

KONSTRUKCJE STALOWE W EUROPIE

**Wielokondygnacyjne
konstrukcje stalowe**

**Część 10: Wskazówki dla twórców
oprogramowania do projektowania
belek zespolonych**

**Wielokondygnacyjne
konstrukcje stalowe
Część 10: Wskazówki dla twórców
oprogramowania do projektowania
belek zespolonych**

PRZEDMOWA

Niniejsza publikacja stanowi drugą część przewodnika projektanta zatytułowanego *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe*.

Przewodnik *Wielokondygnacyjne konstrukcje stalowe* składa się z 10 następujących rozdziałów:

- Część 1: Poradnik architekta
- Część 2: Projekt koncepcyjny
- Część 3: Oddziaływania
- Część 4: Projekt wykonawczy
- Część 5: Projektowanie połączeń
- Część 6: Inżynieria pożarowa
- Część 7: Wzorcowa specyfikacja konstrukcji
- Część 8: Opis kalkulatora do obliczania nośności elementów konstrukcyjnych
- Część 9: Opis kalkulatora do obliczania nośności połączeń prostych
- Część 10: Wskazówki dla twórców oprogramowania do projektowania belek zespolonych

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

Obydwa przewodniki projektanta powstały w ramach europejskiego projektu „Wspieranie rozwoju rynku kształtowników 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 10: Wskazówki dla twórców oprogramowania do projektowania
belek zespolonych*

Spis treści

| | Nr strony |
|--|------------------|
| PRZEDMOWA | iii |
| STRESZCZENIE | vi |
| 1 ZAKRES OPRACOWANIA | 7 |
| 2 DANE PODSTAWOWE | 8 |
| 2.1 Ogólne parametry belki | 8 |
| 2.2 Kształtownik stalowy | 9 |
| 2.3 Płyta betonowa | 9 |
| 2.4 Połączenie ścinane | 10 |
| 2.5 Obciążenia | 11 |
| 2.6 Współczynniki częściowe | 12 |
| 2.7 Inne parametry obliczeniowe | 12 |
| 3 WŁASNOŚCI MATERIAŁU | 13 |
| 3.1 Stal konstrukcyjna | 13 |
| 3.2 Stalowe pręty zbrojeniowe | 13 |
| 3.3 Beton | 13 |
| 4 OBLICZANIE SIŁ I MOMENTÓW WEWNĘTRZNYCH | 14 |
| 4.1 Ogólne | 14 |
| 4.2 Wpływ obciążenia skupionego | 14 |
| 4.3 Wpływ równomiernie rozłożonego obciążenia powierzchniowego | 15 |
| 4.4 Kombinacje oddziaływań | 15 |
| 5 ETAP BUDOWY | 16 |
| 5.1 Ogólne | 16 |
| 5.2 Sprawdzenie stanów granicznych nośności (SGN) | 16 |
| 5.3 Obliczenia stanów granicznej użyteczności (SGU) | 20 |
| 6 ETAP KOŃCOWY | 21 |
| 6.1 Szerokość efektywna płyty | 21 |
| 6.2 Połączenie ścinane | 21 |
| 6.3 Nośność przekroju poprzecznego | 24 |
| 6.4 Nośność przy ścinaniu wzdłużnym | 29 |
| 6.5 Stany graniczne użyteczności | 31 |
| 7 WYKAZ GŁÓWNYCH DANYCH WYJŚCIOWYCH | 33 |
| LITERATURA | 34 |
| ZAŁĄCZNIK A Ogólny schemat blokowy | 35 |

STRESZCZENIE

Niniejszy przewodnik stanowi zbiór wytycznych dla twórców oprogramowania do projektowania belek zespolonych używanych w konstrukcjach wielokondygnacyjnych zgodnie z wymaganiami Eurokodów. Obejmuje on belki swobodnie podparte połączone z płytą betonową za pomocą łączników sworzniowych i zawiera wymagania techniczne. Sprawdzenie stanów granicznych nośności (SGN) musi być przeprowadzone w oparciu o metodę nośności granicznej.

1 ZAKRES OPRACOWANIA

Celem niniejszego dokumentu jest umożliwienie programistom stworzenia prostego narzędzia programowego do projektowania belek zespolonych w konstrukcjach wielokondygnacyjnych zgodnie z wymogami normy EN 1994-1-1^[1]. Dokument może również pełnić rolę przewodnika pozwalającego na zrozumienie działania istniejących już programów tego typu.

Niniejszy przewodnik nie zawiera kodu programu, a jedynie szczegółowe wymagania techniczne.

Dokument obejmuje swobodnie podparte belki zespolone złożone z kształtownika walcowanego połączonego z płytą betonową za pomocą spawanych łączników sworzniowych. Rozpatrywanych jest kilka wariantów:

- belki główne i drugorzędne,
- płyta płaska lub płyta z arkuszem stalowej blachy profilowanej,
- belki w pełni podparte lub belki niepodparte na etapie budowy.

Wymagania techniczne obejmują:

- obliczenia sił i momentów wewnętrznych,
- sprawdzenie stanów granicznych nośności belki (SGN),
- obliczenia stanów granicznych użytkowości (SGU),
- obliczenia belki zespolonej oparte są na nośności plastycznej przy założeniu pełnego lub częściowego połączenia.

Ogólny przebieg procedury projektowania przedstawiony został na schematach w Załączniku A.

2 DANE PODSTAWOWE

2.1 Ogólne parametry belki

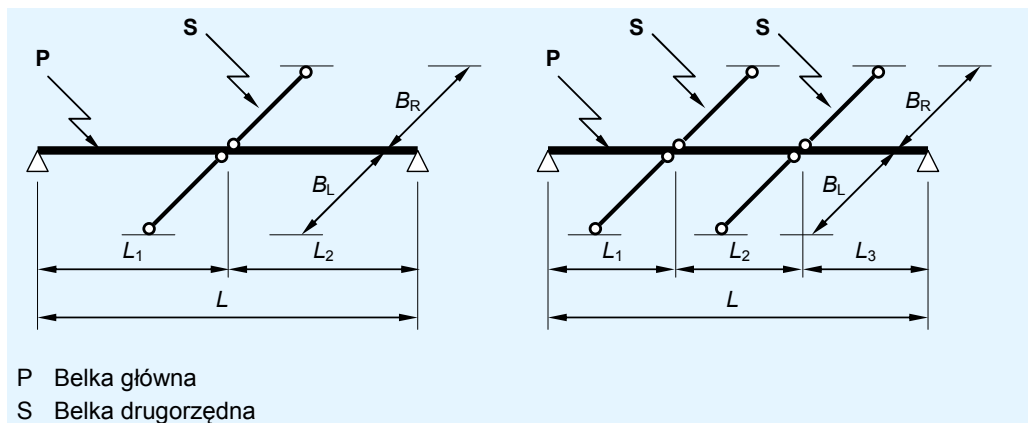
2.1.1 Wymiary

Wymiary ogólne obejmują:

- L rozpiętość przęsła,
- B_L, B_R odległości pomiędzy osiami sąsiednich belek,
- L_i położenie belek drugorzędnych.

Użytkownik może wybrać belkę główną bądź belkę drugorzędną. W przypadku belki drugorzędnej przyjmuje się równomierne rozłożenie obciążenia.

W przypadku belki głównej obciążenia przenoszone są przez jedną lub dwie belki drugorzędne na rozpatrywaną belkę główną.



Rysunek 2.1 Belka główna i belki drugorzędne

Musi zostać spełniony następujący warunek:

$$L_i > L/5$$

2.1.2 Podpory i stężenia boczne

Stosowanie podpór belki na etapie budowy: w pełni podparta lub niepodparta.

Jeśli belka jest w pełni podparta, na etapie budowy nie są wykonywane żadne obliczenia.

Jeśli na etapie budowy belka nie jest podparta, wówczas użytkownik musi dokonać wyboru pomiędzy pełnym stężeniem bocznym zabezpieczającym przed zwichrzeniem w fazie budowy a podporami bocznymi umieszczonymi tylko na końcach belki.

2.2 Kształtownik stalowy

Stalowy kształtownik konstrukcyjny to walcowany na gorąco dwuteownik zdefiniowany za pomocą następujących wymiarów:

- h wysokość kształtownika stalowego,
- b szerokość pasa,
- t_f grubość pasa,
- t_w grubość środnika,
- r promień zaokrąglenia między pasem a środnikiem.

W odpowiedniej bazie danych można znaleźć następujące parametry:

- A pole powierzchni przekroju,
- $A_{v,z}$ pole powierzchni przekroju czynnego przy ścinaniu według normy EN 1993-1-1 § 6.2.6(3),
- I_y moment bezwładności przekroju względem osi mocnej,
- I_z moment bezwładności przekroju względem osi słabej,
- I_t moment bezwładności przy skręcaniu,
- I_w wycinkowy moment bezwładności,
- $W_{el,y}$ sprężysty wskaźnik wytrzymałości względem osi mocnej,
- $W_{pl,y}$ plastyczny wskaźnik wytrzymałości względem osi mocnej.

Gatunek stali można wybrać z poniższej listy:

S235, S275, S355, S420, S460.

2.3 Płyta betonowa

Płytę betonową definiują podane poniżej parametry.

