

# **KONSTRUKCJE STALOWE W EUROPIE**

**Jednokondygnacyjne  
konstrukcje stalowe**

**Część 6: Projekt wykonawczy  
słupów złożonych**



**Jednokondygnacyjne  
konstrukcje stalowe  
Część 6: Projekt wykonawczy  
słupów złożonych**



## PRZEDMOWA

Niniejsza publikacja stanowi część szóstą przewodnika projektanta zatytułowanego *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Przewodnik *Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe* składa się z następujących 11 części:

- Część 1: Poradnik architekta
- Część 2: Projekt koncepcyjny
- Część 3: Oddziaływania
- Część 4: Projekt wykonawczy ram portalowych
- Część 5: Projekt wykonawczy kratownic
- Część 6: Projekt wykonawczy słupów złożonych
- Część 7: Inżynieria pożarowa
- Część 8: Przegrody zewnętrzne budynku
- Część 9: Wprowadzenie do oprogramowania komputerowego
- Część 10: Wzorcowa specyfikacja konstrukcji
- Część 11: Połączenia zginane

*Jednokondygnacyjne konstrukcje stalowe* to jeden z dwóch przewodników projektanta. Drugi przewodnik nosi tytuł *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Obydwa przewodniki projektanta powstały w ramach europejskiego projektu „Wspieranie rozwoju rynku kształowników na potrzeby hal przemysłowych i niskich budynków (SECHALO) RFS2-CT-2008-0030”.

Przewodniki projektanta zostały opracowane pod kierownictwem firm ArcelorMittal, Peiner Träger oraz Corus. Treść techniczna została przygotowana przez ośrodki badawcze CTICM oraz SCI współpracujące w ramach joint venture Steel Alliance.

*Część 6: Projekt wykonawczy słupów złożonych*

## Spis treści

	<b>Nr strony</b>
PRZEDMOWA	iii
STRESZCZENIE	vi
1 WPROWADZENIE	1
2 RODZAJE ELEMENTÓW ZŁOŻONYCH I ZAKRES ICH ZASTOSOWANIA	2
2.1 Ogólne	2
2.2 Słupy złożone z kratowaniem	5
2.3 Słupy złożone z przewiązkami	8
3 OBLICZENIA SZCZEGÓŁOWE	9
3.1 Ogólne	9
3.2 Metodologia obliczeniowa dla słupów złożonych z kratowaniem	9
3.3 Metodologia obliczeniowa dla słupów złożonych z przewiązkami	15
3.4 Długość wyboczeniowa	19
LITERATURA	20
ZAŁĄCZNIK A Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	22

## **STRESZCZENIE**

W niniejszym przewodniku omówiono układy konstrukcyjne i obliczenia słupów złożonych wykonanych z kształtowników walcowanych na gorąco.

Obliczenia zawierają odnośniki do normy europejskiej EN 1993-1-1 z dodatkowymi informacjami w razie potrzeby.

Zaprezentowano podane w normie EN 1993-1-1 procedury projektowe umożliwiające weryfikację słupa złożonego z kratowaniem lub z przewiązkami za pomocą uproszczonych równań i wzorów.

W Załączniku A podano przykład praktyczny.



# 1 WPROWADZENIE

Słupy złożone wykorzystuje się w konstrukcji stalowej, gdy długości wyboczeniowe słupa są duże, a siły ściskające są stosunkowo małe. W niniejszym przewodniku omówiono dwa rodzaje słupów złożonych:

- słupy złożone z kratowaniem,
- słupy złożone z przewiązkami.

W niniejszym dokumencie przedstawiono przegląd podstawowych informacji dotyczących takich elementów konstrukcyjnych. Opisano w nim zgodną z normą EN 1993-1-1<sup>[1]</sup> metodę projektową służącą do wyznaczania sił wewnętrznych i nośności na wyboczenie każdego elementu (pasów, krzyżulców itp.) słupów złożonych wykonanych z kształtowników walcowanych na gorąco.

Należy zauważyć, że z powodu odkształcenia przy ścinaniu słupy złożone z przewiązkami są bardziej giętkie niż słupy pełnościenne o takiej samej bezwładności; musi to być uwzględnione w projekcie.

Aby uzyskać nośność osiową stalowego słupa złożonego, należy zająć się następującymi kwestiami:

- Analiza słupa złożonego w celu określenia sił wewnętrznych przez uwzględnienie równoważnej początkowej imperfekcji i efektów drugiego rzędu
- Weryfikacja pasów i elementów stężających (krzyżulców i przewiązek)
- Weryfikacja połączeń.

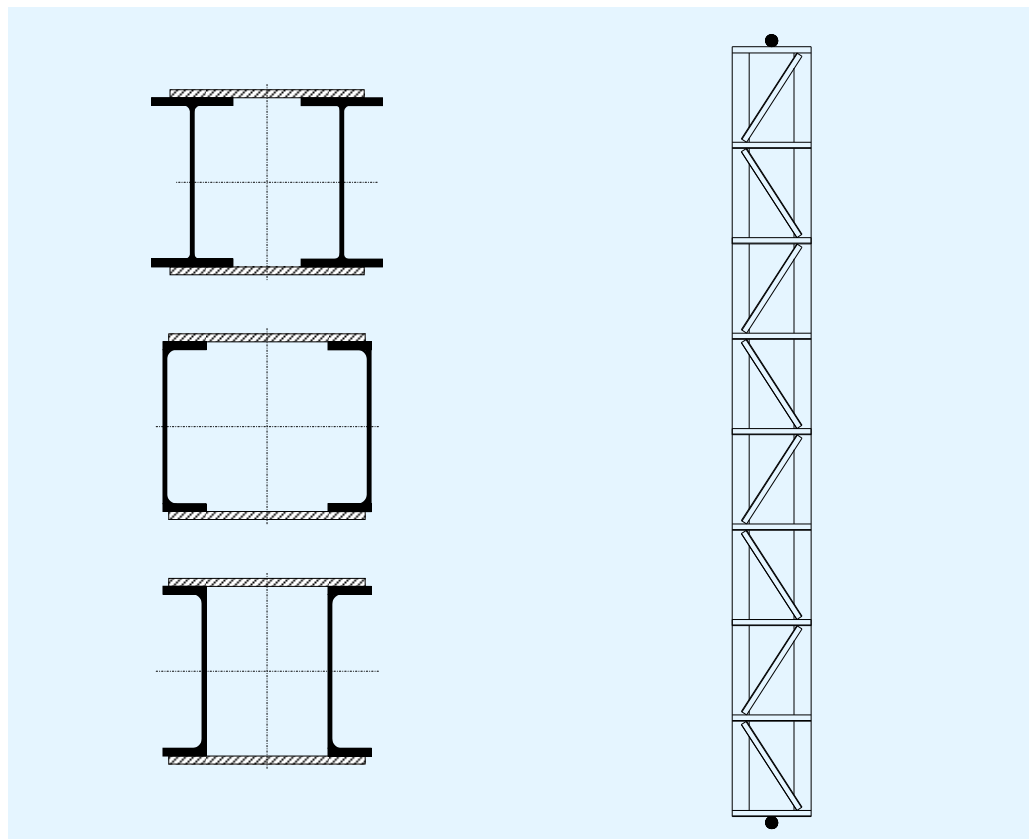
Pełny przykład praktyczny słupa złożonego o układzie kratowania typu N podano w Załączniku A ilustrującym zasady projektowania.

## 2 RODZAJE ELEMENTÓW ZŁOŻONYCH I ZAKRES ICH ZASTOSOWANIA

### 2.1 Ogólne

Ogólnie rzecz biorąc, słupy złożone w budynkach przemysłowych wykorzystywane są albo jako słupy do podtrzymywania okładzin, gdy ich długość wyboczeniowa jest bardzo duża, albo jako słupy podpierające belkę podsownicową.

Gdy słup jest wykorzystywany jako słup do podtrzymywania okładzin, z końcami połączonymi przegubowo, projektuje się go tak, aby przeciwstawił się siłom poziomym wynikającym głównie z naporu wiatru. Stąd moment zginający w takim słupie złożonym jest dominujący w stosunku do siły ściskającej.

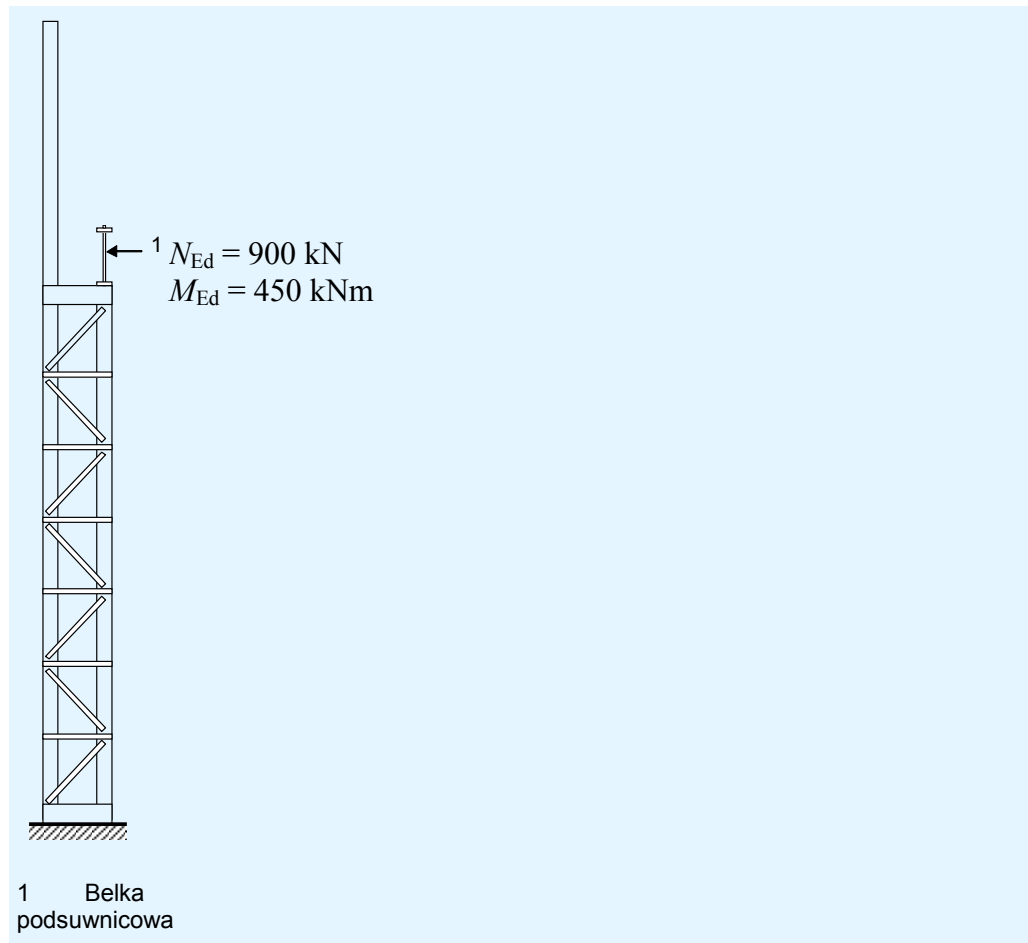


**Rysunek 2.1 Słup do podtrzymywania okładzin z końcami połączonymi przegubowo**

Typowy słup złożony podpierający belkę podsownicową pokazano na rysunku 2.2. Słupy tego rodzaju zwykle mają zamocowaną podstawę i górny koniec połączony przegubowo, a projektuje się je tak, aby mogły wytrzymać:

- Siły ściskające wywierane przez ramę lub szynę podsownicową
- Wynikające z oddziaływań dźwigni siły poziome przyłożone do pasa wewnętrznego oraz obciążenia wiatrem przyłożone do pasa zewnętrznego.

