

GRISPE PLUS



VALORISATION OF KNOWLEDGE
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

WP N°: 3

WP Title: eLectures

Deliverable N°: 3.1 (4)

Deliverable Title: Design manual

Deliverable Date: 31th July 2018

The GRISPE PLUS project has received financial support
from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS)
under grant agreement N° 754092"

Author(s)

Thibault RENAUX, JORIS IDE

Drafting history

FINAL DRAFT – DATE: 8th of July 2018

FINAL VERSION – DATE: 31th of July 2018

Dissemination Level

PU	Public-Open	X
PP	Restricted to the Commission Services, the Coal and Steel Technical Groups and the European Committee for Standardisation (CEN)	
RE	Restricted to a group specified by the Beneficiaries	
CO	Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)	



DESIGN MANUAL FOR CORRUGATED SHEETING

RFCS funded – agreement N° 754092

FINAL VERSION

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.

STRESZCZENIE

Celem niniejszej instrukcji jest prezentacja nowej metody projektowania dotyczącej weryfikacji obliczeniowej nośności pokryć wykonanych z arkuszy blachy falistej. Metoda ta została rozwinięta w ramach międzynarodowego projektu badawczego GRISPE.

Prezentowana metoda jest zgodna z zasadami projektowania podanymi w eurokodach, w szczególności z tymi wyspecyfikowanymi w eurokodach EN 1993-1-3 i EN 1993-1-5.

Proponowane w opisywanej metodzie procedury obliczeniowe oparto na wynikach badań eksperymentalnych przeprowadzanych w latach 2013 – 2016 w ramach projektu GRISPE.

Podstawą formalną opracowania metody było zadanie D2.5 sformułowane w ogólnym zestawieniu zadań przypisanych do projektu GRISPE.

W rozdziale 1 niniejszej instrukcji podano typy profili przekroju poprzecznego blach falistych dla których rozważana metoda ma zastosowanie, opisano aktualny stan wiedzy, zestawiono podstawowe wyniki badań uzyskane w ramach projektu GRISPE a także sformułowano główne zasady i wymagania projektowe.

W rozdziale 2 zdefiniowano ustalenia wstępne, które należy brać pod uwagę w fazie przedprojektowej, w szczególności sformułowano minimalne wymagania technologiczne, które należy respektować przy kolejnych badaniach eksperymentalnych odniesionych do analizowanego zagadnienia, zwłaszcza te odniesione do ramy nośnej podpierającej badane arkusze, charakterystyk geometrycznych badanych profili oraz warunków ich podparcia.

W rozdziale 3 podano podstawowe wymagania technologiczne.

W rozdziale 4 zestawiono właściwości materiałowe odniesione zarówno do badanych arkuszy blach jak też i do łączników użytych do ich połączenia.

W rozdziale 5 scharakteryzowano obciążenia zewnętrzne oddziałujące na badane pokrycia oraz podano miarodajne kombinacje tych obciążeń.

W rozdziale 6 objaśniono szczegóły proponowanej metody obliczeniowej (podstawowe zasady, obszary zastosowań, opis jak i kiedy stosować poszczególne formuły obliczeniowe).

W rozdziale 7 zestawiono specyficzne uwarunkowania projektowe, dla których niniejsza instrukcja nie znajduje zastosowania (oddziaływanie pożaru, oddziaływanie sejsmiczne, aspekty oddziaływania na środowisko, oddziaływanie termiczne, kwestie analizy akustycznej itp.).

W rozdziale 8 podano praktyczne przykłady obliczeniowe w których zastosowano nową metodę projektowania.

W końcowej części niniejszej instrukcji podano bibliografię a także zamieszczono przesłaną do CEN propozycję odpowiedniego uzupełnienia zapisów eurokodu EN 1993-1-3.

PRZEDMOWA

Niniejszą instrukcję opracowano przy wsparciu międzynarodowego programu badawczego finansowanego w ramach funduszu RFCS numer 754092.

Proponowana do stosowania metoda obliczeniowa była prezentowana i dyskutowana w latach 2016 – 2017 w ramach tak zwanej Evolution Group dedykowanej normie EN 1993-1-3 i jest rozważana jako oficjalna propozycja do uzupełnienia zapisów tego eurokodu.

Ta instrukcja została napisana przez Thibault RENAUX i była dyskutowana na posiedzeniu Grupy Roboczej GRISPE PLUS. Członkami tej grupy były następujące osoby:

Mickael BLANC	Francja
Silvia CAPRILI	Włochy
David IZABEL	Francja
Markus KUHNENNE	Niemcy
Anna PALISSON	Francja
Valérie PRUDOR	Francja
Irene PUNCELLO	Włochy
Dominik PYSCHNY	Niemcy
Thibault RENAUX	Francja
Daniel SPAGNI	Francja

Członkiem korespondentem wskazanej grupy był przy tym:

Léopold SOKOL	Francja
---------------	---------

ZESTAWIENIE RYSUNKÓW I TABEL

Poszczególne rysunki i tablice zostały opracowane przez następujące podmioty:

Rys. 1.1.1	JORIS IDE
Rys. 1.1.2	JORIS IDE
Rys. 1.2.1	JORIS IDE
Rys. 1.2.2	Kopia z normy EN 1993-4-1
Rys. 1.2.3	Kopia z normy StBK-N5
Rys. 1.3.1	KIT / JORIS IDE
Rys. 1.3.2	KIT / JORIS IDE
Tab. 1.3	KIT
Rys. 1.3.3	KIT
Rys. 1.3.4	KIT
Rys. 1.3.5	KIT
Rys. 6.3.1.1	Kopia z normy StBK-N5
Rys. 6.3.1.2	Kopia z normy StBK-N5
Rys. 8.2	JORIS IDE
Rys. 8.4.3.1	JORIS IDE
Rys. 8.4.3.2	Kopia z normy StBK-N5
Rys. 8.5.2	JORIS IDE

SPIS TREŚCI

CEL PUBLIKACJI	7
OZNACZENIA	7
1. WPROWADZENIE	8
1.1. Typy rozważanych profili arkuszy blach falistych stosowanych w pokryciach	8
1.2. Obecny stan wiedzy	8
1.3. Główne rezultaty uzyskane w programie GRISPE	11
1.4. Ogólne wymagania i zasady projektowania	15
2. USTALENIA WSTĘPNE	16
2.1. Obszar zastosowań nowej metody obliczeniowej	16
2.2. Minimalne dyspozycje technologiczne odniesione do ramy podpierającej arkusz blachy	16
2.3. Minimalne dyspozycje technologiczne odniesione do arkusza blachy falistej	16
3. PODSTAWOWE WYMAGANIA TECHNOLOGICZNE	17
3.1. Podpory	17
3.2. Oznaczenie znakiem CE	17
4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE	17
4.1. Arkusze blachy falistej	17
4.2. Łączniki	17
4.3. Współczynniki bezpieczeństwa	17
5. ODDZIAŁYWANIA ZEWNĘTRZNE I ICH KOMBINACJE	17
6. PODSTAWY PROJEKTOWANIA	17
6.1. Zasady	17
6.2. Obszar zastosowań nowej metody projektowej	17
6.3. Procedura obliczeniowa	18
6.3.1. Uwagi ogólne co do prezentowanej procedury obliczeniowej	18
6.3.2. Procedura uproszczona, o ograniczonym obszarze zastosowań	19
7. SPECYFICZNE UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE	19
8. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY	19
8.1. Opis zastosowanej ramy i założenia co do obciążenia	20
8.1.1. Informacja na temat budynku	20
8.1.2. Założenia co do obciążenia	20
8.2. Opis zastosowanego arkusza blachy falistej	21
8.3. Weryfikacja z wykorzystaniem podejścia uproszczonego	22
8.3.1. Miarodajny efekt obciążenia	22

8.3.2.	Zastosowanie wnioskowania uproszczonego.....	22
8.4.	Weryfikacja przy użyciu podejścia szczegółowego.....	23
8.4.1.	Rozpatrywany arkusz blachy falistej.....	23
8.4.2.	Miarodajny efekt obciążenia	23
8.4.3.	Zastosowanie metody szczegółowej	23
8.5.	Weryfikacja przy użyciu arkusza kalkulacyjnego	26
8.5.1.	Informacja o zastosowanym arkuszu kalkulacyjnym.....	26
8.5.2.	Walidacja wyników uzyskanych dla danych z rozważanego przykładu obliczeniowego.....	26
BIBLIOGRAFIA		29
ANNEX: PROPOZYCJA UZUPEŁNIENIA EUROKODU PRZESŁANA DO CEN		31

CEL PUBLIKACJI

Celem niniejszej publikacji jest prezentacja nowej metody projektowania pokryć wykonanych z arkuszy stalowych blach falistych. Metoda ta jest zgodna z przepisami normy [1] i została zaproponowana jako uzupełnienie zapisów normy [2].

Proponowana metoda odnosi się jedynie do podstawowych sytuacji projektowych.

W przypadkach specyficznych (takich jak na przykład zastosowanie blach z otworami) lub też w wyjątkowych sytuacjach projektowych (oddziaływania sejsmiczne, pożar itp.) należy uwzględniać szczegółowe zapisy odpowiednich eurokodów i/lub przepisy normy [1].

