

Dr inż. Grzegorz Wandzik

# **KONSTRUKCJE BETONOWE**

**STANY GRANICZNE NOŚNOŚCI**

**ALGORYTMY DO**

**WYMIAROWANIA / SPRAWDZANIA NOŚNOŚCI  
PRZEKROJÓW MIMOŚRODOWO ŚCISKANYCH**

materiały pomocnicze dla studentów



## WYMIAROWANIE I SPRAWDZANIE NOŚNOŚCI ELEMENTÓW MIMOŚRODOWO ŚCISKANYCH (PODSTAWOWE PRZYPADKI)

Wyróżnia się **dwa podstawowe** przypadki:

(A) Przypadek **dużego mimośrod**: zachodzący przy stosunkowo dużym momencie zginającym i niewielkiej sile osiowej.

Wyczerpanie nośności następuje na skutek osiągnięcia przez stal strefy rozciąganej granicy plastyczności przy rozciąganiu – przypadek zachodzi gdy  $\xi_{eff} \leq \xi_{eff,lim}$ .

(B) Przypadek **małego mimośrod**: zachodzący przy stosunkowo małym momencie zginającym i dużej sile osiowej.

Wyczerpanie nośności rozpoczyna się od strefy ściskanej betonu (osiągnięta zostaje wytrzymałość betonu na ściskanie oraz wytrzymałość na ściskanie stali przy krawędzi bardziej ściskanej) – przypadek zachodzi gdy  $\xi_{eff} > \xi_{eff,lim}$ .

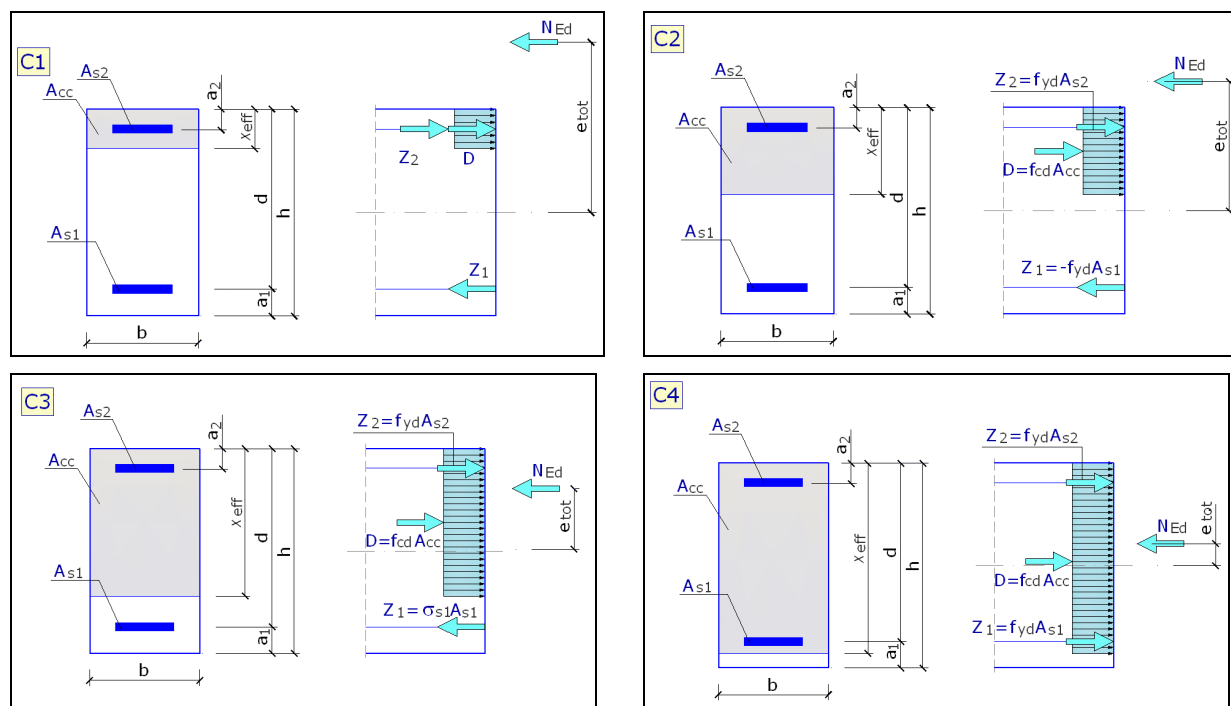
**4 możliwe sytuacje obliczeniowe** (4 układy po 2 równania) – o zastosowaniu wybranego układu równań decyduje wartość  $x_{eff}$ :

**C2**: typowy przypadek ściskania na dużym mimośrodku  $x_{eff,min} < x_{eff} \leq x_{eff,lim}$ ,

**C1**: przypadek szczególny ściskania na dużym mimośrodku, gdy obliczeniowo wyznaczona wysokość strefy ściskanej betonu  $x_{eff} \leq x_{eff,min}$  - można założyć, że wypadkowa siła ściskająca  $C = D + Z_2$  położona jest w odległości  $a_2$  od krawędzi,

