

Podstawy wymiarowanie żelbetowych przekroi zginanych

(na podstawie : R.Gąckowski „Tablice i algorytmy”)

1. Wiadomości ogólne do projektowania konstrukcji

1.1. Stany graniczne konstrukcji

Zgodnie z normą *PN-EN 1990:2004 Eurokod. Podstawy projektowania konstrukcji*, każdą konstrukcję należy zaprojektować i wykonać w taki sposób, aby w przewidzianym okresie użytkowania, z należytym poziomem niezawodności i bez dodatkowych kosztów, przejmowała wszystkie oddziaływania i wpływy, które przewiduje się w czasie eksploatacji, oraz aby pozostała przydatna do przewidzianego użytkowania.

Konstrukcję należy zaprojektować tak, aby jej nośność, użyteczność i trwałość była dostateczna podczas eksploatacji, oraz aby na skutek wybuchów, uderzeń i konsekwencji ludzkich błędów nie została ona uszkodzona w zakresie nieproporcjonalnym do początkowej przyczyny. Rozróżnia się 2 stany graniczne konstrukcji:

- Stan Graniczny Nośności – (ULS – *Ultimate Limit State*),
- Stan Graniczny Użyteczności – (SLS – *Serviceability Limit State*).

Sprawdzenie ULS związane jest z bezpieczeństwem ludzi lub konstrukcji, natomiast sprawdzenie SLS dotyczy funkcji konstrukcji lub elementu konstrukcji w warunkach zwykłego użytkowania, komfortu użytkowników oraz wyglądu obiektu budowlanego.

Stan Graniczny Nośności – ULS

Jako miarodajne należy sprawdzać następujące stany graniczne nośności ULS:

- **EQU** – stan graniczny równowagi konstrukcji lub jakiegokolwiek jej części uważanej za ciało sztywne, na skutek zmiany wartości lub rozkładu oddziaływań: $E_{d,dst} \leq E_{d,stb}$, odpowiednio efekty oddziaływań destabilizujących i stabilizujących;
- **STR** – stan graniczny zniszczenia na skutek: nadmiernego odkształcenia konstrukcji lub jej elementu łącznie z podporami i fundamentami przy decydującym znaczeniu wytrzymałości materiału: $E_d \leq R_d$;
- **GEO** – stan graniczny zniszczenia lub nadmiernego odkształcenia podłoża przy decydującym udziale jego wytrzymałości: $E_d \leq R_d$;
- **FAT** – stan graniczny zniszczenia spowodowanego zmęczeniem lub innymi efektami zależnymi od czasu.

Stan Graniczny Użyteczności – SLS

Rozróżnia się stany graniczne użyteczności:

- ugięcia i innych odkształceń (pogarszających wygląd konstrukcji na skutek dużych deformacji i rys, komfort użytkowników i funkcjonowanie obiektu);
- drgań (powodujących dyskomfort użytkowników, ograniczających zakres użytkowania);
- uszkodzeń (pogarszających wygląd, obniżających trwałość, wpływających na funkcjonowanie konstrukcji).

Każdą konstrukcję należy zaprojektować na odpowiednią sytuację obliczeniową. Sytuacje obliczeniowe dzielą się na:

- **trwale sytuacje obliczeniowe** – w odniesieniu do zwykłych warunków użytkowania, gdzie czas trwania jest porównywalny do okresu użytkowania konstrukcji;
- **przejściowe sytuacje obliczeniowe** – w odniesieniu do chwilowych warunków użytkowania konstrukcji, gdzie czas trwania jest znacznie krótszy niż okres użytkowania konstrukcji;

- **wyjatkowe sytuacje obliczeniowe** – w odniesieniu do wyjątkowych warunków konstrukcji lub jej eksploatacji (np. pożar, wybuch, uderzenia lub lokalne zniszczenia konstrukcji);
- **sytuacje sejsmiczne** – w odniesieniu do konstrukcji poddanej oddziaływaniom sejsmicznym.

1.2. Obciążenia i oddziaływania konstrukcji

Oddziaływania F – to suma wszystkich sił przyłożonych do konstrukcji (oddziaływania bezpośrednie) oraz wszystkie wymuszone odkształcenia lub przyspieszenia spowodowane zmianami termicznymi, wilgotnością, różnicami osiadań lub czynnikami sejsmicznymi (oddziaływania pośrednie).

Efekt oddziaływań E – to siły wewnętrzne, momenty, naprężenia, odkształcenia powstałe na skutek oddziaływań F.

Oddziaływania stałe G – ciężar własny konstrukcji i wykończenia, ciężar stałych elementów wyposażenia, obciążenie od umocowania urządzeń, oddziaływania od skurczu i nierównomiernego osiadania, obciążenia od sprężania. W obliczeniach należy posługiwać się wartościami $G_{k,inf}$ oraz $G_{k,sup}$ zgodnie z PN-EN 1991-1-1:2004 Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-1: Oddziaływania ogólne. Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach. Załącznik A1.

Oddziaływania zmienne Q – obciążenie użytkowe, obciążenie klimatyczne od temperatury, śniegu i wiatru, obciążenie technologiczne. W obliczeniach należy posługiwać się wartościami $Q_{k,inf}$ (wartość najmniejsza), $Q_{k,sup}$ (wartość największa) oraz $Q_{k,nom}$ (wartość charakterystyczna nominalna, gdy nie jest znany rozkład statystyczny). Wartościami reprezentatywnymi oddziaływań zmiennych są:

- **wartość kombinacyjna**: wyrażana w postaci $\psi_0 \cdot Q_k$ i stosowana przy sprawdzaniu ULS oraz nieodwracalnych stanów SLS;
- **wartość częsta**: wyrażana w postaci $\psi_1 \cdot Q_k$ i stosowana przy sprawdzaniu ULS z uwzględnieniem oddziaływań wyjątkowych oraz odwracalnych stanów granicznych ULS i SLS;
- **wartość quasi-stała**: wyrażana w postaci $\psi_2 \cdot Q_k$ i stosowana przy sprawdzaniu ULS z uwzględnieniem oddziaływań wyjątkowych, przy sprawdzaniu nieodwracalnych SLS oraz przy obliczeniach efektów długotrwałych;
- **wartość nieczęsta**: wyrażana w postaci $\psi_{1,inf} \cdot Q_k$ i stosowana przy sprawdzaniu niektórych ULS (obciążenie pojazdami kołowymi, oddziaływania termiczne, oddziaływania wiatrem).

Oddziaływania wyjątkowe A – obciążenia od huraganowego wiatru lub zamieci śnieżnej, obciążenie od wybuchu, pożaru, uderzenia pojazdem kołowym.

Oddziaływania sejsmiczne A_E – wywołane ruchami gruntu podczas trzęsienia ziemi.

Wartości obliczeniowe oddziaływań – F_d:

$$F_d = \gamma_f \cdot F_{rep}$$

F_{rep} – odpowiednia wartość reprezentatywna oddziaływania $F_{rep} = \psi \cdot F_k$

gdzie:

F_k – jest wartością charakterystyczną oddziaływań,

γ_f – współczynnik częściowy dla oddziaływania, uwzględniający możliwość niekorzystnych odchyień wartości oddziaływania od wartości reprezentatywnych $\psi = 1,0$ lub ψ_0, ψ_1, ψ_2 .

Tablica 1.1. Zalecane wartości współczynników ψ dla budynków wg Eurokodu

Oddziaływania	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Obciążenia zmienne w budynkach:			
Kategoria A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
Kategoria B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
Kategoria C: miejsca zebrań	0,7	0,7	0,6
Kategoria D: powierzchnie handlowe	0,7	0,7	0,6
Kategoria E: powierzchnie magazynowe	1,0	0,9	0,8
Kategoria F: powierzchnie ruchu pojazdów (ciężar pojazdu ≤ 30 kN)	0,7	0,7	0,6
Kategoria G: powierzchnie ruchu pojazdów (30 kN < ciężar pojazdu ≤ 160 kN)	0,7	0,5	0,3
Kategoria H: dachy	0	0	0
Obciążenie budynków śniegiem:			
Finlandia, Islandia, Norwegia, Szwecja	0,7	0,5	0,2
Pozostałe kraje CEN, miejscowości położone na wysokości $H > 1000$ m n.p.m.	0,7	0,5	0,2
Pozostałe kraje CEN, miejscowości położone na wysokości $H \leq 1000$ m n.p.m.	0,5	0,2	0
Obciążenie wiatrem	0,6	0,2	0
Obciążenie temperaturą	0,6	0,5	0

Wartości obliczeniowe efektów oddziaływań – E_d :

$$E_d = \gamma_{Sd} \cdot E\{\gamma_{f,i} \cdot F_{rep,i}; a_d\} \quad i \geq 1$$

- γ_{Sd} – współczynnik częściowy uwzględniający niepewności modelu efektów oddziaływań lub niektórych przypadków modelowania oddziaływań,
 $\gamma_{f,i}$ – współczynnik częściowy dla oddziaływań, uwzględniający możliwość niekorzystnych odchyłek wartości oddziaływań od wartości reprezentatywnych,
 $F_{rep,i}$ – wartość reprezentatywna oddziaływania,
 a_d – wartość obliczeniowa wielkości geometrycznej.

Wartości obliczeniowe właściwości materiału lub wyrobu – X_d :

$$X_d = \eta \cdot \frac{X_k}{\gamma_m}$$

- η – średnia wartość współczynnika konwersji uwzględniająca efekty objętości i skali, efekty wilgotności i temperatury oraz inne ważne parametry,
 X_k – wartość charakterystyczna właściwości materiału lub wyrobu,
 γ_m – częściowy współczynnik dla właściwości materiału lub wyrobu, uwzględniający niekorzystne odchyłki właściwości materiału lub wyrobu od wartości charakterystycznej.

Nośność obliczeniowa – R_d :

$$R_d = \frac{R(X_{d,i}; a_d)}{\gamma_{Rd}} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot R \left\{ \eta_i \cdot \frac{X_{k,i}}{\gamma_{m,i}}; a_d \right\} \quad i \geq 1$$

γ_{Rd} – częściowy współczynnik uwzględniający niepewność modelu nośności oraz odchyłek geometrycznych, jeżeli nie zostały one uwzględnione oddzielnie,

$X_{d,i}$ – wartość obliczeniowa właściwości materiału i .

1.3. Kombinacje oddziaływań

W każdym krytycznym przypadku obciążenia należy wyznaczyć obliczeniowy efekt oddziaływań wykorzystując kombinację oddziaływań, które mogą wystąpić jednocześnie. W każdej kombinacji powinny być określone wiodące oddziaływania zmienne oraz oddziaływania wyjątkowe.