W tym przypadku siły ściskające są dominujące w stosunku do momentu zginającego.



**Rysunek 2.2 Słup złożony podpierający belkę podsuwnicową**

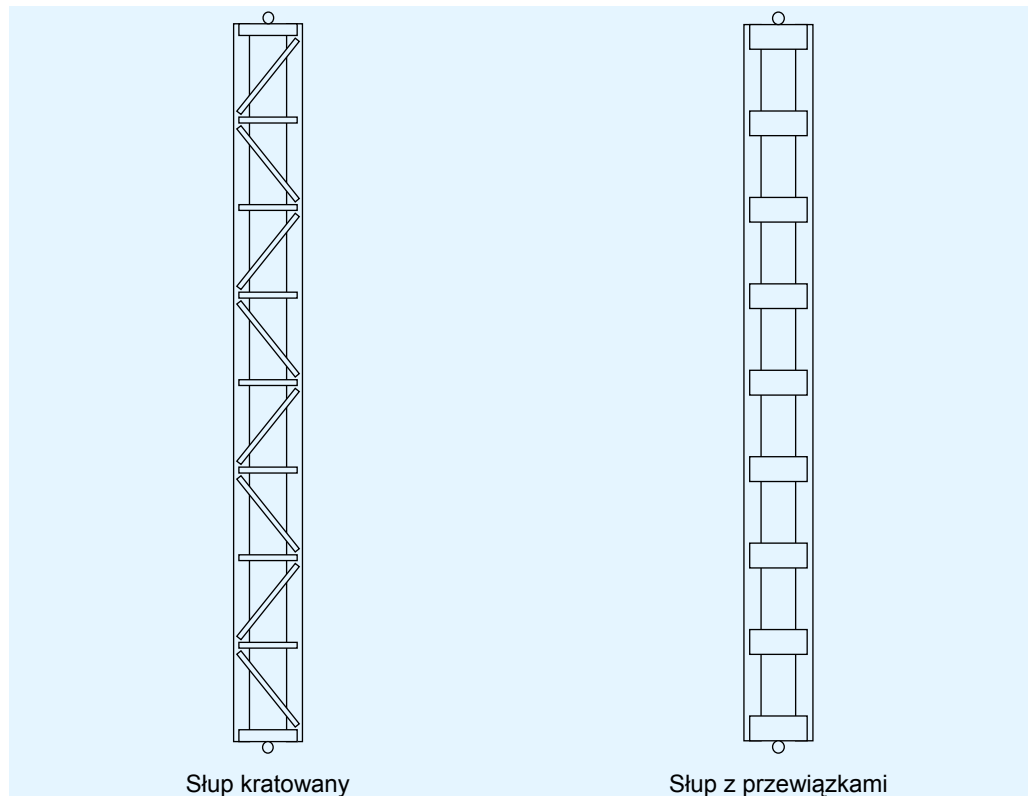
Słupy złożone składają się z dwóch równoległych pasów połączonych ze sobą za pomocą kratowania lub przewiązek, patrz rysunek 2.1. Generalnie układ kratownicy z reguły koncentruje materiał w miejscach najbardziej efektywnych konstrukcyjnie pod względem przenoszenia sił.

W budynku przemysłowym oraz dla danej wysokości, słupy złożone mają teoretycznie najmniejszą masę stali ze wszystkich stalowych konstrukcji ramowych.

Pasy i elementy usztywniające słupa złożonego mogą być wykonane z dowolnego kształtownika walcowanego na gorąco. Najczęściej jednak pasy wykonywane są z ceowników lub dwuteowników. Ich kombinacja z kątownikami stanowi dogodne rozwiązanie techniczne słupów złożonych z kratowaniem lub przewiązkami. W słupach złożonych przewiązki wykonuje się również z płaskowników.

W niniejszym przewodniku omówiono dwa rodzaje słupów złożonych z końcami połączonymi przegubowo, w stosunku do których zakłada się, że są bocznie podparte:

- słupy kratowane,
- słupy z przewiązkami.



**Rysunek 2.3 Słupy złożone**

Różnica między tymi dwoma rodzajami słupów złożonych polega na sposobie połączenia elementów usztywniających (kratowania i przewiązek) z pasami. Słup pierwszego rodzaju zawiera krzyżulce (i ewentualnie rozpórki) projektowane z końcami połączonymi przegubowo. Słup drugiego rodzaju zawiera przewiązki z końcami przymocowanymi do pasów i funkcjonujące jak prostokątna płyta.

Bezwładność słupa złożonego zwiększa się wraz ze wzrostem odległości między osiami pasów. Wzrost sztywności jest równoważony zwiększeniem masy i kosztów połączeń między elementami.

Słupy złożone charakteryzują się względnie lekką konstrukcją o dużej bezwładności. Istotnie położenie pasów, z dala od środka masy przekroju słupa złożonego, bardzo korzystny wpływa na osiąganie dużej bezwładności. Te elementy konstrukcyjne są zwykle przeznaczone do wykorzystywania w wysokich konstrukcjach, w których przemieszczenia poziome są ograniczone do małych wartości (np. słupy podpierające belki podsuwnicowe).

Na nośność osiową słupów złożonych duży wpływ mają odkształcenia przy ścinaniu. Początkowa imperfekcja łukowa znacząco się zwiększa z powodu odkształceń przy ścinaniu.

Zachowanie słupów złożonych można analizować za pomocą prostego modelu sprężystego.

## 2.2 Słupy złożone z kratowaniem

### 2.2.1 Ogólne

Istnieje wiele konfiguracji słupów z kratowaniem, które można brać pod uwagę. Powszechnie jednak wykorzystuje się układy kratowania typu N i typu V.



**Rysunek 2.4 Słup złożony z kratowaniem w budynku przemysłowym**

Wybór na pasy ceowników lub dwuteowników zapewnia różne korzyści. Dwuteowniki są efektywniejsze konstrukcyjnie i dlatego są potencjalnie płytsze niż ceowniki. W przypadku słupów złożonych, na które działa duża osiowa siła ściskająca (na przykład w przypadku słupów podpierających dźwignice), dwuteowniki lub dwuteowniki szerokostopowe są odpowiedniejsze niż ceowniki. Ceowniki mogą być odpowiednie wówczas, gdy trzeba zapewnić dwie płaskie strony.

Teowniki wycięte z kształtowników słupów zgodnych z normami europejskimi również mogą być wykorzystywane jako pasy. Średnik teowników powinien być odpowiednio wysoki, aby można było łatwo przyspawać elementy stężające.

Elementy usztywniające słupa z kratowaniem utworzone z kątowników pozwalają na wykonanie połączeń spawanych bez blach węzłowych, co minimalizuje koszty wytwarzania. Inne rodzaje elementów wymagają zastosowania blach węzłowych lub bardziej złożonego spawania.

Osie środków masy elementów usztywniających poddawanych ściskaniu i rozciąganiu nie muszą spotykać się w tym samym punkcie na osiach pasów. W rzeczywistości słupy z kratowaniem z mimośrodowością na połączeniach mogą być tak samo efektywne, jak słupy bez mimośrodowości. Połączenie pas-element usztywniający może być rozdzielone bez zwiększenia masy stali. Choć

połączenia mimośrodowe wymagają obliczenia momentów miejscowych, mają one pewne zalety. Połączenia mimośrodowe zapewniają dodatkowe miejsce na spawanie, zmniejszając tym samym złożoność wytwarzania. Ponadto zmniejszona długość pasa ściskanego zapewnia podwyższoną nośność na wyoboczenie i przy zginaniu, co częściowo kompensuje dodatkowe momenty generowane przez mimośrodowość połączenia. W przypadku pojedynczych kątowników zaleca się, aby mimośrodowość połączenia była zminimalizowana.

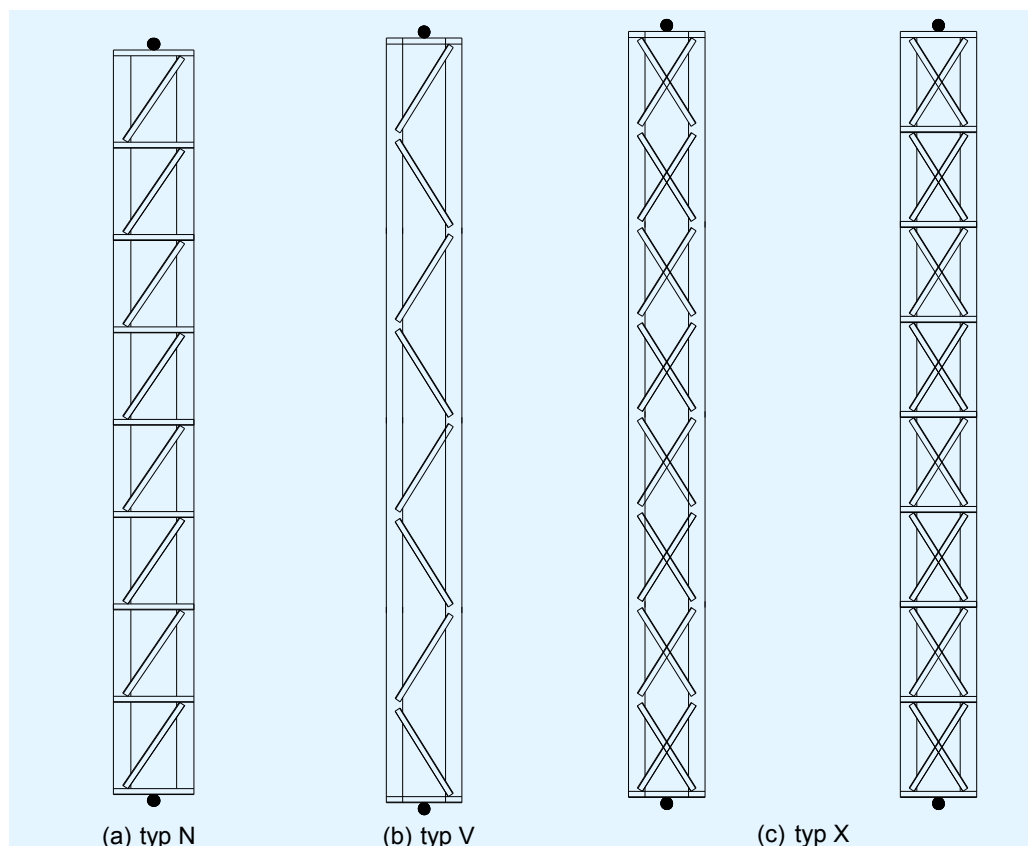
### 2.2.2 Różne geometrie kratowania

Układ kratowania typu N, pokazany na rysunku 2.5(a), można uznać za najbardziej efektywną konfigurację kratownicy dla typowych ram w budynkach przemysłowych. Elementy usztywniające układu typu N składają się z krzyżulców i słupków, które spotykają się w tym samym miejscu na osiach pasów.

