

Praktyczne aspekty wymiarowania ściskanych pasów dźwigarów kratowych sztywno połączonych ze słupami wg PN-EN 1993-1-1 na przykładzie hali dwunawowej

Practical aspects of dimensioning compressed chords of lattice girders rigidly connected to columns according to PN-EN 1993-1-1 on the example of a two-aisle hall

mgr inż. Marek Drzazga (0009-0004-4749-2417), Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska

DOI: 10.5604/01.3001.0054.4880

Streszczenie: Norma PN-EN 1993-1-1 daje możliwość sprawdzenia nośności granicznej (ULS) stalowych elementów ściskanych na kilka sposobów. W artykule przedstawiono praktyczne podejścia do wymiarowania ściskanych pasów kratownic z uwzględnieniem stateczności z płaszczyzny układu. Przeanalizowano rzeczywistą kratownicę dachową konstrukcji stalowej w hali dwunawowej, z pośrednimi stężeniami sztywnymi. Wykonano analizę porównawczą metod klasycznych i bardziej zaawansowanych z uwzględnieniem ograniczeń danych metod oraz oceną ich pracochłonności i korzyści przy projektowaniu ściskanych pasów kratownic sztywno połączonych ze słupami. Opisane zaawansowane metody obliczeń pozwalają uwzględnić różne realne konfiguracje wstępnie zdeformowanej konstrukcji, prowadząc do optymalnego projektowania konstrukcji obiektów halowych lub umożliwiając szukanie zapasów nośności konstrukcji przy zmianie wielkości lub układu obciążeń.

Słowa kluczowe: konstrukcje stalowe, wyboczenie, pas kratownic, analiza II rzędu, imperfekcje.

Abstract: The PN-EN 1993-1-1 standard provides possibility to check ultimate limit states (ULS) of compressed steel elements in several ways. This paper describes practical approaches to design compressed truss chords taking into account out-of-plane stability. The real roof truss of a steel structure in the two-aisle hall with intermediate rigid braces was analyzed. A comparative analysis of classic and more advanced method was performed taking into account the limitations of the given methods and the assessment of their labor consumption and benefits when designing compressed truss chords rigidly connected to columns. The advanced calculation methods make it possible to take into account various real configurations of a pre-deformed structure, leading to optimal design of hall structures or enabling the search for reserves of the structure's load-bearing capacity when changing the value or arrangement of loads.

Keywords: steel structures, buckling, truss chord, 2nd order analysis, imperfections.

1. Wprowadzenie

W wielu budynkach halowych główne elementy ustroju nośnego stanowią stężone z płaszczyzny płaskie układy poprzeczne słupowo-kratowe. Schemat statyczny w postaci dźwigarów kratowych, sztywno połączonych ze słupami charakteryzuje się korzystnym rozkładem sił w pasach, gdzie siła zmienia się skokowo w węzłach kratownic. Ponadto w nowo budowanych halach często można zaobserwować zróżnicowanie przekrojów poprzecznych pasów w celu optymalizacji zużycia stali. W artykule przedstawiono różne inżynierskie podejścia obliczeniowe do sprawdzenia nośności granicznej elementów ściskanych i zginanych z uwzględnieniem wyboczenia z płaszczyzny układu płaskich dźwigarów kratowych.

2. Metody oceny stateczności prętów ściskanych wg PN-EN 1993-1-1 [1]

2.1. Metoda 1.1

Sprężysta analiza I rzędu (ang. LA – *Linear analysis*) oparta na ocenie stateczności wyizolowanych elementów między przekrojami zabezpieczonymi przed wyboczeniem, z wykorzystaniem długości wyboczeniowych wyznaczonych zgodnie z punktem BB.1.3. normy [1]. Długość wyboczeniowa rurowych pasów kratownicy równa jest $0,9L$, gdzie L jest długością teoretyczną w rozpatrywanej płaszczyźnie wyboczenia (przy wyboczeniu z płaszczyzny jest równa rozstawowi stężeń bocznych). Metoda ta jest stosowana w modułach do wymiarowania konstrukcji stalowych w programach inżynierskich oraz przedstawiona szerzej w literaturze, m.in. w [2, 3].

