

WP N°: 3
WP Title: eLectures
Deliverable N°: 3.1 (4)
Deliverable Title: Design manual
Deliverable Date: 30 june 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)

Walter SALVATORE, Silvia CAPRILI, Irene PUNCELLO University of Pisa – Dept. of Civil and Industrial Engineering

Drafting history

FINAL DRAFT – DATE: 15<sup>th</sup> of July 2018 FINAL VERSION – DATE: 15<sup>th</sup> of July 2018

Dissemination Level							
PU	Public-Open	Х					
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						
СО	Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)						





GRISPE PLUS

# **DESIGN MANUAL FOR CURVED PROFILES**

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 because of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

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

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

#### Reasonableness

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

#### Severability

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

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



Design Manual for curved profiles

## EU acknowledgement of support

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



## STRESZCZENIE

Celem niniejszej instrukcji jest prezentacja nowej metody projektowania przez weryfikację obliczeniową dotyczącej łukowych paneli wykonanych z profilowanych blach stalowych. Metoda ta została opracowana w europejskim projekcie GRISPE PLUS w oparciu o wyniki uzyskane we wcześniej zakończonym projekcie badawczym GRISPE.

Instrukcja ta oparta jest na ogólnych zasadach projektowania sformułowanych w eurokodach, w tym w szczególności w normach EN 1993-1-3 i EN 1993-1-5.

Przy opracowywaniu proponowanej metody obliczeniowej wykorzystano wyniki badań eksperymentalnych przeprowadzonych w latach 2013 – 2016 w ramach europejskiego projektu GRISPE.

Poszczególne etapy pracy nad opracowaniem procedury obliczeniowej proponowanej w niniejszej instrukcji zestawiono w załączniku 1.

W szczególności:

W **rozdziale 1** podano informacje na temat rodzaju zastosowanych paneli łukowych, obecnego stanu wiedzy oraz głównych wyników badań zrealizowanych w ramach projektu GRISPE. Omówiono również podstawowe zasady i wymagania projektowe.

W **rozdziale 2** przedstawiono wstępne ustalenia, które należy brać pod uwagę na etapie przedprojektowym, w tym rozważania dotyczące weryfikacji zakresu stosowania nowej metody projektowania.

W **rozdziale 3** podano podstawowe wymagania technologiczne, które muszą być przestrzegane, w tym te dotyczące ramy nośnej, na której opierają się analizowane panele, oraz te odniesione do charakterystyki samych paneli i ich zestawów.

W **rozdziale 4** zestawiono właściwości materiałowe dotyczące stali konstrukcyjnej z której wykonano panele.

W **rozdziale 5** opisano obciążenia, które należy uwzględnić w projekcie oraz podano ich miarodajne kombinacje.

W **rozdziale 6** objaśniono szczegółowo proponowaną metodę projektowania (podano podstawowe zasady, zdefiniowano zakres zastosowania i opisano jak stosować poszczególne formuły).

W **rozdziale 7** podano listę specyficznych zagadnień projektowych dla których niniejsza instrukcja nie znajduje zastosowania (oddziaływania pożarowe, sejsmiczne, aspekty środowiskowe, oddziaływania termiczne, analizy akustyczne).

W **rozdziale 8** zamieszczono praktyczne przykłady obliczeniowe.

Na końcu instrukcji zamieszczono bibliografię.



# WAŻNA UWAGA

Dane eksperymentalne zostały uzyskane i dostarczone przez Rainera Holza, IFL - ING LEICHTBAU oraz przez Daniela Ruffa i Christiana Fautha, KIT - KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY.

# PRZEDMOWA

Niniejsza instrukcja została opracowana przy wsparciu projektu badawczego finansowanego w ramach funduszu RFCS numer **754092.** 

Proponowaną do stosowania metodę projektowania w latach 2016-2017 przedstawiono i dyskutowano podczas obrad tak zwanej Evolution Group dedykowanej normie EN 1993-1-3 i rozważa się jej włączenie do dotychczasowych zapisów tego eurokodu.

Prezentowana instrukcja została napisana przez Waltera Salvatore'a, Silvię Caprili i Irenę Puncello. Przygotowano ją w oparciu o dane eksperymentalne i rozważania przeprowadzone w zakończonym wcześniej projekcie badawczym GRISPE. Była ona omawiana w czasie obrad grupy roboczej projektu GRISPE PLUS. Grupa ta składała się z następujących członków:

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
Walter SALVATORE	Włochy
Daniel SPAGNI	Francja

Członkiem korespondencyjnym tej grupy był:

Léopold SOKOL

Francja



# **RYSUNKI I TABELE**

Zamieszczone w tekście rysunki i tabele zostały opracowane przez następujące podmioty:

Rys. 1.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.4	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.6	web source https://en.wikipedia.org/wiki/File:Roll_forming.png
Rys. 1.7	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.8	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.9	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.10	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 1.11	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 6.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 6.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 8.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 8.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 8.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Rys. 8.4	Plotted from SAP 2000 software
Rys. 8.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Tab. 1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Tab. 2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project
Tab. 3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – GRISPE project



# **SPIS TREŚCI**

CEL PUBLIKACJI11
OZNACZENIA12
1. WPROWADZENIE13
1.1. Typy paneli łukowych z blach13
1.2. Obecny stan wiedzy (ocean nie uwzględniająca wyników uzyskanych w projekcie GRISPE)14
1.3. Główne rezultaty uzyskane w projekcie GRISPE14
1.4. Ogólne zasady i wymagania projektowe19
2. USTALENIA WSTĘPNE DLA FAZY PRZEDPROJEKTOWEJ19
2.1. Obszar zastosowań nowej metody projektowej19
3. PODSTAWOWE WYMAGANIA TYECHNOLOGICZNE20
3.1. Wymagania dotyczące znakowania paneli znakiem CE20
4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE20
4.1. Arkusze profilowanych blach stalowych20
5. OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNE I ICH KOMBINACJE20
6. PODSTAWY PROJEKTOWANIA20
6.1. Zasady ogólne20
6.2. Obszar zastosowań proponowanej metody projektowania
6.3. Procedura obliczeniowa21
6.3.1. Jednoprzęsłowy panel łukowy z pełną swobodą poziomego przesuwu na podporach: wyznaczenie nośności na zginanie21
6.3.2. Jednoprzęsłowy panel łukowy oparty na podporach z ograniczoną możliwością poziomego przesuwu na podporach: wyznaczenie nośności na zginanie 22
7. SPECYFICZNE UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE
7.1. Sytuacje projektowe do których niniejsza instrukcja nie ma zastosowania 26
8. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY26
8.1. Objaśnienie prcedury projektowej26
8.1.1. Panel jednoprzęsłowy oparty na podporach z pełną swobodą przesuwu poziomego
8.1.2. Jednoprzęsłowy panel łukowy oparty na podporach o ograniczonej możliwości przesuwu poziomego28
9. BIBLIOGRAFIA



# LISTA RYSUNKÓW

Rys. 1-2 Formowanie panelu przez zgniatanie wewnętrznego pasa (wariant B)13
Rys. 1-3 Formowanie panelu przez gięcie in situ (wariant C)13
Rys. 1-4: Przekrój poprzeczny płaskiego panelu wykonanego z blachy falistej14
Rys. 1-5: Przekrój poprzeczny płaskiego panelu wykonanego z blachy fałdowej
profilowanej trapezoidalnie14
Rys. 1-6 Proces formowania rolkowego15
Rys. 1-7: Podstawowe parametry typowego panelu łukowego16
Rys. 1-8: Schemat badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej
z analizą czystego zginania17
Rys. 1-9: Realizacja testu jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z
analizą czystego zginania17
Rys. 1-10: Schemat badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej
z analizą interakcji momentu zginającego i siły osiowej (profil 18/76)18
Rys. 1-11: Realizacja badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z
Andrizą interakcji momentu zginającego i siły osłowej (prom 39/333) podporach zastenczymi
spreżynami poziomymi (źródło - Rainer Holts (projekt GRISPE)) 23
Rys 6-2: Wyznaczanie długości wyboczeniowej odcinka łuku kołowego na podstawie
normy DIN 18 800 - 2
Rys 8-1: Konfiguracia jednoprzesłowego panelu łukowego z podporami o pełnej
swobodzie przesuwu poziomego 26
Rys. 8-2: Konfiguracia jednoprzesłowego panelu łukowego z podporami o ograniczonej
swobodzie przesuwu poziomego
Rys. 8-3: Schemat i wymiary zastosowanego do obliczeń modelu numerycznego
Rys. 8-4: Schemat modelu numerycznego zastosowanego w rozpatrywanym przykładzie.
Rvs. 8-5: Wyznaczanie współczynnika długości wyboczeniowej łuku o kształcie wycinka
koła na podstawie normy DIN 18800 – 2

# LISTA TABEL



### CEL PUBLIKACJI

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie nowej metody projektowania łukowych paneli wykonanych z profilowanych blach stalowych, którą zaproponowano jako uzupełnienie dotychczasowych zapisów normy EN 1993-1-3.

