

# GRISPE PLUS



VALORISATION OF KNOWLEDGE  
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

**WP Nr.: 3**

**WP Titel: E-Lectures**

**Deliverable Nr.: D3.1**

**Titel: Perforierte Trapezprofile**

**Datum: 31. März 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)**

*Sokol Palisson Berater, Anna Palisson*

## **Zeichnungshistorie**

*ENTWURF Nr. 1 - Datum:*

*ENTWURF Nr. 2 - Datum:*

*ENDFASSUNG - Datum: 31. März 2018*

## **Verbreitungsgrad**

*PU öffentlich*

*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)*







# **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 as a result 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 report, article, guide, etc. (select the correct word) are those of the author(s) 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 project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement n° 75 4092.



## **ZUSAMMENFASSUNG**

Ziel dieser Bemessungsregel ist es, ein neues Bemessungsverfahren für perforierte Profilbleche vorzustellen, welche in dem europäischen Projekt GRISPE PLUS entwickelt wurde.

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 perforierte Profile basiert auf Versuchen, die im Rahmen des europäischen GRISPE-Projekts (2013-2016) durchgeführt wurden.

Der Hintergrund dieses Verfahrens ist in Anhang 1 beschrieben.

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

Kapitel 2 beschreibt die Vorbemessungen, die während der Entwurfsphase zu berücksichtigen sind, insbesondere die Überprüfung des Anwendungsbereichs des neuen Bemessungsverfahrens;

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

Kapitel 4 gibt die Materialeigenschaften der Profile an;

Kapitel 5 berücksichtigt die Einwirkungen und Lastfallkombinationen;

Kapitel 6 gibt die Bemessungsgrundlagen an;

Kapitel 7 berücksichtigt besondere Bemessungsbetrachtungen;

Kapitel 8 erläutert die Softwareberechnung für perforierte Profilbleche;

Kapitel 9 enthält ein Bemessungsbeispiel des neuen Bemessungsverfahrens;

Kapitel 10 zeigt die automatische Überprüfung der Software.

Ein Literaturverzeichnis und ein Anhang sind enthalten.

## **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 Anna PALISSON verfasst und 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
Daniel SPAGNI	Frankreich

## **ABBILDUNGEN**

Die Abbildungen stammen aus folgenden Quellen:

Abbildung 1.1.1 – JORIS IDE

Abbildung 1.1.2 – KIT

Abbildung 1.1.3 – KIT

Abbildung 1.3.1 bis Abbildung 1.3.12 – KIT

Abbildung 2.2.1.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 2.2.2.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 6.2.1 - Sokol Palisson Berater

Abbildung 6.2.2 - Sokol Palisson Berater

Abbildung 6.3.2.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 8.1 – Sokol Palisson Berater

Abbildung 8.1.1 - Sokol Palisson Berater

Abbildung 8.1.2 - Sokol Palisson Berater

Abbildung 8.1.3 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 9.1- Sokol Palisson Berater

Abbildung 9.1.1- Sokol Palisson Berater

Abbildung 9.1.3.1- Sokol Palisson Berater

Abbildung 9.2.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 9.3.1.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 9.3.1.2 – Kopie aus EN 1993-1-3

Perforierte Profile

Abbildung 9.3.1.1 - Sokol Palisson Berater

Abbildung 9.5.1 – Kopie aus EN 1993-1-3

Abbildung 9.5.2 – Kopie aus EN 1993-1-3

## INHALTSVERZEICHNIS

Bezeichnungen.....	7
1. EINLEITUNG .....	8
1.1. Art der Profilbleche.....	8
1.2. Stand der Technik vor GRISPE .....	8
1.3. Hauptergebnisse von GRISPE .....	9
1.4. Allgemeine Bemessungsanforderungen und -regeln .....	13
2. VORÜBERLEGUNG - VORBEMESSUNG .....	13
2.1. Anwendungsbereich des neuen Bemessungsverfahrens .....	13
2.2. Technologische Anordnungen der Profilbleche.....	14
2.2.1. Profilformen .....	14
2.2.2. Cross-section dimensions.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
3. TECHNISCHE GRUNDLAGEN .....	15
4. MATERIALEIGENSCHAFTEN.....	15
5. EINWIRKUNGEN UND BELASTUNGSKOMBINATIONEN.....	15
6. BEMESSUNGSGRUNDLAGE .....	15
6.1. Grundlagen .....	15
6.2. Anwendungsbereich des neuen Bemessungsverfahrens .....	15
6.3. Bemessungsverfahren .....	16
6.3.1. Bruttoquerschnitt mit quadratisch angeordneten Perforationen .....	16
6.3.2. Wirksamer Querschnitt mit quadratisch angeordneten Perforationen .....	16
6.3.3. Momententragfähigkeit von Profilen mit quadratisch angeordneten Perforationen.....	16
6.3.4. Lokale Last- oder Stützreaktion eines Steges mit quadratisch angeordneten Perforationen .....	17
6.3.5. Kombinierte Beanspruchung aus Biegung und lokaler Lasteinleitung oder Lagerreaktion	17
7. BESONDERE BEMESSUNGSBETRACHTUNGEN .....	17
8. ERLÄUTERUNG DER SOFTWAREBERECHNUNG .....	17
8.1. DATA .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
8.2. Überprüfung der geometrischen Verhältnisse.....	20
8.3. Ergebnisse .....	20
9. BEMESSUNGSBEISPIEL .....	20
9.1. Profilquerschnitt.....	21
9.1.1. Angaben zum Profil .....	21
9.1.2. Überprüfung der geometrischen Verhältnisse.....	22
9.1.3. Muster der Perforation .....	22
9.2. Berechnung der Bruttogesamtfläche $A_g$ .....	22
9.3. Berechnung der wirksamen Querschnittsfläche $A_{eff}$ .....	23
9.3.1. Schritt 1 .....	24
9.3.2. Iteration: Nächste Schritte.....	28
9.4. Berechnung der Momententragfähigkeit .....	28

9.5. Berechnung der Querkrafttragfähigkeit am Endauflager.....	29
10. AUTOMATISCHE KONTROLLE DER SOFTWARE.....	30
10.1. Berechnung der Momententragfähigkeit:.....	30
10.2. Berechnung der Tragfähigkeit am Endauflager.....	30
11. Literatur .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Anhang .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>

## UMFANG DER VERÖFFENTLICHUNG

Ziel dieser Veröffentlichung ist es, das neue Bemessungsverfahren für perforierte 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, etc.) sind die entsprechenden Bestimmungen der Eurocodes bzw. der EN 1090-4 zu beachten.

## BEZEICHNUNGEN

Folgende Symbole werden verwendet:

$t$  : Bemessungsdicke

$t_{nom}$  : Nennblechdicke

$t_{eff}$  : Wirksame Dicke

$h_w$  : Profilhöhe

$h_a$  : Steghöhe oberhalb der Aussteifung

$h_{sa}$  : Höhe der Aussteifung im Steg

$d_s$  : Höhe der Aussteifung im Gurt

$d$  : Durchmesser der Perforation

$a$  : Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen

$f_{yb}$  : Streckgrenze

$E$  : E-Modul

$t_{red}$  : Reduzierte Dicke

$b_{pi}$  : Nennwert der geraden Breite

$b_{i,eff}$  : Wirksame Breite

$A_g$  : Bruttoquerschnittsfläche

$A_{eff}$  : Wirksame Fläche

$z_G$  : Lage der neutralen Achse

$\sigma_{xx}$  : Spannung

$\chi_d$  : Abminderungsfaktor für Forminstabilität

$M_{c,Rd}$  : Momententragfähigkeit

$M_{span}$  : Momententragfähigkeit im Feld

$e_c$  : Höhe der Druckzone bis zur neutralen Achse

$s_{per}$  : Breite des perforierten Teils des Steges

$s_n$  : Breite des Steges in der Druckzone bis zur neutralen Achse

$s_{eff}$  : Wirksame Breite des Steges

$W_{eff}$  : Wirksames Widerstandsmoment

$R_{w,Rd}$  : Querkrafttragfähigkeit

## 1. EINLEITUNG

### 1.1. Art der Profilbleche

Die Bemessungsregeln behandeln Trapezprofile (Abbildung 1.1.1) mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Gurten (Abbildung 1.1.2) oder in den Stegen (Abbildung 1.1.3).



**Abbildung 1.1.1** – Trapezprofil



**Abbildung 1.1.2** – Trapezprofil mit quadratisch angeordneten Perforationen in den oberen Gurten



**Abbildung 1.1.3** – Trapezprofil mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Stegen

### 1.2. Stand der Technik vor GRISPE

Perforierte Profile werden zunehmend als Innenschale der Gebäudehülle eingesetzt, um die Akustik zu verbessern. Für diese Art der Anwendung wurden verschiedene Typen und Geometrien von Perforationen für den Profilsteg und den oberen Gurt entwickelt.

Die europäische Norm EN 1993-1-3 deckt in Kapitel 10.4 nur ebene Wände mit einer Lochanordnung in Form von gleichschenkligen Dreiecken ab, während es auf dem Markt viele Bleche mit abgewandelter Lochverteilung gibt.