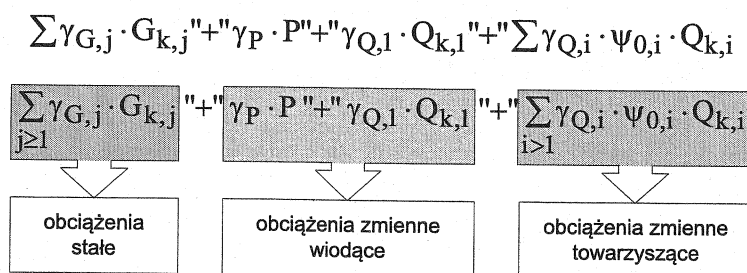
STAN GRANICZNY NOŚNOŚCI – ULS

I. Kombinacje podstawowe – kombinacje oddziaływań w przypadku trwałych i przejściowych sytuacji obliczeniowych:

$$E_d = \gamma_{Sd} \cdot E \{ \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j}; \gamma_P \cdot P; \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}; \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \} \quad j \geq 1; \quad i > 1$$

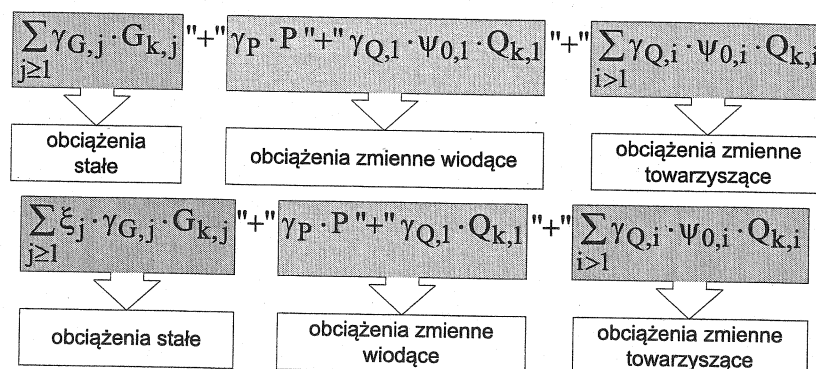
Kombinacja efektów oddziaływań powinna uwzględnić wartości obliczeniowe wiodących oddziaływań zmiennych oraz obliczeniową kombinację wartości towarzyszących oddziaływań zmiennych. Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach $\{ \dots \}$ można przedstawić:

Dla stanów EQU:



Dla stanów STR i GEO:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \\ \sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \end{array} \right.$$



”+” – oznacza że „należy uwzględnić w kombinacji z”,

Σ – oznacza „łączny efekt”,

ξ – oznacza współczynnik redukcji dla niekorzystnych oddziaływań stałych G.

Tablica 1.2. Wartości obliczeniowe oddziaływań EQU – (Zestaw A)

$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$\gamma_{Gj,sup} \cdot G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
$\gamma_{Gj,sup} = 1,10$	$\gamma_{Gj,inf} = 0,90$	$\gamma_{Q,1} = 1,50$ ⁽³⁾ $\gamma_{Q,1} = 0$ ⁽⁴⁾		$\gamma_{Q,i} = 1,50$ ⁽³⁾ $\gamma_{Q,i} = 0$ ⁽⁴⁾
<div>(1) – Oddziaływaniami zmiennymi są te, które uwzględniono w tablicy 1.1</div> <div>(2) – Oddziaływania towarzyszące zmienne główne, jeżeli takie występują</div> <div>(3) – Dla oddziaływań niekorzystnych</div> <div>(4) – Dla oddziaływań korzystnych</div>				

Tablica 1.3. Wartości obliczeniowe oddziaływań STR i GEO – (Zestaw B)

$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE ZMIENNE	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$\gamma_{Gj,sup} \cdot G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
$\gamma_{Gj,sup} = 1,10$	$\gamma_{Gj,inf} = 0,90$	$\gamma_{Q,1} = 1,50$ ⁽³⁾ $\gamma_{Q,1} = 0$ ⁽⁴⁾		$\gamma_{Q,i} = 1,50$ ⁽³⁾ $\gamma_{Q,i} = 0$ ⁽⁴⁾

$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE ZMIENNE	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$\gamma_{Gj,sup} \cdot G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} \cdot G_{kj,inf}$		$\gamma_{Q,1} \cdot \psi_{0,1} \cdot Q_{k,1}$	$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$	$\gamma_{Gj,inf} = 1,00$		$\gamma_{Q,1} = 1,50^{(3)}$ $\gamma_{Q,1} = 0^{(4)}$	$\gamma_{Q,i} = 1,50^{(3)}$ $\gamma_{Q,i} = 0^{(4)}$
$\sum_{j \geq 1} \xi_j \cdot \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE ZMIENNE	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$\xi \cdot \gamma_{Gj,sup} \cdot G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
$\gamma_{Gj,sup} = 1,35$ $\xi = 0,85^{(5)}$	$\gamma_{Gj,inf} = 0,90$	$\gamma_{Q,1} = 1,50^{(3)}$ $\gamma_{Q,1} = 0^{(4)}$		$\gamma_{Q,i} = 1,50^{(3)}$ $\gamma_{Q,i} = 0^{(4)}$
⁽¹⁾ – Oddziaływaniami zmiennymi są te, które uwzględniono w tablicy 1.1 ⁽²⁾ – Oddziaływania towarzyszące zmienne główne, jeżeli takie występują ⁽³⁾ – Dla oddziaływań niekorzystnych ⁽⁴⁾ – Dla oddziaływań korzystnych ⁽⁵⁾ – Zalecana wartość do zastosowania tak, aby $\xi \cdot \gamma_{Gj,sup} = 0,85 \cdot 1,35 = 1,15$				

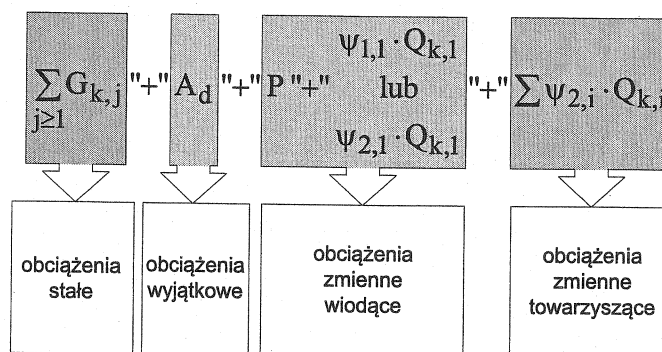
Tablica 1.4. Wartości obliczeniowe oddziaływań STR i GEO – (Zestaw C)

$\sum \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} "+" \gamma_P \cdot P "+" \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} "+" \sum \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$\gamma_{Gj,sup} \cdot G_{kj,sup}$	$\gamma_{Gj,inf} \cdot G_{kj,inf}$	$\gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1}$		$\gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$
$\gamma_{Gj,sup} = 1,00$	$\gamma_{Gj,inf} = 1,00$	$\gamma_{Q,1} = 1,30^{(3)}$ $\gamma_{Q,1} = 0^{(4)}$		$\gamma_{Q,i} = 1,30^{(3)}$ $\gamma_{Q,i} = 0^{(4)}$
⁽¹⁾ – Oddziaływaniami zmiennymi są te, które uwzględniono w tablicy 1.1 ⁽²⁾ – Oddziaływania towarzyszące zmienne główne, jeżeli takie występują ⁽³⁾ – Dla oddziaływań niekorzystnych ⁽⁴⁾ – Dla oddziaływań korzystnych				

II. Kombinacje oddziaływań w przypadku wyjątkowych sytuacji obliczeniowych:

$$E_d = E\{G_{k,j}; A_d; P; (\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}) \text{ lub } (\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}); \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; \quad i > 1$$

Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach {...} można przedstawić:



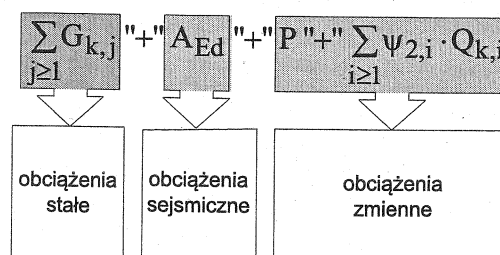
Tablica 1.5. Wartości obliczeniowe oddziaływań przyjmowane do wyjątkowych kombinacji oddziaływań

$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" A_d "+" P "+" \begin{matrix} \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} \\ \text{lub} \\ \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1} \end{matrix} "+" \sum \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STALE		WIODĄCE WYJĄTKOWE	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	A_d	ψ_{11} lub $\psi_{21} \cdot Q_{k1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$
⁽¹⁾ – Oddziaływaniami zmiennymi są te, które uwzględniono w tablicy 1.1				
⁽²⁾ – Oddziaływania towarzyszące zmienne główne, jeżeli takie występują				

III. Kombinacje oddziaływań w przypadku sejsmicznych sytuacji obliczeniowych:

$$E_d = E\{G_{k,j}; A_{Ed}; P; \psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}\} \quad j \geq 1; \quad i \geq 1$$

Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach {...} można przedstawić:



Tablica 1.6. Wartości obliczeniowe oddziaływań przyjmowane do sejsmicznych kombinacji oddziaływań

$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} \text{ "+" } A_{Ed} \text{ "+" } P \text{ "+" } \sum_{i \geq 1} \Psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$				
ODDZIAŁYWANIA				
STAŁE		WIODĄCE WYJĄTKOWE	TOWARZYSZĄCE ZMIENNE ⁽¹⁾	
niekorzystne	korzystne		główne ⁽²⁾	pozostałe
G _{kj,sup}	G _{kj,inf}	γ ₁ · A _{Ek} lub A _{Ek}	Ψ _{2,i} · Q _{k,i}	
⁽¹⁾ – Oddziaływaniami zmiennymi są te, które uwzględniono w tablicy 1.1				
⁽²⁾ – Oddziaływania towarzyszące zmienne główne jeżeli takie występują				

W obliczeniach ULS należy stosować częściowe współczynniki dla materiałów zgodnie z tablicą 1.7.

Tablica 1.7. Współczynniki częściowe dla materiałów w ULS

Sytuacja obliczeniowa	Beton γ_c	Stal zbrojeniowa γ_s	Stal sprężająca γ_s
Trwała i przejściowa	1,4	1,15	1,15
Wyjątkowa	1,2	1,0	1,0

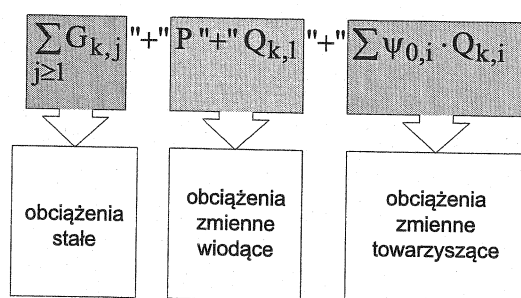
STAN GRANICZNY UŻYTKOWALNOŚCI – SLS

I. Kombinacja charakterystyczna:

Kombinacja charakterystyczna stosowana jest zazwyczaj dla nieodwracalnych stanów granicznych.

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; Q_{k,1}; \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}\} \quad j \geq 1; \quad i \geq 1$$

Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach {...} można przedstawić:



Tablica 1.8. Wartości obliczeniowe w charakterystycznych kombinacjach oddziaływań

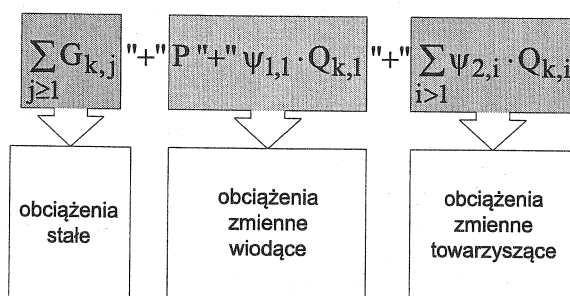
$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} "+" P "+" Q_{k,1} "+" \sum \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$			
ODDZIAŁYWANIA			
STAŁE G_d		ZMIENNE Q_d	
Niekorzystne	Korzystne	Wiodące	Pozostałe
$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$Q_{k,1}$	$\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$

II. Kombinacja częsta:

Kombinacja częsta stosowana jest zazwyczaj dla odwracalnych stanów granicznych.