OZNACZENIA

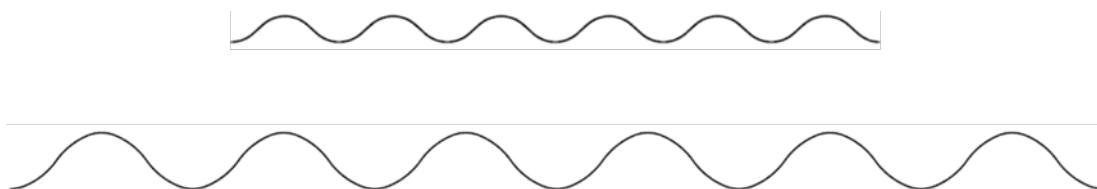
Dodatkowo, w stosunku do konwencjonalnych oznaczeń stosowanych w normie EN 1993-1-3, w niniejszej instrukcji zastosowano następujące oznaczenia:

I_y :	moment bezwładności [mm^4/mm]
R :	promień krzywizny [mm]
W_y :	wskaźnik zginania [mm^3/mm]
η :	współczynnik szczegółowej metody stosowanej do oszacowania nośności na zginanie [-]
σ_{elr} :	naprężenie skojarzone z wyboczeniem [N/mm^2]
σ_c :	naprężenie zredukowane [N/mm^2]

1. WPROWADZENIE

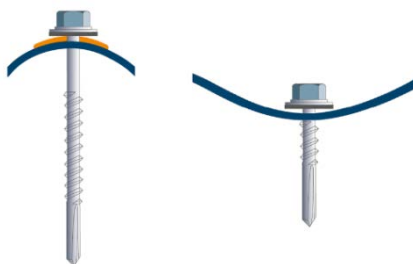
1.1. Typy rozważanych profili arkuszy blach falistych stosowanych w pokryciach

Niniejsza instrukcja dotyczy pokryć wykonywanych z arkuszy stalowych blach falistych (Rys. 1.1.1). Blachy tego typu mają ciągłą krzywiznę zamiast sekwencji odcinków płaskich, jak to ma miejsce w przypadku blach profilowanych trapezoidalnie.



Rys. 1.1.1 – Typowa geometria stalowych blach falistych

Dwa sposoby łączenia arkuszy z blach falistych są obecnie stosowane w Europie. Są to odpowiednio: łączenie przez grzbiet fałdy i łączenie przez dolinę fałdy, tak jak to pokazano na Rys. 1.1.2:



Rys. 1.1.2 – Łączenie arkusza blachy falistej przez grzbiet fałdy (z lewej) i przez dolinę fałdy (z prawej).

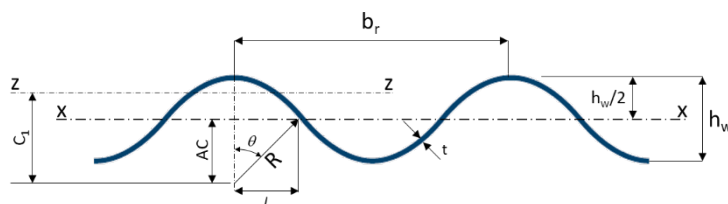
1.2. Obecny stan wiedzy

W przepisach normy [2] nie podano szczegółowych wytycznych co do projektowania pokryć wykonanych z arkuszy stalowych blach falistych, jednego z najstarszych rodzajów blach giętych na zimno i stosowanych powszechnie na rynku europejskim do wykonywania pokryć dachowych i innego typu okładzin.

Z tego względu koniecznym wydaje się zapewnienie inżynierowi na tym polu odpowiednich narzędzi projektowych, po to aby mógł on uniknąć organizowania i opracowywania dedykowanych tym zagadnieniom kampanii badań doświadczalnych. Opracowanie tego typu procedur było jedną z części międzynarodowego programu badawczego GRISPE.

W opracowaniu wykorzystano konwencjonalną teorię zginania pierwszego rzędu ponieważ, z uwagi na ciągłą krzywiznę arkuszy, nie oczekuje się przypadków ich zniszczenia przez lokalną utratę stateczności.

Opierając się na konwencjonalnej analizie tego typu blach w pierwszym kroku należy ustalić wartość momentu statycznego rozważanego arkusza blachy, pokazanego na Rys. 1.2.1, o następujących charakterystykach geometrycznych:



Rys. 1.2.1 – Parametry geometryczne przekroju poprzecznego arkusza blachy rozważanego w niniejszej instrukcji.

- Promień krzywizny: $R = 5 \cdot h_w / 4$;
- Wysokość fałdy $l = h_w$;
- kąt θ : $\sin \theta = l / R$;
- Odległość pomiędzy środkiem krzywizny pojedynczego łuku i jego środkiem ciężkości, przez który poprowadzono oś z-z: $C_1 = (R \cdot \sin \theta) / \theta$;
- Odległość pomiędzy środkiem krzywizny pojedynczego łuku i położeniem osi x-x: $AC = R - (h_w / 2)$;

Na tej podstawie wyznaczono moment statyczny jednej czwartej przekroju poprzecznego:

$$I'_{xx} = R^3 \cdot \left(\frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{(\sin \theta)^2}{\theta} \right) + (R \cdot \theta) \left[C_1 - \left(R - \frac{h_w}{2} \right) \right]^2$$

Stąd odpowiedni wskaźnik zginania ma wartość:

$$W_{xx} = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_R \cdot h_w / 2}$$

W normie niemieckiej [3], jeżeli nie ma zagrożenia wyboczeniem, niektóre charakterystyki przekroju podaje się w funkcji stosunku wysokość fałdy/promień krzywizny.

W pracy [4] można znaleźć analizę, w której wyniki konwencjonalnych obliczeń odnosi się do analogicznych rezultatów uzyskanych z symulacji MES. W analizie tej oblicza się współczynnik redukcji χ służący do wyznaczenia nośności fragmentu powłoki cylindrycznej. W niniejszych rozważaniach pozostaje sprawdzić czy faliście profilowane arkusze blachy stalowej odpowiadają ograniczeniom krzywizny założonym w opracowaniu CTICM. Kolejne etapy tej analizy są przedstawione poniżej:

- Parametr krzywizny: $Z = b^2 / (R \cdot t)$, gdzie b jest rozpiętością fałdy, R – promieniem krzywizny i t - grubością blachy arkusza;
- Eulerowskie naprężenie krytyczne:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 ;$$

- Współczynnik wyboczeniowy:

$$k_c^{(Z)} = \frac{k_c^{plate}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{48 \cdot (1-\nu^2)}{\pi^4 \cdot (k_c^{plate})^2} \cdot Z^2} \right) \text{ przy czym } k_c^{plate} = 4 ;$$

- Naprężenie krytyczne z uwagi na wyboczenie:

$$\sigma_{cr}^{(Z)} = k_c^{(Z)} \cdot \sigma_E;$$

- Smukłość względna: $\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}^{(Z)}}$;
- Pozostałe parametry wykorzystywane do wyznaczenia współczynnika χ : $\bar{\lambda}_0 = 0,33$, $\beta = 0,73$ i α_Z odczytywane z tablic jako funkcja parametru Z ;
- Współczynnik redukcyjny:

$$\chi = \frac{2\beta}{\beta + \bar{\lambda} + \sqrt{(\beta + \bar{\lambda})^2 - 4\beta(\bar{\lambda} - \alpha_Z(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0))}};$$

- Napężenie graniczne: $\sigma_u = \chi \cdot f_y$.

W celu ilustracji proponowanej metody obliczeniowej opracowano odpowiedni przykład numeryczny pokazany w rozdziale 8.5 niniejszej instrukcji.

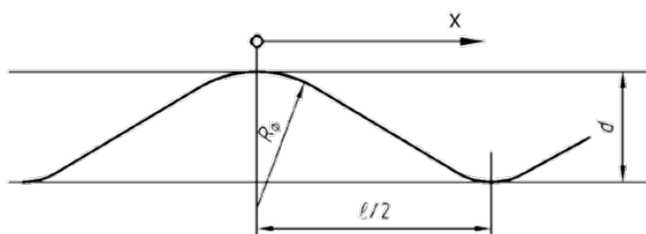
W normie [5], która jest normą dedykowaną dla silosów, podano odpowiednie relacje dla obliczenia sztywności, momentu bezwładności oraz nośności przekroju poprzecznego arkusza blachy falistej. W szczególności:

- Sztywność przy osiowym ściskaniu:

$$C_y = Et \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right);$$

- Momenty bezwładności: $I_y = 0,13 \cdot t \cdot d^2$ przy oznaczeniach jak dla konstrukcji powłokowych oraz $I_x = 0,13 \cdot t \cdot h_w^2$ z oznaczeniami typowymi dla normy [2];

Przy następujących parametrach geometrycznych (Rys. 1.2.2.):



Rys. 1.2.2 – Parametry geometryczne przekroju poprzecznego arkusza blachy falistej z oznaczeniami stosowanymi w normie EN 1993-4-1.

można wyznaczyć obliczeniową nośność na zginanie $M_{c,Rd}$, która jest dana zależnością:

$$M_{c,Rd} = \frac{0,13 \cdot t \cdot h_w^2}{\frac{h_w}{2}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,26 \cdot t \cdot h_w \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

W normie szwedzkiej [6] podano podejście umożliwiające wyznaczenie granicznej nośności na zginanie dla przekroju poprzecznego arkusza blachy falistej, lub też blachy o podobnym kształcie tego przekroju, uwzględniające kwestie zagrożenia lokalną utratą stateczności.