Es existieren in [1], [2], [3], [4], [5] bereits mehrere Studien zur dreieckigen Lochanordnung. Was die quadratischen Musterperforationen betrifft, so liefern erste Untersuchungen am KIT in Deutschland [2], [3] einige nützliche Informationen über die wirksame Breite und den Widerstand gegen Stegkrüppeln. Sie basieren auf einer numerischen Computeranalyse, die nicht sofort zur analytischen Berechnung führt und erweitert werden muss, um die derzeit auf dem Markt befindlichen Lösungen abzudecken.

Eine Möglichkeit die Bleche mit quadratischer Lochanordnung zu bemessen, ist die Ermittlung von Widerstandswerten durch Versuche, die viel Zeit in Anspruch nehmen und teuer sind.

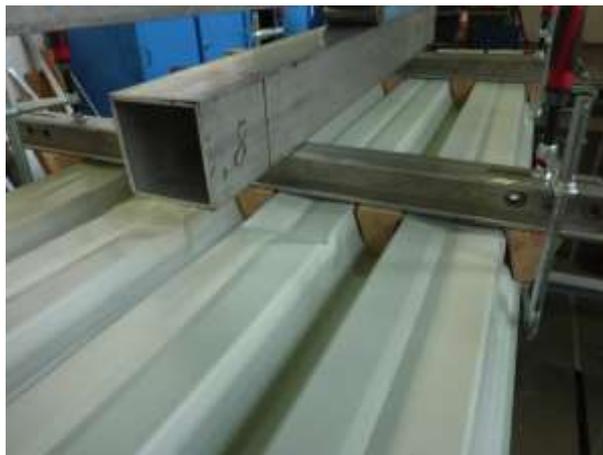
### 1.3. Zentrale Ergebnisse von GRISPE

Zur Ermittlung und zum Vergleich der Tragfähigkeit von Stahlprofilen mit und ohne Perforation wurde ein umfangreiches Programm von 224 Versuchen nach EN 1993-1-3 Anhang A an Stahltrapezprofilen durchgeführt (Abbildung 1.3.1 bis Abbildung 1.3.4):

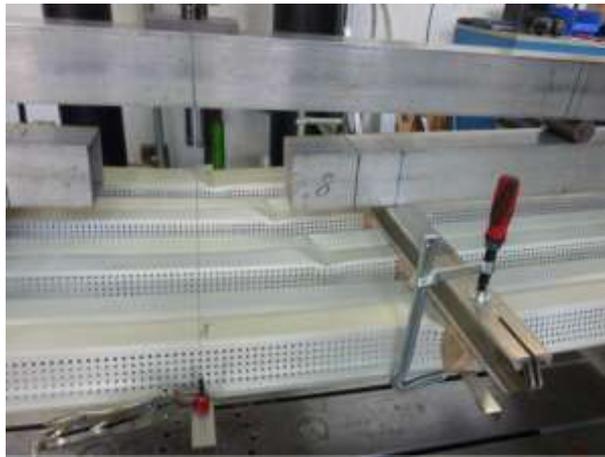
- mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Stegen
- mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Gurten
- ohne Perforationen

Darüber hinaus wurden 48 Versuche an Probekörpern ohne, mit quadratisch und mit dreieckig angeordneten Perforationen durchgeführt, um deren Einfluss auf das lokale Verhalten zu ermitteln.

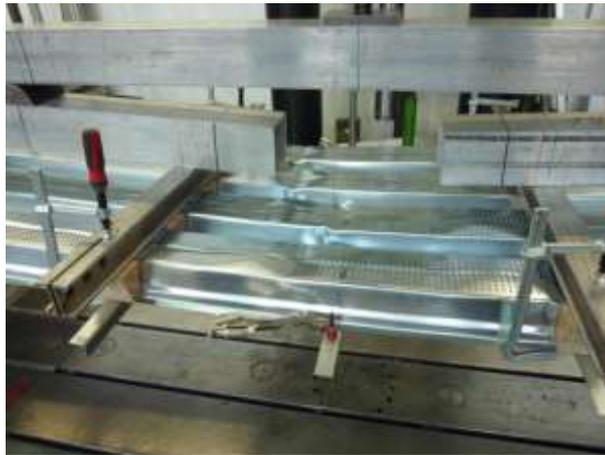
Die Analyse dieser Versuche erlaubte es, die wirksame Dicke für Bleche mit im Quadrat angeordneten Perforationen als Funktion der wirksamen Dicke für Bleche mit im Dreieck angeordneten Perforationen zu definieren und sich an eine im Quadrat angeordnete Perforation anzupassen, wobei die in EN 1993-1-3 definierten Formeln für Perforationen im Dreieck angeordnet sind. Diese innovativen Formeln konnten durch eine detaillierte Analyse der globalen Versuchsergebnisse validiert werden. Es wurden Bemessungsverfahren entwickelt, um die Momenten Tragfähigkeit im Feld, den Widerstand gegen Stegkrüppeln und die Momenten Tragfähigkeit des Profils mit Perforationen (im Gurt oder im Steg) zu bestimmen, die vorher nicht bestimmt werden konnten.



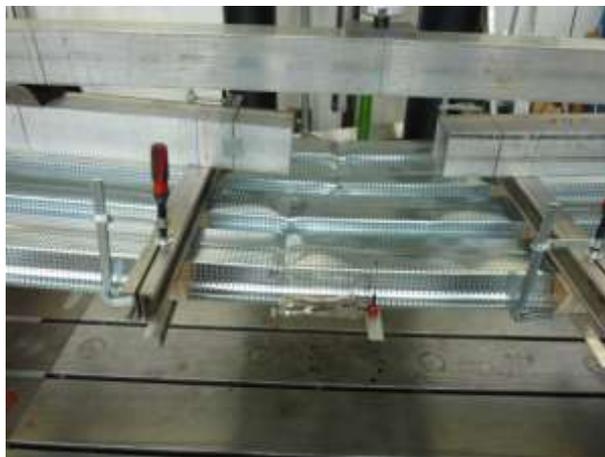
**Abbildung 1.3.1** – Einfeldträgerversuch am Profil ohne Perforation



**Abbildung 1.3.2** – Einfeldträgerversuch am Profil mit Perforation im Steg



**Abbildung 1.3.3** – Einfeldträgerversuch am Profil mit Perforation im Gurt



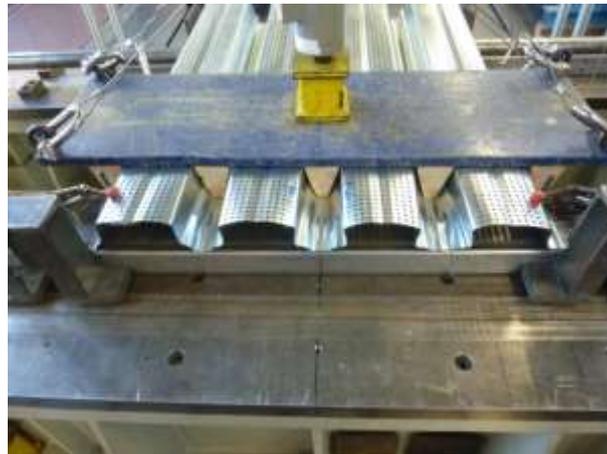
**Abbildung 1.3.4** – Einfeldträgerversuch am Profil mit vollständiger Perforation



**Abbildung 1.3.5** – Endauflagerversuch am Profil ohne Perforation



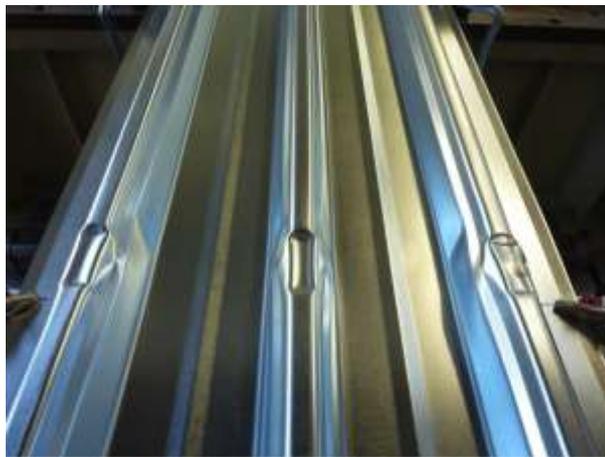
**Abbildung 1.3.6** – Endauflagerversuch am Profil mit Perforationen im Steg



**Abbildung 1.3.7** – Endauflagerversuch am Profil mit Perforationen im Gurt



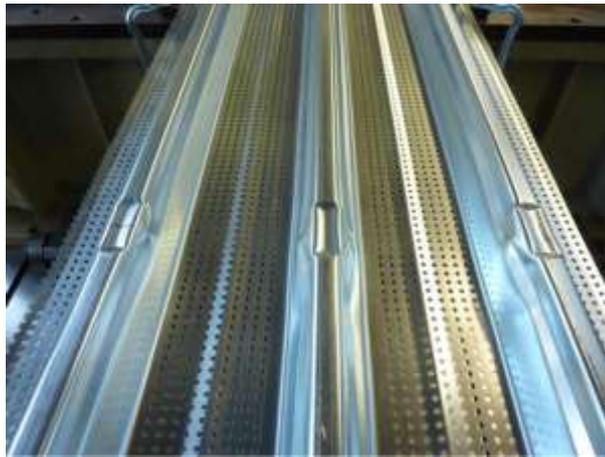
**Abbildung 1.3.8** – Endauflagerversuch am Profil mit vollständiger Perforationen



**Abbildung 1.3.9** – Zwischenauflagerversuch am Profil ohne Perforation



**Abbildung 1.3.10** – Zwischenauflagerversuch am Profil mit Perforationen im Steg



**Abbildung 1.3.11** – Zwischenauflagerversuch am Profil mit Perforationen im Gurt



**Abbildung 1.3.12** – Zwischenauflagerversuch am Profil mit vollständiger Perforation

#### **1.4. Allgemeine Bemessungsanforderungen und -regeln**

- (1) Die Gestaltung von perforierten Profilen sollte den allgemeinen Regeln der EN 1993-1-1 entsprechen.
- (2) Für die Grenzzustände der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit nach EN 1993-1-3 sind geeignete Teilsicherheitsbeiwerte festzulegen.

