

GRISPE PLUS



VALORISATION OF KNOWLEDGE
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

WP Nr.: 3

WP Titel: E-Lectures

Deliverable Nr.: 3.1 (4)

Titel: Bemessungsregeln

Datum: 30. Juni 2018

**Das GRISPE PLUS Projekt wurde vom Forschungsfonds der
Europäischen Gemeinschaft für Kohle und Stahl (RFCS)
im Rahmen der Förderungsvereinbarung Nr. 754092 unterstützt**

Autor(en)

*Walter SALVATORE, Silvia CAPRILI, Irene PUNCELLO
Universität Pisa – Institut für Bau- und Wirtschaftsingenieurwesen*

Zeichnungshistorie

ABSCHLIESSENDE ENTWURF – DATUM: 15. Juli 2018

ENDFASSUNG – DATUM: 15. Juli 2018

Verbreitungsgrad

PU	öffentlich	X
PP	Beschränkt auf die Kommissionsdienststellen, die Technischen Gruppen Kohle und Stahl und das Europäische Komitee für Normung (CEN).	
RE	Beschränkt auf eine von den Begünstigten angegebene Gruppe	
CO	Vertraulich, nur für Begünstigte (einschließlich der Kommissionsdienststellen)	



BEMESSUNGSREGEL FÜR BOMBIERTE PROFILE

**Unterstützt durch RFCS – Förderungsvereinbarung
Nr. 754092**

ENDFASSUNG

Disclaimer notice and EU acknowledgement of support

Disclaimer notice

By making use of any information or content in this manual you agree to the following:

No warranties

All the information or content provided in this manual is provided "as is" and with no warranties. No express or implies warranties of any type, including for example implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, are made with respect to the information or content, or any use of the information or content in this manual.

The authors make no representations or extend no warranties of any type as to the completeness, accuracy, reliability, suitability or timeliness of any information or content in this manual.

Disclaimer of liability

This manual is for informational purposes only. It is your responsibility to independently determine whether to perform, use or adopt any of the information or content in this manual.

The authors specifically disclaim liability for incidental or consequential damages and assume no responsibility or liability for any loss or damage suffered by any person because of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

The authors will not be liable to you for any loss or damage including without limitation direct, indirect, special or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from loss of data or loss of business, production, revenue, income, profits, commercial opportunities, reputation or goodwill, arising out of, or in connection with, the use of the information or content in this manual.

The authors do not represent, warrant, undertake or guarantee that the use of the information or content in this manual will lead to any particular outcome or results.

Reasonableness

By using this manual, you agree that the exclusions and limitations of liability set out in this disclaimer are reasonable. If you do not think they are reasonable, you must not use this manual.

Severability

If any part of this disclaimer is declared unenforceable or invalid, the remainder will continue to be valid and enforceable.

"The information and views set out in this/these manual/guidelines are those of the authors and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information or views contained therein"

EU acknowledgement of support

The GRISPE Plus project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement No. 754092.

ZUSAMMENFASSUNG

Ziel dieser Bemessungsregeln ist es, ein neues Bemessungsverfahren für bombierte Profile vorzustellen, welche in dem europäischen Projekt GRISPE PLUS basierend auf den vorher erzielten Ergebnissen in dem gelungenen bereits abgeschlossenen Projekt GRISPE entwickelt wurden.

Die Regeln basieren auf den Grundsätzen des Eurocodes im Allgemeinen und den Eurocodes EN 1993-1-3 und EN 1993-1-5 im Besonderen.

Dieses neue Bemessungsverfahren für bombierte Profile basiert auf Versuchen, die im Rahmen des europäischen GRISPE-Projekts (2013-2016) durchgeführt wurden.

Der Hintergrund dieses Verfahrens ist in Anhang 1 beschrieben.

Dies bedeutet genauer:

Kapitel 1 beschreibt die Art der Profile, den Stand der Technik, die wichtigsten Forschungsergebnisse von GRISPE und die allgemeinen Bemessungsanforderungen und -regeln (Stand der Technik und Einleitung).

Kapitel 2 beschreibt die Vorbemessungen, die während der Entwurfsphase zu berücksichtigen waren, einschließlich der Überlegungen hinsichtlich der Überprüfung im Anwendungsfeld der neuen Bemessungsregeln.

Kapitel 3 gibt die minimalen technischen Anforderungen, die eingehalten werden müssen an, einschließlich Unterkonstruktion, Profileigenschaften und Montage.

Kapitel 4 gibt die Materialeigenschaften der Profile und Verbindungselemente an.

Kapitel 5 berücksichtigt die bei der Bemessung zu betrachtenden Einwirkungen (Eigengewicht, usw.) und deren Lastfallkombinationen.

Kapitel 6 erklärt detailliert das vorgeschlagene Bemessungsverfahren (Grundsätze, Anwendungsfeld und Beschreibung, wie die neuen Formeln eingesetzt werden).

Kapitel 7 berücksichtigt besondere Bemessungsbetrachtungen (Feuer, Erdbeben, Umweltaspekte, thermische und akustische Aspekte), die nicht von den Regeln abgedeckt werden.

Kapitel 8 enthält ein Bemessungsbeispiel.

Ein Literaturverzeichnis ist enthalten.

WICHTIGE ANMERKUNG

Die experimentellen Daten wurden durch Rainer Holz, IFL – ING LEICHTBAU und Daniel Ruff sowie Christian Fauth, KIT -KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE gewonnen und zur Verfügung gestellt.

VORWORT

Diese Bemessungsregeln wurden mit Unterstützung der RFCS-Förderung Nr. 754092 erstellt.

Diese neue Bemessungsmethode wurde in der Evolutionsgruppe der EN 1993-1-3 in den Jahren 2016-2017 vorgestellt und wird für die Aufnahme in die Eurocodes in Betracht gezogen.

Diese Bemessungsregeln wurde von Walter Salvatore, Silvia Caprili und Irene Puncello basierend auf den experimentellen Daten und Überlegungen, welche bereits in dem abgeschlossenen Forschungsprojekt GRISPE getätigt wurden, verfasst; die Bemessungsregeln wurden in einer GRISPE PLUS Arbeitsgruppe diskutiert, die sich aus folgenden Mitgliedern zusammensetzt:

Mickaël BLANC	Frankreich
Silvia CAPRILI	Italien
David IZABEL	Frankreich
Markus KUHNENNE	Deutschland
Anna PALISSON	Frankreich
Valérie PRUDOR	Frankreich
Irene PUNCELLO	Italien
Dominik PYSCHNY	Deutschland
Thibaut RENAUX	Frankreich
Walter SALVATORE	Italien
Daniel SPAGNI	Frankreich

Korrespondierende Mitglieder mit einbezogen:

Léopold SOKOL	Frankreich
---------------	------------

ABBILDUNGEN AND TABELLEN

Die Abbildungen und Tabellen wurden durch die folgenden Firmen/Quellen erstellt:

Abbildung 1.1.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.1.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.1.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.1.4	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.1.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.3.1	Internetquelle https://en.wikipedia.org/wiki/File:Roll_forming.png
Abbildung 1.3.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.3.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.3.4	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.3.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 1.3.6	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 6.3.2.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 6.3.2.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 8.1.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 8.1.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 8.1.2.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Abbildung 8.1.2.2	Entnommen aus SAP 2000 Software
Abbildung 8.1.2.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Tabelle 1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Tabelle 2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt
Tabelle 3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE Projekt

Inhaltsverzeichnis

UMFANG DER VERÖFFENTLICHUNG	11
BEZEICHNUNGEN.....	12
1. EINLEITUNG	13
1.1. Art der betrachteten profilierten Stahlbleche.....	13
1.2. Stand der Technik vor dem Forschungsprojekt GRISPE	14
1.3. Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojekts GRISPE	14
1.4. Allgemeine Bemessungsanforderungen und -regeln	19
2. VORBEMESSUNG.....	19
2.1. Anwendungsfeld des neuen Bemessungsverfahrens	19
3. TECHNISCHE GRUNDLAGEN	19
3.1. Anforderungen bezüglich der profilierten Bleche und CE-Kennzeichnung ..	19
4. MATERIALEIGENSCHAFTEN	20
4.1. Stahlbleche	20
5. EINWIRKUNGEN UND LASTFALLKOMBINATIONEN	20
6. BEMESSUNGSGRUNDLAGE	20
6.1. Grundlagen	20
6.2. Anwendungsfeld des neuen Bemessungsverfahrens.....	20
6.3. Bemessungsverfahren	21
7. BESONDERE BEMESSUNGSBETRACHTUNGEN	26
7.1. In diesen Bemessungsregeln nicht behandelte Sachverhalte.....	26
8. BEMESSUNGSBEISPIEL.....	26
8.1. Erklärung des Bemessungsverfahrens.....	26
9. LITERATURVERZEICHNIS	35

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1.1.1 - Bombiertes Profil durch Kaltformen (Variante A).....	13
Abbildung 1.1.2 - Bombiertes Profil durch Brechen des inneren Flansches (Variante B)..	13
Abbildung 1.1.3 - Bombiertes Profil durch Biegung auf der Baustelle (Variante C).	13
Abbildung 1.1.4 - Querschnitt des sinusförmigen Profils.....	14
Abbildung 1.1.5 - Querschnitt des trapezförmigen Profils.	14
Abbildung 1.3.1 - Kaltformungsprozess.	15
Abbildung 1.3.2 - Parameter der bombierten Profile.	16
Abbildung 1.3.3 - Versuchsaufbau der Einfeldträger-Versuche.	17
Abbildung 1.3.4 - Foto des Versuchsaufbaus der Einfeldträger-Versuche.....	17
Abbildung 1.3.5 - Darstellung des Versuchsaufbaus der Einfeldträger-Versuche (Profil 18/76).	18
Abbildung 1.3.6 - Foto des Versuchsaufbaus des Einfeldträger-Versuchs mit horizontaler Lagerung (Profil 39/333).	18
Abbildung 6.3.2.1 - Beispiel für ein einfaches Modell mit horizontaler Feder (Quelle: Rainer Holts – Projekt GRISPE).	23
Abbildung 6.3.2.2 - Knicklänge gemäß DIN 18 800 - 2.	25
Abbildung 8.1.1 - Ausführung als Einfeldträger ohne horizontale Lager.	26
Abbildung 8.1.2 - Ausführung als Einfeldträger mit horizontalen Lagern.....	27
Abbildung 8.1.2.1 - Geometrische Abmessungen des Modells.....	29
Abbildung 8.1.2.2 - Beispiel des einfachen Modells mit horizontalen Federn.	31
Abbildung 8.1.2.3 - Knicklängenkoeffizient b aus DIN 18800-2.....	32

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1 - Durchgeführte Versuche.	16
Tabelle 2 - Repräsentative Durchbiegung in Feldmitte bei charakteristischem Lastniveau $F_{u,k}$.	24
Tabelle 3 - Schnittgrößen und Durchbiegungen des Bogens unter charakteristischer Versagenslast	30

UMFANG DER VERÖFFENTLICHUNG

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, das neue Bemessungsverfahren für bombierte Profile vorzustellen, das zur Aufnahme in den Eurocode EN 1993-1-3 vorgeschlagen wurde.