2.2. Metoda 1.2

Sprężysta analiza I rzędu (ang. LA – *Linear analysis*), zmodyfikowana metoda 1.1. Długości wybocheniowe elementów wyznaczane są z wykorzystaniem analizy wybocheniowej (ang. LBA – *Linear buckling analysis*), zaimplementowanej do większości programów służących do analizy konstrukcji. Przykładowo program Autodesk Robot Structural Analysis Professional (ARSAP) posiada możliwość wyznaczenia wartości obciążenia krytycznego i następnie długości wybocheniowej elementów. Analityczne sposoby obliczania siły krytycznej elementów podpartych w różny sposób, o zmiennym przekroju i niemonotonicznym obciążeniu można znaleźć m.in. w pracach [4, 5].

Metody 1.1 i 1.2 zgodnie z normą [1] można stosować w przypadku stałego przekroju poprzecznego elementu. W metodzie 1.1 i 1.2 imperfekcje oraz niewielkie efekty drugiego rzędu uwzględniane są w sposób niejawnny za pomocą współczynnika wybocheniowego (krzywych wybocheniowych) na etapie sprawdzania stateczności elementu zgodnie z odpowiednimi kryteriami podanymi w punkcie 6.3 normy [1].

2.3. Metoda 2

Ogólna metoda oceny stateczności elementów wg punktu 6.3.4 normy [1] oparta na sprężystej analizie I rzędu (dedykowanej dla elementów o zmiennym przekroju poprzecznym oraz różnych warunkach podparcia. Metoda ta może być stosowana dla elementów poddanych ścisnaniu i/lub jednokierunkowemu zginaniu w płaszczyźnie układu, przy czym zginanie ma mieć charakter sprężysty. Metodę tę załącznik krajowy ograniczył do elementów niewrażliwych na dystorsję przekroju (zasada zeszywnienia konturu). Jest to nowe podejście do oceny stateczności elementów w stosunku do przedstawionego w normie PN-90/B-03200

[6]. W normie [6] nie było zaleceń dotyczących obliczeń elementów ścisnanych i zginanych o zmiennym przekroju. Procedura obliczania nośności granicznej stalowych ścisnanych elementów z wykorzystaniem metody ogólnej opisana jest m.in. w [7].

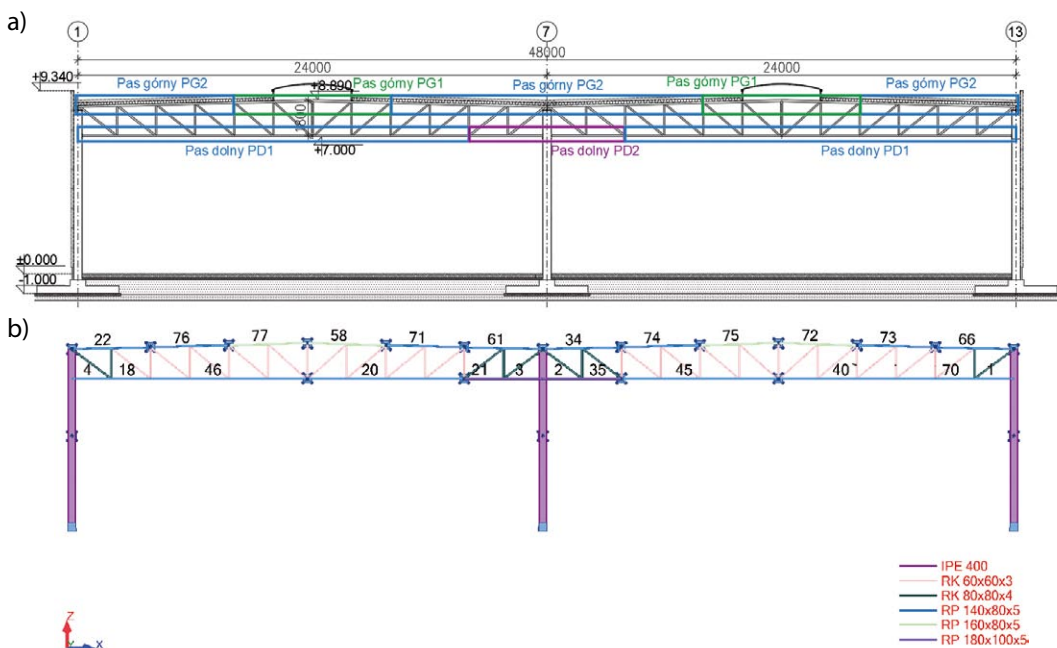
2.4. Metoda 3

Sprężysta analiza II rzędu z uwzględnieniem imperfekcji oraz wpływu deformacji na statykę układu i wartości sił wewnętrznych (efekty $P-\Delta$ i $P-\delta$) (ang. GNIA – *Geometrically nonlinear analysis of imperfect structure*). Imperfekcje uwzględnione są w sposób jawny i weryfikacja elementów sprowadza się do sprawdzenia nośności przekrojów elementów (nie ma potrzeby sprawdzania stateczności elementów). Taka procedura może być stosowana dla układów poprzecznych o dowolnej smukłości. Więcej informacji na temat imperfekcji w konstrukcjach stalowych można znaleźć w [8], a przykłady analityczne projektowania z wykorzystaniem analiz II rzędu w [9].

