



**Algorytm do obliczeń stanów granicznych
zginanych belek żelbetowych wzmocnionych
wstępnie naprężanymi taśmami CFRP**

Ekran 1 - Dane wejściowe

Materiały

Beton

Klasa betonu: C 45/55

Wybór z listy rozwijalnej wg poniższej tabeli - Użytkownik wybiera klasę betonu, wszystkie wartości ładują się automatycznie, ale powinien mieć możliwość ręcznej zmiany załadowanych wartości.

Klasa betonu	f _{ck}	f _{ctm}	E _{cm}	ε _{c2}	ε _{cu2}	n
Jednostka	[MPa]	[MPa]	[GPa]	[‰]	[‰]	[-]
C 12/15	12	1,6	27	2,0	3,5	2
C 16/20	16	1,9	29	2,0	3,5	2
C 20/25	20	2,2	30	2,0	3,5	2
C 25/30	25	2,6	31	2,0	3,5	2
C 30/37	30	2,9	32	2,0	3,5	2
C 35/45	35	3,2	34	2,0	3,5	2
C 40/50	40	3,5	35	2,0	3,5	2
C 45/55	45	3,8	36	2,0	3,5	2
C 50/60	50	4,1	37	2,0	3,5	2
C 55/67	55	4,2	38	2,2	3,1	1,75
C 60/75	60	4,4	39	2,3	2,9	1,6
C 70/85	70	4,6	41	2,4	2,7	1,45
C 80/95	80	4,8	42	2,5	2,6	1,4
C 90/105	90	5,0	44	2,6	2,6	1,4

$f_{ck} := 45\text{MPa}$	- charakterystyczna wytrzymałość betonu na ściskanie
$f_{ctm} := 3.8\text{MPa}$	- średnia wytrzymałość betonu na rozciąganie
$E_{cm} := 36\text{GPa}$	- moduł sprężystości betonu
$\epsilon_{c2} := 2.0 \cdot ‰$	- maksymalne odkształcenie betonu przy ściskaniu
$\epsilon_{cu2} := 3.5 \cdot ‰$	- maksymalne odkształcenie betonu na krawędzi ściskanej przy zginaniu
$n := 2$	- wykładnik potęgi
$\phi := 2$	- współczynnik pełzania
$\gamma_c := 1.4$	- częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla betonu

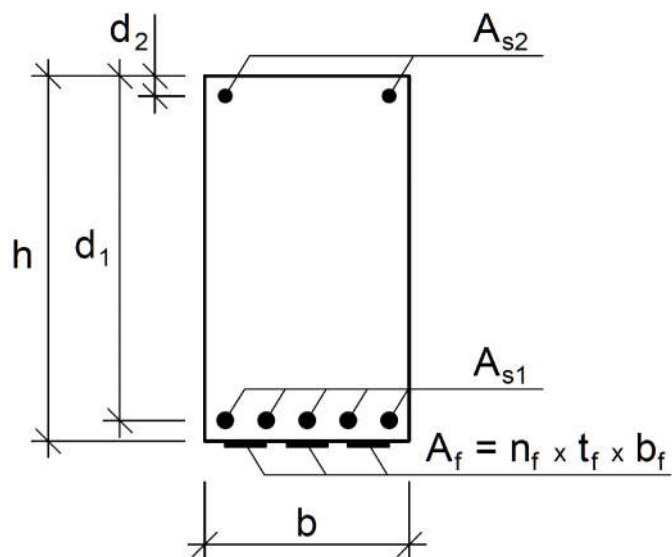
Stal

$f_{yk} := 500\text{MPa}$	- charakterystyczna granica plastyczności stali zbrojeniowej
$E_s := 200\text{GPa}$	- moduł sprężystości stali zbrojeniowej
$\gamma_s := 1.15$	- częściowy współczynnik bezpieczeństwa dla stali

Przekrój

Geometria

$h := 42\text{cm}$ - wysokość przekroju
 $b := 50\text{cm}$ - szerokość przekroju