W zależności od wartości stosunku promienia krzywizny r do grubości t rozpatrywanego arkusza blachy obliczenie charakterystycznej nośności na zginanie ma odmienny charakter:

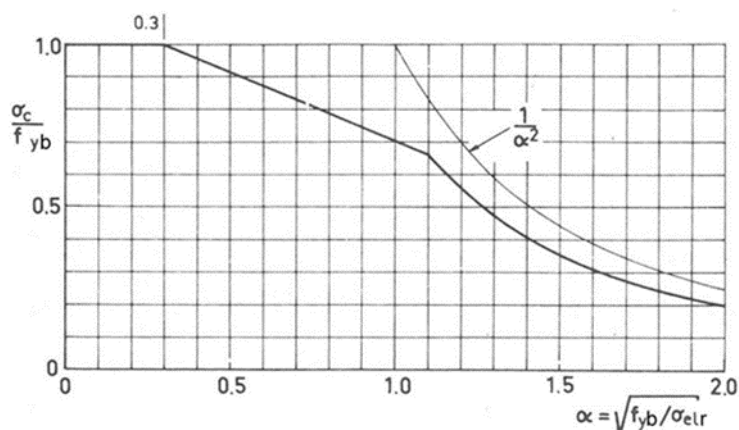
W przypadku gdy $r/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$ nie ma potrzeby weryfikacji zagrożenia wystąpieniem lokalnej utraty stateczności, co oznacza że charakterystyczna nośność na zginanie jest wyznaczana z zależności: $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb}$.

W przypadku gdy $r/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$ charakterystyczną nośność na zginanie wyznacza się z uwzględnieniem zredukowanego naprężenia ściskającego, stosując następujące kroki obliczeniowe:

- Współczynnik redukcyjny η : $\eta = 0,19 + 0,67/\sqrt{1 + r/(100 \cdot t)}$;
- Zredukowane naprężenie skojarzone z wyboczeniem: $\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t/r$;
- Współczynnik smukłości: $\alpha = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{elr}}$;
- Jeżeli $\alpha \leq 0,30$ to $\sigma_c = f_{yb}$;
- Jeżeli $0,30 < \alpha < 1,10$ to $\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \alpha) \cdot f_{yb}$;
- Jeżeli $1,10 \leq \alpha$ to $\sigma_c = \frac{0,8}{\alpha^2} \cdot f_{yb}$.

Co w efekcie daje: $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Na Rys. 1.2.3. pokazano zależność pomiędzy granicznym naprężeniem ściskającym i współczynnikiem smukłości, specyfikowaną w normie [6].



Rys. 1.2.3 – Zależność pomiędzy granicznym naprężeniem ściskającym i współczynnikiem smukłości w odniesieniu do kwestii zagrożenia lokalną utratą stateczności pojedynczej cylindrycznej fałdy rozpatrywanego arkusza blachy.

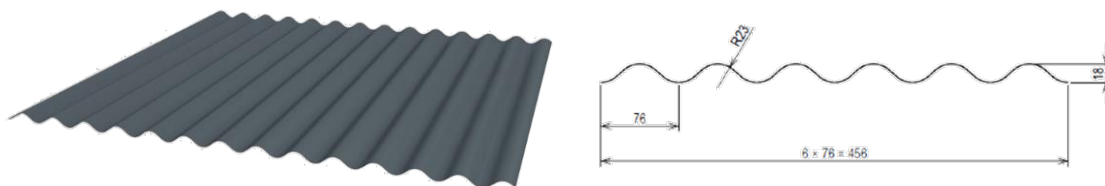
Moment bezwładności, jeśli jest używany do wyznaczania deformacji blachy w stanie granicznym użytkowalności, powinien być wyznaczany według procedury analogicznej do tej, której użyto przy wyznaczaniu nośności na zginanie, ale przy wytrzymałości zredukowanej do poziomu $f_{yb}/1,5$.

1.3. Główne rezultaty uzyskane w programie GRISPE

Celem programu GRISPE było opracowanie procedury obliczeniowej służącej do wyznaczenia nośności arkusza blachy falistej zarówno w przekrojach pomiędzy podporami jak i w przekrojach podporowych, nad podporą pośrednią i nad podporami skrajnymi.

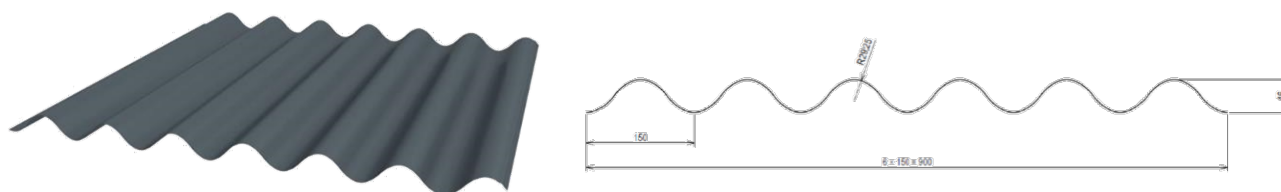
Do badań eksperymentalnych wybrano dwa typy blach falistych, z przekrojami poprzecznymi uznanymi za reprezentatywne dla najczęściej stosowanych pokryć.

- W pierwszym przypadku była to blacha niskoprofilowa, o wysokości fałdy równej 18 mm, promieniu krzywizny tej fałdy wynoszącym 23 mm oraz o rozstawie pomiędzy sąsiadującymi ze sobą grzbietami fałd równym 76 mm. Pokazano ją na Rys. 1.3.1.



Rys. 1.3.1 – Wybrana do testów niskoprofilowa blacha falista.

- W drugim przypadku była to blacha wysokoprofilowa, o wysokości fałdy równej 46 mm, promieniu krzywizny tej fałdy wynoszącym 29,25 mm oraz o rozstawie pomiędzy sąsiadującymi ze sobą grzbietami fałd równym 150 mm. Pokazano ją na Rys. 1.3.2.



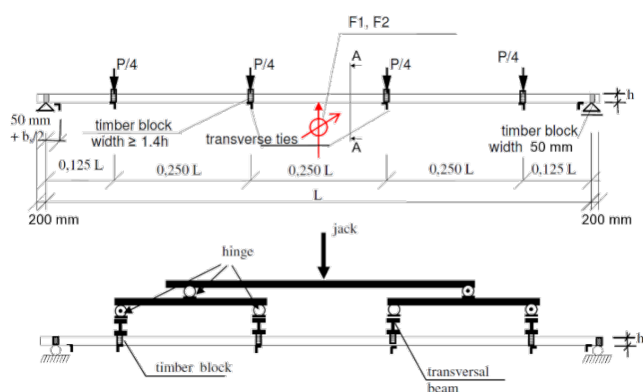
Rys. 1.3.2 – Wybrana do testów wysokoprofilowa blacha falista.

Wykonano łącznie 95 testów pokrycia z blachy falistej. Wyznaczano nośność na zginanie w przekrojach pomiędzy podporami oraz nośność nad podporą pośrednią ze względu na interakcję oddziaływania momentu zginającego i reakcji podporowej. Badania dotyczyły testów pojedynczego przęsła ze względu na zginanie przy ustawieniu blachy jako pozytyw i przy obciążeniu typu grawitacyjnego, testów podpory pośredniej dla obciążenia typu grawitacyjnego oraz dla obciążenia tego samego typu ale skierowanego w górę, a także testów podpory skrajnej wraz z testami czystego ścinania przeprowadzanych dla obciążenia typu grawitacyjnego w celu wyznaczenia charakterystycznej nośności blachy w tym przekroju. Uzyskane wyniki zestawiono w Tabeli 1.3. Schematy samych badań pokazano na Rys. 1.3.3, 1.3.4 i 1.3.5.

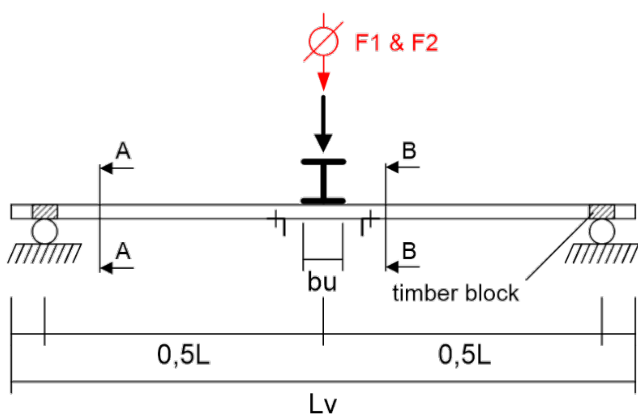
Type of test	Thickness [mm]	Support width [mm] / Fastening	Span [mm]		Number of tests	
			18/76	46/150	18/76	46/150
Single span test with gravity loading	0.63	-	1500	2000	3	6
	1.00	-	2000	3000	3	3
Internal support tests with gravity loading	0.63	10	400	600	2	2
			800	1000	2	2
		40	400	600	2	2
			800	1000	2	2
	1.00	10	400	600	2	2
			1000	1200	2	2
		40	400	600	2	2
			1000	1200	2	2
Internal support tests with uplift loading	0.63	valley	400	600	2	2
			800	1000	2	2
		crest	400	600	2	2
			800	1000	2	2
	1.00	valley	400	900	2	2
			1000	1400	2	2
		crest	400	900	2	2
			1000	1400	2	2
End support tests with gravity loading	0.63	-	1000	1050	4	3
	1.00	-	1000	1050	4	3
Shear test	0.63	-	1000	1000	1	1

Tabela 1.3 – Wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla arkuszy z blachy falistej w ramach program GRISPE.

