte Spannung beanspruchte Stahlquerschnitt wird dabei durch einen reduzierten Querschnitt ersetzt, der gleichmässig beansprucht ist. Die mitwirkende Breite b_{ef} hängt vom Schlankheitsverhältnis b_o/t des druckbeanspruchten Elements und der Grösse der auftretenden Spannung δ_{max} ab. Dadurch vermindert sich das Widerstandsmoment W eines Profilbleches mit zunehmender Spannung infolge der Abnahme der mitwirkenden Breite des druckbeanspruchten Flansches. Es besteht somit keine direkte Proportionalität zwischen der Tragfähigkeit eines Profilbleches und der Fließgrenze des verwendeten Stahls.

Die Tragfähigkeit von ebenen druckbeanspruchten Tragelementen kann durch die Anordnung von Versteifungen wesentlich erhöht werden. Dies gilt gleichermassen für die Tragfähigkeit schubbeanspruchter Stege, in denen Sicken angeordnet sind. Aber auch die unversteiften Bleche zeigen eine Tendenz zu immer grösserer Vielfalt der Formen, die durch die Berechnung oft nur schwierig zu erfassen sind. Die Empfehlungen der EKS enthalten jedoch ein Verfahren, das eine vollständige Berechnung von Profilblechen auch beim Vorhandensein von Flansch- und Stegsicken erlaubt (Bild 2a).

Für die Berechnung der Tragfähigkeit bei Biegebeanspruchung eines Profilbleches wird ein reduzierter Querschnitt (Bild 2b) verwendet, der aus den folgenden Teilen besteht:

- mitwirkende Breiten der druckbeanspruchten ebenen Teile des Gurtes (1),
- mitwirkende Querschnitte der Gurtsicken (2),
- mitwirkende Breite der druckbeanspruchten ebenen Teile des Steges (3),
- mitwirkende Querschnitte der druckbeanspruchten Stegsicken (4),

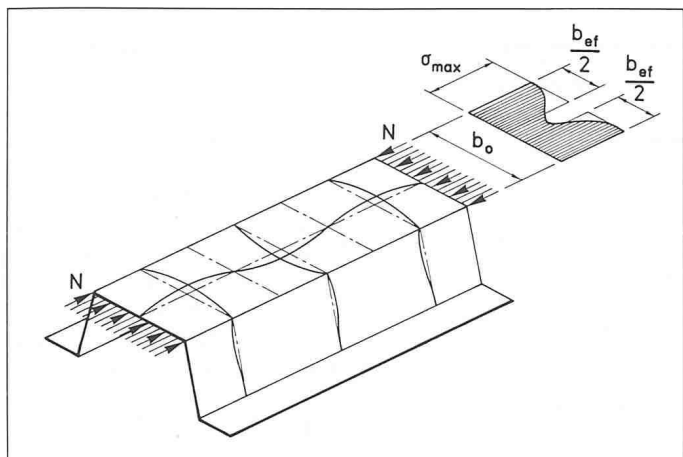
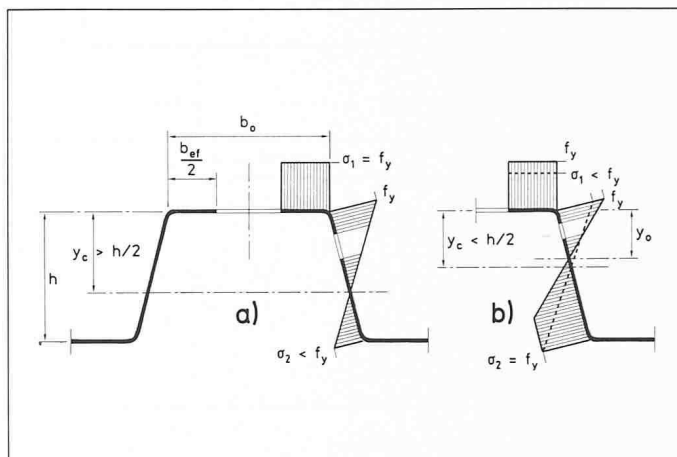
Bild 1. Mitwirkende Breite b_{ef} 

Bild 2. a) Beispiel eines Trapezprofils mit Gurt- und Stegsicken (Profil «Holo-deck H 110»). b) Mitwirkender Querschnitt einer halben Rippe.

- zugbeanspruchter Teil des Steges (5),
- zugbeanspruchter Gurt (6).

Die Tragfähigkeit bei Momentenbeanspruchung ergibt sich aus dem effektiven Widerstandsmoment $W_{ef} = I_{ef}/y$ des reduzierten Querschnittes durch Multiplikation mit der Fließgrenze f_y . Anders formuliert heisst dies auch, dass für $y_c > h/2$ (Bild 3a) die Druckspannung der massgebende Bruchparameter ist und sich das Bruchmoment zu:

$$(1) \quad M_u = \frac{I_{ef}}{y_c} f_y$$

ergibt.

Falls die Plastizierung zuerst im zugbeanspruchten Teil des Querschnittes auftritt, ist es möglich, die plastische Reserve des Querschnittes auszuschöpfen. Für $y_c < h/2$ kann die Tragfähigkeit M_u bei Biegebeanspruchung durch schrittweise Iteration ermittelt werden, bis die Spannung im gedrückten Flansch die Fließgrenze f_y (Bild 3b) erreicht:

$$(2) \quad M_u = \int_{A_{ef}} y \sigma dA$$

Die Berechnung der Schnittkräfte eines senkrecht zu seiner Hauptebene belasteten Profilbleches erfolgt nach der Theorie elastischer Stabtragwerke. Die Veränderlichkeit des Trägheitsmomentes infolge der nicht voll wirksamen druckbeanspruchten Teile des Querschnittes wird dabei nicht berücksichtigt. Das Momentendiagramm eines über mehrere Auflager durchlaufenden Bleches wird somit wie für einen Durchlaufträger mit konstantem Trägheitsmoment ermittelt, wenn die Bedingung:

$$(3) \quad 0,5 < \frac{I_{ef}}{I_{ef}^+} < 1,2$$

erfüllt ist. Darin bedeuten I_{ef}^- und I_{ef}^+ die reduzierten Trägheitsmomente über der Stütze bzw. im Feld. Von einer eventuellen Momentenumlagerung infolge rein elastischer Verformungen durch Ausbeulen kann im vorstehenden Fall Gebrauch gemacht werden. Grössere Unterschiede der Trägheitsmomente zwischen Feld- und Stützenquerschnitt müssen bei der elastischen Berechnung berücksichtigt werden. Hingegen ist keinerlei plastische Momentenumlagerung zulässig, da die Bildung von plastischen Gelenken infolge der speziellen geometrischen Eigenschaften der dünnen Bleche nicht möglich ist.