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}; \psi_{2,1} \cdot Q_{k,i}\}$$

Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach {...} można przedstawić:



Tablica 1.9. Wartości obliczeniowe w częstych kombinacjach oddziaływań

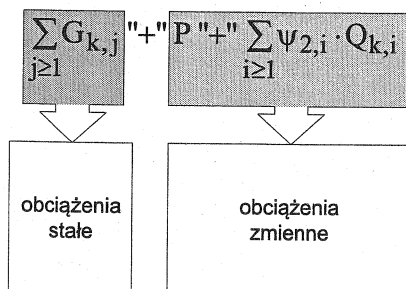
$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \psi_{1,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$			
ODDZIAŁYWANIA			
STAŁE G_d		ZMIENNE Q_d	
Niekorzystne	Korzystne	Wiodące	Pozostałe
$G_{kj,sup}$	$G_{kj,inf}$	$\psi_{1,1} \cdot Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

III. Kombinacja quasi-stała:

Kombinacja quasi-stała stosowana jest zazwyczaj dla oceny efektów długotrwałych i wyglądu konstrukcji.

$$E_d = E\{G_{k,j}; P; \psi_{2,1} \cdot Q_{k,i}\}$$

Kombinację oddziaływań podanych we wzorze w nawiasach {...} można przedstawić:



Tablica 1.10. Wartości obliczeniowe w quasi-stałych kombinacjach oddziaływań

$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + P + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$			
ODDZIAŁYWANIA			
STAŁE G_d		ZMIENNE Q_d	
Niekorzystne	Korzystne	Wiodące	Pozostałe
$G_{k,j,sup}$	$G_{k,j,inf}$	$\psi_{2,1} \cdot Q_{k,1}$	$\psi_{2,i} \cdot Q_{k,i}$

1.4. Beton do projektowania konstrukcji

1.4.1. Minimalne klasy betonu

Tablica 1.11. Orientacyjne minimalne klasy betonu

Rodzaj konstrukcji, elementów, wyrobów	Minimalna klasa betonu
Konstrukcje betonowe	$\geq C16/20$
Konstrukcje żelbetowe	
– fundamenty budowli	$\geq C16/20$
– elementy zginane monolityczne przy obciążeniu zmiennym poniżej 8 kN/m ²	$\geq C16/20$
– elementy zginane monolityczne przy obciążeniu zmiennym powyżej 8 kN/m ²	C20/25 ÷ C25/30
– elementy ściskane monolityczne	C20/25 ÷ C25/30
– słupy hal przemysłowych z ciężkimi suwnicami	C20/25 ÷ C30/37
– łupiny i elementy cienkościenne	C20/25 ÷ C35/45
– elementy prefabrykowane	C20/25 ÷ C30/37
– fundamenty pod maszyny	C25/30 ÷ C35/45
– konstrukcje poddane obciążeniom wielokrotnie zmiennym	C25/30 ÷ C35/45
Konstrukcje sprężone	
– strunobetonowe	C30/37 ÷ C45/55
– kablobetonowe	C25/30 ÷ C40/50

1.4.2. Wytrzymałości i moduł sprężystości dla betonu zwykłego i BWW

1. Średnia wytrzymałość na ściskanie:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad [\text{MPa}]$$

2. Średnia wytrzymałość na rozciąganie:

$$\begin{cases} f_{ctm} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2} \dots\dots\dots C12/15 \div C50/60 \\ f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + 0,1 \cdot f_{cm}) \dots\dots\dots C55/67 \div C90/105 \end{cases}$$

3. Średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu:

$$f_{ctm,fl} = \max \left[\left(1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctm}, f_{ctm} \right] \quad h - \text{cała wysokość elementu w [mm]}$$

4. Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie:

$$\begin{cases} f_{ctk,0,05} = 0,7 \cdot f_{ctm} & \text{kwantyl 5\%} \\ f_{ctk,0,95} = 1,3 \cdot f_{ctm} & \text{kwantyl 95\%} \end{cases}$$

5. Charakterystyczna wytrzymałość betonu na rozciąganie przy zginaniu:

$$f_{ctk,fl} = \max \left[\left(1,6 - \frac{h}{1000} \right) \cdot f_{ctk}, f_{ctk} \right] \quad h - \text{wysokość przekroju w [mm]}$$

6. Sieczny moduł sprężystości betonu:

$$E_{cm} = 22 \cdot (0,1 \cdot f_{cm})^{0,3}$$

7. Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie:

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} \quad f_{cd,pl} = \alpha_{cc,pl} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$

8. Obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c} \quad f_{ctd,pl} = \alpha_{ct,pl} \cdot \frac{f_{ctk,0,05}}{\gamma_c}$$

α_{cc} , α_{ct} , $\alpha_{cc,pl}$, $\alpha_{ct,pl}$ – współczynniki uwzględniające wpływy obciążenia długotrwałego, niekorzystny efekt sposobu przyłożenia obciążenia oraz w przypadku słupów – wpływ małych przekrojów na wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie.

- Wartości α_{cc} i α_{ct} (żelbet) można przyjmować z przedziału $\langle 0,8 \div 1,0 \rangle$ zalecana wartość 1,0
 - Wartości $\alpha_{cc,pl}$ i $\alpha_{ct,pl}$ (beton niezbrojony i słabo zbrojony) zalecana wartość 0,8
- γ_c – współczynnik częściowy betonu:
- w trwałych i przejściowych sytuacjach obliczeniowych $\gamma_c = 1,4$
 - w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej $\gamma_c = 1,2$

Wytrzymałości, moduł sprężystości betonu i odkształcenia graniczne dla paraboliczno-prostokątnej zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$ podane są w tablicy 1.13a.

1.4.3. Wytrzymałości i moduł sprężystości dla betonu lekkiego LWAC

1. Średnia wytrzymałość na ściskanie:

$$f_{lcm} = f_{lck} + 8 \quad [\text{MPa}]$$

2. Średnia wytrzymałość na rozciąganie:

$$f_{lctm} = \eta_l \cdot f_{ctm} \quad \eta_l = 0,40 + 0,60 \cdot \frac{\rho}{2200}$$

Tablica 1.12. Klasy gęstości ρ oraz odpowiadające im gęstości obliczeniowe LWAC wg EN 206-1

Klasa gęstości		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Gęstość [kg/m³]		801÷1000	1010÷1200	1201÷1400	1401÷1600	1601÷1800	1801÷2000
Gęstość ρ [kg/m³]	Beton niezbrojony	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Beton zbrojony	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Tablica 1.13a. Beton – wytrzymałość, moduł sprężystości i odkształcenia graniczne

	Beton zwykły									Beton wysokiej wytrzymałości (BWW)				
	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60	C55/67	C60/75	C70/85	C80/95	C90/105
f_{ck} [MPa]	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90
$f_{ck,cube}$ [MPa]	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105
f_{cm} [MPa]	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98
f_{ctm} [MPa]	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0
$f_{ctk, 0,05}$ [MPa]	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,2	2,5	2,7	2,9	3,0	3,1	3,2	3,4	3,5
$f_{ctk, 0,95}$ [MPa]	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,2	4,6	4,9	5,3	5,5	5,7	6,0	6,3	6,6
E_{cm} [GPa]	27	29	30	31	32	34	35	36	37	38	39	41	42	44
ε_{c1} [‰]	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,25	2,3	2,4	2,45	2,5	2,6	2,7	2,8	2,8
ε_{cu1} [‰]	3,5									3,2	3,0	2,8	2,8	2,8
ε_{c2} [‰]	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
ε_{cu2} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
ε_{c3} [‰]	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2	2,3
ε_{cu3} [‰]	3,5									3,1	2,9	2,7	2,6	2,6
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4	1,4

Tablica 1.13b. Beton lekki – wytrzymałość, moduł sprężystości i odkształcenia graniczne

	Lekkie betony kruszywowe LWAC												
	LC12/13	LC16/18	LC20/22	LC25/28	LC30/33	LC35/38	LC40/44	LC45/50	LC50/55	LC55/60	LC60/75	LC70/77	LC80/88
f_{lck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80
$f_{lck,cube}$ (MPa)	13	18	22	28	33	38	44	50	55	60	75	77	88
f_{lcm} (MPa)	17	22	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88
ε_{lc2} (‰)	2,0									2,2	2,3	2,4	2,5
ε_{lcu2} (‰)	$3,5 \cdot \eta_1$									$3,1 \cdot \eta_1$	$2,9 \cdot \eta_1$	$2,7 \cdot \eta_1$	$2,6 \cdot \eta_1$
ε_{lc3} (‰)	1,75									1,8	1,9	2,0	2,2
ε_{lcu3} (‰)	$3,5 \cdot \eta_1$									$3,1 \cdot \eta_1$	$2,9 \cdot \eta_1$	$2,7 \cdot \eta_1$	$2,6 \cdot \eta_1$
n	2,0									1,75	1,6	1,45	1,4

3. Charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie:

$$\begin{cases} f_{lctk,0,05} = \eta_1 \cdot f_{ctk,0,05} \\ f_{lctk,0,95} = \eta_1 \cdot f_{ctk,0,95} \end{cases}$$

4. Sieczny moduł sprężystości betonu:

$$E_{lcm} = \eta_E \cdot E_{cm} \quad \eta_E = \left(\frac{\rho}{2200} \right)^2$$

5. Obliczeniowa wytrzymałość betonu na ściskanie:

$$f_{lcd} = \alpha_{lcc} \cdot \frac{f_{lck}}{\gamma_c}$$

6. Obliczeniowa wytrzymałość betonu na rozciąganie:

$$f_{lctd} = \alpha_{lct} \cdot \frac{f_{lctk,0,05}}{\gamma_c}$$

α_{lcc} , α_{lct} – współczynniki uwzględniające wpływy obciążenia długotrwałego, niekorzystny efekt sposobu przyłożenia obciążenia oraz w przypadku słupów – wpływ małych przekrojów na wytrzymałość betonu na ściskanie i rozciąganie.

- Wartości α_{lcc} i α_{lct} (beton lekki kruszywowy) zalecana wartość 0,85
- γ_c – współczynnik częściowy betonu:
 - w trwałych i przejściowych sytuacjach obliczeniowych $\gamma_c = 1,4$
 - w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej $\gamma_c = 1,2$

Wytrzymałości, moduł sprężystości betonu i odkształcenia graniczne dla paraboliczno-prostokątnej zależności $\sigma_c - \varepsilon_c$ podane są w tabelicy 1.13b.

$$\varepsilon_{c1} = 0,7 \cdot f_{cm}^{0,31} \text{ oraz } \varepsilon_{c1} \leq 2,8$$

$$\varepsilon_{c2} = 2,0 + 0,085 \cdot (f_{ck} - 50)^{0,53}$$

$$\varepsilon_{c3} = 1,75 + 0,01375 \cdot (f_{ck} - 50)$$

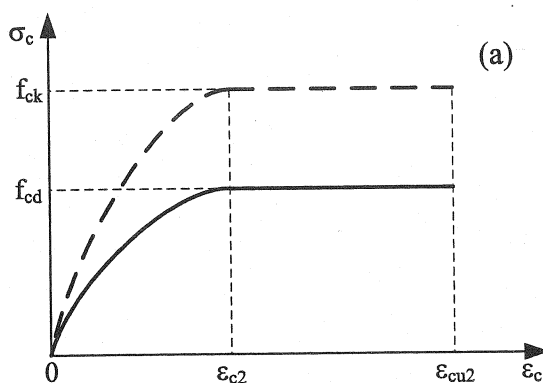
$$n = 1,4 + 23,4 \cdot [0,01 \cdot (90 - f_{ck})]^4$$

$$\varepsilon_{cu1} = 2,8 + 27 \cdot [0,01 \cdot (98 - f_{cm})]^4$$

$$\varepsilon_{cu2} = 2,6 + 35 \cdot [0,01 \cdot (90 - f_{ck})]^4$$

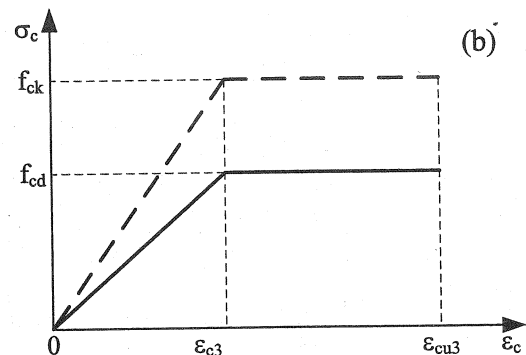
$$\varepsilon_{cu3} = 2,6 + 35 \cdot [0,01 \cdot (90 - f_{ck})]^4$$

1.4.4. Odkształcalność betonu do projektowania przekroju



$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c2}} \right)^n \right] \text{ dla } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c2}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ dla } \varepsilon_{c2} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu2}$$