## **2. VORBEMESSUNG**

### **2.1. Anwendungsbereich des neuen Bemessungsverfahrens**

In diesen Bemessungsregeln werden die Anforderungen an die Konstruktion von Trapezprofilen mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Stegen oder in den Flanschen festgelegt. Die Ausführung von Stahlkonstruktionen aus Trapezprofilblechen ist in der EN 1090 geregelt.

In diesen Bemessungsregeln werden die Bemessungsverfahren beschrieben. Diese Verfahren gelten innerhalb der angegebenen Bereiche von Materialeigenschaften und geometrischen Abmessungen.

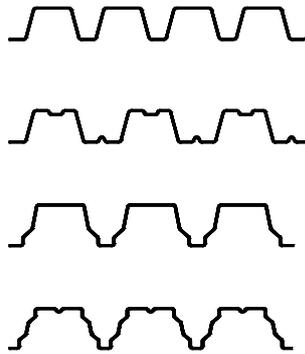
Diese Regeln beziehen sich nicht auf die Lastanordnung für Lasten während der Ausführung und Wartung.

Die in diesen Bemessungsregeln angegebenen Berechnungsverfahren sind nur gültig, wenn die Toleranzen der kaltgeformten Profile der EN 1993-1-3 entsprechen.

## 2.2. Technologische Anordnungen der Profilbleche

### 2.2.1. Profilformen

- (1) Die Profilbleche haben innerhalb der zulässigen Toleranzen eine konstante Nennblechdicke über ihre gesamte Länge und können entweder einen gleichmäßigen oder einen gesickten Querschnitt haben.
- (2) Die Querschnitte der Profilbleche bestehen im Wesentlichen aus einer Anzahl von ebenen Elementen, die durch gebogene Elemente verbunden sind.
- (3) Beispiele für verschiedene Querschnitte sind in Abbildung 2.2.1.1. dargestellt.



**Abbildung 2.2.1.1** – Beispiele von verschiedenen Profilquerschnitten

- (4) Die Querschnitte können entweder unversteift sein oder Längsversteifungen in ihren Stegen, Gurten oder beiden Teilen enthalten.

### 2.2.2. Querschnittsabmessungen

Die Querschnittsabmessungen sollten den allgemeinen Anforderungen der EN 1993-1-3, Abschnitt 1.5.3 entsprechen.

- (1) Die Bemessungsdicke  $t$  ist eine Stahlkonstruktionsdicke (die gemessene Stahlkerndicke minus Toleranz, falls erforderlich, gemäß Abschnitt 3.2.4 der EN 1993-1-3), sofern nicht anders angegeben.
- (2) Das Bemessungsverfahren sollte nicht auf Querschnitte außerhalb des in der Tabelle 5.1 der EN 1993-1-3 angegebenen Bereichs der Breiten-/Dickenverhältnisse  $b/t$ ,  $h/t$ ,  $c/t$  und  $d/t$  angewendet werden.
- (3)

		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$  $h/t \leq 500 \sin \phi$

**Tabelle 2.2.2.1** – Geometrische Anwendungsgrenzen

### 3. TECHNISCHE GRUNDLAGEN

#### Profilblech und CE-Kennzeichnung

Trapezprofilbleche sind nach der Norm EN 1090-1 CE-gekennzeichnet.

### 4. MATERIALEIGENSCHAFTEN

#### Stahlblech

Die Materialeigenschaften sollten den Anforderungen der EN 1993-1-3, Abschnitt 3 entsprechen.

Die üblichen Stahlsorten sind die Sorten S320GD + ZA und S350GD + ZA.

Die Profildicken sollten den Anforderungen der EN 1993-1-3, Abschnitt 3.2.4 entsprechen.

### 5. EINWIRKUNGEN UND LASTFALLKOMBINATIONEN

Die zu berücksichtigenden Einwirkungen und Lastfallkombinationen sind nach EN 1991-1-6 Eurocode 1: "Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-6: Allgemeine Einwirkungen, Einwirkungen während der Bauausführung" festzulegen.

### 6. BEMESSUNGSGRUNDLAGE

#### 6.1. Grundlagen

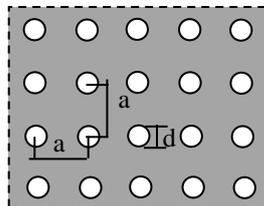
Dieses neue Bemessungsverfahren ist für Profile mit quadratisch in den Stegen oder in den Gurten angeordneten Perforationen:

- Momententragfähigkeit
- Widerstand gegen örtliche Lasteinleitung oder Lagerreaktion
- Widerstand gegen die kombinierte Beanspruchung aus Biegung und lokaler Lasteinleitung oder Lagerreaktion

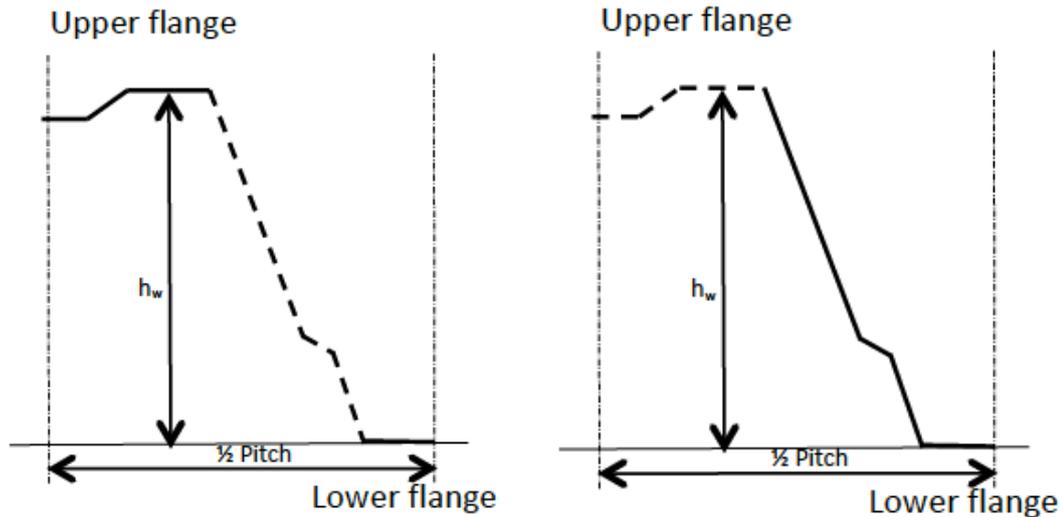
#### 6.2. Anwendungsbereich des neuen Bemessungsverfahrens

Dieses neue Bemessungsverfahren ist für Bleche mit quadratisch angeordneten Perforationen (Abbildung 6.2.1) in den Stegen oder den Gurten (Abbildung 6.2.2).

Anwendungsbereich:  $0.2 \leq d/a \leq 0.9$



**Abbildung 6.2.1** – Quadratisch angeordnete Perforationen



**Abbildung 6.2.2** – Profile mit Perforationen im Steg (links) oder im Gurt (rechts)

### 6.3. Bemessungsverfahren

#### 6.3.1. Bruttoquerschnitt mit quadratisch angeordneten Perforationen

Die Dicke des Bruttoquerschnitts wird nach EN 1993-1-3 Abschnitt 5.1 berechnet, wobei  $t$  durch  $t_{a,eff}$  ersetzt wird:

$$t_{a,eff} = 1,09t \left( 1 - \frac{1,03d}{a} \right)$$

Mit:

$d$  Durchmesser der Perforation;

$a$  Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen (Abbildung 6.2.1).

#### 6.3.2. Wirksamer Querschnitt mit quadratisch angeordneten Perforationen

Die wirksame Dicke wird nach EN 1993-1-3 Abschnitt 5 berechnet, wobei  $t$  durch  $t_{b,eff}$  ersetzt wird:

$$t_{b,eff} = t \sqrt[3]{1,18 \left( 1 - d/a \right)}$$

Mit:

$d$  Durchmesser der Perforation;

$a$  Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen (Abbildung 6.2.1).

#### 6.3.3. Momententragfähigkeit von Profilen mit quadratisch angeordneten Perforationen

Die Momententragfähigkeit eines Querschnitts für Biegung um eine Hauptachse  $M_{c,Rd}$  wird nach EN 1993-1-3 Kapitel 6.1.4 "Biegung" wie folgt ermittelt:

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Das wirksame Widerstandsmoment  $W_{eff}$  sollte mit dem wirksamen Querschnitt berechnet werden, der nur dem Biegemoment um die jeweilige Hauptachse unterliegt.

