

# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO

PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

The background of the slide is a light gray gradient with several realistic water droplets of various sizes scattered across it. The droplets have highlights and shadows, giving them a three-dimensional appearance. The word "Uwaga" is centered in the upper half of the slide in a bold, red, sans-serif font.

## Uwaga

Niniejsza prezentacja stanowi wyłącznie  
materiał dydaktyczny dla studentów  
realizujących moduł kształcenia  
Konstrukcje cienkościennie

## Wstęp

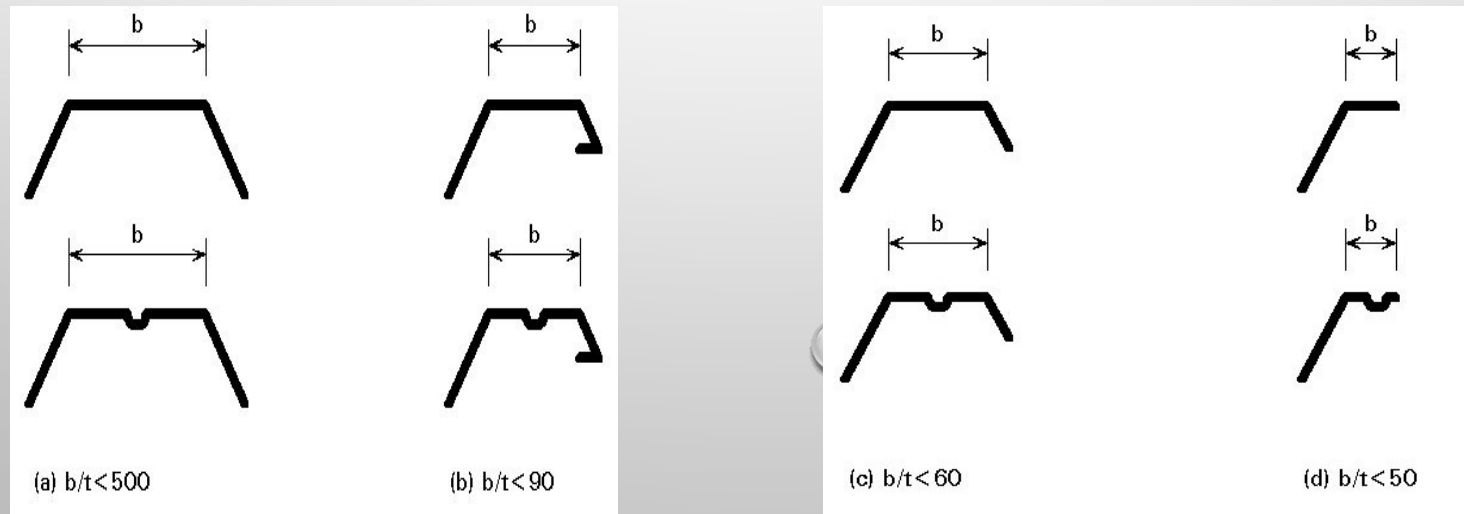
Przy projektowaniu elementów ściskanych należy rozróżnić dwa zjawiska: wyboczenie globalne, które zależy od smukłości elementu, oraz wyboczenie miejscowe, które może wystąpić, jeżeli stosunek  $b/t$  ścianek przekroju jest stosunkowo duży. To ostatnie występuje w elementach giętych na zimno na poziomie obciążenia niższym niż poziom wyboczenia globalnego. W takim przypadku interakcja wyboczenia lokalnego i globalnego daje zmniejszone globalne obciążenie krytyczne przy wyboczeniu w porównaniu do obciążenia pręta krępego.

Interakcję można zasymulować, zastępując przekrój efektywnym przekrojem, biorąc pod uwagę redystrybucję naprężeń w każdej ściance przekroju. Ta metoda umożliwia obliczenie nośności elementów cienkościennych (przekroje klasy 4) w taki sam sposób, jak w przypadku przekrojów niższych klas. Można przyjąć obciążenie osiowe, jeśli siła ściskająca działa w środku ciężkości przekroju efektywnego.

Procedury projektowania przedstawione w PN-EN-1993-1-3 wymagają oceny powierzchni efektywnej i smukłości przekroju, biorąc pod uwagę takie odpowiednie właściwości geometryczne, jak stosunki  $b/t$ , zaokrąglenie narożników, usztywnień i fałd.

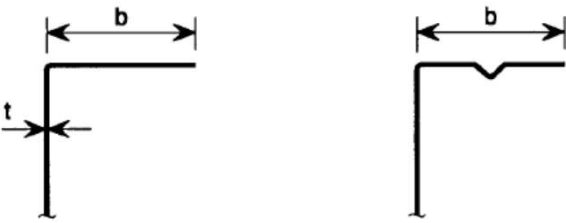
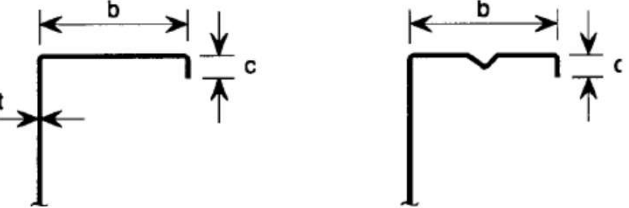
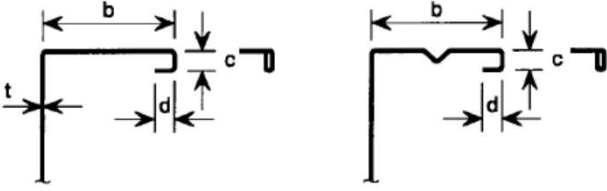
### Ograniczenia smukłości ścianki $b/t$

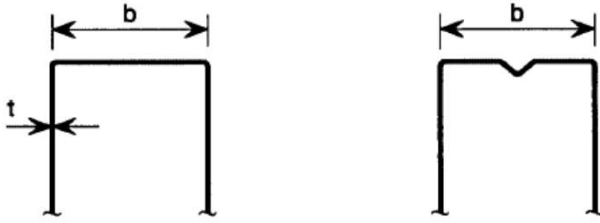

Aby zapewnić odpowiednią sztywność i uniknąć przedwczesnej niestateczności usztywnień brzegowych. Norma projektowania określa limity współczynników  $b/t$ . Te maksymalne stosunki szerokości do grubości zostały przyjęte częściowo z ograniczonych badań eksperymentalnych, a częściowo z doświadczenia przy produkcji i użytkowaniu przekrojów giętych na zimno. Szerokie i sprężyste elementy są podatne na uszkodzenia mechaniczne; efektywna powierzchnia jest niewielka w porównaniu do całkowitej powierzchni, a wybrzuszenia przy obciążeniach eksploatacyjnych mogą być widoczne; niektóre przekroje o dużych stosunkach  $b/t$ . Mogą one jednak zachowywać się dobrze pod obciążeniem i dlatego zaleca się również „projektowanie na podstawie badań”.



## Ograniczenia smukłości ścianki $b/t$

### Sprawdzenie smukłości ścianek

Część elementu (w przekroju)	Wartość maksymalna
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$

Część elementu (w przekroju)	Wartość maksymalna
	$b/t \leq 500$
	$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Aby uniknąć przedwczesnej niestateczności usztywnienia brzegowe powinny spełniać warunki:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,6$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,3$$

#### Modelowanie ścianek elementu na użytek analizy

Jeśli nie przeprowadza się modelowania zgodnie z EN 1993-1-5, to ścianki elementu można modelować, jak pokazano w Tablicy 5.2.


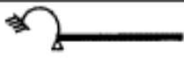

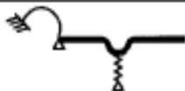

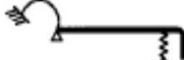

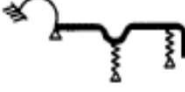

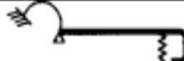



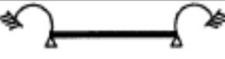






W modelowaniu bierze się pod uwagę wzajemny wpływ różnych usztywnień.

Imperfekcje odnoszące się do wyboczenia giętnego i giętno-skrętnego przyjmuje się wg EN 1993-1-1 Tablica 5.1.

Imperfekcje związane ze zwichrzeniem przyjmuje się w postaci wstępnego wygięcia łukowego  $e_0$  słabej osi przekroju, bez potrzeby jednoczesnego uwzględnienia wstępnego skręcenia. Wielkość imperfekcji w przypadku kształtowników przypisanych do krzywej zwichrzenia 'a' wg EN 1992-1-1/ 6.3.2.2 zaleca się wartości:  $e_0/L = 1/600$  w przypadku analizy sprężystej oraz  $e_0/L = 1/500$  w przypadku analizy plastycznej.

## Modelowanie ścianek elementu na użytek analizy

Tablica 5.2: Modelowanie ścianek kształtowników

Typ ścianki	Model	Typ ścianki	Model
			
			
			
			
			

### Deformacja pasów

Należy uwzględnić wpływ efektu zakrzywienia bardzo szerokich pasów na nośność przekroju. Uwzględnia się zakrzywienie pasów w kierunku osi obojętnej, chyba że wielkość tych deformacji nie przekracza 5%. Wzory do obliczania wielkości deformacji mają zastosowanie do pasów ściskanych i rozciąganych, z usztywnieniami lub bez usztywnień, jednak bez blisko rozmieszczonych usztywnień poprzecznych pasów.



Rysunek 5.3: Ugięcia pasów

Dla elementów prostoliniowych:

$$u = 2 \frac{\sigma_a}{E^2} \frac{b_s^4}{t^2 z}$$

Dla belek łukowych:

$$u = 2 \frac{\sigma_a}{E} \frac{b_s^4}{t^2 r}$$



## Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

Ścianki przekroju są albo dwustronnie podparte (środniki lub pasy z odpowiednim usztywnieniem krawędzi), albo jednostronnie podparte (pasy profili o kształcie litery U lub L) lub podparte sprężystie np. pasy z niewystarczająco sztywnymi usztywnieniami krawędzi. W przypadku ścianek podpartych dwustronnie i jednostronnie, naprężenie krytyczne wyboczeniowe  $f_{cr}$  (naprężenie bifurkacyjne) przy równomiernie rozłożonych naprężeniach normalnych lub nawet gradientach naprężeń stanowi podstawę koncepcji efektywnej szerokości Wintera. Współczynnik wyboczenia  $k_{\sigma}$ , odnosi się do rzeczywistego stanu obciążenia i warunków brzegowych. Odpowiednie wartości  $k_{\sigma}$  można uzyskać z normy.