Diese Bemessungsregeln befassen sich mit aktuellen Situationen.

Für spezielle Sachverhalte (z.B. Öffnung) oder für Ausnahmesituationen (Erdbeben, Feuer, usw.) sind die entsprechenden Bestimmungen der Eurocodes und/oder EN 1090-4 zu beachten.

BEZEICHNUNGEN

Die folgenden Symbole werden nachfolgend verwendet:

t_N	Bemessungsdicke
R	Krümmungsradius
b	Bogenlänge
L	Spannweite
f	Höhe
β	Knicklängenbeiwert
α [°]	Krümmungswinkel
N_D	Bemessungswert der Drucknormalkraft
M	Bemessungswert des Biegemoments
M_d	Bemessungswiderstand des Biegemoments
N_{dD}	Bemessungswiderstand der Drucknormalkraft
$\max N_{dD}$	ideale Knicklast
$ult N_{dD}$	kritische Knicklast
α	Schlankheitsgrad
L_{cr}	Knicklänge
i_{ef}	Flächenträgheitsradius des effektiven Querschnitts
σ_{cd}	Bemessungsdruckspannung
A_{ef}	effektive Querschnittsfläche für axialen Druck
σ_{elg}	Eulersche Druckspannung für den Bruttoquerschnitt
A_g	Bruttoquerschnittsfläche
$M_{c,RK,F}$	charakteristisches Biegemoment im Feld
$F_{u,k}$	charakteristische Last
b_v	Breite des Prüfkörpers
L_v	Spannweite
L	Länge des Prüfkörpers
s	halbe Länge des Bogens
g	Eigengewicht des Prüfkörpers
f_{max}	vertikale Durchbiegung in Feldmitte
F_u	Versagenslast
$C_{f,i}$	Gesamtsteifigkeit der Probe
C_f	Mittelwert aller Versuche derselben Teilversuchsreihe, die als repräsentativ für eine Gruppe angesehen werden
f_{eq}	äquivalente vertikale Durchbiegung in Feldmitte, repräsentativ für eine Serie
C_{ind}	Federsteifigkeit für die Horizontallagerung
f_{yk}	charakteristische Streckgrenze

1. EINLEITUNG

1.1. Art der betrachteten profilierten Stahlbleche

Diese Bemessungsregel behandelt bombierte Profile aus Stahl.

Im Allgemeinen kann diese Profilart durch drei verschiedene Krümmungsprozesse bombiert werden:

- Kaltformen (siehe Abbildung 1.1.1)
- Brechen des inneren Gurtes (siehe Abbildung 1.1.2)
- In situ Biegeverfahren (siehe Abbildung 1.1.3)

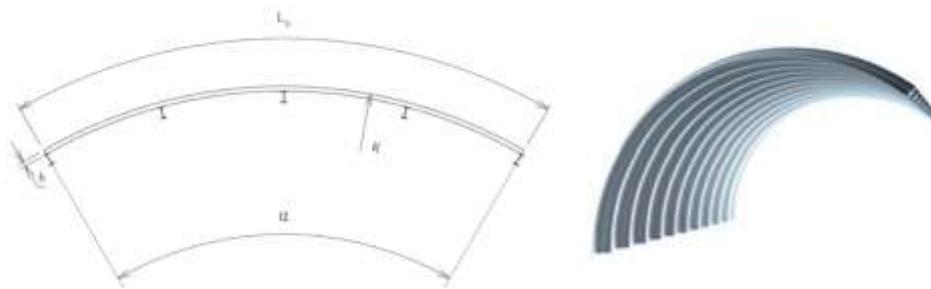


Abbildung 1.1.1 - Bombiertes Profil durch Kaltformen (Variante A).

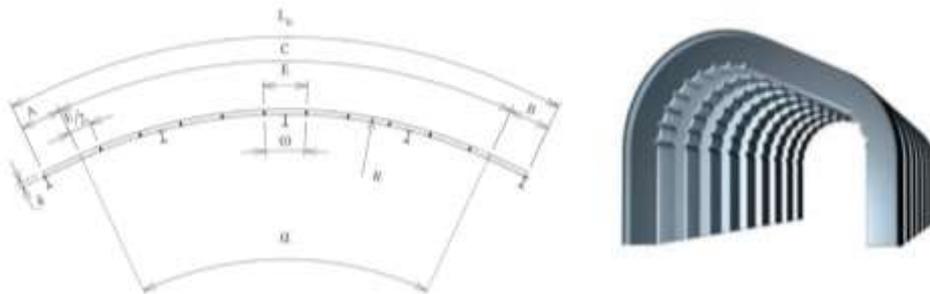


Abbildung 1.1.2 - Bombiertes Profil durch Brechen des inneren Gurtes (Variante B).

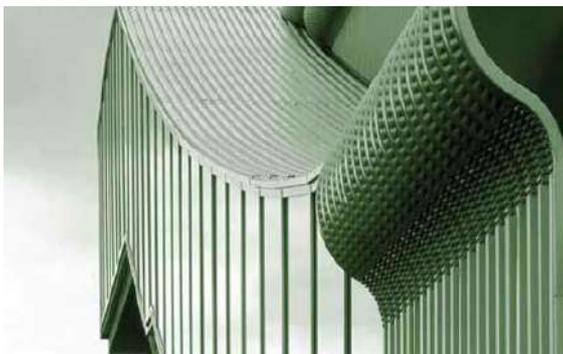


Abbildung 1.1.3 - Bombiertes Profil durch Biegung auf der Baustelle (Variante C).

In der aktuellen Bemessungsregel wird nur das Tragverhalten von **bombierten Profilen, welche durch ein gleichmäßiges Kaltverformungsverfahren (Variante A)** erzeugt wurden, analysiert. Das Tragverhalten muss mit Bezug auf die Tragfähigkeit des entsprechenden ebenen Profils ausgewertet werden.

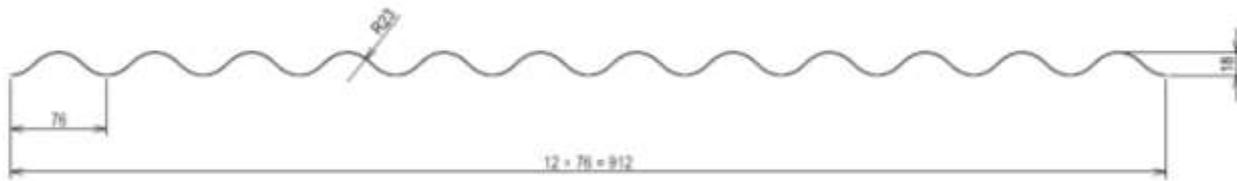


Abbildung 1.1.4 - Querschnitt des sinusförmigen Profils.

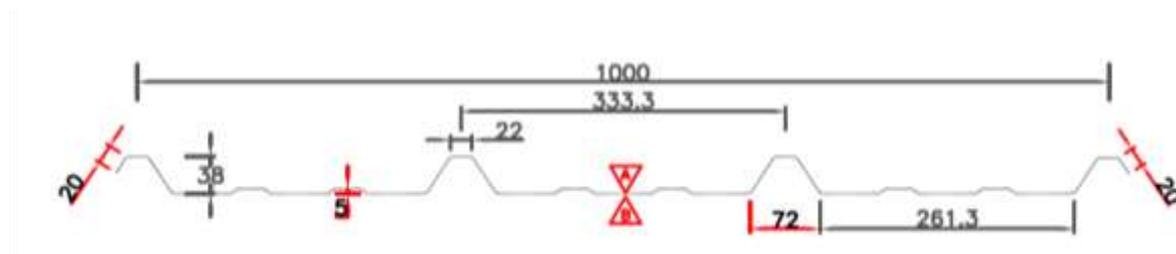


Abbildung 1.1.5 - Querschnitt des trapezförmigen Profils.

1.2. Stand der Technik vor dem Forschungsprojekt GRISPE

Die Momententragfähigkeit der durch das Brechen des inneren Gurtes erzeugten Profile (Variante B) ist nicht relevant für die Ziele des Forschungsprojekts GRISPE, da die so gewonnenen Profile normalerweise mit kurzen Spannweiten in Verbindung gebracht werden.

Währenddessen können die durch das 'In Situ Biegeverfahren' (Variante C) erzeugten Profile gemäß EN 1993-1:2005 für flache Profile einfach bemessen werden, da der Biegeradius sehr groß ist. Für diese wird keine Veränderung der Tragfähigkeit, verglichen mit herkömmlichen Profilen, erwartet.

Diese Bemessungsregel konzentriert sich, wie zuvor erwähnt, auf durch Kaltverformung hergestellte Profile (Variante A).