Die maximale Spannung  $\sigma_{max,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$  und die Auswirkung von lokalem Beulen und Forminstabilität wird gemäß Abschnitt 5.5 und 7.1 berücksichtigt.

### 6.3.4. Örtliche Lasteinleitung oder Lagerreaktion eines Steges mit quadratisch angeordneten Perforationen

Die lokale Querkrafttragfähigkeit eines Steges mit quadratisch angeordneten Perforationen wird nach der Formel (6.18) der EN 1993-1-3 berechnet.

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left( 1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[ 0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] \left( 2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

Jedoch wird  $t$  durch  $t_{c,eff}$  ersetzt:

$$t_{c,eff} = t \left[ 1 - \left( d/a \right)^2 s_{per} / s_w \right]^{3/2}$$

Mit:

$s_{per}$  Breite des perforierten Teils des Steges;  
 $s_w$  Gesamtbreite des Steges.

### 6.3.5. Kombinierte Beanspruchung aus Biegung und lokaler Lasteinleitung oder Lagerreaktion

(1) Bei Profilen mit quadratisch angeordneten Lochungen können die Gleichungen (6.28a), (6.28b) und (6.28c) der EN 1993-1-3 verwendet werden:

$M_{c,Rd}$  = Momententragfähigkeit ermittelt nach 6.3.3

$R_{w,Rd}$  = Lokale Querkrafttragfähigkeit ermittelt nach 6.3.4

(2) Querschnitte, die der kombinierten Einwirkung eines Biegemoments  $M_{Ed}$  und einer Querkraft durch eine lokale Belastung oder Lagerreaktion  $F_{Ed}$  unterliegen, sollten folgende Anforderungen erfüllen:

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1$$

$$F_{Ed} / R_{w,Rd} \leq 1$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25$$

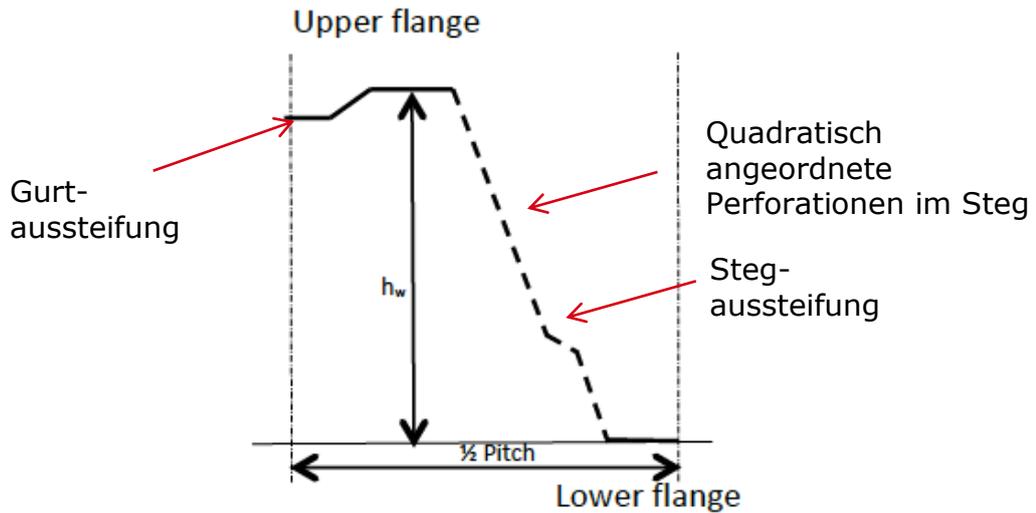
## 7. BESONDERE BEMESSUNGSBETRACHTUNGEN

Sachverhalte, die in diesen Bemessungsregeln nicht behandelt werden:

- Feuer
- Erdbeben - Seismische Berechnung
- Umweltaspekt
- Thermische Berechnung
- Akustik
- Andere

## 8. ERLÄUTERUNG DER SOFTWAREBERECHNUNG

Die Software ermöglicht die Berechnung der Momententragfähigkeit im Feld und der Querkrafttragfähigkeit am Endauflager für ein Profil mit einer Aussteifung im oberen Gurt, mit einer Aussteifung im Steg und mit quadratisch angeordneten Perforationen im Steg.



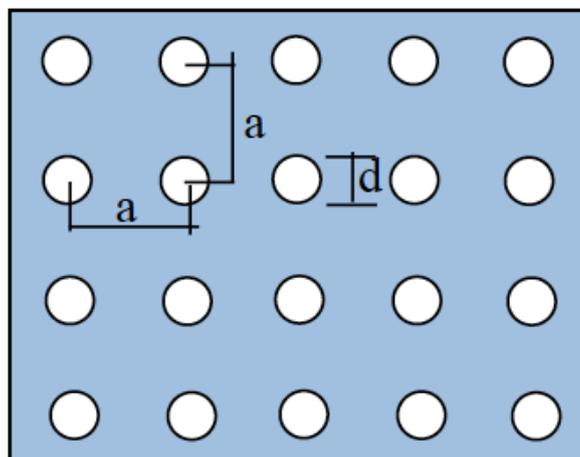
**Abbildung 8.1.** - Profil mit einer Aussteifung im Obergurt, einer Aussteifung im Steg und mit quadratisch angeordneten Perforationen im Steg

**8.1. Parameter**

Alle roten Zellen müssen mit den Profilabmessungen (Abbildung 8.1.1 und 8.1.2) gefüllt werden. Dazu gehört: Innenradius R, Winkel  $\theta$ , Winkel vom Steg zum Gurt  $\phi$ , Blechdicke t, Nennblechdicke  $t_{nom}$ , Breite, Steghöhe  $h_w$ , Höhe des Steges bis zur Aussteifung  $h_a$ , Höhe der Aussteifung  $h_{sa}$ , Höhe der Gurtaussteifung  $d_s$ , Streckgrenze  $f_{yb}$ , E-Modul, Durchmesser der Perforationen  $d$ ; Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen  $a$ , Breite des perforierten Teils des Steges  $s_{per}$ :

R1 (mm)	$\theta_1$ (rad)	R2 <sub>sup</sub> (mm)	R2 <sub>inf</sub> (mm)	$\theta_2$ (rad)	R3 (mm)	$\theta_3$ (rad)	$\phi$ (rad)
$t_{nom}$ (mm)	t (mm)	Pitch (mm)	$h_w$ (mm)	$h_a$ (mm)	$h_{sa}$ (mm)	$d_s$ (mm)	
$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	$\nu_{M0}$	a (mm)	d (mm)	$s_{per}$ (mm)		