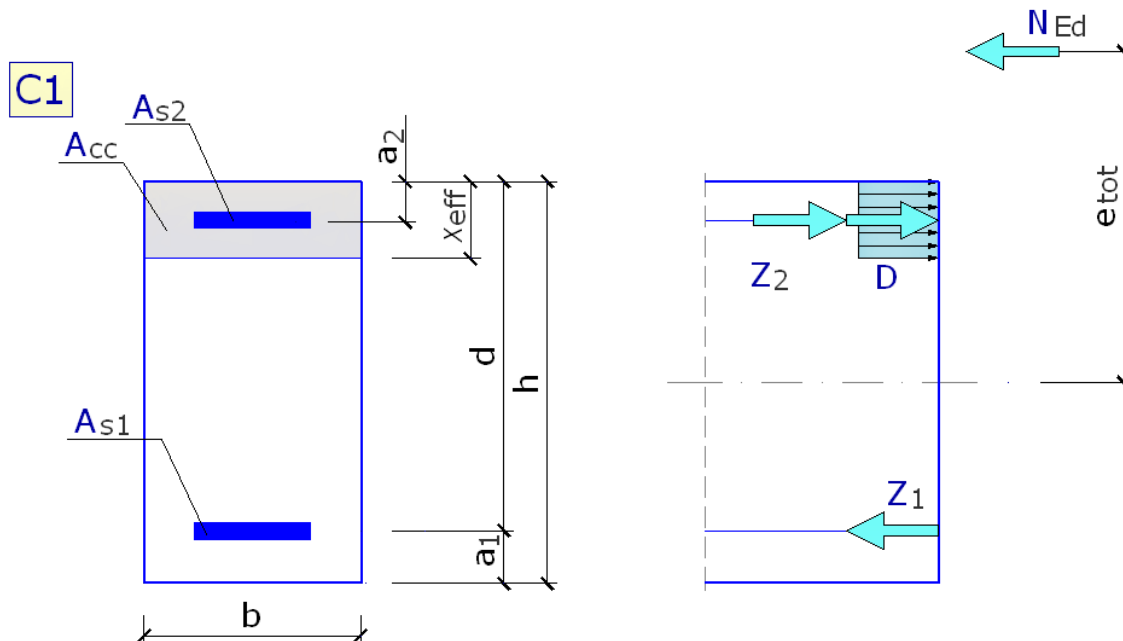
**C3**: typowy przypadek ściskania na małym mimośrodku - nie jest w pełni wykorzystane zbrojenie „rozciągane” (mniej ściskane):  $x_{eff,lim} < x_{eff} \leq d$ ,

**C4**: przypadek szczególny ściskania na małym mimośrodku (prawie cały przekrój jest ściskany) – w dolnym i górnym zbrojeniu występują naprężenia ściskające równe granicy plastyczności  $d < x_{eff} \leq h$ .



## ŚCISKANIE: WARUNKI RÓWNOWAGI – SYTUACJA C1

warunek: ściskanie na dużym mimośrodku – przypadek szczególny,  
typ zniszczenia: na skutek rozciągania,



**wysokość strefy ściskanej betonu:**

$$x_{eff} = x_{eff,min} \approx 2 \cdot a_2 \text{ (dla stali o } f_{yk} = 500 \text{ MPa; } f_{yd} = 435 \text{ MPa; } \epsilon_{yd} = 2,17\text{‰})}$$

**naprężenia w betonie:**

$$\sigma_c \leq f_{cd} \quad (\text{nie ma potrzeby wyznaczania wartości naprężeń w betonie})$$

**naprężenia w zbrojeniu:**

$$A_{s1}: \sigma_{s1} = -f_{yd} \quad A_{s2}: \sigma_{s2} < +f_{yd}$$

**siła wypadkowa w betonie i stali  $A_{s2}$  (położona w odległości  $a_2$  od krawędzi):**

$$C = D + Z_2 = \sigma_c \cdot b \cdot 2a_2 + \sigma_{s2} \cdot A_{s2}$$

$$Z_1 = -f_{yd} \cdot A_{s1}$$

suma sił  $D$  i  $Z_2$  występuje w równaniach jako wypadkowa o wartości:  $C = N_{Ed} - Z_1$

**niewiadome:**

$$\text{nośność:} \quad C = D + Z_2$$

$$N_{Ed} \cdot e_2 \text{ (SGN),}$$

$$\text{wymiarowanie:} \quad C = D + Z_2$$

$$A_{s1} \text{ (} A_{s2} = A_{s,min} \text{).}$$

**warunki równowagi:**

$$\begin{cases} \sum X = 0 \Rightarrow N = C - f_{yd} \cdot A_{s1} \\ \sum M_2 = 0 \Rightarrow N \cdot e_2 = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (d - a_2) \end{cases} \quad [1]$$