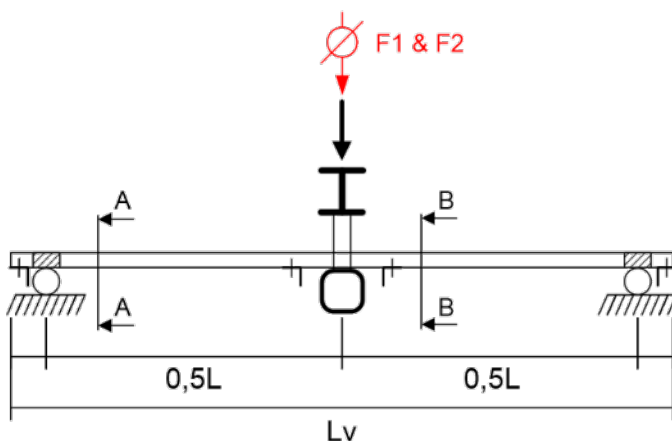
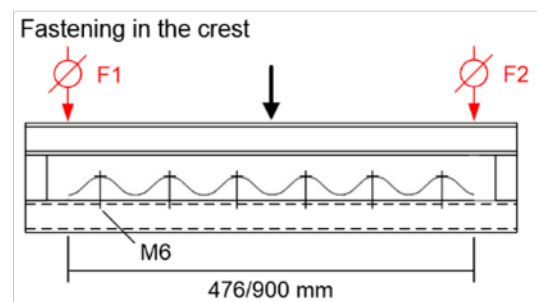
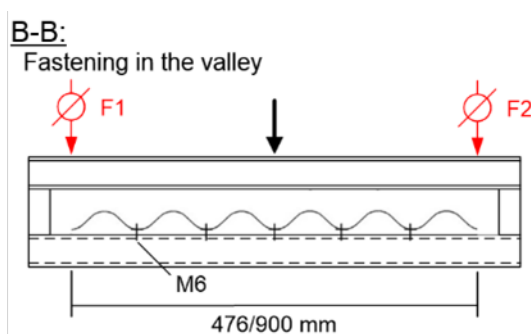
Podpora pośrednia w testach przeprowadzanych dla obciążenia skierowanego w górę była skonstruowana dla dwóch serii badań. W pierwszej z tych serii była ona połączona z grzbietami fałd natomiast w drugiej – z ich dolinami (patrz rozdział 1.1).



Rys. 1.3.3 – Schemat badania przeprowadzanego w teście pojedynczego przęsła i przykład zniszczenia arkusza blachy uzyskany w tym badaniu.



Rys. 1.3.4 – Schemat badania przeprowadzanego w teście podpory pośredniej przy skierowanym w dół obciążeniu typu grawitacyjnego oraz przykład zniszczenia arkusza blachy uzyskany w tym badaniu.



Rys. 1.3.5 – Schemat badania przeprowadzanego w teście podpory pośredniej w przypadku gdy podpora ta jest połączona z dolinami fałd, przy obciążeniu skierowanym w górę, oraz przykład zniszczenia arkusza blachy uzyskany w tym badaniu.

Do planu badań włączono również serię testów statycznej próby rozciągania, przeprowadzanych w celu określenia właściwości materiałowych stali konstrukcyjnej zastosowanej w analizowanych arkuszach blach.

Analiza i interpretacja wyników uzyskanych na podstawie przeprowadzonych testów była nakierowana na wyznaczenie charakterystycznych wartości nośności przekroju arkusza blachy o falistym lub też podobnym do falistego typie profilu.

W odniesieniu do nośności na czyste ścinanie wykazano eksperymentalnie że w testowanych arkuszach blachy nośność ta była zawsze większa niż nośność wymagana do przeniesienia przyłożonych obciążeń.

Dla prostego zginania arkusza blachy, poddanego oddziaływaniu obciążenia typu „parcie”, zaproponowano dwie alternatywne formuły:

- pierwszą, uwzględniającą wskazania pkt. 4.4 normy EN 1993-4-1, opartą na równowaznej sztywności giętnej,
- drugą, uwzględniającą wskazania normy szwedzkiej, opartą na wyznaczeniu naprężenia skojarzonego z wyboczeniem.

Bezpośrednie zastosowanie obu wskazanych powyżej metod umożliwia arkusz kalkulacyjny na pisany w środowisku Excel. Został on opracowany w ramach projektu GRISPE.

W odniesieniu do zachowania się badanych arkuszy blach nad podporą pośrednią przeprowadzone testy nie dały jasnej odpowiedzi co do rekomendowanej zasady weryfikacji obliczeniowej. Wpływ na końcowy wynik miało bowiem w tym przypadku wiele czynników i wydaje się, że na tym polu potrzebne są dalsze eksperymenty. Parametrami wpływającymi w tym przypadku na redukcję granicznego momentu zginającego były:

- wskaźnik kwantyfikujący część przekroju poprzecznego która jest w bezpośrednim kontakcie z podporą;
- rozstaw pomiędzy sąsiadującymi ze sobą grzbietami fałd a także długości samych fałd;
- typ zastosowanej podpory i jej szerokość;
- lokalizacja i kierunek obciążenia oddziałującego na podporę, stosunek wartości reakcji podporowej do wartości przypadającego na podporę obciążenia.

To czy oddziaływanie reakcji podporowej ma charakter parcia czy ssania odgrywa bardzo istotną rolę. Jeżeli bowiem reakcja podporowa oddziałuje na przekrój poprzeczny arkusza blachy jako siła rozciągająca to nie ma ona wpływu na wartość momentu zginającego.

W odniesieniu do badań nośności podpory skrajnej w tym w szczególności jej odporności na czyste ścinanie rezultaty przeprowadzonych badań okazały się być zbyt rozbieżne aby wypracować jednolitą rekomendację projektową.

Podsumowując, w ramach badań przeprowadzonych w projekcie GRISPE wypracowano i zweryfikowano dwie metody pomocne w projektowaniu nośności blach falistych na ich zginanie w przekroju przęsłowym. W odniesieniu do wszystkich innych badanych sytuacji projektowych liczba czynników wpływających na ostateczny wynik okazała się być zbyt duża na to aby wypracować jednolitą rekomendację dla projektanta. Konieczne wydaje się zatem przeprowadzenie na tym polu kolejnych testów.

Podjęto decyzję, że metoda obliczeniowa rozwijana dla zginania arkusza blachy falistej w pojedynczym przęśle, przy spełnieniu zasad statycznej wyznaczalności, może stanowić podstawę do jej włączenia, w charakterze uzupełnienia, do dotychczasowych zapisów odpowiednich eurokodów.

1.4. Ogólne wymagania i zasady projektowania

Procedura obliczeniowa prezentowana w niniejszej instrukcji może być stosowana jedynie do przypadku wyznaczania obliczeniowej nośności na zginanie M_{Rd} of arkusza blachy falistej podpartego

na dwóch podporach, prowadzonego według przepisów normy [7] wraz z poprawkami [8] i [9]. Obliczeniowe wartości efektów oddziaływań zewnętrznych muszą być przyjmowane w zgodności z odpowiednimi częściami normy [10] wraz z poprawką [11], normy [12] wraz z poprawkami [13] i [14], a także normy [15] wraz z poprawkami [16] i [17].

Poszczególne procedury obliczeniowe respektują zasady ogólne podane w normie [18] wraz z poprawkami [19] i [20] oraz podstawy projektowania zdefiniowane w części 2 normy [2] oraz w poprawce [21].

2. USTALENIA WSTĘPNE

2.1. Obszar zastosowań nowej metody obliczeniowej

W niniejszej instrukcji prezentowana jest obliczeniowa metoda weryfikacji nośności pokrycia wykonanego ze stalowych blach falistych, zgodna z wymogami normy [1].

Ta metoda jest opracowana przy założeniu spełnienia minimalnych dyspozycji technologicznych. Szczegóły tych wymagań omówiono w paragrafach 2.2 i 2.3.

W tej instrukcji nie rozważa się sytuacji projektowych i kombinacji obciążeń związanych z montażem konstrukcji ani też z jej utrzymaniem w stanie zdatności.

Zasady projektowe zastosowane w niniejszej instrukcji są ważne jedynie w przypadku zachowania tolerancji wymiarowych w zakresie zgodnym z przepisami norm [2] i [21].

2.2. Minimalne dyspozycje technologiczne odniesione do ramy podpierającej arkusz blachy

Arkusz blachy falistej musi być oparty na dwóch podporach i obciążony obciążeniem równomiernie rozłożonym.

Bezpośredni kontakt arkusza blachy z betonową podporą jest niedopuszczalny.

2.3. Minimalne dyspozycje technologiczne odniesione do arkusza blachy falistej

Arkusze blachy falistej mieszczą się w dopuszczalnych tolerancjach geometrycznych i mają stałą nominalną grubość na całej swojej długości. Poza tym mają albo stały przekrój poprzeczny albo też przekrój poprzeczny liniowo zbieżny na długości arkusza.

Arkusze blachy falistej mają przekrój poprzeczny o ciągłej krzywiźnie, w odróżnieniu od sekwencji płaskich paneli typowej dla blach profilowanych trapezoidalnie.

Grubość blachy t jest obliczeniową grubością stali (grubością stalowego rdzenia pomniejszoną, jeśli zachodzi taka potrzeba, o ewentualną tolerancję, tak jak to opisano w pkt. 3.2.4 normy [2]), o ile nie postanowiono inaczej.