Taki układ zmniejsza długość ściskanych pasów i krzyżulców. Zwykle stosuje się go w ramach, na które działa znaczna równomierna siła ściskająca.

W układzie kratowania typu V zwiększona jest długość ściskanych pasów i krzyżulców oraz zmniejszona jest nośność tych elementów konstrukcyjnych na wyoboczenie. Ten układ wykorzystuje się w ramach, na które działa niewielka siła ściskająca.

Konfiguracje typu X zasadniczo nie są wykorzystywane w budynkach, ze względu na koszty i złożoność wytwarzania.



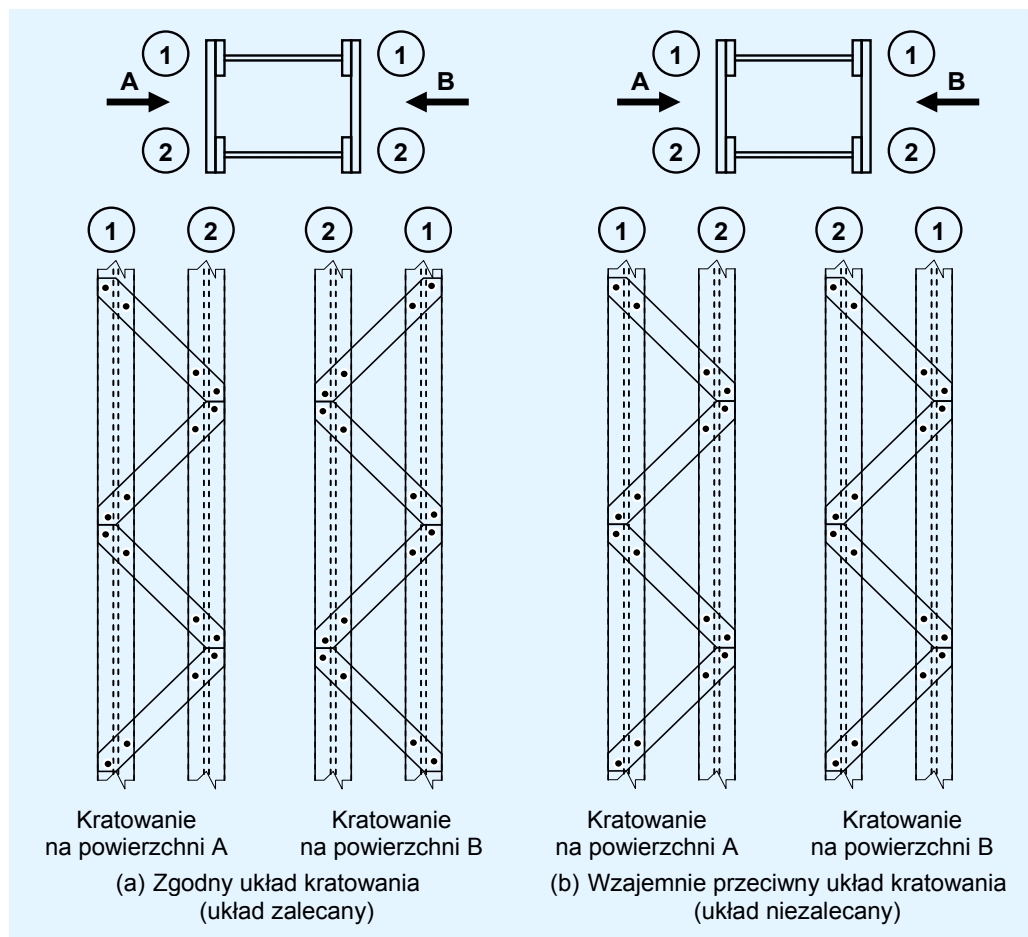
Rysunek 2.5 Różne typy układów kratowania

### 2.2.3 Szczegóły konstrukcji

Pojedyncze układy kratowania na przeciwległych powierzchniach elementu konstrukcyjnego złożonego o dwóch równoległych płaszczyznach kratowanych powinny być układami zgodnymi, jak pokazano na rysunku 2.6(a) (EN 1993-1-1, § 6.4.2.2(1)).

Gdy pojedyncze układy kratowania na przeciwległych powierzchniach elementu konstrukcyjnego złożonego o dwóch równoległych płaszczyznach kratowanych są ustawione wzajemnie przeciwnie, jak pokazano na rysunku 2.6(b), wówczas należy uwzględnić wynikowe momenty skręcające w elemencie konstrukcyjnym. Pasy muszą być projektowane z uwzględnieniem dodatkowej mimośrodowości spowodowanej zginaniem poprzecznym, co może mieć znaczący wpływ na rozmiar elementu konstrukcyjnego.

Zaleca się zamontowanie płyt łączących na końcach układów kratowania, w miejscach przerwania kratowania oraz w miejscach połączeń z innymi elementami konstrukcyjnymi.



**Rysunek 2.6** Pojedynczy układ kratowania na przeciwległych powierzchniach elementu konstrukcyjnego złożonego o dwóch równoległych płaszczyznach kratowanych

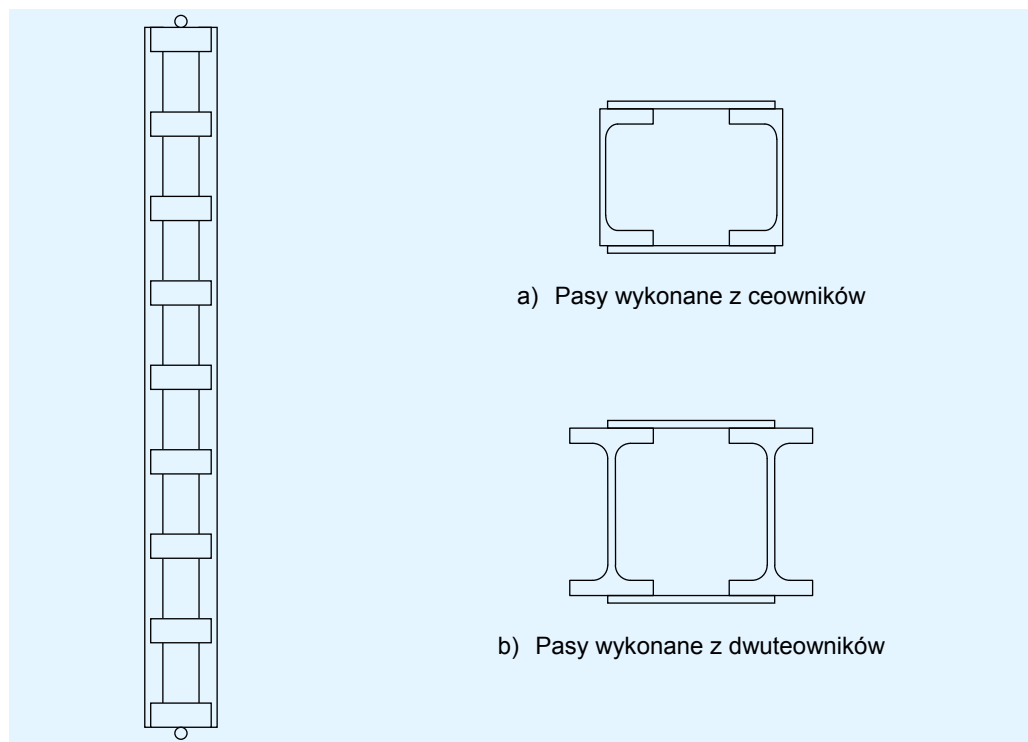
## 2.3 Słupy złożone z przewiązkami

Słupy złożone z przewiązkami nie są odpowiednie w przypadku ram w budynkach przemysłowych. Czasami wykorzystuje się je jako odosobnione elementy konstrukcyjne ram w szczególnych warunkach, tam gdzie siły poziome nie są znaczące.

Pasy najczęściej wykonuje się z ceowników lub teowników, natomiast przewiązki wykonywane są z płaskowników. Końce przewiązek muszą być przymocowane do pasów.

Słupy złożone z przewiązkami składają się z leżących na dwóch równoległych płaszczyznach przewiązek połączonych z półkami pasów. Położenie przewiązek powinno być jednakowe na obydwóch płaszczyznach. Przewiązki należy umieszczać na każdym końcu elementu konstrukcyjnego złożonego.

Należy także umieszczać przewiązki w pośrednich punktach przyłożenia obciążeń oraz w punktach utwierdzenia bocznego.



Rysunek 2.7 Elementy konstrukcyjne ściskane z przewiązkami z dwoma rodzajami pasów



## 3 OBLICZENIA SZCZEGÓŁOWE

### 3.1 Ogólne

Opisana poniżej metodologia obliczeniowa może być stosowana do weryfikacji nośności różnych komponentów elementu konstrukcyjnego złożonego z końcami połączonymi przegubowo pod kątem najbardziej krytycznej kombinacji ULS. Przyjmuje się, że obliczeniowa siła osiowa  $N_{Ed}$  i obliczeniowy moment zginający  $M_{Ed}$  względem osi mocnej elementu konstrukcyjnego złożonego zostały wyznaczone na podstawie analizy zgodnie z normą EN 1993-1-1<sup>[1]</sup>.

Ta metodologia ma zastosowanie do słupów złożonych, w których moduły kratowania lub przewiązek są jednakowe, a pasy są równoległe. Minimalną liczbą modułów elementu konstrukcyjnego jest 3.

Metodologię przedstawiono na schemacie blokowym na rysunku 3.2 dla słupów złożonych z kratowaniem i na rysunku 3.4 dla słupów złożonych z przewiązkami. Zilustrowano ją przykładem praktycznym podanym w Załączniku A.

### 3.2 Metodologia obliczeniowa dla słupów złożonych z kratowaniem

#### 3.2.1 Krok 1: Maksymalna ściskająca siła osiowa w pasach

##### **Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi**

Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi oblicza się za pomocą następującej zależności (EN 1993-1-1, § 6.4.2.1(4)):

$$I_{\text{eff}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}}$$

gdzie:

$h_0$  jest odległością między środkami masy pasów.

$A_{\text{ch}}$  jest polem przekroju poprzecznego jednego pasa.

##### **Sztywność ścinania**

W celu weryfikacji stateczności słupa złożonego z kratowaniem należy uwzględnić wydłużenie sprężyste krzyżulców i słupków, aby uzyskać sztywność ścinania  $S_v$ . Wzory do obliczania sztywności ścinania  $S_v$  podano w tabeli 3.1 dla różnych układów kratowania.