Niniejsza instrukcja dotyczy jedynie podstawowych sytuacji projektowych.

W przypadkach specyficznych (takich jak na przykład projektowanie paneli z otworami) lub w wyjątkowych sytuacjach projektowych (oddziaływania sejsmiczne, pożar itp.) należy stosować się do odpowiednich postanowień poszczególnych eurokodów i/lub normy EN 1090-4.



### OZNACZENIA

W prezentowanej instrukcji użyto następujących oznaczeń:

<b>I</b>	
t <sub>N</sub>	grubość obliczeniowa
R	promień krzywizny
b	długość łuku
L	rozpiętość przęsła
f	wysokość łuku
β	współczynnik długości wyboczeniowej
α[°]	kąt nachylenia
ND	obliczeniowa siła ściskająca
Μ	obliczeniowy moment zginający
M <sub>d</sub>	obliczeniowa nośność na zginanie
$N_{dD}$	obliczeniowa nośność na osiowe ściskanie
$maxN_{dD}$	wartość siły stowarzyszonej z idealnym wyboczeniem
$ultN_{\text{dD}}$	wartość graniczna (krytyczna) siły stowarzyszonej z wyboczeniem
α	współczynnik smukłości
Lcr	długość wyboczeniowa
İef	promień bezwładności przekroju efektywnego
$\sigma_{cd}$	obliczeniowe naprężenie ściskające
$A_{ef}$	powierzchnia efektywnego przekroju poprzecznego specyfikowanego dla osiowego ściskania
σelg	eulerowskie naprężenie ściskające
Ag	powierzchnia przekroju poprzecznego brutto
$M_{c,Rk,F}$	charakterystyczny moment zginający przęsło
F <sub>u,k</sub>	obciążenie charakterystyczne
bv	szerokość panelu badanego w teście
Lv	rozpiętość przęsła panelu
L	długość panelu badanego w teście
S	połowa długości łuku panelu
g	ciężar własny panelu
$\mathbf{f}_{max}$	pionowe ugięcie panelu w środku przęsła
Fu	obciążenie niszczące badany panel
C <sub>f,i</sub>	sztywność badanego panelu wyznaczona w pojedynczym teście
Cf	wartość średnia sztywności badanego panelu wyznaczona jako miarodajny wynik przeprowadzenia całej grupy takich samych testów
$f_{eq}$	zastępcze ugięcie w środku rozpiętości panelu łukowego, reprezentatywne dla całej grupy testów
Cind	miarodajna sztywność sprężyny modelującej podporę poziomą
fyk	charakterystyczna granica plastyczności stali konstrukcyjnej

12

### **1. WPROWADZENIE**

#### **1.1.** Typy paneli łukowych z blach

Niniejsza instrukcja dotyczy paneli łukowych wykonywanych z arkuszy blach profilowanych.

W ogólności, tego rodzaju panele można uzyskać za pomocą trzech różnych procesów formowania:

- Formowanie rolkowe (Rys. 1-1),
- Formowanie przez zgniatanie wewnętrznego pasa (Rys. 1-2),
- Formowanie przez gięcie in situ (Rys. 1-3).



Rys. 1-1 Gięcie panelu przez formowanie rolkowe (wariant A).



Rys. 1-2 Formowanie panelu przez zgniatanie wewnętrznego pasa (wariant B).



Rys. 1-3 Formowanie panelu przez gięcie in situ (wariant C).

W niniejszej instrukcji analizuje się jedynie parametry **paneli łukowych otrzymywanych w procesie ciągłego formowania rolkowego (WARIANT A)**. Zachowanie się tego rodzaju paneli ocenia się przy tym w odniesieniu do nośności odpowiadających im paneli płaskich.

GRISPE PLUS



Rys. 1-4: Przekrój poprzeczny płaskiego panelu wykonanego z blachy falistej.



*Rys.* 1-5: *Przekrój poprzeczny płaskiego panelu wykonanego z blachy fałdowej profilowanej trapezoidalnie.* 

# **1.2.** Obecny stan wiedzy (ocean nie uwzględniająca wyników uzyskanych w projekcie GRISPE)

Nośność na zginanie łukowych paneli uzyskanych przez zgniatanie wewnętrznego pasa (wariant B) nie ma znaczenia dla celów projektu badawczego GRISPE, ponieważ panele uzyskane w ten sposób mają na ogół bardzo małą rozpiętość.

Panele łukowe uzyskane w procesie gięcia in situ (wariant C) można w prosty sposób zaprojektować na podstawie przepisów normy EN 1993-1: 2005 stosując konwencjonalne procedury opracowane dla paneli płaskich. Takie uproszczenie jest dopuszczalne ponieważ promień gięcia tego rodzaju paneli jest bardzo duży. Dla nich nie oczekuje się istotnych zmian nośności jeśli odnosić tę nośność do analogicznej nośności wyliczonej dla paneli płaskich.

W niniejszej instrukcji, jak wcześniej wspomniano, skupiono się na panelach uzyskanych w drodze formowania rolkowego (wariant A).

Wpływ naprężeń rezydualnych wprowadzonych do panelu łukowego w procesie formowania rolkowego był badany w przeszłości w centrum badawczym stali, drewna i muru w Niemczech w szerokiej kampanii badań eksperymentalnych. Przeprowadzono szereg prób na łukowych panelach wykonanych z blach fałdowych profilowanych trapezoidalnie, dostarczonych przez różnych producentów. Badania prowadzono zgodnie z normą DIN 18807-2. Promień gięcia wahał się przy tym od 4 m do 19 m, a podpory nie były nie były obustronnie w pełni utwierdzone. Zmierzone różnice w nośności na zginanie, pomiędzy wartością uzyskaną dla panelu płaskiego i analogiczną wartością zmierzoną dla odpowiadającego mu panelu łukowego, wynosiła od zera do dziesięciu procent.

Dane dostępne w aktualnej literaturze naukowej podają, że różnica nośności na zginanie, pomiędzy wartością odnoszącą się do panelu łukowego i odpowiadającą mu nośnością panelu płaskiego, dochodzi do 20% w przypadku ściskania wąskiego panelu i do 30% jeśli ściskaniu podlega szeroki panel [1].

#### **1.3.** Główne rezultaty uzyskane w projekcie GRISPE

Jak wcześniej wspomniano, w niniejszym studium skoncentrowano się na panelach łukowych giętych przez formowanie rolkowe. Proces ten polega na ciągłym gięciu



Design Manual for curved profiles

długiego pasa blachy stalowej (zazwyczaj zwiniętego w rolkę) aż do uzyskania pożądanego przekroju poprzecznego. Pas ten przechodzi przez zestawy rolek zamontowanych na kolejnych stojakach, przy czym każdy z tych zestawów wykonuje jedynie składową część zginania. Tego typu formowanie stosuje się do wytwarzania dużej liczby cienkościennych elementów stalowych o stałym profilu przekroju poprzecznego i o stosunkowo dużych długościach. Prosty schemat omawianej powyżej procedury przedstawiono na Rys. 1 6.