Ścianki podparte dwustronnie

Efektywna szerokość ścianki elementu ściskanego jest następująca:

$$\rho = b_{\text{eff}}/b_p$$

gdzie  $b_{\text{eff}}$  jest szerokością efektywną ścianki, a  $b_p$  jest szerokością całkowitą ścianki,

### Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

W stanie granicznym nośności:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \cdot \left( 1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p} \right)$$

i

$$\bar{\lambda}_p = \left( \frac{1,052}{\sqrt{k_\sigma}} \right) \cdot \left( \frac{b_p}{t} \right) \cdot \left( \frac{\sqrt{f_y}}{E} \right) \leq 0,673$$

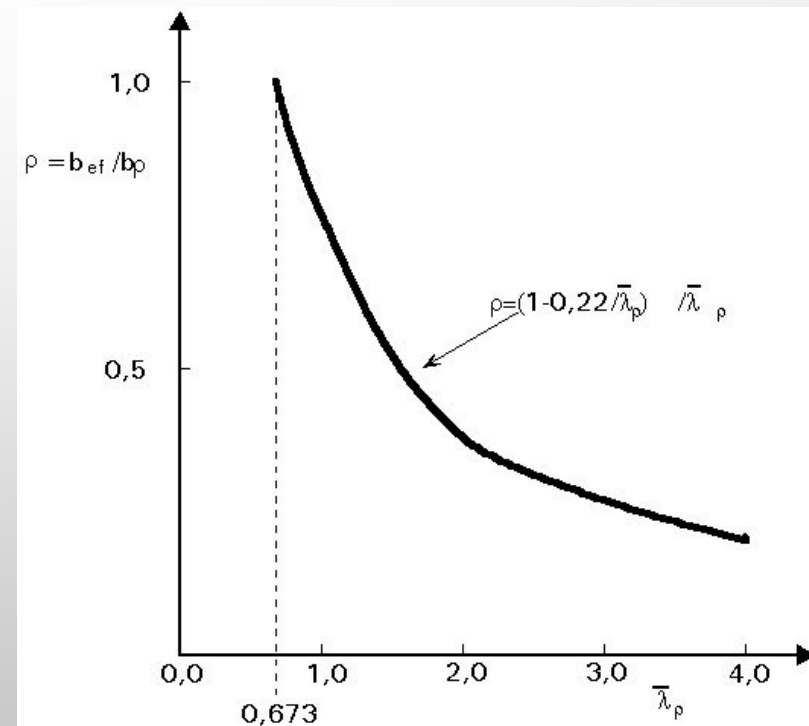
Dla  $\bar{\lambda}_p = 0,673$  ta wzór daje  $\rho = 1,0$ , tzn., że ścianka jest w pełni efektywna. Odpowiednie wartości  $\rho$  i  $\bar{\lambda}_p$  są zilustrowane na rysunku. Efektywna szerokość jest przypisana do obu stron elementu płytowego dla stałego naprężenia w stanie podkrytycznym. Jeśli występują nierównomierne rozkłady naprężeń, całkowita efektywna szerokość jest dzielona na dwie części ( $b_{ef1}$  i  $b_{ef2}$ ), w zależności od stosunku naprężeń  $\psi = \sigma_2/\sigma_1$ , przy czym  $\sigma_1 = f_y$  jako maksymalne naprężenie ściskające a  $\sigma_2 = 0$ . W przypadku części przekroju, gdzie występują naprężenia rozciągające ( $b_t$ ), przekrój jest zawsze uważany za w pełni efektywny.

## Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

W stanie granicznym nośności naprężenie ściskające  $\sigma_1$  odpowiada granicy plastyczności  $f_y$  ( $\sigma_1 = f_y$ ); w stanie granicznym użyteczności stan  $\sigma_1$  można uznać za równy  $f_y / 1,5$ .

### Ścianki podparte jednostronnie

Dla ścianek elementów podpartych jednostronnie można uzyskać podobne rozwiązania, stosując odpowiednie wartości  $k_\sigma$ . W tym przypadku jednak przy obliczaniu szerokości efektywnej ważne jest, aby zwrócić uwagę, czy maksymalne naprężenie ściskające znajduje się na podpartej lub niepodpartej stronie ścianki.



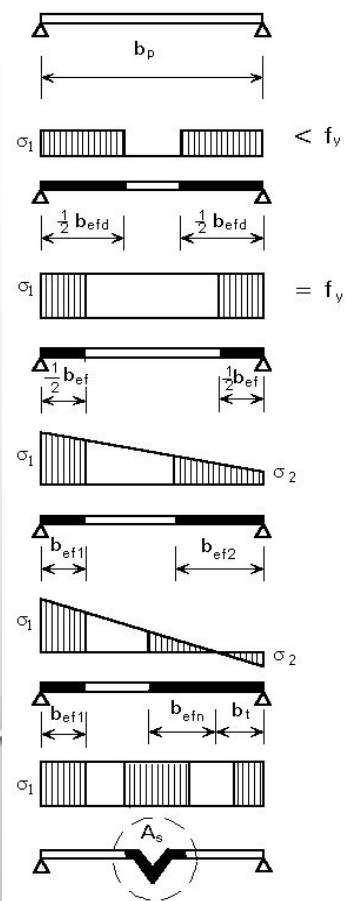
# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

## W3

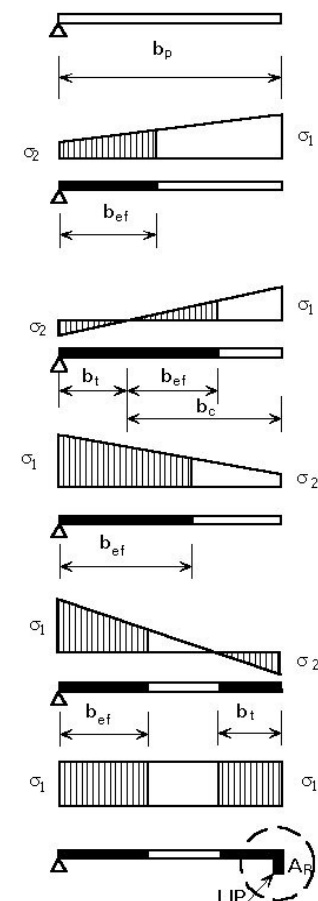
### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

## Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

(a) Doubly supported element



(b) Singly supported element

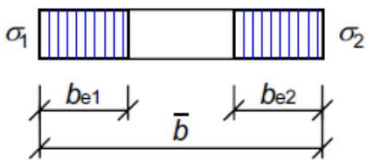
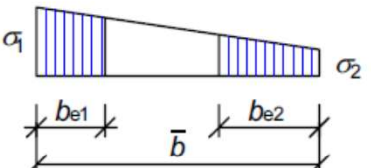
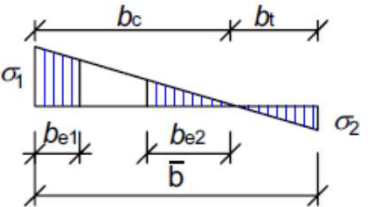


# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

## W3

### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

#### Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

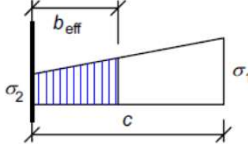
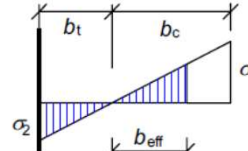
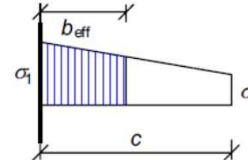
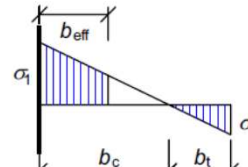
Rozkład naprężeń (ściskanie – dodatnie)				Szerokość współpracująca $b_{eff}$			
				$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{eff}$			$b_{e2} = 0,5 b_{eff}$
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5-\psi} b_{eff}$			$b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1-\psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{eff}$			$b_{e2} = 0,6 b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$	
Parametr niestateczności miejscowej $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \psi)^2$	

# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

## W3

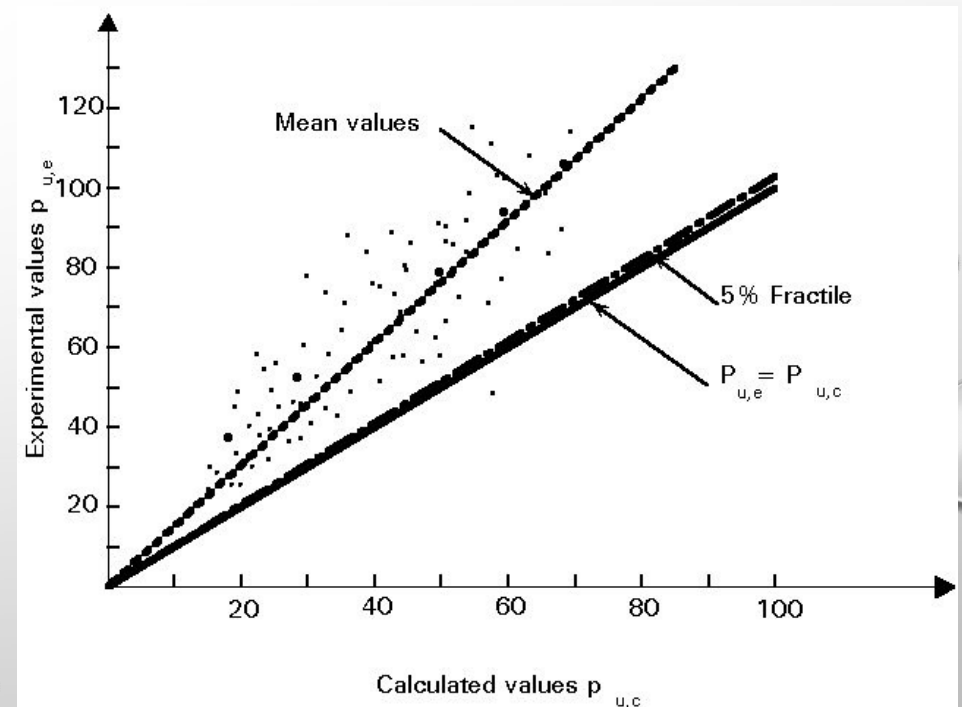
### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

#### Wzory do wyznaczania efektywnej szerokości ścianki

Rozkład naprężeń (ściskanie – dodatnie)		Szerokość współpracująca $b_{eff}$				
		$1 > \psi \geq 0$ : $b_{eff} = \rho c$				
		$\psi < 0$ : $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$		1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -3$	
Parametr niestateczności miejscowej $k_{\sigma}$		0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
		$1 > \psi \geq 0$ : $b_{eff} = \rho c$				
		$\psi < 0$ : $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$				
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$		1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Parametr niestateczności miejscowej $k_{\sigma}$		0,43	$0,578 / (\psi + 0,34)$	1,70	$1,7 - 5\psi + 17,1 \psi^2$	23,8

## Walidacja koncepcji efektywnej szerokości

Porównania między wynikami badań a obliczonymi analitycznie obciążeniami wyboczeniowymi ceowników giętych na zimno i innych profili o różnych warunkach brzegowych elementu potwierdzają praktyczną trafność modelu projektowego. Jedną z zalet koncepcji efektywnej szerokości jest to, że pozwala ona na stosowanie stosunkowo prostych metod; pozwala także na wizualizację wpływu geometrii przekroju na wytrzymałość przekroju. Efekt ten można zobaczyć na podstawie wartości efektywnej szerokości w odniesieniu do różnych rozkładów naprężeń i warunków podparcia. Praktyczną konsekwencją jest to, że niepodparte części elementów poddanych naprężeniom ściskającym są nieskuteczne i należy ich unikać. Ich skuteczność można łatwo zwiększyć, wzmacniając płaską ściankę przekroju usztywnieniami krawędzi (krawędzie, zagięcia, fałdy) i / lub usztywnieniami pośrednimi.