**Początkowa imperfekcja łukowa**

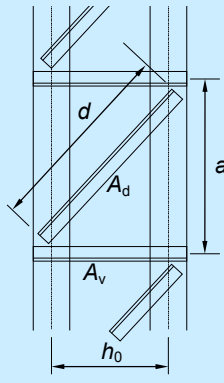
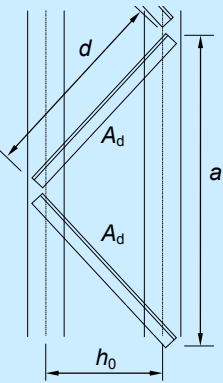
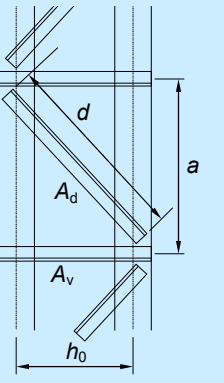
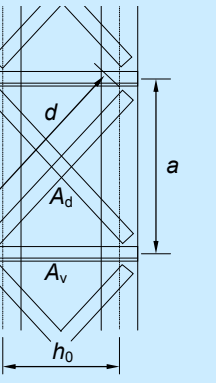
Słup złożony uważa się za słup o początkowej imperfekcji łukowej wynoszącej  $e_0$ , jak pokazano na rysunku 3.1:

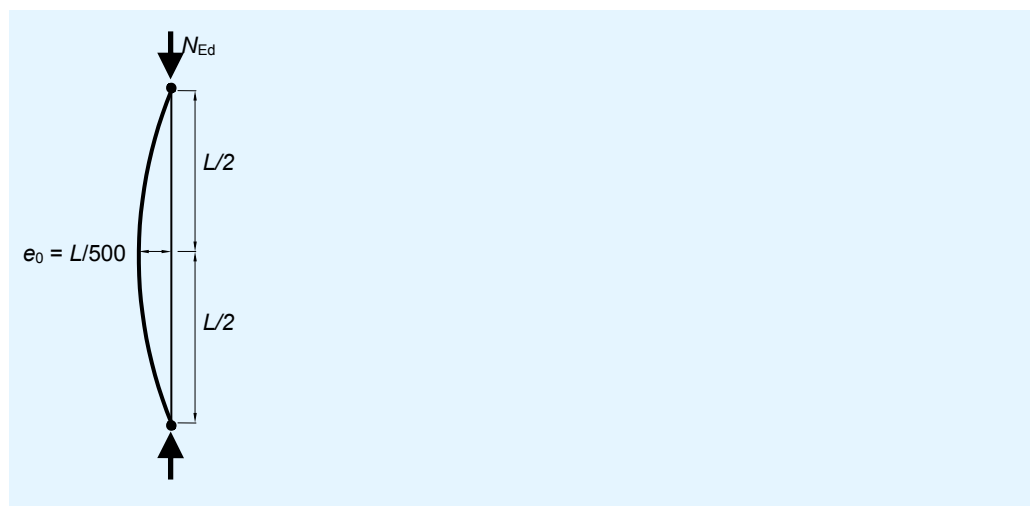
$$e_0 = L/500$$

gdzie:

$L$  jest długością elementu konstrukcyjnego złożonego

**Tabela 3.1 Sztywność ścinania  $S_v$  słupów złożonych**

typ N	typ V	typ K	typ X
			
$S_v = \frac{nEA_d ah_0^3}{d^3 \left[ 1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$	$S_v = \frac{nEA_d ah_0^2}{2d^3}$	$S_v = \frac{nEA_d ah_0^2}{d^3}$	$S_v = \frac{2nEA_d ah_0^2}{d^3}$
<p><math>n</math> jest liczbą płaszczyzn kratowania  <math>A_d</math> jest polem powierzchni przekroju krzyżulca  <math>A_v</math> jest polem powierzchni przekroju słupka  <math>d</math> jest długością krzyżulca</p>			



**Rysunek 3.1 Początkowa imperfekcja łukowa**

### Maksymalna siła ściskania osiowego w pasach

Weryfikacje dla pasów powinno się wykonywać za pomocą sił obliczeniowych  $N_{ch,Ed}$  wynikających z przyłożonej siły ściskającej  $N_{Ed}$  i momentu zginającego  $M_{Ed}$  w połowie wysokości słupa złożonego.

W przypadku elementu konstrukcyjnego o dwóch identycznych pasach, siłę obliczeniową  $N_{ch,Ed}$  wyznacza się z następującej zależności (EN 1993-1-1, § 6.4):

$$N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed} h_0 A_{ch}}{2I_{eff}}$$

gdzie:

$M_{Ed}$  jest maksymalnym momentem zginającym w połowie wysokości słupa złożonego, łącznie z równoważną imperfekcją  $e_0$  i efektami drugiego rzędu:

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed} e_0 + M_{Ed}^I}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$$

$N_{cr}$  jest efektywną siłą krytyczną słupa złożonego:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{eff}}{L^2}$$

$N_{Ed}$  jest obliczeniową siłą ściskania osiowego przyłożoną do słupa złożonego.

$M_{Ed}^I$  jest wartością obliczeniową maksymalnego momentu w połowie wysokości słupa złożonego bez efektów drugiego rzędu.

### 3.2.2 Krok 2: Nośność pasa na wyboczenie w płaszczyźnie

#### Klasyfikacja przekroju poprzecznego pasa

Przekrój poprzeczny pasa należy klasyfikować zgodnie z tabelą 5.2 normy EN 1993-1-1.

#### Nośność pasa na wyboczenie względem osi z-z

Należy zweryfikować nośność pasa na wyboczenie giętne w płaszczyźnie elementu konstrukcyjnego złożonego, tj. względem osi słabej przekroju poprzecznego pasa (oś z-z). Weryfikacja wyboczenia jest wykonywana za pomocą zależności (EN 1993-1-1, § 6.4.2):

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,z,Rd}} \leq 1$$

gdzie:

$N_{b,z,Rd}$  jest obliczeniową nośnością pasa na wyboczenie względem osi słabej przekroju poprzecznego, obliczoną zgodnie z § 6.3.1 normy EN 1993-1-1.

Informacje dotyczące długości wyboczeniowej  $L_{ch}$  pasa zamieszczono w rozdziale 3.4 niniejszego przewodnika.

### 3.2.3 Krok 3: Nośność pasów na wyboczenie z płaszczyzny

Należy uwzględnić nośność elementu konstrukcyjnego na wyboczenie z płaszczyzny, tj. wyboczenie względem osi mocnej przekroju poprzecznego pasów (osi y-y). Weryfikacja wyboczenia jest wykonywana za pomocą zależności:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \leq 1$$

gdzie:

$N_{b,y,Rd}$  jest obliczeniową nośnością pasa na wyboczenie względem osi mocnej przekroju poprzecznego, obliczoną zgodnie z § 6.3.1 normy EN 1993-1-1.

Długość wyboczeniowa zależy od warunków podparcia elementu konstrukcyjnego złożonego dla wyboczenia z płaszczyzny. Podpory na końcach elementu konstrukcyjnego zazwyczaj przyjmuje się jako przegubowe. Można jednak zapewnić pośrednie utwierdzenia boczne.

### 3.2.4 Krok 4: Maksymalna siła ścinająca

Weryfikację elementów usztywniających słupa złożonego z końcami połączonymi przegubowo wykonuje się dla końcowego panelu, uwzględniając siłę ścinającą jak opisano poniżej.

W przypadku elementu konstrukcyjnego złożonego poddawanego tylko osiowej sile ściskającej siłę ścinającą można obliczyć z zależności:

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L}$$

gdzie:

$M_{Ed}$  jest momentem zginającym jak obliczono w kroku 2 z:  $M_{Ed}^I = 0$

W przypadku elementu konstrukcyjnego złożonego poddawanego tylko równomiernie rozłożonemu obciążeniu wzór na siłę ścinającą jest następujący:

$$V_{Ed} = 4 \frac{M_{Ed}}{L}$$

gdzie:

$M_{Ed}$  jest maksymalnym momentem zginającym spowodowanym rozłożonym obciążeniem.

Słupy złożone są często poddawane kombinacji osiowej siły ściskającej  $N_{Ed}$  i równomiernie rozłożonemu obciążeniu. A zatem współczynnik zmienia się pomiędzy  $\pi/L$  a  $4/L$ . Dla uproszczenia siłę ścinającą można obliczyć przez interpolację liniową:

$$V_{Ed} = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{e_o N_{Ed}}{e_o N_{Ed} + M_{Ed}^I} \right) M_{Ed}$$

gdzie:

$M_{Ed}$  jest maksymalnym momentem zginającym jak obliczono w kroku 2.  
Moment zginający  $M_{Ed}^I$  jest maksymalnym momentem spowodowanym rozłożonym obciążeniem.

### 3.2.5 Krok 5: Nośność na wyboczenie elementów usztywniających poddawanych ścisnaniu

#### Maksymalna osiowa siła ścisniająca

Maksymalną siłę osiową  $N_{Ed}$  w elementach usztywniających sąsiadujących z końcami uzyskuje się z siły ścinającej  $V_{Ed}$ .

#### Klasyfikacja ścisnianych elementów usztywniających

Przekrój poprzeczny elementu usztywniającego jest klasyfikowany zgodnie z tabelą 5.2 normy EN 1993-1-1.

#### Nośność na wyboczenie

Weryfikację wyboczenia elementów usztywniających należy wykonywać dla wyboczenia względem osi słabej przekroju poprzecznego, wykorzystując następujące kryterium:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1$$

gdzie,  $N_{b,z,Rd}$  jest obliczeniową nośnością elementu usztywniającego na wyboczenie względem osi słabej przekroju poprzecznego, obliczoną zgodnie z § 6.3.1 normy EN 1993-1-1.

Informacje dotyczące długości wyboczeniowej elementów usztywniających podano w rozdziale 3.4.

### 3.2.6 Krok 6: Nośność rozciąganych elementów usztywniających

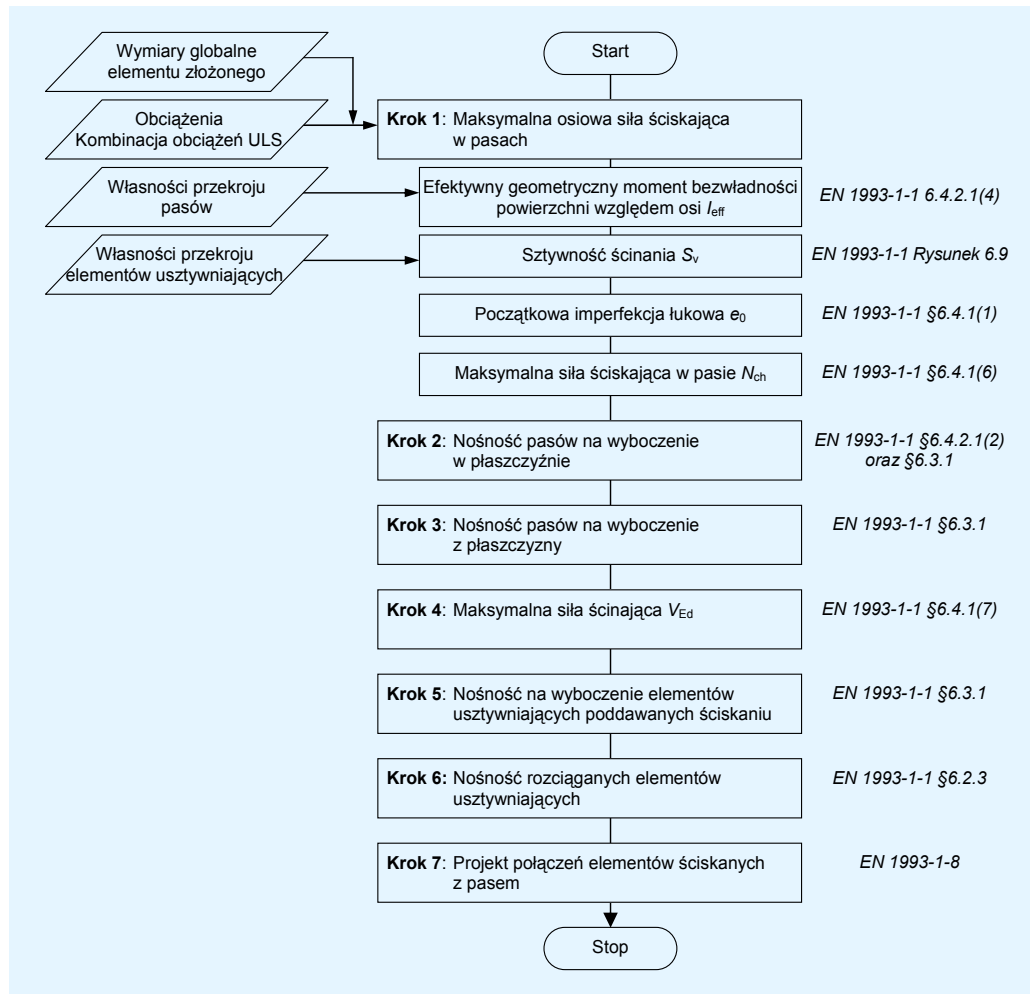
Nośność przekroju poprzecznego elementów usztywniających należy weryfikować zgodnie z § 6.2.3 normy EN 1993-1-1 dla rozciągającej siły osiowej, którą uzyskuje się z maksymalnej siły ścinającej  $V_{Ed}$ , jak opisano w kroku 3.