Zbrojenie

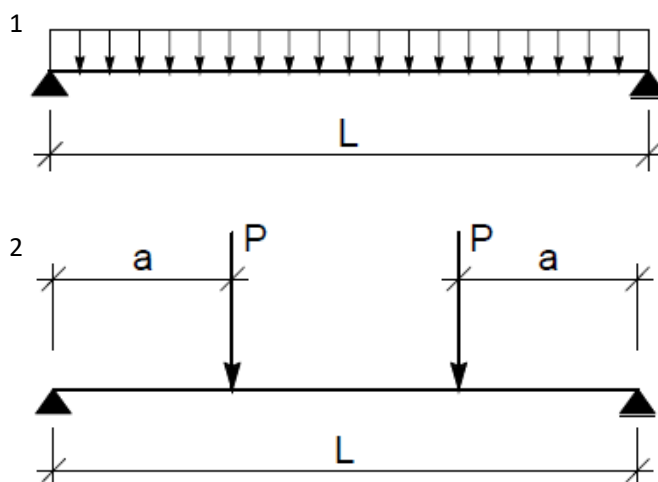
$A_{s1} := 14.7\text{cm}^2$ - pole powierzchni zbrojenia dolnego
 $A_{s2} := 14.7\text{cm}^2$ - pole powierzchni zbrojenia górnego
 $\phi_{s1} := 25\text{mm}$ - średnica zbrojenia dolnego
 $d_1 := 37\text{cm}$ - odległość środka ciężkości zbrojenia dolnego od krawędzi ściskanej przekroju
 $d_2 := 5\text{cm}$ - odległość środka ciężkości zbrojenia górnego od krawędzi ściskanej przekroju

Obciążenia

Wybór schematu obciążenia

- 1 - obciążenie równomiernie rozłożone
- 2 - dwie siły skupione

Schemat := 2



$L := 5.6\text{m}$ - rozpiętość teoretyczna
 $a := 1.80\text{m}$ - odległość siły skupionej od osi podparcia
 UWAGA:
 pole aktywne tylko w przypadku wyboru schematu 2

$M_{Sk0} := 20\text{kNm}$ - charakterystyczny moment zginający podczas wzmocniania
 $M_{Sk1} := 220\text{kNm}$ - moment zginający po wzmocnieniu od charakterystycznej kombinacji obciążeń
 $M_{Sk2} := 150\text{kNm}$ - moment zginający po wzmocnieniu od quasi-stałej kombinacji obciążeń

Wzmocnienie

$f_{fu} := 3200\text{MPa}$ - charakterystyczna wytrzymałość na rozciąganie kompozytu

$E_f := 160\text{GPa}$ - moduł sprężystości kompozytu

$\varepsilon_{fu} := 20 \cdot \%$ - odkształcenie graniczne kompozytu

$\varepsilon_{fp} := 10 \cdot \%$ - wstępne odkształcenie kompozytu od sprężenia

$\gamma_f := 1.2$ - współczynnik materiałowy dla kompozytu

KOMUNIKAT:

jeżeli $\varepsilon_{fp} > 0,6 \varepsilon_{fu}$ wyświetlić komunikat:

"Poziom sprężenia nie powinny przekraczać $0,6 f_{fu}$ "