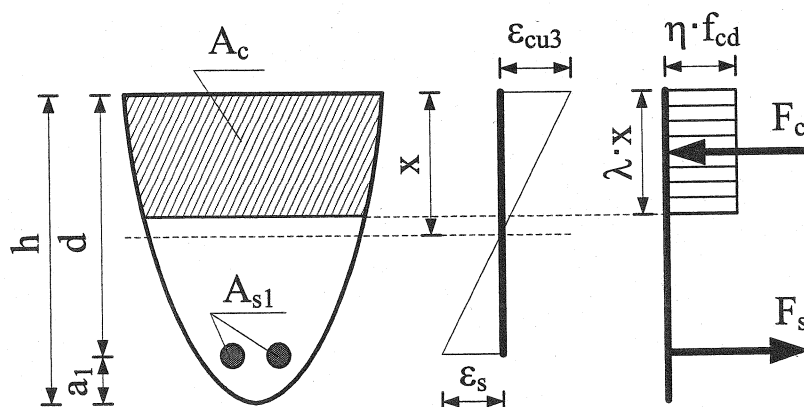


$$\sigma_c = f_{cd} \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c3}} \text{ dla } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{c3}$$

$$\sigma_c = f_{cd} \text{ dla } \varepsilon_{c3} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu3}$$

Rysunek 1.1. Wykres $\sigma - \varepsilon$ dla betonu: (a) paraboliczno-prostokątny, (b) bilinearny wykres

1.4.5. Uproszczenie kształtu bryły naprężeń do projektowania przekroju



Rysunek 1.2. Prostokątny rozkład naprężeń w strefie ściskanej

$$\lambda = 0,8 \dots \dots \dots \text{dla } f_{ck} \leq 50 \text{ w [MPa]}$$

$$\lambda = 0,8 - \frac{f_{ck} - 50}{400} \dots \dots \dots \text{dla } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ w [MPa]}$$

$$\eta = 1,0 \dots \dots \dots \text{dla } f_{ck} \leq 50 \text{ w [MPa]}$$

$$\eta = 1,0 - \frac{f_{ck} - 50}{200} \dots \dots \dots \text{dla } 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ w [MPa]}$$

UWAGA!

Jeżeli szerokość strefy ściskanej betonu zmniejsza się w kierunku skrajnych włókien ściskanych, należy wartość $\eta \cdot f_{cd}$ zmniejszyć o 10 %.

1.4.6. Współczynnik odkształcenia poprzecznego

Wartość współczynnika odkształcenia poprzecznego betonu przy ściskaniu przyjmuje się:

- dla betonu niezarysowanego $\nu_c = 0,2$
- dla betonu zarysowanego $\nu_c = 0,0$

1.4.7. Współczynnik liniowej rozszerzalności termicznej

Wartość współczynnika liniowej rozszerzalności termicznej betonu przyjmuje się:

$$\alpha_t = 1 \cdot 10^{-5} \frac{1}{^\circ\text{K}}$$

1.5. Stal do projektowania konstrukcji

1.5.1. Wytrzymałości i moduł sprężystości stali zbrojeniowej

1. Obliczeniowa granica plastyczności stali: $f_{td} = \frac{f_{tk}}{\gamma_s}$
2. Obliczeniowa wytrzymałość stali zbrojeniowej na rozciąganie: $f_{td} = \frac{f_{tk}}{\gamma_s}$
 - w trwałych i przejściowych sytuacjach obliczeniowych $\gamma_s = 1,15$ (ULS), $\gamma_s = 1,0$ (SLS)
 - w wyjątkowej sytuacji obliczeniowej $\gamma_s = 1,0$ (ULS i SLS)

ULS – stany graniczne nośności,

SLS – stany graniczne użytkowości.

Charakterystyczne i obliczeniowe granice plastyczności przy $\gamma_s = 1,15$ oraz charakterystyczne wytrzymałości stali na rozciąganie podano w tablicy 1.14.

Tablica 1.14. Właściwości mechaniczne wybranych stali zbrojeniowych klas A, B, C

Klasa stali	Znak gatunku stali	Nominalna średnica prętów ϕ [mm]	Granica plastyczności stali		Wytrzymałość charakterystyczna stali na rozciąganie f_{tk} [MPa]
			charakterystyczna f_{yk} [MPa]	obliczeniowa f_{yd} [MPa]	
A	BSt 500KR	6 ÷ 12	500	420	550
	RB500	4 ÷ 16	500	420	550
	RB500W	6 ÷ 40	500	420	550
	BSt500S	6 ÷ 14	500	420	550
B	RB400	6 ÷ 40	400	350	440
	RB400W	6 ÷ 40	400	350	440
	34GS	6 ÷ 32	410	350	550
	RB500	6 ÷ 40	500	420	550
	RB500WZ	8 ÷ 32	500	420	550
	BSt500S	8 ÷ 32	500	420	550
	BSt500WR	8 ÷ 32	500	420	550
C	35G2Y	6 ÷ 20	410	350	550
	20G2VY-b	6 ÷ 28	490	420	590
	B500SP	8 ÷ 32	500	435	575

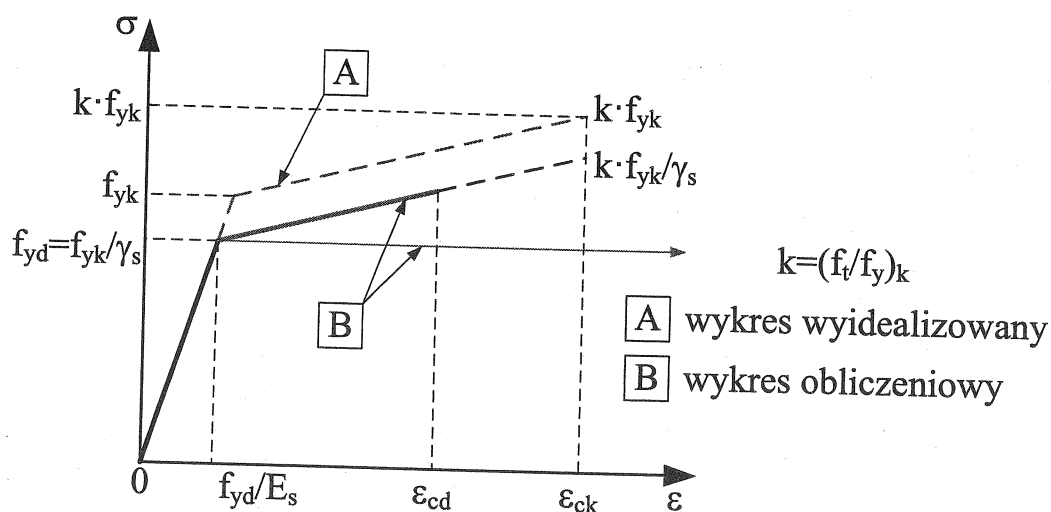
Tablica 1.15. Klasyfikacja stali zbrojeniowej

Postać wyrobu	Pręty proste i rozwijane z kręgów			Siatki			Wymaganie lub wartość kwantyla
	A	B	C	A	B	C	
Charakterystyczna granica plastyczności f_{yk} lub $f_{0,2k}$ [MPa]	400 do 600						5,0
Skrajne wartości stosunku $k = (f_t/f_y)_k$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	$\geq 1,05$	$\geq 1,08$	$\geq 1,15$ $< 1,35$	10,0
Charakterystyczne odkształcenie przy maksymalnej sile ϵ_{uk} [%]	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	$\geq 2,5$	$\geq 5,0$	$\geq 7,5$	10,0
Zdatność do gięcia	Badanie na zginanie i odginanie			—			—

Klasa A – mała ciągliwość stali $2,5 \% \leq \epsilon_{uk} \leq 5,0 \%$ $(f_t/f_y)_k \geq 1,05$
 Klasa B – średnia ciągliwość stali $5,0 \% < \epsilon_{uk} \leq 7,5 \%$ $(f_t/f_y)_k \geq 1,08$
 Klasa C – duża ciągliwość stali $\epsilon_{uk} > 7,5 \%$ $(f_t/f_y)_k \geq 1,15$ ale $(f_t/f_y)_k < 1,35$

Moduł sprężystości stali zbrojeniowej w przedziale temperatury $<-30^\circ\text{C} \div 100^\circ\text{C}>$: ... $E_s = 200 \text{ GPa}$

1.5.2. Odształcalność stali zbrojeniowej



Rysunek 1.3. Wykresy $\sigma - \epsilon$ dla stali zbrojeniowej

1.5.3. Charakterystyka stali zbrojeniowej o kolistym przekroju poprzecznym

Tablica 1.16. Zalecane nominalne średnice, pola przekroju poprzecznego i masy na metr prętów zbrojeniowych

Średnica nominalna ϕ_s	Ciężar pręta	Powierzchnia nominalna w cm^2 przy liczbie prętów									
[mm]	[kg/m]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4,5	0,126	0,159	0,32	0,48	0,64	0,80	0,95	1,11	1,27	1,43	1,59
5	0,154	0,196	0,39	0,59	0,79	0,98	1,18	1,37	1,57	1,77	1,96
5,5	0,187	0,238	0,48	0,71	0,95	1,19	1,43	1,66	1,90	2,14	2,38
6	0,222	0,283	0,57	0,85	1,13	1,41	1,70	1,98	2,26	2,54	2,83
8	0,395	0,503	1,01	1,51	2,01	2,51	3,02	3,52	4,02	4,52	5,03
10	0,617	0,785	1,57	2,36	3,14	3,93	4,71	5,50	6,28	7,07	7,85
12	0,888	1,131	2,26	3,39	4,52	5,65	6,79	7,92	9,05	10,18	11,31
14	1,208	1,540	3,08	4,62	6,16	7,70	9,24	10,78	12,32	13,85	15,39
16	1,578	2,010	4,02	6,03	8,04	10,05	12,06	14,07	16,08	18,10	20,11
18	1,998	2,540	5,09	7,63	10,18	12,72	15,27	17,81	20,36	22,90	25,45
20	2,466	3,140	6,28	9,42	12,57	15,71	18,85	21,99	25,13	28,27	31,42
22	2,984	3,800	7,60	11,40	15,21	19,01	22,81	26,61	30,41	34,21	38,01
25	3,853	4,910	9,82	14,73	19,63	24,54	29,45	34,36	39,27	44,18	49,09
28	4,834	6,160	12,32	18,47	24,63	30,79	36,95	43,10	49,26	55,42	61,58
32	6,313	8,030	16,08	24,13	32,17	40,21	48,25	56,30	64,34	72,38	80,42
36	7,990	10,180	20,36	30,54	40,72	50,89	61,07	71,25	81,43	91,61	101,79
40	9,870	12,570	25,13	37,70	50,27	62,83	75,40	87,96	100,53	113,10	125,66

2. Podstawowe zasady projektowania konstrukcji żelbetowych

2.1. Minimalne otulenie prętów i zalecenia dotyczące jakości betonu z uwagi na korozję

Tablica 2.1. Orientacyjne projektowe okresy użytkowania

Klasa konstrukcji	Rodzaj konstrukcji	Czas użytkowania [lata]
S1	konstrukcje tymczasowe (*)	do 10
S2	wymienialne części konstrukcji (belki podsuwnicowe, łożyska)	10 ÷ 25
S3	konstrukcje rolnicze i podobne	15 ÷ 30
S4	konstrukcje budynków i inne konstrukcje zwykłe	do 50
S5	obiekty monumentalne, mosty i inne konstrukcje w budownictwie lądowym	do 100
S6	obiekty monumentalne, mosty i inne konstrukcje w budownictwie lądowym	powyżej 100

(*) Zaleca się, aby konstrukcje lub część konstrukcji, które mogą być demontowane w celu ponownego zmontowania, nie uważać za konstrukcje tymczasowe

Tablica 2.2. Minimalne otulenie $c_{\min,b}$ – wymagania ze względu na przyczepność