Typ płyty: płyta płaska lub płyta z arkuszem stalowej blachy profilowanej

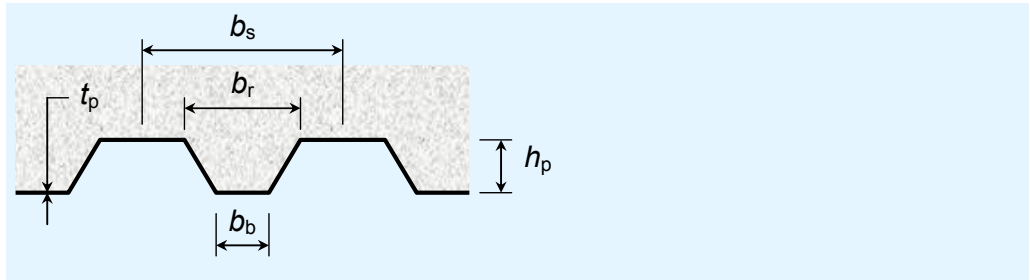
- h_f grubość płyty,
- ρ gęstość betonu.

Gatunek betonu można wybrać z poniższej listy:

- C20/25
- C25/30
- C30/37
- C35/45
- C40/50
- C45/55
- C50/60
- C55/67
- C60/75

Arkusze stalowej blachy profilowanej, jeśli występuje, zdefiniowany jest za pomocą geometrii przekroju (Rysunek 2.2):

- h_p całkowita wysokość arkusza stalowej blachy profilowanej,
- t_p grubość arkusza blachy,
- b_s odległość pomiędzy osiami sąsiadujących występow,
- b_r szerokość występu,
- b_b szerokość dna występu.



Rysunek 2.2 Przekrój poprzeczny arkusza stalowej blachy profilowanej

Należy wybrać jedną z poniższych opcji:

- arkusz (występy) ułożony prostopadle do belki,
- arkusz (występy) ułożony równolegle do osi belki.

Jeśli arkusz stalowej blachy profilowanej ułożony jest prostopadle do osi belki, wówczas należy wybrać jedną z poniższych opcji:

- łączniki przyspawane do arkusza stalowej blachy profilowanej,
- arkusz stalowej blachy profilowanej z otworami pod łączniki,
- arkusz stalowej blachy profilowanej z przerwami na belce (swobodne rozmieszczenie łączników wzdłuż osi belki).

2.4 Połączenie ścinane

2.4.1 Opis sworznia

Łączniki to sworznie z łbem przyspawane do górnego pasa kształownika stalowego. Wszystkie sworznie w danej belce są identyczne.

Sworzeń określa następujące parametry:

- h_{sc} całkowita wysokość nominalna,
- d średnica trzpienia, której wartość można wybrać z następującej listy:
 - 16 mm
 - 19 mm
 - 22 mm,
- $f_{u,sc}$ granica wytrzymałości materiału sworznia.

2.4.2 Rozmieszczenie łączników

Położenie łączników można określić na 1, 2 lub 3 odcinkach belki. W przypadku wyboru więcej niż jednego odcinka należy określić długość każdego z nich. Suma tych długości powinna być równa długości belki.

Dla każdego odcinka należy określić następujące parametry:

- liczba rzędów: 1 lub 2,
- odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi łącznikami umieszczonymi wzdłuż belki.

Jeśli arkusz stalowej blachy profilowanej umieszczony jest prostopadle do belki, wówczas odległość pomiędzy sworzniami wynosi $n \times b_s$, gdzie n może być równe 1, 2 lub 3.

2.5 Obciążenia

Oprogramowanie umożliwia użytkownikowi zdefiniowanie podstawowych przypadków obciążenia stosowanych w kombinacjach oddziaływań przy analizie stanów granicznych nośności (SGN) oraz stanu granicznego użytkowalności (SGU) według normy EN 1990^[2].

Rozpatrywane są wyłącznie obciążenia grawitacyjne (skierowane w dół).

Uwzględniane są maksymalnie trzy podstawowe przypadki obciążeń spełniające poniższe warunki techniczne:

- 1 przypadek obciążenia stałego — oznaczony jako G ,
- 2 przypadki obciążenia zmiennego — oznaczone jako Q_1 i Q_2 .

Dla każdego przypadku obciążenia możliwe jest zdefiniowanie równomiernie rozłożonego obciążenia powierzchniowego q_{surf} . W przypadku belki zdefiniowanej jako „belka drugorzędna” z poniższego wzoru wyznaczone zostaje równomierne obciążenie liniowe:

$$q_{\text{lin}} = q_{\text{surf}} (B_L + B_R)/2$$

gdzie:

B_L i B_R to odległości pomiędzy daną belką a belkami sąsiednimi (lewą i prawą).

Natomiast w przypadku belki zdefiniowanej jako „belka główna” na podstawie równomiernego obciążenia powierzchniowego wyznaczone zostaje jedno lub dwa obciążenia punktowe.

Ciężar własny kształtownika walcowanego oraz ciężar płyty betonowej obliczane są automatycznie.

Dla każdego przypadku obciążenia zmiennego należy określić współczynniki kombinacji ψ_0 , ψ_1 oraz ψ_2 .

Jeśli belka jest niepodparta na etapie budowy, obciążenie konstrukcji musi określić użytkownik. Domyślna wartość wynosi $0,75 \text{ kN/m}^2$.

2.6 Współczynniki częściowe

2.6.1 Współczynniki częściowe oddziaływań

W zakresie zastosowań niniejszego oprogramowania występują następujące współczynniki częściowe oddziaływań wykorzystywane do określenia kombinacji obciążeń stanów granicznych nośności:

- γ_G stosowany do oddziaływań stałych,
- γ_Q stosowany do oddziaływań zmiennych.

2.6.2 Współczynniki częściowe nośności

Wyrażenia związane z nośnością obliczeniową odnoszą się do następujących współczynników częściowych:

- γ_{M0} stosowany do obliczania nośności stali konstrukcyjnej,
- γ_{M1} stosowany do obliczania nośności stali konstrukcyjnej w przypadku stanu granicznego nośności związanego ze zjawiskiem wyboczenia,
- γ_c stosowany do obliczania nośności betonu przy ściskaniu,
- γ_V stosowany do obliczania nośności sworzni z łbem,
- γ_s stosowany do obliczania nośności stalowych prętów zbrojeniowych.

Wartości współczynników częściowych podane są w Załącznikach krajowych. Wartości zalecane można znaleźć w Tabeli 2.1.

Tabela 2.1 Zalecane wartości współczynników częściowych

| Współczynniki częściowe | γ_G | γ_Q | γ_{M0} | γ_{M1} | γ_c | γ_s | γ_V |
|-------------------------|------------|------------|---------------|---------------|-------------|------------|-------------|
| Eurokod | EN 1990 | | EN 1993-1-1 | | EN 1992-1-1 | | EN 1994-1-1 |
| Zalecane wartości | 1,35 | 1,50 | 1,0 | 1,0 | 1,5 | 1,15 | 1,25 |

2.7 Inne parametry obliczeniowe

Należy podać wartości następujących parametrów obliczeniowych:

- η współczynnik nośności przy ścinaniu zgodnie z definicją w normie EN 1993-1-5 § 5.1. Należy przyjąć wartość współczynnika podaną w Załączniku krajowym. Zalecana wartość wynosi 1,2.

Procentową wartość obciążeń użytkowych wykorzystywanych do oceny częstotliwości drgań własnych (SGU) musi podać użytkownik.

3 WŁASNOŚCI MATERIAŁU

3.1 Stal konstrukcyjna

Własności stali definiuje norma EN 1993-1-1^[3]:

E moduł sprężystości podłużnej ($E = 210000 \text{ N/mm}^2$)

G moduł sprężystości poprzecznej ($G = 80770 \text{ N/mm}^2$)

f_y granica plastyczności podana w tabeli 3.1 w normie EN 1993-1-1 i zależna od gatunku stali oraz grubości materiału. Dla uproszczenia wartość granicy plastyczności można wyznaczyć na podstawie grubości pasa.

f_{yw} granica plastyczności środka wyznaczona na podstawie jego grubości

ε parametr materiałowy określony wzorem:

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_y}$$

gdzie f_y to granica plastyczności w N/mm^2 .

3.2 Stalowe pręty zbrojeniowe

Własności stali zbrojeniowej definiuje norma EN 1992-1-1:

$f_{y,r,k}$ granica plastyczności poprzecznych prętów zbrojeniowych.

3.3 Beton

Właściwości betonu definiuje norma EN 1992-1-1^[4]. Są one wyznaczane na podstawie klasy betonu.

f_{ck} charakterystyczna wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach według tabeli 3.1 w normie EN 1992-1-1,

f_{cd} obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie (EN 1994-1-1 § 2.4.1.2(2)):

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_c$$

E_{cm} sieczny moduł sprężystości według tabeli 3.1 w normie EN 1992-1-1.

4 OBLICZANIE SIŁ I MOMENTÓW WEWNĘTRZNYCH

4.1 Ogólne

Nośność przekroju belki zespolonej należy sprawdzić, uwzględniając zmienność siły ścinającej i momentu zginającego, zmienność nośności przy zginaniu na skutek zmiany szerokości efektywnej płyty, stopień połączenia oraz wpływ siły ścinającej. W związku z tym siłę ścinającą i moment zginający należy obliczyć w kilku punktach obliczeniowych wzdłuż belki dla każdego podstawowego przypadku obciążeń (tzn. G , Q_1 , Q_2). W ten sposób uzyskane zostaną wewnętrzne siły i momenty obliczeniowe dla każdej kombinacji oddziaływań.