$n_f := 2$ - liczba taśm CFRP

$t_f := 1.4\text{mm}$ - grubość taśmy

$b_f := 60\text{mm}$ - szerokość taśmy

▼ Obliczenia

Obliczenia - niewidoczne dla użytkownika**Jednostki**długość: $1\text{m} = 100 \cdot \text{cm}$ $1\text{cm} = 10 \cdot \text{mm}$ siła: $1\text{kN} = 1000 \text{ N}$ moment zginający: $1\text{kNm} = 1 \cdot \text{kN} \cdot \text{m}$ odkształcenia: $\text{‰} = 0.001$ naprężenia: $1\text{MPa} = 1 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $1\text{GPa} = 1000 \cdot \text{MPa}$ **Parametry przekroju** $A_c := h \cdot b = 2100 \cdot \text{cm}^2$ - pole przekroju $A_f := n_f \cdot t_f \cdot b_f$ - pole przekroju wzmocnienia kompozytowego
$$b_{\min} := \begin{cases} 25\text{cm} + (n_f - 1) \cdot 10\text{cm} & \text{if } n_f > 1 \\ 25\text{cm} & \text{otherwise} \end{cases} = 0.35 \text{ m}$$
Warunek $b \geq b_{\min}$ **KOMUNIKAT:**Jeżeli $b < b_{\min}$ wyświetlić komunikat:

"Może wystąpić problem z montażem takiej liczby taśm systemu Neoxe Prestressing System II na szerokości belki.

Sprawdź położenie taśm z zakotwieniami i urządzeniem naciągowym w przekroju poprzecznym."

Ale obliczenia można prowadzić dalej.

Ogólne $\varepsilon_{c2} := -\varepsilon_{c2}$ Użytkownik definiuje jako wartości dodatnie, obliczenia prowadzone są na ujemnych. $\varepsilon_{cu2} := -\varepsilon_{cu2}$

$$f_{cd} := \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 32.1 \cdot \text{MPa}$$
- wytrzymałość obliczeniowa betonu na ściskanie

$$f_{yd} := \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = 435 \cdot \text{MPa}$$
- wytrzymałość obliczeniowa stali zbrojeniowej

$$\alpha_s := \frac{E_s}{E_{cm}} = 5.56$$
- stosunek modułów sprężystości stali i betonu

$$\alpha_f := \frac{E_f}{E_{cm}} = 4.44$$
- stosunek modułów sprężystości kompozytu i betonu

$$\epsilon_{slimk} := \frac{f_{yk}}{E_s} = 2.5 \cdot ‰$$

- minimalne wymagane odkształcenie stali zbrojeniowej odpowiadające odkształceniu uplastyczniającemu

$$\epsilon_{slimd} := \frac{f_{yd}}{E_s} = 2.17 \cdot ‰$$

- minimalne wymagane odkształcenie stali zbrojeniowej odpowiadające odkształceniu uplastyczniającemu

$$\alpha_{cc} := 1.00$$

- współczynnik uwzględniający różnicę wytrzymałości betonu uzyskaną na próbkach i w konstrukcji [wg EC2 - załącznik krajowy]

$$\eta := \begin{cases} 1.0 & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 1.0 - \frac{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 50}{200} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

- współczynnik kształtu rozkładu naprężeń w strefie ściskanej betonu

$$\lambda := \begin{cases} 0.8 & \text{if } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ 0.8 - \frac{\frac{f_{ck}}{\text{MPa}} - 50}{400} & \text{if } 50 \text{ MPa} < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases}$$

- współczynnik wysokości bloku zastępczego strefy ściskanej betonu

BŁĄD

W przypadku błędu w obliczeniu η i λ wyświetlić komunikat:

"Za duża wartość wytrzymałości betonu na ściskanie.

Zakres obliczeń obejmuje klasy betonu ujęte w Eurokodzie 2."

I. Stan Graniczny Nośności

Nośność obliczeniowa przekroju bez wzmocnienia

$$x_{lim} := \frac{|\epsilon_{cu2}|}{|\epsilon_{cu2}| + \epsilon_{slimd}} \cdot d_1 = 22.82 \cdot \text{cm}$$

- maksymalna wysokość strefy ściskanej

$$\epsilon_c(x) := \epsilon_{cu2}$$

- odkształcenia górnych włókien betonu

$$\epsilon_{s1}(x) := \epsilon_{cu2} \cdot \frac{x - d_1}{x}$$

- odkształcenia zbrojenia dolnego

$$\epsilon_{s2}(x) := \epsilon_{cu2} \cdot \frac{x - d_2}{x}$$

- odkształcenia zbrojenia górnego

$$F_c(x) := -\eta \cdot \lambda \cdot x \cdot b \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd}$$