Wymagania ze względu na przyczepność	
Ułożenie prętów	Minimalne otulenie $c_{\min,b}$ (*)
Zwykłe	Średnica pręta ϕ
W wiązkach	Średnica zastępcza ϕ_n

(*) Jeżeli nominalny, maksymalny wymiar ziaren kruszywa przekracza 32 mm, to $c_{\min,b}$ należy zwiększyć o 5 mm

Tablica 2.3. Klasy ekspozycji w zależności od warunków środowiskowych wg EN 206-1

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
1. Brak zagrożenia korozją i agresją chemiczną		
X0	Dotyczy betonu niezbrojonego i niezawierającego wbudowanych elementów metalowych. Wszystkie środowiska z wyjątkiem przypadków występowania zamrażania/rozmarzania, ścierania lub agresji chemicznej. W przypadku betonów zbrojonych lub zawierających inne elementy metalowe: bardzo suche	Beton wewnątrz budynków o bardzo niskiej wilgotności powietrza
2. Korozja spowodowana karbonizacją		
XC1	Suche lub stale mokre	Beton we wnętrzach o niskiej wilgotności powietrza lub stale zanurzony w wodzie

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
XC2	Mokre, sporadycznie suche	Powierzchnie betonu narażone na długotrwały kontakt z wodą. Wiele fundamentów
XC3	Umiarkowanie wilgotne	Beton wewnątrz budynków o umiarkowanej lub wysokiej wilgotności powietrza. Beton na zewnątrz osłonięty przed deszczem
XC4	Cyklicznie mokre i suche	Powierzchnie betonu narażone na kontakt z wodą, ale nie jak w klasie ekspozycji XC2
3. Korozja spowodowana chlorkami		
XD1	Umiarkowanie wilgotne	Powierzchnie betonu narażone na działanie chlorków z powietrza
XD2	Mokre, sporadycznie suche	Baseny pływakie. Beton narażony na działanie wody przemysłowej zawierającej chlorki
XD3	Cyklicznie mokre i suche	Elementy mostów narażone na działanie rozpylonych cieczy zawierających chlorki. Nawierzchnie dróg. Płyty parkingów
4. Korozja spowodowana chlorkami z wody morskiej		
XS1	Narażenie na działanie soli zawartych w powietrzu, ale nie na bezpośredni kontakt z wodą morską	Konstrukcje zlokalizowane na wybrzeżu lub w jego pobliżu
XS2	Stałe zanurzenie	Elementy budowli morskich
XS3	Strefy wpływów, rozbryzgów i aerozoli	Elementy budowli morskich
5. Agresywne oddziaływanie zamrażania/rozmarzania		
XF1	Umiarkowanie nasycone wodą bez środków odladzających	Pionowe powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF2	Umiarkowanie nasycone wodą ze środkami odladzającymi	Pionowe powierzchnie betonowe konstrukcji drogowych narażonych na zamarzanie i działanie z powietrza środków odladzających
XF3	Silnie nasycone wodą bez środków odladzających	Poziome powierzchnie betonowe narażone na deszcz i zamarzanie
XF4	Silnie nasycone wodą ze środkami odladzającymi lub wodą morską	Płyty dróg i mostów narażone na działanie środków odladzających. Powierzchnie betonowe narażone bezpośrednio na opryskiwanie środkami odladzającymi i zamarzanie. Strefy narażone na ochlapywanie i zamarzanie w konstrukcjach morskich

Oznaczenie klasy	Opis środowiska	Przykłady występowania klas ekspozycji
6. Agresja chemiczna		
XA1	Środowisko chemiczne mało agresywne	Naturalne grunty i woda gruntowa
XA2	Środowisko chemiczne średnio agresywne	Naturalne grunty i woda gruntowa
XA3	Środowisko chemiczne silnie agresywne	Naturalne grunty i woda gruntowa
7. Agresja wywołana ścieraniem		
XM1	Umiarkowane zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pneumatycznym
XM2	Silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie eksploatowane przez pojazdy o ogumieniu pełnym oraz wózki podnośnikowe z ogumieniem elastomerowym lub na rolkach stalowych
XM3	Ekstremalnie silne zagrożenie ścieraniem	Posadzki i nawierzchnie często najezdżane przez pojazdy gaśnicowe... Filary mostów. Powierzchnie przelewów. Ściany spustów i sztolni hydrotechnicznych

Tablica 2.4. Minimalne otulenie $c_{\min, \text{dur}}$ w [mm] wymagane ze względu na trwałość stali zbrojeniowej/sprężającej

Wymagania ze względu na środowisko							
Klasa konstrukcji	Klasa ekspozycji wg tablicy 2.1/3						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1/XS1	XD2/XS2	XD3/XS3
S1	10/10	10/15	10/20	15/25	20/30	25/35	30/40
S2	10/10	10/15	15/25	20/30	25/35	30/40	35/45
S3	10/10	10/20	20/30	25/35	30/40	35/45	40/50
S4	10/10	15/25	25/35	30/40	35/45	40/50	45/55
S5	15/15	20/30	30/40	35/45	40/50	45/55	50/60
S6	20/20	25/35	35/45	40/50	45/55	50/60	55/65

Tablica 2.5. Zmniejszenie dopuszczalnych odchyłek i dodatków Δc_{dev}

Odchyłka Δc_{dev}	
Wartość zalecana	$\Delta c_{\text{dev}} = 10 \text{ mm}$
Wartość zmniejszona przy zastosowaniu pomiaru otuliny podczas wznoszenia/prefabrykacji	$5 \text{ mm} \leq \Delta c_{\text{dev}} \leq 10 \text{ mm}$
Wartość zmniejszona przy zastosowaniu bardzo czułego pomiaru otuliny podczas wznoszenia/prefabrykacji i odrzucaniu wadliwych prefabrykatów	$0 \leq \Delta c_{\text{dev}} \leq 10 \text{ mm}$

Tablica 2.6. Zalecana klasyfikacja konstrukcji

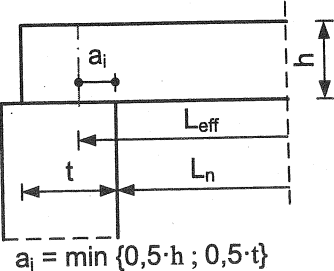
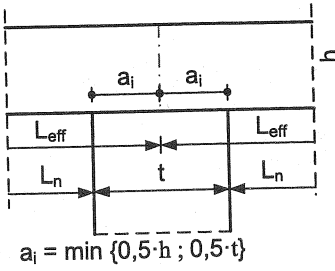
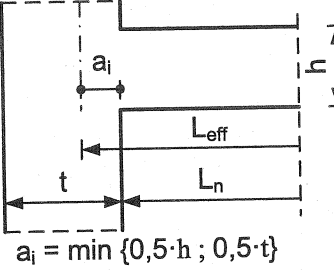
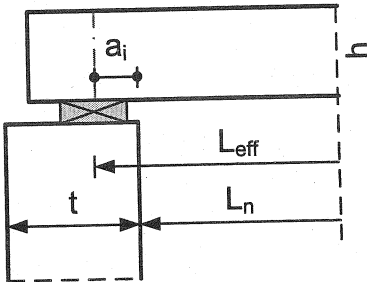
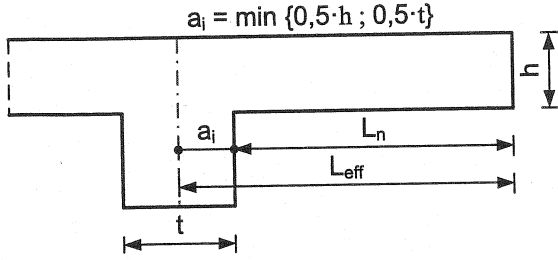
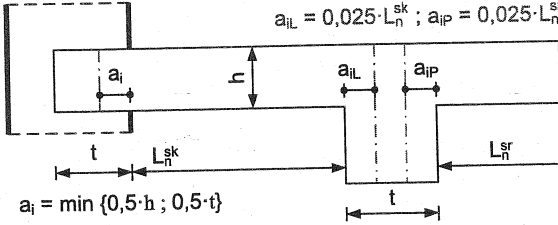
Kryterium	Klasa konstrukcji						
	Klasa ekspozycji wg tablicy 2.1/3						
	X0	XC1	XC2/XC3	XC4	XD1	XD2/XS1	XD3/XS2/XS3
Projektowy okres użytkowania 100 lat	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2	Zwiększyć klasę o 2
Klasa wytrzymałości ^{*)}	$\geq C30/37$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C30/37$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C35/45$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C40/50$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C40/50$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C40/50$ Zmniejszyć klasę o 1	$\geq C45/55$ Zmniejszyć klasę o 1
Element o kształcie płyty (proces wznoszenia konstrukcji nie wpływa na usytuowanie zbrojenia)	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1
Zapewniona specjalna kontrola jakości betonu	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1	Zmniejszyć klasę o 1

^{*)} Klasa konstrukcji i stosunek w/c są wartościami związanymi. Właściwą przepuszczalność uzyskuje się przez modyfikację składu betonu. Przy zawartości powietrza ponad 4% klasę wytrzymałości betonu można zmniejszyć o 1.

Tablica 2.7. Zalecane wartości graniczne wytrzymałości betonu

Klasy wytrzymałości betonu wskazane ze względu na korozję										
Przyczyna korozji	Karbonatyzacja				Działanie chlorków			Działanie chlorków z wody morskiej		
Klasa ekspozycji	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
Wskazana klasa betonu	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37		C35/45	C30/37		C35/45
Klasy wytrzymałości betonu wskazane ze względu na uszkodzenia betonu										
Przyczyna uszkodzenia		Brak ryzyka		Zagrożenie zamrażaniem/rozmarzaniem			Zagrożenie chemiczne			
Klasa ekspozycji		X0		XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3	
Wskazana klasa betonu		C12/15		C30/37	C25/30	C30/37	C30/37		C35/45	

2.2. Efektywna rozpiętość elementu

<p>A) Podpora skrajna swobodnie podparta</p>  <p>$a_i = \min \{0,5 \cdot h ; 0,5 \cdot t\}$</p>	<p>B) Podpora wewnętrzna w elemencie ciągłym</p>  <p>$a_i = \min \{0,5 \cdot h ; 0,5 \cdot t\}$</p>
<p>C) Podpora skrajna z pełnym zamocowaniem</p>  <p>$a_i = \min \{0,5 \cdot h ; 0,5 \cdot t\}$</p>	<p>D) Podpora z łożyskiem oporowym</p> 
<p>E) Zamocowanie</p>  <p>$a_i = \min \{0,5 \cdot h ; 0,5 \cdot t\}$</p>	<p>Jeżeli $t < 0,05 \cdot L_n \rightarrow$ podpora wąska Jeżeli $t \geq 0,05 \cdot L_n \rightarrow$ podpora szeroka $a_{iL} = 0,025 \cdot L_n^{sk} ; a_{iP} = 0,025 \cdot L_n^{sr}$</p>  <p>$a_i = \min \{0,5 \cdot h ; 0,5 \cdot t\}$</p>

2.3. Minimalny przekrój zbrojenia podłużnego

W elementach zginanych bez udziału sił podłużnych – belki i płyty:

$$A_{sl,min} = 0,26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} \cdot b_t \cdot d$$

$$A_{sl,min} = 0,0013 \cdot b_t \cdot d$$

b_t – średnia szerokość strefy rozciąganej

W elementach zginanych z udziałem sił podłużnych – słupy:

$$A_{s,min} = 0,10 \cdot \frac{N_{Ed}}{f_{yd}}$$

$$A_{s,min} = 0,002 \cdot A_c$$

Ze względu na zarysowanie (w strefie rozciąganej):

$$A_{s,min} = k_c \cdot k \cdot f_{ct,eff} \cdot \frac{A_{ct}}{\sigma_s}$$

$f_{ct,eff}$ – średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie w chwili spodziewanego zarysowania. W razie braku ściślejszych informacji zaleca się przyjąć $f_{ct,eff} \leq f_{ctm}$. Jeżeli beton jest młodszy niż 28 dni, należy przyjąć $f_{ct,eff} = f_{ctm}(t)$;

k_c – współczynnik uwzględniający rozkład naprężeń w przekroju w chwili poprzedzającej zarysowanie oraz wielkość ramienia sił wewnętrznych dla fazy II:

- przy rozciąganiu osiowym: $k_c = 1,0$,
- przy czystym zginaniu lub zginaniu z udziałem siły podłużnej:
 - dla przekrojów prostokątnych i środników belek teowych i skrzynkowych:

$$k_c = 0,4 \cdot \left(1 - \frac{\sigma_c}{k_1 \cdot \frac{h}{h^*} \cdot f_{ct,eff}} \right), \quad k_c \leq 1,0$$

– dla półek przekrojów teowych i skrzynkowych:

$$k_c = 0,9 \cdot \frac{F_{cr}}{A_{ct} \cdot f_{ct,eff}}, \quad k_c \leq 0,5$$

σ_c – średnie naprężenie w betonie w rozpatrywanej części przekroju $\sigma_c = \frac{N_{Ed}}{b \cdot h}$;

N_{Ed} – siła podłużna w stanie granicznym użytkowości działająca na rozpatrywaną część przekroju, dodatnia przy ściskaniu;

h – zastępcza wysokość przekroju

$$h^* = \begin{cases} h & \text{dla } h < 1,0 \text{ m} \\ 1,0 \text{ m} & \text{dla } h \geq 1,0 \text{ m} \end{cases}$$

k_1 – współczynnik zależny od wpływu siły podłużnej na rozkład naprężeń:

$k_1 = 1,5$ dla siły N_{Ed} ściskającej,

$k_1 = 1,0$ dla siły N_{Ed} rozciągającej;

F_{cr} – wartość bezwzględna siły osiowej w półce bezpośrednio przed zarysowaniem wywołanym przez moment rysujący obliczony przy założeniu, że wytrzymałość na rozciąganie wynosi $f_{ct,eff}$;

k – współczynnik uwzględniający wpływ nierównomiernych naprężeń samorównoważących się w ustroju, prowadzących do zmniejszenia sił od odkształceń wymuszonych:

- $k = 1,0$ dla środników o wysokości $h \leq 300$ mm oraz półek szerokości mniejszej niż 300 mm,
- $k = 0,65$ dla środników o wysokości $h \geq 800$ mm oraz półek szerokości większej niż 800 mm, w przypadkach pośrednich, wartości współczynnika k można interpolować liniowo;

A_{ct} – pole rozciąganej strefy przekroju w chwili poprzedzającej zarysowanie, dla przekroju prostokątnego:

- przy rozciąganiu osiowym: $A_{ct} = b \cdot h$,
- przy zginaniu: $A_{ct} = 0,5 \cdot b \cdot h$;

$\sigma_{s,lim}$ – naprężenie przyjęte w zbrojeniu rozciągany natychmiast po zarysowaniu;
można przyjmować $\sigma_s = f_{yk}$, ale jeżeli wymaga się nieprzekroczenia granicznej szerokości rysy, naprężenie można przyjmować według tablicy 2.8 odpowiednio dla największej średnicy pręta lub maksymalnego rozstawu.

Tablica 2.8. Ograniczenie rys – maksymalne średnice prętów ϕ_{s1} i maksymalny rozstaw prętów

Naprężenia w stali [MPa]	maksymalne średnice prętów ϕ_{s1} [mm]			Naprężenia w stali [MPa]	maksymalny rozstaw prętów [mm]		
	$w_k =$ 0,4 mm	$w_k =$ 0,3 mm	$w_k =$ 0,2 mm		$w_k =$ 0,4 mm	$w_k =$ 0,3 mm	$w_k =$ 0,2 mm
160	40	32	25	160	300	300	200
200	32	25	16	200	300	250	150
240	20	16	12	240	250	200	100
280	16	12	8	280	200	150	50
320	12	10	6	320	150	100	–
360	10	8	5	360	100	50	–
400	8	6	4				
450	6	5	–				

2.4. Maksymalny przekrój zbrojenia podłużnego

Belki, płyty i słupy:

Poza zakładami zbrojenia:

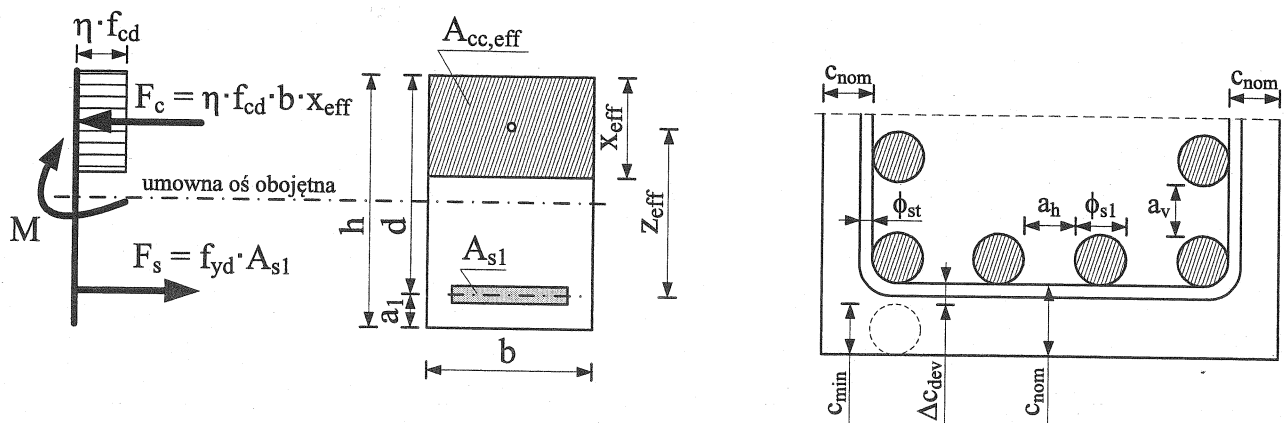
$$A_{s,max} = 0,04 \cdot A_c$$

W miejscach zakładów zbrojenia ilość maksymalna może w belkach i płytach być wyższa, niż podana powyżej, a w słupach może wynosić:

$$A_{s,max} = 0,08 \cdot A_c$$

3. Algorytm do wymiarowania zginanych elementów żelbetowych

3.1. Przekrój prostokątny pojedynczo zbrojony



Rysunek 3.1. Naprężenia w stanie granicznym w przekroju prostokątnym pojedynczo zbrojonym

Dane:

$M = M_{Ed}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $\alpha_{cc} = 1,0$, $\gamma_c = 1,4$	f_{yd}	E_s	b	h
--------------	---	----------	-------	-----	-----

Szukane:

Pole przekroju zbrojenia w strefie rozciąganej betonu: A_{s1}

Wartości graniczne:

$\xi_{\text{eff,lim}} = \frac{x_{\text{eff,lim}}}{d} = \lambda \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\text{cu3}}}{\varepsilon_{\text{cu3}} - \varepsilon_{\text{yd}}} \right), \quad \varepsilon_{\text{yd}} = -\frac{f_{\text{yd}}}{E_s}, \quad \varepsilon_{\text{cu3}} - \text{wartość z Tablicy 1.13a.}$	
$\zeta_{\text{eff,lim}} = 1 - 0,5\xi_{\text{eff,lim}}$	
$s_{\text{ceff,lim}} = \xi_{\text{eff,lim}} \cdot \zeta_{\text{eff,lim}}$	
Przyjąć $a_1 \approx 5,0 \text{ cm},$	$d = h - a_1$

WYMIAROWANIE:

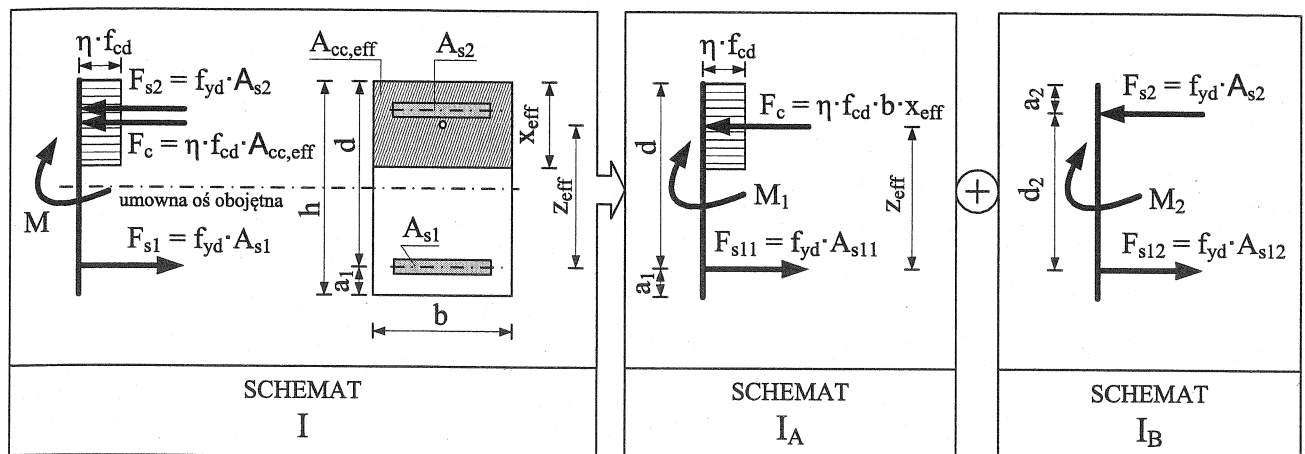
$s_{ceff} = \frac{M_{Ed}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2} \leq s_{ceff,lim}$	
$s_{ceff} \leq s_{ceff,lim}$	$s_{ceff} > s_{ceff,lim}$

$\zeta_{\text{eff}} = 0,5 + 0,5\sqrt{1 - 2s_{\text{ceff}}}$ $A_{s1} = \frac{M_{\text{Ed}}}{f_{\text{yd}} \cdot \zeta_{\text{eff}} \cdot d}$ $A_{s1} \geq A_{s1,\text{min}}$	LUB	$\xi_{\text{eff}} = 1,0 - \sqrt{1 - 2s_{\text{ceff}}}$ $A_{s1} = \frac{\eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot \xi_{\text{eff}} \cdot b \cdot d}{f_{\text{yd}}} \geq A_{s1,\text{min}}$ $A_{s1} \geq A_{s1,\text{min}}$	a) należy zwiększyć wymiary belki, b) zwiększyć klasę betonu, c) wymiarować przekrój jako podwójnie zbrojony
---	-----	--	--

NOŚNOŚĆ GRANICZNA

Obliczyć wartości rzeczywiste:			
a_1	d	$A_{s1,\text{prov}}$	$d = h - a_1$
$c_{\text{nom}} = c_{\text{min}} + \Delta c_{\text{dev}}$ $c_{\text{min}} = \max \{ c_{\text{min},b}; c_{\text{min},\text{dur}}; 10 \text{ mm} \}$			
$a_v, a_h \geq \begin{cases} \phi \cdot k_1 \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \end{cases}$ gdzie: $k_1 = 1,0$ d_g – maksymalny wymiar ziarna kruszywa $k_2 = 5 \text{ mm}$ $c_{\text{min},b}$ Tablica 2.2. $c_{\text{min},\text{dur}}$ Tablica 2.4. Δc_{dev} Tablica 2.5.			
$x_{\text{eff},\text{lim}} = \xi_{\text{eff},\text{lim}} \cdot d$			
$x_{\text{eff}} = \frac{f_{\text{yd}} \cdot A_{s1,\text{prov}}}{\eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot b}$			
$x_{\text{eff}} \leq x_{\text{eff},\text{lim}}$		$x_{\text{eff}} > x_{\text{eff},\text{lim}}$	
$\xi_{\text{eff}} = \frac{x_{\text{eff}}}{d}$ $\zeta_{\text{eff}} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{\text{eff}}$ $s_{\text{ceff}} = \xi_{\text{eff}} \cdot \zeta_{\text{eff}}$ $M_{\text{Rd}} = s_{\text{ceff}} \cdot f_{\text{cd}} \cdot b \cdot d^2$		$M_{\text{Rd}} = s_{\text{ceff},\text{lim}} \cdot f_{\text{cd}} \cdot b \cdot d^2$	
$M \leq M_{\text{Rd}}$		$M \leq M_{\text{Rd}}$	