Der Einfluss von Eigenspannungen aus der Herstellung wurde in der Vergangenheit im Forschungszentrum für Stahl, Holz und Mauerwerk in Deutschland durch die Durchführung einer umfassenden experimentellen Versuchsreihe überprüft. Es wurden eine Vielzahl an Tests gemäß DIN 18807-2 an bombierten Trapezprofilen von verschiedenen Herstellern durchgeführt. Der Biegeradius variierte zwischen 4 m und 19 m und die Lagerung in den Versuchen war gelenkig. Der gemessene Unterschied hinsichtlich der Biegetragfähigkeit zwischen einem ebenen Profil und einem bombierten Profil betrug zwischen null und zehn Prozent.

Die in der aktuellen wissenschaftlichen Literatur angegebenen Daten weisen auf eine Variation der Biegetragfähigkeit von bombierten Profilen bezüglich ebenen Profilen um 20% (schmäler Gurt unter Druck) bis 30% (breiter Gurt unter Druck) hin [1].

Anzumerken ist, dass wenn beide Lager eingespannt sind die Biegetheorie nicht länger anwendbar ist, da sich die Profile wie ein Bogen verhalten.

1.3. Wesentliche Ergebnisse des Forschungsprojekts GRISPE

Wie zuvor beschrieben, befasst sich die Studie hauptsächlich mit den durch einen Biege-/Kaltverformungsprozess bombierten Profilen. Das Kaltverformungsverfahren beinhaltet die gleichmäßige Biegung eines langen Streifens des Metalls (gängiger Weise aufgerollter Stahl) zum gewünschten Querschnitt. Der Streifen durchläuft eine Reihe von Walzen, die auf aufeinanderfolgenden Halterungen montiert sind, wobei jede Reihe nur einen sehr kleinen Teil der Biegung durchführt, bis der gewünschte Querschnitt (Profil) erreicht ist. Dieses Verfahren wird zur Herstellung gleichmäßig

profilerter Abschnitte mit großen Längen und in hohen Stückzahlen verwendet. Eine einfache Darstellung des Vorgangs ist in der nachfolgenden Abbildung 1.3.1 dargestellt.

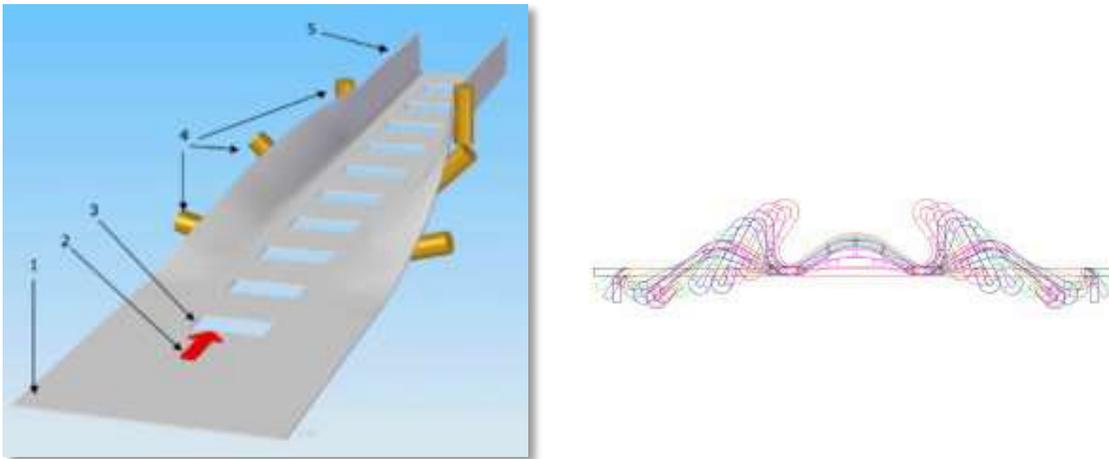


Abbildung 1.3.1 - Kaltumformungsprozess.

Die kaltgeformten Abschnitte bieten einige Vorteile gegenüber der durch Strangpressen hergestellten Abschnitte: Die Komponenten können aufgrund der Verformung im kalten Zustand leichter, mit dünneren Wänden und stärker sein. Zudem ist der Kaltumformungsprozess schneller als das Strangpressverfahren.

Die Wirkungen des Verfahrens auf die Materialeigenschaften sind minimal. Die physischen und chemischen Eigenschaften verändern sich nahezu nicht, aber der Vorgang kann eine Verfestigung, Mikrorisse oder eine Verdünnung an den Knickstellen verursachen, was bei der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften des Materials beachtet werden muss.

Im Projekt GRISPE wurde die Modifikation des Tragverhaltens (Tragfähigkeit) des erzeugten bombierten Profils gegenüber den ebenen Profilen für unterschiedliche Biegeradien untersucht (die entstehenden plastischen Verformungen in den Randfasern des Querschnitts können die Tragfähigkeit verändern).

Im Rahmen des Projekts GRISPE wurde ein umfassendes Versuchsprogramm zur Bestimmung der Tragfähigkeit von bombierten Profilen unter Biegung für verschiedene Biegeradien bestimmt. Zwei verschiedene Profilquerschnitte wurden geprüft: durch Bacacier zur Verfügung gestellte **sinusförmige Profile** (Profil 18/76) siehe Abbildung 1.1.4 und von Arcelor Mittal construction France zur Verfügung gestellte **trapezförmige Profile** mit Aussteifungen (Profil 39/333) siehe Abbildung 1.1.5. Für jede Profilform wurden Profile der Nennblechdicken 0,63 und 1,0 mm vorgesehen.

Es wurden zwei verschiedene Ausführungen für die Durchführung der experimentellen Prüfungen ausgewählt, angepasst an die Analyse des Tragverhaltens der bombierten Profile nur unter Biegeeinwirkung und im Zustand von kombinierter Biegung mit Normalkräften.

In der folgenden Tabelle 1 sind die durchgeführten Versuche zusammengefasst.

Abbildung 1.3.2 erklärt die Parameter eines bombierten Profils.

Type of test	Profile	R [m]	b [mm]	Span L [mm]	s [mm]	f [mm]	α [°]	Number of tests
Single span positive bending test	18/76 $t_w = 0.63$ mm	∞	2200	2000	2200	0	0	3
		20.0	2201			30	6.31	2
		10.0	2204			61	12.63	2
		4.0	2229			154	31.92	2
	18/76 $t_w = 1.00$ mm	∞	3200	3000	3200	0	0	1
		20.0	3203			64	9.18	4
		10.0	3214			129	18.41	3
		4.0	3292			334	47.16	3
	39/333 $t_w = 0.63$ mm	∞	3200	3000	3200	0	0	3
		20.0	3203			64	9.18	2
		10.0	3214			129	18.41	2
		6.0	3239			217	30.93	3
	39/333 $t_w = 1.00$ mm	∞	4200	4000	4200	0	0	2
		20.0	4208			111	12.05	2
		10.0	4232			223	24.24	2
		6.0	4291			380	40.98	2
Single span positive bending test with horizontal support	39/333 $t_w = 0.63$ mm	6.0	3239	3000	3200	217	30.93	2
		6.0	4291	4000	4200	380	40.97	3
		6.0	5300	5000	5129	576	50.61	3

Tabelle 1 - Durchgeführte Versuche.

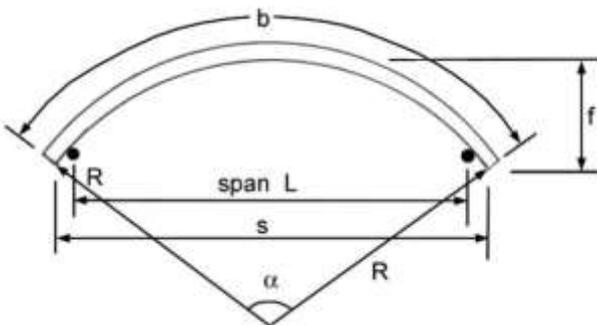


Abbildung 1.3.2 - Parameter der bombierten Profile.

In der ersten Ausführung (z.B. nur Biegeeinwirkungen), wurden das maximale Biegemoment und das effektive Flächenträgheitsmoment durch Belastungstests mit bombierten Blechen als Einfeldträger bestimmt, welche mit zwei oder vier vertikalen Linienlasten belastet wurden, um eine gleichmäßig verteilte Last abzubilden (siehe Abbildung 1.3.3 und Abbildung 1.3.4). Die Prüfkörper wurden auf Lagern befestigt, welche in horizontaler Richtung verschieblich waren. Daher konnten keine Normalkräfte im Scheitelpunkt der bombierten Probekörper auftreten, wo das Biegemoment maximal wird. Der Krümmungsradius wurde zur Analyse des Einflusses der inneren Spannungen und der Momententragfähigkeit auf das Profil variiert.

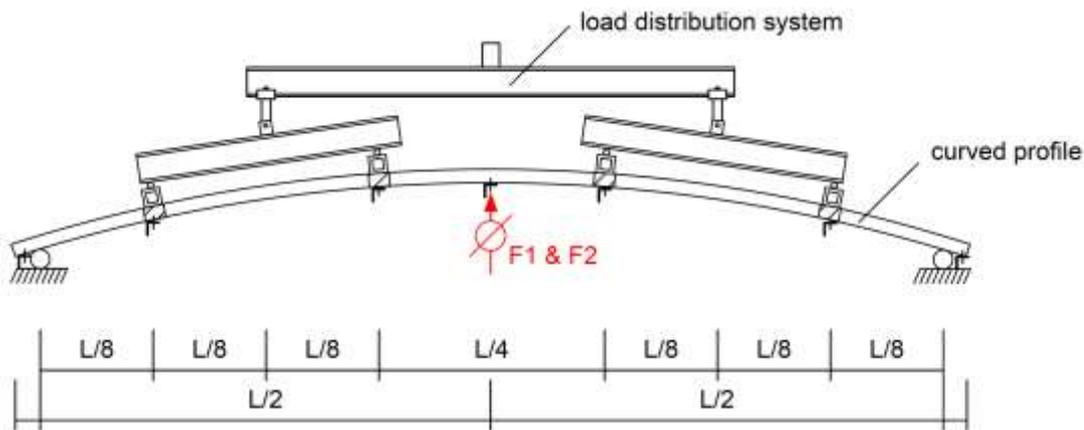


Abbildung 1.3.3 - Versuchsaufbau der Einfeldträger-Versuche.