Przekrój poprzeczny blachy falistej musi spełniać następujące wymagania geometryczne:

- Stosunek: $r/t \leq 0,1 \cdot E/f_{yb}$;
- Rozstaw pomiędzy grzbietami sąsiadujących ze sobą fałd: $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$;
- Wysokość fałdy: $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$;

- Minimalna grubość rdzenia stalowego: 0,55 mm.

3. PODSTAWOWE WYMAGANIA TECHNOLOGICZNE

3.1. Podpory

Podpory, jeśli wykonano je ze stali muszą spełniać wymagania norm [18] i [20], jeśli natomiast wykonano je z drewna – wymagania [22] do [25].

3.2. Oznaczenie znakiem CE

Arkusze blach muszą być znakowane znakiem CE, zgodnie z wymaganiami normy [1].

4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE

4.1. Arkusze blachy falistej

Właściwości materiałowe odniesione do blachy falistej powinny spełniać wymagania rozdziału 3 normy [2], przy czym minimalnym gatunkiem stali z której wykonano blachę jest stal S 320 GD + Z.

4.2. Łączniki

Właściwości materiałowe w odniesieniu do zastosowanych łączników powinny spełniać wymagania rozdziału 8 normy [2].

4.3. Współczynniki bezpieczeństwa

Współczynniki bezpieczeństwa zastosowane do obliczeń powinny spełniać wymagania rozdziału 2 normy [2].

5. ODDZIAŁYWANIA ZEWNĘTRZNE I ICH KOMBINACJE

Oddziaływania zewnętrzne i ich kombinacje powinny być rozpatrywane w zgodności z przepisami następujących dokumentów:

- norm [8] i [9] w odniesieniu do podstaw projektowania i specyfikacji reguł kombinacji obciążeń,
- norm [10] i [11] w odniesieniu do ciężaru własnego i obciążeń użytkowych,
- norm [12] i [14] w odniesieniu do obciążenia śniegiem,
- norm [15] i [17] w odniesieniu do obciążenia wiatrem.

6. PODSTAWY PROJEKTOWANIA

6.1. Zasady

Prezentowana w niniejszej instrukcji nowa metoda projektowania została opracowana aby umożliwić wyznaczenie sztywności giętnej i nośności na zginanie arkusza blachy falistej z sinusoidalnie profilowanym przekrojem poprzecznym (lub też profilowanym w sposób zbliżony do sinusoidalnego).

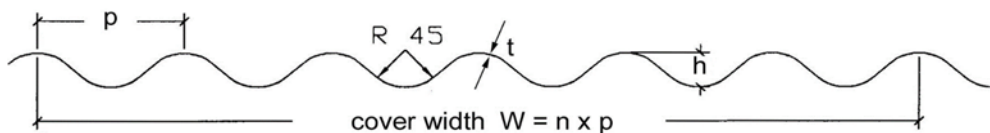
6.2. Obszar zastosowań nowej metody projektowej

Prezentowana metoda jest ważna dla arkusza blachy falistej opartego na dwóch podporach i obciążonego w sposób równomiernie rozłożony.

6.3. Procedura obliczeniowa

6.3.1. Uwagi ogólne co do prezentowanej procedury obliczeniowej

W prezentowanej procedurze uwzględniono zagrożenie wystąpienia lokalnej utraty stateczności w ściskanej części przekroju poprzecznego.



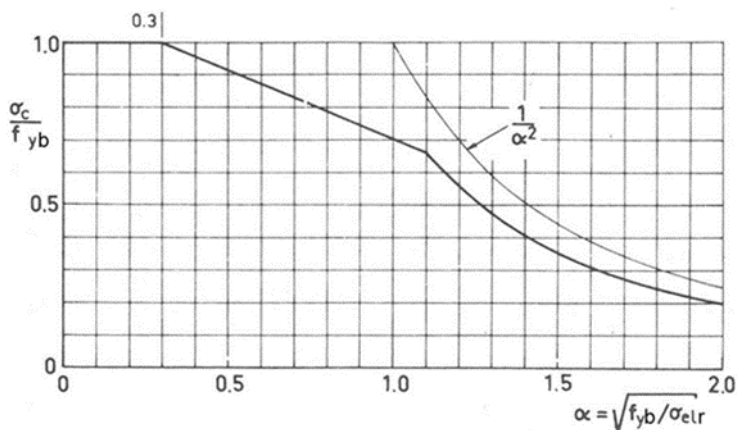
Rys. 6.3.1.1 – Typowy przekrój poprzeczny blachy falistej

Możliwe są dwie alternatywne sytuacje obliczeniowe:

- Pierwsza, gdy zachodzi $R/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$ – w tej sytuacji nie ma zagrożenia wystąpieniem lokalnej utraty stateczności, co oznacza że charakterystyczna nośność arkusza na zginanie wyznaczana jest z zależności : $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb}$;
- Druga, gdy zachodzi $R/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$ – w tej sytuacji charakterystyczną nośność arkusza na zginanie wyznacza się stosując zredukowane naprężenie ściskające σ_c . Na tej podstawie zachodzi $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Przy czym:

- Smukłość: $\lambda = (f_{yb}/\sigma_{elr})^{0,5}$;
- Naprężenie skojarzone z wyboczeniem: $\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t/R$;
- Współczynnik redukcyjny η : $\eta = 0,19 + 0,67/(1 + R/(100 \cdot t))^{0,5}$;
- W przypadku gdy $\lambda \leq 0,30$: $\sigma_c = f_{yb}$;
- W przypadku gdy $0,30 < \lambda < 1,10$: $\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \lambda) \cdot f_{yb}$;
- W przypadku gdy $\lambda \geq 1,10$: $\sigma_c = (0,8/\lambda^2) \cdot f_{yb}$.



Rys. 6.3.1.2 – *Relacja pomiędzy granicznym naprężeniem ściskającym a współczynnikiem smukłości stosowana do weryfikacji zagrożenia wystąpieniem lokalnej utraty stateczności w cylindrycznej części fałdy badanego arkusza blachy.*

Moment bezwładności, jeśli jest używany do wyznaczania deformacji blachy w stanie granicznym użyteczności, powinien być wyznaczany według procedury analogicznej do tej, której użyto przy wyznaczaniu nośności na zginanie, ale przy wytrzymałości zredukowanej do poziomu $f_{yb}/1,5$.

6.3.2. Procedura uproszczona, o ograniczonym obszarze zastosowań

W przypadku spełnienia następujących warunków początkowych:

- Arkusz blachy falistej pracuje jako ustrój jednoprzęsłowy,
- Obciążenie przyłożone do arkusza jest równomiernie rozłożone,
- Spełniona jest nierówność $R/t \leq 0,1 \cdot E/f_y$,
- Grubość stalowego rdzenia blachy spełnia warunek $t_{cor} \geq 0,55 \text{ mm}$,
- Wysokość fałdy spełnia warunek $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$,
- Rozstaw pomiędzy grzbietami sąsiadujących ze sobą fałd spełnia warunek $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$,

Można w obliczeniach stosować następujące uproszczone oszacowania:

- Moment bezwładności przekroju poprzecznego o jednostkowej szerokości: $I_y = 0,13 \cdot t \cdot h^2$;
- Wskaźnik zginania o jednostkowej szerokości: $W_y = 0,26 \cdot t \cdot h$;
- Charakterystyczna nośność na zginanie: $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb}$

7. SPECYFICZNE UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE

Niniejsza instrukcja nie ma zastosowania do następujących, specyficznych przypadków analizy:

- Analiza bezpieczeństwa odniesionego do sytuacji pożaru: w tego typu analizie należy stosować narodowe wytyczne normowe, w zgodności z przepisami norm EN 1991-1-2 i EN 1993-1-2;
- Analiza bezpieczeństwa odniesiona do oddziaływań sejsmicznych: w tego typu analizie należy stosować narodowe wytyczne normowe, w zgodności z przepisami normy EN 1998-1;
- Analiza odniesiona do aspektów środowiskowych: w tym przypadku należy stosować się do narodowych przepisów normowych i prawnych;
- Analiza bezpieczeństwa odniesiona do oddziaływań termicznych: w tego typu analizie należy stosować narodowe wytyczne normowe, w zgodności z przepisami normy EN 1991-1-5;
- Analiza odniesiona do zagadnień akustyki: w tym przypadku należy stosować się do narodowych przepisów normowych i prawnych.

Powyższe ograniczenia należy stosować również we wszystkich przypadkach, których nie można zakwalifikować w sposób jednoznaczny do sytuacji opisanych w niniejszej instrukcji.

8. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

8.1. Opis zastosowanej ramy i założenia co do obciążenia

Niniejszy przykład dotyczy prostego dachu ukośnego umieszczonego na budynku. Konstrukcję nośną tego dachu stanowią belki stalowe wykonane z kształtownika IPE 80, rozstawione co 1,15 m. Weryfikacja obciążenia wiatrem dotyczy obszaru dachu zlokalizowanego w strefach H i I, zgodnie z wytycznymi punktu 7.2.4 normy EN 1991-1-4.

Pokrycie dachu wykonano z arkuszy blachy falistej o nominalnej grubości 0,65 mm.

8.1.1. Informacja na temat budynku

Rozpatrywany budynek, o nazwie "budynek 1", ma 16 m wysokości i jest zlokalizowany w przemysłowym terenie w pobliżu Ostendy (Belgia). Kąt nachylenia dachu względem poziomu wynosi 45°.

Dla analizowanego terenu wartość bazowa prędkości wiatru $v_{b,0}$ wynosi 26 m.s⁻¹.

Założono, że teren na którym zlokalizowano budynek należy do kategorii 0.