Zusätzlich zu den Regeln für die Ermittlung der wirksamen Querschnitte und der Tragfähigkeit bei reiner Biegung (M) kann mit Hilfe der Europäischen Empfehlungen die Tragfähigkeit bei Schubbeanspruchung (V) und im Eintragungsbereich konzentrierter Lasten (R) sowie die Interaktion zwischen den Schnittkräften $M-V$ und $M-R$ berechnet werden.

Profilbleche in der Schweiz

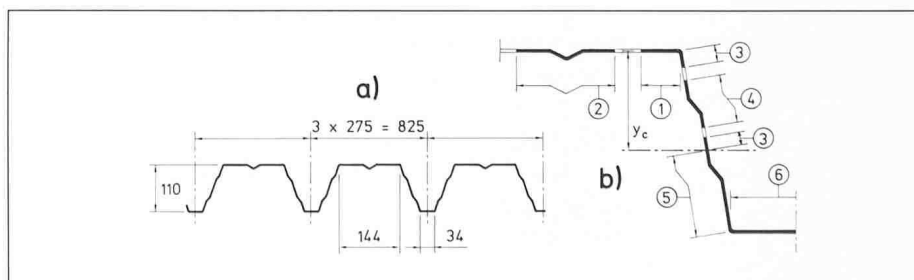
Aus den folgenden Gründen existiert hinsichtlich der Profilbleche in der Schweiz eine besondere Situation:

- wegen des begrenzten Marktes werden Profilbleche nur in zwei Werken hergestellt, was das Vorhandensein von mehreren ausländischen Vertretungen (hauptsächlich aus Deutschland, Frankreich und Italien) begünstigt;
- für die Bestimmung der Tragfähigkeit aus Versuchen (Grenztragfähigkeit oder zulässige Belastung) bestehen keine Vorschriften.

Die beiden vorstehenden Gründe sind übrigens keine besondere Eigentümlichkeit der Profilbleche; sie charakterisieren vielmehr die rasche Entwicklung dieses Bauelements von einer «Neuheit» zur «erprobten Technik». So findet man in der Schweiz in den von den Herstellern und den Importeuren herausgegebenen Dokumentationen Querschnittswerte und Belastungstabellen, die auf sehr unterschiedlichen Bestimmungsarten beruhen, z. B.:

- Berechnung mit Hilfe der Norm SIA 161 [2],
- Berechnung mit Hilfe ausländischer Normen,
- Festlegung aufgrund von Versuchen, die nach in den einzelnen Ländern unterschiedlichen Richtlinien durchgeführt wurden,
- uneinheitlichen Sicherheitskonzepten,
- uneinheitlichen Bruchkriterien,
- uneinheitlichen Kriterien für die zulässigen Durchbiegungen usw.

Bild 3. Ermittlung des Tragwiderstands bei Biegebeanspruchung. a) Massgebende Druckspannung. b) Plastische Reserve im zugbeanspruchten Teil des Querschnitts.



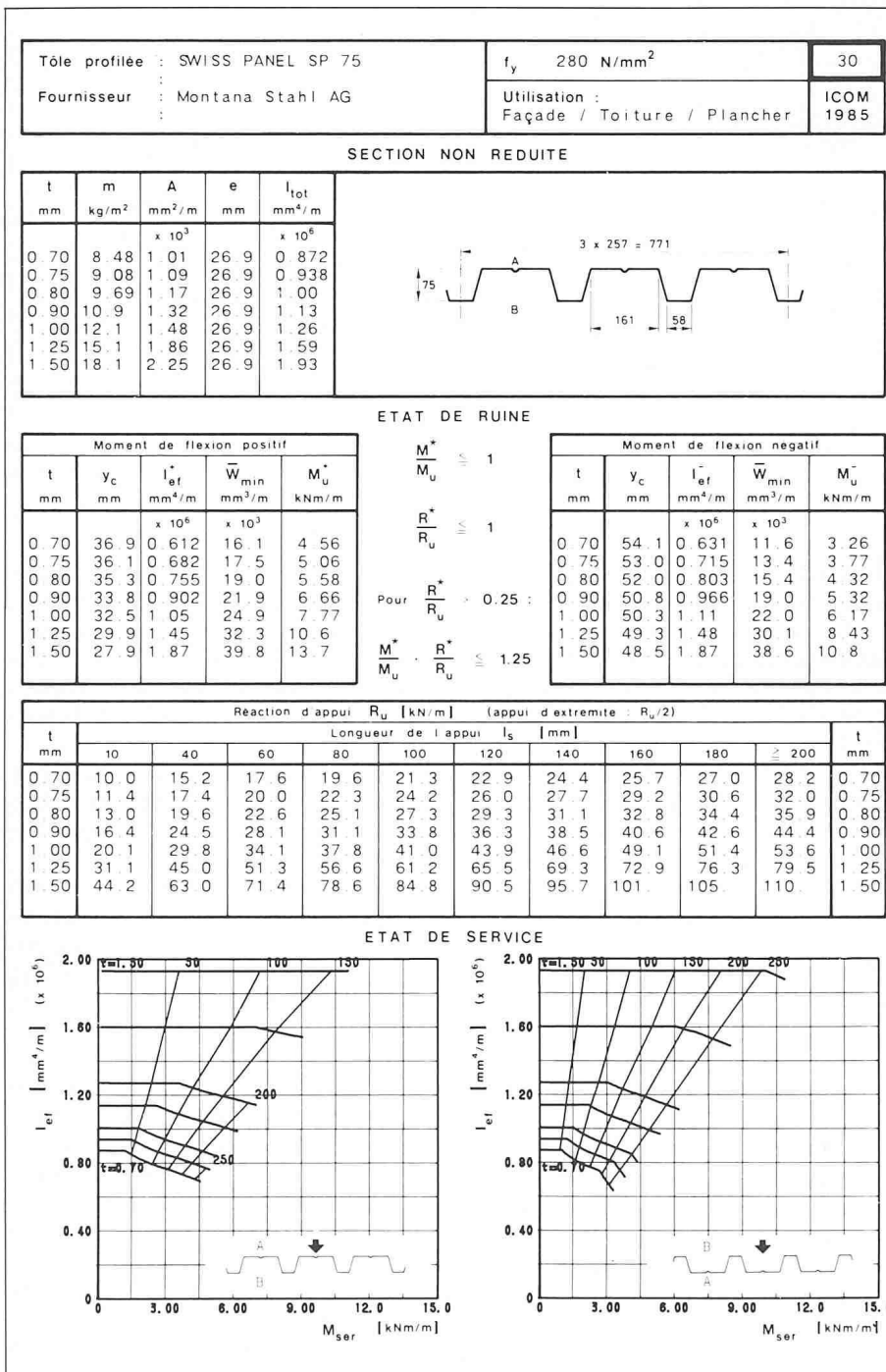
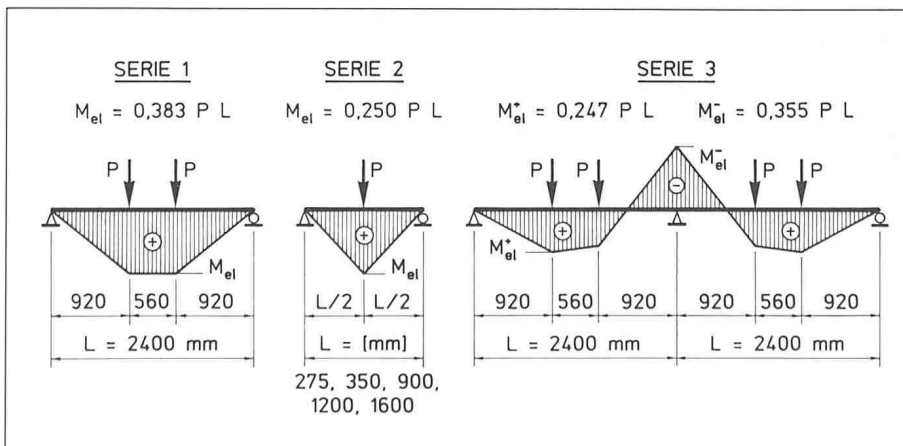