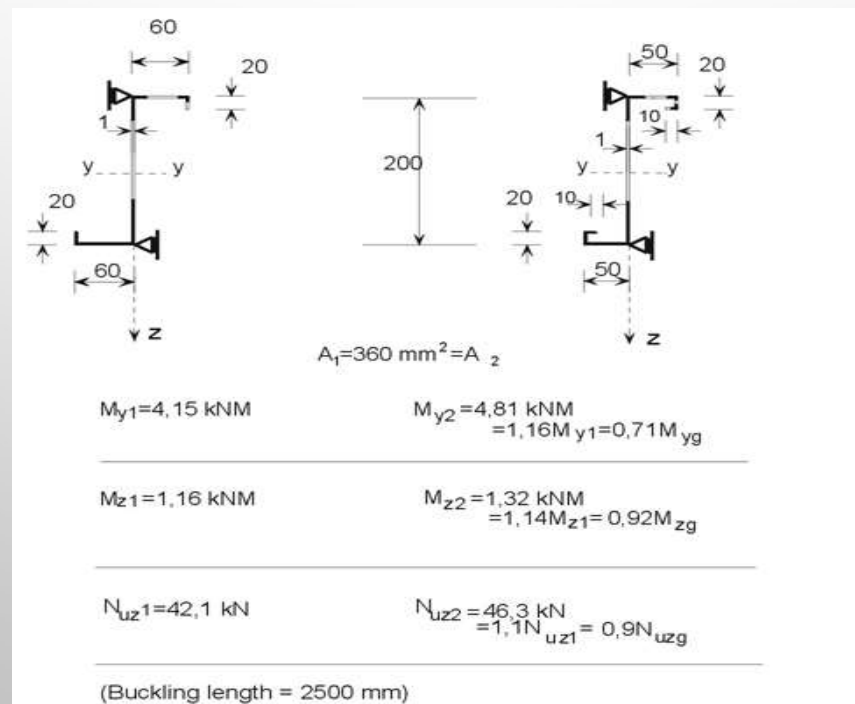
## KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

### W3

#### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

### Walidacja koncepcji efektywnej szerokości

Na rysunku można również zobaczyć wytrzymałość na obciążenia profili w kształcie litery Z z różnymi rodzajami usztywnień końcowych odpowiednio przy momentach zginających i siłach normalnych. Można zauważyć, że nawet niewielkie zmiany właściwości geometrycznych zapewniają zwiększoną wytrzymałość na obciążenia.





### Traktowanie usztywnień i fałd

Skutecznym środkiem w celu zwiększenia nośności i sztywności cienkościennych odcinków jest zmniejszenie płaskiej szerokości elementów ściskanych przez pośrednie usztywnienia oraz zapewnienie usztywnienia krawędzi jednostronnie podpartym płaskim ściankom (zagięcia lub przegięcia). Jeśli sztywność samego usztywnienia jest wystarczająco duża, może ono działać jako sztywne podparcie dla sąsiednich płaskich ścianek. Oznacza to, że nie może wystąpić żadne załamanie usztywnienia, spowodowanego podatnością na ściskanie lub niestabilnością samego usztywnienia, zanim element podparty znajdzie się w stanie krytycznym. Zazwyczaj nie jest możliwe zapewnienie takiej sztywności, co oznacza, że należy wziąć pod uwagę interakcję między sąsiednią ścianką a ścianką usztywniającą.

Ponieważ analityczne rozwiązanie problemu jest bardzo trudne i niepraktyczne, opracowano przybliżone rozwiązanie oparte na fizycznym zachowaniu tego składnika. Na rysunku pokazano trzy różne rodzaje wyboczenia, które przedstawiają:

Jednostronnie podparte pasmo, w którym spodziewana jest duża długość fali i swobodny rozwój amplitudy wyboczeniowej po nieusztywnionej stronie pasma.

Lokalne wyboczenie dwustronnie podpartego pasma płytowego, w którym połączenie między pasmem a krawędzią pozostaje proste, ale w którym krawędź podąża za kształtem wyboczenia

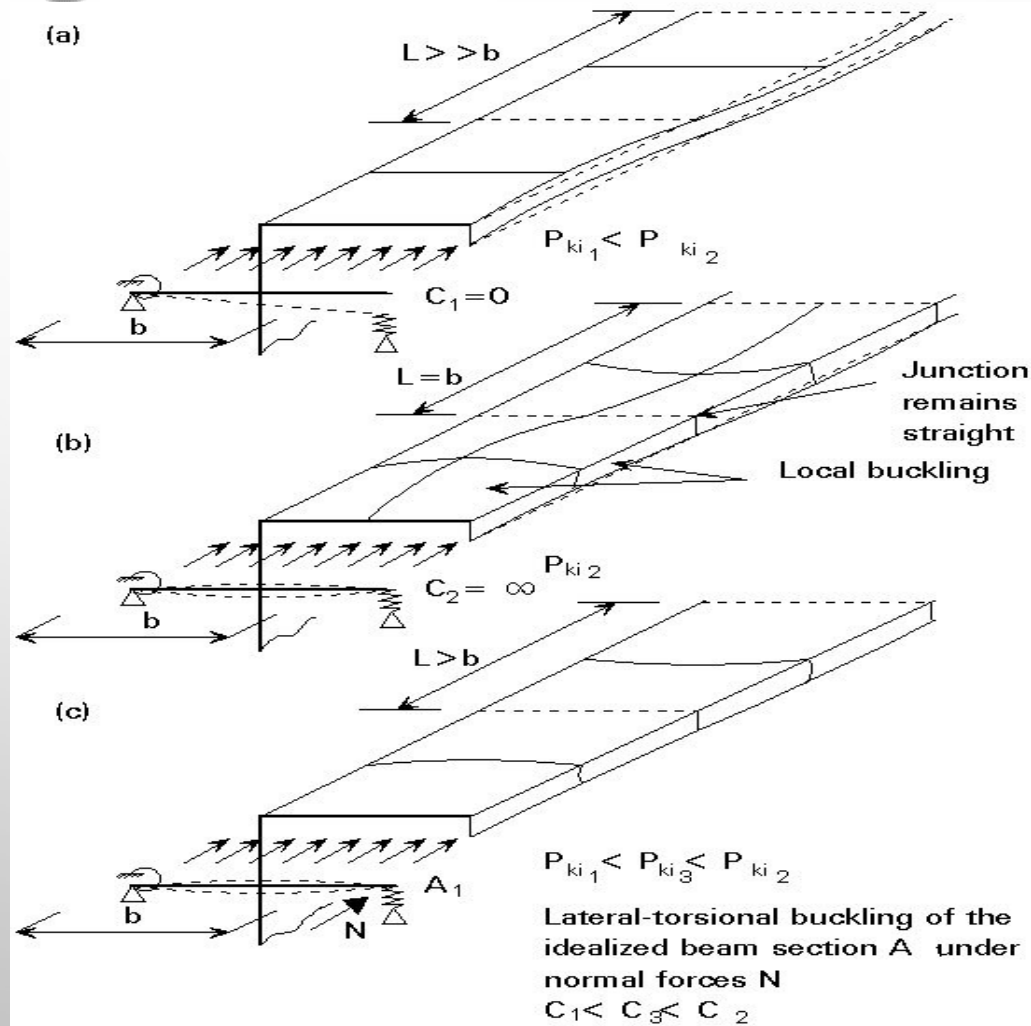
Wzajemne oddziaływanie między wyboczeniem pasma i fałdy, skutkujące rodzajem wyboczenia giętno-skrętnego fałdy i sąsiednich części pasma na długości fali, która zależy od sztywności fałdy, stosunku  $b/t$  i ograniczeń dla pasma.

# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

## W3

### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

Traktowanie usztywnień i fałd



## Traktowanie usztywnień i fałd

Takie zachowanie można zasymulować za pomocą modelu „belki na sprężystym podłożu”, w którym belka jest reprezentowana przez części fałdy i pasma, oraz sprężystego podłoża modelowanego za pomocą sztywności sprężyny, która przedstawia utwierdzenie pasma.

### Uproszczona metoda projektowania usztywnień

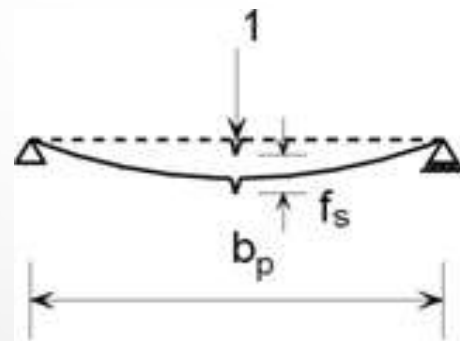
Na podstawie opisanego powyżej zachowania fizycznego, obliczeniowy model wymaga oszacowania przekroju efektywnego i sztywności sprężystej „podłoża”. Następnie można określić idealne krytyczne obciążenie wyboczeniowe przekroju ( $N_{cr}$ ) i zredukowane obciążenie maksymalne ( $N_u$ ), w zależności od smukłości względnej ścianki. Sztywność sprężysta usztywnienia pośredniego zależy głównie od stosunku  $b_p/t$  ściskanego elementu i od usztywnienia krawędzi (np. zagieć lub fałd) od wielkości utwierdzenia po przeciwnej stronie panelu. Określenie sztywności sprężyny pokazano na rysunku.

## KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

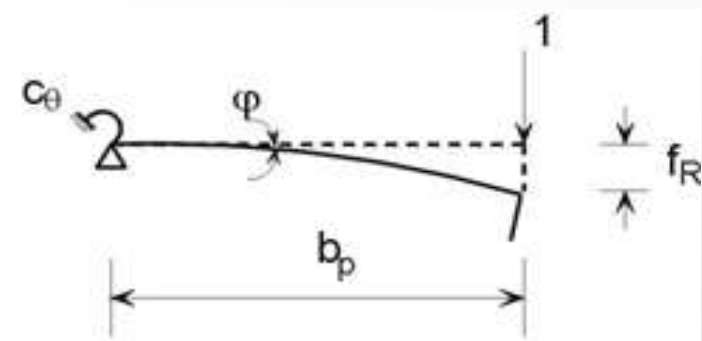
Traktowanie usztywnień i fałd



$$f_s = \frac{\alpha(1-\mu^2)b_p^3}{Et^3}$$

With  $\alpha = 5$ , taking into account a restraint of the plate strip; otherwise  $\alpha = 4$

$$c_s = \frac{1}{f_s}$$



$$f_R = \frac{4(1-\mu^2)b_p^3}{Et^3} + \varphi b_p$$

With  $\varphi = 1/c_\theta =$  angle due to the amount of restraint at the support

$$c_R = \frac{1}{f_R}$$

## Traktowanie usztywnień i fałd

Procedura określania nośności pasa ściskanego przekroju zetownika została zilustrowana na rysunku, gdzie przeprowadza się następujące kroki:

Krok 1 Wyznacza się sztywność sprężystą  $C_R = 1/f_R$ , biorąc pod uwagę sztywność obrotową na podparciu spowodowaną sąsiednim średnikiem.

Krok 2 Określenie efektywnej szerokości odpowiednio elementu płytowego i fałdy, przyjmując przegubowe podparcie w narożu

$$\sum A_{eff} = b_{eff,1} \cdot t + A_R = (b_{eff,1} + C_{eff,1}) \cdot t$$

Krok 3 Po obliczeniu  $I_R$ , moment bezwładności przekroju poprzecznego z powierzchnią  $A_R$  (w odniesieniu do osi a-a pola  $A_R$ ), idealna naprężenie krytyczne przy wyboczeniu,  $\sigma_{ki,R}$  są podane wzorem:

$$\sigma_{ki,R} = \frac{2}{A_R} \cdot \sqrt{C_R \cdot E \cdot I_R}$$

reprezentujące naprężenia bifurkacyjne belki na sprężystym podłożu.

## Traktowanie usztywnień i fałd

Krok 4 Określenie odpowiedniej smukłości  $\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{ki,R}}$  i ocena współczynnika redukcji na podstawie krzywej wyboczenia (zwykle krzywa „b”), co daje  $\sigma_k = \kappa \cdot f$  i nośność przekroju na docisk „elementu belkowego”  $N_{u,2} = \kappa \cdot f_y \cdot A_R$ .

Krok 5 lub, w odniesieniu do granicy plastyczności,  $N_{u,2} = f_y \cdot (\kappa A_R)$ , co oznacza, że  $A_R$  należy zredukować do wartości  $A_{ef,2} = \kappa \cdot A_R$  (przekrój równoważny).

Jeśli  $\kappa$  jest znacznie mniejsze niż 1,0, prowadzi się iteracyjny proces z co najmniej dwoma etapami (6 i 7) może poprawić nośność kształtownika, tak że na końcu iteracji  $\kappa \approx 1,0$  i  $N_{u,n} = f_y \cdot A_{ef,2}$ . Całkowita wytrzymałość kształtownika wynosi wtedy  $\Sigma N_u = f_y \cdot (A_{ef,1} + A_{ef,2})$ .

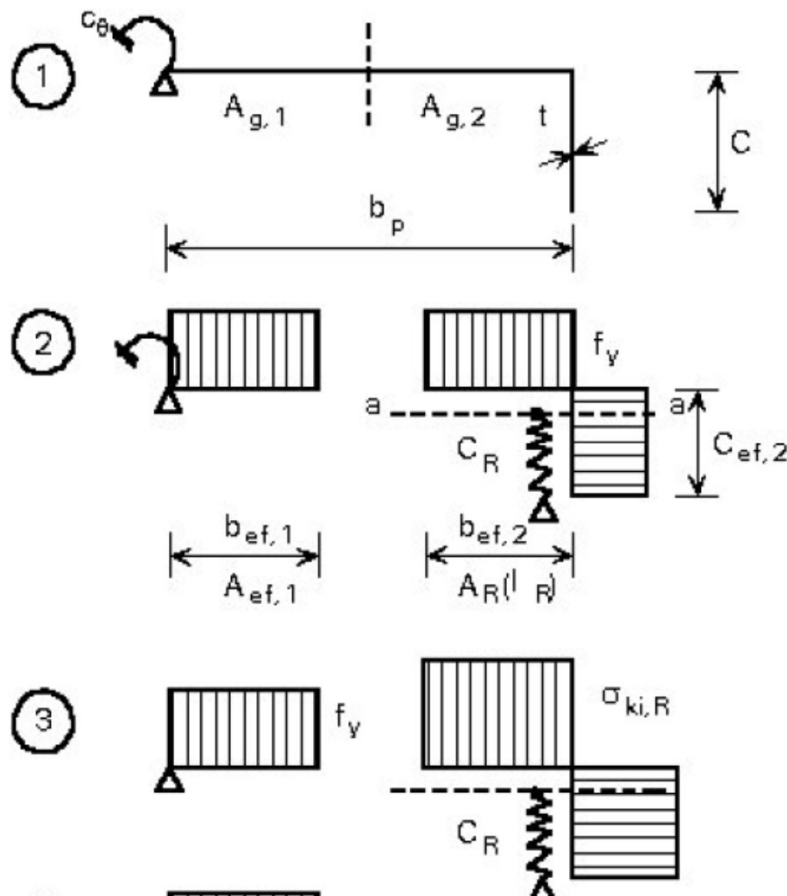
Efekt pośredniego usztywnienia można określić w podobny sposób. Ważność tego modelu została potwierdzona badaniami.

# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

## Traktowanie usztywnień i fałd



Gross cross-section

Effective cross-section

$$\sum A_{ef} = A_{ef,1} + A_R$$

$$(b_{ef,1} = b_{ef,2})$$

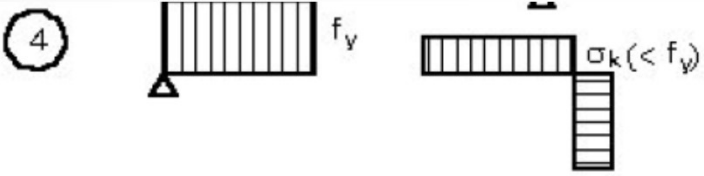
Bifurcation stress of the section with  $A_R$  and  $C_R$

# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

## W3

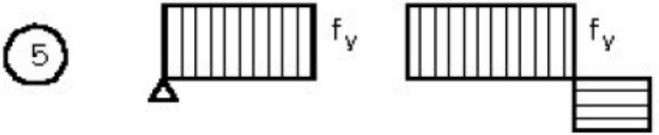
### KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

#### Traktowanie usztywnień i fałd



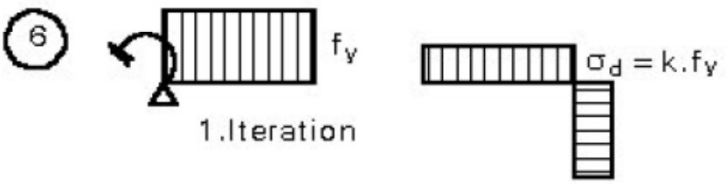
Reduced buckling stress according to a buckling curve for:  

$$\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{ki,R}}$$

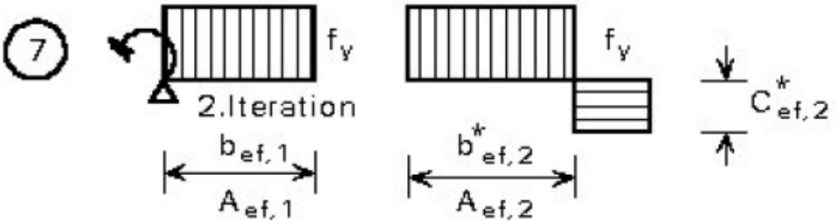


Reduced area  $A_{ef,2} \neq k \cdot A_R$   
 $N_{u,2} \neq \sigma_k A_R = f_y k \cdot A_R$

---



New effective section for  $\sigma_d = k \cdot f_y$   
 new values of  $A_R, I_R, \bar{\lambda}$   
 $\Rightarrow k_1 > k$   
 $\Rightarrow k \neq k_1$



$$\sum N_u = f_y (A_{ef,1} + A_{ef,2}^*)$$



## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

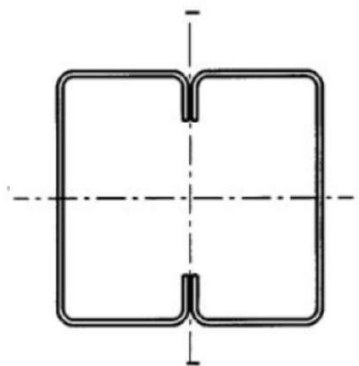
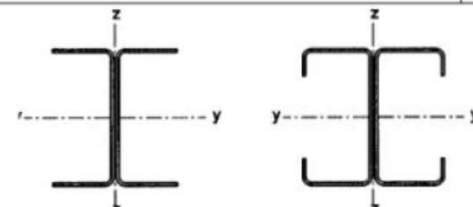
Procedura projektowania dla obciążonych osiowo słupów cienkościennych przebiega głównie zgodnie z procedurą dla przekrojów krępych, to znaczy: wybór krzywej wyboczenia (a-c) w odniesieniu do rodzaju przekroju; obliczanie właściwości przekroju ( $I_{ef}$ ,  $A_{ef}$ ) i smukłości ( $\lambda$ ) słupów; wyprowadzenie powiązanej smukłości,  $f(\lambda, f_y)$ ; oraz oszacowanie współczynnika wyboczenia  $\alpha$  i obliczeniowego obciążenia wyboczeniowego  $N_{Rd}$ . W przypadku tej procedury należy wziąć pod uwagę następujące aspekty:


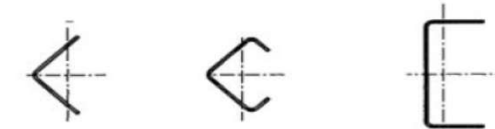
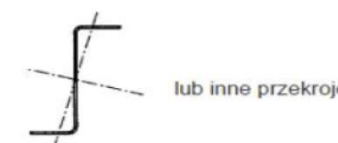
### Krzywe wyboczeniowe i rodzaje przekrojów

Rodzaje przekrojów i powiązane krzywe wyboczenia (a-c), reprezentowane tutaj przez współczynniki imperfekcji  $\alpha = 0,21 - 0,34 - 0,49$ . Im bardziej przekrój jest podatny na lokalne wyboczenie lub skręcanie, tym bardziej wartości  $\alpha$  wzrastają, a współczynniki redukcji wyboczenia maleją. Fakt ten podkreśla potrzebę uwzględnienia w projekcie rzeczywistego rodzaju obciążenia, któremu podlega przekrój.

## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Krzywe wyboczenia i typy przekroju

Typ przekroju	Wyboczenie względem osi	Krzywa wyboczenia	
	jeśli stosuje się $f_{yb}$	dowolna	b
	jeśli stosuje się $f_{ya}$ <sup>*)</sup>	dowolna	c
	y - y	a	
	z - z	b	

Typ przekroju	Wyboczenie względem osi	Krzywa wyboczenia
	dowolna	b
	dowolna	c
		

<sup>\*)</sup> Średnią granicę plastyczności  $f_{ya}$  stosuje się gdy  $A_{eff} = A_g$

## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Wyboczenie przekrojów symetrycznych

Efektywny przekrój oblicza się przy założeniu stałych naprężeń ściskających działających na przekrój brutto. Dla przekrojów symetrycznych oś neutralna przekroju efektywnego jest identyczna z osią przekroju całkowitego, i element musi być sprawdzony jedynie pod kątem czystych ściskania osiowego.

#### Procedura jest zatem następująca:

- Określenie niezbędnych właściwości przekroju:  
 $A_g, A_{eff}, Q = A_{eff}/A_g, I_{eff}, i_{eff} = \sqrt{I_{eff}/A_{eff}}, \lambda = L/i_{eff}$   
 w odniesieniu do odpowiedniej osi (y, z)
- Określenie powiązanych wartości smukłości:  
 $\lambda_1 = \sqrt{E/f_y}, \quad \bar{\lambda} = \lambda/\lambda_1$
- Wybór krzywej wyboczenia w zależności od rodzaju przekroju:  
 wartość  $\alpha$  przyjmuje się zgodnie tab. 6.3.

- Obliczanie parametru krzywej wyboczeniowej:  
 $\phi = 0,5 [1 + \alpha (-0,2) + 2] \quad \phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$

- Określenie współczynnika redukcji:

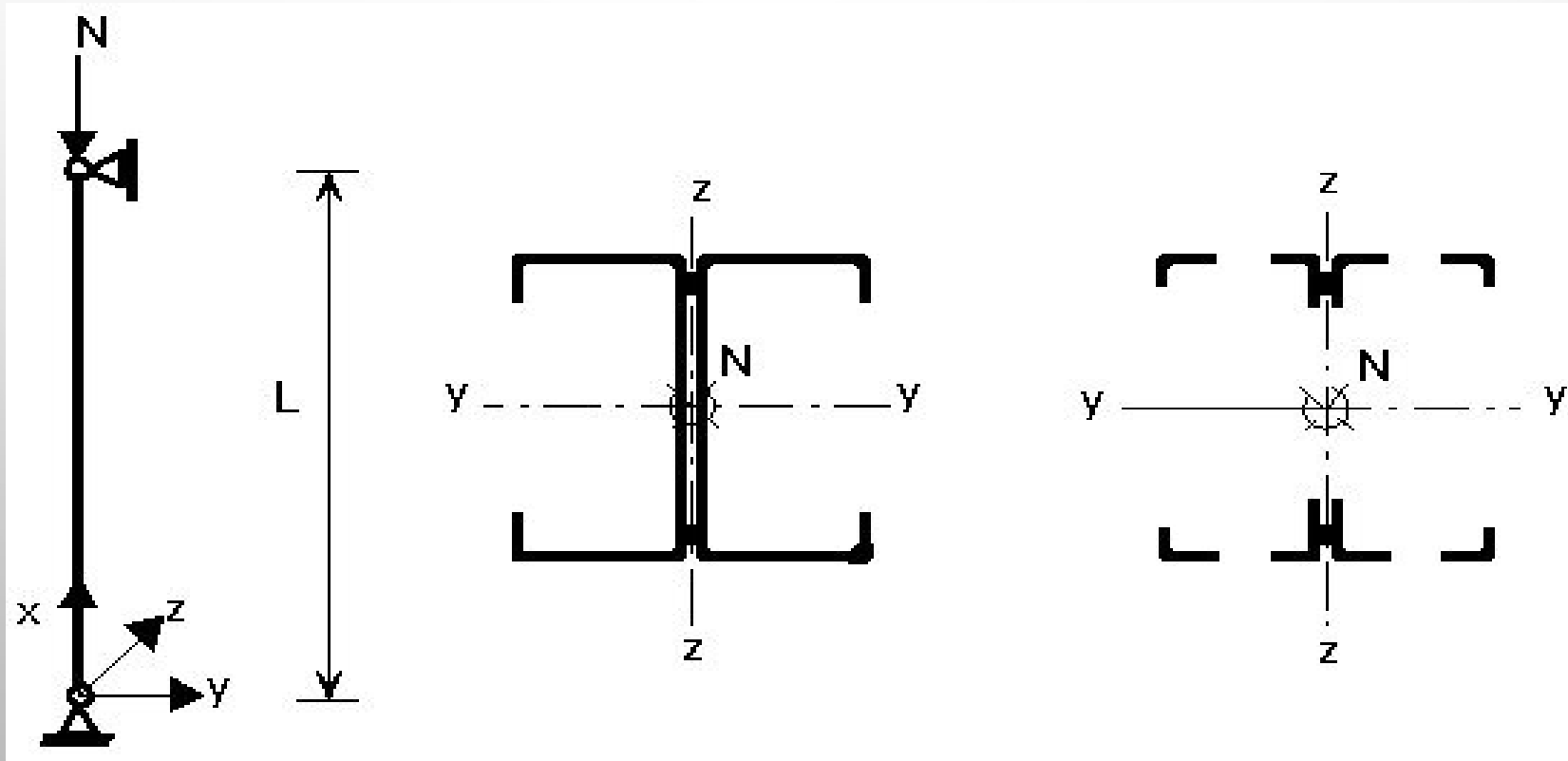
$$\kappa = 1 / \left( \phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2} \right) \leq 1$$

- Określenie wartości obliczeniowej dla obciążenia wyboczeniowego:

$$N_{Rd} = \kappa \cdot A_{eff} \cdot f_y / \gamma_M$$

## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Wyboczenie przekrojów symetrycznych



## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Wyboczenie przekrojów niesymetrycznych

Dla przekrojów niesymetrycznych oś neutralna przekroju efektywnego (jeśli  $A_{eff}/A_g < 1$ ) przesuwa się w stosunku do przekroju brutto. Ponieważ ściskanie koncentryczne jest definiowane jako siła normalna działająca na środek ciężkości przekroju efektywnego, ten przypadek będzie ważny tylko wtedy, gdy obciążenie zostanie przyłożone do środka ciężkości przekroju za pomocą rozwiązań konstrukcyjnych.

Przesunięcie osi neutralnej wytworzy zwykle dodatkowy moment zginający,  $M_b = N \cdot e$ , który należy wziąć pod uwagę w ten sam sposób, co wyboczenie gięte. Dodatkowy moment spowodowany wzajemnym oddziaływaniem sił normalnych i zewnętrznych momentów zginających. Zasadniczo wszystkie elementy poddane łączonemu zginaniu i ścisaniu osiowemu muszą spełniać następujące warunki:

$$\frac{N}{N_{Rd,min}} + \frac{M_y + \Delta M_y}{M_{Rd,y}} \cdot (k_y \cdot k_{LT}) + \frac{M_z + \Delta M_z}{M_{Rd,z}} \cdot k_z \leq 1$$

gdzie:

$\Delta M_y, \Delta M_z$  to dodatkowe momenty zginające wynikające z przesunięcia osi neutralnej.

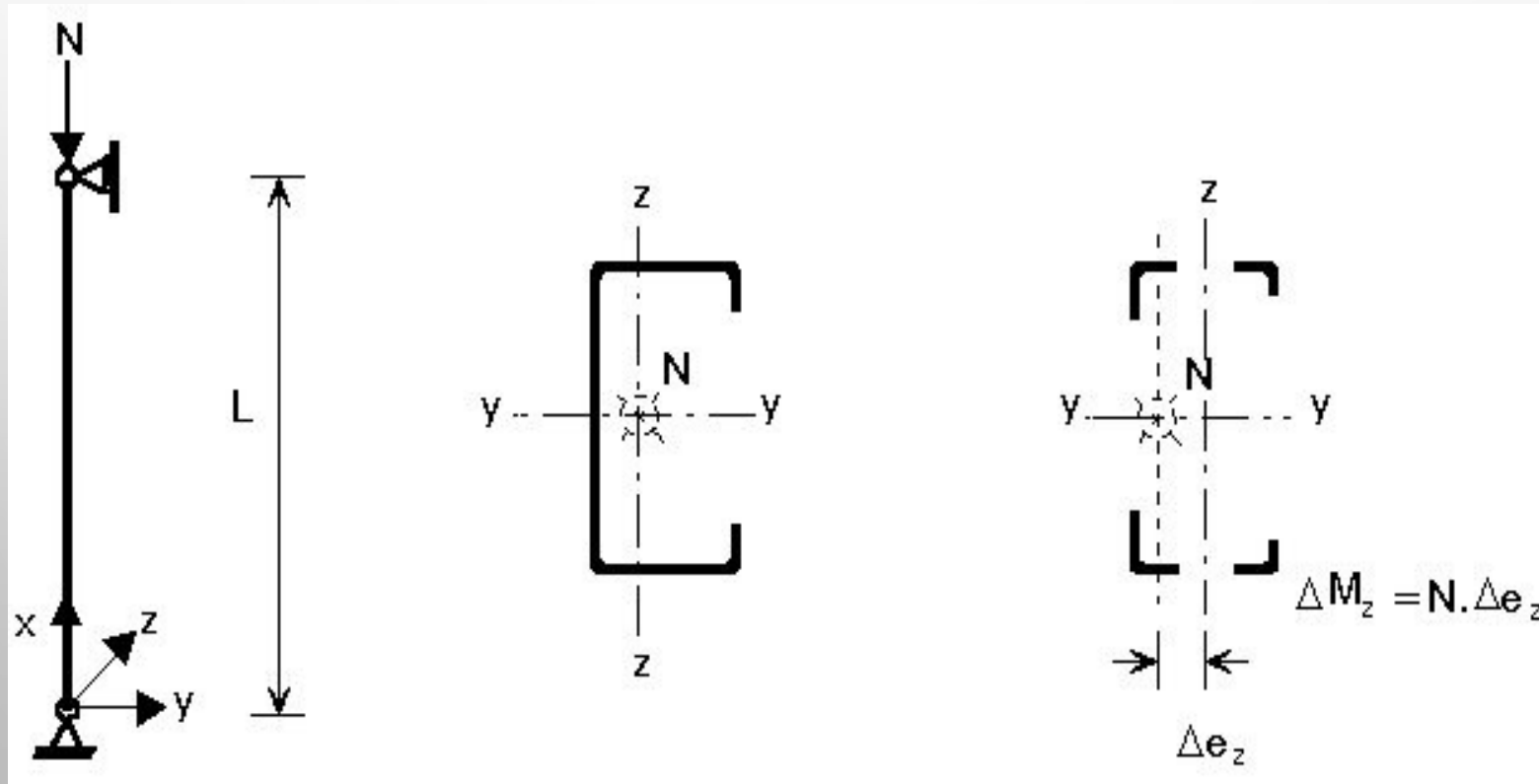
$M_y, M_z$  są nominalnymi zewnętrznymi momentami zginającymi zgodnie z teorią pierwszego rzędu.