Abbildung 1.3.4 - Foto des Versuchsaufbaus der Einfeldträger-Versuche.

In der zweiten Ausführung (z.B. Biegung und Normalkräfte) wurden die bombierten Profile auf den horizontal festgehaltenen Lagern angeordnet (siehe Abbildung 1.3.5 und Abbildung 1.3.6). Somit wirkten die Profile als ein Bogen und wurden durch Biegung und Drucknormalkräfte belastet. Diese Versuche wurden zur Überprüfung der in EN 1993-1-3 gegebenen Bemessungsformel für eine kombinierte Belastung aus Biegemoment und Drucknormalkraft durchgeführt. Da diese Formel für Trapezbleche gültig ist, wurden diese Versuche nicht mit dem sinusförmigen Profil ausgeführt. Durch Variation der Feldlänge der Probekörper wurden unterschiedliche Neigungen und dadurch mit verschiedenen Verhältnissen von Biegemoment zu Drucknormalkraft erzeugt.

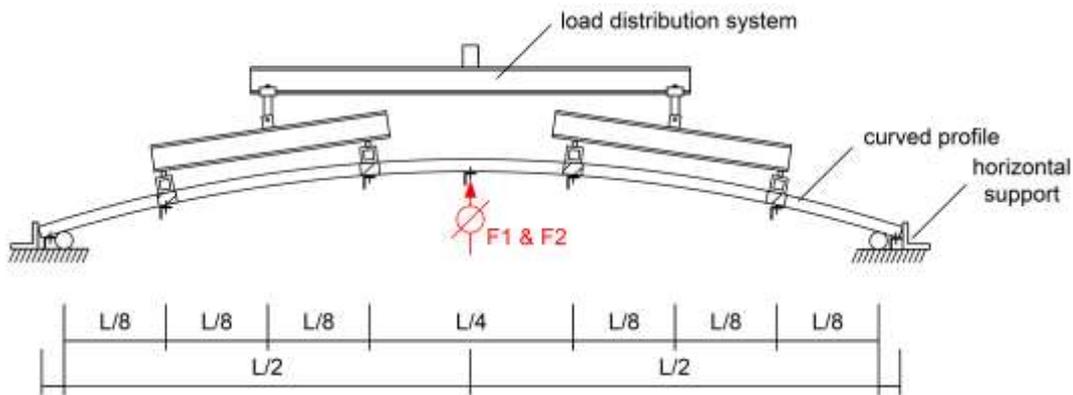


Abbildung 1.3.5 - Skizzierung des Versuchsaufbaus der Einfeldträger-Versuche mit horizontaler Lagerung (Profil 18/76).



Abbildung 1.3.6 - Foto des Versuchsaufbaus des Einfeldträger-Versuchs mit horizontaler Lagerung (Profil 39/333).

Basierend auf den Ergebnissen der experimentellen Prüfungen an den zuvor beschriebenen Probekörpern, wird für bombierte Profile mit reiner Biegeeinwirkung eine Reduktion der Momenten Tragfähigkeit um 10%, verglichen mit der ebenen Profile, vorgeschlagen.

Für die bombierten Profile mit horizontaler Lagerung (Bogenform: M+N) sind dagegen zusätzliche Überlegungen anzustellen, unter Berücksichtigung dessen, was sich aus den experimentellen Erkenntnissen ergab. Zunächst wurde festgestellt, dass der Einfluss der horizontalen Verschiebungen (in der weiteren Ausführung nicht zugelassen) auf der sicheren Seite nicht vernachlässigt werden kann: Aufgrund geringerer Schnittgrößen ergeben sich größere Verschiebungen. Daher muss das Bemessungsverfahren die vorhandene horizontale Lagerung direkt berücksichtigen, womit das entsprechende Tragsystem überbestimmt wird. Das folgende Bemessungsverfahren wird vorgeschlagen:

1. Die Schnittgrößen jedes Bogens (Biegemomente, Normalkräfte) müssen unter Verwendung der Bruttoquerschnittswerte A_g und I_g der profilierten Profile ausgewertet werden.
2. Die horizontale Verschiebung an den Auflagern kann nicht vernachlässigt werden. Umso größer die Verschiebung geschätzt wird, desto ungünstiger entwickeln sich die Schnittgrößen. Daher ist es notwendig die horizontale Verschiebung durch Modellierung des Lagers mit einer günstigen horizontalen Feder zu berücksichtigen. Die Federsteifigkeit, welche von der Unterkonstruktion und der Befestigung des profilierten Bleches abhängt, muss 'angepasst' werden, um die berechneten horizontalen Verschiebungen an die realen (experimentellen) Werte an-

zugleichen. Zur Vermeidung einer unsicheren Bemessung darf die Federsteifigkeit nicht überschätzt werden; eine Unterschätzung der Federsteifigkeit führt zu einer Überschätzung der horizontalen Verschiebungen und damit zu einer Bemessung auf der sicheren Seite.

3. Die Interaktion aus Biegemoment und Normaldruckkraft muss mit den Interaktionsformeln aus DIN 18807 berechnet werden, aber ohne Begrenzung von α auf 1.

1.4. Allgemeine Bemessungsanforderungen und -regeln

- (1) Die Bemessung muss in Übereinstimmung mit den allgemeinen Regeln aus EN 1993-1-1 durchgeführt werden.
- (2) Für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit müssen geeignete Teilsicherheitsbeiwerte gemäß EN 1993-1-3 angenommen werden.

2. VORBEMESSUNG

2.1. Anwendungsfeld des neuen Bemessungsverfahrens

Diese Regeln zeigen eine Bemessungsmethode zur Bestimmung der Festigkeit von bombierten Profilen.

Diese Regeln geben ein Bemessungsverfahren durch Berechnung an.

Diese Regeln decken nicht die Lastverteilungen für Lasten während Ausführung und Wartung ab.

Die in diesen Regeln gegebenen Berechnungsmethoden sind nur gültig, wenn die Grenzwerte der kaltgeformten Bauteile mit denen in EN 1993-1-3 übereinstimmen.

Die Berechnungsmethoden basieren auf der Ausarbeitung experimenteller Daten an den zuvor beschriebenen bombierten Probekörpern.

Das Bemessungsverfahren ist gültig für Profile, die während der Herstellung durch Biegung oder Kaltumformung bombiert wurden. Es ist nicht gültig für Profile, die durch Biegung während der Montage oder durch Brechen der inneren Flansche des Querschnitts bombiert wurden.

Der Steifigkeitsgrad Alpha darf nicht auf 1 begrenzt werden wie es in DIN 18807 für gerade Profile gefordert wird.

Die horizontale Verschiebung an den Lagern kann durch horizontale Federn modelliert werden. Die horizontale Verschiebung führt zu höheren Biegemomenten im Bogen. Die Federsteifigkeit muss der horizontalen Steifigkeit der Unterkonstruktion (eingeschlossen der Verformungen in der Befestigung des Bogenprofils) angepasst werden. Je kleiner die Federsteifigkeit ist, desto größer werden die Biegemomente; die Annahme der Federsteifigkeit auf der „schwachen“ Seite führt zu einer sicheren Bemessung.

3. TECHNISCHE GRUNDLAGEN

3.1. Anforderungen bezüglich der profilierten Bleche und CE-Kennzeichnung

Die Stahlprofile müssen gemäß der Norm EN 14782 (nicht-tragend) oder EN 1090-1 (tragend) eingestuft werden.

4. MATERIALEIGENSCHAFTEN

4.1. Stahlbleche

Wenn nicht weiter spezifiziert, müssen die in der Berechnung verwendeten Materialeigenschaften die in Abschnitt 3 von EN 1993-1-3 angegebenen Anforderungen erfüllen.

Die Toleranz der Profildicken muss die in EN 1993-1-3, Abschnitt 3.2.4 gegebenen Anforderungen erfüllen.

- Stahlkerndicke $t_{cor} = 0,58 \text{ mm}$
- Fließspannung $f_{y,k} = 408,3 \text{ N/mm}^2$

Abschnitt 8.1 beinhaltet genaue Informationen hinsichtlich der Profileigenschaften.

5. EINWIRKUNGEN UND LASTFALLKOMBINATIONEN

Die zu berücksichtigenden Einwirkungen und Lastfallkombinationen müssen bestimmt werden gemäß:

EN 1990 Eurocode 0: Grundlagen der Tragwerksplanung

EN 1991-1-1:2005 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-1: Allgemeine Einwirkungen auf Tragwerke - Wichten, Eigengewicht und Nutzlasten im Hochbau

EN 1991-1-3:2005 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-3: Allgemeine Einwirkungen, Schneelasten

EN 1991-1-6:2005 Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen, Einwirkungen während der Bauausführung

6. BEMESSUNGSGRUNDLAGE

6.1. Grundlagen

Das neue Bemessungsverfahren kann verwendet werden zur Bestimmung von:

- Biegesteifigkeit in Feldmitte, in der Variante des Einfeldträgers ohne horizontale Lagerung.
- M-N-Interaktion, in der Variante des Einfeldträgers mit horizontaler Lagerung.

Um diese Bemessungsregel anzuwenden, muss das Profil symmetrisch belastet werden.

6.2. Anwendungsfeld des neuen Bemessungsverfahrens

Das folgende Bemessungsverfahren kann zur Auswertung der Tragfähigkeit der bombierten Profile genutzt werden.

Während der im Projekt GRISPE durchgeführten experimentellen Überprüfungen, wurden Profile mit verschiedenen Dicken, Spannweiten und Krümmungsradien untersucht (entsprechend Tabelle 1).

Die Schnittkräfte des Bogens (Biegemomente, Normalkräfte) müssen unter Verwendung der Bruttoquerschnittswerte A_g und I_g der profilierten Profile berechnet werden.

Das Bemessungsmodell ist für Bögen mit symmetrischer Belastung nachgewiesen.

Die horizontale Verschiebung an den Auflagern kann nicht vernachlässigt werden.