3. Przykład analizowanej konstrukcji

Zaprojektowano dwunawową halę o konstrukcji stalowej i wymiarach w rzucie 48,0x48,0 m. Wysokość hali do atyki wynosi 9,34 m. Rozpiętość osiowa nawy wynosi 24,0 m. Ustrój nośny stanowią płaskie układy poprzeczne, stężone systemem stężeń z płaszczyzny układu. Główną konstrukcję nośną dachu stanowią kratowe dźwigary stalowe sztywno połączone do słupów. Zaprojektowano dwuspadowe kratownice dachowe o pasach wykonanych z rur prostokątnych i prętach skratowania z rur kwadratowych (rys. 1a). Rozstaw układów poprzeczny w kierunku podłużnym jest równy 6,0 m. Schemat statyczny, profile dobrane na poprzeczny ustrój nośny oraz punkty sztywnego podparcia bocznych kratownic

Rys. 1. Przekrój poprzeczny analizowanej hali: a) Podział pasa górnego i dolnego kratownicy odpowiednio na części PG i PD; b) Schemat statyczny z numeracją prętów pasów kratownicy



i słupów w kierunku podłużnym przedstawiono na rysunku 1b. Pasy kratownic zamodelowano jako ciągłe, a pręty skrawowania jako przegubowo połączone z pasami. Wszystkie elementy kratownicy zaprojektowano ze stali S355J2H. Pas górny został stężony w kierunku podłużnym co 4,0 m, a pas dolny w strefie słupa środkowego co 4,0 m oraz jednym stężeniem międzywiązarowym w osi każdej nawy. Słupy hali przytrzymano stężeniami międzysłupowymi z płaszczyzny hali na końcach oraz w środku wysokości słupa.

Konstrukcja narażona jest na oddziaływania stałe, oddziaływania klimatyczne (wiatr i śnieg), oddziaływania od instalacji podwieszonych oraz od instalacji fotowoltaicznej przewidzianej do montażu na dachu hali. Przy wymiarowaniu konstrukcji przyjęto – zgodnie z Załącznikiem Krajowym do normy [10] – kombinacje oddziaływań 6.10a i 6.10b. Do obliczeń wykorzystano globalną analizę sprężystą.

3.1. Pas górny PG1 i PG2

Metoda 1.1 – metoda klasycznej długości wybocheniowej

W analizowanym przypadku hali długość wybocheniowa pasa górnego kratownicy wyznaczona wg punktu BB.1.3. normy [1] jest równa: $L_{cr} = 0,9 \cdot L = 0,9 \cdot 4,0 \text{ m} = 3,6 \text{ m}$

Wyniki wymiarowania pasa górnego kratownicy z warunkiem stateczności w programie ARSAP, współczynniki wybocheniowe wyznaczono zgodnie z punktem 6.3.1.2 normy [1] przedstawiono na rysunku 2.

Pręt	Profil	Materiał	Lay	Laz	Wyteż.
72	RP 160x80x5	S 355J2H	62.88	54.35	0.87
76	RP 140x80x5	S 355J2H	70.88	55.09	1.00

Rys. 2. Wyniki wymiarowania prętów nr 72 i 76 (odpowiednio PG1 i PG2) w metodzie 1.1

Warunek nośności z uwagi na stateczność nie został spełniony.

Metoda 1.2 – metoda długości wybocheniowej wyznaczonej na podstawie analizy wybocheniowej

W przypadku analizowanej kombinacji oddziaływań mnożnik obciążenia krytycznego dla pasa górnego kratownicy wynosi $\alpha_{cr,op,pas\ g\ \text{g\ \text{r\ \text{o\ \text{p\ \text{n\ \text{y}}}}}} = 2,59$. Długość wybocheniową w i-tym odcinku pasa:

$$L_{cr,PG1} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_{PG1}}{N_{cr,PG1}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 744 \cdot 10^{-8}}{380 \cdot 2,59}} = 3,96 \text{ m}$$

$$L_{cr,PG2} = \sqrt{\frac{\pi^2 E I_{PG2}}{N_{cr,PG2}}} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 210 \cdot 10^6 \cdot 534 \cdot 10^{-8}}{367 \cdot 2,59}} = 3,41 \text{ m}$$

Długości wybocheniowe poszczególnych odcinków pasów są różne niż te wyliczone zgodnie z BB.1.3 normy [1]. Podejście bez przeprowadzenia analizy wybocheniowej pasa o zmiennym przekroju poprzecznym powoduje

niedoszacowanie długości wybocheniowej dla środkowego odcinka, co może być niekorzystne w ujęciu bezpieczeństwa konstrukcji. Wyniki wymiarowania pasa górnego kratownicy w metodzie 1.2 przedstawiono na rysunku 3.