Punkty obliczeniowe zlokalizowane są na podporach i po obu stronach przyłożonego obciążenia skupionego. Aby uzyskać dostatecznie dokładny przekrój krytyczny, pomiędzy tymi punktami należy wyznaczyć dodatkowe punkty obliczeniowe. W tym celu zaleca się, aby odległość pomiędzy dwoma sąsiadującymi punktami obliczeniowymi wynosiła mniej niż $L/20$.

4.2 Wpływ obciążenia skupionego

Reakcja pionowa w miejscu lewej podpory:

$$R_{VL} = -F(L - x_F) / L$$

Reakcja pionowa w miejscu prawej podpory:

$$R_{VR} = F - R_{VL}$$

Siła ścinająca dla odciętej x pochodząca od lewej podpory:

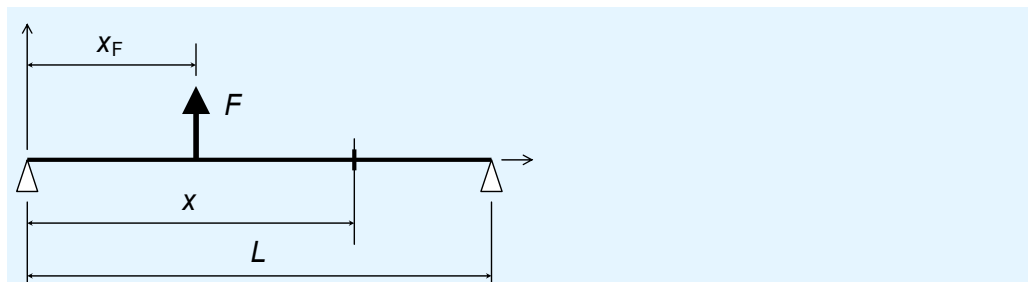
$$\text{Jeśli } x \leq x_F: \quad V(x) = R_{VL}$$

W przeciwnym razie: $V(x) = R_{VL} + F$

Moment zginający dla odciętej x pochodzący od lewej podpory:

$$\text{Jeśli } x \leq x_F: \quad M(x) = R_{VL} x$$

W przeciwnym razie: $M(x) = R_{VL} x + F(x - x_F)$



Rysunek 4.1 Obciążenie skupione przyłożone do belki

4.3 Wpływ równomiernie rozłożonego obciążenia powierzchniowego

Reakcja pionowa na podporach:

$$R_{VL} = R_{VR} = -Q (B_L + B_R) L / 4$$

Siła ścinająca dla odciętej x pochodząca od lewej podpory:

$$V(x) = R_{VL} + Q (B_L + B_R) x / 2$$

Moment zginający dla odciętej x pochodzący od lewej podpory:

$$M(x) = R_{VL} x + Q (B_L + B_R) x^2 / 4$$

4.4 Kombinacje oddziaływań

4.4.1 Stany graniczne nośności (SGN)

Kombinacje oddziaływań wykorzystywane do sprawdzenia stanów granicznych nośności to podstawowe kombinacje określone w normie EN 1990 § 6.4.3.2:

$$\gamma_G G + \gamma_Q Q_1 + \gamma_Q \psi_{0,2} Q_2$$

$$\gamma_G G + \gamma_Q Q_2 + \gamma_Q \psi_{0,1} Q_1$$

4.4.2 Stany graniczne użyteczności (SGU)

Kombinacje oddziaływań używane do sprawdzenia stanów granicznych użyteczności (ugięcie, drgania) mogą być kombinacjami charakterystycznymi lub częstymi — w zależności od wymagań w Załączniku krajowym:

kombinacje charakterystyczne (EN 1990 § 6.5.3 a):

$$G + Q_1 + \psi_{0,2} Q_2$$

$$G + Q_2 + \psi_{0,1} Q_1$$

kombinacje częste (EN 1990 § 6.5.3 b):

$$G + \psi_{1,1} Q_1 + \psi_{2,2} Q_2$$

$$G + \psi_{1,2} Q_2 + \psi_{2,1} Q_1$$

5 ETAP BUDOWY

5.1 Ogólne

Jeśli na etapie budowy belka jest niepodparta, wówczas należy wykonać sprawdzenie stanów granicznych nośności (SGN). Na tym etapie uwzględnione zostają następujące oddziaływania:

- ciężar własny kształtownika stalowego (G),
- ciężar betonu (Q_{cf}),
- obciążenie konstrukcji przyjęte jako oddziaływanie zmienne (Q_{ca}).

Siły i momenty wewnętrzne obliczane są zgodnie z instrukcjami podanymi w rozdziale 4 niniejszego przewodnika dla następującej kombinacji oddziaływań używanych do sprawdzania stanów granicznych nośności:

$$\gamma_G G + \gamma_Q (Q_{cf} + Q_{ca})$$

Sprawdzenie stanów granicznych nośności obejmuje:

- nośność przy zginaniu,
- nośność przy ścinaniu,
- nośność przy wyboczeniu,
- wzajemne oddziaływanie momentu zginającego i siły ścinającej,
- zwichrzenie.

Jeśli chodzi o zwichrzenie (LTB), wybór założeń projektowych należy do użytkownika. Belka może być w pełni podparta bocznie, co zapobiega zwichrzeniu, lub stężona bocznie jedynie na podporach. Analiza zwichrzenia wykonywana jest stosownie do przypadku mocowania.

5.2 Sprawdzenie stanów granicznych nośności (SGN)

5.2.1 Ogólne

Dla każdego punktu obliczeniowego zlokalizowanego wzdłuż belki obliczone zostają różne kryteria projektowe. Przez kryterium rozumie się stosunek siły obliczeniowej do odpowiedniej nośności obliczeniowej. W związku z tym wynik sprawdzenia jest zadowalający, jeśli wartość kryterium oznaczonego jako Γ nie przekracza jedności:

$$\Gamma \leq 1,0$$

5.2.2 Klasyfikacja przekrojów poprzecznych

Nośność przekroju poprzecznego przy zginaniu zależy od klasy danego przekroju.

| | |
|---|---------------------------|
| Jeśli $0,5 (b - t_w - 2 r) / t_f \leq 9 \varepsilon$ | to pas należy do klasy 1. |
| Jeśli $0,5 (b - t_w - 2 r) / t_f \leq 10 \varepsilon$ | to pas należy do klasy 2. |
| Jeśli $0,5 (b - t_w - 2 r) / t_f \leq 14 \varepsilon$ | to pas należy do klasy 3. |

W innym przypadku pas należy do klasy 4.

| | |
|---|-------------------------------|
| Jeśli $(h - 2(t_f + r)) / t_w \leq 72 \varepsilon$ | to środnik należy do klasy 1. |
| Jeśli $(h - 2(t_f + r)) / t_w \leq 83 \varepsilon$ | to środnik należy do klasy 2. |
| Jeśli $(h - 2(t_f + r)) / t_w \leq 124 \varepsilon$ | to środnik należy do klasy 3. |

W innym przypadku środnik należy do klasy 4.

Klasa przekroju poprzecznego to najwyższa klasa ściskanego pasa i środnika.

5.2.3 Nośność przy ścinaniu w płaszczyźnie pionowej

Kryterium nośności przy ścinaniu w płaszczyźnie pionowej oblicza się według zależności podanej w punkcie 6.3.3 niniejszego przewodnika. Informacje na temat wyboczenia można znaleźć w punkcie 6.3.4 niniejszego przewodnika.

5.2.4 Nośność przy zginaniu

Kryterium nośności przy zginaniu oblicza się z zależności:

$$\Gamma_M = M_{Ed} / M_{c,Rd}$$

gdzie:

M_{Ed} to maksymalny moment obliczeniowy wzdłuż belki,

$M_{c,Rd}$ to obliczeniowa nośność przy zginaniu uzależniona od klasy przekroju:

$$M_{c,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0} \text{ dla klasy 1 lub 2,}$$

$$M_{c,Rd} = W_{el,y} f_y / \gamma_{M0} \text{ dla klasy 3,}$$

$$M_{c,Rd} = W_{eff,y} f_y / \gamma_{M0} \text{ dla klasy 4.}$$

5.2.5 Wzajemne oddziaływanie momentu zginającego i siły ścinającej (M-V)

Jeśli wartość smukłości środnika h_w/t_w przekracza $72\varepsilon/\eta$, wówczas, jak podano w punkcie 6.3.4 powyżej, obliczone zostaje kryterium wyboczenia Γ_{bw} zgodnie z instrukcjami podanymi w punkcie 5.2.3. Jeśli wartość tego kryterium przekracza 0,5 oraz gdy wartość momentu zginającego jest większa od nośności przy zginaniu pasów, wówczas należy uwzględnić wzajemne oddziaływanie M-V. Kryterium wzajemnego oddziaływania oblicza się z następującej zależności (EN 1993-1-5 § 7.1(1)):

$$\Gamma_{MV} = \bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(2\bar{\eta}_3 - 1\right)^2 \quad \text{jeśli } M_{Ed} > M_{f,Rd}$$

gdzie:

$$\bar{\eta}_1 = M_{Ed} / M_{pl,Rd}$$

$$\bar{\eta}_3 = \Gamma_{bw}$$

$$M_{pl,Rd} = W_{pl,y} f_y / \gamma_{M0}$$

$$M_{f,Rd} = b t_f (h - t_f) f_y / \gamma_{M0}$$

Jeśli nie ma konieczności uwzględniania wyboczenia, a wartość kryterium ścinania Γ_V jest większa niż 0,5, wówczas należy sprawdzić wzajemne oddziaływanie M-V przy użyciu następującego kryterium (EN 1993-1-1 § 6.2.8):

$$\Gamma_{MV} = \frac{M_{Ed}}{M_{V,Rd}}$$

gdzie:

$$M_{V,Rd} = \left(W_{pl,y} - \frac{\rho A_w^2}{4t_w} \right) f_y / \gamma_{M0}$$