**uwagi:**

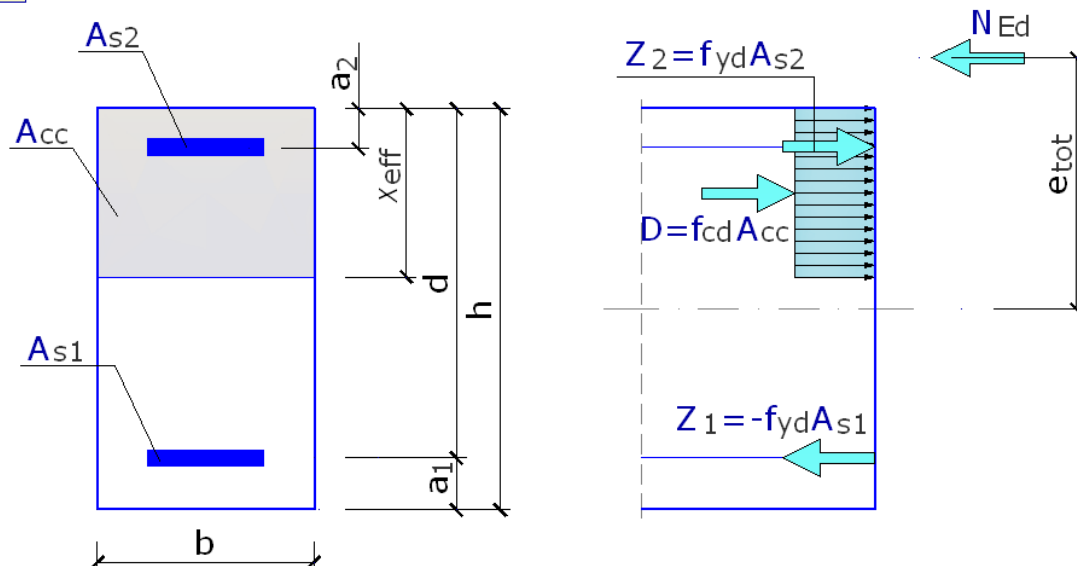
Sytuacja **C1** jest przypadkiem szczególnym ściskania na dużym mimośrodku (przypadek **C2**). Równania równowagi [1] są wykorzystywane, gdy w przypadku **C2** ([2])  $x_{eff} < x_{eff,min} = 2a_2$ .

Jedynie drugi z warunków równowagi [1] jest wykorzystywany (zarówno do obliczenia potrzebnego zbrojenia  $A_{s1}$  (przy wymiarowaniu), jak i do określenia nośności  $N \cdot e_2$  (przy sprawdzaniu nośności)).

**ŚCISKANIE: WARUNKI RÓWNOWAGI – SYTUACJA C2**

warunek: ściskanie na dużym mimośrodku – przypadek typowy,

typ zniszczenia: na skutek rozciągania,

**C2****wysokość strefy ściskanej betonu:**

$$x_{eff,min} \approx 2a_2 < x_{eff} \leq x_{eff,lim}$$

gdzie:  $x_{eff,min} = 0,8 \cdot \epsilon_{cu} / (\epsilon_{cu} - \epsilon_{yd}) \cdot a_2 \approx 2a_2$  (dla stali o  $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ ;  $\epsilon_{yd} = 2,17\%$ )**naprężenia w betonie:**

$$\sigma_c = f_{cd}$$

**naprężenia w zbrojeniu:**

$$A_{s1}: \sigma_{s1} = -f_{yd}$$

$$A_{s2}: \sigma_{s2} = +f_{yd}$$

**siły wypadkowe w betonie i stali:**

$$D = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff}$$

$$Z_2 = f_{yd} \cdot A_{s2}$$

$$Z_1 = -f_{yd} \cdot A_{s1}$$

**niewiadome:**

nośność:

 $x_{eff}$  $N_{Ed} \cdot e_1$  (SGN),

wymiarowanie:

 $A_{s2}(x_{eff})$  $A_{s1}$ **warunki równowagi:**

$$\begin{cases} \sum X = 0 \Rightarrow N = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} - f_{yd} \cdot A_{s1} \\ \sum M_1 = 0 \Rightarrow N \cdot e_1 = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2) \end{cases} \quad [2]$$