Współczynniki, kierunkowy c_{dir} i sezonowy c_{season} , są założone jako równe 1. Współczynnik związany z orografią terenu $c_0(z)$ również założono na poziomie 1.

Wartość 1 przyjęto także dla współczynnika turbulencji k_t .

W odniesieniu do gęstości powietrza ρ , przyjęto wartość $\rho = 1,25$ kg/m³.

Zgodnie z normą [12] przyjęto współczynnik ekspozycji $C_e = 0,8$.

Współczynnik kształtu dachu dla obliczeń obciążenia śniegiem ma wartość 0,8.

8.1.2. Założenia co do obciążenia

Niniejszy przykład nie dotyczy fazy montażowej. W fazie użytkowania budynku rozpatruje się efekty oddziaływania wiatru i obciążeń stałych.

Efekty oddziaływania śniegu są pomijane ze względu na to, że wartość charakterystyczna obciążenia śniegiem na gruncie s_k na poziomie morza, zgodnie z normą [12], wynosi jedynie 0,2 kN/m². Dodatkowe uwzględnienie współczynnika kombinacji $\Psi_0 = 0,5$ daje dla badanego obszaru, zgodnie z belgijskim narodowym aneksem do normy [12], wartość obciążenia $s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,064$ daN/m², zanedbywalną w dalszych rozważaniach.

Określenie wartości oddziaływania wiatru, zgodne z przepisami norm [15] i [17]

Bazowa prędkość wiatru $v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0} = 1,00 \cdot 1,00 \cdot 26 = 26$ m.s⁻¹.

Wyznaczenie prędkości średniej $v_m(z)$:

- Kategoria terenu 0: $z_0 = 0,003$ m oraz $z_{min} = 1$ m;
- $z_{0,II} = 0,05$ m;
- Współczynnik terenowy $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} = 0,156$;
- Wskaźnik szorstkości $c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,156 \cdot \ln\left(\frac{16}{0,003}\right) = 1,339$;
- $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 1,339 \cdot 1,00 \cdot 26 \approx 34,8$ m.s⁻¹;

Wskaźnik turbulencji $I_v(z) = \frac{k_t}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} = \frac{1,00}{1,00 \cdot \ln(16/0,003)} = 0,117$

Wartość szczytowa ciśnienia prędkości wiatru $q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,117] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 34,8^2 \approx 1,38 \text{ kN/m}^2$

Współczynniki ciśnienia dla dachu jednospadowego:

- $\theta = 45^\circ$;
- Dla parcia zewnętrznego $c_{pe,10}$:
 - o W strefie H:
 - Przy kierunku 0° : 0,6;
 - Przy kierunku 180° : -0,7;
 - Przy kierunku 90° : -1,0;
 - o W strefie I: -0,9;
- Dla parcia wewnętrznego $c_{pi} = +0,2/-0,3$;
- Współczynniki netto $c_{p,net}$:
 - o Dla parcia wiatru: $c_{p,net} = 0,9$;
 - o Dla ssania wiatru: $c_{p,net} = -1,2$.

Obciążenie od oddziaływania wiatru W_{50} :

- W przypadku parcia wiatru: $W_{50}^+ = 1,24 \text{ kN/m}^2$
- W przypadku ssania wiatru: $W_{50}^- = -1,65 \text{ kN/m}^2$

Miarodajne kombinacje obciążeń, na podstawie norm [8], [9] oraz belgijskiego aneksu narodowego do normy [8]

Najbardziej niekorzystna kombinacja uwzględniająca parcie wiatru jest opisana formułą:
 $Q^+ = 1,50 \cdot W_{50}^+ + 1,35 \cdot g_0 = 1,50 \cdot 1,24 + 1,35 \cdot 0,061 \approx 1,94 \text{ kN/m}^2$

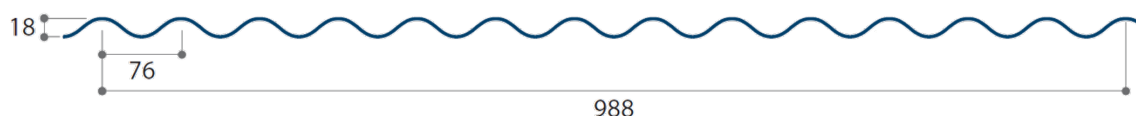
Najbardziej niekorzystna kombinacja uwzględniająca ssanie wiatru jest opisana formułą:
 $Q^- = 1,50 \cdot W_{50}^- + g_0 = 1,50 \cdot (-1,65) + 0,061 \approx -2,41 \text{ kN/m}^2$

Wartość obciążenia ciężarem własnym wyznaczono na podstawie pkt. 8.2 niniejszej instrukcji.

Kombinacja obciążeń miarodajna do weryfikacji stanu granicznego użyteczności ma postać:
 $Q_{SLS} = W_{50}^+ + g_0 = 1,30 \text{ kN/m}^2$.

8.2. Opis zastosowanego arkusza blachy falistej

Do rozważań przyjęto blachę falistą o rozstawie sąsiadujących ze sobą grzbietów fałd równym 76 mm, wysokości fałdy równej 18 mm i nominalnej grubości równej 0,65 mm.



Rys. 8.2 – Przekrój poprzeczny rozpatrywanego w przykładzie arkusza blachy fałdowej.

Wskazaną powyżej blachę wykonano ze stali gatunku S 320 GD + Z 275. Ciężar własny tej blachy wynosi 0,061 kN/m².

Przyjęto, że częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{M0} ma wartość równą 1,00.

8.3. Weryfikacja z wykorzystaniem podejścia uproszczonego

8.3.1. Miarodajny efekt obciążenia

Rozważany jest ustrój jednoprzęsłowy o rozpiętości przęsła równej 1,15 m, poddany działaniu obciążenia równomiernie rozłożonego.

Przy rozpatrywaniu kombinacji obciążeń uwzględniającej efekt parcia wiatru, wyspecyfikowanej w punkcie 8.1.2 niniejszej instrukcji, miarodajny moment zginający ma wartość:
 $M_{c,Ed} = (Q^+ \cdot L^2)/8 = (1,94 \cdot 1,15^2)/8 = 0,321 \text{ kNm/m}$.

Przy rozpatrywaniu kombinacji obciążeń uwzględniającej efekt ssania wiatru, wyspecyfikowanej w punkcie 8.1.2 niniejszej instrukcji, miarodajny moment zginający ma wartość:
 $M_{c,Ed} = (Q^- \cdot L^2)/8 = (2,41 \cdot 1,15^2)/8 = 0,399 \text{ kNm/m}$.

Dla rozpatrzenia warunku stanu granicznego użytkowalności przyjęto jako kryterium osiągnięcie poziomu L/150, co dało maksymalne dopuszczalne ugięcie o wartości 7,67 mm.

8.3.2. Zastosowanie wnioskowania uproszczonego

Wychodząc z nominalnej grubości blachy, po uwzględnieniu tolerancji, przyjęto, że grubość obliczeniowa ma wartość $t = 0,60 \text{ mm}$.

Przed rozpoczęciem obliczeń sprawdzono czy spełniony jest warunek $R/t \leq 0,1 \cdot E/f_{yb}$:

- Ponieważ: $R = 5h_w/4 = 22,5 \text{ mm}$;
- Co daje: $R/t = 37,50$;
- A zatem: $0,1 \cdot E/f_{yb} = 0,1 \cdot \frac{210\,000}{320} = 65,625$ – warunek jest spełniony.
- Moment bezwładności przekroju poprzecznego o jednostkowej szerokości:
 $I_y = 0,13 \cdot t \cdot h^2 = 0,13 \cdot 0,60 \cdot 18^2 = 25,27 \text{ mm}^4/\text{mm}$;
- Wskaźnik zginania przekroju poprzecznego o jednostkowej szerokości:
 $W_y = 0,26 \cdot t \cdot h = 0,26 \cdot 0,60 \cdot 18 = 2,81 \text{ mm}^3/\text{mm}$;
- Charakterystyczna nośność na zginanie: $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb} = 2,808 \cdot 320 = 0,899 \text{ kN.m/m}$.

A zatem obliczeniowa nośność na zginanie: $M_{c,Rd} = 0,899 \text{ kN.m/m}$.

Założono, uwzględniając symetrię przekroju poprzecznego, że wartości obliczeniowej nośności na zginanie dla rozpatrywanego arkusza blachy są identyczne w przypadku obciążenia skierowanego w dół i w przypadku obciążenia skierowanego w górę.

Weryfikacja warunku nośności i warunku użytkowalności

Warunek nośności w przypadku obciążenia skierowanego w dół: $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,321}{0,899} = 0,357 \leq 1,00$;

Warunek nośności w przypadku obciążenia skierowanego w górę: $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,399}{0,899} = 0,444 \leq 1,00$.

Oba warunki są spełnione.

Ugięcie jednoprzęsłowego arkusza blachy opartego na dwóch skrajnych podporach oblicza się z zależności:

$$y = \frac{5 \cdot (W_{50}^+ + g_0) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} = 8,57 \text{ mm}$$

Kryterium dopuszczalnego ugięcia arkusza blachy nie jest spełnione ponieważ otrzymana wartość 8,57 mm przekracza maksymalną akceptowaną wartość 7,67 mm.

Dodatkowo należy zweryfikować nośność łączników na podstawie rozdziału 8 normy [2].

8.4. Weryfikacja przy użyciu podejścia szczegółowego

8.4.1. Rozpatrywany arkusz blachy falistej

Rozważany arkusz blachy falistej jest taki sam jak analogiczny arkusz opisany w rozdziale 8.2 niniejszej instrukcji.