### 3.2.7 Krok 7: Nośność połączeń krzyżulec-pas

Nośność połączeń między elementami usztywniającymi a pasami należy weryfikować zgodnie z normą EN 1993-1-8<sup>[2]</sup>. Weryfikacja zależy od szczegółów połączenia: połączenie śrubowe lub połączenie spawane. Tę weryfikację powinno się wykonywać przy wykorzystaniu sił wewnętrznych obliczonych w poprzednich krokach.

Przykład praktyczny w Załączniku A zawiera szczegółową weryfikację połączenia spawanego.

### 3.2.8 Schemat blokowy



Rysunek 3.2 Schemat blokowy metodologii obliczeniowej dla słupów złożonych z kratowaniem

### 3.3 Metodologia obliczeniowa dla słupów złożonych z przewiązkami

#### 3.3.1 Krok 1: Maksymalna osiowa siła ściskająca w pasach

##### Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi

Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi oblicza się za pomocą następującej zależności (EN 1993-1-1, § 6.4.3.1(3)):

$$I_{\text{eff}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}} + 2\mu I_{\text{ch}}$$

gdzie:

$h_0$  jest odległością między środkami masy pasów

$A_{\text{ch}}$  jest polem przekroju poprzecznego jednego pasa

$I_{\text{ch}}$  jest płaskim geometrycznym momentem bezwładności powierzchni względem osi jednego pasa

$\mu$  jest wskaźnikiem efektywności według tabeli 3.2.

**Tabela 3.2 Wskaźnik efektywności (EN 1993-1-1, Tabela 6.8)**

Kryterium	Wskaźnik efektywności $\mu$
$\lambda \geq 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$2 - \lambda/75$
$\lambda \leq 75$	1,0

gdzie:  $\lambda = \frac{L}{i_0}$     $i_0 = \sqrt{\frac{I_t}{2A_{\text{ch}}}}$     $I_t = 0,5h_0^2 A_{\text{ch}} + 2I_{\text{ch}}$

#### Sztywność ścinania

W celu weryfikacji stateczności słupa złożonego z przewiązkami należy uwzględnić odkształcenia sprężyste przewiązek i pasów, aby uzyskać sztywność ścinania  $S_v$  — wyrażaną następującą zależnością (EN 1993-1-1, § 6.4.3.1(2)):

$$S_v = \frac{24EI_{\text{ch}}}{a^2 \left[ 1 + \frac{2I_{\text{ch}} h_0}{nI_b a} \right]} \leq \frac{2\pi^2 EI_{\text{ch}}}{a^2}$$

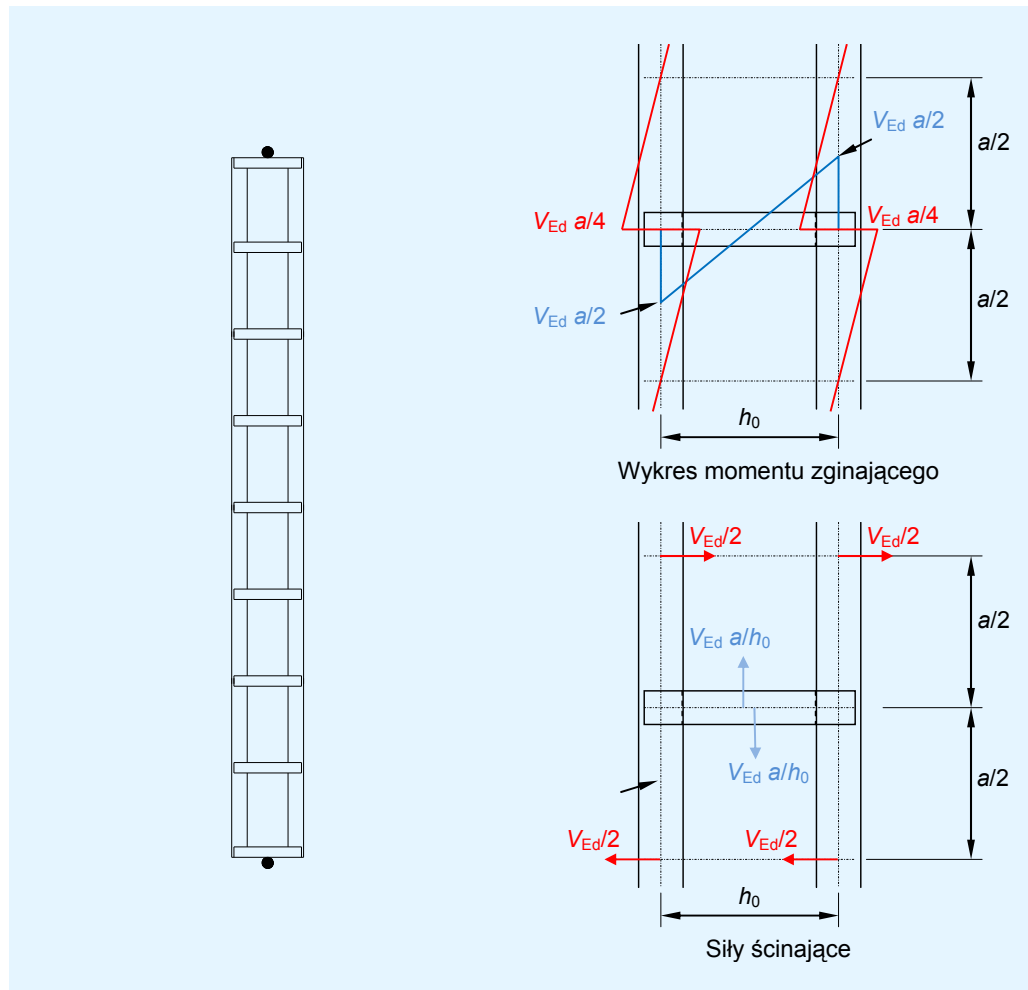
Ale sztywność  $S_v$  nie powinna być przyjmowana większa niż  $\frac{2\pi^2 EI_{\text{ch}}}{a^2}$

gdzie:

$a$  jest odległością między przewiązkami

$n$  jest liczbą płaszczyzn przewiązek

$I_b$  jest płaskim geometrycznym momentem bezwładności powierzchni względem osi jednej przewiązki.



Rysunek 3.3 Momenty zginające i siły ścinające w panelu słupa złożonego z przewiązkami

### Początkowa imperfekcja łukowa

Początkowa imperfekcja łukowa  $e_0$  wynosi:

$$e_0 = L/500$$

gdzie:

$L$  jest długością elementu konstrukcyjnego złożonego

### Maksymalna osiowa siła ściskająca w pasach

Maksymalne ściskanie osiowe  $N_{ch,Ed}$  w pasach oblicza się z zależności podanej w punkcie 3.2.1.



### 3.3.2 Krok 2: Nośność pasa na wyboczenie w płaszczyźnie

#### Klasyfikacja przekroju poprzecznego pasa

Przekrój poprzeczny pasa jest klasyfikowany zgodnie z tabelą 5.2 normy EN 1993-1-1.

#### Nośność pasa na wyboczenie względem osi z-z

Nośność pasa należy zweryfikować dla zginania i ściskania osiowego oraz wyboczenia w płaszczyźnie elementu konstrukcyjnego złożonego, tj. względem osi słabej przekroju poprzecznego pasa (osi z-z), zgodnie z § 6.3.3 normy EN 1993-1-1. W zależności od geometrii elementu konstrukcyjnego złożonego z przewiązkami powinno się wykonać weryfikacje dla różnych segmentów pasa:

- dla końcowego panelu, na który działa maksymalna siła ścinająca, a zatem maksymalny miejscowy moment zginający,
- dla panelu znajdującego się w połowie wysokości, gdzie osiowa siła ściskająca może być maksymalna w pasie.

### 3.3.3 Krok 3: Nośność pasów na wyboczenie z płaszczyzny

Nośność pasów na wyboczenie z płaszczyzny weryfikuje się przy użyciu następującego kryterium:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,y,Rd}} \leq 1$$

gdzie:

$N_{b,y,Rd}$  jest obliczeniową nośnością pasa na wyboczenie względem osi mocnej przekroju poprzecznego, obliczoną zgodnie z § 6.3.1 normy EN 1993-1-1.

Długość wyboczeniowa zależy od warunków podparcia elementu konstrukcyjnego złożonego dla wyboczenia z płaszczyzny. Podpory na końcach elementu konstrukcyjnego zazwyczaj przyjmuje się jako przegubowe. Można jednak zapewnić pośrednie utwierdzenia boczne.

### 3.3.4 Krok 4: Siła ścinająca

Siłę ścinającą  $V_{Ed}$  oblicza się z maksymalnego momentu zginającego jak w przypadku elementu konstrukcyjnego złożonego z kratowaniem, zgodnie z punktem 3.2.4 niniejszego przewodnika.