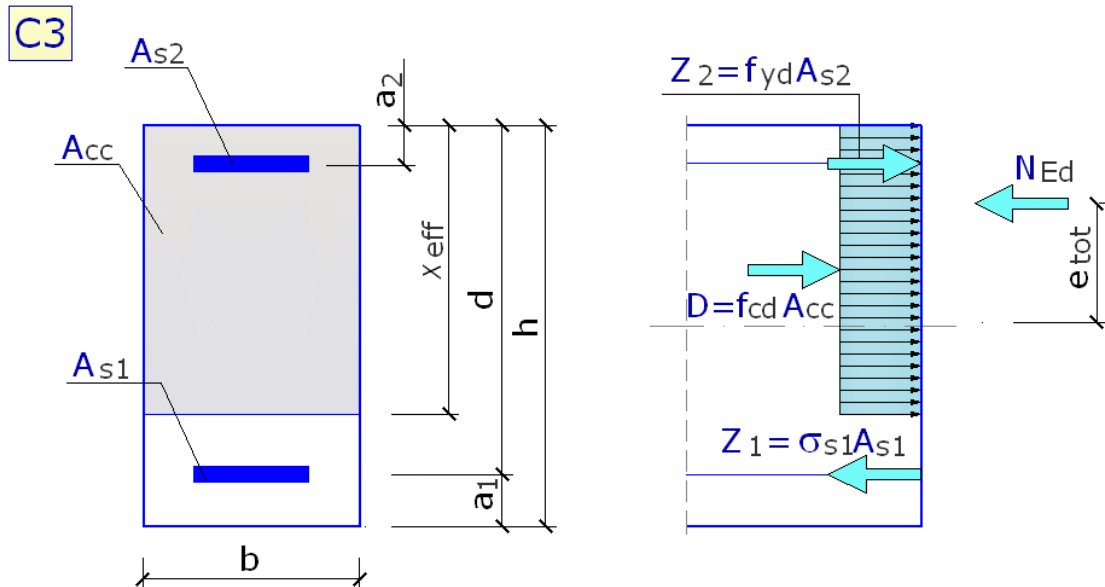
**uwagi:**

Sytuacja **C2** jest przypadkiem podstawowym ściskania na dużym mimośrodku, występującym dla  $x_{eff} \in (2a_2, x_{eff,lim})$ . Opisuje ona stan równowagi (stan naprężeń) przy zniszczeniu wynikającym z przekroczenia naprężeń rozciągających.

W typowych algorytmach wymiarowania i sprawdzania nośności układ równań [2] wykorzystywany jest zwykle w pierwszym kroku.

## ŚCISKANIE: WARUNKI RÓWNOWAGI – SYTUACJA C3

warunek: ściskanie na małym mimośrodku – przypadek typowy,  
typ zniszczenia: na skutek ściskania,



**wysokość strefy ściskanej betonu:**

$$x_{eff,lim} < x_{eff} \leq d$$

**naprężenia w betonie:**

$$\sigma_c = f_{cd}$$

**naprężenia w zbrojeniu:**

$$A_{s1}: -f_{yd} \leq \sigma_{s1} = \kappa_{s1} \cdot f_{yd} \leq +f_{yd}$$

$$A_{s2}: \sigma_{s2} = +f_{yd}$$

$$\text{gdzie: } \kappa_{s1} = -\frac{2(1-\xi_{eff})}{(1-\xi_{eff,lim})} + 1$$

**siły wypadkowe w betonie i stali:**

$$D = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff}$$

$$Z_2 = f_{yd} \cdot A_{s2}$$

$$Z_1 = \kappa_{s1} \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}$$

**niewiadome:**

nośność:  $x_{eff}$

wymiarowanie:  $x_{eff}$

$$N_{Ed} \cdot e_1 \text{ (SGN),}$$

$$A_{s2} \text{ (} A_{s1} = A_{s1,min} \text{)}$$

**warunki równowagi:**

$$\begin{cases} \sum X = 0 \Rightarrow N = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} + \kappa_{s1} \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} \\ \sum M_1 = 0 \Rightarrow N \cdot e_1 = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2) \end{cases} \quad [3]$$

**uwagi:**

Sytuacja **C3** jest przypadkiem podstawowym ściskania na małym mimośrodku, występującym dla  $x_{eff} \in (x_{eff,lim}, d >)$ . Opisuje ona stan równowagi (stan naprężeń) przy zniszczeniu wynikającym z przekroczenia naprężeń ściskających. (siła wypadkowa  $N_{Ed}$  jest położona pomiędzy środkami ciężkości stref ściskanej i rozciąganej).

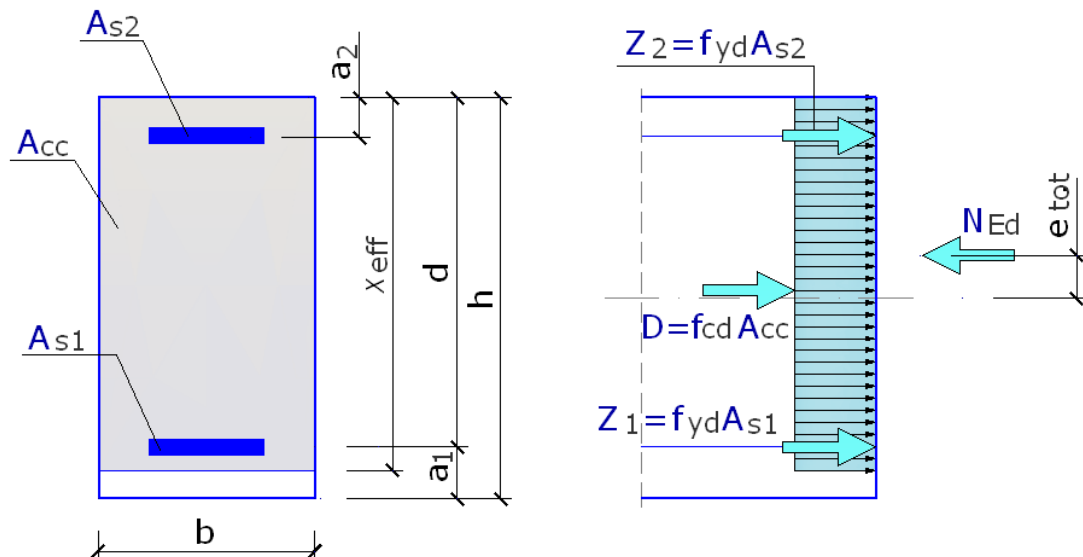
Warunki równowagi [3] są zwykle wykorzystywane w drugim kroku obliczeń (gdy  $x_{eff}$  obliczone z równań dla sytuacji **C2** [2] jest większe niż  $x_{eff,lim}$ ).