Pręt	Profil	Materiał	Lay	Laz	Wyteż.
72	RP 160x80x5	S 355J2H	69.35	54.35	0.92
76	RP 140x80x5	S 355J2H	67.14	55.09	0.96

Rys. 3. Wyniki wymiarowania prętów nr 72 i 76 (odpowiednio PG1 i PG2) w metodzie 1.2

W rozważanym przypadku warunek nośności z uwagi na stateczność został spełniony.

Metoda 2 – metoda ogólna zgodnie z punktem 6.3.4. normy [1]

Minimalny mnożnik obciążeń obliczeniowych, przy którym przekrój krytyczny osiąga nośność charakterystyczną $\alpha_{ult,k}$ wynosi:

$$\alpha_{ult,k,min} = \min(\alpha_{ult,k,PG2}; \alpha_{ult,k,PG1}) = \min\left(\frac{N_{Ed,max\ PG1}}{N_{Rd}} + \frac{M_{z,Ed,max\ PG1}}{M_{z,Rd}}; \frac{N_{Ed,max\ PG2}}{N_{Rd}} + \frac{M_{z,Ed,max\ PG2}}{M_{z,Rd}}\right) = 1,43$$

Smukłość względna pasa górnego wynosi:

$$\bar{\lambda}_{op} = \sqrt{\frac{\alpha_{ult,k,min}}{\alpha_{cr,op,pas\ g\ \text{r\ \text{o\ \text{p\ \text{n\ \text{y}}}}}}} = \sqrt{\frac{1,43}{2,59}} = \sqrt{0,55} = 0,74$$

$$\phi_{op} = 0,5 \left[1 + \alpha(\bar{\lambda}_{op} - 0,2) + \bar{\lambda}_{op}^2 \right] = 0,5[1 + 0,49(0,74 - 0,2) + 0,74^2] = 0,91$$

Współczynnik wybochenia z płaszczyzny dla globalnej smukłości względnej wynosi:

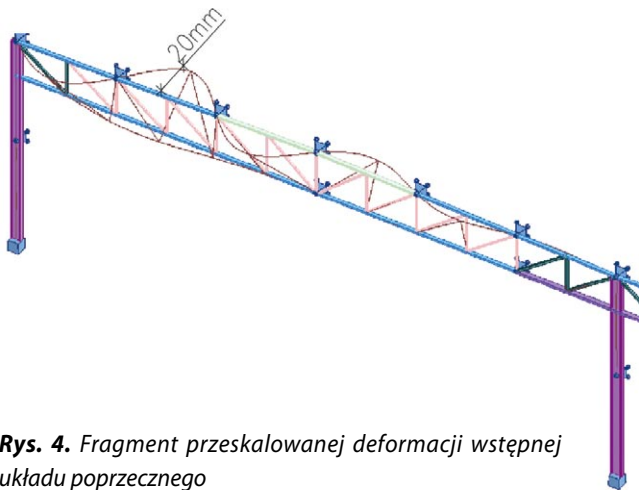
$$\chi_{op} = \frac{1}{\phi_{op} + \sqrt{\phi_{op}^2 - \bar{\lambda}_{op}^2}} = \frac{1}{0,91 + \sqrt{0,91^2 - 0,74^2}} = 0,69$$

Warunek stateczności pasa górnego:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_{op} N_{Rk} / \gamma_{M1}} + \frac{M_{z,Ed}}{\chi_{LT} M_{z,Rk} / \gamma_{M1}} = \frac{367,00}{0,69 \cdot 734,85} + \frac{4,38}{1,0 \cdot 22,09} = 0,72 + 0,20 = 0,92 \leq 1,0$$

Metoda 3 – Analiza z wykorzystaniem teorii II rzędu z uwzględnieniem wstępnych imperfekcji łukowych

W celu wyznaczenia momentów II rzędu przyjęto deformację wstępną schematu statycznego zgodnego z wybraną najbardziej niekorzystną postacią wybocheniową i amplitudą wychylenia obliczoną zgodnie z tablicą 5.1 normy [1]. Program ARSAP umożliwia przyjęcie postaci wybocheniowej



Rys. 4. Fragment przeskalowanej deformacji wstępnej układu poprzecznego

jako deformacji wstępnej. Dla pasa górnego maksymalna imperfekcja łukowa wynosi $e_0 = L/200 = 4000/200 = 20 \text{ mm}$ (rys. 4).