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

$$A_w = (h - 2 t_f) t_w$$

5.2.6 Nośność przy zwichrzeniu

Kryterium obliczeniowe

Jeśli przyjmuje się, że belka jest w pełni podparta bocznie, wówczas analiza zwichrzenia nie jest wykonywana. Natomiast jeśli belka zamocowana jest jedynie na podporach, kryterium zwichrzenia (LTB) oblicza się z następującej zależności:

$$\Gamma_{LT} = M_{Ed} / M_{b,Rd}$$

gdzie:

M_{Ed} to maksymalny moment obliczeniowy wzdłuż belki,

$M_{b,Rd}$ to obliczeniowa nośność na zwichrzenie (LTB) wyznaczana na podstawie odpowiedniej krzywej zwichrzenia; smukłość związaną ze zwichrzeniem oblicza się według wzoru podanego poniżej.

Sprężysty moment krytyczny

Sprężysty moment krytyczny wyznacza się z następującego równania:

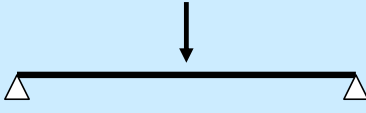
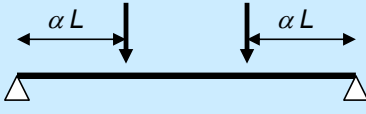
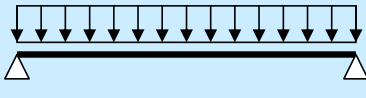
$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{L^2} \left[\sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{GI_t L^2}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right]$$

gdzie:

$z_g = +h/2$ (przyjmuje się, że obciążenie poprzeczne przyłożone jest powyżej górnego pasa).

Wartości współczynników C_1 i C_2 podano w tabeli 5.1.

Tabela 5.1 Współczynniki C_1 i C_2

| Obciążenie | C_1 | C_2 |
|---|---------------------|-----------------------------------|
|  | 1,35 | 0,59 |
|  | $1 + 2,92 \alpha^3$ | $\alpha (2,44 - 3,24 \alpha) C_1$ |
|  | 1,13 | 0,45 |

Smukłość związana ze zwichrzeniem

Smukłość związaną ze zwichrzeniem oblicza się na podstawie zależności:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}$$

gdzie:

$W_y = W_{pl,y}$ dla przekroju poprzecznego klasy 1 lub 2,

$W_y = W_{el,y}$ dla przekroju poprzecznego klasy 3,

$W_y = W_{eff,y}$ dla przekroju poprzecznego klasy 4.

Współczynnik redukcyjny

Współczynnik redukcyjny kształtowników walcowanych oblicza się według normy EN 1993-1-1 § 6.3.2.3:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{ale: } \chi_{LT} \leq 1$$

$$\text{oraz: } \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2}$$

gdzie:

$$\phi_{LT} = 0,5 \left[1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Wartości parametrów $\bar{\lambda}_{LT,0}$ i β można przyjąć z Załącznika krajowego do normy EN 1993-1-1. Wartości zalecane to:

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$$

$$\beta = 0,75$$

α_{LT} to wyznaczany na podstawie krzywej zwichrzenia współczynnik niedoskonałości, który należy uwzględnić w przypadku kształtowników walcowanych na gorąco — według tabeli 6.5 w normie EN 1993-1-1.

Jeśli $h/b_f \leq 2$ krzywa b $\alpha_{LT} = 0,34$.

Jeśli $h/b_f > 2$ krzywa c $\alpha_{LT} = 0,49$.

Wytrzymałość przy zwichrzeniu (LTB)

Wytrzymałość przy zwichrzeniu (LTB) wyraża się zależnością:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT,mod} W_y f_y / \gamma_{M1}$$

gdzie:

$\chi_{LT,mod}$ to zmodyfikowany współczynnik redukcyjny obliczany zgodnie z normą EN 1993-1-1 § 6.3.2.3 (2). Dla uproszczenia można przyjąć, że jest on równy współczynnikowi χ_{LT} .

$$\chi_{LT,mod} = \chi_{LT} / f \quad \text{ale:} \quad \chi_{LT,mod} \leq 1$$

$$\text{oraz:} \quad \chi_{LT,mod} \leq \frac{1}{\lambda_{LT}^2}$$

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c) \left[1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2 \right] \quad \text{ale:} \quad f \leq 1$$

k_c to współczynnik korekcji, który można wyznaczyć z następującej zależności:

$$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_1}}$$

5.3 Obliczenia stanów granicznej użyteczności (SGU)

Na etapie budowy ugięcie można obliczyć przy użyciu wzoru podanego w punkcie 6.5.3 niniejszego przewodnika, w którym moment bezwładności odpowiada momentowi przekroju stalowego.

6 ETAP KOŃCOWY

6.1 Szerokość efektywna płyty

Szerokość efektywną płyty betonowej oblicza się zgodnie z normą EN 1994-1-1 § 5.4.1.2. Poniższe wyrażenia dotyczą jedynie zakresu zastosowań tych specyfikacji.

$$b_e = \text{Min}(L/8; B/2) \quad \text{gdzie: } B = (B_L + B_R) / 2$$

$$\beta = (0,55 + 0,025 L/b_e)$$

Jeśli $\beta > 1,0$ wówczas $\beta = 1,0$

Dla danego przekroju obliczeniowego znajdującego się w punkcie o odciętej x , efektywną szerokość $b_{\text{eff}}(x)$ wyznacza się z następujących zależności:

$$\text{jeśli } x \leq 0,25 L: \quad b_{\text{eff}}(x) = 2 b_e [\beta + 4(1 - \beta) x/L],$$

$$\text{jeśli } x \geq 0,75 L: \quad b_{\text{eff}}(x) = 2 b_e [\beta + 4(1 - \beta) (L - x)/L],$$

w innym przypadku: $b_{\text{eff}}(x) = 2 b_e$.

Należy zauważyć, że poprzez uproszczenie wykonane zgodnie z zaleceniem normy EN 1994-1-1 § 5.4.1.2(9) przy wyznaczeniu efektywnej szerokości płyty odległość b_0 pomiędzy 2 rzędami łączników przyjmuje wartość 0.

6.2 Połączenie ścinane

6.2.1 Wytrzymałość sworzni z łbem

Wytrzymałość obliczeniowa

Zgodnie z normą EN 1994-1-1 § 6.6.3.1 przyjmuje się, że nośność obliczeniowa sworzni z łbem to mniejsza spośród wartości wyliczonych na podstawie dwóch poniższych wyrażeń:

$$P_{\text{Rd}} = \frac{0,8 f_{u,\text{sc}} \pi d^2 / 4}{\gamma_V}$$

$$P_{\text{Rd}} = \frac{0,29 \alpha d^2 \sqrt{f_{\text{ck}} E_{\text{cm}}}}{\gamma_V}$$

gdzie:

$$\alpha = 0,2 \left(\frac{h_{\text{sc}}}{d} + 1 \right) \quad \text{dla } 3 \leq h_{\text{sc}}/d \leq 4$$

$$\alpha = 1,0 \quad \text{dla } h_{\text{sc}}/d > 4$$

$f_{u,\text{sc}}$ to wytrzymałość materiału sworzni na rozciąganie. Maksymalna wartość tego parametru to 500 N/mm².

Arkusz stalowej blachy ułożony równoległe do osi belki

Jeśli blacha jest ułożona tak, że występy są równoległe do osi belki, do nośności obliczeniowej sworzni z łbem odnosi się współczynnik k_ℓ . Jego wartość uzależniona jest od odległości b_0 wyznaczonej z poniższych zależności:

$$\text{jeśli } b_r > b_b: \quad b_0 = (b_r + b_b)/2$$

$$\text{w innym przypadku: } b_0 = b_r$$

$$k_\ell = 0,6 \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right)$$

Maksymalna wartość parametru h_{sc} wynosi $h_p + 75$ mm.

Maksymalna wartość współczynnika k_ℓ wynosi 1,0.

Arkusz stalowej blachy ułożony prostopadłe do osi belki

Jeśli blacha jest ułożona tak, że występy są prostopadłe do osi belki, do nośności obliczeniowej sworzni z łbem odnosi się współczynnik k_t :

$$k_t = \frac{0,7}{\sqrt{n_r}} \frac{b_0}{h_p} \left(\frac{h_{sc}}{h_p} - 1 \right)$$

gdzie:

b_0 zdefiniowano w punkcie 6.1.3,

n_r to ilość łączników na jednym występie w przekroju belki, która nie może podczas obliczeń przekroczyć wartości 2.