**ŚCISKANIE: WARUNKI RÓWNOWAGI – SYTUACJA C4**

warunek: ściskanie na małym mimośrodku – przypadek szczególny,

typ zniszczenia: na skutek ściskania,

**C4**



**wysokość strefy ściskanej betonu:**

$$d < x_{eff} \leq h$$

**naprężenia w betonie:**

$$\sigma_c = f_{cd}$$

**naprężenia w zbrojeniu:**

$$A_{s1}: \sigma_{s1} = + f_{yd} \quad A_{s2}: \sigma_{s2} = + f_{yd}$$

**siły wypadkowe w betonie i stali:**

$$D = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \quad Z_2 = f_{yd} \cdot A_{s2} \quad Z_1 = f_{yd} \cdot A_{s1}$$

**niewiadome:**

nośność:	$x_{eff}$	$N_{Ed} \cdot e_1$ (SGN),
wymiarowanie:	$x_{eff}$	$A_{s2}$ ( $A_{s1} = A_{s1,min}$ )

**warunki równowagi:**

$$\begin{cases} \sum X = 0 \Rightarrow N = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2} + f_{yd} \cdot A_{s1} \\ \sum M_1 = 0 \Rightarrow N \cdot e_1 = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2) \end{cases} \quad [4]$$

**uwagi:**

Sytuacja **C4** jest przypadkiem szczególnym ściskania na małym mimośrodku, występującym dla  $x_{eff} \in (d, h)$ . Opisuje ona stan równowagi (stan naprężeń) przy zniszczeniu wynikającym z przekroczenia naprężeń ściskających.

Warunki równowagi [4] są zwykle wykorzystywane w trzecim kroku obliczeń (gdy  $x_{eff}$  obliczone z równań dla sytuacji **C3** [3] jest większe niż wysokość użyteczna przekroju  $d$ ).

## SPRAWDZANIE NOŚNOŚCI MIMOŚRODOWO ŚCISKANEGO PRZEKROJU PROSTOKĄTNEGO – METODA UPROSZCZONA

Obliczenia prowadzone są metodą „prób i błędów”, w celu znalezienia który z czterech układów równań będzie obowiązywał w momencie osiągnięcia nośności. Kontrola następuje poprzez sprawdzenie wartości  $x_{eff}$ .

### ALGORYTM

1. Obliczenia prowadzi się dla rzeczywistego pola powierzchni przekroju zbrojenia  $A_{s1}$  i  $A_{s2}$  oraz jego rzeczywistego położenia ( $a_1$  i  $a_2$ ) – obliczamy:  
 $d = h - a_1$  [5]

2. Dla znanego zbrojenia określa się rzeczywisty mimośród siły osiowej względem środka ciężkości przekroju betonowego  $e_{tot}$  (wpływ efektów II rzędu w elementach smukłych) oraz związane z nim mimośrody siły względem zbrojenia.  
 $e_{tot} = \eta \cdot (e_e + e_a)$  oraz  $[e_1 = e_{tot} + 0,5h - a_1; \quad e_2 = e_{tot} - 0,5h + a_2]$  [6]

3. Założenie przypadku **C2** i z równania ([2].1: **C2** równanie 1) obliczenie  $x_{eff}$

$$x_{eff} = \frac{N_{Ed} - f_{yd} \cdot A_{s2} + f_{yd} \cdot A_{s1}}{f_{cd} \cdot b} \quad [7]$$

3a. Gdy  $x_{eff} < 2a_2$  to zachodzi **C1** ( $x_{eff} = 2a_2$ ) – strefa ściskana z dużym nadmiarem może zrównoważyć siłę rozciągającą ( $f_{yd} \cdot A_{s1}$ ) (np. duże  $A_{s2}$ ). Środek ciężkości strefy ściskanej zakłada się w odległości  $a_2$  od krawędzi ściskanej.

**K**  $N_{Ed} \cdot e_2 \leq M_{Rd2} = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (d - a_2)$  [8]

3b. Gdy  $2 \cdot a_2 < x_{eff} \leq x_{eff,lim}$ , to  $x_{eff}$  ze wzoru [7] jest poprawne – zachodzi **C2**

**K**  $N_{Ed} \cdot e_1 \leq M_{Rd1} = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2)$  [9]

3c. Gdy obliczone ze wzoru [7]  $x_{eff} > x_{eff,lim}$  to zachodzi **C3** lub **C4** – należy od nowa obliczyć  $x_{eff}$