Rys. 1-6 Proces formowania rolkowego.

Kształtowniki uzyskane w procesie formowania rolkowego mają wiele zalet jeśli porównywać je z odpowiadającymi im kształtownikami uzyskiwanymi w procesie wytłaczania. Na ogół są od nich lżejsze, mają cieńsze ale przy tym mocniejsze ścianki, po wychłodzeniu ulegają utwardzeniu. Ponadto proces formowania rolkowego jest szybszy niż proces wytłaczania.

Wpływ procesu gięcia na właściwości stali użytej na panele jest minimalny. Właściwości fizyczne i chemiczne praktycznie się nie zmieniają, ale proces ten może powodować utwardzanie co zwiększa podatność na mikropęknięcia. Jego skutkiem może być również pocienianie ścianek na krawędziach gięcia. Tego typu uwarunkowania powinno się w miarę możliwości uwzględniać przy doborze kształtowników.

W ramach badań prowadzonych w projekcie GRISPE analizowano zmianę nośności paneli łukowych w relacji do nośności odpowiadających im paneli płaskich (deformacje plastyczne rozwijające się w skrajnych włóknach przekroju poprzecznego mogły dodatkowo wpływać na zmierzoną nośność tego typu panelu), przy założeniu różnych promieni gięcia.

W projekcie GRISPE zrealizowano duży program badań eksperymentalnych w celu określenia nośności na zginanie paneli łukowych dla różnych promieni gięcia. Testowano dwa różne rodzaje paneli: panele **profilowane sinusoidalnie** dostarczone przez firmę Bacacier (profil 18/76) - patrz Rys. 1-4, oraz panele **profilowane trapezoidalnie z usztywnieniami** dostarczone przez firmę Arcelor Mittal France (profil 39/333) - patrz Rys. 1-5. Dla każdego kształtu przekroju poprzecznego panelu analizie poddawano profile o grubości nominalnej równej odpowiednio 0,63 mm i 1,0 mm.

Dwie różne konfiguracje wybrano do przeprowadzenia badań eksperymentalnych. Pierwsza z nich odpowiadała badaniu zachowania się paneli łukowych przy czystym zginaniu, druga natomiast była skojarzona z badaniem łącznego oddziaływania na panel momentu zginającego i osiowej siły ściskającej.

Uzyskane wynik	zestawiono ze	sobą w	Tabeli 1.
----------------	---------------	--------	-----------

Type of test	Profile	R [m]	b [mm]	Span L [mm]	s [mm]	f [mm]	α [°]	Number of tests
		∞	2200			0	0	3
	18/76	20.0	2201	2000		30	6.31	2
	t <sub>N</sub> = 0.63 mm	10.0	2204	2000	2200	61	12.63	2
		4.0	2229			154	31.92	2
		8	3200			0	0	1
	18/76	20.0	3203	2000	2200	64	9.18	4
	t <sub>N</sub> = 1.00 mm	10.0	3214	3000	3200	129	18.41	3
Single span		4.0	3292			334	47.16	3
test		∞	3200	3000	3200	0	0	3
	39/333 t <sub>N</sub> = 0.63 mm 39/333	20.0	3203			64	9.18	2
		10.0	3214			129	18.41	2
		6.0	3239			217	30.93	3
		8	4200	4000	4200	0	0	2
		20.0	4208			111	12.05	2
	t <sub>N</sub> = 1.00 mm	10.0	4232		4200	223	24.24	2
		6.0	4291			380	40.98	2
Single span		6.0	3239	3000	3200	217	30.93	2
positive bending test with	39/333 t <sub>N</sub> = 0.63 mm	6.0	4291	4000	4200	380	40.97	3
horizontal support		6.0	5300	5000	5129	576	50.61	3

Tabela 1: Wyniki uzyskane w testach przeprowadzonych w ramach projektu GRISPE.

Na Rys. 1-7 objaśniono znaczenie oznaczeń stosowanych do analizy typowego panelu łukowego.



Rys. 1-7: Podstawowe parametry typowego panelu łukowego.

W pierwszej konfiguracji, skojarzonej z czystym zginaniem, graniczny moment zginający i efektywny moment bezwładności były wyznaczane w testach obciążeniowych jednoprzęsłowych paneli łukowych poddanych obciążeniu dwoma lub czterema skierowanymi pionowo w dół obciążeniami liniowymi co symulowało obciążenia równomiernie rozłożone na całej szerokości panelu (Rys. 1-8 i Rys. 1-9). Testowane elementy były oparte na podporach ze swobodną możliwością ruchu w kierunku



poziomym. Dlatego żadna siła osiowa nie mogła pojawić się w kluczu badanego panelu, natomiast moment zginający w tym przekroju osiągał wartość maksymalną. W badaniach zmieniano promień krzywizny aby przeanalizować jego wpływ zarówno na naprężenia generowane w panelu jak i na nośność tego panelu na czyste zginanie.

GRISPE PLUS



Rys. 1-8: Schemat badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z analizą czystego zginania.



*Rys. 1-9: Realizacja testu jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z analizą czystego zginania.* 

W drugiej konfiguracji, odniesionej do analizy wpływu interakcji momentu zginającego i siły osiowej, badane panele łukowe były oparte na podporach z ograniczoną możliwością przesuwu poziomego (Rys. 1-10 i Rys. 1-11). W ten sposób pracowały one jak klasyczne łuki i były obciążone zarówno momentami zginającymi jak i osiowymi siłami ściskającymi. Ta grupa testów została wykonana w celu weryfikacji formuły interakcyjnej zamieszczonej w normie EN 1993-1-3. Ponieważ ta formuła normowa obowiązuje dla paneli z blach profilowanych trapezoidalnie, testów tych nie przeprowadzono dla paneli łukowych wykonanych z blachy falistej (profilowanej sinusoidalnie). Przez zmianę rozpiętości badanych paneli uzyskiwano różne nachylenia blachy względem poziomu, a zatem równocześnie różny stosunek momentu zginającego do osiowej siły ściskającej.





*Rys.* 1-10: Schemat badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z analizą interakcji momentu zginającego i siły osiowej (profil 18/76).



Rys. 1-11: Realizacja badania jednoprzęsłowego panelu łukowego w konfiguracji związanej z analizą interakcji momentu zginającego i siły osiowej (profil 39/333).

Na podstawie wyników opisanych powyżej badań eksperymentalnych, w przypadku analizy paneli łukowych poddanych czystemu zginaniu, zaproponowano że nośność na zginanie tak obciążonych paneli łukowych można określać zmniejszając o 10% nośność na zginie wyznaczoną dla odpowiadających im paneli płaskich.

Natomiast w przypadku paneli łukowych z podporami z ograniczoną możliwością przesuwu poziomego (to znaczy takich, w których występuje interakcja momentu zginającego i siły osiowej) analiza uzyskanych wyników eksperymentalnych wymaga szerszego komentarza. Przede wszystkim zauważono, że wpływ poziomych przemieszczeń podpór nie może być w obliczeniach pomijany przez uznanie go za efekt konserwatywny. A zatem, procedura obliczeniowa, aby dawała precyzyjne oszacowanie nośności na zginanie, powinna w miarę precyzyjnie uwzględniać rzeczywistą podatność podpór na przesuw poziomy. Rozważania powinny w tym przypadku dotyczyć analizy układu hiperstatycznego. Zaleca się zatem stosowanie następującej procedury projektowania:

1. Siły wewnętrzne w łuku (momenty zginające i siły osiowe) powinny być wyznaczone przy uwzględnieniu powierzchni przekroju poprzecznego brutto Ag oraz momentu bezwładności tego przekroju Jg, wyliczone dla przekroju poprzecznego profilowanej blachy panelu.