Bild 4. Verkleinerte Darstellung einer in [3] enthaltenen Tabelle der Kennwerte des Profils «Swiss Panel SP75».

Bild 5. Statische Systeme und Momentenlinie der drei Versuchsserien.



Für den Ingenieur, der für das Tragwerk verantwortlich ist, und der die in den Normen geforderten Nachweise durchführen muss, ist die Auswahl des «besten» Produkts keine einfache Angelegenheit. Er verfügt nur über unzureichende Informationen über die Produkte; die Berechnungsmethoden sind aufwendig und kompliziert und die Durchführung von Versuchen kann überhaupt nicht in Betracht gezogen werden. Die Auswahl erfolgt deshalb immer auf der Grundlage der Dokumentation der Hersteller.

Die Schweizerische Zentralstelle für Stahlbau (SZS) wurde auf dieses Problem aufmerksam und beauftragte eine Unterkommission mit dessen Lösung. Diese aus Vertretern der Hersteller, Importeure, projektierenden Ingenieure, Stahlbauunternehmen und Technischen Hochschulen zusammengesetzte Kommission kam zu dem Schluss, dass die Veröffentlichung von Belastungstabellen für sämtliche in der Schweiz lieferbaren Profilbleche aus finanziellen und kommerziellen Gründen nicht möglich ist. Sie hat sich schliesslich für die Veröffentlichung von charakteristischen Querschnittstabellen entschieden, die auf der Grundlage der allgemein anerkannten Berechnungsmethode der Europäischen Empfehlungen ermittelt wurden. Eine entsprechende von den Herstellern und Importeuren finanzierte und von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne herausgegebene Veröffentlichung «Les tôles profilées» [3] ist im März 1986 erschienen.

Diese in erster Linie für den in der Praxis tätigen Ingenieur bestimmte Veröffentlichung umfasst fünf Kapitel:

1. Allgemeine Angaben

Dieser Abschnitt enthält Angaben über die Werkstoffnormen, die Herstellung und die Befestigung der Bleche.

2. Charakteristische Querschnittswerte von Profilblechen

Der Abschnitt enthält auszugsweise die Empfehlungen der Europäischen Konvention für Stahlbau für die Berechnungen von Profilblechen [1]. Er betrifft hauptsächlich die Methode für die Berechnung von biege- und schubbeanspruchten Querschnitten.

3. Liste und Tabellen der Profilbleche

In diesem Abschnitt sind die meisten (49) der in der Schweiz lieferbaren Fassade-, Dach- und Deckenbleche aufgeführt. Er enthält auch 49 Tabellen mit den berechneten Querschnittswerten, die der Ingenieur für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit und

im Gebrauchszustand benötigt. Im Bild 4 ist eine dieser Tabellen verkleinert dargestellt.

4. Bemessung von Profilblechen

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsmethode, die anzusetzenden Belastungen und die von den SIA-Normen verlangten Nachweise behandelt.

5. Beispiele

Der Abschnitt enthält Beispiele für die Berechnung der Querschnittswerte von Profilblechen und für die Bemessung von Fassaden-, Dach- und Deckenblechen.

Die Tabellen des Kapitels 3 wurden mit Hilfe eines Computerprogramms berechnet, das auf der Methode der Europäischen Empfehlungen [1] beruht. Sie enthalten somit Rechenwerte der Tragfähigkeit von Profilblechquerschnitten bei Biege- und Schubbeanspruchung. Sie enthalten jedoch keine Tragfähigkeitswerte für aus Profilblechen gebildete Tragsysteme in Form von zulässigen oder Grenzbelastungen. Zur Bestimmung dieser Lasten gibt es zwei Möglichkeiten:

- Durchführung von Belastungsversuchen, deren Ergebnisse unter Beachtung des für das übrige Tragwerk verwendeten Sicherheitskonzeptes zu interpretieren sind;
- Dimensionierung mit Hilfe der in der Norm SIA 161 (1979) [2] verlangten Nachweise und unter Verwendung der berechneten Werte [3] für die Tragfähigkeit bei Biege- und Schubbeanspruchung.