**Tabelle 8.1.1** - Exceltabelle, in die die Profilabmessungen eingetragen werden sollen

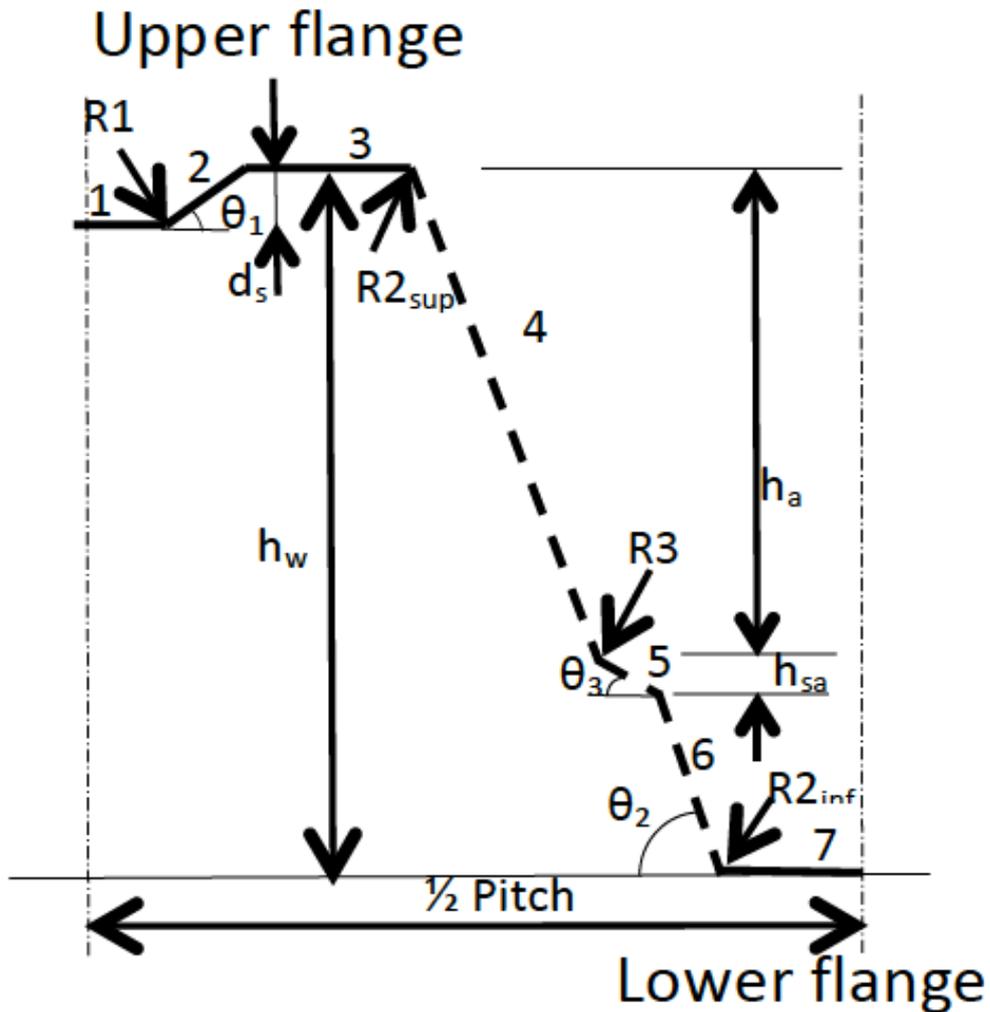


**Abbildung 8.1.1** - Perforationsmuster

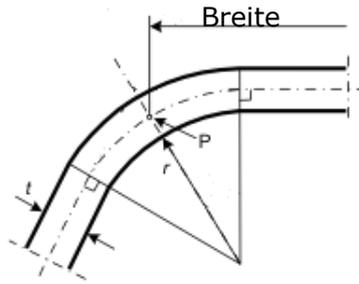
Es sind die roten Felder der folgenden Tabelle mit den Abmessungen ( $b_{pi}$ ) aller Elemente von einer halben Profilwelle auszufüllen. Die Elementnummern sind in der Abbildung 8.1.2 angegeben. Die Länge der Elemente wird vom Mittelpunkt " P " der benachbarten Eckelemente gemessen, wie in Abbildung 8.1.3 angegeben.

Element	$b_{pi}$ (mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	

**Tabelle 8.1.2** - Exceltabelle, die mit den Abmessungen der Elemente gefüllt werden soll



**Abbildung 8.1.2** - Elementnummern und Parameter



**Abbildung 8.1.3** - Länge der Elemente, gemessen vom Mittelpunkt " P "

### 8.2. Überprüfung der geometrischen Verhältnisse

Die rote Zelle in Tabelle 8.2.1 ist mit der Abmessung der Breite b zu füllen.

Die Software zeigt automatisch die Kontrolle der geometrischen Verhältnisse an.

	$b =$		$b/t \leq 500$
	$b/t =$		
	$\theta_2 =$		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
	$h/t =$		$h/t \leq 500 \sin \phi$
	$500 \sin(\theta_2) =$		
$r <$	$0,04 t E / f_y$		

**Tabelle 8.2.1** - Automatische Überprüfung der geometrischen Verhältnisse

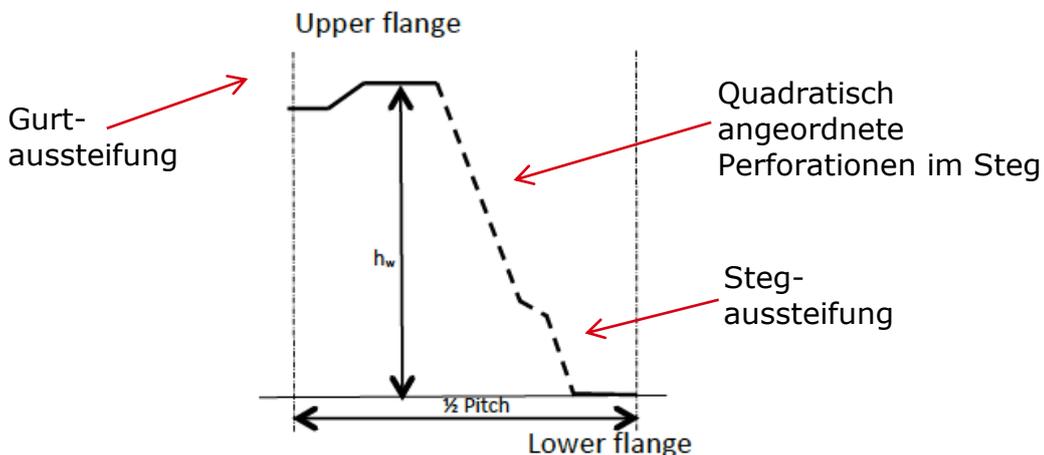
### 8.3. Ergebnisse

Die Software zeigt die Ergebnisse automatisch an:

- ⇒ Momenten­trag­fä­hig­keit im Feld  $M_{span} = \text{xxx} \text{ kNm/m}$
- ⇒ Quer­kraft­trag­fä­hig­keit am Endauflager  $R_{endsupport} = \text{xxx} \text{ kN/m}$

## 9. BEMESSUNGSBEISPIEL

Dieses Beispiel zeigt, wie man mit Stahlprofilen mit quadratisch angeordneten Perforationen in den Stegen umgeht, wenn man die Biegetragfähigkeit und den Stegbruchwiderstand eines Bleches mit einer Aussteifung im oberen Gurt und einer Aussteifung im Steg ermittelt.



**Abbildung 9.1** - Profil mit einer Aussteifung im Obergurt, einer Aussteifung im Steg und mit quadratisch angeordneten Perforationen im Steg.

### 9.1. Profilquerschnitt

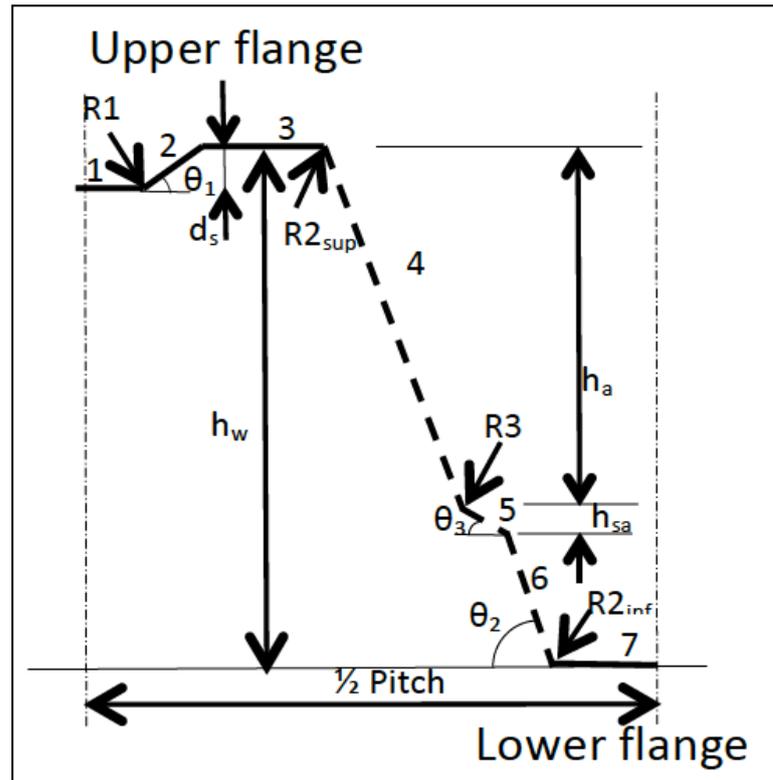


Abbildung 9.1.1 - Profilquerschnitt

#### 9.1.1. Angaben zum Profil

Das Beispiel basiert auf der Berechnung der Momenten Tragfähigkeit im Feld eines Profils mit den folgenden Daten:

R1 (mm)	$\theta_1$ (rad)	$R2_{sup}$ (mm)	$R2_{inf}$ (mm)	$\theta_2$ (rad)	R3 (mm)	$\theta_3$ (rad)	$\phi$ (rad)
0	0.22	6	6	1.31	3	0.99	1.27

$t_{nom}$ (mm)	t (mm)	Pitch (mm)	$h_w$ (mm)	$h_a$ (mm)	$h_{sa}$ (mm)	$d_s$ (mm)
0.75	0.71	195	73	45	9	3

$f_{yb}$ (N/mm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )	$\gamma_{M0}$	a (mm)	d (mm)	$s_{per}$ (mm)
320	210000	1	11.30	5.00	46.64

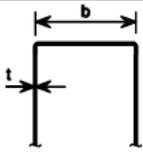
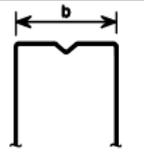
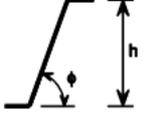
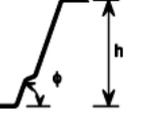
Tabelle 9.1.1.1 - Angaben zum Profil

Element	$b_{pi}$ (mm)
1	0.00
2	15.30
3	47.50
4	45.44
5	10.34
6	18.52
7	12.00

Tabelle 9.1.1.2 - Abmessungen der einzelnen Elemente

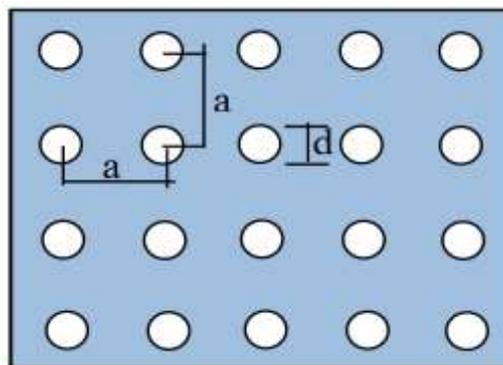
### 9.1.2. Überprüfung der geometrischen Verhältnisse