- siła przenoszona przez beton

$$F_{s1}(x) := \begin{cases} A_{s1} \cdot \epsilon_{s1}(x) \cdot E_s & \text{if } \epsilon_{s1}(x) < \epsilon_{slimd} \\ A_{s1} \cdot f_{yd} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- siła przenoszona przez zbrojenie dolne

$$F_{s2}(x) := \begin{cases} A_{s2} \cdot \epsilon_{s2}(x) \cdot E_s & \text{if } \epsilon_{s2}(x) < \epsilon_{slimd} \\ A_{s2} \cdot f_{yd} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- siła przenoszona przez zbrojenie górne

Sformułowanie warunków brzegowych i rozwiązanie równania równowagi sił w przekroju:

Given $x := 1 \text{ cm}$ - wstępna wysokość strefy ściskanej

$F_{s1}(x) + F_c(x) + F_{s2}(x) = 0$ - warunek równowagi sił poziomych

$$0\text{cm} < x \leq x_{\text{lim}} \quad - \text{warunek położenia osi obojętnej}$$

$$x := \text{Find}(x) = 4.99 \cdot \text{cm} \quad - \text{wysokość strefy ściskanej}$$

BŁĄD

Jeżeli $x > x_{\text{lim}}$ wyświetlić komunikat: "Przekrój przezbrojony, należy zmniejszyć stopień zbrojenia."

W przypadku innych błędów komunikat: "Sprawdź dane wejściowe."

$$F_c(x) = -641 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez beton}$$

$$F_{s1}(x) = 639 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie dolne}$$

$$F_{s2}(x) = 2 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie górne}$$

$$\epsilon_c(x) = -3.5 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia górnych włókien betonu}$$

$$\epsilon_{s1}(x) = 22.5 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia dolnego}$$

$$\epsilon_{s2}(x) = 0.01 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia górnego}$$

$$z_1 := d_1 - \frac{\lambda \cdot x}{2} = 35 \cdot \text{cm} \quad - \text{ramię sił wewnętrznych}$$

Nośność obliczeniowa przekroju bez wzmocnienia:

$$M_{Rd0} := F_{s1}(x) \cdot d_1 + F_c(x) \cdot 0.5 \cdot \lambda \cdot x + F_{s2}(x) \cdot d_2$$

$$M_{Rd0} = 224 \cdot \text{kNm}$$

Nośność obliczeniowa przekroju wzmocnionego

Faza a) Wytyczenie elementu przed wzmocnieniem

Sprawdzenie czy przekrój został zarysowany przed wzmocnieniem

Charakterystyki niezarysowanego przekroju sprowadzonego belki bez wzmocnienia

$$A_{cs0} := h \cdot b + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s1} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} = 2234 \cdot \text{cm}^2$$

$$S_{cs0} := h \cdot b \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s1} \cdot d_1 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot d_2 = 46913 \cdot \text{cm}^3$$

$$d_{cs0} := \frac{S_{cs0}}{A_{cs0}} = 21 \cdot \text{cm}$$

$$J_{cs0} := \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left(d_{cs0} - \frac{h}{2} \right)^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - d_{cs0})^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (d_{cs0} - d_2)^2$$

$$J_{cs0} = 342987 \cdot \text{cm}^4 \quad - \text{moment bezwładności przekroju niezarysowanego}$$

$$W_{cs0} := \frac{J_{cs0}}{h - d_{cs0}} = 16333 \cdot \text{cm}^3 \quad - \text{wskaźnik wytrzymałości}$$

$$M_{cr0} := W_{cs0} \cdot f_{ctm} = 62.1 \cdot \text{kNm} \quad - \text{moment rysujący przekroju bez wzmocnienia}$$