Wie bereits erwähnt ist die erste Möglichkeit nicht realistisch und zu kostspielig. Von den Verfassern der Veröffentlichung [3] wird deshalb zum jetzigen Zeitpunkt die zweite der vorstehenden Möglichkeiten empfohlen. Das im Anhang angegebene Rechenbeispiel zeigt, wie die verschiedenen in der Norm SIA 161 verlangten Nachweise mit Hilfe der in der Veröffentlichung [3] enthaltenen Werte für eine Dachplatte geführt werden. Aus den Ergebnissen lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die vom Hersteller angegebene zulässige Belastung ist höher als die mit der vorgeschlagenen Methode berechnete, und dies obwohl die vom Hersteller angegebene Stahlqualität ($f_y = 235 \text{ N/mm}^2$) geringer als die in der Veröffentlichung des ICOM (Institut de la Construction métallique, EPFL) vorgesehene ($f_y = 280 \text{ N/mm}^2$) ist;
- das massgebende Kriterium für die Bemessung nach der vorgeschlagenen Methode ist die Interaktion zwischen dem negativen Moment und

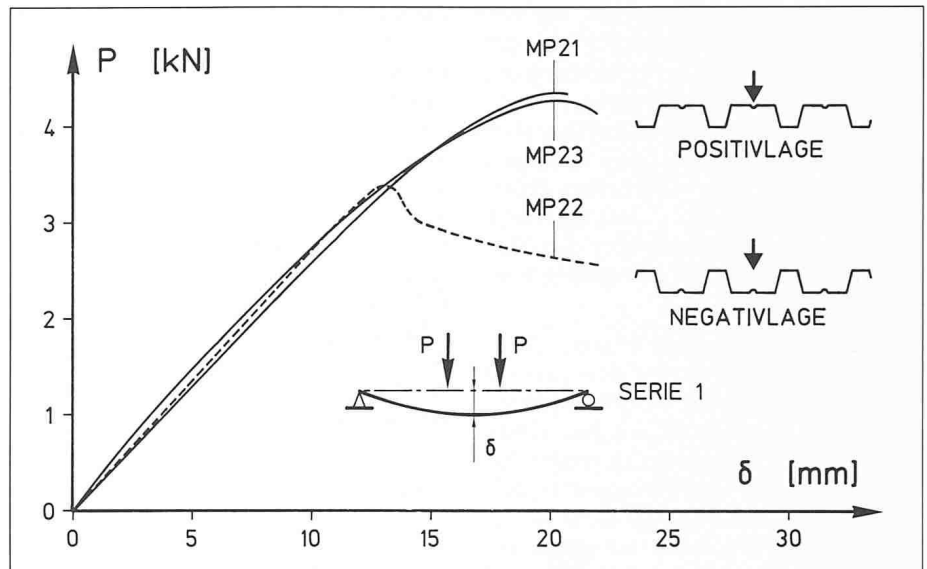


Bild 6. Gemessene Lastverformungskurven $P-\delta$ der Serie 1 (Blech SP 75-0,80).

Tabelle 1. Grösste Momente (Blech SP 75-0,80, Serie 1)

VERSUCH		P_{exp} für 1 Platte [kN]	M_{exp} für 1 Platte [kNm]	M_{exp} für 1 m [kNm/m]	M_u nach ICOM 157 [kNm/m]	M_u aus Messwerten berechnet [kNm/m]
POSITIVLAGE	MP21	4,38	4,03	Mittelwert 5,18	5,58	4,98
	MP23	4,30	3,96			
NEGATIVLAGE	MP22	3,41	3,14	4,07	4,32	4,36

der Reaktion beim ersten Zwischenauflager. Zur Erfüllung des Kriteriums ist es erforderlich, entweder die Stützweite auf 2,40 m zu begrenzen oder das Auflager auf 170 mm zu verbreitern oder die Blechdicke auf 0,90 mm zu erhöhen;

- der Nachweis für den Gebrauchszustand (Berechnung der Durchbiegungen) ist nicht massgebend.

Diese Feststellungen bestätigen die in einigen Forschungsarbeiten [4, 5] formulierte Vermutung, wonach bei als Durchlaufträger wirkenden kaltverformten Stahlblechen eine Momentenumlagerung stattfindet, die die Tragfähigkeit erhöht. Die Grösse der Momentenumlagerung kann zurzeit noch nicht angegeben werden, da die diesbezüglichen Arbeiten noch nicht abgeschlossen sind.

Vergleiche mit Versuchsergebnissen

Die kürzlich mit einem Blech «Swiss Panel SP 75-0,80» durchgeführten Versuche [6] erlauben gewisse Vergleiche zwischen der Europäischen Berechnungsmethode, den vom Hersteller an-

gegebenen zulässigen Belastungen und dem Verhalten im Versuch. Die Versuche wurden an den drei im Bild 5 dargestellten statischen Systemen durchgeführt. Mit der Serie 1 wurde die Biegetragfähigkeit ermittelt, Serie 2 diente zur Untersuchung des Verhaltens im Auflagerbereich und Serie 3 betraf einen Durchlaufträger mit zwei Spannweiten. Die folgenden Ergebnisse liegen vor:

Serie 1

Die Ergebnisse sind graphisch als Beziehung zwischen der Belastung und der grössten Durchbiegung dargestellt (Bild 6). Die Tabelle 1 enthält die grössten Momente, die in drei Versuchen bei reiner Biegung in Positiv- und Negativlage ermittelt wurden. Die Tabelle enthält auch die in der Veröffentlichung des ICOM angegebenen Werte sowie diejenigen, die mit der wirklichen Fließgrenze und den wirklichen Querschnittsabmessungen des Bleches berechnet wurden.