2. Poziome przemieszczenie na podporach nie może być zaniedbane w obliczeniach. Dlatego konieczne jest uwzględnienie w analizie rzeczywistej podatności podpory przez wprowadzenie do modelu zastępczej sprężyny poziomej o odpowiedniej sztywności. Sztywność tę należy dobrać z warunku zgodności przemieszczeń, tych uzyskanych z obliczeń z tymi zmierzonymi eksperymentalnie. Aby uniknąć projektowania po stronie niebezpiecznej sztywność zastępczej sprężyny nie powinna być zawyżona. Z drugiej strony przyjęcie zbyt małej sztywności sprężyny prowadzi do przeszacowania poziomych przemieszczeń na podporze a w konsekwencji do projektowania zbyt ostrożnego.

GRISPE PLUS 🕢

3. Interakcję momentu zginającego i siły osiowej należy uwzględniać na podstawie formuły interakcyjnej podanej w normie DIN 18807 <u>ale bez ograniczania wartości</u> <u>współczynnika wyboczeniowego a do wartości 1</u>.

#### 1.4. Ogólne zasady i wymagania projektowe

- (1) Projekt powinien być wykonany zgodnie z ogólnymi zasadami podanymi w normie EN 1993-1-1.
- (2) Należy przyjąć do obliczeń częściowe współczynniki bezpieczeństwa odpowiednie dla analizy stanu granicznego nośności i stanu granicznego użytkowalności, zgodnie z rekomendacjami normy EN 1993-1-3.

### 2. USTALENIA WSTĘPNE DLA FAZY PRZEDPROJEKTOWEJ

#### 2.1. Obszar zastosowań nowej metody projektowej

Niniejsza instrukcja dotyczy sposobu wyznaczania nośności paneli łukowych wykonywanych ze stalowych blach profilowanych.

Niniejsza instrukcja dotyczy metody projektowania przez weryfikację obliczeniową.

Niniejsza instrukcja nie dotyczy sytuacji obliczeniowych związanych z montażem konstrukcji ani też tych związanych z jej utrzymaniem w stanie zdatności.

Procedury obliczeniowe zawarte w niniejszej instrukcji są ważne tylko wtedy gdy wszelkiego rodzaju tolerancje dotyczące blach zastosowanych w analizowanych panelach spełniają wymagania normy EN 1993-1-3.

Proponowane procedury obliczeniowe opracowano na podstawie analizy danych eksperymentalnych uzyskanych z testów prowadzonych na opisanych powyżej stanowiskach badawczych.

Procedura projektowania obowiązuje dla paneli łukowych uzyskanych w procesie formowania rolkowego. Nie jest ważna w sytuacji gdy panele łukowe uzyskano przez gięcie in situ ani też gdy ich formowanie następowało wskutek kruszenia wewnętrznego pasa przekroju.

Współczynnik smukłości "alfa" nie powinien być ograniczany do wartości 1 jak tego wymaga norma DIN 18807 w odniesieniu do paneli płaskich.

Poziome przemieszczenie na podporach może być modelowane za pomocą zastępczych poziomych sprężyn. Poziome przemieszczenie podpory prowadzi do większych momentów zginających w łuku. Sztywność sprężyny powinna być dopasowana do poziomej sztywności całego ustroju, z uwzględnieniem podatności samej podpory. Niedoszacowanie sztywności sprężyny prowadzi do bezpiecznego ale zbyt ostrożnego projektowania.

### **3. PODSTAWOWE WYMAGANIA TYECHNOLOGICZNE**

#### 3.1. Wymagania dotyczące znakowania paneli znakiem CE

Profile stalowe powinny być znakowane znakiem CE, zgodnie z normą EN 14782 (w przypadkach niekonstrukcyjnych) lub EN 1090-1 (w przypadkach konstrukcyjnych).

## 4. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁOWE

#### 4.1. Arkusze profilowanych blach stalowych

Jeżeli nie podano inaczej, właściwości stali użyte do obliczeń muszą spełniać wymagania określone w rozdziale 3 normy EN 1993-1-3.

Tolerancje grubości blach z których wykonano panele łukowe powinny spełniać wymagania podane w rozdziale 3.2.4 normy EN 1993-1-3, w tym:

- Minimalna grubość rdzenia stalowego  $t_{cor} = 0,58$  mm
- Nominalna granica plastyczności stali z której wykonano blachę, co najmniej  $f_{y,k} = 408,3 \text{ N/mm}^2$

Szczegółowe informacje dotyczące charakterystyk geometrycznych przekroju poprzecznego rozważanych w niniejszej instrukcji paneli łukowych podano w rozdziale 8.1.

### 5. OBCIĄŻENIA ZEWNĘTRZNE I ICH KOMBINACJE

Obciążenia zewnętrzne i ich kombinacje, które należy uwzględnić w obliczeniach, należy określić zgodnie z następującymi normami:

EN 1990 Eurocode 0: Basis of structural design

EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings

EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads

EN 1991-1-6: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution"

### **6.**PODSTAWY PROJEKTOWANIA

#### 6.1. Zasady ogólne

Metoda projektowania prezentowana w niniejszej instrukcji może być użyta do określenia:

 Nośności na zginanie w kluczu jednoprzęsłowego panelu łukowego, w konfiguracji z podporami zapewniającymi pełną swobodę przesuwu poziomego,



 Nośności na interakcyjne oddziaływanie momentu zginającego i siły osiowej, w konfiguracji jednoprzęsłowego panelu łukowego opartego na podporach z ograniczoną swobodą przesuwu poziomego.

Aby stosować tę metodę projektowania panel powinien być symetrycznie obciążony.

#### 6.2. Obszar zastosowań proponowanej metody projektowania

Niniejsza procedura obliczeniowa może być użyta do oceny nośności na zginanie paneli łukowych wykonanych ze stalowych blach profilowanych.

W ramach badań eksperymentalnych przeprowadzonych w projekcie GRISPE, testowano panele o różnych grubościach blachy, długości przęsła i promieniu krzywizny. Zestawienie tych paneli podano w Tabeli 1.

Siły wewnętrzne w łuku (momenty zginające i siły osiowe) powinny być wyznaczone przy uwzględnieniu powierzchni przekroju poprzecznego brutto Ag oraz momentu bezwładności tego przekroju Jg, wyliczone dla przekroju poprzecznego profilowanej blachy panelu.

Procedura projektowa została zweryfikowana doświadczalnie dla paneli symetrycznie obciążonych.

Poziome przemieszczenie podpór panelu nie może zostać pominięte w obliczeniach.

Obszar zastosowań proponowanej metody obliczeniowej jest taki sam jak analogiczny obszar zdefiniowany w rozdziale 3 normy DIN 18807 (pkt. 3.3.6.1) dla interakcyjnego oddziaływania momentu zginającego i siły osiowej.

#### 6.3. Procedura obliczeniowa

# 6.3.1. Jednoprzęsłowy panel łukowy z pełną swobodą poziomego przesuwu na podporach: wyznaczenie nośności na zginanie

Proces gięcia panelu łukowego przez formowanie rolkowe powoduje deformacje plastyczne w skrajnych włóknach przekroju poprzecznego. Generuje to powstawanie naprężeń rezydualnych, które mogą wpływać na zmierzoną nośność na zginanie badanego przekroju poprzecznego. Wyniki testów pokazały jednak, że tego rodzaju wpływ jest raczej niewielki, a ponadto niejednolity. Z tego względu proponuje się przyjąć, że:

- W przypadku panelu łukowego wykonanego z blachy o grubości równej 1,0 mm krzywizna tego panelu nie wpływa na jego nośność na zginanie, a zatem nie zmienia tej nośności w stosunku do analogicznej nośności odpowiadającego mu panelu płaskiego.
- W przypadku panelu łukowego wykonanego z blachy o grubości równej 0,63 mm nośność tego panelu zmienia się wraz z jego wygięciem, co dało:
  - + 25% dla panelu z blachy profilowanej sinusoidalnie (profil 18/76),
  - - 15% dla panelu z blachy profilowanej trapezoidalnie (profil 39/333).