Charakterystyki zarysowanego przekroju sprowadzonego belki bez wzmocnienia

$$\text{Given} \quad x_{cr0} := 1 \text{cm}$$

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_{cr0}^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_{cr0} - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x_{cr0})$$

$$0\text{cm} < x_{cr0}$$

$$x_{cr0} := \text{Find}(x_{cr0})$$

$$x_{cr0} = 8.99 \cdot \text{cm} \quad - \text{wysokość strefy ściskanej}$$

$$J_{cr0} := \frac{b \cdot x_{cr0}^3}{3} + \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x_{cr0})^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_{cr0} - d_2)^2$$

$$J_{cr0} = 77248 \cdot \text{cm}^4 \quad - \text{moment bezwładności przekroju zarysowanego}$$

$$\text{Przekrój} := \begin{cases} \text{"niezarysowany"} & \text{if } M_{Sk0} < M_{cr0} \\ \text{"zarysowany"} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \text{Przekrój} = \text{"niezarysowany"}$$

$$y_g := \begin{cases} d_{cs0} & \text{if } \text{Przekrój} = \text{"niezarysowany"} \\ x_{cr0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad - \text{położenie osi obojętnej}$$

$$y_g = 0.21 \text{ m}$$

$$J_{c0} := \begin{cases} J_{cs0} & \text{if } \text{Przekrój} = \text{"niezarysowany"} \\ J_{cr0} & \text{otherwise} \end{cases} \quad - \text{moment bezwładności przekroju}$$

$$J_{c0} = 342987 \cdot \text{cm}^4$$

Stan odkształceń w przekroju przed wzmocnieniem:

$$\varepsilon_{cg0} := \frac{-M_{Sk0} \cdot y_g}{E_{cm} \cdot J_{c0}} = -0.03 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia górnych włókien betonu przed wzmocnieniem}$$

$$\varepsilon_{cd0} := -\varepsilon_{cg0} \cdot \frac{h - y_g}{y_g} = 0.03 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia dolnych włókien betonu przed wzmocnieniem}$$

$$\varepsilon_{s10} := \varepsilon_{cg0} \cdot \frac{y_g - d_1}{y_g} = 0.0259 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia w zbrojeniu dolnym przed wzmocnieniem}$$

$$\varepsilon_{s20} := \varepsilon_{cg0} \cdot \frac{y_g - d_2}{y_g} = -0.0259 \cdot \text{‰} \quad - \text{odkształcenia w zbrojeniu dolnym przed wzmocnieniem}$$

Faza b) Wytyczenie elementu po naprężeniu taśm

Charakterystyki niezarysowanego przekroju sprowadzonego belki wzmocnionej

$$A_{cs2} := h \cdot b + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s1} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} + \alpha_f \cdot A_f = 2241 \cdot \text{cm}^2$$

$$S_{cs2} := h \cdot b \cdot \frac{h}{2} + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s1} \cdot d_1 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot d_2 + \alpha_f \cdot A_f \cdot h = 47226 \cdot \text{cm}^3$$

$$d_{cs2} := \frac{S_{cs2}}{A_{cs2}} = 21.1 \cdot \text{cm}$$

$$J_{cs2} := \frac{b \cdot h^3}{12} + b \cdot h \left(d_{cs2} - \frac{h}{2} \right)^2 + \alpha_s \cdot \left[A_{s1} \cdot (d_1 - d_{cs2})^2 + A_{s2} \cdot (d_{cs2} - d_2)^2 \right] + \alpha_f \cdot A_f \cdot (h - d_{cs2})^2$$

$$J_{cs2} = 353795 \cdot \text{cm}^4 \quad - \text{moment bezwładności}$$

$$W_{cs2} := \frac{J_{cs2}}{h - d_{cs2}} = 16904 \cdot \text{cm}^3 \quad - \text{wskaźnik wytrzymałości}$$