Bei positivem Biegemoment zeigen die beiden Versuchskörper sehr ähnliche Ergebnisse. Der mittlere Versuchswert ist infolge der gegenüber den Angaben des Herstellers geringeren Quer-

schnittsabmessungen kleiner als der mit Hilfe der Veröffentlichung des ICOM berechnete (Die Versteifung des druckbeanspruchten Flansches hat in Wirklichkeit nicht die vom Hersteller angegebenen Abmessungen). Hingegen ergibt die mit den wirklichen Querschnittsabmessungen durchgeführte Berechnung einen gegenüber den Versuchen – wie üblich – geringfügig kleineren Wert.

Bei Beanspruchung mit einem negativen Biegemoment ergibt der Versuch sowohl gegenüber der Veröffentlichung des ICOM als auch der mit den wirklichen Querschnittswerten durchgeführten Berechnung eine geringere Tragfähigkeit. Dies hat seine Ursache in der während des Versuchs aufgetretenen Instabilität, was sich auch im Verlauf der Kurve $P\delta$ (Bild 6, Kurve MP22) zeigt: Die äusseren Versteifungen sind seitlich nicht gehalten und kippen, bevor das grösste Moment erreicht ist. In der Berechnung kann diese Erscheinung nicht berücksichtigt werden, die in der Praxis bei einer Dacheindeckung mit seitlich überlappenden Blechtafeln auch nicht auftreten kann.

Die Serie 1 erlaubt mit Hilfe der $P\delta$ -Kurven die Ermittlung des Trägheitsmomentes des Versuchsbleches. In Tabelle 2 sind die Werte I_{exp} angegeben,

die sich bei einer vertikalen zu $L/300$ (8 mm) angenommenen Durchbiegung ergeben. Im Vergleich zu den in der Veröffentlichung des ICOM angegebenen Werten ist festzustellen, dass die Werte I_{exp} zwischen den berechneten Werten I_{tot} (Gesamtquerschnitt, $\sigma = 0$) und I_{ef} (abgeminderter Querschnitt, $\sigma = f_y = 280 \text{ N/mm}^2$) liegen. Die bei einer Durchbiegung von $L/300$ wirklich vorhandene Druckspannung beträgt bei positivem Moment etwa 80 N/mm^2 und bei negativem Moment rund 150 N/mm^2 (vgl. die Diagramme Bild 4, unten).

Serie 2

Diese Serie diente zur Untersuchung der Interaktion zwischen einem Biegemoment und einer Einzellast, die in das Profilblech mit Hilfe eines Stahlprofils eingeleitet wurde (Bild 7a). Die Ergebnisse sind im Bild 7b als Tabelle und im Bild 7c als Interaktionsdiagramm $M-R$ dargestellt. Es wird darauf hingewiesen, dass das Biegemoment am Rand des Stahlprofils und nicht in der Achse der Last angegeben ist. Die verschiedenen Versuchswerte M_{exp} und R_{exp} sind zusammen mit den berechneten Werten $M_u^+ = 5,58 \text{ kNm/m}$ und $R_u = 27,3 \text{ kN/m}$ dargestellt, die mit der Veröffentlichung des ICOM ermittelt wur-

den. Es zeigt sich, dass alle Versuchswerte ausserhalb der in den Europäischen Empfehlungen vorgeschlagenen Interaktionskurve liegen, die sich damit auf der sicheren Seite befindet (die bei der Bemessung gefundenen Werte müssen sich innerhalb der gebrochenen Geraden befinden). Der Punkt Δ stellt den Bemessungswert des im Anhang angegebenen Rechenbeispiels dar. Es befindet sich ausserhalb der gebrochenen Geraden, d. h. auf der unsicheren Seite. Im Vergleich zu den Versuchen liegt dieser Punkt etwa auf der Mittellinie der Versuchsergebnisse.

Serie 3

In der Serie 3 wurde ein Durchlaufträger mit zwei Spannweiten im Hinblick auf die im Vergleich mit Serie 1 und mit den Europäischen Empfehlungen mögliche Momentenumlagerung untersucht. Die Ergebnisse sind als Belastungs-Durchbiegungskurve in Feldmitte dargestellt (Bild 8). Ausserdem sind in diesem Bild die Ergebnisse der Serie 1, die mit konstantem, mitwirkendem, theoretischem Trägheitsmoment (I_{ef}) berechneten Geraden ($P\delta$) und die mit den Europäischen Empfehlungen berechneten Grenzwerte der Tragfähigkeit enthalten.

Diese Vergleiche ergeben folgende Feststellungen: Der Übergang von einem Einfeldträger zu einem Durchlaufträger mit zwei Feldern führt zu einer Erhöhung der Bruchlast von $3,41 \text{ kN}$ auf $5,56 \text{ kN}$, wobei die bei der grössten Last gemessene vertikale Durchbiegung in beiden Fällen etwa gleich gross ist ($\delta \approx 12 \text{ mm}$, entsprechend $L/200$). Es ist auch festzustellen, dass sich die theoretischen Bruchlasten (bei elastischer Berechnung mit den Europäischen Empfehlungen) nur wenig voneinander unterscheiden ($3,62 \text{ kN}$ bzw. $3,84 \text{ kN}$). Im theoretischen Gebrauchszustand (bei Belastungen von $2,26 \text{ kN}$ bzw. $2,40 \text{ kN}$) ist dagegen die Durchbiegung des Einfeldträgers ($\delta = 8,2 \text{ mm}$) 2,2mal grösser als diejenige des Durchlaufträgers ($\delta = 3,7 \text{ mm}$).

Die effektive Umlagerung des Stützmomentes, die für die Erhöhung der Tragfähigkeit massgebend ist, kann durch den Koeffizienten:

$$(4) \quad \alpha = \frac{P_{exp} - P_{th}}{P_{th}}$$

definiert werden.