Biorąc pod uwagę takie zachowanie paneli i uwzględniając małą wrażliwość na ten efekt nośności na zginanie, proponuje się - zachowawczo – redukcję nośności na zginanie panelu łukowego w stosunku do analogicznej nośności odpowiadającego mu panelu płaskiego o 10%. Ten stopień redukcji uważa się przy tym za dodatkowy współczynnik bezpieczeństwa, który uwzględnia niepewność modelu obliczeniowego. Nie jest to zatem współczynnik oparty na mechanice. Na tej podstawie:

$$M_{c,Rk,F}(curved \ profile) = 0.9 \cdot M_{c,Rk,F}(flat \ profile)$$
 6(1)

#### 6.3.2. Jednoprzęsłowy panel łukowy oparty na podporach z ograniczoną możliwością poziomego przesuwu na podporach: wyznaczenie nośności na zginanie

W niemieckiej normie DIN 18807 podano zasady projektowania blach trapezoidalnie profilowanych w przypadku gdy są one obciążone oddziaływaniem interakcyjnym łączącym wpływ momentu zginającego i siły osiowej. Poniżej sprawdzono, czy ta sama procedura obliczeniowa może być również efektywnie stosowana w przypadku paneli łukowych pracujących na zasadzie konwencjonalnego łuku.

Jeżeli na analizowany panel oddziałuje moment zginający i osiowa siła ściskająca do obliczeń stosuje się następujące równanie:

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}}\right)\right] + \frac{M}{M_d} \le 1$$
6(2)

gdzie:

N<sub>D</sub> - obliczeniowa siła ściskająca

M - obliczeniowy moment zginający

M<sub>d</sub> - obliczeniowa nośność na zginanie

N<sub>dD</sub> - obliczeniowa nośność na osiowe ściskanie

Smukłość jest przy tym zdefiniowana stosunkiem:

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

gdzie:

L<sub>cr</sub> - długość wyboczeniowa.

i<sub>ef</sub> - promień bezwładności efektywnego przekroju poprzecznego.

W ogólności, w formule interakcyjnej dla interakcji M-N współczynnik a należy ograniczyć do 1 (jeśli z obliczeń otrzymano wartość a>1). Ograniczenie to nie jest jednak ważne, gdy smukłość a jest wyznaczana w celu określenia granicznego naprężenia ściskającego miarodajnego w weryfikacji zagrożenia wystąpieniem globalnej utraty stateczności.

W dalszej części krok po kroku opisano procedurę rekomendowaną w normie DIN dla interakcyjnego oddziaływania momentu zginającego i osiowej siły ściskającej, zmodyfikowaną jednak tak aby można ją było zastosować nie tylko do paneli płaskich ale również do paneli łukowych

Wyznaczenie sił wewnętrznych generowanych w łuku obciążonym charakterystycznym obciążeniem niszczącym

Krok (1) można wykonać, kalibrując prosty model obliczeniowy na podstawie wyników badań eksperymentalnych. Kalibracja ta pozwala ustalić reprezentatywną sztywność poziomych sprężyn założonych na obu podporach zlokalizowanych na krawędziach analizowanego panelu (Rys. 6-1).

GRISPE PLUS



*Rys.* 6-1: Przykład prostego modelu z założonymi na obu podporach zastępczymi sprężynami poziomymi (źródło - Rainer Holts (projekt GRISPE)).

Przykładowo, aby wykorzystać dane uzyskane w programie GRISPE na podstawie prezentowanych wcześniej badań eksperymentalnych, można opracować prosty model, który będzie reprezentatywny dla schematu statycznego panelu łukowego. Dla prostoty analizy łuk w kształcie koła może być przy tym aproksymowany łamaną. Obie skrajne podpory są wyposażone na obu końcach panelu w poziome sprężyny co pozwala kontrolować przemieszczenie poziome. Podpory te w pełni blokują przy tym równocześnie ewentualny przesuw pionowy. Sposób przyłożenia obciążenia niszczącego o wartości charakterystycznej zależy od rodzaju przeprowadzanego testu (na przykład jako 4 pasy równomiernie rozłożonych po szerokości panelu i skierowanych w dół obciążeń pionowych rozmieszczonych w sekwencji 0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L - Rys. 6-1) natomiast ciężar własny panelu jest zaniedbywany. Oczywiście, w przypadku innego schematu obciażenia zastosowany model kalibracyjny powinien być odpowiednio zaktualizowany.

Wyznaczenie miarodajnych wartości sił wewnętrznych przeprowadza się dla zbioru identycznych testów charakteryzowanych jedną wartością charakterystyczną obciążenia niszczącego ustalaną metodami statystycznymi. Dla każdego z tych testów odczytuje się specyficzne dla niego obciążenie niszczące oraz towarzyszące temu obciążeniu pionowe ugięcie panelu w środku rozpiętości. Reprezentatywną wartością losowego ugięcia może być na przykład jego wartość średnia.

Biorąc pod uwagę wyniki pochodzące z opisanych powyżej testów, można przyjąć następującą procedurę:

 Dla i-tego testu odczytuje się ugięcie panelu łukowego w środku rozpiętości f<sub>max</sub> oraz towarzyszące temu ugięciu obciążenie niszczące F<sub>u</sub>. Na podstawie tych dwóch wartości ustala się specyficzny dla tego testu parametr sztywności:



 Dysponując wynikami wszystkich testów zrealizowanych w danym zbiorze ustala się wartość średnią tego parametru, interpretowaną jak jego wartość reprezentatywna:

$$C_f = Mean\left(C_{f,i}\right) \tag{6(5)}$$

- Ugięcie  $f_{\text{max}}$  odpowiadające parametrowi  $C_{\text{f}}$  jest rozumiane jako reprezentatywne dla całego zbioru.
- Ponieważ siły wewnętrzne generowane w łuku są specyfikowane na jednostkę szerokości panelu przy wyznaczaniu reprezentatywnego ugięcia zastępczego trzeba również zastosować mnożenie przez szerokość tego panelu:

$$f_{eq} = (F_{u.k} / C_f) * b_V$$
 6(6)

W obliczeniach prowadzonych z wykorzystaniem programu numerycznego sztywność poziomej sprężyny na podporze jest zmienna. Ustala się ją jednak dla tej samej wartości, dla której wyznaczono ugięcie  $f_{eq}$  korespondujące z wartością charakterystyczną obciążenia niszczącego  $F_{u,k}$ , co pokazano w Tabeli 2. Tak wyznaczoną sztywność oznacza się teraz symbolem  $C_{ind}$ .

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

Tabe 2: Przykład wyznaczenia wartości reprezentatywnego ugięcia panelu kojarzonego z charakterystycznym obciążeniem niszczącym F<sub>u,k.</sub>

Po przeprowadzeniu kalibracji modelu obliczeniowego można wyznaczyć wartości generowanych w panelu sił wewnętrznych.

1. Określenie długości wyboczeniowej Lcr.

Długość wyboczeniową wycinka łuku kołowego określają formuły znane z literatury, na przykład wykorzystując normę DIN 18 800 part 2 otrzymuje się (Rys.Rys. 6-1):

 $L_{cr} = s_K$  przy czym  $s_K = \beta \cdot s_r$ ,





*Rys.* 6-2: Wyznaczanie długości wyboczeniowej odcinka łuku kołowego na podstawie normy DIN 18 800 - 2.