Sprawdzenie warunku stanu granicznego nośności przekrojów, jako ostrożne przybliżenie, zgodnie z punktem 6.2.1 (7) normy [1], dokonujemy ze wzoru 6.2 normy [1]:

PG2 (RP 140x80x5):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{360,66}{734,85} + \frac{9,31}{32,59} + \frac{4,70}{22,09} = 0,98 \leq 1,0$$

PG1 (RP 160x80x5):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} = \frac{373,39}{805,85} + \frac{9,65}{40,17} + \frac{4,72}{24,76} = 0,89 \leq 1,0$$

Porównanie wyników sprawdzenia warunku stanu granicznego nośności z uwzględnieniem stateczności pasa górnego:

	metoda 1.1	metoda 1.2	metoda 2	metoda 3
Wykorzystanie nośności	100%	96%	92%	98%

3.2. Pas dolny PD1 (między skrajnym słupem i kalenicą)

Obliczenia przeprowadzono opisanymi wyżej metodami. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

W pasie dolnym PD1 dochodzącym do skrajnego słupa hali zauważamy bardzo dużą zmienność siły osiowej od ściskania po rozciąganie. W programach inżynierskich moduły do wymiarowania elementów konstrukcji stalowych automatycznie, po zidentyfikowaniu siły ściskającej w przęcie, przeprowadzają wymiarowanie elementu z warunku stateczności uwzględniając zadaną wcześniej długość wybocheniową. Takie podejście przedstawiane jest również w przykładach obliczeniowych w literaturze, m.in. w [3]. Stosując w tym przypadku punkt BB.1.3 normy [1] i metodę 1.1 otrzymujemy znacznie zawyżoną długość wybocheniową.

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla pasa dolnego PD1

Metoda 1.1	Metoda 1.2	Metoda 2	Metoda 3
Obciążenie wymiarujące $N_{ed} = 147,67 \text{ kN}$ $M_{z,Ed} = 0,35 \text{ kNm}$	Obciążenie wymiarujące $N_{ed} = 147,67 \text{ kN}$ $M_{z,Ed} = 0,35 \text{ kNm}$	Obciążenie wymiarujące $N_{ed} = 147,67 \text{ kN}$ $M_{z,Ed} = 0,35 \text{ kNm}$	Obciążenie wymiarujące $N_{ed} = 136,28 \text{ kN}$ $M_{y,Ed} = 7,24 \text{ kNm}$ $M_{z,Ed} = 0,1 \text{ kNm}$
Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 734,85 \text{ kN}$ $M_{z,Rk} = 22,09 \text{ kNm}$ $\gamma_{M1} = 1,0$	Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 734,85 \text{ kN}$ $M_{z,Rk} = 22,09 \text{ kNm}$ $\gamma_{M1} = 1,0$	Mnożnik graniczny $\alpha_{ult,k} = 1/(N_{ed}/N_{Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd}) = 4,61$	Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 734,85 \text{ kN}$ $M_{y,Rk} = 32,59 \text{ kNm}$ $M_{z,Rk} = 22,09 \text{ kNm}$ $\gamma_{M1} = 1,0$
Długość wybocheniowa $L_{cr} = 10,8 \text{ m}$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 4,42$ Długość wybocheniowa $L_{cr} = 4,12 \text{ m}$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 4,42$	-
Współczynnik wybocheniowy $\chi_y = 0,11$ Współczynnik zwirzenia $\chi_{LT} = 1,00$	Współczynnik wybocheniowy $\chi_y = 0,49$ Współczynnik zwirzenia $\chi_{LT} = 1,00$	Współczynnik niestateczności $\chi_{op} = 0,53$	Amplituda wstępnej łukowej imperfekcji $e_0 = L/200 = 60 \text{ mm}$
Współczynnik interakcji $k_{yz} = 0,62$	Współczynnik interakcji $k_{yz} = 0,62$	-	-
Warunek stateczności $N_{ed}/(\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yz} M_{z,Ed}/(\chi_{LT} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 1,85$	Warunek stateczności $N_{ed}/(\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yz} M_{z,Ed}/(\chi_{LT} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 0,41$	Warunek stateczności $N_{ed}/(\chi_{op} N_{Rk}/\gamma_{M1}) + M_{z,Ed}/(\chi_{op} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 0,41$	Warunek stateczności = warunek nośności przekroju $N_{ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd} = 0,41$