Wskazany arkusz wykonano ze stali gatunku S 320 GD + Z 275. Nominalna grubość blachy w tym arkuszu wynosi 0,65 mm. Ciężar własny g_0 analogicznie jak poprzednio wynosi 0,061 kN/m².

Częściowy współczynnik bezpieczeństwa γ_{M0} przyjęto jako równy 1,00.

8.4.2. Miarodajny efekt obciążenia

Wartości miarodajnego efektu obciążenia są analogiczne do wyników opisanych wcześniej w pkt. 8.3.1 niniejszego opracowania.

8.4.3. Zastosowanie metody szczegółowej

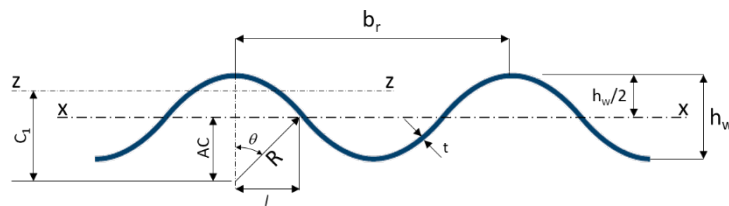
Wychodząc z nominalnej grubości blachy, po uwzględnieniu tolerancji, przyjęto, że grubość obliczeniowa ma wartość $t = 0,60 \text{ mm}$.

W tej metodzie przed rozpoczęciem obliczeń sprawdzone jest spełnienie warunku $R/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$:

- Ponieważ: $R = 5h_w/4 = 22,5 \text{ mm}$;
- Co daje: $R/t = 37,50$;
- A zatem: $0,04 \cdot E/f_{yb} = 0,04 \cdot \frac{210000}{320} = 26,25$ - warunek nie jest spełniony.

Ponieważ wykazano, że zachodzi $R/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$ charakterystyczna nośność na zginanie powinna być wyliczana przy użyciu zredukowanego naprężenia ściskającego σ_c dając w efekcie wartość $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Wyznaczenie wartości momentu bezwładności i wskaźnika zginania



Rys. 8.4.3.1 – Geometryczne parametry przekroju poprzecznego rozpatrywanego arkusza blachy falistej.

Promień krzywizny: $R = 5 \cdot h_w / 4 = 22,5 \text{ mm}$;

Wysokość fałdy $l = h_w = 18 \text{ mm}$;

Kąt θ : ponieważ $\sin \theta = l/R = 18/22,5$ więc $\theta = 0,927 \text{ rad}$;

Odległość pomiędzy środkiem krzywizny pojedynczego łuku fałdy i jego środkiem ciężkości, przez który poprowadzono oś z-z:

$$C_1 = (R \cdot \sin \theta) / \theta = \frac{22,5 \cdot \sin 0,927}{0,927} = 19,41 \text{ mm};$$

Odległość pomiędzy środkiem krzywizny pojedynczego łuku fałdy i położeniem osi x-x:

$$AC = R - (h_w/2) = 22,5 - 0,5 \cdot 18 = 13,5 \text{ mm};$$

Na tej podstawie wyznaczono moment statyczny jednej czwartej przekroju poprzecznego:

$$I'_{xx}/t = R^3 \cdot \left(\frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{(\sin \theta)^2}{\theta} \right) + (R \cdot \theta) \left[C_1 - \left(R - \frac{h_w}{2} \right) \right]^2$$

$$\frac{I'_{xx}}{t} = 22,5^3 \left(\frac{0,927 + \sin 0,927 \cdot \cos 0,927}{2} - \frac{(\sin 0,927)^2}{0,927} \right) + (22,5 \cdot 0,927) [19,41 - 13,5]^2$$

$$= 882,48 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

oraz moment bezwładności tej części przekroju przy jednostkowej szerokości pasa arkusza:

$$I_{xx} = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_R} = \frac{4 \cdot 882,48 \cdot 0,60}{76} = 27,87 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

W efekcie tych obliczeń otrzymano wskaźnik zginania:

$$W_y = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_R \cdot h_w/2} = \frac{4 \cdot 882,48 \cdot 0,60}{76 \cdot 9} = 3,10 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

Wyznaczenie nośności na zginanie z zastosowaniem zredukowanego naprężenia ściskającego

Obliczono kolejno:

- Współczynnik redukcji

$$\eta = 0,19 + 0,67 / (1 + R / (100 \cdot t))^{0,5} = 0,19 + 0,67 / (1 + 22,5 / (100 \cdot 0,60))^{0,5} = 0,761;$$

- Naprężenie skojarzone z wyboczeniem:

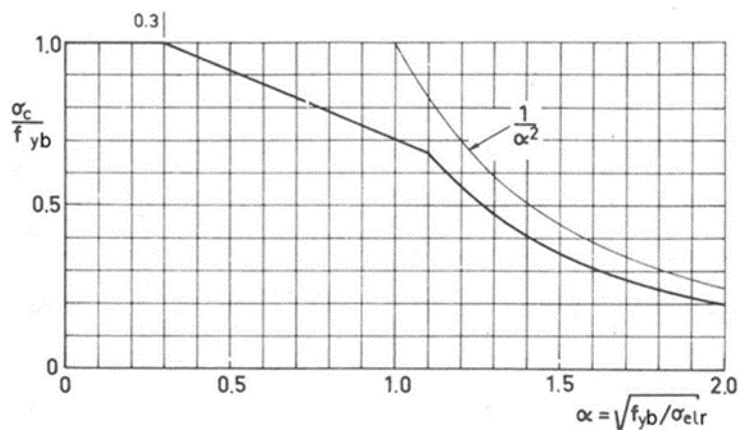
$$\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t / R = 0,60 \cdot 0,763 \cdot 210\,000 \cdot 0,60 / 22,5 = 2558,23 \text{ N/m}^2;$$

Smukłość:

$$\lambda = (f_{yb}/\sigma_{elr})^{0,5} = (320/2558,23)^{0,5} = 0,354;$$

Z uwagi na to, że zachodzi $0,30 < \lambda < 1,10$, zredukowane naprężenie oblicza się z zależności:

$$\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \lambda) \cdot f_{yb} = (1,126 - 0,419 \cdot 0,354) \cdot 320 = 312,9 \text{ N/mm}^2$$



Rys. 8.4.3.2 – Relacja pomiędzy granicznym naprężeniem ściskającym a współczynnikiem smukłości stosowana do weryfikacji zagrożenia wystąpieniem lokalnej utraty stateczności w cylindrycznej części fałdy badanego arkusza blachy.

Charakterystyczna nośność na zginanie wynosi zatem:

$$M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c = 3,15 \cdot 313,33 = 0,969 \text{ kN.m/m}$$

Co daje obliczeniową nośność wyznaczoną na poziomie: $M_{c,Rd} = 0,969 \text{ kN.m/m}$.

Założono, uwzględniając symetrię przekroju poprzecznego, że wartości obliczeniowej nośności na zginanie dla rozpatrywanego arkusza blachy są identyczne w przypadku obciążenia skierowanego w dół i w przypadku obciążenia skierowanego w górę.

Dla weryfikacji stanu granicznego użytkowalności otrzymano odpowiednio: $W_{y,SLS} = M_{c,Rk} / (f_{yb} / 1,5) = 4,54 \text{ mm}^3/\text{mm}$ oraz $I_{y,SLS} = W_{y,SLS} \cdot (h_w / 2) = 40,87 \text{ mm}^4/\text{mm}$.

Weryfikacja warunku nośności i warunku użytkowalności

Warunek nośności w przypadku obciążenia skierowanego w dół: $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,321}{0,969} = 0,331 \leq 1,00$;

Warunek nośności w przypadku obciążenia skierowanego w górę: $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,399}{0,969} = 0,412 \leq 1,00$.

Oba warunki są spełnione. Zastosowanie metody szczegółowej dało zysk około 8% w stosunku do analogicznych wyników uzyskanych po wykorzystaniu metody uproszczonej.

Ugięcie jednoprzęsłowego arkusza blachy opartego na dwóch skrajnych podporach oblicza się z zależności:

$$y = \frac{5 \cdot (W_{50}^+ + g_0) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{y,SLS}} = 5,30 \text{ mm}$$

Kryterium dopuszczalnego ugięcia arkusza blachy jest teraz spełnione ponieważ otrzymana wartość 5,30 mm nie przekracza maksymalnej akceptowanej wartości 7,67 mm.

Dodatkowo należy zweryfikować nośność łączników na podstawie rozdziału 8 normy [2].

8.5. Weryfikacja przy użyciu arkusza kalkulacyjnego

8.5.1. Informacja o zastosowanym arkuszu kalkulacyjnym

W obliczeniach wykorzystano arkusz kalkulacyjny napisany w środowisku Excel i dostępny na stronie internetowej projektu GRISPE (www.grispeplus.eu).