### 3.3.5 Krok 5: Nośność przewiązek

Jak pokazano na rysunku 3.3, przewiązki powinny być tak zaprojektowane, aby mogły wytrzymać siłę ścinającą:

$$V_{Ed} \frac{a}{h_0}$$

oraz moment zginający:

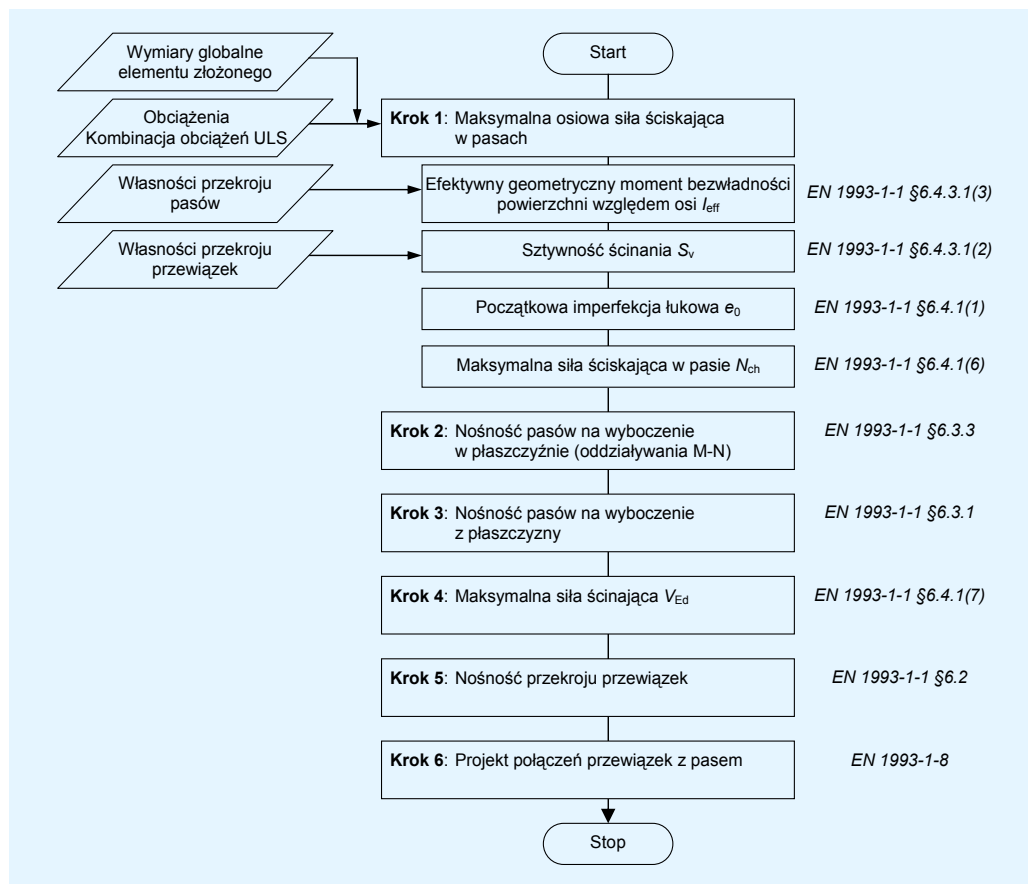
$$M_{Ed} = \frac{V_{Ed} a}{2}$$

Klasę przekroju poprzecznego należy określić zgodnie z tabelą 5.2 normy EN 1993-1-1 dla czystego zginania. Nośność przekroju należy zweryfikować za pomocą odpowiednich kryteriów podanych w § 6.2 normy EN 1993-1-1.

### 3.3.6 Krok 5: Nośność połączeń przewiązka-pas

Nośność połączeń między przewiązkami a pasami należy zweryfikować zgodnie z normą EN 1993-1-8. Ta weryfikacja zależy od szczegółów połączenia: połączenie śrubowe lub połączenie spawane. Ta weryfikacja jest wykonywana przy wykorzystaniu sił wewnętrznych obliczonych w poprzednich krokach.

### 3.3.7 Schemat blokowy



Rysunek 3.4 Schemat blokowy metodologii obliczeniowej dla słupów złożonych z przewiązkami

## 3.4 Długość wyboczeniowa

### 3.4.1 Ściskane elementy konstrukcyjne kratowane

#### Pasy

Zgodnie z Załącznikiem BB normy EN 1993-1-1 długość wyboczeniową  $L_{cr}$  elementu konstrukcyjnego pasa słupa złożonego, wykonanego z walcowanego dwuteownika lub dwuteownika szerokostopowego, przyjmuje się jako  $0,9L$  dla wyboczenia a płaszczyźnie i  $1,0L$  dla wyboczenia z płaszczyzny. Te wartości mogą zostać obniżone, jeżeli jest to uzasadnione wynikami szczegółowej analizy.

$L$  jest odległością w danej płaszczyźnie między dwoma sąsiednimi punktami, w których element konstrukcyjny jest stężony, aby zapobiec przemieszczeniu w tej płaszczyźnie, lub między jednym z tych punktów a końcem elementu konstrukcyjnego.

#### Elementy usztywniające

Elementy usztywniające wykonuje się najczęściej z kątowników.

Pod warunkiem, że pasy zapewniają odpowiednie utwierdzenie końców ściskanych elementów usztywniających wykonanych z kątowników, a połączenia końców elementów zapewniają odpowiednie unieruchomienie (co najmniej 2 śruby w przypadku połączenia śrubowego), długość wyboczeniowa  $L_{cr}$  dla wyboczenia w płaszczyźnie jest przyjmowana jako  $0,9L$ , gdzie  $L$  jest długością układu między połączeniami.

Jeśli końce elementów usztywniających wykonanych z kątowników łączone są tylko jedną śrubą, wówczas należy uwzględnić mimośrodowość i przyjąć długość wyboczeniową  $L_{cr}$  równą długości układu  $L$ .

Smukłość efektywną  $\bar{\lambda}_{eff}$  elementów usztywniających wykonanych z kątowników określono w § BB.1.2 normy EN 1993-1-1 w następujący sposób:

$$\bar{\lambda}_{eff} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}$$

gdzie:

$\bar{\lambda}$  jest smukłością względną zdefiniowaną w § 6.3 normy EN 1993-1-1.

W przypadku innych kształtowników niż kątowniki elementy usztywniające mogą być obliczane pod kątem wyboczenia w płaszczyźnie za pomocą długości wyboczeniowej mniejszej niż długość układu i przy wykorzystaniu smukłości względnej zgodnie z § 6.3 normy EN 1993-1-1, pod warunkiem, że pasy zapewniają odpowiednie utwierdzenie końców, a połączenia końców elementów zapewniają odpowiednie unieruchomienie (co najmniej 2 śruby w przypadku połączenia śrubowego). W praktyce długość wyboczeniowa  $L_{cr}$  kształtownika walcowanego jest równa odległości między połączeniami w przypadku wyboczenia w płaszczyźnie i z płaszczyzny.

### 3.4.2 Ściskane elementy konstrukcyjne z przewiązkami

Dla uproszczenia pomija się każde potencjalne utwierdzenie na końcach słupa i długość wyboczeniową pasów można przyjąć jako równą długości układu.

## LITERATURA

- 1 EN 1993-1-1:2005 Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków
- 2 EN 1993-1-8:2005 Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych. Projektowanie węzłów



## **ZAŁĄCZNIK A**

### **PRZYKŁAD PRAKTYCZNY: PROJEKT SŁUPA ZŁOŻONEGO KRATOWANEGO**

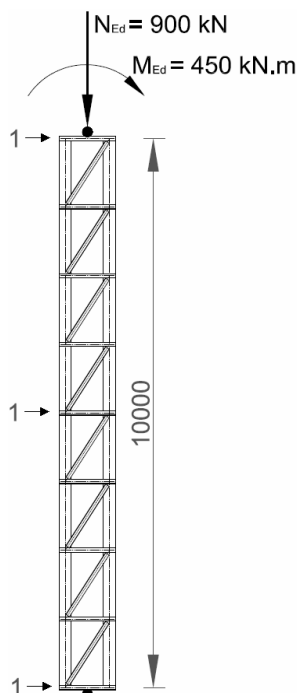
## 1. Wprowadzenie

Ten przykład praktyczny ilustruje weryfikacji typowego słupa złożonego poddawanego działaniu osiowej siły ściskającej i momentu zginającego. Obliczenia wykonano zgodnie z normą EN 1993-1-1. Nie uwzględniono żadnych Załączników krajowych, a w obliczeniach wykorzystano zalecane wartości podane w normie EN 1993-1-1.

Obliczenia wykonano zgodnie z metodologią obliczeniową podaną w punkcie 3.2 niniejszego przewodnika.

## 2. Opis

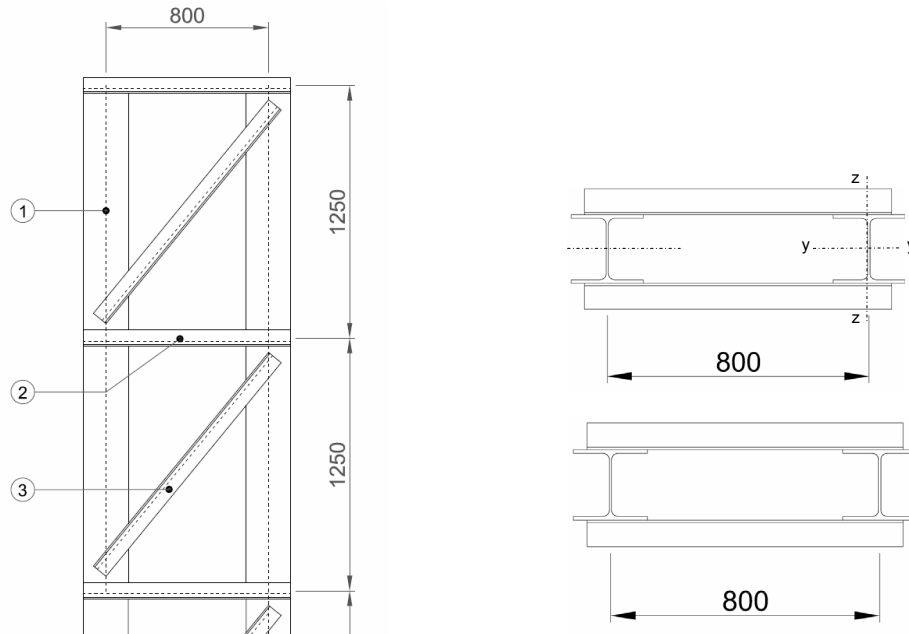
Geometrię słupa złożonego przedstawiono na rysunku A.1 i na rysunku A.2. W przypadku najbardziej niekorzystnej kombinacji ULS oddziaływań, siła osiowa i moment zginający względem osi mocnej kształtownika złożonego są przyłożone na szczycie słupa.



1 Utwierdzenia boczne

**Rysunek A.1 Model obliczeniowy**

Aby zapobiec wyboczeniu z płaszczyzny, słup złożony jest utwierdzony na obu końcach i w połowie wysokości.



- 1 Pasy HEA 200  
 2 Słupki Kątowniki  $90 \times 9$   
 3 Krzyżulce Kątowniki  $80 \times 8$

**Rysunek A.2 Geometria słupa złożonego**

### Właściwości kształtowników

Należy zauważyć, że oś y-y i oś z-z oznaczają odpowiednio oś mocną i oś słabą przekroju poprzecznego każdego komponentu.