Wartość współczynnika redukcyjnego k_t nie powinna przekraczać maksymalnych wartości podanych w tabeli 6.1 (EN 1994-1-1 tabela 6.2).

Wartości współczynnika redukcyjnego k_t mają zastosowanie, gdy:

$$h_p \leq 85 \text{ mm,}$$

$$b_0 \geq h_p.$$

Tabela 6.1 Maksymalne wartości współczynnika redukcyjnego k_t

| | Średnica | Łączniki przyspawane do arkusza stalowej blachy profilowanej | | | Profilowana blacha stalowa z otworami | | |
|-----------|-------------------------|--|----|----|---------------------------------------|------|----|
| | | 16 | 19 | 22 | 16 | 19 | 22 |
| $n_r = 1$ | $t_p \leq 1 \text{ mm}$ | 0,85 | | | Nie ujęte w EN 1994 | 0,75 | |
| | $t_p > 1 \text{ mm}$ | 1,00 | | | | 0,75 | |
| $n_r = 2$ | $t_p \leq 1 \text{ mm}$ | 0,70 | | | | 0,60 | |
| | $t_p > 1 \text{ mm}$ | 0,80 | | | | 0,60 | |

6.2.2 Stopień połączenia

Stopień połączenia η w danym punkcie obliczeniowym wzdłuż osi belki można obliczyć ze wzoru:

$$\eta = \frac{F_{sc}}{\text{Min}(N_{pl,Rd}; N_{c,Rd})}$$

gdzie:

F_{sc} to obliczeniowa nośność połączenia ścinanego w punkcie obliczeniowym,

$N_{c,Rd}$ to obliczeniowa nośność przy ściskaniu płyty betonowej w punkcie obliczeniowym,

$N_{pl,Rd}$ to obliczeniowa nośność osiowa stali konstrukcyjnej.

Nośność połączenia

Nośność połączenia F_{sc} w danym punkcie obliczeniowym belki wynosi:

$$F_{sc} = \text{Min}(n_{sc,left}; n_{sc,right}) k P_{Rd}$$

gdzie:

$n_{sc,left}$ to liczba łączników pomiędzy lewą podporą a punktem obliczeniowym,

$n_{sc,right}$ to liczba łączników pomiędzy prawą podporą a punktem obliczeniowym,

k = 1 dla płyty płaskiej,
= k_ℓ dla płyty wykonanej z arkusza stalowej blachy profilowanej ułożonej równolegle do osi belki,
= k_t dla płyty wykonanej z arkusza stalowej blachy profilowanej ułożonej prostopadle do osi belki.

Nośność płyty betonowej

Obliczeniowa nośność płyty betonowej w punkcie obliczeniowym zlokalizowanym wzdłuż belki i określonym za pomocą odciętej x wyrażona jest zależnością:

$$N_{c,Rd} = (h_f - h_p) b_{\text{eff}}(x) \times 0,85 f_{cd}$$

W przypadku płyty płaskiej h_p przyjmuje wartość 0.

Nośność stali konstrukcyjnej

Obliczeniowa nośność osiowa stali konstrukcyjnej wyraża się wzorem:

$$N_{pl,Rd} = A f_y / \gamma_{M0}$$

6.2.3 Minimalny stopień połączenia

Minimalny stopień połączenia, η_{\min} , oblicza się zgodnie z normą EN 1994-1-1 § 6.6.1.2 według zależności:

$$\text{jeśli } L \leq 25 \text{ m: } \eta_{\min} = 1 - (355/f_y) (0,75 - 0,03 L)$$

$$\text{ale } \eta_{\min} \geq 0,4$$

w innym przypadku: $\eta_{\min} = 1$

gdzie:

L to rozpiętość przęsła w metrach,

f_y to granica plastyczności w N/mm^2 .

6.2.4 Sprawdzenie stopnia połączenia

Jeśli stopień połączenia w punkcie maksymalnego momentu zginającego jest mniejszy od minimalnego stopnia połączenia ($\eta < \eta_{\min}$), wówczas teoria odkształceń plastycznych nie ma zastosowania (EN 1994-1-1 § 6.1.1(7)). W takim przypadku powinien zostać wyświetlony następujący komunikat: „Niedostateczny stopień połączenia: należy zwiększyć nośność połączenia ścinanego”.

6.3 Nośność przekroju poprzecznego

6.3.1 Ogólne

Dla każdego punktu obliczeniowego zlokalizowanego wzdłuż belki obliczone zostają różne kryteria projektowe. Przez kryterium rozumie się stosunek siły obliczeniowej do odpowiedniej nośności obliczeniowej. W związku z tym wynik sprawdzenia jest zadowalający, jeśli wartość kryterium oznaczonego jako Γ nie przekracza jedności:

$$\Gamma \leq 1,0 \quad \text{Sprawdzenie zakończone pozytywnie}$$

6.3.2 Klasyfikacja przekrojów poprzecznych

Należy pamiętać, że zakres zastosowań niniejszych specyfikacji ogranicza się do projektowania przekroju poprzecznego metodą nośności granicznej. Należy zatem sprawdzić, czy każdy analizowany przekrój jest przekrojem klasy 2 (lub 1).

Klasa przekroju poprzecznego to najwyższa klasa ściskanego pasa (górnego) i środника.

Graniczna wartość smukłości uzależniona jest od parametru materiałowego ε zdefiniowanego w punkcie 3.1 niniejszego przewodnika.

Pierwszym etapem jest określenie położenia $y_{pl,a}$ Osi obojętnej w zakresie odkształceń plastycznych w przekroju kształownika stalowego, mierzonej od dolnej części przekroju. Więcej informacji dotyczących obliczania parametru $y_{pl,a}$ znajduje się w punkcie 6.3.7, gdzie nie uwzględniono wpływu siły ścinającej (tzn. $\rho = 0$ w zależnościach określających parametr $y_{pl,a}$).

Klasa górnego pasa poddanego ścisnaniu

Jeśli $y_{pl,a} > h - t_f$ górny pas kształtownika stalowego nie podlega w całości naprężeniom ścisakającym. W związku z tym nie można go sklasyfikować.

Dla celów klasyfikacji smukłość pasa wynosi: $\lambda_f = 0,5 (b - t_w - 2r)/t_f$

Jeśli $\lambda_f \leq 10 \varepsilon$ pas należy do klasy 2 (lub 1) (EN 1993-1-1 tabela 5.2).

Gdy $\lambda_f > 10 \varepsilon$, aby stwierdzić, że pas należy do klasy 2 (EN 1993-1-1 § 5.5.2(1) oraz § 6.6.5.5), muszą być spełnione następujące wymagania:

- Rozstaw wzdłużny łączników w przypadku płyt płaskich lub płyt z arkuszem stalowej blachy profilowanej ułożonej równolegle do osi belki jest mniejszy niż $22 \varepsilon t_f$.
- Rozstaw wzdłużny łączników w przypadku płyt z arkuszem stalowej blachy profilowanej ułożonej prostopadle do osi belki jest mniejszy niż $15 \varepsilon t_f$.
- Rozstaw wzdłużny łączników jest mniejszy od 6-krotności wysokości płyty ($6 h_f$).
- Rozstaw wzdłużny łączników jest mniejszy niż 800 mm.
- Odległość od krawędzi pasa do najbliższego rzędu łączników nie przekracza $9 \varepsilon t_f$.

Klasa środnika

Jeśli $y_{pl,a} > h - t_f - r$ wówczas środek jest w pełni poddawany rozciąganiu. W związku z tym środek nie można sklasyfikować.

Dla celów klasyfikacji smukłość pasa wynosi: $\lambda_w = (h - 2t_f - 2r)/t_w$

Część ścisakaną środka określa się szacunkowo za pomocą współczynnika α :

$$\alpha = \frac{h - t_f - r - y_{pl,a}}{h - 2t_f - 2r}$$

W tym przypadku wartość współczynnika α powinna być mniejsza od 0,5.

Jeśli $\lambda_w \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ wówczas środek należy do klasy 2 (lub 1).

6.3.3 Nośność przy ścinaniu w płaszczyźnie pionowej

Nośność przekroju przy ścinaniu w płaszczyźnie pionowej oblicza się zgodnie z normą EN 1993-1-1 § 6.2.6. Wpływ płyty betonowej jest pomijany.

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_{v,z} f_y}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

Kryterium to oblicza się z zależności:

$$\Gamma_V = \frac{|V_{Ed}|}{V_{pl,Rd}}$$

6.3.4 Nośność przy wyboczeniu

Gdy wartość smukłości środnika h_w/t_w przekracza $72\varepsilon/\eta$, wówczas nośność przy wyboczeniu $V_{bw,Rd}$ należy obliczyć zgodnie z normą EN 1993-1-5 § 5.2, przyjmując następujące założenia:

- pod uwagę brany jest wyłącznie wpływ środnika,
- słupy końcowe nie są sztywne.