Darin ist P_{exp} die im Versuch ermittelte Traglast ($P_{exp} = 5,56 \text{ kN}$) und P_{th} die mit den Europäischen Empfehlungen unter Berücksichtigung der Interaktion $M-R$ beim Auflager berechnete theoretische

VERSUCH		I_{exp} [$10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$]	I_{tot} [$10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$]	I_{ef} [$10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$]	I_{ef} [$10^6 \text{ mm}^4/\text{m}$]
POSITIVLAGE	MP21	0,858	$\sigma = 0$	$\sigma = f_y$	$\sigma \approx 80 \text{ N/mm}^2$
	MP23	0,931	1,000	0,775	0,94
NEGATIVLAGE	MP22	0,913	1,000	0,803	$\sigma \approx 150 \text{ N/mm}^2$ 0,91

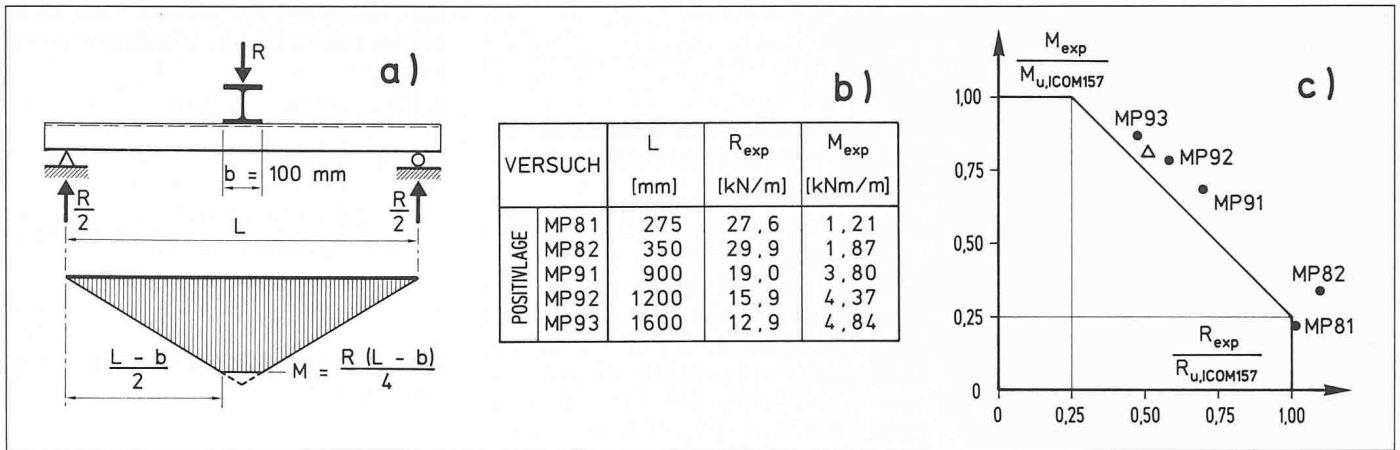
Bemerkung: Das vom Lieferanten für das Profilblech SP 75 – 0,80 angegebene Trägheitsmoment beträgt $1,193 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$.

Tabelle 2. Trägheitsmomente (Blech SP 75–0,80, Serie 1, Durchbiegung $L/300$).

Tabelle 3. Gleichmässig verteilte zulässige Belastungen mit oder ohne Momentenumlagerung (Zweifeldträger, Sicherheitsfaktor 1,6, Auflagerlänge 100 mm).

SWISS PANEL SP 75 – 0,80	POSITIVLAGE			NEGATIVLAGE		
Spannweite [mm]	2500	3000	3500	2500	3000	3500
zulässige Belastung ohne Momentenumlagerung (nach EK5 [1, 3]) [kN/m ²]	2,64	1,96	1,51	3,07	2,30	1,79
zulässige Belastung mit Momentenumlagerung (nach Tsai [6, 8, 9]) [kN/m ²]	3,15*	2,26*	1,69*	3,66	2,65	2,00
zulässige Belastung nach Angaben des Lieferanten [kN/m ²]	3,45	2,87	2,19	—	—	—

* : Es wird vorausgesetzt, dass der Umlagerungskoeffizient die gleiche Grösse wie bei Negativlage des Bleches hat.

Bild 7. Versuche der Serie 2. a) Statisches System, b) Versuchsergebnisse, c) Interaktionsdiagramm M - R .

Traglast. Im Falle des Profilbleches «Swiss Panel SP 75-0,80» ergibt sich $P_{th} = 3,84 \text{ kN}$. Dabei gilt:

$$(5) \quad \frac{M_{th}}{M_u} + \frac{R_{th}}{R_u} = \frac{0,355 \cdot 3,84 \cdot 2,4}{0,771 \cdot 5,58} + \frac{2,71 \cdot 3,84}{0,771 \cdot 27,3} = 0,76 + 0,49 = 1,25.$$

Der aus Versuchen ermittelte Umlagekoeffizient ergibt sich damit zu:

$$(6) \quad \alpha = \frac{5,56 - 3,84}{3,84} = 0,45.$$

Somit hat das als Durchlaufträger wirkende Profilblech (Bild 5c) eine um 45% höhere Traglast als der Einfeldträger gleicher Spannweite. Gegenwärtig wird am ICOM eine Berechnungsmethode zur Bestimmung der Koeffizienten α [7, 8] entwickelt, die sowohl auf Versuchen als auch auf Berechnungen basiert.

Der in der Praxis tätige Ingenieur interessiert sich in erster Linie für die zulässige Belastung des von ihm auszuwählenden Bleches. Ein Vergleich der zulässigen Belastungen des am ICOM untersuchten Profilbleches «Swiss Panel SP 75-0,80 mm» [6] mit dem im Anhang aufgeführten Rechenbeispiel ist deshalb von Nutzen. So sind in der Tabelle 3 die zulässigen Belastungen dieses als gleichmässig belasteter Zweifeldträger mit 100 mm breiten Auflagern wirkenden Bleches für drei verschiedene Spannweiten und nach drei verschiedenen Rechenverfahren dargestellt.

Folgendes ist festzustellen:

- Durch die Momentenumlagerung erhöht sich die Tragfähigkeit als Funktion der Spannweite zwischen 12 und 19%,
- die von den Herstellern angegebenen Werte sind zwischen 31 und 71% höher als die nach den Europäischen Empfehlungen berechneten und 10 bis 30% höher als die mit der semi-analytischen Methode und Momentenumlagerung berechneten.