3.2. Przekrój prostokątny podwójnie zbrojony



Rysunek 3.2. Naprężenia w stanie granicznym w przekroju podwójnie zbrojonym

Dane:

$M = M_{Ed}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \alpha_{cc} = 1,0, \gamma_c = 1,4$	f_{yd}	E_s	b	h
--------------	---	----------	-------	-----	-----

Szukane:

Pole przekroju zbrojenia w strefie rozciąganej betonu: A_{s1}, A_{s2}

Wartości graniczne:

$\xi_{eff,lim} = \frac{x_{eff,lim}}{d} = \lambda \cdot \left(\frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{yd}} \right),$		$\varepsilon_{yd} = -\frac{f_{yd}}{E_s},$	ε_{cu3} - wartość z Tablicy 1.13a.
$\zeta_{eff,lim} = 1 - 0,5\xi_{eff,lim}$			
$s_{ceff,lim} = \xi_{eff,lim} \cdot \zeta_{eff,lim}$			
Przyjąć $a_1 \approx 5,0 \text{ cm}, a_2 \approx 5,0 \text{ cm}$		$d = h - a_1, d_2 = d - a_2$	

WYMIAROWANIE:

$s_{ceff} = \frac{M_{Ed}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2} > s_{ceff,lim}$	
SCHEMAT I _A	SCHEMAT I _B
Przyjąć $x_{eff} = x_{eff,lim}$	$M_2 = M - M_1$
$M_1 = s_{ceff,lim} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$	$A_{s2} = A_{s12} = \frac{M_2}{f_{yd} \cdot d_2} \geq A_{s2,min}$
$A_{s11} = \frac{\eta \cdot f_{cd} \cdot \xi_{eff,lim} \cdot b \cdot d}{f_{yd}}$	$A_{s1} = A_{s11} + A_{s12} \geq A_{s1,min}$

NOŚNOŚĆ GRANICZNA

Obliczyć wartości rzeczywiste:

a_1	a_2	d	d_2	$A_{s1,prov}$	$A_{s2,prov}$	$d = h - a_1$	$d_2 = h - a_2$
-------	-------	-----	-------	---------------	---------------	---------------	-----------------

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm} \}$$

$$a_v, a_h \geq \begin{cases} \phi \cdot k_1 \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \end{cases}$$

gdzie:

$$k_1 = 1,0$$

d_g – maksymalny wymiar ziarna kruszywa

$$k_2 = 5 \text{ mm}$$

$$c_{min,b} \quad \text{Tablica 2.2.}$$

$$c_{min,dur} \quad \text{Tablica 2.4.}$$

$$\Delta c_{dev} \quad \text{Tablica 2.5.}$$

$$x_{eff,lim} = \xi_{eff,lim} \cdot d$$

$$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot (A_{s1,prov} - A_{s2,prov})}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b}$$

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

$$x_{eff} > x_{eff,lim}$$

$$x_{eff} \geq 2 \cdot a_2$$

$$x_{eff} < 2 \cdot a_2$$

$$\zeta_{eff} = 1 - 0,5 \xi_{eff}$$

$$s_{ceff} = \xi_{eff} \cdot \zeta_{eff}$$

$$M_1 = s_{ceff} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$$

$$M_2 = A_{s2,prov} \cdot f_{yd} \cdot d_2$$

$$M_{Rd} = M_1 + M_2$$

$$M_{Rd} = A_{s1,prov} \cdot f_{yd} \cdot d_2$$

$$M_1 = s_{ceff,lim} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$$

$$M_2 = A_{s2,prov} \cdot f_{yd} \cdot d_2$$

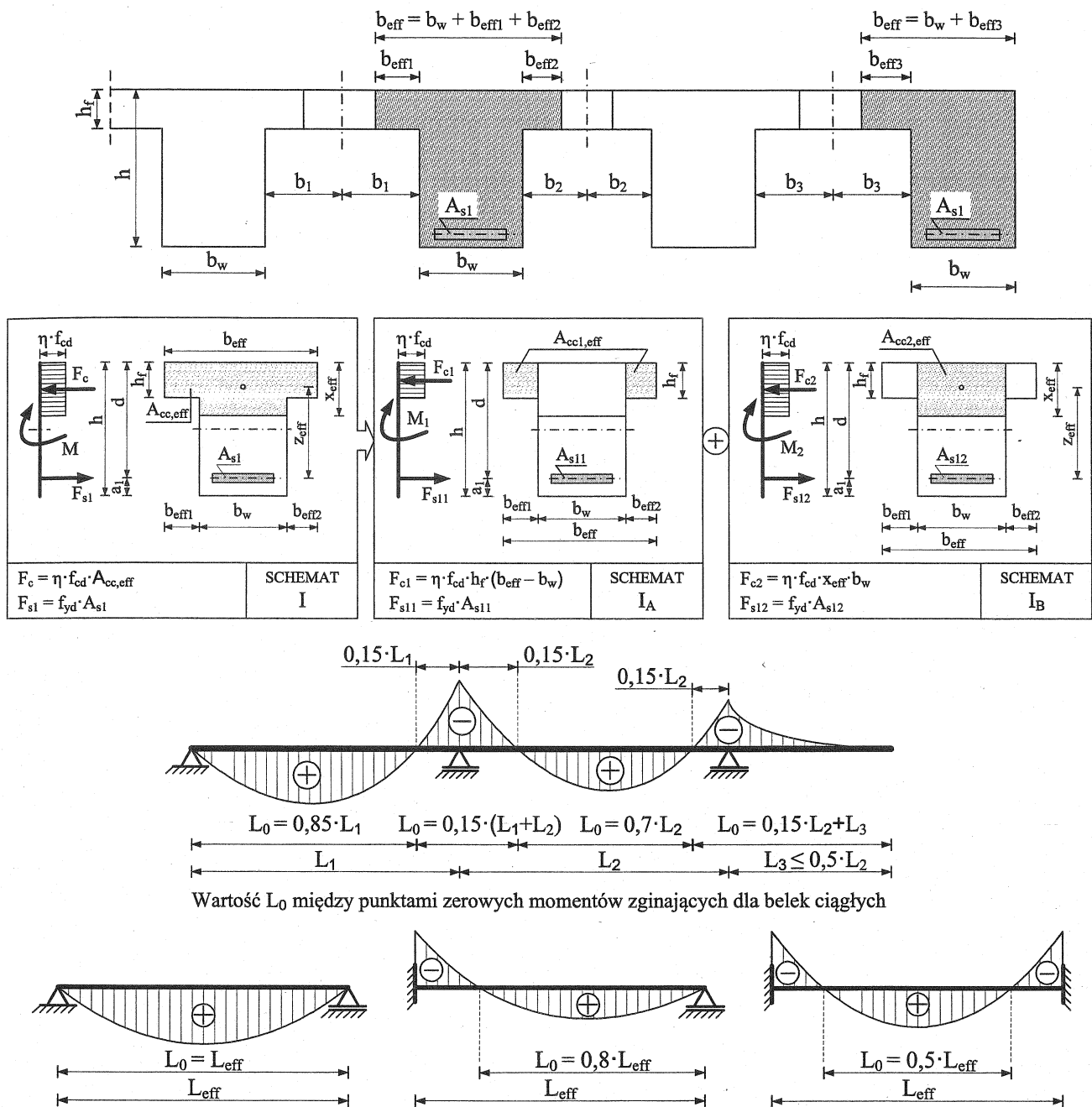
$$M_{Rd} = M_1 + M_2$$

$$M \leq M_{Rd}$$

$$M \leq M_{Rd}$$

$$M \leq M_{Rd}$$

3.3. Przekrój teowy pojedynczo zbrojony



Rysunek 3.3. Naprężenia w stanie granicznym w przekroju teowym pojedynczo zbrojonym

Dane:

$M = M_{Ed}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$, $\alpha_{cc} = 1,0$, $\gamma_c = 1,4$	f_{yd}	E_s	b	h
--------------	---	----------	-------	-----	-----

Szukane:

Pole przekroju zbrojenia w strefie rozciąganej betonu: A_{s1}

Wartości graniczne:

$\xi_{\text{eff},\text{lim}} = \frac{x_{\text{eff},\text{lim}}}{d} = \lambda \cdot \left(\frac{\varepsilon_{\text{cu3}}}{\varepsilon_{\text{cu3}} - \varepsilon_{\text{yd}}} \right), \quad \varepsilon_{\text{yd}} = -\frac{f_{\text{yd}}}{E_s}, \quad \varepsilon_{\text{cu3}} - \text{wartość z Tablicy 1.13a.}$		
$\zeta_{\text{eff},\text{lim}} = 1 - 0,5\xi_{\text{eff},\text{lim}}$	$s_{\text{ceff},\text{lim}} = \xi_{\text{eff},\text{lim}} \cdot \zeta_{\text{eff},\text{lim}}$	
Przyjąć $a_1 \approx 5,0 \text{ cm}$	$d = h - a_1$	

WYMIAROWANIE:

UWAGA!

Aby płyta mogła być uwzględniona w obliczeniach, muszą być spełnione warunki:

$$h_f \geq \begin{cases} 0,03 \text{ m} \\ 0,05 \cdot h \end{cases}$$

$$b_{\text{eff},i} \leq \min \begin{cases} 0,2 \cdot b_i + 0,1 \cdot l_0 \\ 0,2 \cdot l_0 \\ b_i \end{cases}$$

- Wysięg płyty dwustronny: $b_{\text{eff}} = b_w + \sum b_{\text{eff},i} \leq b_w + b_1 + b_2$
- Wysięg płyty jednostronny: $b_{\text{eff}} = b_w + \sum b_{\text{eff},i} \leq b_w + b_3$

Obliczyć moment przenoszony przez płytę o wymiarach $b_{\text{eff}} \times h_f$:

$$M_f = \eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)$$

Jeżeli $M \leq M_f \Rightarrow$ **przekrój pozornie teowy**:

naależy wymiarować jako **przekrój prostokątny pojedynczo zbrojony** o wymiarach $b_{\text{eff}} \times d$.

$$s_{\text{ceff}} = \frac{M_{\text{Ed}}}{\eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot d^2} \leq s_{\text{ceff},\text{lim}}$$

$$\zeta_{\text{eff}} = 0,5 + 0,5\sqrt{1 - 2s_{\text{ceff}}}$$

$$A_{s1} = \frac{M_{\text{Ed}}}{f_{\text{yd}} \cdot \zeta_{\text{eff}} \cdot d} \geq A_{s1,\text{min}}$$

LUB

$$\xi_{\text{eff}} = 1,0 - \sqrt{1 - 2s_{\text{ceff}}}$$

$$A_{s1} = \frac{\eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot \xi_{\text{eff}} \cdot b_{\text{eff}} \cdot d}{f_{\text{yd}}} \geq A_{s1,\text{min}}$$

Jeżeli $M > M_f \Rightarrow$ **przekrój rzeczywisty teowy**:

SCHEMAT I_A

$$M_1 = \eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot (b_{\text{eff}} - b_w) \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)$$

$$A_{s11} = \frac{\eta \cdot f_{\text{cd}}}{f_{\text{yd}}} \cdot (b_{\text{eff}} - b_w) \cdot h_f$$

SCHEMAT I_B

$$M_2 = M - M_1$$

$$s_{\text{ceff}} = \frac{M_2}{\eta \cdot f_{\text{cd}} \cdot b_w \cdot d^2} \leq s_{\text{ceff},\text{lim}}$$