Das Anwendungsfeld ist dasselbe wie für die in DIN 18807, Abschnitt 3, Punkt 3.3.6.1 gegebenen Interaktionsformeln.

6.3. Bemessungsverfahren

6.3.1. Ausführung als Einfeldträger ohne horizontale Lager: Berechnung der Momententragfähigkeit

Der Krümmungsvorgang durch Biegung oder Kaltverformung erzeugt plastische Verformungen in den Randfasern des Querschnitts. Dies führt zu Eigenspannungen im Querschnitt, welche die Biegetragfähigkeit des Querschnittes selbst beeinflussen können. Die Versuchsergebnisse haben wiederum gezeigt, dass der Einfluss sehr gering und zudem nicht gleichmäßig ist:

- Für Profile mit einer Dicke von 1,0 mm beeinflusst die Krümmung nicht die Momententragfähigkeit des bombierten Profils verglichen mit dem ebenen.
- Für Profile mit einer Dicke von 0,63 mm wird die Momententragfähigkeit durch die Anwendung einer Krümmung bei zwei Ausführungen beeinträchtigt:

- + 25 % für das sinusförmige Profil 18/76
- 15 % für das trapezförmige Profil 39/333

Unter Berücksichtigung dieses Verhaltens und bei Betrachtung einer geringen Empfindlichkeit der Momententragfähigkeit wird vorgeschlagen – konservativ – die Momententragfähigkeit des entsprechenden ebenen Profils um 10% abzumindern (siehe Gl. 6(1)). Dieser Abminderungsfaktor muss als ein zusätzlicher Sicherheitsbeiwert betrachtet werden, um die ungewisse Streuung abzudecken; es handelt sich nicht um einen mechanisch bedingten Koeffizienten.

$$M_{c,Rk,F}(\text{gekrümmtes Profil}) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(\text{ebenes Profil}) \quad \mathbf{6(1)}$$

6.3.2. Ausführung als Einfeldträger mit horizontalen Lagern: Berechnung der Momententragfähigkeit

Die Deutsche Norm DIN 18807 umfasst die Bemessungsregeln für Trapezbleche unter kombinierter Belastung aus Biegemomenten und Drucknormalkräften. Es wurde überprüft, ob dieses Vorgehen auch für bombierte Profile mit Bogenwirkung angewendet werden kann.

Wenn die Einwirkung aus einer Druckkraft und Biegung zusammengesetzt ist, kann die folgende Gleichung 6(2) angewendet werden:

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad \mathbf{6(2)}$$

Wobei gilt:

- N_D Bemessungswert der Druckkraft
- M Bemessungswert des Biegemoments

M_d Bemessungswiderstand des Biegemoments

N_{dD} Bemessungswiderstand der Druckkraft

Und der Schlankheitsgrad ist definiert zu:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{eff} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{y,k}}{E}} \quad \mathbf{6(3)}$$

Mit:

L_{cr} Knicklänge. Die Formel wird gängiger Weise akzeptiert seit sie zur Verfügung steht, zum Beispiel durch DIN 18800 Teil 2 (siehe Abbildung 6.3.2.2).

i_{ef} Trägheitsradius des effektiven Querschnitts

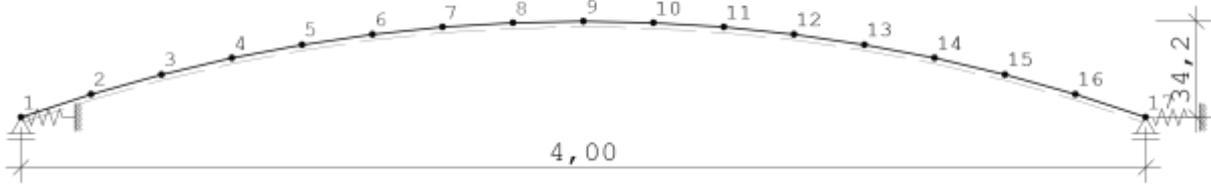
Im Allgemeinen ist bei der M-N-Interaktionsformel der Beiwert α auf 1 begrenzt, wenn $\alpha > 1$. Diese Begrenzung ist nicht gültig, wenn der Schlankheitsgrad α direkt zur Bestimmung der maximalen Druckspannung unter Berücksichtigung der Gesamtstabilität genutzt wird.

Nachfolgend wird das Vorgehen der DIN, das für eine kombinierte Belastung aus Biegemoment und Drucknormalkraft für den Fall von bombierten Profilen 'angepasst' wurde, Schritt für Schritt beschrieben.

1. Bestimmung der Schnittkräfte für den Bogen unter charakteristischer Versagenslast.

Dieser Schritt (1) kann durchgeführt werden, indem ein einfaches – auf den Ergebnissen der experimentellen Untersuchung basierendes – Modell erzeugt wird. Die Verifizierung erlaubt die Annahme einer repräsentativen Steifigkeit der horizontalen Federn, welche in Übereinstimmung mit den zwei Profilenden angeordnet werden (siehe Abbildung 6.3.2.1).

System scale 1 : 25



SECTION PROPERTIES

Cross-sect. No.	Profile Mat Name	I (cm4)	A (cm2)	A _q (cm2)	h (cm)	S top (cm3)	S bot (cm3)
1	1 Arcelor 3	9.77	6.58	0.000	0.00	0.000	0.000

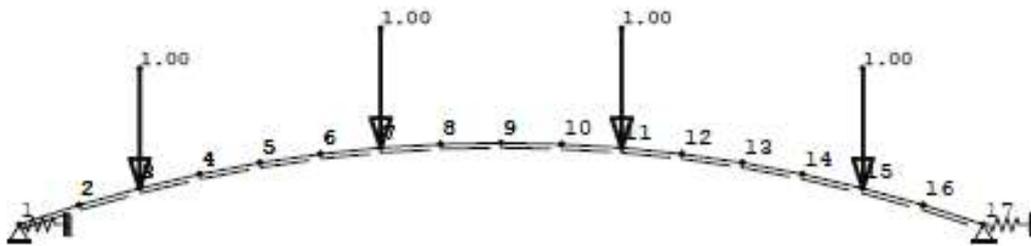


Abbildung 6.3.2.1 - Beispiel für ein einfaches Modell mit horizontaler Feder (Quelle: Rainer Holts – Projekt GRISPE).

Als Beispiel wird, unter Berücksichtigung der zuvor dargestellten experimentellen Daten, ein einfaches Modell als repräsentativ für die tragende Ausführung des bombierten Profils untersucht werden. Zur Vereinfachung kann der kreisförmige Bogen durch ein Polygon angenähert werden. Die zwei Endlager werden mit Federn in horizontaler Richtung ausgestattet, um die horizontalen Durchbiegungen zuzulassen und zu kontrollieren, während die Lager in vertikaler Richtung gehalten sind. Die charakteristische Versagenslast wird entsprechend der durchgeführten experimentellen Untersuchungen (zum Beispiel mit 4 gleichen vertikalen Linienlasten bei 0,125L – 0,25L – 0,25L – 0,25L – 0,125L) angeordnet und das Eigengewicht des Profils wird vernachlässigt. Somit muss für den Verifizierungsvorgang im Fall von verschiedenen Belastungssituationen das Modell entsprechend angepasst werden.

Die Berechnung der Schnittgrößen erfolgt für das System, welches die betrachtete Teilversuchsreihe unter der charakteristischen Versagenslast darstellt. Jede Teilversuchsreihe besteht aus mehreren identischen Versuchen mit verschiedenen einzelnen Versagenslasten und verschiedenen einzelnen Durchbiegungswerten. Aus den Versuchen muss ein gemeinsamer Durchbiegungswert bestimmt werden, welcher die gesamte Teilversuchsreihe abbildet: Dieser repräsentative Wert entspricht nicht direkt der Durchbiegung eines einzelnen Versuchs (zum Beispiel, kann es die mittlere Durchbiegung bei charakteristischer Versagenslast sein, wie im Folgenden angenommen). Natürlich kann unter Berücksichtigung der aus den vorherigen Versuchen entstandenen Ergebnisse das nachfolgende Vorgehen angewendet werden.

Für jeden i-ten Versuch erlauben die vertikale Durchbiegung in Feldmitte f_{max} und die zugehörige (Einzel-)Versagenslast F_u (Versuch) die Bestimmung eines einzelnen „Steifigkeitsparameters“, wie im Folgenden:

- Gesamtsteifigkeit des i-ten Probekörpers

$$C_{f,i} = F_u / f_{max} \quad \mathbf{6(4)}$$

- Mittelwert aller Versuche derselben Teilversuchsreihe, die als repräsentativ für diese Gruppe angesehen werden

$$C_f = \text{Mean} (C_{f,i}) \quad \mathbf{6(5)}$$

Unter Verwendung der Gesamtsteifigkeit der Gruppe (C_f) kann eine Durchbiegung in Feldmitte unter charakteristischer Versagenslast bestimmt werden, welche als repräsentativ für diese Gruppe angesehen wird.

Da die Schnittgrößen des Bogens je Breitereinheit berechnet werden, muss das Ergebnis mit der Breite des Probekörpers multipliziert werden.

$$f_{eq} = F_{u,k} / C_f * b_V \quad \mathbf{6(6)}$$

Bei Berechnung des Bogens mit einer Software, die zur Umsetzung des Modells verwendet wird, variiert die Federsteifigkeit der horizontalen Lager und bleibt schließlich bei einem Wert, für den die berechnete Durchbiegung in Feldmitte unter charakteristischer Versagenslast mit der Durchbiegung f_{eq} gemäß Tabelle 2 übereinstimmt. Die Federsteifigkeit des horizontalen Lagers entspricht dem zuvor beschriebenen Wert C_{ind} .