Die Erklärung der Unterschiede zu den von den Herstellern angegebenen Werten bietet aus den folgenden Gründen einige Schwierigkeiten:

- Es sind keine weiteren Versuche über das vom ICOM getestete Profilblech bekannt;
- die von den Herstellern angegebenen Querschnittswerte enthalten keine Abminderungen (siehe Tabelle 2);
- in der Dokumentation des Herstellers sind die Fließgrenze des Stahls und der Sicherheitsfaktor mit der angegebenen zulässigen Spannung nicht kompatibel.

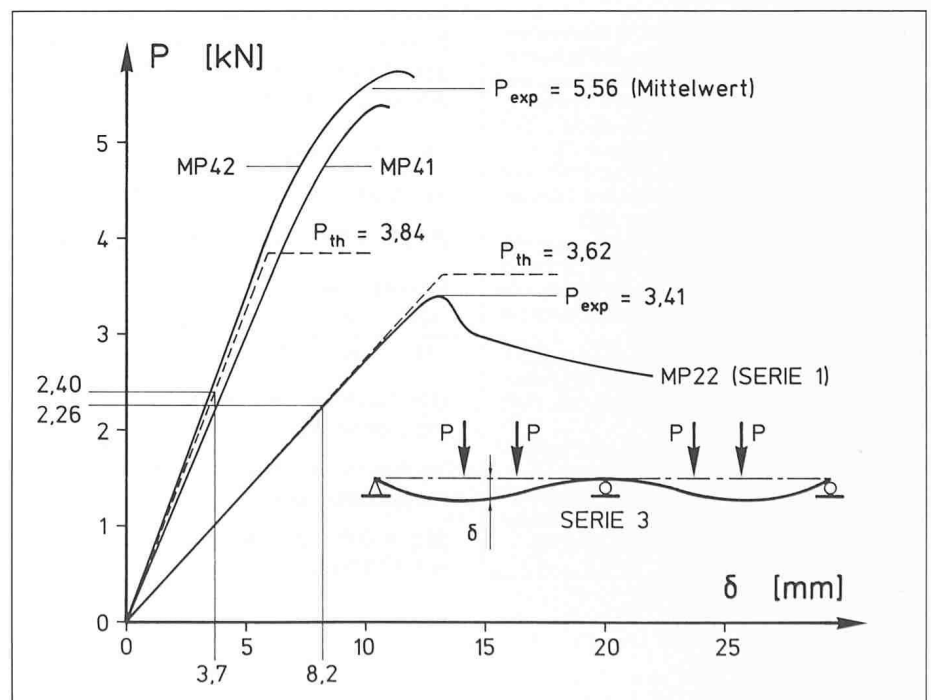
Zusammenfassung

Die hier dargestellten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten stellen zwei für

die Berechnung von Profilblechen wesentliche Punkte heraus:

- Die mit der in den Europäischen Empfehlungen vorgeschlagenen Berechnungsmethode erhaltenen Werte liegen sehr nahe bei den Versuchsergebnissen von Blechen, die als Einfeldträger wirken;
- für durchlaufende Bleche mit zwei und mehr Spannweiten erhöht sich die Tragfähigkeit infolge der in den Europäischen Empfehlungen nicht erlaubten Momentenumlagerung beträchtlich.

Die Hersteller von Profilblechen kennen natürlich das günstige Tragverhalten von über mehrere Felder durchlaufenden Blechen. Sie bevorzugen daher um so mehr die Ermittlung der zulässigen Belastungen durch Versuche als durch Berechnungen. Die nach den gegenwärtig gültigen Regeln, z. B. der

Bild 8. Gemessene Lastverformungskurven P - δ der Serie 3 (Negativlage). Vergleich mit der elastischen Berechnung ohne Momentenumlagerung (P_{th}) und den Ergebnissen des Einfeldträgers (Versuch MP22, Serie 1, Negativlage).

Veröffentlichung des ICOM [3] durchgeführten Berechnungen erlauben jedoch Vergleiche zwischen den Produkten verschiedener Hersteller, wie auch die Überbrückung des Mangels an Versuchsergebnissen und schliesslich vor allem auch die Entwicklung von neuen Blechprofilen.

Mit dem Abschluss des ersten Teils der am ICOM durchgeführten Arbeiten werden den projektierenden Ingenieuren die berechneten Werte der meisten in der Schweiz lieferbaren Bleche zur Verfügung gestellt. Die Fortsetzung dieser Arbeiten besteht in der Ausarbeitung einer semi-empirischen oder besser noch rein analytischen Methode zur Berechnung des Umlagerungskoeffizienten dieser Bleche für beliebige statische Systeme, Spannweiten, Belastungen und Auflagerbedingungen.

Adresse des Verfassers: M. Crisinel, dipl. Ing. EPFL/SIA, Institut de Statique et Structures, ICOM - Construction métallique, Ecole polytechnique fédérale, 1015 Lausanne.

Übersetzung aus dem Französischen: C. Notheisen, dipl. Ing. SIA.

Anhang

Beispiel für die bei der Bemessung einer Dachplatte durchzuführenden Nachweise.

Gegeben ist ein durchlaufendes Blech mit 5 Auflagern (4 gleiche Spannweiten von 2500 mm). Das Blech trägt eine aus Wärmedämmschicht, Abdichtung und Kiessand bestehende Dacheindeckung (Gesamtgewicht einschliesslich des Bleches 1700 N/m²). Die Schneelast beträgt 1560 N/m² (Höhe 600 m ü. Meer). Die Auflager des Bleches (Pfetten) bestehen aus Profilen IPE 240 (Flanschbreite 120 mm).