$b = 125$ ;  $t = 0.71$ ;  $h = 73$ ;  $f_y = 320$

	$b =$	125.00			$b/t \leq 500$
	$b/t =$	176.06			
	$\theta_2 =$	75.00			
	$h/t =$	102.82			
	$500 \sin(\theta_2) =$	482.96			$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
$r <$	$0,04 t E / f_y$	18.64			$h/t \leq 500 \sin \phi$

**Tabelle 9.1.2.1** – Überprüfung der geometrischen Verhältnisse

### 9.1.3. Muster der Perforation



**Abbildung 9.1.3.1** - Perforationsmuster

$d/a = 0.4$

Überprüfung der Anwendungsgrenze :  $0.2 \leq d/a \leq 0.9$

### 9.2. Berechnung der Bruttogesamtfläche $A_g$

Die Dicke des Bruttoquerschnitts wird nach EN 1993-1-3 Abschnitt 5.1 berechnet, wobei  $t$  durch  $t_{a,eff}$  ersetzt wird:

$$t_{a,eff} = 1,09t \left( 1 - \frac{1,03d}{a} \right)$$

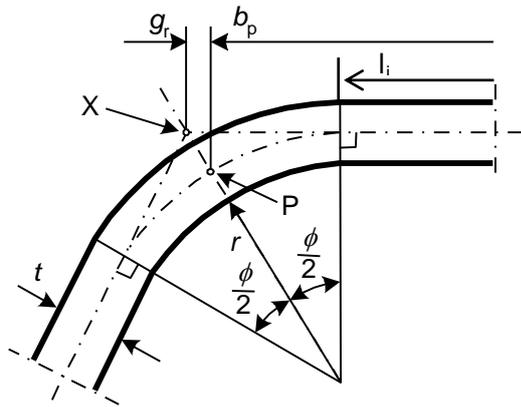
Mit:

$d$  Durchmesser der Perforation;

$a$  Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen (Abbildung 9.1.3.1).

$A_g$  ist die Summe der Flächen der einzelnen Elemente (Länge x  $t$ )

Länge =  $l_i = b_p - r_m \times \sin \pi/4$



(a) Mittelpunkt der Eckausrundung

X ist der Schnittpunkt der Mittellinien

P ist der Mittelpunkt der Ecke

$$r_m = r + t/2$$

**Abbildung 9.2.1** - Nennbreiten der ebenen Querschnittsteile  $b_p$  unter Berücksichtigung von Eckenradien

Element	$l_i$ (mm)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$z$ (mm)	$S_i$ (mm <sup>3</sup> )	$z_0$ (mm)
1	0.0	0.0	70.0	0.00	-18.5
Corner 1 <sub>inf</sub>	0.0	0.0	70.0	0.00	-18.5
2	15.3	10.9	71.5	776.56	-20.0
Corner 1 <sub>sup</sub>	0.0	0.0	73.0	0.00	-21.5
3	43.8	31.1	73.0	2272.61	-21.5
Corner 2 <sub>sup</sub>	7.9	5.6	71.4	398.30	-19.9
4	40.4	17.0	50.5	858.37	1.0
Corner 3 <sub>sup</sub>	3.0	1.3	28.0	35.18	23.5
5	7.5	3.2	23.5	74.03	28.0
Corner 3 <sub>inf</sub>	3.0	1.3	19.0	23.87	32.5
6	13.4	5.7	9.5	53.77	42.0
Corner 2 <sub>inf</sub>	7.9	5.6	1.6	8.77	49.9
7	8.3	5.9	0.0	0.00	51.5
TOTAL		87.4		4501.5	51.5

**Tabelle 9.2.1** – Abmessungen der einzelnen Elemente

$$A_g = 87.4 \text{ mm}^2$$

$$\text{Lage der neutralen Achse: } z_G = S / A_g = 51.5 \text{ mm}$$

### 9.3. Berechnung der wirksamen Querschnittsfläche $A_{\text{eff}}$

Die wirksame Dicke wird nach EN 1993-1-3 Abschnitt 5 berechnet, wobei  $t$  durch  $t_{b,\text{eff}}$  ersetzt wird:

$$t_{b,\text{eff}} = t \sqrt[3]{1,18 \left( 1 - d/a \right)}$$

Mit:

$d$  Durchmesser der Perforation;

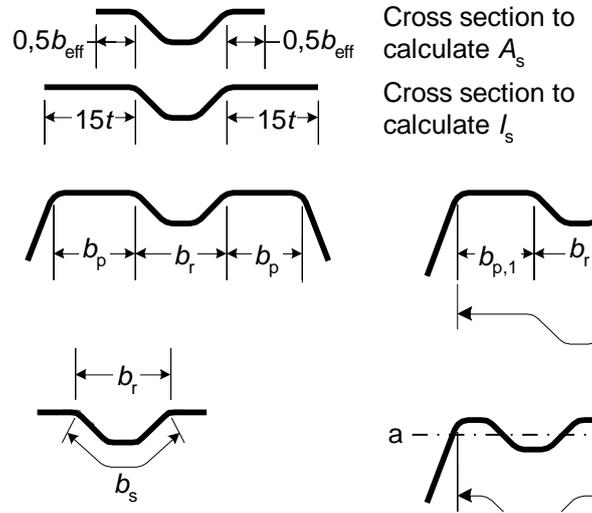
$a$  Abstand zwischen den Mittelpunkten der Perforationen (Abbildung 9.1.3.1).

$A_{\text{eff}}$  ist die Summe der wirksamen Flächen der einzelnen Elemente.

### 9.3.1. Schritt 1

#### Wirksame Querschnittsfläche des Obergurtes

Der obere Gurt hat eine Aussteifung. Der wirksame Querschnitt des Gurtes wird nach EN 1993-1-3 Kapitel 5.5.3.4.2 "Gurte mit Zwischenaussteifungen" berechnet.



**Abbildung 9.3.1.1** - Gurt mit einfacher oder mehrfacher Aussteifung

Die Spannung im Obergurt beträgt:  $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 134 \text{ N / mm}^2$

$b_p = 47.5 \text{ mm}$

$$\lambda_p = b_p / t / (28.4 \epsilon k_\sigma^{1/2}) \text{ with } \epsilon = (235 / f_{yb})^{1/2}$$

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1 = 1 \rightarrow \text{Koeffizient } k_\sigma = 4$$

$$\lambda_p = 1.374$$

$$\lambda_{pred} = \lambda_p \times \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{f_{y} / \gamma_{M0}}} \rightarrow \lambda_{pred1} = 0.888$$

$$\lambda_{pred} > 0.673 \rightarrow \rho = \frac{1 - 0.055(3 + \psi) / \bar{\lambda}_{p,red}}{\bar{\lambda}_{p,red}} + 0.18 \frac{(\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_{p,red})}{(\bar{\lambda}_p - 0.6)} \rightarrow \rho = 0.96$$

$$b_{eff} = \rho * b_p = 45.6 \rightarrow \boxed{0,5 b_{eff} = 22.8 \text{ m}}$$

#### Aussteifung des Obergurtes:

Der Querschnitt der Aussteifung wird nach EN 1993-1-3 Kapitel 5.5.3.3 "Ebene Teilflächen mit Zwischensteifen" berechnet.

Die elastische kritische Spannung  $\sigma_{cr,s}$  wird berechnet mit:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{4 b_p^2 (2 b_p + 3 b_s)}}$$

$$b_s = 30.6 \text{ mm}, b_p = 47.5 \text{ mm}$$

Berechnung von  $A_s$

Element	$l_i$ (mm)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )
plane part	22.81	16.19
Corner $l_{sup}$	0.00	0.00
2	15.30	10.86
Corner $l_{inf}$	0.00	0.00
1	0.00	0.00
Corner $l_{inf}$	0.00	0.00
2	15.30	10.86
Corner $l_{sup}$	0.00	0.00
plane part	22.81	16.19
<b>TOTAL</b>		<b>54.1</b>

**Tabelle 9.3.1.1** – Längen und Flächen der einzelnen Elemente

$A_s = 54.1 \text{ mm}^2$

Berechnung von  $I_s$

Element	$l_i$ (mm)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$z$ (mm)	$S_i$ (mm <sup>3</sup> )	$z_0$ (mm)	$h$	$I_i$ (mm <sup>4</sup> )
plane part	10.65	7.56	0.00	0.00	0.88	0.71	6.23
Corner $l_{sup}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00
2	15.30	10.86	1.50	16.29	-0.62	3.30	13.95
Corner $l_{inf}$	0.00	0.00	3.00	0.00	-2.12	0.00	0.00
1	0.00	0.00	3.00	0.00	-2.12	0.71	0.00
Corner $l_{inf}$	0.00	0.00	3.00	0.00	-2.12	0.00	0.00
2	15.30	10.86	1.50	16.29	-0.62	3.30	13.95
Corner $l_{sup}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.88	0.00	0.00
plane part	10.65	7.56	0.00	0.00	0.88	0.71	6.23
<b>TOTAL</b>		<b>36.8</b>		<b>32.6</b>	<b>0.88</b>		<b>40.4</b>