Wówczas nośność obliczeniową przy wyboczeniu wyznacza się z zależności:

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w h_w t_w f_{yw}}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$$

gdzie:

h_w to wysokość środnika: $h_w = h - 2 t_f$,

χ_w to współczynnik redukcyjny dla wyboczenia uzależniony od smukłości środnika $\bar{\lambda}_w$.

Smukłość środnika wynosi:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon_w \sqrt{k_\tau}}$$

gdzie:

$$\varepsilon_w = \sqrt{235 / f_{yw}}$$

$$k_\tau = 5,34$$

Współczynnik redukcyjny χ_w wyliczany jest w sposób następujący:

$$\text{jeśli } \bar{\lambda}_w < 0,83/\eta: \quad \chi_w = \eta$$

$$\text{w innym przypadku } \chi_w = 0,83/\bar{\lambda}_w.$$

Następnie obliczane jest kryterium z zależności:

$$\Gamma_{Vb} = \frac{|V_{Ed}|}{V_{bw,Rd}}$$

6.3.5 Nośność przy zginaniu

Nośność przekroju przy zginaniu M_{Rd} wyliczana jest zgodnie z instrukcjami podanymi w punkcie 6.3.7, przyjmując wartość parametru ρ równą 0 (tzn. bez wpływu siły ścinającej). Kryterium wyznacza się z zależności:

$$\Gamma_M = \frac{|M_{Ed}|}{M_{Rd}}$$

6.3.6 Wzajemne oddziaływanie momentu zginającego i siły ścinającej (M-V)

Jeśli wartość smukłości środnika h_w/t_w przekracza $72\varepsilon/\eta$, wówczas kryterium wyboczenia Γ_{bw} obliczane jest zgodnie z instrukcjami podanymi w punkcie 6.3.4. Jeśli wartość kryterium przekracza 0,5, wówczas należy wziąć pod uwagę wzajemne oddziaływanie M-V. Kryterium wzajemnego oddziaływania wynosi:

$$\Gamma_{MV} = \frac{|M_{Ed}|}{M_{V,Rd}}$$

Nośność przy zginaniu $M_{V,Rd}$ obliczana jest zgodnie z instrukcjami podanymi w punkcie 6.3.7, gdzie parametr ρ wyznaczany jest z zależności:

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{bw,Rd}} - 1 \right)^2$$

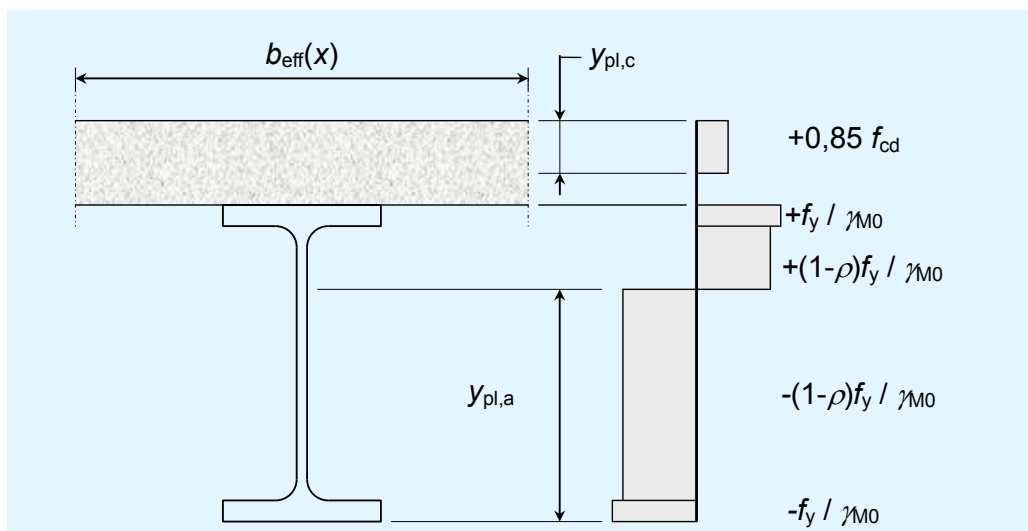
Jeśli wyboczenie nie zostało uwzględnione, parametr $V_{bw,Rd}$ zastąpiony zostaje przez $V_{pl,Rd}$. Jeśli wartość kryterium ścinania Γ_V przekracza 0,5, wówczas należy uwzględnić wzajemne oddziaływanie, a nośność $M_{V,Rd}$ obliczana jest zgodnie z instrukcjami podanymi w punkcie 6.3.7, gdzie parametr ρ wyznacza się z zależności:

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

6.3.7 Ogólna postać równania nośności przy zginaniu

Poniższa procedura umożliwi użytkownikowi obliczenie nośności obliczeniowej przy zginaniu, wraz z redukcją ze względu na występowanie siły ścinającej. Jeśli wpływ siły ścinającej może zostać pominięty, parametr ρ przyjmuje wartość 0.

Rozkład naprężeń w zakresie odkształceń plastycznych przedstawiony został na rysunku 6.1.



Rysunek 6.1 Rozkład naprężeń w zakresie odkształceń plastycznych przy połączeniu częściowym

Wpływ płyty betonowej

Nośność przy zginaniu w każdym punkcie obliczeniowym o odciętej x uzależniona jest od nośności połączenia przy ścinaniu F_{sc} wyznaczanej zgodnie z § 6.2.2. Położenie osi obojętnej przy zginaniu idealnie plastycznym w przypadku płyty wyznacza się z następującego wyrażenia (patrz Rysunek 6.1):

$$y_{pl,c} = \frac{\text{Min}(N_{pl,V,Rd}; F_{sc})}{b_{eff}(x) \times 0,85 f_{cd}}$$

Ale: $y_{pl,c} \leq h_f - h_p$

Dla płyty płaskiej: $h_p = 0$

$N_{pl,V,Rd}$ to nośność plastyczna dla siły osiowej przekroju stalowego pomniejszona o wpływ siły ścinającej:

$$N_{pl,V,Rd} = [A - \rho((h - 2 t_f) t_w + (4 - \pi)r^2)] f_y / \gamma_{M0}$$

Zatem wynikowa siła ściskająca działająca na płytę betonową wynosi:

$$N_c = y_{pl,c} b_{eff}(x) \times 0,85 f_{cd}$$

Odnosi się ona do położenia $y_{pl,c}/2$ od góry płyty.

Położenie osi obojętnej w zakresie odkształceń plastycznych przekroju kształtownika stalowego

Należy wyznaczyć oś obojętną w zakresie odkształceń plastycznych kształtownika stalowego. Może ona znajdować się w jednej z trzech poniższych części przekroju:

1. W środku, jeśli: $N_c \leq N_{pl,1}$
dla: $N_{pl,1} = (h - 2 t_f - 2 c) t_w (1 - \rho) f_y / \gamma_{M0}$

$$y_{pl,a} = \frac{1}{2} \left(h + \frac{N_c}{t_w (1 - \rho) f_y / \gamma_{M0}} \right)$$

2. Na zaokrągleniach, gdy: $N_{pl,1} < N_c \leq N_{pl,2}$
dla: $N_{pl,2} = (A - 2 b t_f) (1 - \rho) f_y / \gamma_{M0}$

$$y_{pl,a} = h - t_f - c + \frac{1}{2} \left\{ \sqrt{t_w^2 - 4 \left[t_w \left(\frac{h}{2} - t_f - c \right) - \frac{N_c}{2(1 - \rho) f_y / \gamma_{M0}} \right]} - t_w \right\}$$

3. W górnym pasie, jeśli: $N_{pl,2} < N_c \leq N_{pl,V,Rd}$

$$y_{pl,a} = h - \frac{N_{pl,V,Rd} - N_c}{2 b f_y / \gamma_{M0}}$$

gdzie:

$$c = r \times \sqrt{2 - \pi} / 2$$

Nośność przy zginaniu plastycznym

W zależności od położenia osi obojętnej w zakresie odkształceń plastycznych nośność przy zginaniu plastycznym określa zależność:

1. W środku:

$$M_{Rd} = \left[(1-\rho)W_{pl,y} + b_f t_f (h-t_f) \rho - \left(\frac{N_c}{t_w (1-\rho) f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \frac{(1-\rho)t_w}{4} \right] \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + M_{slab}$$

2. Na zaokrągleniach:

$$M_{Rd} = \left[(1-\rho)W_{pl,y} + b_f t_f (h-t_f) \rho - \left(\frac{N_c}{t_w (1-\rho) f_y / \gamma_{M0}} \right)^2 \frac{(1-\rho)t_w}{4} \right] \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + M_{slab}$$

3. W górnym pasie:

$$M_{Rd} = (h - y_{pl,a}) b y_{pl,a} \frac{f_y}{\gamma_{M0}} + M_{slab}$$

gdzie:

$$M_{slab} = N_c \left(h_f + \frac{h - y_{pl,c}}{2} \right)$$

6.4 Nośność przy ścinaniu wzdłużnym

6.4.1 Minimalny stopień zbrojenia poprzecznego

Zgodnie z normą EN 1994-1-1 § 6.6.6.3 minimalny stopień zbrojenia poprzecznego można znaleźć w § 9.2.2(5) normy EN 1992-1-1:

$$\rho_{w,min} = \frac{0,08 \sqrt{f_{ck}}}{f_{yr,k}}$$

gdzie:

f_{ck} to wytrzymałość charakterystyczna betonu na ściskanie w N/mm²,

$f_{yr,k}$ to granica plastyczności prętów zbrojeniowych w N/mm².