2. Wyznaczenie obliczeniowej nośności na osiowe ściskanie NdD

$$N_{dD} = min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g)$$

$$6(7)$$

gdzie:

- $\sigma_{cd}$  obliczeniowe naprężenie ściskające
- A<sub>ef</sub> powierzchnia efektywnego przekroju poprzecznego wyznaczanego z uwagi na osiowe ściskanie
- $\sigma_{elg}$  eulerowskie naprężenie ściskające dla przekroju poprzecznego brutto
- Ag powierzchnia przekroju poprzecznego brutto
- 3. <u>Warunek interakcji moment zginający osiowa siła ściskająca w ujęciu normy DIN</u> <u>18807</u>

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}}\right)\right] + \frac{M}{M_d} \le 1$$
6(8)

gdzie:

- N<sub>D</sub> obliczeniowa siła ściskająca
- M obliczeniowy moment zginający
- M<sub>d</sub> obliczeniowa nośność na zginanie
- NdD obliczeniowa nośność na osiowe ściskanie

Zgodnie z normą DIN 18807, wartość smukłości zdefiniowanej wcześniej przez zależność 6(3) powinna być ograniczona do 1.

Na podstawie wyników uzyskanych w projekcie GRISPE w przypadku paneli łukowych proponuje się stosować zmodyfikowaną procedurę DIN, bez ograniczenia smukłości a do wartości 1. W ten sposób uzyskane wyniki będą nieco bardziej zachowawcze niż te uzyskane w konwencjonalnym podejściu zgodnym z procedurą DIN.

Metoda kalibracji proponowana w niniejszej instrukcji została zweryfikowana jedynie dla paneli obciążonych w sposób symetryczny.



### **7. SPECYFICZNE UWARUNKOWANIA PROJEKTOWE**

# 7.1. Sytuacje projektowe do których niniejsza instrukcja nie ma zastosowania

Następujące sytuacje projektowe nie są objęte procedurami prezentowanymi w niniejszej instrukcji:

- Analiza odniesiona do sytuacji pożaru: w takim przypadku należy zastosować narodowe regulacje prawne w zgodności z przepisami norm EN 1991-1-2 oraz EN 1993-1-2, w szczególności należy stosować narodowe aneksy dedykowane do tych norm.
- Analiza odniesiona do oddziaływań sejsmicznych: w takim przypadku należy zastosować narodowe regulacje prawne w zgodności z przepisami normy EN 1998-1 oraz dedykowanego dla niej narodowego aneksu.
- Analiza odniesiona do aspektów środowiskowych: w takim przypadku należy zastosować narodowe regulacje prawne.
- Analiza odniesiona do oddziaływań termicznych: w takim przypadku należy zastosować narodowe regulacje prawne w zgodności z przepisami normy EN 1991-1-5 oraz dedykowanego dla niej narodowego aneksu.
- Analiza odniesiona do kwestii akustyki: w takim przypadku należy zastosować narodowe regulacje prawne.

W podobny sposób należy postępować we wszystkich innych sytuacjach których nie da się jednoznacznie skojarzyć z sytuacjami dla których opracowano niniejszą procedurę.

### 8. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

#### 8.1.Objaśnienie prcedury projektowej

Procedura projektowa prezentowana w niniejszej instrukcji pozwala na wyznaczenie nośności na zginanie paneli łukowych otrzymanych w procesie formowania rolkowego płaskich arkuszy blachy profilowanej. Rozpatrzono przy tym dwie różne konfiguracje:

- Pierwszą dla jednoprzęsłowego panelu łukowego opartego na podporach z pełną swobodą poziomego przesuwu (panel poddany czystemu zginaniu) Rys. 8-1,
- Drugą dla jednoprzęsłowego panelu łukowego opartego na podporach z ograniczoną swobodą poziomego przesuwu (panel poddany oddziaływaniu interakcyjnemu momentu zginającego i osiowej siły ściskającej) – Rys. 8-2.



*Rys.* 8-1: Konfiguracja jednoprzęsłowego panelu łukowego z podporami o pełnej swobodzie przesuwu poziomego.





*Rys.* 8-2: Konfiguracja jednoprzęsłowego panelu łukowego z podporami o ograniczonej swobodzie przesuwu poziomego.

W dalszych rozważaniach wyznacza się nośność panelu łukowego podpartego w sposób odpowiadający obu przedstawionym wcześniej konfiguracjom, przy założeniu że panel ten wykonano z blachy profilowanej o przekroju poprzecznym opisanym w sposób następujący:



- Profil blachy: Arcelor 39/333
- Oznaczenie panelu w badaniach eksperymentalnych: H-39-380-63
- Rozpiętość przęsła panelu łukowego: 4.0 m
- Wysokość łuku panelu: 342 mm
- Szerokość panelu: 1 m
- Promień krzywizny łuku panelu: 6.02 m
- Wartość charakterystyczna obciążenia niszczącego (obciążenie przykładane do panelu w procedurze obliczeniowej): 12.77 kN/m
- Ciężar własny panelu: 0.095 kN/m<sup>2</sup>
- Długość panelu: 4.20 m
- Parametry przekroju poprzecznego brutto
  - Pole powierzchni  $A_g = 6.58 \text{ cm}^2/\text{m}$
  - Moment bezwładności J<sub>g</sub> = 9.77 cm<sup>4</sup>/m
  - Promień bezwładności ig = 1.218 cm
- Parametry przekroju poprzecznego efektywnego z uwagi na ściskanie osiowe
  - Pole powierzchni  $A_{ef} = 1.89 \text{ cm}^2/\text{m}$
  - Moment bezwładności J<sub>ef</sub> = 5.21 cm<sup>4</sup>/m
  - Promień bezwładności i<sub>ef</sub> = 1.660 cm
- Nośność na zginanie podana przez producenta panelu:
  - dla dodatniego momentu zginającego M<sub>d</sub><sup>+</sup>= 1.093 kNm/m



- dla ujemnego momentu zginającego  $M_d^- = 1.426$  kNm/m

# 8.1.1. Panel jednoprzęsłowy oparty na podporach z pełną swobodą przesuwu poziomego

W tym przypadku przyłożone do panelu obciążenie zewnętrzne generuje w nim moment zginający i siłę poprzeczną, podłużne siły osiowe są zaniedbywalne.

Obciążenie zewnętrzne jest przyłożone do panelu w postaci czterech pasów obciążenia liniowego równomiernie rozłożonego na szerokości panelu. Pasy te rozmieszczone są w następującej sekwencji licząc od lewej podpory: 0,125 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,125 L.

Na podstawie rekomendacji sformułowanej po przeprowadzeniu badań eksperymentalnych w ramach programu GRISPE nośność na zginanie panelu łukowego została oszacowana na poziomie 90% analogicznej nośności wyznaczonej dla odpowiadającego temu panelowi panelu płaskiego.

Maksymalny przęsłowy moment zginający dla panelu płaskiego wyznacza się z zależności:

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

gdzie:

M<sub>c,Rk,F</sub> - wartość charakterystyczna przęsłowego momentu zginającego (kNm/m)

- F<sub>u,k</sub> wartość charakterystyczna przyłożonego obciążenia w kN (w tym także obciążenie wstępne)
- bv szerokość testowanego panelu
- Lv długość testowanego panelu
- L rozpiętość przęsła panelu (przy czym: L = 2,00 m lub 3,00 m lub 4,00 m)
- g ciężar własny panelu

Dla przyjętych danych przy płaskim panelu otrzymano:

$$M_{c,Rk,F} = \frac{12.77}{1} \cdot \frac{4}{8} + 0.095 \cdot 4.20 \cdot [2 \cdot 4 - 4.20]/8 = 6.57 \text{kN/m/m}$$

Tę wartość należy wprowadzić do odpowiedniego pola arkusza kalkulacyjnego, oznaczonego kolorem czerwonym. W sąsiednim polu pokaże się natychmiast wartość nośności specyfikowana dla odpowiadającego rozpatrywanemu panelowi płaskiemu panelu łukowego. Jest to po prostu wartość wyliczona dla panelu płaskiego i zredukowana o 10%.



# 8.1.2. Jednoprzęsłowy panel łukowy oparty na podporach o ograniczonej możliwości przesuwu poziomego



W tym przypadku zostanie zastosowana opisana wcześniej procedura wielokrokowa.





Rys. 8-3: Schemat i wymiary zastosowanego do obliczeń modelu numerycznego.