Die gleichmässig verteilte Belastung für den Tragfähigkeitsnachweis ergibt sich wie folgt:

$$p = (1700 + 1560) \text{ 1 m} = 3260 \text{ N/m} = 3,26 \text{ kN/m}.$$

Multipliziert mit dem Sicherheitsfaktor:

- Grösstes positives Moment (Randfeld):

$$M^{+*} = \gamma \cdot 0,077 \cdot p \cdot L^2 = 1,6 \cdot 0,077 \cdot 3,26 \cdot 2,5^2 = 2,51 \text{ kNm/m},$$

- Grösstes negatives Moment (erstes Zwischenaufleger):

$$M^{-*} = \gamma \cdot 0,107 \cdot p \cdot L^2 = 1,6 \cdot 0,107 \cdot 3,26 \cdot 2,5^2 = 3,49 \text{ kNm/m},$$

- Grösste Auflagerreaktion (erstes Zwischenaufleger):

$$R^* = \gamma \cdot 1,143 \cdot p \cdot L = 1,6 \cdot 1,143 \cdot 3,26 \cdot 2,5 = 14,0 \text{ kN/m}.$$

Es wird z. B. das Profil «Swiss Panel SP 75», Dicke 0,80 mm, Stahl: $f_y = 280 \text{ N/mm}^2$ gewählt. Die Dokumentation des Herstellers (Montana Stahl AG) gibt eine zulässige Belastung von 3,77 kN/m² für einen Stahl Fe 360 ($f_y = 235 \text{ N/mm}^2$) an. Mit den Nachweisen nach den Europäischen Empfehlungen ergibt sich (siehe Bild 4):

$$M^{+*} = 2,51 \text{ kNm/m} < M_{u1}^+ = 5,58 \text{ kNm/m}.$$

$$M^{-*} = 3,49 \text{ kNm/m} < M_{u2}^- = 4,32 \text{ kNm/m}.$$

$$R^* = 14,9 \text{ kN/m} < R_u = 29,3 \text{ kN/m}.$$

Interaktion:

$$\frac{M^{+*}}{M_{u1}^+} + \frac{R^*}{R_u} = \frac{3,49}{4,32} + \frac{14,9}{29,3} = 1,32 > 1,25.$$

Der Nachweis der Interaktion ist somit nicht erbracht.

Nachweis der Durchbiegung nach der vorgeschlagenen Methode:

$$M_{ser}^+ = 0,077 \cdot p \cdot L^2 = 0,077 \cdot 3,26 \cdot 2,5^2 = 1,57 \text{ kNm/m}.$$

Das entsprechende Trägheitsmoment beträgt (siehe Bild 4, Diagramm unten links):

$$I_{ef} \approx I_{tot} = 1,00 \cdot 10^6 \text{ mm}^4/\text{m},$$

$$\delta_{max} = \frac{2,5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E I_{ef}} =$$

$$= \frac{2,5 \cdot 3,26 \cdot 2500^4}{384 \cdot 210\,000 \cdot 1,0 \cdot 10^6} = 3,9 \text{ mm},$$

$$\delta_{max} < \delta_{adm} = \frac{L}{300} = 8,3 \text{ mm}.$$

Die Durchbiegung ist somit nicht massgebend.

Les tôles profilées (Profilbleche)

Michel Crisinel, Yung-Min Tsai, Michael J. Fidler. Veröffentlichung ICOM 157 (in französischer Sprache, März 1986, Format A4, 108 Seiten, broschiert, 49 Tabellen, 21 Figuren. Preis Fr. 20.-).

Bezug: Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Vente des cours, 1015 Lausanne. Tél. 021/47 21 80.

Ergebnisse der Arbeit einer Unterkommission der Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau (SZS) in Zusammenarbeit mit den Schweizer Fabrikanten und Importeuren von Profilblechen. Die Studie gibt in Tabellenform die nach den EKS-Methoden berechneten Querschnittswerte der meisten in der Schweiz lieferbaren Profilbleche. Sie enthält ferner einen Auszug der «Europäische Empfehlungen zur Berechnung von Profilblechen», eine mit diesen Empfehlungen und den SIA-Normen verträgliche Bemessungsmethode sowie Zahlenbeispiele. Diese Veröffentlichung ersetzt die Dokumentationen der Fabrikanten nicht, sie hilft aber dem Ingenieur, die einzelnen Produkte miteinander zu vergleichen und die nach den Normen verlangten Nachweise zu führen.

Der Autor dankt Herrn Yung-Min Tsai, Doktorand am ICOM, für die Ausarbeitung des Rechenprogrammes für Profilbleche. Herr Tsai setzt die begonnenen Arbeiten mit der Untersuchung des Umlagerungskoeffizienten im Rahmen seiner Doktorarbeit fort. Der Autor dankt allen Mitarbeitern des ICOM, die an den Versuchen und an der Publikation «Les tôles profilées» gearbeitet haben. Seine Anerkennung gilt ebenfalls den Herstellern von Profilblechen, für die kostenlose Lieferung der für die Versuche benötigten Bleche (Dr. Ing. Koenig AG, Montana Stahl AG und Profilmont AG).

Er dankt besonders der Schweizerischen Zentralstelle für Stahlbau (SZS), den Herstellern und Importeuren von Profilblechen (Cofrastra AG/SA, Dr. Ing. Koenig AG, Montana Stahl AG und Charles Nell SA) für die finanzielle Unterstützung, die die Entwicklung des Rechenprogrammes und die Veröffentlichung der Broschüre «Les tôles profilées» ermöglicht hat.

Literatur

- [1] ECCS. European Recommendations for Steel Construction: The Design of Profiled Sheeting. Croydon (GB), Constrado, 1984 (Publication ECCS no 40).
- [2] Norm SIA 161. Stahlbauten. Zürich, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), 1979.
- [3] Crisinel, M., Tsai, Y.-M., Fidler, M. J. Les tôles profilées. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 1986 (Publication ICOM 157).
- [4] Unger, B. Ein Beitrag zur Ermittlung der Traglast von querbelasteten Durchlaufträgern mit dünnwandigem Querschnitt, insbesondere von durchlaufenden Trapezblechen für Dach- und Geschossdecken. Der Stahlbau, Berlin, 42 (1973) H. 1, S. 20-24.
- [5] Bryan, E. R., Leach, P. Design of profiled sheeting as permanent formwork. London, CIRIA, 1984 (Technical Note 116).
- [6] Tsai, Y.-M. Comportement sur appui des tôles minces profilées en acier formé à froid. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, ICOM (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [7] Tsai, Y.-M., Crisinel, M. Moment redistribution in continuous profiled steel sheeting. IABSE reports, vol. 49, Zurich, 1986, pp. 107-144.
- [8] Tsai, Y.-M., Crisinel, M. Moment redistribution in profiled sheeting. Eighth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures, University of Missouri - Rolla (USA), November 11-12, 1986.