Nach der Verifizierung des Modells, basierend auf dem zuvor beschriebenen, ist eine Auswertung der Schnittgrößen möglich.

test no. SSP-H-39-...	F_u kN	deflection f_{max} at mid-span (mm)	L m	b_V m	overall stiffness specimen $C_{f,i}$ (kN/mm)	mean value stiffness C_f	repr. deflection (mm) for $F_{u,k}$, width 1 m
217-063-1	9,12	18,0	3,00	0,667	0,507	0,444	16,6
217-063-2	8,95	23,5	3,00	0,667	0,381		
380-063-1	9,49	17,6	4,00	0,667	0,539	0,589	14,4
380-063-2	11,43	19,2	4,00	0,667	0,595		
380-063-3	11,03	17,4	4,00	0,667	0,634		
576-063-1	5,67	23,6	5,00	0,667	0,240	0,329	13,4
576-063-2	5,17	14,1	5,00	0,667	0,367		
576-063-3	6,83	18,0	5,00	0,667	0,379		

Tabelle 2 - Repräsentative Durchbiegung in Feldmitte bei charakteristischer Versagenslast $F_{u,k}$.

2. Bestimmung der Knicklänge L_{cr}

Die Knicklänge eines kreisförmigen Bogens kann in der Literatur ermittelt werden, zum Beispiel in DIN 18800 Teil 2 (siehe Abbildung 6.3.2.1).

$$\text{Knicklänge } L_{cr} = s_K \quad =: s_K = \beta \cdot s_r$$

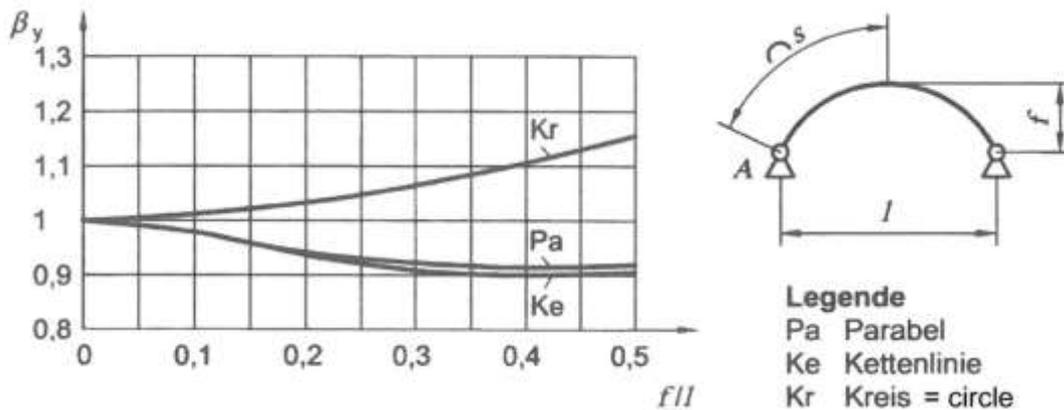


Abbildung 6.3.2.2 - Knicklänge gemäß DIN 18800 - 2.

3. Bestimmung des Bemessungswiderstands der Druckkraft N_{dD} .

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0,8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g) \quad \mathbf{6(7)}$$

Wobei gilt:

- σ_{cd} Bemessungsdruckspannung
- A_{ef} effektive Querschnittsfläche für axialen Druck
- σ_{elg} Eulersche Druckspannung für den Bruttoquerschnitt
- A_g Bruttoquerschnittsfläche

4. Berechnung der M-N-Interaktion, nach DIN 18807

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad \mathbf{6(8)}$$

Wobei gilt:

- N_D Bemessungswert der Druckkraft
- M Bemessungswert des Biegemoments
- M_d Bemessungswiderstand des Biegemoments
- N_{dD} Bemessungswiderstand der Druckkraft

Gemäß DIN 18807 muss der zuvor in Gleichung 6(3) definierte Schlankheitsgrad auf 1 begrenzt werden.

Basierend auf den Ergebnissen von GRISPE wird ein modifiziertes Vorgehen der DIN ohne die Begrenzung von α auf den Wert 1 vorgeschlagen; dadurch sind die erzielten Werte geringfügig konservativer als die durch das reine DIN-Verfahren erhaltenen Werte.

Die Durchführung des Verfahrens erfolgte unter symmetrischer Belastung.

7. BESONDERE BEMESSUNGSBETRACHTUNGEN

7.1. In diesen Bemessungsregeln nicht behandelte Sachverhalte

Die folgenden Themen werden nicht durch diese Bemessungsregeln abgedeckt:

- Feuer: Es sollten die nationalen Bestimmungen in Übereinstimmung mit EN 1991-1-2 und EN 1993-1-2 herangezogen werden.
- Erdbeben: Es sollten die nationalen Bestimmungen in Übereinstimmung mit EN 1998-1 herangezogen werden.
- Umweltaspekte: Es sollten die nationalen Bestimmungen herangezogen werden.
- thermische Berechnungen: Es sollten die nationalen Bestimmungen in Übereinstimmung mit EN 1991-1-5 herangezogen werden.
- akustische Berechnungen: Es sollten die nationalen Bestimmungen herangezogen werden.

Und dies gilt außerdem für alle anderen nicht eindeutig als höher oder niedriger eingestuften Themen.

8. BEMESSUNGSBEISPIEL

8.1. Erklärung des Bemessungsverfahrens

Das vorgestellte Bemessungsverfahren erlaubt die Berechnung der Momententragfähigkeit im Feld für ein bombiertes Profil, welches durch den auf ein ebenes Blech angewendeten Kaltumformvorgang erzeugt wurde. Es werden zwei verschiedene Ausführungsvarianten berücksichtigt:

- Einfeldträger ohne horizontale Lagerungen (Spannungen des Profils entstehen nur durch das Biegemoment), siehe Abbildung 8.1.1.
- Einfeldträger mit horizontalen Lagerungen (Spannungen des Profils entstehen durch eine Kombination aus Biegemoment und Normalkräften), siehe Abbildung 8.1.2.

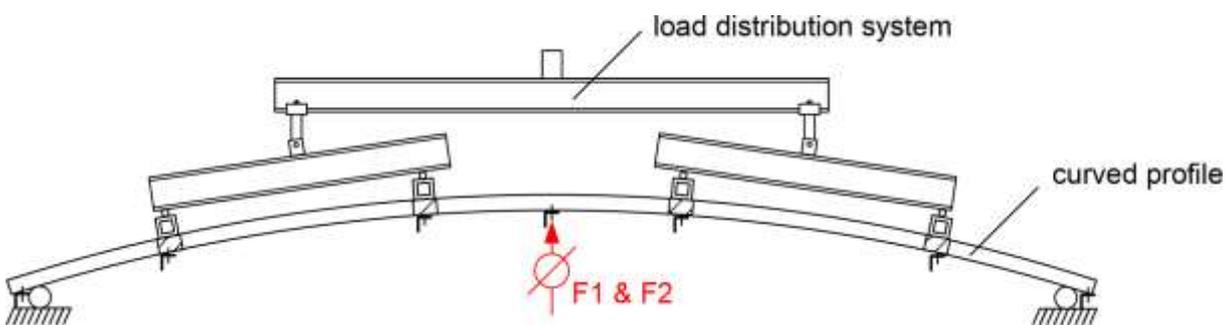


Abbildung 8.1.1 - Ausführung als Einfeldträger ohne horizontale Lager.

8.1.1. Einfeldträger ohne horizontale Auflager

Für den Fall des Einfeldträgers *ohne* horizontale Lagerungen, entstehen aus der Belastung Biegung und Querkräfte im Profil; Normalkräfte sind wiederum vernachlässigbar.

Die Last wird durch 4 Linienlasten bei 0,125L – 0,25L – 0,25L – 0,25L – 0,125L angesetzt und ist aufgrund des isostatischen Lastverteilungssystems bei allen 4 Linienlasten gleich.

Gemäß dem Vorschlag in GRISPE konnte die Tragfähigkeit der bombierten Profile auf Grundlage der experimentellen Versuchsreihe zu 90 % der Tragfähigkeit der entsprechenden ebenen Profile bestimmt werden.

Das maximale Biegemoment im Feld eines ebenen Profils konnte unter Verwendung der folgenden Gleichung ausgewertet werden:

$$M_{c,Rk,F} = \frac{F_{u,k}}{b_v} \cdot \frac{L}{8} + g \cdot L_v \cdot [2L - L_v]/8$$

Wobei gilt:

$M_{c,Rk,F}$: charakteristisches Biegemoment im Feld (kNm/m)

$F_{u,k}$: charakteristische Last in kN (inklusive Vorspannung)

b_v : Breite des Probekörpers

L_v : Länge des Probekörpers

L : Feldlänge (hier: $L = 2,00$ oder $3,00$ oder $4,00$ m)

g : Eigengewicht des Profils

Gemäß den zuvor genannten Eigenschaften des Beispiel-Profils, können die folgenden Werte für das 'originale' ebene Profil gewonnen werden:

$$M_{c,Rk,F} = \frac{12,77}{1} \cdot \frac{4}{8} + 0,095 \cdot 4,20 \cdot [2 \cdot 4 - 4,20]/8 = 6,57 \text{ kN/m/m}$$

Dieser Wert muss in die Excel-Tabelle in die entsprechende rote Zelle übertragen werden. Auf diese Weise wird automatisch der Wert der Tragfähigkeit des entsprechenden bombierten Profils durch die Excel-Datei angezeigt, indem einfach eine Abminderung um 10 % gegenüber dem ebenen Profil erfolgt.

$M_{c,Rk,F}(\text{curved profile}) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(\text{flat profile})$					
$M_{c,Rk,F,flat profile}$	6.57	[kNm/m]	$M_{c,Rk,F,curved profile}$	5.91	[kNm/m]

8.1.2. Einfeldträger mit horizontalen Lagern

Im Fall des Einfeldträgers *mit* horizontalen Auflagern sollte ein mehrschrittiger Ansatz, wie nachfolgend detailliert erläutert, angenommen werden. Wie schon in diesen Bemessungsregeln erklärt, muss die Lösung des Problems bei dieser Beanspruchung/Lager-Variante als unbestimmtes Problem erfolgen. Bei Festhaltung der horizontalen Verschiebungen verhält sich das bombierte Profil wie ein Bogen.