Łuk o kształcie wycinka koła zostaje aproksymowany wielokątem składającym się z 16 odcinków prostych. Kolejne węzły otrzymuja przy tym numery od 1 do 17 (Rys. 8-3 i 8-4). Obliczenia dotyczą panelu o szerokości 1.0 m. Podpory, zlokalizowane w węzłach 1 i 17, są modelowane przez poziome sprężyny co pozwala na monitorowanie poziomych przemieszczeń. Obie podpory nie pozwalają na przesuw pionowy. Charakterystyczne obciążenie niszczące, przyłożono do panelu w 4 pasach, jako równomiernie rozłożone na całej szerokości tego panelu obciążenie liniowe. Miejscem przyłożenia poszczególnych pasów obciążenia były węzły 3, 7, 11 i 13, co oznaczało sekwencję 0,125 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,125 L. Ciężar własny panelu został pominięty w obliczeniach.

Ponieważ siły wewnętrzne w łuku zależą od poziomego przemieszczenia podpór sprawą podstawową jest taki dobór sztywności sprężyn aby zapewnić zgodność przemieszczeń symulowanych z pomierzonymi. Dobór tej sztywności powinien przy tym być dokonany raczej po stronie słabej, tak aby zapewnić odpowiedni poziom bezpieczeństwa przy projektowaniu. Pominięcie wpływu przemieszczenia poziomego na podporze dałoby zbyt korzystne oszacowanie osiowej siły ściskającej a zatem byłoby to projektowanie po stronie niebezpiecznej. W niniejszym przykładzie sztywność poziomej sprężyny podporowej jest ustalana przez dopasowanie pionowego ugięcia w środku rozpiętości łuku, symulowanego numerycznie, do analogicznego pionowego ugięcia tego samego łuku, zmierzonego w teście.

Wyznaczenie miarodajnych wartości sił wewnętrznych dokonuje się dla charakterystycznego obciążenia niszczącego. Służąca do porównań z wynikami symulowanymi numerycznie eksperymentalna wartość pionowego przemieszczenia łuku jest przy tym ustalana jako wartość reprezentatywna z całej serii podobnych testów.

Dla każdego testu ustala się pionowe ugięcie łuku w środku rozpiętości przęsła f<sub>max</sub> oraz towarzyszącą temu ugięciu wartość obciążenia niszczącego F<sub>u</sub>. Na tej podstawie wyznacza się specyficzny dla tego testu parametr sztywności:

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

Następnie ustalana jest wartość średnia z całej rodziny podobnych testów:

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

W końcu ustala się wartość reprezentatywną równoważnego ugięcia panelu. Ponieważ siły wewnętrzne generowane w łuku są obliczane na jednostkę szerokości panelu wartość reprezentatywna równoważnego ugięcia musi być także przemnożona przez tą szerokość:

$$f_{eq} = (F_{u.k} / C_f) * b_V$$

# GRISPE PLUS

Design Manual for curved profiles

GRISPE+ WG

		Spring Cross stiffness at ection support C <sub>f</sub> [kN/m]		Dislacement			Support		M/N values [kN/m/m, kN/m]		
Test setup/ span	Cross section			Dislacement		[kN/m]		at load point near to summit		at support	
				fh (support)	f <sub>∨</sub> (summit)	R <sub>h</sub>	Rv	max M	corresp N	max N	
		fixed	11.03	0.00	0,11	20.46	5.52	0.17	20.62	21.19	
		68.00	11.03	0.28	1.67	18.81	5.52	0.49	18.98	19.60	
	gross	20.00	11.03	0.79	4.55	15.76	5.52	1.08	15.94	16.65	
1/2.00m		10.00	11.03	1.28	7.33	12.82	5.52	1.65	13.01	13.80	
1/5.0011		fixed	11.03	0.00	0.41	20.35	5.52	0.19	20.51	21.08	
	effective	88.00	11.03	0.22	1.66	19.64	5.52	0.33	19.80	20.40	
		20.00	11.03	0.88	5.33	17.57	5.52	0.73	17.74	18.39	
		10.00	11.03	1.55	9.08	15.46	5.52	1.14	15.64	16.35	
	gross	fixed	12.77	0.00	0.08	19.13	6.39	0.35	19.35	20.16	
		62.00	12.77	0.30	1.45	18.64	6.39	0.40	18.87	19.70	
		20.00	12.77	0.88	4.10	17.69	6.39	0.71	17.92	18.80	
2/4.00m		10.00	12.77	1.64	7.56	16.45	6.39	1.11	16.69	17.62	
		fixed	12.77	0.00	0.39	19.09	6.39	0.26	19.31	20.13	
	offoctivo	79.00	12.77	0.24	1.44	18.88	6.39	0.33	19.11	19.93	
	enective	20.00	12.77	0.91	4.51	18.29	6.39	0.51	18.53	19.37	
		10.00	12.77	1.76	8.33	17.56	6.39	0.75	17.80	18.68	
		fixed	6.62	0.00	0.02	9.23	3.31	0.16	9.36	9.81	
	aross	29.00	6.62	0.31	1.34	9.01	3.31	0.26	9.14	9.60	
	gross	20.00	6.62	0.45	1.91	8.91	3.31	0.30	9.04	9.50	
3/5 00m		10.00	6.62	0.86	3.67	8.61	3.31	0.43	8.74	9.22	
5/5.0011		fixed	6.62	0.00	0.23	9.22	3.31	0.16	9.35	9.80	
	offoctivo	33.00	6.62	0.28	1.33	9.12	3.31	0.21	9.09	9.70	
	enective	20.00	6.62	0.45	2.07	9.05	3.31	0.24	9.18	9.63	
		10.00	6.62	0.89	3.91	8.88	3.31	0.31	9.01	9.48	

Tabela 3: Siły wewnętrzne i ugięcia w rozpatrywanym łuku odpowiadające wartości charakterystycznej obciążenia niszczącego.

Kolorem zielonym oznaczono sztywność sprężyny podporowej dobraną do ugięcia panelu w środku rozpiętości zmierzonego w teście.

Czerwoną linią obramowano konfigurację rozpatrywaną w analizowanym przypadku.



Rys. 8-4: Schemat modelu numerycznego zastosowanego w rozpatrywanym przykładzie.

W prezentowanych obliczeniach z użyciem modelu numerycznego wynikowa sztywność podpory jest zmienna. Miarodajnym do dalszego wnioskowania jest rezultat uzyskany dla



GRISPE+ WG

wybranej wartości ugięcia f<sub>eq</sub> skojarzonej z charakterystycznym obciążeniem niszczącym. Ta wartość odpowiada sztywności C<sub>ind</sub>.

Obciążenie niszczące w analizowanym przykładzie miało wartość 12.77kN/m co można odczytać z Tabeli 3. Rozkłada się ono na obciążenia przyłożone w czterech wyszczególnionych wcześniej węzłach modelu numerycznego, dając w każdym z tych węzłów:

$$F_{u, nodes} = 12.77/4 = 3.19 kN$$

Pionowe ugięcie łuku panelu w środku przęsła w analizowanym przykładzie miało wartość:

#### $f_v=1.45 \text{ cm}$

Tę wartość odczytano przy założonej sztywności sprężyny podporowej na poziomie:

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

Dla wskazanych powyżej parametrów w przekroju poprzecznym w którym występuje maksymalny moment zginający (klucz łuku) odczytano:

M=0.40 kNm/m

N<sub>D</sub>= 18.87 kN/m

Powyższe wartości wstawiono do odpowiednich komórek arkusza kalkulacyjnego napisanego w środowisku Excel, zaznaczonych poniżej kolorem czerwonym:

f <sub>yb</sub>	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]	N <sub>c,Ed</sub>	18.87	[kN/m]
Е	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]	M <sub>c,Ed</sub>	0.40	[kNm/m]
$L_{cr}=\beta s$	207.9	[cm]	M <sub>c,Rd</sub>	1.09	[kNm/m]
Ag	6.58	[cm²/m]			
İg	1.22	[cm]			
A <sub>ef</sub>	1.89	[cm <sup>2</sup> /m]			
İ <sub>ef</sub>	1.66	[cm]			

Krok 2: Określenie długości wyboczeniowej Lcr.