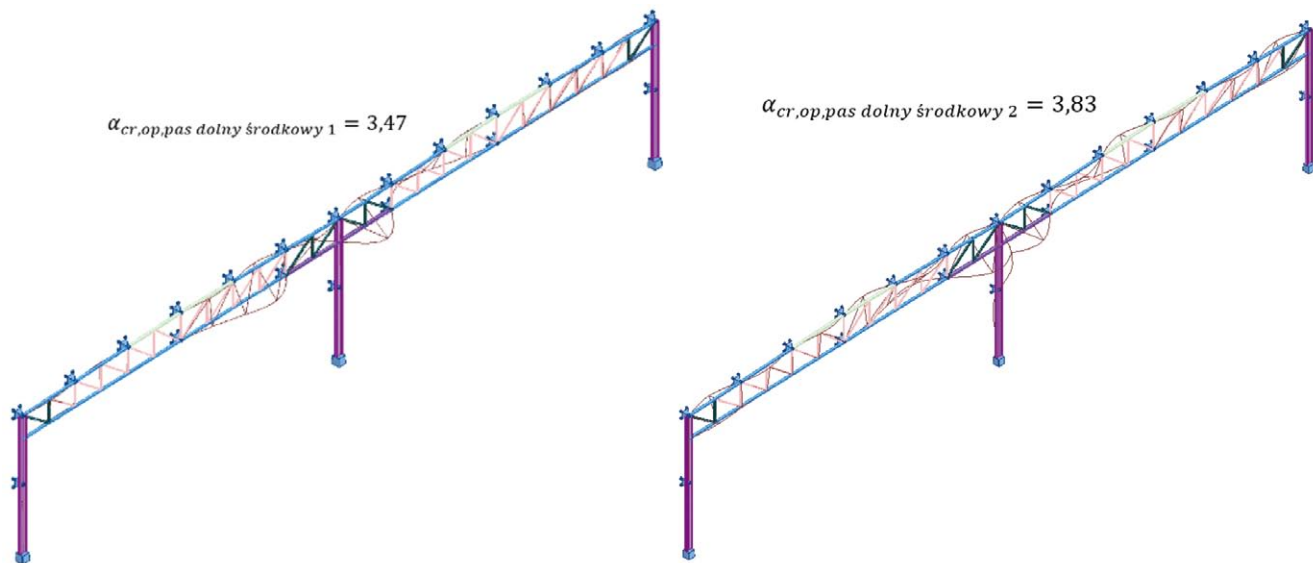
Tabela 2. Wyniki obliczeń dla pasa dolnego PD2