Schritt 1: Bestimmung der Schnittgrößen des 'Bogens' unter charakteristischer Versagenslast.

System scale 1 : 25

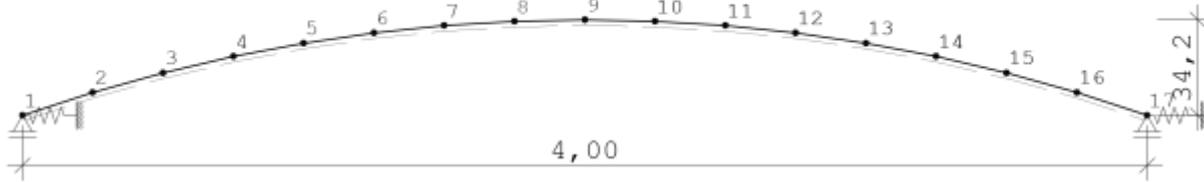


Abbildung 8.1.2.1 - Geometrische Abmessungen des Modells.

Der kreisförmige Bogen wird durch ein aus 16 geraden Abschnitten bestehendes Polygon angenähert; dabei werden die Knoten mit Nummern von 1 bis 17 bezeichnet (siehe Abbildung 8.1.2.1 und Abbildung 8.1.2.2). Die Berechnung bezieht sich auf eine Einheitsbreite des Profils von 1,0 m. Die Endlager (Knoten 1 und 17) werden in horizontaler Richtung mit Federn ausgestattet um die horizontalen Durchbiegungen zu erlauben und zu kontrollieren; die Lager werden in vertikale Richtung festgehalten. Die charakteristische Versagenslast wird als 4 gleiche Linienlasten bei $0,125L - 0,25L - 0,25L - 0,125L$ (in Übereinstimmung mit den Knoten 3, 7, 11 und 13) angesetzt. Das Eigengewicht des Profils wird vernachlässigt.

Da die Schnittkräfte des Bogens von der horizontalen Verschiebung an den Lagern abhängen, ist es von zentraler Bedeutung bei der Berechnung der Schnittgrößen die richtige Federsteifigkeit anzusetzen. Bezüglich des Einflusses der Federsteifigkeit auf die Schnittkräfte muss die Federsteifigkeit "auf der sicheren Seite" geschätzt werden, um eine konservative Bedingung für die Bemessung zu erhalten. Die Vernachlässigung der horizontalen Verschiebungen an den Auflagern führt zu günstigen Schnittkräften und damit zu einer unsicheren Bemessung. Die Federsteifigkeit wird so gewählt, dass die berechnete vertikale Verschiebung bei Erreichen der Versagenslast mit der in den Versuchen gemessenen vertikalen Verschiebung übereinstimmt. Die Berechnung der Schnittgrößen wird für ein System durchgeführt, das die betrachtete Teilversuchsreihe unter charakteristischer Versagenslast darstellt. Aus den Versuchen muss ein gemeinsamer Durchbiegungswert entwickelt werden, der die gesamte Teilversuchsreihengruppe abbildet. Zu beachten ist, dass dieser repräsentative Wert nicht direkt der Durchbiegung eines einzelnen Versuchs entspricht.

Für jeden Versuch definieren die vertikale Durchbiegung in Feldmitte f_{\max} und die entsprechende (einzelne) Versagenslast F_u (Versuch) einen einzelnen "Steifigkeitsparameter":

Gesamtsteifigkeit des Probekörpers

$$C_{f,i} = F_u / f_{\max}$$

Der Mittelwert aller Versuche derselben Teilversuchsreihe wird als repräsentativ für diese Gruppe angesehen.

$$C_f = \text{Mean} (C_{f,i})$$

Unter Verwendung des Gesamtsteifigkeitswerts der Gruppe kann die Durchbiegung in Feldmitte unter charakteristischer Versagenslast berechnet werden, welche als repräsentativ für diese Gruppe angesehen wird.

Da die Schnittkräfte des Bogens für die Einheitsbreite berechnet werden, muss das Ergebnis mit der Breite des Probekörpers multipliziert werden.

$$f_{\text{eq}} = F_{u,k} / C_f * b_V$$

Versuchsaufbau/ Feldlänge	Querschnitt	Federsteifigkeit am Lager C_f [kN/m/cm]	Versagenslast [kN/m]	Verschiebung		Auflagerreaktionen [kN/m]		M/N Werte [kN/m/m; kN/m]		
				f_h (Lager)	f_v (Hochpunkt)	R_h	R_v	Am Lasteinleitungspunkt bei Versagenslast		Am Lager
								max M	entspr. N	max N
1/3,00m	brutto	fest	11,03	0,00	0,11	20,46	5,52	0,17	20,62	21,19
		68,00	11,03	0,28	1,67	18,81	5,52	0,49	18,98	19,60
		20,00	11,03	0,79	4,55	15,76	5,52	1,08	15,94	16,65
		10,00	11,03	1,28	7,33	12,82	5,52	1,65	13,01	13,80
	effektiv	fest	11,03	0,00	0,41	20,35	5,52	0,19	20,51	21,08
		88,00	11,03	0,22	1,66	19,64	5,52	0,33	19,80	20,40
20,00		11,03	0,88	5,33	17,57	5,52	0,73	17,74	18,39	
2/4,00m	brutto	fest	12,77	0,00	0,08	19,13	6,39	0,35	19,35	20,16
		62,00	12,77	0,30	1,45	18,64	6,39	0,40	18,87	19,70
		20,00	12,77	0,88	4,10	17,69	6,39	0,71	17,92	18,80
	effektiv	fest	12,77	0,00	0,39	19,09	6,39	0,26	19,31	20,13
		79,00	12,77	0,24	1,44	18,88	6,39	0,33	19,11	19,93
		20,00	12,77	0,91	4,51	18,29	6,39	0,51	18,53	19,37
3/5,00m	brutto	fest	6,62	0,00	0,02	9,23	3,31	0,16	9,36	9,81
		29,00	6,62	0,31	1,34	9,01	3,31	0,26	9,14	9,60
		20,00	6,62	0,45	1,91	8,91	3,31	0,30	9,04	9,50
	effektiv	fest	6,62	0,00	0,23	9,22	3,31	0,16	9,35	9,80
		33,00	6,62	0,28	1,33	9,12	3,31	0,21	9,09	9,70
		20,00	6,62	0,45	2,07	9,05	3,31	0,24	9,18	9,63
10,00	6,62	0,89	3,91	8,88	3,31	0,31	9,01	9,48		

Tabelle 3 - Schnittgrößen und Durchbiegungen des Bogens unter charakteristischer Versagenslast

Grün eingefärbte Zeilen: Federsteifigkeit am Auflager angepasst auf die Durchbiegung in Feldmitte im Versuch.

Rot eingefärbte Zeile: Beispielausführungsvariante, die in der genauen Berechnung betrachtet wurde.

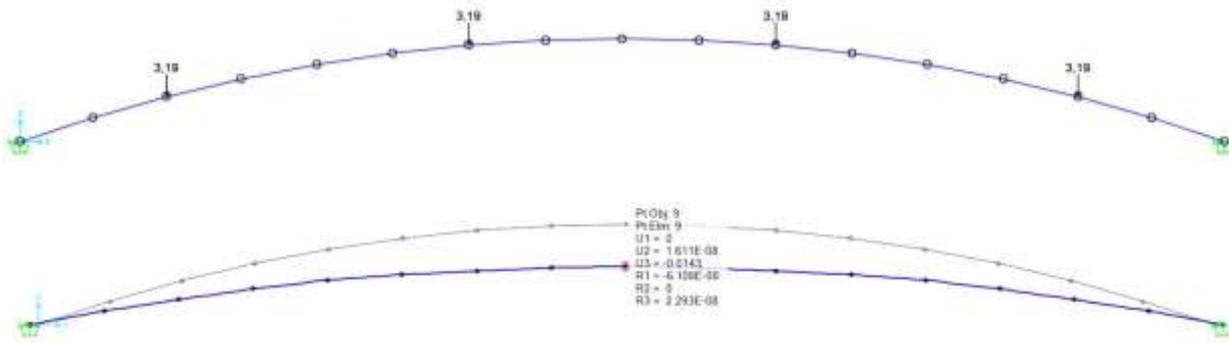


Abbildung 8.1.2.2 - Beispiel des einfachen Modells mit horizontalen Federn.

Bei Berechnung des Bogens mit einer Software wird die Federsteifigkeit des horizontalen Lagers variiert und schließlich auf einen Wert festgelegt, für den die berechnete Durchbiegung in Feldmitte unter charakteristischer Versagenslast mit der Durchbiegung f_{eq} übereinstimmt. Diese Federsteifigkeit des horizontalen Auflagers entspricht der zuvor genannten C_{ind} .

Die Versagenslast im analysierten Beispiel hat, wie in Tabelle 3 zu sehen, einen Wert von 12,77 kN/m. In dem Modell wird dieser Wert an vier Punkten aufgebracht, was zu dem folgenden Wert führt:

$$F_{u,nodes} = 12,77 / 4 = 3,19 \text{ kN}$$

Die vertikale Durchbiegung in Feldmitte für dieses Beispiel hat einen Wert von:

$$f_v = 1,45 \text{ cm}$$

Dieser Wert wird durch das Modell erreicht, indem die folgende Federsteifigkeit des horizontalen Lagers angesetzt wird:

$$C_f = 62 \text{ kN/m/cm}$$

In dem eingestellten Modell werden unter Berücksichtigung des Abschnittes mit dem größten Biegemoment (im Lasteinleitungspunkt nahe des Hochpunktes) die folgenden Werte erzielt:

$$M = 0,40 \text{ kNm/m}$$

$$N_D = 18,87 \text{ kN/m}$$

Diese Werte müssen in die entsprechenden roten Zellen der Excel-Tabelle eingetragen werden.

f_{yb}	408,3	[N/mm ²]	$N_{c,Ed}$	18,87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{c,Ed}$	0,40	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207,9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1,09	[kNm/m]
A_g	6,58	[cm ² /m]			
i_g	1,22	[cm]			
A_{ef}	1,89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1,66	[cm]			

Schritt 2: Bestimmung der Knicklänge L_{cr} .