Sposób wyznaczenia długości wyboczeniowej łuku o kształcie wycinka kołowego można znaleźć w literaturze przedmiotu. Przykładowo, w normie DIN 18800-2 podano następujący sposób postępowania w tym zakresie:

Długość łuku b

Stosunek wysokości łuku do rozpiętości przęsła f/L

Współczynnik długości wyboczeniowej  $\beta = f(f/L)$ , na podstawie Rys. 8-5

Długość wyboczeniowa  $L_{cr} = \beta * s = \beta * b/2$ 

*s* jest połową długości łuku (Rys. 8-5).

GRISPE PLUS

Design Manual for curved profiles



*Rys.* 8-5: Wyznaczanie współczynnika długości wyboczeniowej łuku o kształcie wycinka koła na podstawie normy DIN 18800 – 2.

Przykładowo, dla następujących danych wejściowych:

Wysokość łuku f = 342 mmRozpiętość przęsła L = 4000 mmKąt nachylenia podpory  $\alpha/2 = 0,338$ Promień krzywizny R = 4000 / (2 \* sin 0,338) = 6024 mmDługość łuku b = 6024 \* 2 \* 0,338 = 4072 mmWspółczynnik wysokości łuku do rozpiętości przęsła f/L = 342 / 4000 = 0,085Współczynnik długości wyboczeniowej  $\beta = 1,02$ Długość wyboczeniowa  $L_{cr} = 1,02 * 4072 / 2 = 2079 \text{ mm}$ 

Wartość długości wyboczeniowej jest wstawiana do odpowiedniej komórki, zaznaczonej na czerwono, arkusza kalkulacyjnego napisanego w środowisku Excel.

f <sub>yb</sub>	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]		N <sub>c,Ed</sub>	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]		$M_{c,Ed}$	0.4	[kNm/m]
L <sub>cr</sub> =β s	207.9	[cm]		$M_{c,Rd}$	1.09	[kNm/m]
Ag	6.58	[cm²/m]	•			
İg	1.22	[cm]				
A <sub>ef</sub>	1.89	[cm²/m]				
İef	1.66	[cm]				



Krok3: Wyznaczenie obliczeniowej nośności na czyste ściskanie NdD

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g)$$

Siła odpowiadająca wyboczeniu idealnemu:

$$maxN_{dD} = 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g$$
$$maxN_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_g}{L_{cr}^2}$$
$$maxN_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 9.77}{207.9^2}$$
$$maxN_{dD} = 37.47kN$$

Siła krytyczna skojarzona z wyboczeniem:

$$ultN_{dD} = \sigma_{cd} \cdot A_{ef}$$

Współczynnik smukłości:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{ef} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{yk}}{E}}$$
$$\alpha = \frac{207.9}{1.66 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{408.3}{210000}} = 1.758$$

Krzywa wyboczeniowa na podstawie normy DIN 18807:

α	σ <sub>cd</sub> /βs
a≤ 0.30	1.00
$0.30 < \alpha \leq 1.85$	1.126 -0.419 α
1.85< α	1.2/ α <sup>2</sup>

$$\frac{\sigma_{cd}}{f_{yk}} = 1.126 - 0.419 \cdot 1.758 = 0.390$$

 $\sigma_{cd} = 0.390 \cdot 408.3 = 159.0 \, N/mm^2$ 

Siła krytyczna skojarzona z wyboczeniem:

 $ultN_{dD} = 15.9 \cdot 1.8895 = 30.06 \; kN/m$ 

Obliczeniowa nośność na ściskanie:

$$N_{dD} = 30.06 \ kN/m$$

Powyższe wartości zostają automatycznie wyświetlone w odpowiednich, zaznaczonych na czerwono, komórkach arkusza kalkulacyjnego napisanego w środowisku Excel.

f <sub>yb</sub>	408.3	[N/mm <sup>2</sup> ]	$N_{c,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm <sup>2</sup> ]	$M_{c,Ed}$	0.40	[kNm/m]
L <sub>cr</sub> =β s	207.9	[cm]	Mc,Rd	1.09	[kNm/m]
Ag	6.58	[cm²/m]			
İg	1.22	[cm]			

GRISPE PLUS

Design Manual for curved profiles

	A <sub>ef</sub>	1.89	[cm²/m]			
	İef	1.66	[cm]			
Slenderness ratio		o Idea	buckling force	Reduction factor	Critical buckling force	
α [-]			[kN/m]	χ[-]	[kN/m]	
	1.76		37.45	0.39	30.05	
N <sub>c,Rd</sub> Nc,Ed / Mc,Ed /	′ N <sub>c,Rd</sub> / M <sub>c,Rd</sub>	30.05 0.63 0.37	5 [kN/m] [-] [-]			

#### Krok 4: Interakcja momentu zginającego i osiowej siły ściskającej

Zgodnie z zapisami normy DIN 18807 współczynnik smukłości  $\alpha$ =1,758 powinien być ograniczany do wartości 1, ale w niniejszym przykładzie dotyczącym zmodyfikowanej procedury DIN 18807 dostosowanej do paneli łukowych wartość tego współczynnika nie podlega temu ograniczeniu. Formuła interakcyjna opisująca interakcję M-N ma postać:

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot \alpha \left( 1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \le 1$$
$$\frac{18.87}{30.06} \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot 1.758 \left( 1 - \frac{18.87}{30.06} \right) \right] + \frac{0.40}{1.093}$$
$$= 0.628 \cdot \left[ 1 + 0.5 \cdot 1.758 (1 - 0.628) \right] + 0.366$$
$$= 0.833 + 0.366 = 1.20 > 1$$

Powyższy wynik jest automatycznie wyświetlany w arkuszu kalkulacyjnym napisanym w środowisku Excel:

Interaction formula	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}}\right)\right] + \frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}}$	1.20>1.0
	=	

Na podstawie tej formuły potwierdzono, że przy obciążeniu składającym się z czterech pasów z siłą 3.19kN przyłożoną w każdym pasie, co daje łącznie obciążenie 12.77kN, łuk ulegnie wyboczeniu tak jak to obserwowano w testach.

## 9. BIBLIOGRAFIA

[1] James L. Jorgenson J.L., Chowdhury A.H.: Buckling Strength of cold formed steel curved panels.

[2] EN 1090-4:2016 Execution Of Steel Structures And Aluminium Structures - Part 4: Technical Requirements For Cold-Formed Structural Steel Elements And Cold-Formed Structures For Roof, Ceiling, Floor And Wall Applications

[3] CEN, EN 1990 Eurocode: basis of structural design



Design Manual for curved profiles

[4] CEN, EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings [5] CEN, EN 1991-1-2: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire [6] CEN, EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads [7] CEN, EN 1991-1-4: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions [8] CEN, EN 1991-1-5: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions [9] CEN, EN 1991-1-6: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution" [10] CEN, EN 1993-1-2: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design [11] CEN, EN 1993-1-3:2006 - Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2006. [12] CEN, EN 1998-1: 2013 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance [13] DIN 18807 part 1 and part 3: trapezoidal sheeting in buildings; steel trapezoidal sheeting. [14] DIN 18800 part2: steel structures- stability- buckling of bars and skeletal structures [15] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.2 Test program definition, 2016 [16] R. HOLZ, GRISPE - WP2: Curved Profiles - D2.4 Test analysis and interpretation,2016



## Annex 1

Poszczególne etapy prac nad opracowaniem niniejszej procedury:

D2.1	GRISPE WP2 Background document	Christian FAUTH (KIT)
D2.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Rainer HOLZ (IFL)
D2.3	GRISPE Test report of curved profiles	Christian FAUTH (KIT)
D2.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Rainer HOLZ (IFL)
D2.5	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of sheeting with embossments and indentations	Christian FAUTH (KIT)