4. Założenie **C3** i obliczenie z równania [3].1 wielkości  $x_{eff}$

$$x_{eff} = d \cdot \frac{(N_{Ed} - f_{yd} \cdot A_{s2} - f_{yd} \cdot A_{s1}) \cdot (1 - \xi_{eff,lim}) + 2 \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}}{f_{cd} \cdot b \cdot d \cdot (1 - \xi_{eff,lim}) + 2 \cdot f_{yd} \cdot A_{s1}} \quad [10]$$

4a. Gdy  $x_{eff}$  obliczone ze wzoru [10] jest:  $x_{eff,lim} < x_{eff} \leq d$  to zachodzi **C3**

**K**  $N_{Ed} \cdot e_1 \leq M_{Rd1} = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2)$  [11]

4b. Gdy obliczone ze wzoru [10]  $x_{eff} > d$  to zachodzi **C4**

5. Obliczenie dla **C4** wielkości  $x_{eff}$  z równania [4].1

$$x_{eff} = \frac{(N_{Ed} - f_{yd} \cdot A_{s2} - f_{yd} \cdot A_{s1})}{f_{cd} \cdot b} \quad [12]$$

5a. Gdy  $x_{eff}$  obliczone ze wzoru [12] jest:  $d < x_{eff} \leq h$  to zachodzi **C4**

**K**  $N_{Ed} \cdot e_1 \leq M_{Rd1} = f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff}) + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2)$  [13]

5b. Gdy obliczone ze wzoru [12]  $x_{eff} > h$  lub nie jest spełniony któryś z warunków nośności to przekrój nie spełnia warunku SGN. Należy dozbroić strefę ściskaną (dla  $x_{eff} > x_{eff,lim}$ ) lub rozciąganą (dla  $x_{eff} \leq x_{eff,lim}$ ) i ponownie wykonać sprawdzenie nośności (rozpoczynając od punktu 3) W rzeczywistości, w przypadku elementów smukłych spadnie wartość momentu  $N_{Ed} \cdot e_1$  (ze względu na wzrost sztywności słupa).



## WYMIAROWANIE ZBROJENIA MIMOŚRODOWO ŚCISKANEGO PRZEKROJU PROSTOKĄTNEGO – METODA UPROSZCZONA (1)

Wymiarowanie prowadzone jest metodą „prób i błędów”, w celu znalezienia który z czterech układów równań C1-C4 będzie właściwy w momencie osiągnięcia nośności. Kontrola następuje poprzez sprawdzenie wartości  $x_{eff}$ .

### ALGORYTM

1. Określenie fizycznej długości słupa ( $l_{col}$ ), współczynnika wyboczeniowego ( $\beta$ ) oraz długości efektywnej (wyboczeniowej)
 
$$l_0 = \beta \cdot l_{col} \quad [14]$$
2. Założenie wymiarów przekroju poprzecznego elementu (zależą one od długości efektywnej słupa oraz panujących w nim sił wewnętrznych)
3. Założenie położenia środków ciężkości zbrojenia ( $a_1$  i  $a_2$ ) oraz obliczenie na tej podstawie użytecznej wysokości przekroju  $d$ .
 
$$d = h - a_1 \quad [15]$$
4. Określenie smukłości elementu ( $\lambda = l_0/i$ ) oraz smukłości granicznej ( $\lambda_{lim}$ ) – smukłość graniczną obliczać wg założeń podanych w części wykładowej.
- 4a. Dla elementów smukłych ( $\lambda = l_0/i > \lambda_{lim}$ ) należy wykonać następujące obliczenia:  
 Założenie sumarycznego zbrojenia (stopień zbrojenia) w celu wyznaczenia wpływu efektów II rzędu na wartość momentów zginających
  - dla **1-szej** iteracji:  $A_{s1} + A_{s2} = \rho_B \cdot b \cdot d$ , (oszacowane  $\rho_B = 0,005-0,030$ )
 
$$I_s = \rho_B b d \cdot (0,5h - a_1)^2$$
  - dla iteracji  **$i > 1$** : zakładamy nowy stopień zbrojenia jako wartość uśrednioną dla ze stopnia zbrojenia założonego na początku i obliczonego na końcu iteracji  **$i-1$**  ( $N_B$  oraz  $I_s$  obliczamy dla „nowego”  $\rho_B$ ):
 
$$\rho_{B,(iter \rightarrow i)} = 0,33 \cdot \rho_{B,(iter \rightarrow i-1)} + 0,67 \cdot \rho_{B,(iter \rightarrow i-1)}$$
 obliczenie siły krytycznej  $N_B$  oraz współczynnika  $\eta > 1$
- 4b. Dla elementów krępych ( $\lambda = l_0/i \leq \lambda_{lim}$ ) współczynnik  $\eta = 1$
5. Określenie mimośrodków
 
$$e_{tot} = \eta \cdot (e_0 + e_i) \text{ oraz } [e_1 = e_{tot} + 0,5h - a_1; \quad e_2 = e_{tot} - 0,5h + a_2] \quad [17]$$
6. Założenie przypadku **C2** i z równania [2].2 przy założeniu, że w pełni wykorzystana jest strefa ściskana ( $x_{eff} = x_{eff,lim}$ ) obliczenie potrzebnego zbrojenia ściskanego  $A_{s2}$ 

$$A_{s2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_1 - f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff,lim} \cdot (d - 0,5 \cdot x_{eff,lim})}{f_{yd} \cdot (d - a_2)} \geq 0,5A_{s,min} \quad [18]$$