Metoda 1.1	Metoda 1.2	Metoda 2	Metoda 3.1	Metoda 3.2
Obciążenie wymiarujące $N_{Ed} = 601,16 \text{ kN}$	Obciążenie wymiarujące $N_{Ed} = 601,16 \text{ kN}$	Obciążenie wymiarujące $N_{Ed} = 601,16 \text{ kN}$	Obciążenie wymiarujące $N_{Ed} = 577,98 \text{ kN}$ $M_{y,Ed} = 12,26 \text{ kNm}$ $M_{z,Ed} = 1,00 \text{ kNm}$	Obciążenie wymiarujące $N_{Ed} = 579,46 \text{ kN}$ $M_{y,Ed} = 10,61 \text{ kNm}$ $M_{z,Ed} = 1,05 \text{ kNm}$
Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 947,85 \text{ kN}$ $\gamma_{M1} = 1,0$	Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 947,85 \text{ kN}$ $\gamma_{M1} = 1,0$	Mnożnik graniczny $\alpha_{ult,k} = 1/(N_{Ed}/N_{Rd}) = 1,58$	Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 947,85 \text{ kN}$ $M_{y,Rk} = 45,48 \text{ kNm}$ $M_{z,Rk} = 32,66 \text{ kNm}$ $\gamma_{M1} = 1,0$	Nośności charakterystyczne $N_{Rk} = 947,85 \text{ kN}$ $M_{y,Rk} = 45,48 \text{ kNm}$ $M_{z,Rk} = 32,66 \text{ kNm}$ $\gamma_{M1} = 1,0$
Długość wybojeniowa $L_{cr} = 3,60 \text{ m}$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 3,47$ Długość wybojeniowa $L_{cr} = 3,38 \text{ m}$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 3,47$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 3,47$	Mnożnik obciążenia krytycznego $\alpha_{cr,op} = 3,83$
Współczynnik wybojeniowy $\chi_y = 0,71$ Współczynnik zwichrzenia $\chi_{LT} = 1,00$	Współczynnik wybojeniowy $\chi_y = 0,74$ Współczynnik zwichrzenia $\chi_{LT} = 1,00$	Współczynnik niestateczności $\chi_{op} = 0,74$	Amplituda wstępnej łukowej imperfekcji $e_0 = L/200 = 20 \text{ mm}$	Amplituda wstępnej imperfekcji $e_0 = L/200 = 30 \text{ mm}$
Wpółczynnik interakcji $k_{yz} = 1,14$	Wpółczynnik interakcji $k_{yz} = 1,14$	-	-	-
Warunek stateczności $N_{Ed}/(\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yz} M_{z,Ed}/(\chi_{LT} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 0,92$	Warunek stateczności $N_{Ed}/(\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}) + k_{yz} M_{z,Ed}/(\chi_{LT} M_{z,Rk}/\gamma_{M1}) = 0,89$	Warunek stateczności $N_{Ed}/(\chi_{op} N_{Rk}/\gamma_{M1}) = 0,86$	Warunek stateczności = warunek nośności przekroju $N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd} = 0,91$	Warunek stateczności = warunek nośności przekroju $N_{Ed}/N_{Rd} + M_{y,Ed}/M_{y,Rd} + M_{z,Ed}/M_{z,Rd} = 0,88$

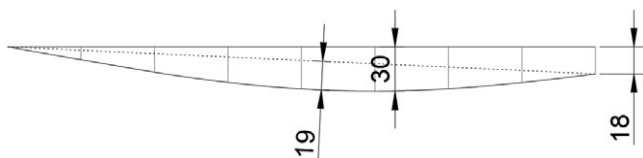
Należy zauważyć, że rozważany przypadek nie jest do końca zgodny z założeniami punktu BB.1.3 normy [1], gdyż na połączeniu pasa dolnego ze skrajnym słupem hali stężenie boczne nie jest sztywne, a podatne – związane ze sztywnością giętną słupa względem słabszej osi. W związku

z powyższym metoda 1.1 nie jest odpowiednia do analizy tego typu przypadków.

Obliczenia z wykorzystaniem analiz wybojeniowych (metoda 1.2, 2 i 3) wykazały bardzo dużą zbieżność otrzymanych wyników. Podejście obliczeniowe bez przeprowadzenia



Rys. 5. Postacie wybojeniowe pasa dolnego PD2



Rys. 6. Fragment przeskalowanej deformacji pasa dolnego w sąsiedztwie słupa środkowego

analizy wybozeniowej pasa i nie uwzględnienie zmiennej siły osiowej na długości pręta może powodować znaczne przewymiarowanie konstrukcji i w efekcie zastosowanie rozwiązań nieekonomicznych.

3.3. Pas dolny PD2 (na odcinku przy słupie środkowym)

Obliczenia przeprowadzono analogicznymi metodami jak w przypadku pasa górnego. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2. Momenty zginające M_z są pomijalnie małe i nie uwzględniono ich podczas wymiarowania metodą 1.1, 1.2 i 2.

W związku ze złożonością przypadku spowodowaną zmiennym przekrojem pasa dolnego, zmienną siłą osiową, pośrednim podparciem bocznym pasa dolnego w odległości 4,0 m od słupa środkowego, brakiem stężenia bocznego kratownicy na połączeniu pasa dolnego ze słupem środkowym wybór odpowiedniej postaci własnej jest w tym przypadku trudniejszy i wymaga przeanalizowania kilku postaci wybozeniowych. W tabeli 2, dla metody 3, przedstawiono wyniki dla dwóch postaci wybozeniowych przy niestateczności sprężystej pasa dolnego przy słupie środkowym (metoda 3.1 i metoda 3.2) (rys. 5).

W Metodzie 3.2, dla $\alpha_{cr} = 3,83$, mamy do czynienia z konsekwencją braku stężenia bocznego na połączeniu pasa dolnego ze słupem środkowym. Postać wybozeniowa jest w tym przypadku symetryczna – związana z niestatecznością pasa dolnego oraz słupa środkowego. Wstępnie zdeformowany kształt konstrukcji zgodnie z taką postacią własną jest możliwy i spowodowany jest nałożeniem się imperfekcji łukowej słupa i imperfekcji łukowej pasa dolnego (rys. 6).