6.4.2 Obliczenia stopnia zbrojenia poprzecznego

Stopień zbrojenia poprzecznego można wyznaczyć z zależności (EN 1992-1-1 § 6.2.4(4)):

$$\frac{A_{sf} f_{yd}}{s_f} \geq \frac{v_{Ed} h_f}{\cot \theta_f}$$

gdzie:

A_{sf}/s_f to stopień zbrojenia poprzecznego (np. w cm²/m),

f_{yd} to wartość obliczeniowa granicy plastyczności prętów zbrojeniowych:

$$f_{yd} = f_{yr,k} / \gamma_s,$$

θ_f to kąt pomiędzy ściskanymi betonowymi rozporami a rozciąganymi pasami dźwigarów. Może być on zdefiniowany w Załączniku krajowym. Proponowana w tym przypadku wartość to $\theta_f = 45^\circ$.

v_{Ed} to wzdłużne oddziaływanie sił ścinających określone wzorem:

$$v_{Ed} = \frac{\Delta F_d}{h_f \Delta x}$$

ΔF_d to zmienność osiowej siły ściskającej w płycie na odcinku Δx pomiędzy dwoma określonymi przekrojami.

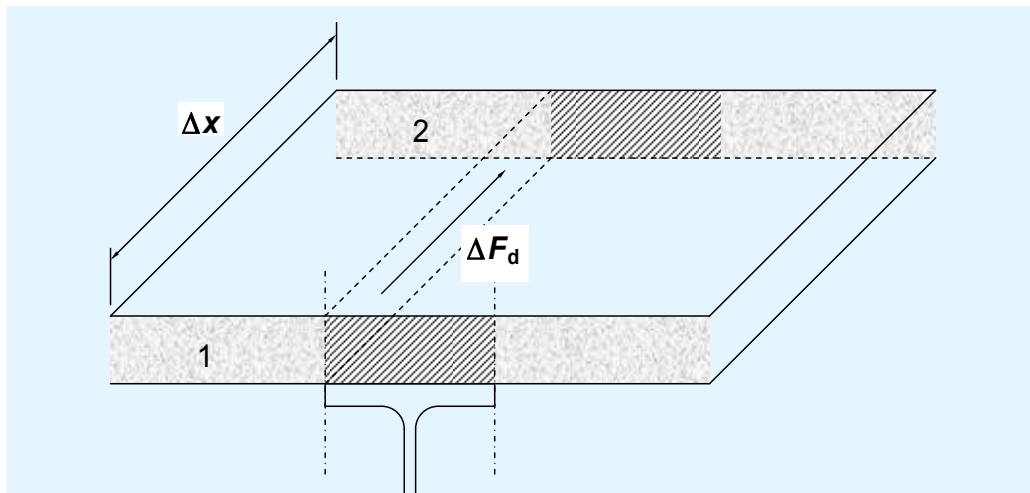
Obliczenia wykonuje się wzdłuż odcinka sąsiadującego z każdym z końców belki. Wówczas:

$$\Delta F_d = (N_c - 0)/2 = N_c/2,$$

N_c oblicza się zgodnie z punktem 6.3.7.

W przypadku obciążeń rozłożonych równomiernie obliczenia przeprowadza się na odcinku pomiędzy przekrojem leżącym w połowie rozpiętości a podporą ($\Delta x = L/2$).

Natomiast w przypadku belki obciążonej punktowo obliczenia należy przeprowadzić wzdłuż odcinka pomiędzy przekrojem obciążonym punktowo a najbliższą podporą.



Rysunek 6.2 Wyznaczenie parametru ΔF_d

6.4.3 Wytrzymałość betonu w miejscu rozpór ściskanych

Kryterium wytrzymałości betonu rozpór ściskanych obliczane jest na podstawie następującej zależności:

$$\Gamma_{vh} = \frac{v_{Ed}}{v f_{cd} \sin \theta_f \cos \theta_f}$$

Kryterium to obliczane jest dla każdego odcinka rozpatrywanego w punkcie 6.4.2, a następnie wybrana zostaje wartość maksymalna.

6.5 Stany graniczne użyteczności

6.5.1 Ogólne

Dla omawianych budynków brak jest ograniczenia naprężeń pod względem stanów granicznych użyteczności. Stany graniczne obejmują:

- ugięcie belki,
- częstotliwość drgań własnych belki wyznaczaną z ugięcia.

6.5.2 Bezwładność belki zespolonej

Ugięcie wyznacza się szacunkowo na podstawie rozpatrywanej kombinacji oddziaływań oraz sztywności belki zespolonej. Wartość sztywności zależy od momentu bezwładności przekroju belki zespolonej wyznaczanego na podstawie stosunku współczynników sprężystości n stali konstrukcyjnej i betonu.

Jak podano w normie EN 1994-1-1 § 5.4.2.2(11) ugięcie w budynkach poddanych zarówno oddziaływaniom stałym, jak i zmiennym obliczane jest z zależności:

$$n = 2 E_a / E_{cm}$$

Aby oszacować częstotliwość drgań własnych, należy obliczyć ugięcie za pomocą krótkookresowego stosunku współczynników sprężystości stali i betonu:

$$n = E_a / E_{cm}$$

Położenie osi obojętnej w zakresie odkształceń sprężystych obliczane jest z zależności:

$$y_{el} = \frac{Ah/2 + b_{eff}(h_f - h_p)[h + (h_f + h_p)/2]/n}{A + b_{eff}(h_f - h_p)/n}$$

Moment bezwładności przekroju belki zespolonej wyznacza się ze wzoru:

$$I_{eq} = I_y + \frac{b_{eff}(h_f - h_p)^3}{12 \times n} + A(y_{el} - h/2)^2 + \frac{b_{eff}(h_f - h_p)}{n} [h + (h_f + h_p)/2 - y_{el}]^2$$

Należy zwrócić uwagę, że:

b_{eff} to szerokość efektywna w połowie rozpiętości.

W przypadku płyt płaskich parametr $h_p = 0$.

6.5.3 Ugięcia

Ogólne

Ugięcie można obliczyć w różnych kluczowych punktach zlokalizowanych wzdłuż belki dla każdej rozpatrywanej kombinacji oddziaływań. Następnie może zostać wyznaczona wartość maksymalna.

W zależności od wymagań podanych w Załączniku krajowym ugięcie należy obliczyć dla każdego przypadku obciążenia zmiennego, Q_1 i Q_2 , oraz dla każdego — zarówno charakterystycznej, jak i częstej — kombinacji oddziaływań SGU.

W przypadku belki w pełni podpartej na etapie budowy obliczone zostaje ugięcie pod ciężarem własnym (kształtownika stalowego i betonu) z uwzględnieniem oddziaływań na konstrukcję zespoloną. Natomiast w przypadku belki niepodpartej ugięcie to obliczane jest bez uwzględnienia udziału płyty betonowej. W takim przypadku brany jest pod uwagę moment bezwładności przekroju kształtownika stalowego $I_{eq} = I_y$.

Ugięcie pod wpływem obciążenia równomiernego

Ugięcie w dla odciętej x pod wpływem równomiernie rozłożonego obciążenia oznaczonego jako Q oblicza się z zależności:

$$w(x) = \frac{QL^3}{24EI_{eq}} \left[\frac{x}{L} - 2\left(\frac{x}{L}\right)^3 + \left(\frac{x}{L}\right)^4 \right]$$

Ugięcie pod wpływem obciążenia skupionego

Ugięcie w w przekroju dla odciętej x pod wpływem obciążenia skupionego oznaczonego jako F przyłożonego w miejscu x_F oblicza się z zależności (patrz Rysunek 4.1):

$$w(x) = \frac{F}{6EI_{eq}L} \left[L^2 - (L - x_F)^2 - x^2 \right] (L - x_F)x \quad \text{jeśli } x < x_F,$$

$$w(x) = \frac{F}{6EI_{eq}L} \left[L^2 - (L - x)^2 - x_F^2 \right] (L - x)x_F \quad \text{jeśli } x > x_F.$$

6.5.4 Drgania

Częstotliwość drgań własnych (w Hz) belki zespolonej można oszacować na podstawie poniższych równań:

$$f = \frac{18,07}{\sqrt{w}} \quad \text{w przypadku obciążenia rozłożonego równomiernie,}$$

$$f = \frac{15,81}{\sqrt{w}} \quad \text{w przypadku obciążenia skupionego w połowie rozpiętości,}$$

gdzie:

- w to ugięcie w milimetrach obliczone dla krótkookresowego stosunku współczynników sprężystości stali i betonu dla kombinacji oddziaływań obejmującej jedynie część obciążenia użytkowego. W zależności od wymagań Załącznika krajowego może to być zarówno kombinacja charakterystyczna, jak i częsta.