Gdy uzyskane ze wzoru [18] zbrojenia  $A_{s2} < 0$  świadczy to o wystarczającej zdolności strefy ściskanej betonu do przejścia ściskania. Należy przyjąć ( $A_{s2r} > 0,5A_{s,min}$ )
7. Przyjęcie rzeczywistego zbrojenia strefy ściskanej ( $A_{s2r}$ ) i położenia jego środka ciężkości ( $a_{2r}$ ) – w dalszych obliczeniach wykorzystywane są wielkości rzeczywiste (oznaczane jako  $A_{s2}$  i  $a_2$ ).

## WYMIAROWANIE ZBROJENIA MIMOŚRODOWO ŚCISKANEGO PRZEKROJU PROSTOKĄTNEGO – METODA UPROSZCZONA (2)

8. Korekta rzeczywistej wysokości strefy ściskanej betonu  $x_{eff}$  (przy założeniu **C2**) - z równania [2].2

$$x_{eff} = d - \sqrt{d^2 - \frac{2 \cdot [N_{Ed} \cdot e_1 - f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2)]}{f_{cd} \cdot b}} \quad [19]$$

*komentarz: obliczane we wzorze [19]  $x_{eff}$  jest sprowadzonym do jednego wzoru (znanym z projektowania zginanego przekroju podwójnie zbrojonego) przekształceniem:*

$$s_{c,eff} = \frac{N_{Ed} \cdot e_1 - f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot (d - a_2)}{f_{cd} \cdot b \cdot d^2}; \quad \xi_{eff} = 1 - \sqrt{1 - 2 \cdot s_{c,eff}}; \quad x_{eff} = \xi_{eff} \cdot d$$

8a. Gdy obliczone ze wzoru [19]  $x_{eff} \leq 2a_2$  to zachodzi **C1** ( $x_{eff} = 2a_2$ ). Zbrojenie  $A_{s1}$  można wyznaczyć z równania [1].2.

<b>KW</b>	$A_{s1} = \frac{ N_{Ed} \cdot e_2 }{f_{yd} \cdot (d - a_2)} \geq A_{s,min} \quad [20]$
-----------	--

8b. Gdy  $x_{eff}$  otrzymane ze wzoru [19]  $2a_2 < x_{eff} \leq x_{eff,lim}$ , to  $x_{eff}$  to zachodzi **C2**, **C3** lub **C4**.

9. W dalszym ciągu utrzymujemy założenie przypadku **C2** i obliczamy  $A_{s1}$  z równania [2].1.

$$A_{s1} = \frac{-N_{Ed} + f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} + f_{yd} \cdot A_{s2}}{f_{yd}} \quad [21]$$

<b>KW</b>	9a. Gdy obliczone ze wzoru [21] $A_{s1} > 0$ to należy sprawdzić warunek $A_{s1} > A_{s,min}$ i rozmieścić zbrojenie w przekroju
-----------	--

9b. Gdy obliczone ze wzoru [21]  $A_{s1} < 0$  to występuje przypadek **małego mimośrod** (zachodzi **C3** lub **C4**) – wszystkie dotychczasowe obliczenia (od pkt. 6) bazowały na złych założeniach

10. Przy założeniu **C3**, ze względu na niepełne wykorzystanie zbrojenia  $A_{s1}$  przyjmuje się zbrojenie  $A_{s1}$  jako minimalne

$$A_{s1} = 0,5A_{s,min} \quad [22]$$

Przyjęcie rzeczywistego zbrojenia  $A_{s1r}$  i jego rozmieszczenie  $a_{1r}$

11. Przy założeniu **C3** określa się  $x_{eff}$  (z warunku  $\Sigma M_2$  dla **C3**)

$$x_{eff} = A + \sqrt{A^2 - \frac{2 \cdot [(1 - \xi_{eff,lim}) \cdot N_{Ed} \cdot e_2 - (1 + \xi_{eff,lim}) \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (d - a_2)]}{(1 - \xi_{eff,lim}) \cdot f_{cd} \cdot b}} \quad [23]$$

gdzie:

$$A = a_2 - \frac{2 \cdot f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (d - a_2)}{(1 - \xi_{eff,lim}) \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d}$$