$M_{Rd,y}, M_{Rd,z}$  są nośnościami na zginanie w odniesieniu do efektywnego przekroju poprzecznego

$k_y, k_{LT}, k_z$  są współczynnikami wzmocnienia obejmującymi efekty drugiego rzędu.

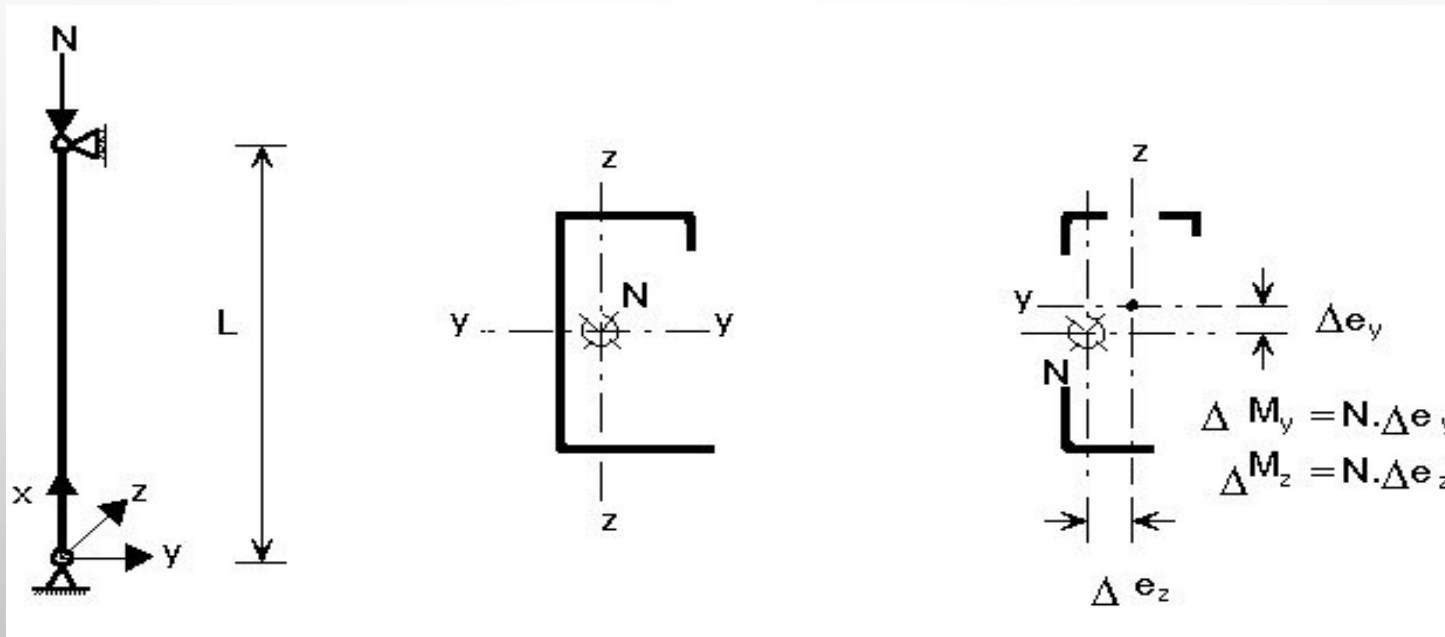
## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Wyboczenie przekrojów niesymetrycznych



## PROJEKTOWANIE SŁUPÓW OSIOWO ŚCISKANYCH

### Wyboczenie przekrojów niesymetrycznych

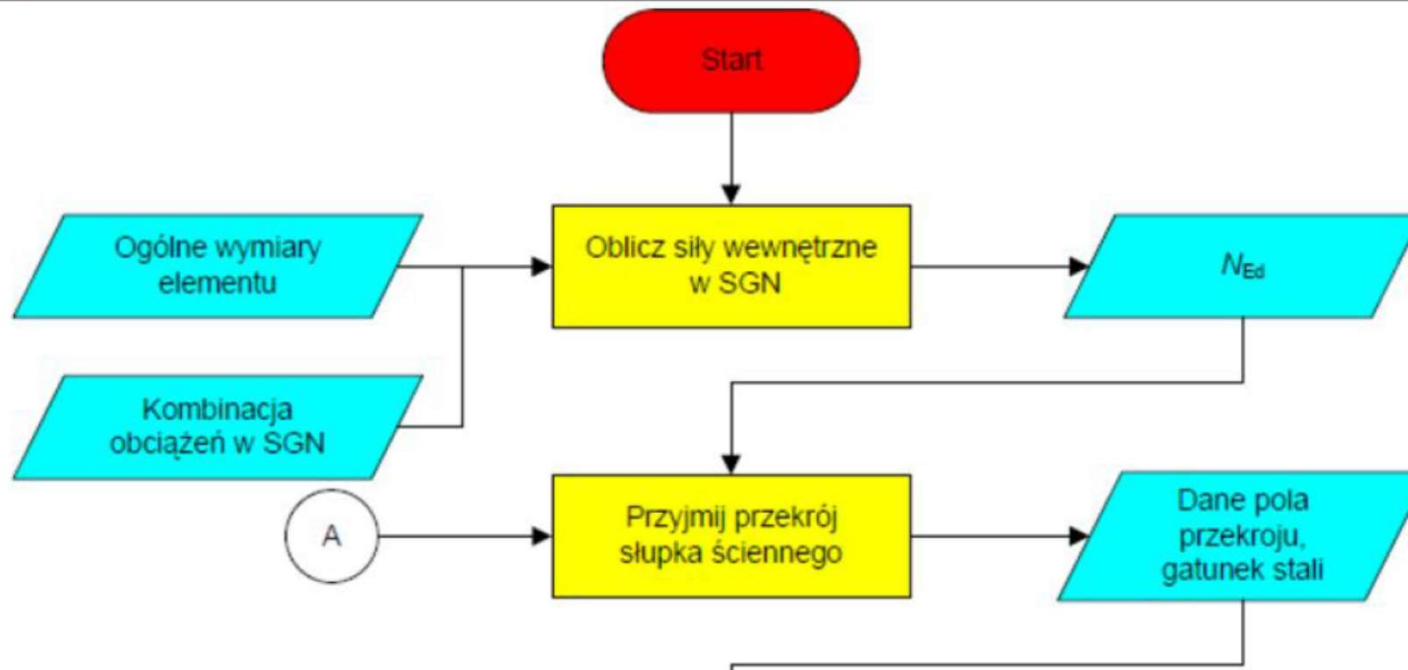


Równanie obejmuje przypadek łączonego zginania i ściskania osiowego z wyboczeniem skręcania bocznego, jeżeli  $M_{Rd,y}$  jest nośnością na zginanie uwzględniającą wyboczenie skrętne, i jeżeli  $k_{LT}$  jest odpowiednim współczynnikiem wzmocnienia.

## Schematy blokowe obliczania słupów ściskanych

**Schemat przedstawia projektowanie przegubowego ściskanego słupa ściennego. Słup wykonany jest z zimnogiętego ceownika z odgięciami usztywiającymi.**

W praktycznym stosowaniu przekrojów cienkościennych zgodnie z PN-EN1993, projektanci będą zwykle korzystać z oprogramowania komputerowego bądź wykorzystywać informacje dostarczone przez producentów. Schemat przedstawia szczegóły procedur obliczeniowych by pokazać podstawy metody.