Pasy: HEA 220 — S355

$$A_{ch} = 64,3 \text{ cm}^2$$

$$i_y = 9,17 \text{ cm} \quad i_z = 5,51 \text{ cm}$$

Krzyżulce: Kątowniki równoramienne  $L 90 \times 90 \times 9$  — S355

$$A_d = 15,52 \text{ cm}^2$$

$$i_y = i_z = 2,73 \text{ cm} \quad i_u = 3,44 \text{ cm} \quad i_v = 1,75 \text{ cm}$$

Słupki: Kątowniki równoramienne  $L 80 \times 80 \times 8$  — S355

$$A_v = 12,27 \text{ cm}^2$$

$$i_y = i_z = 2,43 \text{ cm} \quad i_u = 3,06 \text{ cm} \quad i_v = 1,56 \text{ cm}$$



Tytuł	ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	3 z 12
<p><b>3. Krok 1: Maksymalna osiowa siła ściskająca w pasach</b></p> <p><b>3.1. Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi</b></p> <p>Efektywny geometryczny moment bezwładności powierzchni względem osi mocnej kształtownika złożonego oblicza się za pomocą następującej zależności:</p> $I_{\text{eff}} = 0,5 h_0^2 A_{\text{ch}}$ <p>gdzie:</p> <p><math>A_{\text{ch}}</math> jest polem powierzchni przekroju pasa</p> <p><math>h_0</math> jest odległością między środkami masy pasów</p> <p>Wartość efektywnego geometrycznego momentu bezwładności powierzchni względem osi wynosi:</p> $I_{\text{eff}} = 0,5 \times 80^2 \times 64,3 = 205800 \text{ cm}^4$ <p><b>3.2. Sztywność ścinania</b></p> <p>W przypadku układu kratowania typu N sztywność ścinania wyraża się zależnością:</p> $S_v = \frac{nEA_d a h_0^2}{d^3 \left[ 1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3} \right]}$ <p>gdzie:</p> <p><math>d = \sqrt{h_0^2 + a^2} = \sqrt{0,8^2 + 1,25^2} = 1,48 \text{ m}</math></p> <p><math>n</math> jest liczbą płaszczyzn kratowania (<math>n = 2</math>)</p> <p><math>A_d</math> jest polem powierzchni przekroju krzyżulców</p> <p><math>A_v</math> jest polem powierzchni przekroju słupków</p> <p>Zatem:</p> $S_v = \frac{2 \times 210000 \times 1552 \times 1250 \times 800^2}{1480^3 \left[ 1 + \frac{1552 \times 800^3}{1227 \times 1480^3} \right]} \times 10^{-3}$ <p><math>S_v = 134100 \text{ kN}</math></p>		<p>EN 1993-1-1 § 6.4.2.1</p> <p>EN 1993-1-1 Rysunek 6.9</p>

Tytuł	<b>ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego</b>	4 z 12
<p><b>3.3. Początkowa imperfekcja łukowa</b></p> <p>Początkowa imperfekcja łukowa jest równa:  <math display="block">e_0 = L/500 = 10000/500 = 20 \text{ mm}</math></p> <p><b>3.4. Maksymalna osiowa siła ściskająca w pasach</b></p> <p>Maksymalna osiowa siła ściskająca w pasach, <math>N_{ch,Ed}</math>, jest wyznaczana w połowie wysokości słupa złożonego w następujący sposób:</p> $N_{ch,Ed} = \frac{N_{Ed}}{2} + \frac{M_{Ed} h_0 A_{ch}}{2I_{eff}}$ <p>gdzie:</p> $M_{Ed} = \frac{N_{Ed} e_0 + M_{Ed}^1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}}$ <p><math>N_{cr}</math> jest efektywną osiową siłą krytyczną elementu konstrukcyjnego złożonego:</p> $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI_{eff}}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 210000 \times 205800 \times 10^4}{10000^2} \times 10^{-3} = 42650 \text{ kN}$ <p>Maksymalny moment zginający, uwzględniający imperfekcję łukową i efekty drugiego rzędu, wynosi:</p> $M_{Ed} = \frac{900 \times 0,02 + 450}{1 - \frac{900}{42650} - \frac{900}{134100}} = 481,4 \text{ kNm}$ <p>Siła osiowa w pasie poddawany największemu ściskaniu wynosi:</p> $N_{ch,Ed} = \frac{900}{2} + \frac{481,4 \times 0,8 \times 64,34 \times 10^{-4}}{2 \times 205800 \times 10^{-8}} = 1052 \text{ kN}$ <p><b>4. Krok 2: Nośność pasa na wyboczenie w płaszczyźnie</b></p> <p><b>4.1. Klasyfikacja przekroju poprzecznego pasa</b></p> <p><math>\varepsilon = 0,81</math> dla stali gatunku S355</p> <p>Smukłość półki: <math>c/t_f = 88,5 / 11 = 8,05 &lt; 10 \quad \varepsilon = 8,10 \quad</math> klasa 2</p> <p>Smukłość środnika: <math>c/t_w = 152 / 7 = 21,7 &lt; 33 \quad \varepsilon = 26,73 \quad</math> klasa 1</p> <p>Zatem przekrój poprzeczny należy do klasy 2 pod względem czystego ściskania.</p>		<p>EN 1993-1-1 § 6.4.1(1)</p> <p>EN 1993-1-1 § 6.4.1(6)</p>

Tytuł	<b>ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego</b>	<b>5 z 12</b>
<p><b>4.2. Nośność pasa na wyboczenie</b></p> <p>Nośność na wyboczenie pasa poddanego największemu ściskaniu jest weryfikowana zgodnie z § 6.3.1 normy EN 1993-1-1 dla wyboczenia względem osi słabej przekroju poprzecznego, tj. względem osi z-z.</p> <p>Długość wyboczeniową elementu konstrukcyjnego wykonanego z dwuteownika szerokostopowego walcowanego na gorąco można przyjąć jako <math>0,9 a</math> dla wyboczenia w płaszczyźnie, gdzie <math>a</math> jest długością układu między dwoma węzłami słupa złożonego.</p> <p>Długość wyboczeniowa pasów:</p> $L_{cr,z} = 0,9 a = 0,9 \times 1,25 = 1,125 \text{ m}$ <p>Smukłość wynosi:</p> $\lambda_z = \frac{L_{cr,z}}{i_z}$ <p>gdzie</p> <p><math>i_z</math> jest promieniem bezwładności przekroju poprzecznego brutto względem osi słabej.</p> <p>stąd: <math>\lambda_z = \frac{1125}{55,1} = 20,42</math></p> $\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \varepsilon \quad \text{przy: } \varepsilon = 0,81 \text{ dla stali gatunku S355}$ $\lambda_1 = 93,9 \times 0,81 = 76,06$ <p>Smukłość względna wynosi:</p> $\bar{\lambda}_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_1} = \frac{20,42}{76,06} = 0,268$ <p>Krzywa wyboczenia <math>c</math> dla wyboczenia względem osi słabej, ponieważ:</p> <p>Gatunek stali S355</p> $h/b < 1,2$ $t_f < 100 \text{ mm}$ <p>Współczynnik imperfekcji wynosi: <math>\alpha_z = 0,49</math></p> <p>Współczynnik redukcyjny <math>\chi_z</math> można obliczyć z następujących zależności:</p> $\phi_z = 0,5 \left[ 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0,2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,49 \times (0,268 - 0,2) + 0,268^2 \right] = 0,553$ $\chi_z = \frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 + \bar{\lambda}_z^2}} = \frac{1}{0,553 + \sqrt{0,553^2 - 0,268^2}} = 0,965$		<p>EN 1993-1-1 BB.1.1(2)B</p> <p>EN 1993-1-1 Tabela 6.2</p> <p>EN 1993-1-1 § 6.3.1.2(1)</p>

Obliczeniowa nośność na wyboczenie jest równa:

$$N_{b,z,Rd} = \frac{\chi_z A_{ch} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,965 \times 6430 \times 355}{1,0} \times 10^{-3} = 2203 \text{ kN}$$

Kryterium nośności jest następujące:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,z,Rd}} = \frac{1052}{2203} = 0,477 < 1 \quad \text{OK}$$

## 5. Krok 3: Nośność pasów na wyboczenie z płaszczyzny

Słup złożony jest połączony przegubowo na obydwu końcach i jest bocznie podparty w połowie wysokości. Zatem długość wyboczeniowa dla wyboczenia pasów względem osi mocnej jest równa:

$$L_{cr,y} = L/2 = 10000/2 = 5000 \text{ mm}$$

Smukłość wynosi:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y}$$

gdzie

$i_y$  jest promieniem bezwładności przekroju brutto względem osi mocnej.

Zatem:

$$\lambda_y = \frac{L_{cr,y}}{i_y} = \frac{5000}{91,7} = 54,53$$

$$\lambda_1 = 93,9 \varepsilon = 76,06$$

Smukłość względna wynosi:

$$\bar{\lambda}_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_1} = \frac{54,53}{76,06} = 0,717$$

Krzywa wyboczenia  $b$  dla wyboczenia względem osi mocnej, ponieważ:

Gatunek stali S355

$$h/b < 1,2$$

$$t_f < 100 \text{ mm}$$

Współczynnik imperfekcji wynosi:  $\alpha_y = 0,34$

Współczynnik redukcyjny  $\chi_y$  można obliczyć z następujących zależności:

$$\phi_y = 0,5 \left[ 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0,2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,34 \times (0,717 - 0,2) + 0,717^2 \right] = 0,845$$

$$\chi_y = \frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 + \bar{\lambda}_y^2}} = \frac{1}{0,845 + \sqrt{0,845^2 - 0,717^2}} = 0,774$$

EN 1993-1-1  
§ 6.3.1.2(1)

Obliczeniowa nośność na wyboczenie jest równa:

$$N_{b,y,Rd} = \frac{\chi_y A_{ch} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,774 \times 6430 \times 355}{1,0} \times 10^{-3} = 1767 \text{ kN}$$

Kryterium nośności jest następujące:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,y,Rd}} = \frac{1052}{1767} = 0,595 < 1 \quad \text{OK}$$

## 6. Krok 4: Maksymalna siła ścinająca

Maksymalna osiowa siła ściskająca występuje w krzyżulcach końcowych paneli słupa złożonego. Zależy ona od siły ścinającej w tym panelu. Siłę ścinającą można obliczyć za pomocą następującej zależności:

$$V_{Ed} = \frac{1}{L} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{e_0 N_{Ed}}{e_0 N_{Ed} + M_{Ed}^I} \right) M_{Ed}^{II}$$

gdzie:

$$L = 10 \text{ m}$$

$$e_0 = 0,02 \text{ m}$$

$$N_{Ed} = 900 \text{ kN}$$

$$M_{Ed}^I = 450 \text{ kNm}$$

$$M_{Ed}^{II} = 482 \text{ kNm}$$

Zatem:

$$V_{Ed} = \frac{1}{10} \left( 4 - (4 - \pi) \frac{0,02 \times 900}{0,02 \times 900 + 450} \right) \times 482 = 191,2 \text{ kN}$$