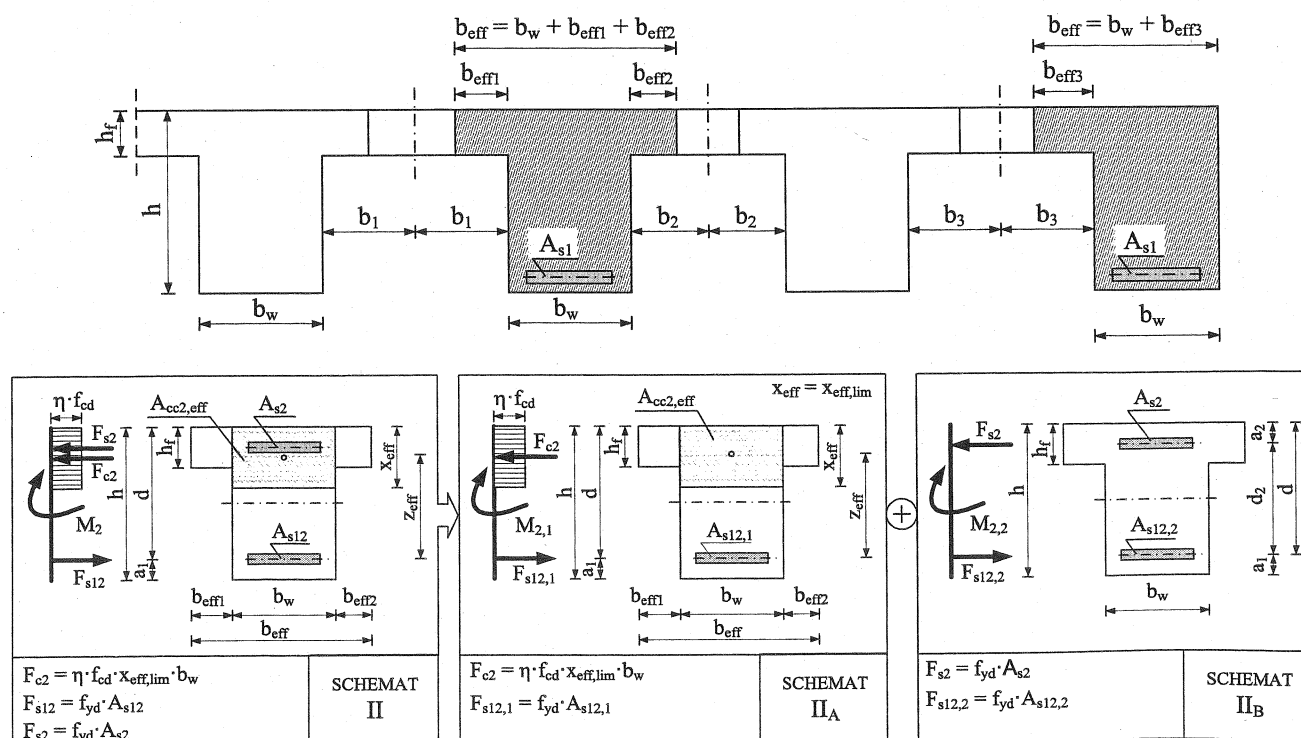
Jeżeli $s_{ceff} \leq s_{ceff,lim} \Rightarrow$ wymiarować jako przekrój rzeczywisty teowy pojedynczo zbrojony.		
$\zeta_{eff} = 0,5 + 0,5 \cdot \sqrt{1 - 2 \cdot s_{ceff}}$ $A_{s12} = \frac{M_2}{f_{yd} \cdot \zeta_{eff} \cdot d}$	LUB	$\xi_{eff} = 1,0 - \sqrt{1 - 2s_{ceff}}$ $A_{s12} = \frac{\eta \cdot f_{cd} \cdot \xi_{eff} \cdot b_w \cdot d}{f_{yd}} \geq A_{s1,min}$
Ostateczne zbrojenie: $A_{s1} = A_{s11} + A_{s12} \geq A_{s1,min}$		
Jeżeli $s_{ceff} > s_{ceff,lim} \Rightarrow$ wymiarować jako przekrój rzeczywisty teowy podwójnie zbrojony.		

NOŚNOŚĆ GRANICZNA:

Obliczyć wartości rzeczywiste:			
a_1	d	$A_{s1,prov}$	$d = h - a_1$
$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$ $c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm} \}$			
$a_v, a_h \geq \begin{cases} \phi \cdot k_1 \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \end{cases}$ <p>gdzie: $k_1 = 1,0$ d_g – maksymalny wymiar ziarna kruszywa $k_2 = 5 \text{ mm}$ $c_{min,b}$ Tablica 2.2. $c_{min,dur}$ Tablica 2.4. Δc_{dev} Tablica 2.5.</p>			
$x_{eff,lim} = \xi_{eff,lim} \cdot d$			
$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{s1,prov}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}}$			
Jeżeli $x_{eff} \leq h_f \Rightarrow$ przekrój pozornie teowy			
$\xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d}$ $\zeta_{eff} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{eff}$ $s_{ceff} = \xi_{eff} \cdot \zeta_{eff}$ $M_{Rd} = s_{ceff} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2$			
$M \leq M_{Rd}$			

Jeżeli $x_{eff} > h_f \Rightarrow$ przekrój rzeczywisty teowy	
$M_1 = \eta \cdot f_{cd} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)$ $A_{s11} = \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f$ $A_{s12} = A_{s1,prov} - A_{s11}$	
$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot A_{s12}}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b_w}$	
Jeżeli $x_{eff} \leq x_{eff,lim} \Rightarrow$	Jeżeli $x_{eff} > x_{eff,lim} \Rightarrow$
$\xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d}$ $\zeta_{eff} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{eff}$ $s_{ceff} = \xi_{eff} \cdot \zeta_{eff}$ $M_2 = s_{ceff} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ $M_{Rd} = M_1 + M_2$	$M_2 = s_{ceff,lim} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ $M_{Rd} = M_1 + M_2$
$M \leq M_{Rd}$	

3.4. Przekrój teowy podwójnie zbrojony



Rysunek 3.4. Naprężenia w stanie granicznym w przekroju teowym podwójnie zbrojonym

Dane:

$M = M_{Ed}$	$f_{cd} = \alpha_{cc} \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c}, \alpha_{cc} = 1,0, \gamma_c = 1,4$	f_{yd}	E_s	b	h
--------------	---	----------	-------	-----	-----

Szukane:

Pole przekroju zbrojenia w strefie rozciąganej betonu: A_{s1}

Wartości graniczne:

$\xi_{eff,lim} = \frac{x_{eff,lim}}{d} = \lambda \cdot \left(\frac{\varepsilon_{cu3}}{\varepsilon_{cu3} - \varepsilon_{yd}} \right), \quad \varepsilon_{yd} = -\frac{f_{yd}}{E_s}, \quad \varepsilon_{cu3} - \text{wartość z Tablicy 1.13a.}$	
$\zeta_{eff,lim} = 1 - 0,5\xi_{eff,lim}$	$s_{ceff,lim} = \xi_{eff,lim} \cdot \zeta_{eff,lim}$
Przyjąć $a_1 \approx 5,0 \text{ cm}$	$d = h - a_1$

WYMIAROWANIE:

Jeżeli $M > M_f \Rightarrow$ *przekrój rzeczywisty teowy:*

Jeżeli $s_{ceff} > s_{ceff,lim} \Rightarrow$ *wymiarować jako przekrój rzeczywisty teowy podwójnie zbrojony.*

SCHEMAT I_A

$$M_1 = \eta \cdot f_{cd} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)$$

$$A_{s11} = \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f$$

SCHEMAT II_A

$$M_2 = M - M_1$$

$$M_{2,1} = s_{ceff,lim} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d^2$$

$$A_{s12,1} = \frac{\eta \cdot f_{cd} \cdot x_{eff,lim} \cdot b_w}{f_{yd}}$$

SCHEMAT II_B

$$M_{2,2} = M_2 - M_{2,1}$$

$$A_{s2} = A_{s12,2} = \frac{M_{2,2}}{f_{yd} \cdot (d - a_2)}$$

$$A_{s2} \geq A_{s2min}$$

Ostateczne zbrojenie:

$$A_{s1} = A_{s11} + A_{s12,1} + A_{s12,2} \geq A_{s1min}$$

NOSNOŚĆ GRANICZNA							
Obliczyć wartości rzeczywiste:							
a_1	a_2	d	d_2	$A_{s1,prov}$	$A_{s2,prov}$	$d = h - a_1$	$d_2 = d - a_2$
$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$ $c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur}; 10 \text{ mm} \}$							
$a_v, a_h \geq \begin{cases} \phi \cdot k_1 \\ 20 \text{ mm} \\ d_g + k_2 \end{cases}$ <p>gdzie: $k_1 = 1,0$ d_g – maksymalny wymiar ziarna kruszywa $k_2 = 5 \text{ mm}$ $c_{min,b}$ Tablica 2.1/2. $c_{min,dur}$ Tablica 2.1/4. Δc_{dev} Tablica 2.1/5.</p>							
$x_{eff,lim} = \xi_{eff,lim} \cdot d$							
$x_{eff} = \frac{f_{yd} \cdot (A_{s1,prov} - A_{s2,prov})}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}}$							
<p>Jeżeli $x_{eff} \leq h_f \Rightarrow$ przekrój pozornie teowy</p>							
<p>Jeżeli $x_{eff} \leq 2 \cdot a_2 \Rightarrow$</p>		<p>Jeżeli $x_{eff} > 2 \cdot a_2 \Rightarrow$</p>					
$M_{Rd} = A_{s1,prov} \cdot f_{yd} \cdot d_2$		$\xi_{eff} = \frac{x_{eff}}{d} \quad \zeta_{eff} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{eff} \quad s_{ceff} = \xi_{eff} \cdot \zeta_{eff}$ $M_1 = s_{ceff} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b_{eff} \cdot d^2$ $M_2 = f_{yd} \cdot A_{s2,prov} \cdot d_2$ $M_{Rd} = M_1 + M_2$					
$M \leq M_{Rd}$							
<p>Jeżeli $x_{eff} > h_f \Rightarrow$ przekrój rzeczywisty teowy</p>							
$M_1 = \eta \cdot f_{cd} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f \cdot (d - 0,5 \cdot h_f)$ $A_{s11} = \frac{\eta \cdot f_{cd}}{f_{yd}} \cdot (b_{eff} - b_w) \cdot h_f$ $A_{s12} = A_{s1,prov} - A_{s11}$							

$$x_{\text{eff}} = \frac{f_{yd} \cdot (A_{s12} - A_{s2,\text{prov}})}{\eta \cdot f_{cd} \cdot b_w}$$

Jeżeli $x_{\text{eff}} \leq x_{\text{eff},\text{lim}} \Rightarrow$	Jeżeli $x_{\text{eff}} > x_{\text{eff},\text{lim}} \Rightarrow$
$\xi_{\text{eff}} = \frac{x_{\text{eff}}}{d} \quad \zeta_{\text{eff}} = 1 - 0,5 \cdot \xi_{\text{eff}}$ $s_{\text{ceff}} = \xi_{\text{eff}} \cdot \zeta_{\text{eff}}$ $M_{2,1} = s_{\text{ceff}} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ $M_{2,2} = f_{yd} \cdot A_{s2,\text{prov}} \cdot d_2$ $M_{\text{Rd}} = M_1 + M_{2,1} + M_{2,2}$	$M_{2,1} = s_{\text{ceff},\text{lim}} \cdot \eta \cdot f_{cd} \cdot b \cdot d^2$ $M_{2,2} = f_{yd} \cdot A_{s2,\text{prov}} \cdot d_2$ $M_{\text{Rd}} = M_1 + M_{2,1} + M_{2,2}$
$M \leq M_{\text{Rd}}$	