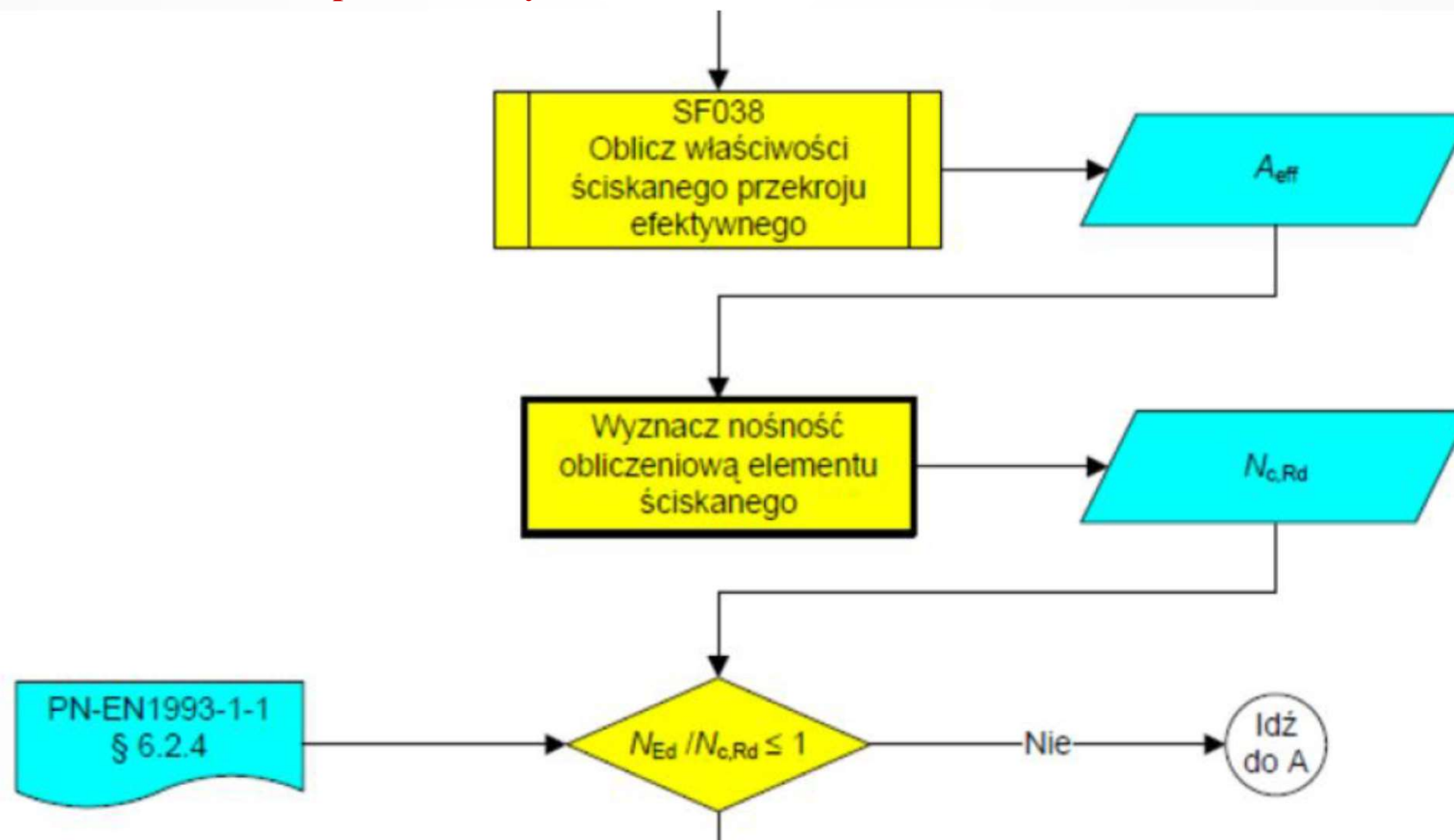


## KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

### Schematy blokowe obliczania słupów ściskanych



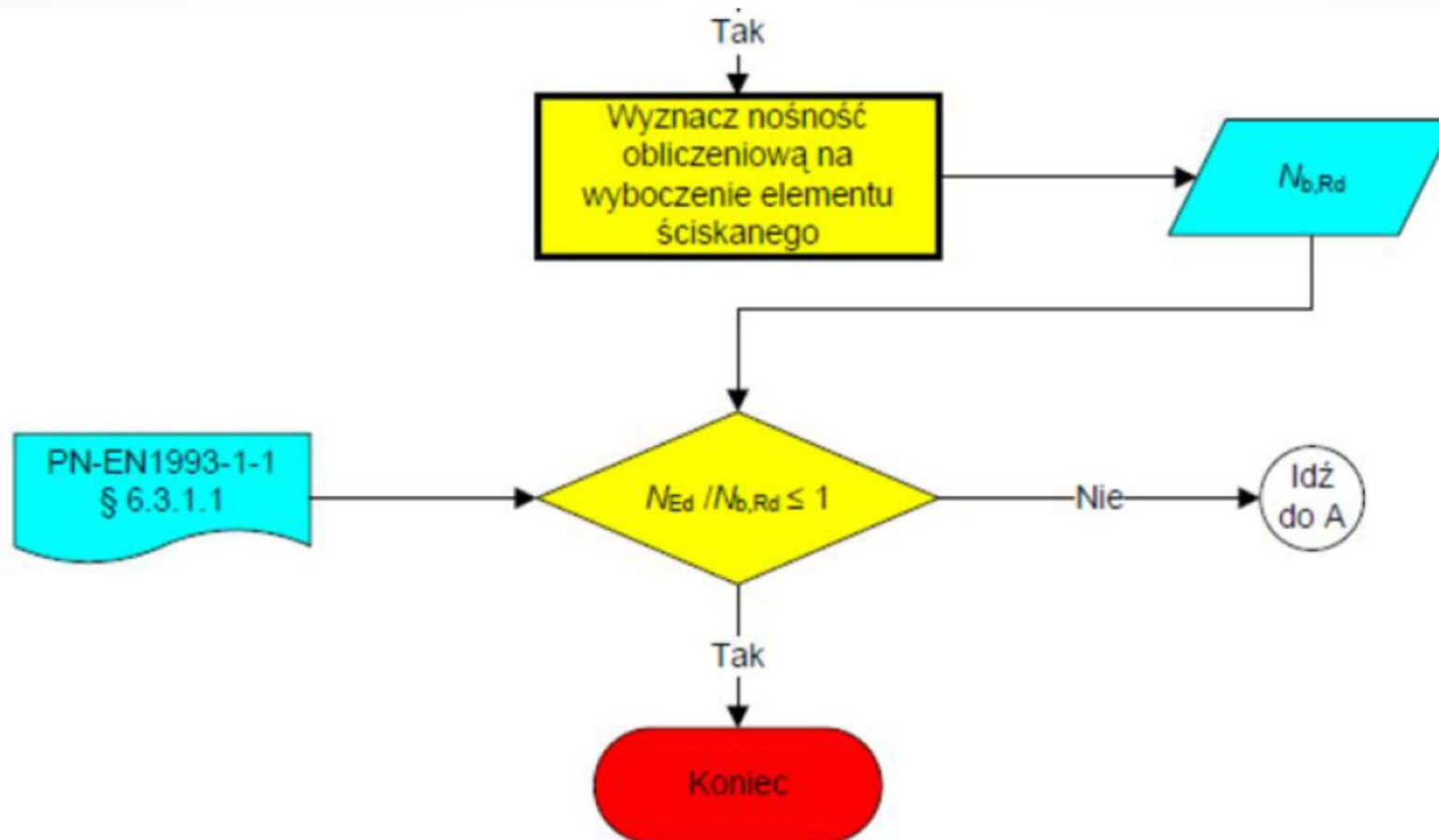


## KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

### Schematy blokowe obliczania słupów ściskanych

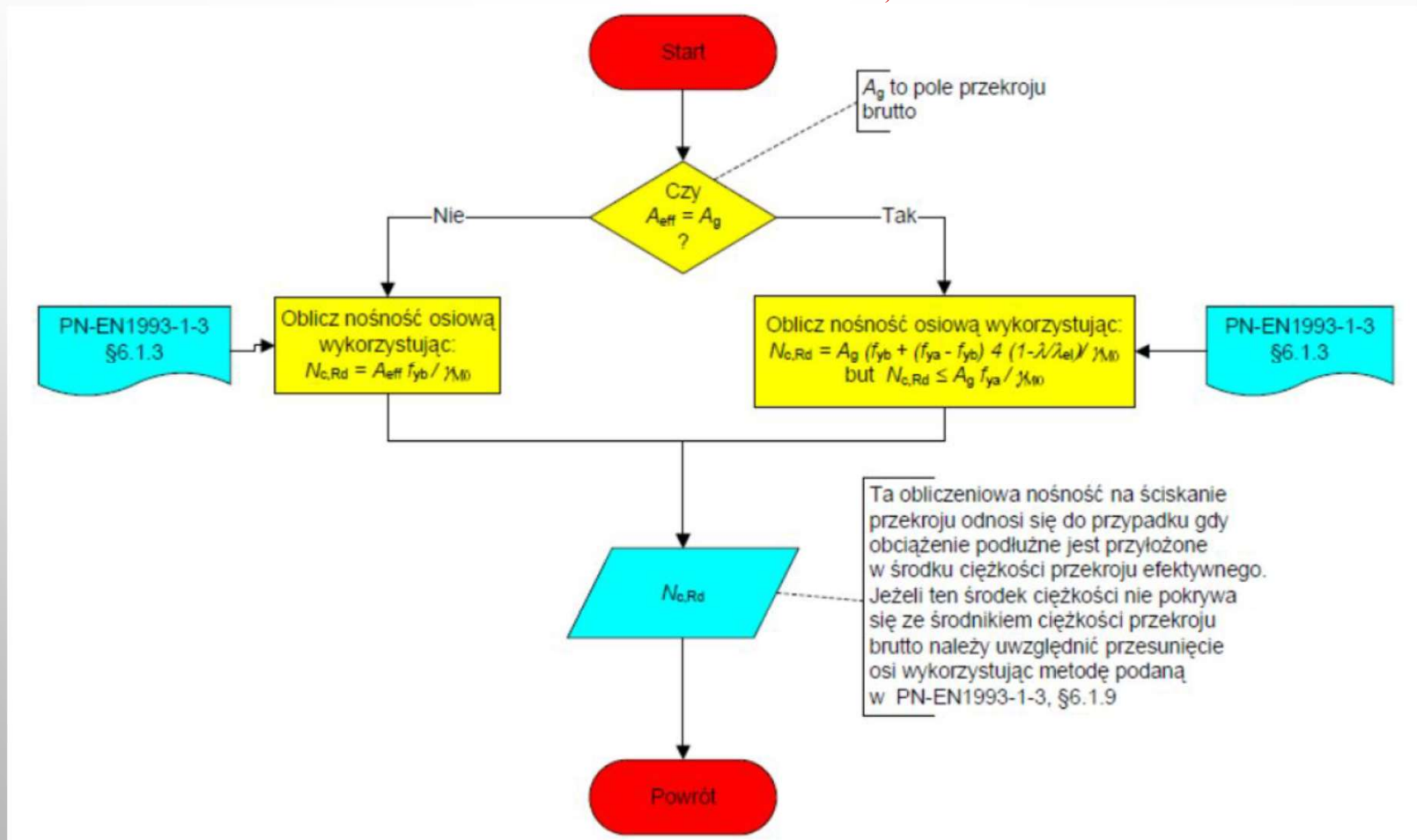


# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

## Schematy blokowe obliczania nośności przekrojów ściskanych $N_{c,Rd}$



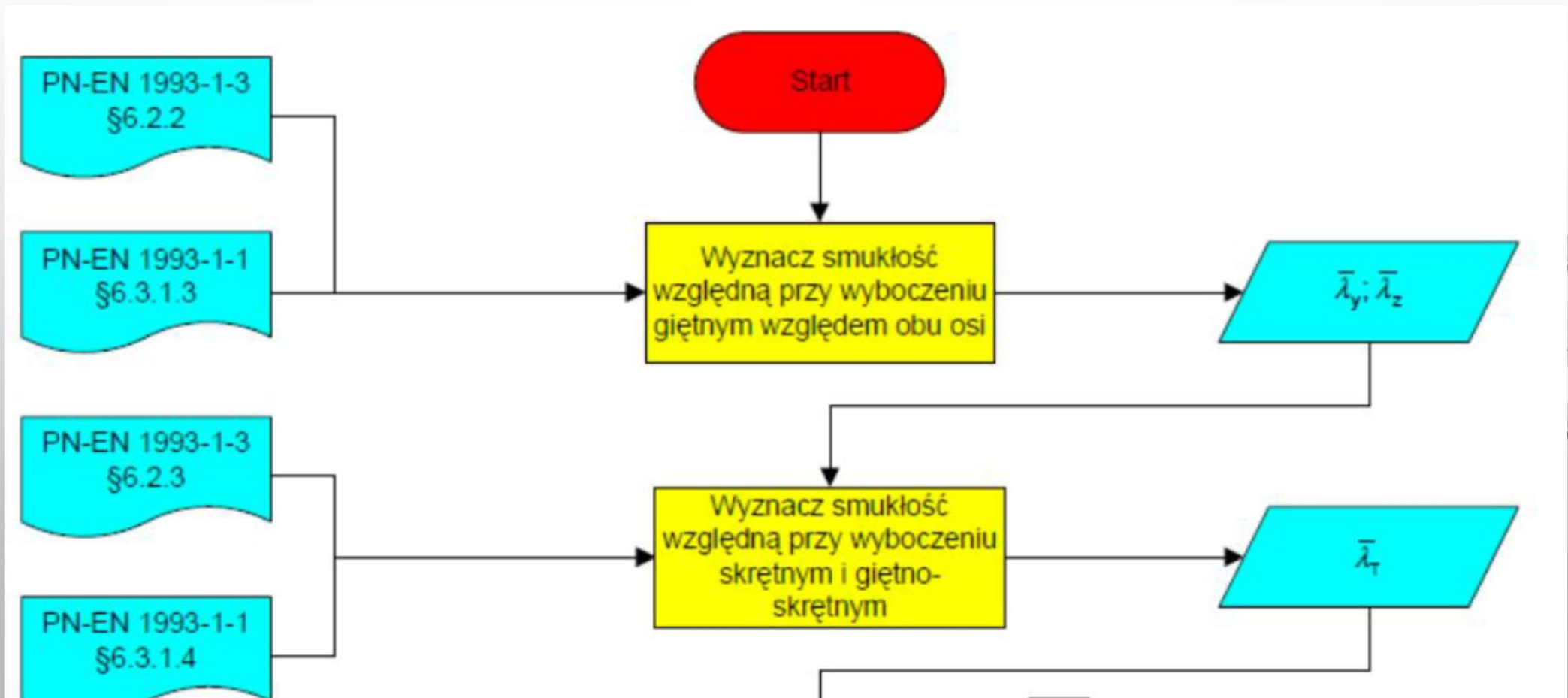


# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

Schematy blokowe obliczania nośności wyboczeniowej elementu przy ściskaniu  $N_{b,Rd}$