**Tabelle 9.3.1.2** – Flächenträgheitsmomente der einzelnen Elemente

$I_s = 40.4 \text{ mm}^4$

$$l_b = 3,07 \sqrt[4]{\frac{I_s b_p^2 (2 b_p + 3 b_s)}{t^3}}$$

$l_b = 254.9$

$s_w = 73.7$

$l_b / s_w = 3.5 \geq 2 \rightarrow k_w = k_{w0}$

$$k_{w0} = \sqrt{\frac{s_w + 2 b_d}{s_w + 0,5 b_d}}$$

$k_{w0} = 1.54$

**Elastische kritische Spannung  $\sigma_{cr,s} = 74 \text{ N/mm}^2$**

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}}$$

$\bar{l}_d = 1,77$

$$\bar{\lambda}_d \geq 1,38 \rightarrow \chi_d = \frac{0,66}{\lambda_d}$$

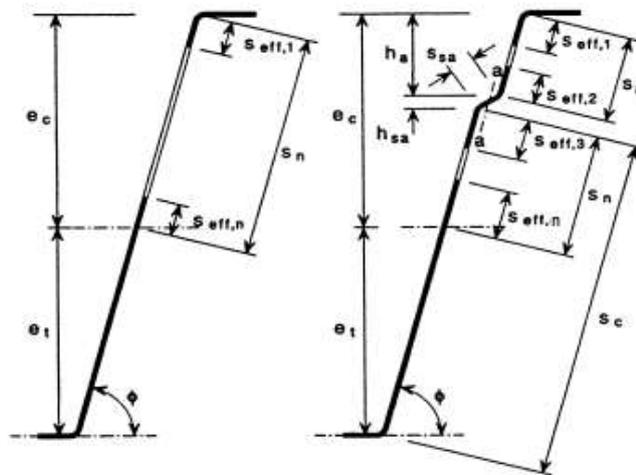
Abminderungsfaktor für die Forminstabilität  $\chi_d = 0,317$

$$\text{Reduzierte Dicke } t_{\text{red}} = C_d t \frac{f_{yb}/g_{M0}}{S_{\text{com,Ed}}}$$

Reduzierte Dicke  $t_{\text{red}} = 0,54 \text{ mm}$

Wirksame Fläche des Steges

Die wirksamen Flächen des Steges werden nach EN 1993-1-3 Kapitel 5.5.3.4.3 "Steg mit bis zu zwei Aussteifungen" berechnet.



**Abbildung 9.3.1.2** - Wirksame Querschnittsfläche von trapezförmig profilierten Stegen

In diesem Beispiel ist die neutral Achse  $z_g = 51,5 \text{ mm}$  und  $h_a = 45 \text{ mm}$  und die Aussteifung des Steges somit unterhalb des Druckbereiches. Die wirksame Fläche darf als Steg ohne Versteifung berechnet werden.

$$e_c = h_w - z_G = 21,5 \text{ mm} \rightarrow s_n = 21,3 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{com}} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 134 \text{ N / mm}^2$$

Die wirksamen Querschnittswerte dürfen wahlweise durch Iteration weiter verbessert werden. Bei dieser Iteration sollte ein erhöhter Eingangswert für die wirksame Breite  $s_{\text{eff},0}$  berechnet werden:

$$s_{\text{eff},0} = 0,95 t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{\text{com,Ed}}}}$$

$$\rightarrow s_{\text{eff},0} = 22,0 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},1} = 22,0 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 1,5 s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},n} = 33,0 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},n} \geq s_n \text{ Der Steg ist voll wirksam}$$

$$s_{\text{eff},1} = 0,4s_n$$

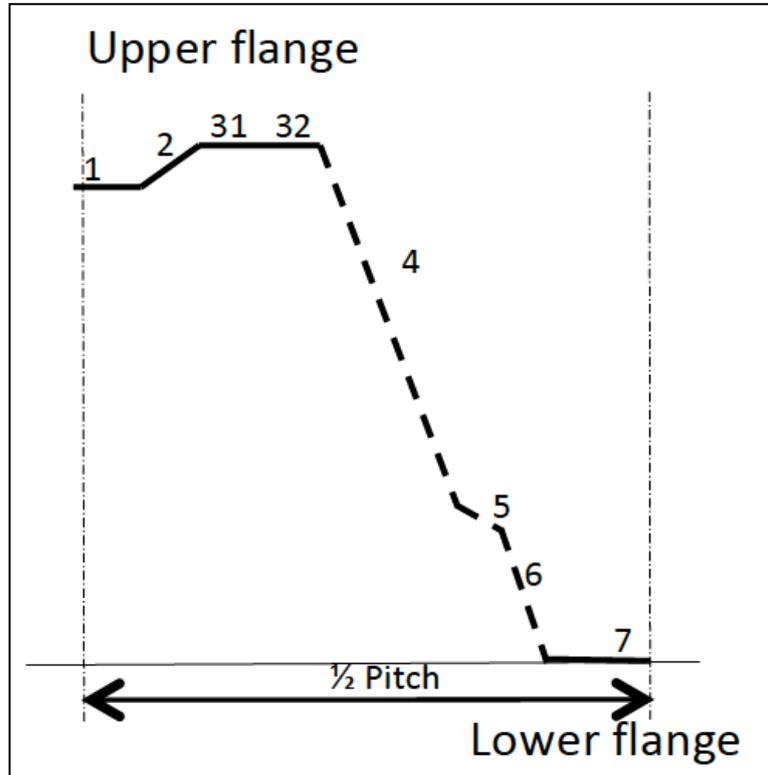
$$s_{\text{eff},n} = 0,6s_n$$

Wirksame Fläche des Untergurtes

Der Untergurt ist unter Zugbelastung → alle Breiten sind voll wirksam

Wirksame Gesamtfläche

Berechnung von  $A_{eff}$



**Abbildung 9.3.1.3** – einzelne Elementnummern

Element	$l_i$ (mm)	$t_{eff}$ (mm)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$z$ (mm)	$S_i$ (mm <sup>3</sup> )	$z0$ (mm)
1	0.0	0.54	0.00	70.00	0.00	-21.94
Corner 1 <sub>inf</sub>	0.0	0.54	0.00	70.00	0.00	-21.94
2	15.3	0.54	8.24	71.50	589.16	-23.44
Corner 1 <sub>sup</sub>	0.0	0.54	0.00	73.00	0.00	-24.94
31	23.8	0.54	12.79	73.00	933.91	-24.94
32	19.2	0.71	13.60	73.00	992.85	-24.94
Corner 2 <sub>sup</sub>	7.9	0.71	5.58	71.43	398.30	-23.36
4	40.4	0.58	23.53	50.50	1188.30	-2.44
Corner 3 <sub>sup</sub>	3.0	0.58	1.74	28.00	48.70	20.06
5	7.5	0.58	4.36	23.50	102.48	24.56
Corner 3 <sub>inf</sub>	3.0	0.58	1.74	19.00	33.05	29.06
6	13.4	0.58	7.84	9.50	74.44	38.56
Corner 2 <sub>inf</sub>	7.9	0.71	5.58	1.57	8.77	46.49
7	8.3	0.71	5.93	0.00	0.00	48.06
<b>TOTAL</b>			<b>90.9</b>		<b>4370.0</b>	<b>48.1</b>

**Tabelle 9.3.1.3** – Länge und Fläche der einzelnen Elemente

$A_{eff} = 90.9 \text{ mm}^2$

Die Lage der neutralen Achse vom wirksamen Querschnitt beträgt:  $z_G = 48.1 \text{ mm}$

### 9.3.2. Iteration: Nächste Schritte

In den nächsten Schritten wird die neue Position der neutralen Achse des wirksamen Querschnitts mit dem neuen  $\sigma_{com}$  bestimmt.

Die wirksame Querschnittsfläche des Obergurtes wird wie in Schritt 1 berechnet, jedoch unter Berücksichtigung des neuen  $\sigma_{com}$ , welches mit der aktuell iterierten Position der neutralen Achse  $z_c$  berechnet wird.

Die wirksame Querschnittsfläche vom Steg wird ebenfalls wie in Schritt 1 berechnet, wobei die neue Spannung  $\sigma_{com}$  mit der neuen Position der neutralen Achse berechnet wird.

Der Untergurt ist weiterhin vollständig unter Zugbelastung und alle Breiten sind voll wirksam.

Alle Werte der Schritte 2, 3 und 4 sind in der folgenden Tabelle angegeben. Die Konvergenz wird in Schritt 4 als zufriedenstellend angesehen und die Iteration endet in Schritt 4.