Skalując wstępną deformację układu otrzymujemy imperfekcję dla części przysłupowej PD2 jak na rysunku 6.

Z tabeli 2 można wnioskować, że wszystkie wykorzystane metody dały bardzo zbliżone wyniki. Zaawansowana analiza II rzędu pozwoliła mieć większą kontrolę nad oceną stateczności konstrukcji i wykazała, że nie ma potrzeby w danym projekcie (z uwagi na stateczność kratownicy) stosować bocznego przytrzymania słupa w miejscach dochodzenia ściskanych pasów dolnych kratownicy PD2.

4. Podsumowanie

Metoda 1.1 stosowana jest powszechnie przez projektantów konstrukcji, ponieważ jest ona zaimplementowana w modułach do wymiarowania konstrukcji stalowych w programach inżynierskich. Należy zauważyć,

że uproszczenia zawarte w tej metodzie mogą w wielu przypadkach prowadzić do nieoptymalnego projektowania ściskanych elementów konstrukcji stalowych. Należy również podkreślić ograniczenia dla metody 1.1, która zarezerwowana jest dla elementów przytrzymanych w sposób sztywny w płaszczyźnie wybożenia i o stałym przekroju poprzecznym.

Metody oparte o obliczenia na podstawie liniowej analizy wybozeniowej (LBA) jak metoda 1.2 i 2 (metoda ogólna) dają dokładniejsze wyniki i pozwalają uwzględnić rzeczywiste formy własne konstrukcji. Metody te wykazują największe korzyści nad metodą 1.1 w przypadku zmiennego przekroju poprzecznego oraz gdy siła zmienia wartość i znak na długości pręta. Pomimo, że zastosowanie tych metod nie jest tak „automatyczne” w programach inżynierskich jak metoda 1.1, to nie wymaga ona od projektanta dużo większego nakładu pracy. Identyfikacja wymiarujących kombinacji oddziaływań oraz wybranie odpowiednich postaci wybozeniowych wymaga pewnego doświadczenia, jednak – jak obrazuje przytoczony przykład – pozwala ona na bardziej ekonomiczne projektowanie elementów, zapewniając wystarczającą dokładność obliczeń i bezpieczeństwo konstrukcji.

Obecnie używane programy inżynierskie umożliwiają wykonanie jeszcze dokładniejszych obliczeń w oparciu o analizę II rzędu z uwzględnieniem wstępnie zdeformowanego kształtu konstrukcji (metoda 3). Daje to możliwość największej kontroli nad obliczeniami z uwzględnieniem pomijanych w klasycznych metodach warunków brzegowych podparć, podatności stężeń bocznych czy rozkładu sił wewnętrznych na długości pręta. Trudność w tej metodzie stanowi wybór najbardziej niekorzystnego układu imperfekcji, która wprowadzona jako wstępna postać deformacji konstrukcji spowoduje maksymalne jej wyiężenie.

BIBLIOGRAFIA

- [1] PN-EN 1993-1-1:2006:Projektowanie konstrukcji stalowych, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, PKN, Warszawa, 2006
- [2] Biegus A., Projektowanie konstrukcji stalowych według PN-EN 1993. Zeszyt 1. Zeszyty Edukacyjne Buildera, Warszawa, 2011
- [3] Budownictwo ogólne tom 5, Stalowe konstrukcje budynków projektowanie według eurokodów z przykładami obliczeń (praca zbiorowa pod kierunkiem Mariana Giżejowskiego i Jerzego Ziółko), Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 2012
- [4] Rykaluk K., Zagadnienia stateczności konstrukcji metalowych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2012
- [5] Timoshenko S. P., Gere J. M., Teoria stateczności sprężystej, Wydawnictwo Arkady, Warszawa, 1963
- [6] PN-90/B-03200: Konstrukcje stalowe – obliczenia statyczne i projektowanie
- [7] Kędziora E., Ocena stateczności prętów ściskanych na podstawie PN-EN 1993-1-1. Inżynieria i Budownictwo 8/2015, str. 430–433
- [8] Biegus A., Probabilistyczna analiza konstrukcji stalowych, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa – Wrocław, 1999
- [9] Pałkowski Sz., Podstawy stateczności stalowych konstrukcji prętowych, Wydawnictwo uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2016
- [10] PN-EN 1990:2004: Podstawy projektowania konstrukcji, PKN, Warszawa, 2004