7 WYKAZ GŁÓWNYCH DANYCH WYJŚCIOWYCH

Poniższy wykaz stanowi podsumowanie głównych wyników obliczeń:

Na etapie budowy:

- Maksymalny moment zginający oraz jego położenie na osi wzdłużnej belki
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy zginaniu ($\Gamma_{M,max}$)
- Maksymalna wartość pionowej siły ścinającej oraz jej położenie na osi wzdłużnej belki
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy ścinaniu pionowym ($\Gamma_{V,max}$)
- W razie konieczności maksymalna wartość kryterium nośności przy wyboczeniu ($\Gamma_{Vb,max}$)
- Kryterium nośności przy zwichrzeniu (Γ_{LT})
- Maksymalne ugięcie pod wpływem ciężaru własnego belki oraz ciężaru betonu
- Maksymalne ugięcie pod wpływem obciążeń konstrukcyjnych

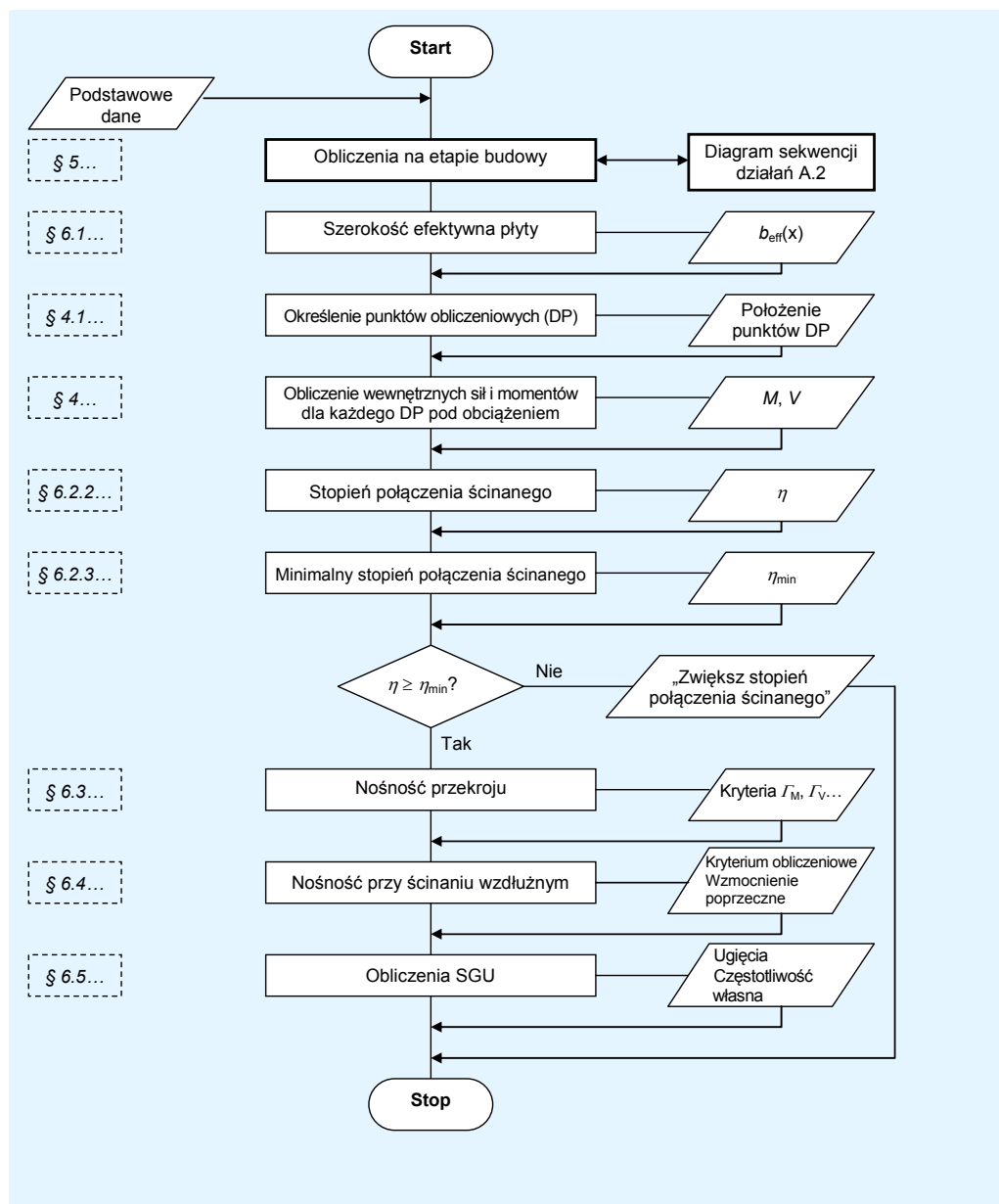
Na etapie końcowym:

- Szerokość efektywna płyty betonowej
- Nośność sworzni z łbem przy ścinaniu
- Maksymalny moment zginający oraz jego położenie na osi wzdłużnej belki
- Maksymalna wartość pionowej siły ścinającej oraz jej położenie na osi wzdłużnej belki
- Stopień połączenia
- Minimalny stopień połączenia
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy ścinaniu pionowym ($\Gamma_{V,max}$)
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy wyboczeniu ($\Gamma_{Vb,max}$)
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy zginaniu ($\Gamma_{M,max}$)
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy zginaniu pomniejszona o wpływ pionowej siły ścinającej ($\Gamma_{MV,max}$)
- Maksymalna wartość kryterium nośności przy ścinaniu pionowym w płycie betonowej ($\Gamma_{Vh,max}$)
- Stopień zbrojenia poprzecznego
- Maksymalne ugięcie pod wpływem każdej kombinacji obciążeń zmiennych Q_1 i Q_2
- Maksymalne ugięcie pod wpływem każdej kombinacji SGU
- Częstotliwość drgań własnych dla każdej kombinacji SGU

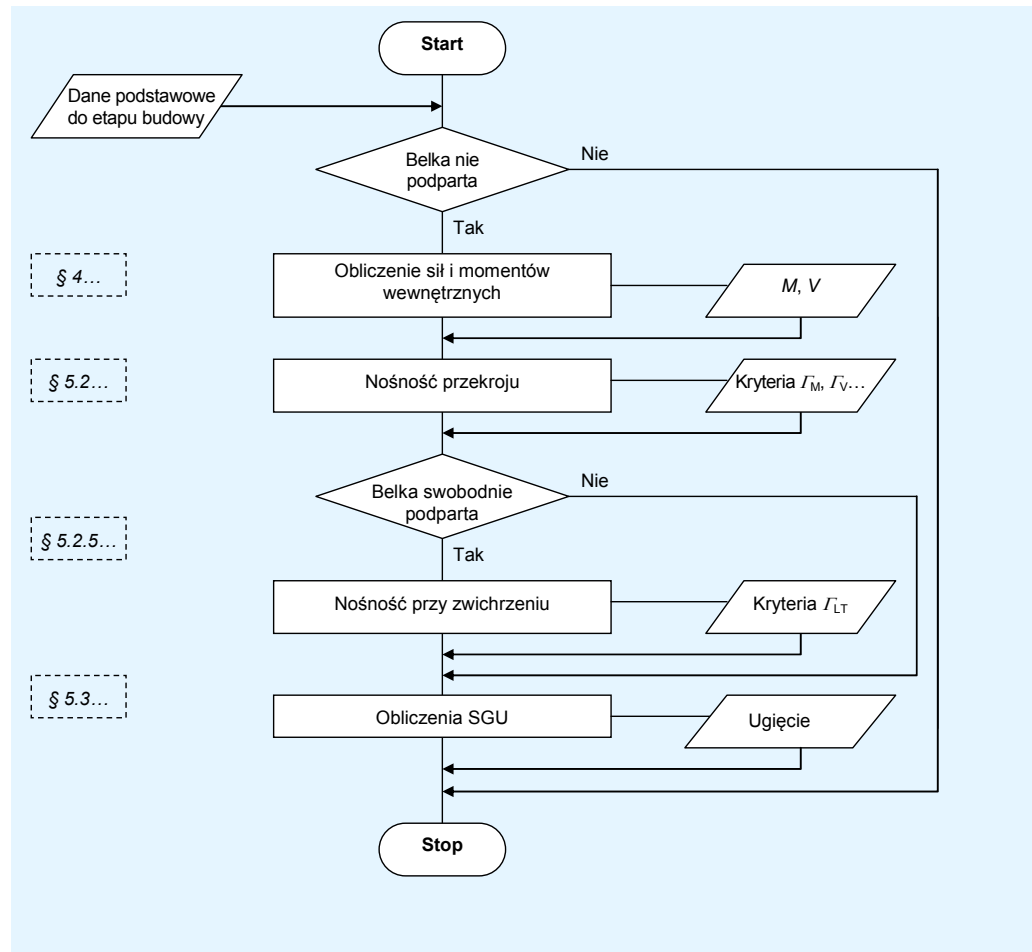
LITERATURA

- 1 EN 1994-1-1:2004 Eurokod 4 Projektowanie konstrukcji zespolonych stalowo-betonowych. Reguły ogólne i reguły dla budynków.
- 2 EN 1990:2002 Eurokod Podstawy projektowania konstrukcji.
- 3 EN 1993-1-1:2005 Eurokod 3 Projektowanie konstrukcji stalowych. Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków
- 4 EN 1992-1-1:2004 Eurokod 2 Projektowanie konstrukcji z betonu. Reguły ogólne i reguły dla budynków.

ZAŁĄCZNIK A OGÓLNY SCHEMAT BLOKOWY



Rysunek A.1 Ogólny schemat blokowy obliczeń



Rysunek A.2 Obliczenia na etapie budowy