		2nd step	3rd step	4th step
Upper flange	$\sigma_{com}$	166	177	179
	$\rho$	0.875	0.851	0.844
	$0,5 b_{l,eff}$	20.78	20.20	20.05
Upper flange stiffer	$\sigma_{cr,s}$	77.75	79.02	79.35
	$\chi_{if}$	0.33	0.33	0.33
	$t_{red}$	0.45	0.42	0.42
Web	$e_c$	24.9	26.0	26.2
	$S_n$	24.9	25.9	26.2
	$S_{eff,D}$	19.7	19.1	19.0
	$S_{eff,1}$	19.7	19.1	19.0
	$S_{eff,n}$	29.6	28.7	28.4
	$S_{eff,1} + S_{eff,n}$	49.3	47.8	47.4
		entire web is effective	entire web is effective	entire web is effective
	$S_{eff,1}$	0,4sn	0,4sn	0,4sn
	$S_{eff,n}$	0,6sn	0,6sn	0,6sn
	Total effective Area	$A_{eff}$	87.3	86.4
Position of neutral axis	$Z_c$	47.0	46.8	46.7

**Tabelle 9.3.2.1** – Ergebnisse der Schritte 2,3 und 4

### 9.4. Berechnung der Momententragfähigkeit

Die Momententragfähigkeit wird mit den Daten aus Schritt 4 berechnet:

Element	$l_i$ (mm)	$t_{eff}$ (mm)	$A_i$ (mm <sup>2</sup> )	$z$ (mm)	$S_i$ (mm <sup>3</sup> )	$z0$ (mm)	$h$	$I_i$ (mm <sup>4</sup> )
1	0.0	0.42	0.0	70.00	0.00	-23.29	0.71	0.00
Corner 1 <sub>inf</sub>	0.0	0.42	0.0	70.00	0.00	-23.29	0.00	0.00
2	15.3	0.42	6.4	71.50	455.37	-24.79	3.30	3918.40
Corner 1 <sub>sup</sub>	0.0	0.42	0.0	73.00	0.00	-26.29	0.00	0.00
31	23.8	0.42	9.9	73.00	721.84	-26.29	0.71	6832.62
32	19.2	0.71	13.6	73.00	992.85	-26.29	0.71	9397.89
Corner 2 <sub>sup</sub>	7.9	0.71	5.6	71.43	398.30	-24.71	0.00	3405.73
4	40.4	0.58	23.5	50.50	1188.30	-3.79	38.98	3316.80
Corner 3 <sub>sup</sub>	3.0	0.58	1.7	28.00	48.70	18.71	0.00	609.15
5	7.5	0.58	4.4	23.50	102.48	23.21	6.27	2364.40
Corner 3 <sub>inf</sub>	3.0	0.58	1.7	19.00	33.05	27.71	0.00	1335.93
6	13.4	0.58	7.8	9.50	74.44	37.21	12.98	10961.71
Corner 2 <sub>inf</sub>	7.9	0.71	5.6	1.57	8.77	45.14	0.00	11363.27
7	8.3	0.71	5.9	0.00	0.00	46.71	0.71	12933.53
<b>TOTAL</b>			<b>86.1</b>		<b>4024.1</b>	<b>46.7</b>		<b>66439.4</b>

**Tabelle 9.4.1** – Daten aus Schritt 4

Perforierte Profile

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Für eine halbe Profilwelle  $I_{eff} = 66439 \text{ mm}^4$

Für ein Profil  $I_{eff} = 681 \text{ mm}^3$

$$v = \max(46,7; 26,3) = 46,7 \text{ mm}$$

$$W_{eff} = I_{eff} / v = 14.6 \text{ mm}^3$$

$$M_c = 4,7 \text{ kNm/m}$$

## 9.5. Berechnung der Querkrafttragfähigkeit am Endauflager

Die lokale Querkrafttragfähigkeit eines Steges mit quadratisch angeordneten Perforationen wird nach der Formel (6.18) der EN 1993-1-3 berechnet.

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left( 1 - 0,1 \sqrt{r/t} \right) \left[ 0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] \left( 2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

$$t_{c,eff} = t \left[ 1 - \left( d/a \right)^2 s_{per} / s_w \right]^{3/2}$$

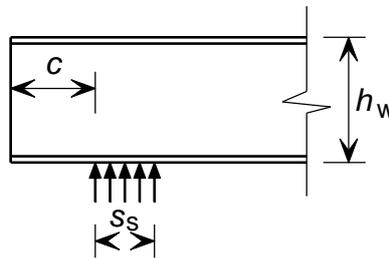
Jedoch wird  $t$  durch  $t_{c,eff}$  ersetzt:

Mit:

$s_{per}$  Länge des perforierten Teils des Steges;

$s_w$  Gesamtlänge des Steges.

In diesem Beispiel ist die Lagerreaktion in einem Abstand  $c \leq 1,5 h_w$  vom freien Ende und daher der Kategorie 1 zu zuordnen.



**Abbildung 9.5.1** - Lagerreaktion in einem Abstand  $c \leq 1,5 h_w$  : Kategorie 1

Für Profilbleche der Kategorie 1 gilt:  $\alpha = 0,075$  und  $l_a = 10 \text{ mm}$

Bei ausgesteiften Stegen kann die örtliche Beanspruchbarkeit durch Multiplikation der Beanspruchbarkeit des unausgesteiften Steges nach EN 1993-1-3 Kapitel 6.1.7.2 oder 6.1.7.3 mit dem Faktor  $\kappa_{a,s}$  ermittelt werden:

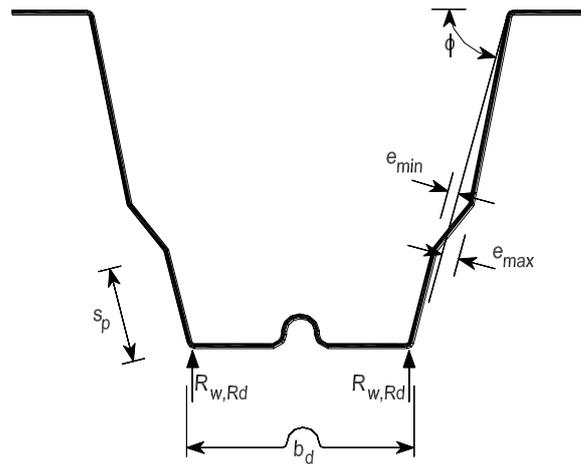
$$\kappa_{a,s} = 1,45 - 0,05 e_{max} / t \quad \text{but} \quad \kappa_{a,s} \leq 0,95 + 35 000 t^2 e_{min} / (b_d^2 s_p)$$

Dabei ist

$b_d$  die Steglänge der ebenen Teilfläche des Steges direkt am belasteten Gurt, siehe Bild 6.10.

$e_{min}$  die geringere Exzentrizität eines Steifeneckpunktes gegenüber der Verbindungslinie der Gurteckpunkte;

$s_p$  die Abwicklungslänge des belasteten Gurtes, siehe Bild 6.10;



**Abbildung 9.5.2 – Ausgesteifte Stege**

$$t = 0,71 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm}$$

$$\phi = 72$$

$$e_{\min} = 0.804 \text{ mm}$$

$$b_d = 24$$

$$\kappa_{a,s} = 1.278$$

$$\text{Pro Steg : } R_{w,Rd} = 713 \text{ N}$$

$$\text{Profilwelle} = 195$$

$$\text{Pro Meter: } \boxed{R_{w,Rd} = 6,5 \text{ kN/m}}$$

## 10. AUTOMATISCHE KONTROLLE DER SOFTWARE

Die automatische Kontrolle basiert auf dem vorherigen Beispiel.

### 10.1. Berechnung der Momententragfähigkeit:

Das berechnete Feldmoment im vorigen Beispiel beträgt:  $\boxed{M_{\text{span}} = 4.7 \text{ kNm/m}}$

Das Ergebnis der Software ist:  $\boxed{M_{\text{span}} = 4.7 \text{ kNm/m}}$

**Die Ergebnisse sind identisch.**

### 10.2. Berechnung der Tragfähigkeit am Endauflager

Die berechnete Endauflagerkraft im vorigen Beispiel beträgt:  $\boxed{R_{w,Rd} = 6.5 \text{ kN/m}}$

Das Ergebnis der Software ist:  $\boxed{R_{\text{endsupport}} = 6.5 \text{ kN/m}}$

**Die Ergebnisse sind identisch.**

## 11. LITERATUR

[1] Baik S.C, Han H.N, Lee S.H, Oh K.H, Lee D.N, Plastic behaviour of perforated sheets under biaxial stress state, LNT J. Mech. Sc., vol39, No7, pp781-793, 1997.

[2] Misiak T. and Saal H. Load bearing capacity of perforated trapezoidal sheeting, stability and ductility of steel structure, Rio de Janeiro, Brazil, Sept. 2010.

[3] Kathage K., Misiak T., Saal H., Stiffness and critical buckling load of perforated sheeting, Thin-Walled Structures, 44, 2006.

[4] Lee Y.C., Chen F.K., Yield criterion for a perforated sheet with a uniform triangular pattern of round holes and a low ligament ratio, NTU Publ., Febr. 1999.

[5] Degtyarev V.V, Degtyareva N.V., Elastic stability of uniformly compressed plates perforated in triangular pattern, Thin-Walled Structures, 52, 2012,

## ANHANG 1

Hintergrund des neuen Bemessungsverfahrens für Profilbleche mit Perforierungen:

<b>D3.1</b>	GRISPE WP3 Hintergrunddokument	Anna PALISSON (Sokol Palisson Berater)
<b>D3.2</b>	GRISPE WP3 Versuchsaufbau	Anna PALISSON (Sokol Palisson Berater)
<b>D3.3</b>	GRISPE Versuchsprotokoll	Christian FAUTH (KIT)
<b>D3.4</b>	GRISPE WP3 Analyse und Interpretation der Versuche	Anna PALISSON (Sokol Palisson Berater)
<b>D3.5</b>	GRISPE WP3 Hintergrundinformation für EN 1993-1-3 zur Bemessung von Blechen mit Perforation oder mit Öffnung	Anna PALISSON (Sokol Palisson Berater)