8.5.2. Walidacja wyników uzyskanych dla danych z rozważanego przykładu obliczeniowego

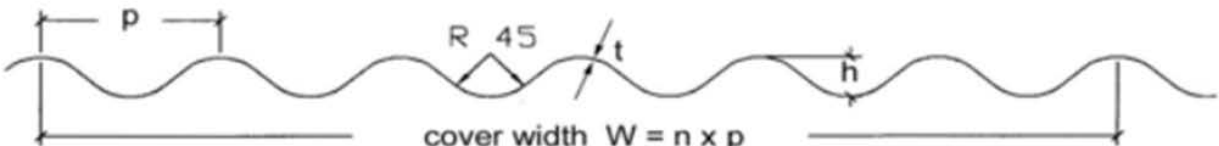
W pierwszym kroku procedury walidacyjnej wprowadzono następujące parametry geometryczne:

- Promień krzywizny: $R = 22,5 \text{ mm}$;
- Wysokość fałdy: $h = 18 \text{ mm}$;
- Rozstaw grzbietów sąsiadujących ze sobą fałd: $p = 76 \text{ mm}$.

W drugim kroku wprowadzono parametry materiałowe zastosowanej stali konstrukcyjnej, w szczególności moduł sprężystości podłużnej $E = 210\,000 \text{ N/mm}^2$ oraz granicę plastyczności $f_{yb} = 320 \text{ N/mm}^2$. Dodano również wyznaczoną w punkcie 8.4.3 niniejszej instrukcji wartość wskaźnika zginania $W_y = 3150 \text{ mm}^3/\text{m}$ (Rys. 8.5.2).

Please fill in the red cells

results



R	22,50	[mm]	E	210 000,00	[N/mm ²]
t _{cor}	0,61	[mm]	f _{yb}	320,00	[N/mm ²]
h	18,00	[mm]	W _y	3 150,00	[mm ³ /m]
p	76,00	[mm]			

Generally applicable design procedure with respect to local buckling in the compressed area

R/t	36,885246 [-]	≤	0,04*E/f _{yb}	26,25 [-]
slenderness ratio α [-]	buckling stress σ _{elb} [N/mm ²]	coefficient η [-]	compressive stress σ _c [N/mm ²]	
0,350	2 605,245	0,763	313,329	

M_{c,Rk} 0,987 [kNm/m]

Simplified procedure for restricted application range

Check conditions (all must be fulfilled):

single span girder	true/false?
uniformly distributed loads	true/false?
ratio R/t 36,885246 [-] ≤ 0,1*E/f _{yb} 65,625 [-]	true
steel core thickness t _{cor} ≥ 0,55 mm	true
profile height 18 mm ≤ h ≤ 46 mm	true
profile pitch 76 mm ≤ p ≤ 150 mm	true

M_{c,Rk} 0,914 [kNm/m]

Rys. 8.5.2 – Tabela arkusza kalkulacyjnego zastosowanego do weryfikacji nośności rozpatrywanego w przykładzie arkusza blachy falistej.

Porównanie wyników uzyskanych z obliczeń analitycznych z analogicznymi wynikami otrzymanymi po zastosowaniu arkusza kalkulacyjnego

Obie metody w pełni sobie odpowiadają z uwagi na te same parametry i te same zależności brane do analizy. W szczególności dotyczy to:

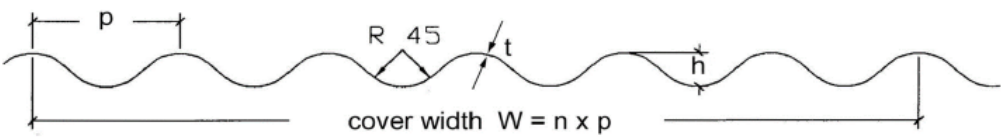
- Smukłości;
- Naprężenia skojarzonego z wyboczeniem;
- Współczynnika redukcyjnego η ;
- Zredukowanego naprężenia ściskającego;
- Charakterystycznej nośności na zginanie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] CEN, EN 14782:2006 – Self-supporting metal sheet for roofing, external cladding and internal lining - Product specification and requirements, Brussels, 2006.
- [2] CEN, EN 1993-1-3:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2007.
- [3] DIN 59231:2003 – Hot-dip metal coated corrugated and profiled steel sheets – Dimensions, mass and static parameters, Berlin, 2003.
- [4] K. Le TRAN, L. DAVAIN, C. DOUTHE, K. SAB and J. DALLOT – Etude de la résistance et de la stabilité des panneaux cylindriques non-raidis soumis à une compression uniforme : application aux ouvrages d'arts, Revue Construction Métallique, 1-2012.
- [5] CEN, EN 1993-4-1:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos, Brussels, 2007.
- [6] StBK-N5, Swedish code for light-gauge metal structures, Stockholm, 1982.
- [7] CEN, EN 1990:2002 – Eurocode – Basis of structural design, Brussels, 2002.
- [8] CEN, EN 1990:2002/A1:2005 – Eurocode – Basis of structural design – Amendment A1, Brussels, 2005.
- [9] CEN, EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 – Eurocode – Basis of structural design – Amendment A1 - Corrigendum, Brussels, 2010.
- [10] CEN, EN 1991-1-1:2002 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, Brussels, 2002.
- [11] CEN, EN 1991-1-1:2002/AC:2009 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [12] CEN, EN 1991-1-3:2003 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads, Brussels, 2003.
- [13] CEN, EN 1991-1-3:2003/AC:2009 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [14] CEN, EN 1991-1-3:2003/A1:2015 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads - Amendment A1, Brussels, 2015.
- [15] CEN, EN 1991-1-4:2005 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions, Brussels, 2005.
- [16] CEN, EN 1991-1-4:2005/AC:2010 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions – Corrigendum, Brussels, 2010.
- [17] CEN, EN 1991-1-4:2005/A1:2010 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions – Amendment A1, Brussels, 2010.

- [18] CEN, EN 1993-1-1:2005 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [19] CEN, EN 1993-1-1:2005/AC:2009 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings - Corrigendum, Brussels, 2005.
- [20] CEN, EN 1993-1-1:2005/A1:2014 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings – Amendment A1, Brussels, 2014.
- [21] CEN, EN 1993-1-3:2007/AC:2009 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [22] CEN, EN 1995-1-1:2005 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [23] CEN, EN 1995-1-1:2005/AC:2006 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Corrigendum, Brussels, 2006.
- [24] CEN, EN 1995-1-1:2005/A1:2008 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Amendment A1, Brussels, 2008.
- [25] CEN, EN 1995-1-1:2005/A2:2014 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Amendment A1, Brussels, 2014.

ANNEX: PROPOZYCJA UZUPEŁNIENIA EUROKODU PRZESŁANA DO CEN

AM-1-3-2013-75	
Subject	Load bearing capacity / characteristic values of corrugated profiles with sinusoidal or similar cross section
Clause No/ Subclause No/ Annex	
Reason for Amendment	No design rules by calculation available in EN 1993-1-3
Proposed Change	In order to calculate the bending stiffness and the ultimate bending moment for corrugated profiles with sinusoidal or similar cross section, two approaches are proposed 1. Generally applicable design procedure with respect to local buckling in the compressed area  Fig nn: Typical cross section, definition of parameters σ • If $R/t \leq 0,04 * E / f_{yb}$: The cross section needs not be checked for local buckling

characteristic bending moment: $M_{c,Rk} = W_y * f_{yb}$

- If $R/t > 0,04 * E / f_{yb}$: The characteristic bending moment should be calculated using the reduced compressive stress $\sigma_c M_{c,Rk} = W_y * \sigma_c$

with:

slenderness ratio: $\lambda = (f_{yb} / \sigma_{elr})^{0,5}$

buckling stress $\sigma_{elr} = 0,60 * \eta * E * t / R$

coefficient η $\eta = 0,19 + 0,67 / (1 + R / (100 * t))^{0,5}$

for $\lambda < 0,30$ $\sigma_c = f_{yb}$

for $0,30 < \lambda < 1,10$ $\sigma_c = (1,126 - 0,419 * \lambda) * f_{yb}$

for $1,10 \geq \lambda$ $\sigma_c = (0,8 / \lambda^2) * f_{yb}$

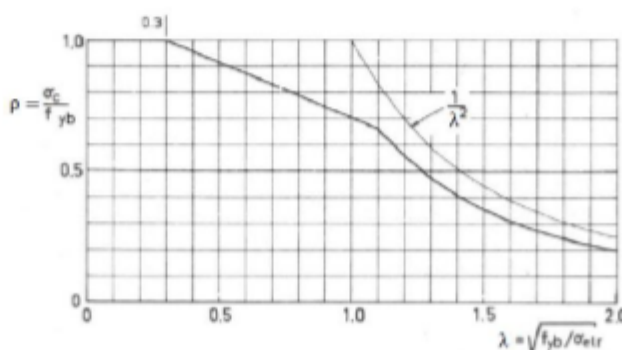


Fig nn: ultimate compressive stress with respect to local buckling of the cylindric part of the profile

The moment of inertia, which is used to calculate deformations in serviceability limit state, should be calculated using the same procedure as for bending moment, but with reduced stress $f_{yb} / 1,5$.

2. Simplified procedure for restricted application range

If the conditions

- profile installed as single span girder and
- uniformly distributed loads and
- ratio $R/t \leq 0,1 * E / f_{yb}$ and
- steel core thickness $t_{cor} \geq 0,55$ mm and
- profile height $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$ and
- profile pitch $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$

are met, the following simplified procedure may be adopted:

	moment of inertia per unit width $I_y = 0,13 * t * h^2$ section modulus per unit width $W_y = 0,26 * t * h$ characteristic bending moment: $M_{c,Rk} = W_y * f_{yb}$
Background Information	[1] D2.5 WP2 Background and draft annexes for EN 1993-1-3 for corrugated sheets, 31.12.2015, KIT [2] StBK-N5 Swedish Code for Light-Gauge Metal Structures, March 1982, SBI [3] EN 1993-4-1 Tanks