## 7. Krok 5: Nośność na wyboczenie ściskanych elementów usztywniających

### 7.1. Krzyżulce

#### 7.1.1. Maksymalna osiowa siła ściskająca

Wzór na osiową siłę ściskającą  $N_{d,Ed}$  w krzyżulcu uzyskuje się z zależności definiującej siłę ścinającą:

$$N_{d,Ed} = \frac{V_{Ed} \cos \varphi}{n} = \frac{V_{Ed} d}{nh_0}$$

gdzie:

$$h_0 = 800 \text{ mm}$$

$$d = 1480 \text{ mm}$$

$$n \text{ jest liczbą płaszczyzn kratowania: } n = 2$$

Tytuł	ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	8 z 12
<p>wówczas:</p> $N_{d,Ed} = \frac{191,2 \times 1480}{2 \times 800} = 176,86 \text{ kN}$ <p><b>7.1.2. Klasyfikacja ściskanego krzyżulca</b></p> $h/t = 90 / 9 = 10 < 15 \quad \varepsilon = 12,15$ $(b+h) / (2t) = (90+90) / (2 \times 9) = 10 > 11,5 \quad \varepsilon = 9,31 \text{ klasa 4}$ <p>Choć przekrój poprzeczny należy do klasy 4, zgodnie z normą EN 1993-1-1, Tabela 5.2, Arkusz 3, obliczenie efektywnego pola powierzchni przekroju nie prowadzi do redukcji. Zatem pole powierzchni przekroju jest w pełni efektywne i obliczenie jest takie samo jak dla przekroju klasy 3.</p> <p><b>7.1.3. Nośność krzyżulca na wyboczenie</b></p> <p>Smukłość względną można obliczyć zgodnie z § BB.1.2 normy EN 1993-1-1, o ile krzyżulce są przyspawane na obu końcach a pasy są wystarczająco sztywne, aby zapewnić utwierdzenie końców.</p> <p>Smukłość względem najsłabszej osi:</p> $\lambda_v = \frac{d}{i_v} = \frac{1480}{17,5} = 84,57$ <p>Smukłość względna</p> $\bar{\lambda}_v = \frac{\lambda}{93,9\varepsilon} = \frac{84,57}{93,9 \times 0,81} = 1,112$ <p>Efektywna smukłość względna</p> $\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v = 0,35 + 0,7 \times 1,112 = 1,128$ <p>Krzywa wyboczenia <math>b</math> jest wykorzystywana do wyznaczenia współczynnika redukcyjnego:</p> $\alpha_v = 0,34$ <p>Zatem:</p> $\phi_v = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff},v} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff},v}^2 \right] = 0,5 \times \left[ 1 + 0,34 \times (1,128 - 0,2) + 1,128^2 \right] = 1,294$ $\chi_v = \frac{1}{\phi_v + \sqrt{\phi_v^2 + \bar{\lambda}_{\text{eff},v}^2}} = \frac{1}{1,294 + \sqrt{1,294^2 - 1,128^2}} = 0,519$ <p>Obliczeniowa nośność na wyboczenie elementu konstrukcyjnego poddawanemu ścisłaniu jest równa:</p> $N_{b-d,Rd} = \frac{\chi_v A_d f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,519 \times 1552 \times 355}{1,0} \times 10^{-3} = 285,9 \text{ kN}$ <p>Kryterium nośności jest następujące:</p> $\frac{N_{d,Ed}}{N_{b-d,Rd}} \leq 1 \Leftrightarrow \frac{176,8}{285,9} = 0,62 < 1 \quad \text{OK}$		

EN 1993-1-1  
Tabela 5.2  
Arkusz 3

EN 1993-1-1  
§ BB.1.2

EN 1993-1-1  
§ 6.3.1

Tytuł	ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	9 z 12
<p><b>7.2. Słupki</b></p> <p><b>7.2.1. Maksymalna osiowa siła ściskająca</b></p> <p>Maksymalna osiowa siła ściskająca wynosi:</p> $N_{h,Ed} = V_{Ed} = 191,2 \text{ kN}$ <p><b>7.2.2. Klasyfikacja przekroju poprzecznego</b></p> $h/t = 80 / 8 = 10 < 15 \quad \varepsilon = 12,15$ $(b+h) / (2t) = (80+80) / (2 \times 8) = 10 > 11,5 \quad \varepsilon = 9,31 \text{ klasa 4}$ <p>Choć przekrój poprzeczny należy do klasy 4, zgodnie z normą EN 1993-1-1, Tabela 5.2, Arkusz 3, obliczenie efektywnego pola powierzchni przekroju nie prowadzi do redukcji. Zatem pole powierzchni przekroju jest w pełni efektywne i obliczenie jest takie samo jak dla przekroju klasy 3.</p> <p><b>7.2.3. Nośność na wyboczenie</b></p> <p>Długość wyboczeniowa jest równa:</p> $L_{cr} = h_0 = 800 \text{ mm}$ <p>Smukłość względem najsłabszej osi:</p> $\lambda_v = \frac{L_{h,y}}{i_v} = \frac{800}{15,6} = 51,28$ <p>Smukłość względna:</p> $\bar{\lambda}_v = \frac{\lambda_v}{93,9\varepsilon} = \frac{51,28}{93,9 \times 0,81} = 0,674$ <p>Efektywna smukłość względna:</p> $\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v = 0,35 + 0,7 \times 0,674 = 0,822$ <p>Krzywa wyboczenia <b>b</b> jest wykorzystywana do wyznaczenia współczynnika redukcyjnego:</p> $\alpha = 0,34$ <p>Zatem:</p> $\phi_v = 0,5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda}_{\text{eff},v} - 0,2) + \bar{\lambda}_{\text{eff},v}^2 \right] = 0,5 \times [1 + 0,34 \times (0,822 - 0,2) + 0,822^2] = 0,943$ $\chi_v = \frac{1}{\phi_v + \sqrt{\phi_v^2 + \bar{\lambda}_{\text{eff},v}^2}} = \frac{1}{0,943 + \sqrt{0,943^2 - 0,822^2}} = 0,712$ <p>Obliczeniowa nośność na wyboczenie elementu konstrukcyjnego poddawanemu ściskaniu jest równa:</p> $N_{b,Rd} = \frac{\chi_v A_h f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,712 \times 1227 \times 355}{1,0} \times 10^{-3} = 310 \text{ kN}$		

EN 1993-1-1  
Tabela 5.2  
Arkusz 3

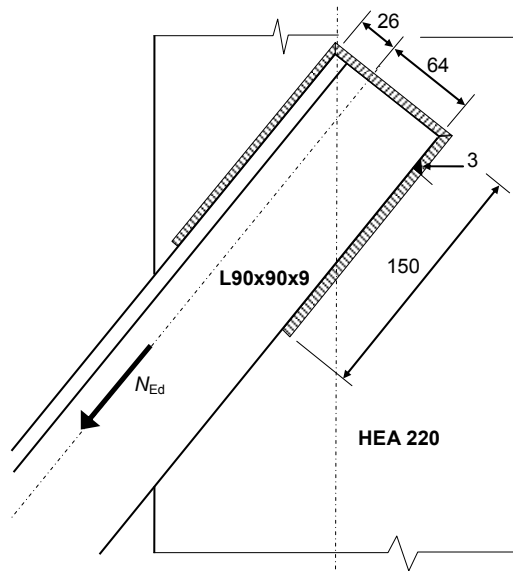
EN 1993-1-1  
§ BB.1.2

Tytuł	ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	10 z 12
<p>Kryterium nośności jest następujące:</p> $\frac{N_{h,Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{191,2}{310} = 0,62 < 1 \quad \text{OK}$ <p><b>8. Krok 6: Nośność rozciąganych elementów usztywniających</b></p> <p>Należy zweryfikować nośność krzyżulców poddawanych rozciąganiu, nawet jeśli na ogół ta sytuacja jest mniej krytyczna niż ściskanie.</p> <p>Weryfikacja tych elementów konstrukcyjnych obejmuje weryfikację nośności przekroju poprzecznego oraz weryfikację nośności przekroju netto dla połączeń śrubowych.</p> <p>Maksymalna wartość obliczeniowa osiowej siły rozciągającej:</p> $N_{t,Ed} = 176,8 \text{ kN}$ <p>Kryterium nośności jest następujące:</p> $\frac{N_{t,Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$ <p>Obliczeniową nośność przy rozciąganiu <math>N_{t,Rd}</math> przyjmuje się jako obliczeniową nośność plastyczną przekroju poprzecznego brutto:</p> $N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A_d f_y}{\gamma_{M_0}} = \frac{1552 \times 355}{1,0} \times 10^{-3} = 551 \text{ kN}$ <p>Kryterium nośności jest następujące:</p> $\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{176,8}{551,0} = 0,32 < 1,0 \quad \text{OK}$		EN 1993-1-1 §6.2.3



## 9. Krok 7: Nośność połączenia spawanego krzyżulec-pas

Krzyżulce (L90 × 90 × 9) są przyspawane do pasa (HEA 220) za pomocą spoin pachwinowych, patrz rysunek A.3.



**Rysunek A.3** Połączenie spawane krzyżulca z pasem

Grubość spoiny:	$a$	= 3 mm
Efektywna długość wzdłużna spoiny pachwinowej:	$l_{\text{eff-L}}$	= 150 mm
Efektywna długość poprzeczna spoiny pachwinowej:	$l_{\text{eff-T}}$	= 90 mm
Siła osiowa w krzyżulcu:	$N_{\text{d,Ed}}$	= 176,8 kN

Nośność obliczeniową spoiny pachwinowej wyznacza się za pomocą metody uproszczonej podanej w § 4.5.3.3 normy EN 1993-1-8.

W każdym punkcie wzdłuż spoiny pachwinowej przenoszona przez spoinę wypadkowa wszystkich sił na jednostkę długości powinna spełniać następujące kryterium:

$$F_{\text{w,Ed}} \leq F_{\text{w,Rd}}$$

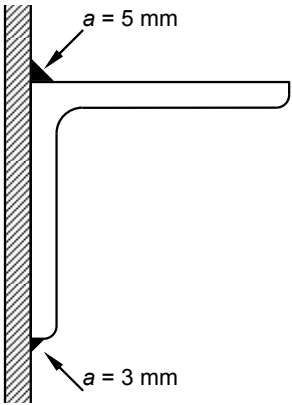
gdzie:

$F_{\text{w,Ed}}$  jest wartością obliczeniową siły na jednostkę długości

$F_{\text{w,Rd}}$  jest obliczeniową nośnością spoiny na jednostkę długości

Nośność obliczeniowa jest niezależna od orientacji płaszczyzny grubości spoiny i wyznacza się ją z następującej zależności:

$$F_{\text{w,Rd}} = f_{\text{vw,d}} a$$

Tytuł	ZAŁĄCZNIK A. Przykład praktyczny: Projekt słupa złożonego kratowanego	12 z 12
<p>gdzie:</p> <p><math>f_{vw,d}</math> jest obliczeniową wytrzymałością spoiny na ścinanie</p> $f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}$ <p><math>f_u</math> jest wytrzymałością słabszej części na rozciąganie: <math>f_u = 510 \text{ N/mm}^2</math></p> <p><math>\beta_w</math> jest odpowiednim współczynnikiem korelacji: <math>\beta_w = 0,9</math> dla stali gatunku S355</p> <p><math>\gamma_{M2} = 1,25</math></p> <p>zatem:</p> $f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{510 / \sqrt{3}}{0,9 \times 1,25} = 261,7 \text{ N/mm}^2$ $F_{w,Rd} = f_{vw,d} a = 261,7 \times 5 = 785,2 \text{ N/mm}$ $F_{w,Ed} = \frac{N_{d,Ed}}{\sum l_{eff}} = \frac{176800}{(2 \times 150 + 90)} = 453,3 \text{ N/mm}$ <p>Zatem:</p> $F_{w,Ed} = 453,3 \text{ N/mm}^2 < F_{w,Rd} = 785,2 \text{ N/mm}^2 \text{ OK}$ <p>Minimalna grubość spoiny <math>a_{min} = 3 \text{ mm}</math> jest dopuszczalna.</p> <p>Aby zapobiec korozji, krzyżulec można przyspawać dookoła jednym przejściem (<math>a = 3 \text{ mm}</math>).</p> <p>Aby uwzględnić mimośrodowość, zaleca się spoinę pachwinową o grubości 5 mm (2 przejścia) po stronie niepołączonego ramienia, jak pokazano na rysunku A.4.</p>  <p><b>Rysunek A.4 Grubość spoiny dla spoin pachwinowych</b></p>		<p>EN 1993-1-8 § 4.5.3.3</p> <p>EN 1993-1-1 Tabela 3.1</p> <p>EN 1993-1-8 Tabela 4.1</p>