## WYMIAROWANIE ZBROJENIA MIMOŚRODOWO ŚCISKANEGO PRZEKROJU PROSTOKĄTNEGO – METODA UPROSZCZONA (3)

11a. Gdy $x_{eff}$ obliczone ze wzoru [23] spełnia warunek $x_{eff} < x_{eff,lim}$ to także zbrojenie $A_{s2}$ może zostać przyjęte jako minimalne	
<b>KW</b>	$A_{s2} = 0,5A_{s,min}$ [24]
11b. Gdy $x_{eff}$ obliczone ze wzoru [23] spełnia nierówność $x_{eff,lim} \leq x_{eff} \leq d$ to zachodzi <b>C3</b> . Z warunku [3].2 oblicza się $A_{s2}$	
<b>KW</b>	$A_{s2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_1 - f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff})}{f_{yd}(d - a_2)}$ [25]
11c. Gdy $x_{eff}$ obliczone ze wzoru [23] spełnia nierówność $x_{eff} > d$ to zachodzi <b>C4</b> .	
12. Dla przypadku <b>C4</b> z warunku $\Sigma M_2$ oblicza się $x_{eff}$	
$x_{eff} = a_2 + \sqrt{a_2^2 - \frac{2 \cdot [N_{Ed} \cdot e_2 - f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot (d - a_2)]}{f_{cd} \cdot b}}$ [26]	
12a. Gdy $x_{eff}$ obliczone ze wzoru [26] spełnia nierówność $x_{eff} \leq h$ to zachodzi <b>C4</b> . Z warunku [4].2 oblicza się $A_{s2}$	
<b>KW</b>	$A_{s2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_1 - f_{cd} \cdot b \cdot x_{eff} \cdot (d - 0,5x_{eff})}{f_{yd}(d - a_2)}$ [27]
12b. Gdy $x_{eff}$ obliczone ze wzoru [26] spełnia nierówność $x_{eff} > h$ to cały przekrój jest ściskany (konieczne jest wykorzystanie na ściskanie zbrojenia $A_{s1}$ ).	
<b>KW</b>	$x_{eff} = h$ $A_{s2} = \frac{N_{Ed} \cdot e_1 - f_{cd} \cdot b \cdot h \cdot (d - 0,5h)}{f_{yd}(d - a_2)}$ $A_{s1} = - \frac{N_{Ed} \cdot e_2 + f_{cd} \cdot b \cdot h \cdot (d - 0,5h)}{f_{yd}(d - a_2)}$ [28]
13. Po zakończeniu pojedynczej iteracji wymiarowania (symbol <b>KW</b> ) należy skorygować poprawność założenia wyboczenia (wstępnego założenia ilości zbrojenia)	
13a. Dla elementów <b>krępych</b> należy dokonać sprawdzenia czy rzeczywiste odległości zbrojenia od krawędzi są mniejsze od założonych. Jeżeli nie są spełnione powyższe warunki to należy przeprowadzić sprawdzenie nośności.	
13b. Dla elementów <b>smukłych</b> należy dokonać sprawdzenia poprawności założenia stopnia zbrojenia (oszacowania efektów II rzędu) – według punktów 14-15	

## WYMIAROWANIE ZBROJENIA MIMOŚRODOWO ŚCISKANEGO PRZEKROJU PROSTOKĄTNEGO – METODA UPROSZCZONA (4)

<p>14. Dla rzeczywistego zbrojenia <math>A_{s1}</math> i <math>A_{s2}</math> i rzeczywistego położenia <math>a_1</math> i <math>a_2</math> oblicza się:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- moment bezwładności zbrojenia względem osi przechodzącej przez środek ciężkości przekroju: <math>I'_s = A_{s1} \cdot (0,5h - a_1)^2 + A_{s2} \cdot (0,5h - a_2)^2</math>,</li> <li>- stopień zbrojenia: <math>\rho_{prov} = \frac{A_{s1} + A_{s2}}{bd}</math>,</li> <li>- rzeczywistą wartość siły krytycznej <math>N_B(I'_s)</math></li> <li>- współczynnik zwiększający mimośród <math>\eta'</math>,</li> <li>- rzeczywistą wartość mimośrodu całkowitego <math>e'_{tot}</math> dla współczynnika <math>\eta'</math></li> </ul>	[29]
15. Porównuje się rzeczywisty mimośród całkowity $e'_{tot}$ do założonego na początku niniejszej iteracji ( $e_{tot}$ )	
15a. Gdy $0,9 \leq e'_{tot} / e_{tot} \leq 1$ to efekty II rzędu zostały uwzględnione poprawnie. <b>Nie ma potrzeby wykonania kolejnej iteracji.</b>	
15b. Gdy $e'_{tot} / e_{tot} \leq 0,9$ to przekrój będzie spełniał warunki nośności (ale mógł zostać zaprojektowany nieoszczędnie). <b>Powinno się wykonać kolejną iterację.</b> (powrót do punktu 4a).	
15c. Gdy $e'_{tot} / e_{tot} > 1$ to przekrój prawdopodobnie nie będzie spełniał warunków nośności. <b>Należy wykonać kolejną iterację.</b> (powrót do punktu 4a) W kolejnej iteracji należy założyć nowy stopień zbrojenia (pomiędzy założonym na początku iteracji – krok 4a oraz otrzymanym na końcu – krok 14)	
<p><i>Gdy obliczona proporcja mimośrodów nieznacznie przekracza wartość 1 (do około 1,03) to istnieje możliwość, że zastosowane większe niż obliczone zbrojenie zrekompensuje niedoszacowanie mimośrodu całkowitego. Można wtedy nie wykonywać kolejnej iteracji, jednak trzeba przeprowadzić sprawdzenie nośności.</i></p>	