Die Knicklänge eines kreisförmigen Bogens kann in der Literatur gefunden werden; zum Beispiel gibt DIN 18800-2 den folgenden Ausdruck an:

Bogenlänge b

Höhe/Feldlänge-Verhältnis f/L

Knicklängenkoeffizient $\beta = f$ (Höhe/Feldlänge-Verhältnis f/L) aus Diagramm

Knicklänge $L_{cr} = \beta \cdot s = \beta \cdot b/2$

s ist die halbe Feldlänge des Bogens, wie in Abbildung 8.1.2.2 dargestellt.

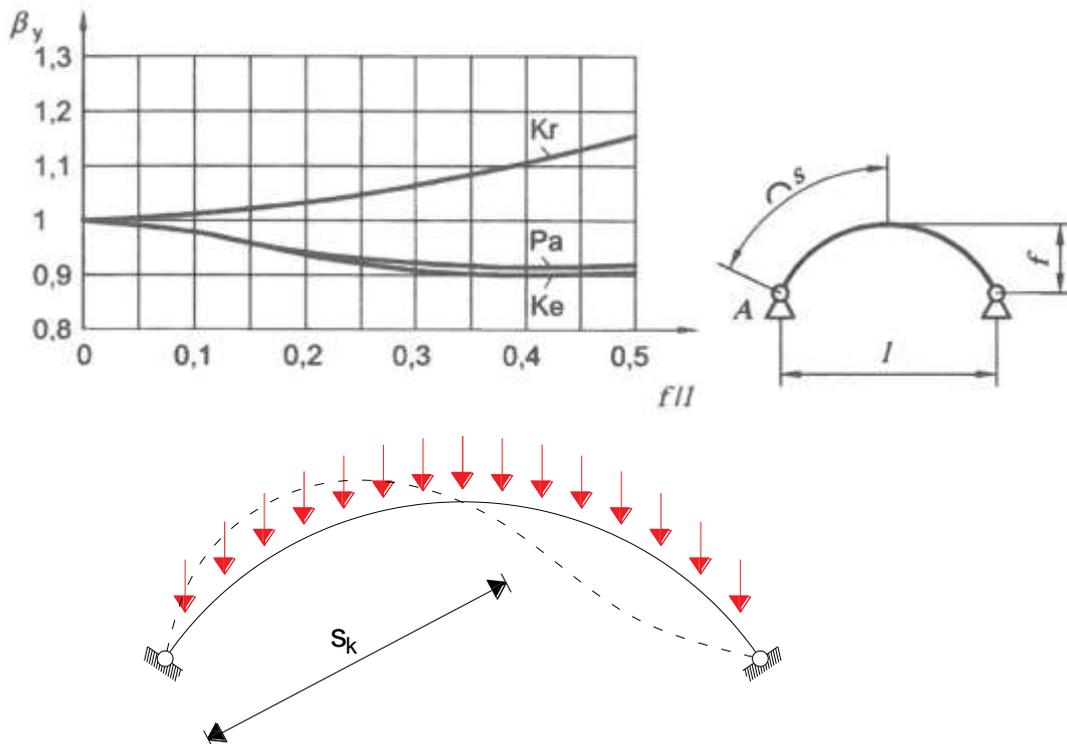


Abbildung 8.1.2.3 - Knicklängenkoeffizient b aus DIN 18800-2.

Zum Beispiel können die folgenden Angaben verwendet werden:

Bogenhöhe $f = 342 \text{ mm}$

Feldlänge $L = 4000 \text{ mm}$

Neigung am Auflager $\alpha/2 = 0,338$

Radius der Krümmung $R = 4000 / (2 \cdot \sin 0,338) = 6024 \text{ mm}$

Bogenlänge $b = 6024 \cdot 2 \cdot 0,338 = 4072 \text{ mm}$

Höhe/Feldlänge-Verhältnis $f/L = 342 / 4000 = 0,085$

Knicklängenkoeffizient $\beta = 1,02$

Knicklänge $L_{cr} = 1,02 \cdot 4072 / 2 = 2079 \text{ mm}$

Der Knicklängenwert muss in die entsprechenden roten Zellen der Excel-Tabelle eingetragen werden.

f_{yb}	408,3	[N/mm ²]	$N_{c,Ed}$	18,87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{c,Ed}$	0,4	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta \cdot s$	207,9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1,09	[kNm/m]
A_g	6,58	[cm ² /m]			
i_g	1,22	[cm]			
A_{ef}	1,89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1,66	[cm]			

Schritt 3: Bestimmung des Bemessungswiderstands der Druckkraft N_{dD} .

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0,8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g)$$

Ideale Knicklast:

$$\max N_{dD} = 0,8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g$$

$$\max N_{dD} = 0,8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_g}{L_{cr}^2}$$

$$\max N_{dD} = 0,8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 9,77}{207,9^2}$$

$$\max N_{dD} = 37,47 \text{ kN}$$

Kritische Knicklast:

$$\text{ult} N_{dD} = \sigma_{cd} \cdot A_{ef}$$

Schlankheitsgrad:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{ef} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{yk}}{E}}$$

$$\alpha = \frac{207,9}{1,66 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{408,3}{210000}} = 1,758$$

Knickkurve aus DIN 18807:

α	$\sigma_{cd}/\beta s$
$\alpha \leq 0,30$	1,00
$0,30 < \alpha \leq 1,85$	$1,126 - 0,419 \alpha$
$1,85 < \alpha$	$1,2 / \alpha^2$

$$\frac{\sigma_{cd}}{f_{yk}} = 1,126 - 0,419 \cdot 1,758 = 0,390$$

$$\sigma_{cd} = 0,390 \cdot 408,3 = 159,0 \text{ N/mm}^2$$

Kritische Knicklast:

$$\text{ult} N_{dD} = 15,9 \cdot 1,8895 = 30,06 \text{ kN/m}$$

Maßgebender Bemessungswiderstand:

$$N_{dD} = 30,06 \text{ kN/m}$$

Die Werte des Schlankheitsgrads, der idealen Knicklast, dem Abminderungsfaktor und der kritischen Knicklast werden automatisch durch die Excel-Datei angezeigt, sobald die roten Zellen mit allen erforderlichen Daten ausgefüllt worden sind.

f_{yb}	408,3	[N/mm ²]	$N_{c,Ed}$	18,87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{c,Ed}$	0,40	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta \cdot s$	207,9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1,09	[kNm/m]
A_g	6,58	[cm ² /m]			
i_g	1,22	[cm]			
A_{ef}	1,89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1,66	[cm]			

Schlankheitsgrad α [-]	Ideale Knicklast [kN/m]	Abminderungsfaktor χ [-]	Kritische Knicklast [kN/m]
1,76	37,45	0,39	30,05
$N_{c,Rd}$	30,05 [kN/m]		
$N_{c,Ed} / N_{c,Rd}$	0,63 [-]		
$M_{c,Ed} / M_{c,Rd}$	0,37 [-]		

Schritt 4: Interaktion von Biegemoment und Drucknormalkraft

Gemäß DIN 18807 muss der Schlankheitswert $\alpha = 1,758$ auf 1 begrenzt werden, aber im Folgenden wird die Berechnung mit dem von DIN 18807 abgeänderten Vorgehen vorgeschlagen: Die Modifikation besteht darin, den Wert des Koeffizienten α in der M-N-Interaktions-Formel nicht zu begrenzen.

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1$$

$$\frac{18,87}{30,06} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot 1,758 \cdot \left(1 - \frac{18,87}{30,06} \right) \right] + \frac{0,40}{1,093}$$

$$= 0,628 \cdot [1 + 0,5 \cdot 1,758(1 - 0,628)] + 0,366$$

$$= 0,833 + 0,366 = 1,20 > 1$$

Die M-N-Interaktion wird in der Excel-Datei automatisch angezeigt.

Interaktions-Formel	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \right) \right] + \frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = 1,20 > 1,0$
---------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Die Formel bestätigt, dass der Bogen wie in den Versuchen unter der Belastung von 12,77 kN (4 Lasten von 3,19 kN) versagt.

9. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] James L. Jorgenson J.L., Chowdhury A.H.: Buckling Strength of cold formed steel curved panels.
- [2] EN 1090-4:2016 Execution Of Steel Structures And Aluminium Structures - Part 4: Technical Requirements For Cold-Formed Structural Steel Elements And Cold-Formed Structures For Roof, Ceiling, Floor And Wall Applications
- [3] CEN, EN 1990 Eurocode: basis of structural design
- [4] CEN, EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [5] CEN, EN 1991-1-2: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- [6] CEN, EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads
- [7] CEN, EN 1991-1-4: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions
- [8] CEN, EN 1991-1-5: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions
- [9] CEN, EN 1991-1-6: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution"
- [10] CEN, EN 1993-1-2: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- [11] CEN, EN 1993-1-3:2006 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2006.
- [12] CEN, EN 1998-1: 2013 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
- [13] DIN 18807 part 1 and part 3: trapezoidal sheeting in buildings; steel trapezoidal sheeting.
- [14] DIN 18800 part2: steel structures- stability- buckling of bars and skeletal structures
- [15] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.2 Test program definition, 2016
- [16] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.4 Test analysis and interpretation,2016

Anhang 1

Hintergrund der neuen Bemessungsmethode für bombierte Profile.

D2.1	GRISPE WP2 Hintergrund Dokument	Christian FAUTH (KIT)
D2.2	GRISPE WP1 Prüfprogrammdefinition	Rainer HOLZ (IFL)
D2.3	GRISPE Versuchsprotokoll der bombierten Profile	Christian FAUTH (KIT)
D2.4	GRISPE WP1 Versuchsanalyse und Interpretation	Rainer HOLZ (IFL)
D2.5	GRISPE Hintergrundanleitung für EN 1993-1-3 zur Bemessung von Blechen mit Prägungen und Kerben	Christian FAUTH (KIT)