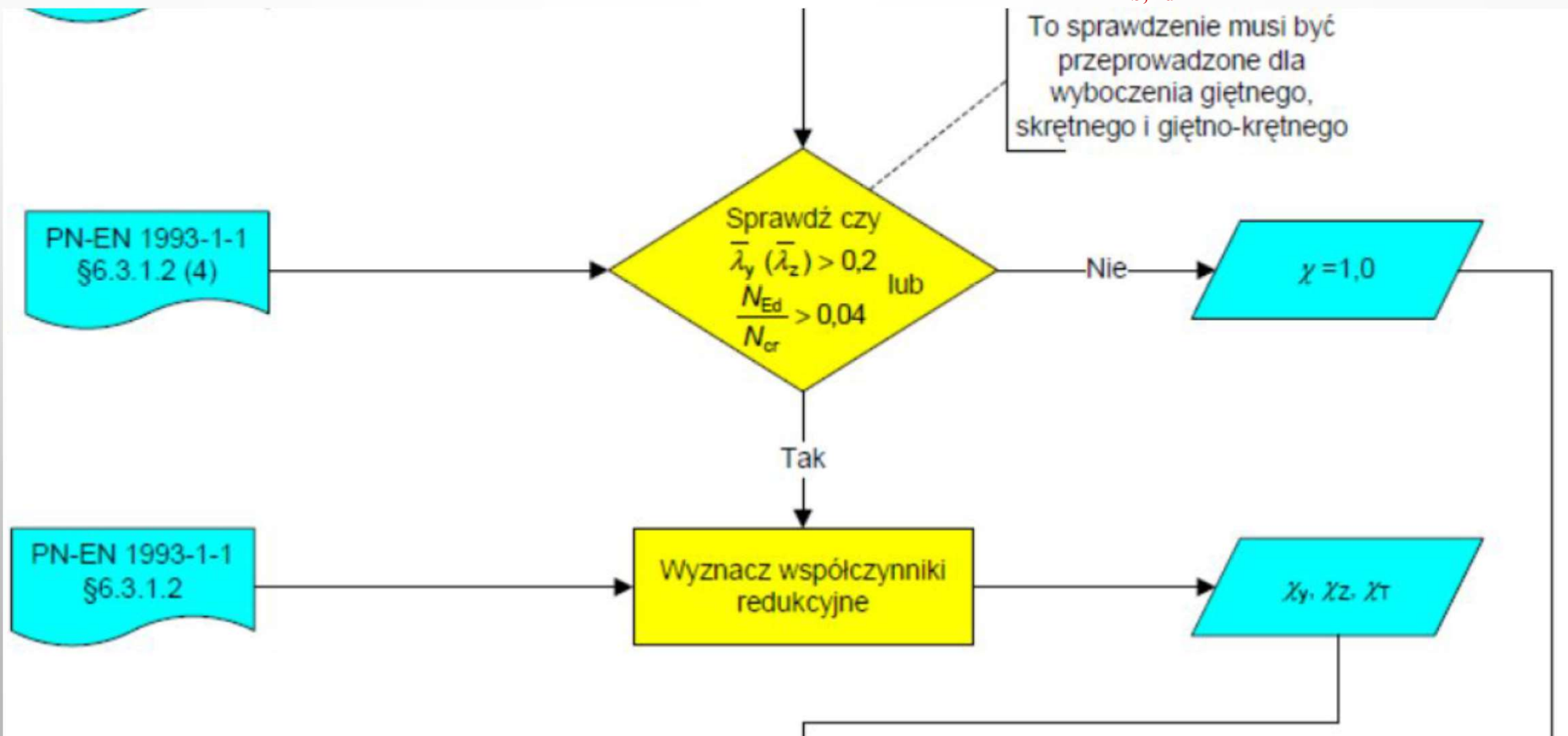


# KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

Schematy blokowe obliczania nośności wyboczeniowej elementu przy ściskaniu  $N_{b,Rd}$



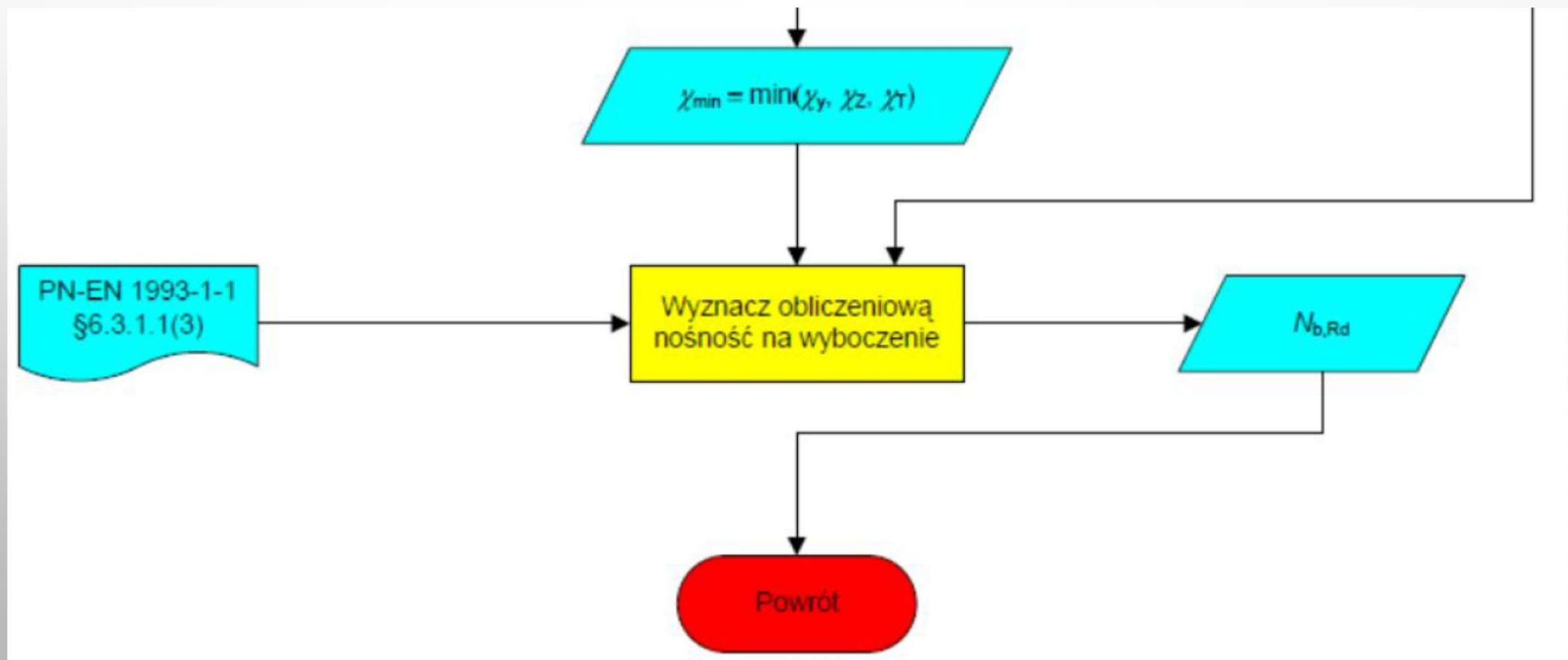


## KONSTRUKCJE CIENKOŚCIENNE

W3

KSZTAŁTOWNIKI GIĘTE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA SŁUPÓW

**Schematy blokowe obliczania nośności wyboczeniowej elementu przy ściskaniu  $N_{b,Rd}$**



## Siła krytyczna $N_{cr,T}$ przy sprężystym wyboczeniu skrętnym

Siła krytyczna  $N_{cr,T}$  przy sprężystym wyboczeniu skrętnym elementu podpartego przegubowo na końcach jest określona wzorem:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \cdot \left( G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{l_T^2} \right)$$

Biegunowy promień bezwładności wyznacza się ze wzoru:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$$

gdzie:  $G$  – moduł sprężystości poprzecznej (przy ścinaniu).

$I_t$  – moment bezwładności przy skręcaniu,

$I_w$  – wycinkowy moment bezwładności,

$i_y$  – promień bezwładności przekroju względem osi  $y$ ,

$i_z$  – promień bezwładności przekroju względem osi  $z$ ,

$l_T$  – długość wyboczeniowa przy wyboczeniu skrętnym,

$y_0$  i  $z_0$  – współrzędne środka ścinania względem środka ciężkości przekroju brutto.

### Siła krytyczna $N_{cr,TF}$ przy sprężystym wyboczeniu giętno - skrętnym

W przypadku elementów o przekroju bisymetrycznym ( $y_0 = z_0 = 0$ ), siła krytyczna  $N_{cr,TF}$  przy sprężystym wyboczeniu giętno-skrętnym elementu podpartego przegubowo na końcach może:

$$N_{cr,TF} = N_{cr,TF}$$

Powyższy warunek jest miarodajny, gdy  $N_{cr,T} < N_{cr,y}$  oraz  $N_{cr,T} < N_{cr,z}$

W przypadku przekrojów monosymetrycznych o osi symetrii  $y$  (gdy  $z_0 = 0$ ), siłę krytyczną  $N_{cr,TF}$  przy wyboczeniu giętno - skrętnym wyznacza się ze wzoru:

$$N_{cr,T} = \frac{N_{cr,y}}{2 \cdot \beta} \cdot \left[ 1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right]$$

gdzie:

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2$$