Moment rysujący przekroju wzmocnionego

$$F_{fp} := \epsilon_{fp} \cdot E_f \cdot A_f = 269 \cdot \text{kN}$$

- siła sprężająca

$$e_p := h - d_{cs0} = 0.21 \text{ m}$$

- ramię działania siły sprężającej

$$M_{fp} := -F_{fp} \cdot e_p = -56.4 \cdot \text{kNm}$$

- moment wywołany sprężeniem

$$\sigma_p := \frac{F_{fp}}{A_{cs0}} + \frac{F_{fp} \cdot e_p}{J_{cs0}} \cdot (h - d_{cs0}) = 4.66 \cdot \text{MPa}$$

- naprężenia w dolnych włóknach przekroju wywołane sprężeniem

$$M_{cr2} := W_{cs2} \cdot (f_{ctm} + \sigma_p) \quad M_{cr2} = 143 \cdot \text{kNm}$$

- moment rysujący przekroju wzmocnionego

Moment bezwładności zarysowanego przekroju sprowadzonego belki wzmocnionej

$$\text{Given} \quad x_{cr2} := 1 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{2} b \cdot x_{cr2}^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_{cr2} - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x_{cr2}) + \alpha_f \cdot A_f \cdot (h - x_{cr2})$$

$$0 \text{ cm} < x_{cr2}$$

$$x_{cr2} := \text{Find}(x_{cr2})$$

$$x_{cr2} = 9.39 \cdot \text{cm}$$

- wysokość strefy ściskanej

$$J_{cr2} := \frac{b \cdot x_{cr2}^3}{3} + \alpha_s \cdot \left[A_{s1} \cdot (d_1 - x_{cr2})^2 + A_{s2} \cdot (x_{cr2} - d_2)^2 \right] + \alpha_f \cdot A_f \cdot (h - d_{cs2})^2$$

$$J_{cr2} = 80899 \cdot \text{cm}^4$$

Odształcenia wywołane sprężeniem:

$$\epsilon_{cgp} := \frac{-F_{fp}}{E_{cm} \cdot A_{cs0}} + \frac{-M_{fp}}{E_{cm} \cdot J_{cs0}} \cdot d_{cs0} = 0.06 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia górnych włókien betonu wywołane sprężeniem taśm

$$\epsilon_{cdp} := \frac{-F_{fp}}{E_{cm} \cdot A_{cs0}} + \frac{M_{fp}}{E_{cm} \cdot J_{cs0}} \cdot (h - d_{cs0}) = -0.13 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia dolnych włókien betonu wywołane sprężeniem taśm

$$\epsilon_{s1p} := \frac{-F_{fp}}{E_{cm} \cdot A_{cs0}} + \frac{M_{fp}}{E_{cm} \cdot J_{cs0}} \cdot (d_1 - d_{cs0}) = -0.11 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia w zbrojeniu dolnym wywołane sprężeniem taśm

$$\epsilon_{s2p} := \frac{-F_{fp}}{E_{cm} \cdot A_{cs0}} + \frac{-M_{fp}}{E_{cm} \cdot J_{cs0}} \cdot (d_{cs0} - d_2) = 0.04 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia w zbrojeniu górnym wywołane sprężeniem taśm

Odształcenia w fazie po naprężeniu taśm:

$$\epsilon_{cgII} := \epsilon_{cg0} + \epsilon_{cgp} = 0.029 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia górnych włókien betonu

$$\epsilon_{cdII} := \epsilon_{cd0} + \epsilon_{cdp} = -0.095 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia dolnych włókien betonu

$$\epsilon_{s1II} := \epsilon_{s10} + \epsilon_{s1p} = -0.081 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia zbrojenia dolnego

$$\epsilon_{s2II} := \epsilon_{s20} + \epsilon_{s2p} = 0.014 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia zbrojenia górnego

Nośność obliczeniowa przekroju ze wzmocnieniem czynnym**Wyznaczenie maksymalnych odkształceń kompozytu ze względu na odspojenie**

wg CNR - DT 200/2004

$$k_{cr} := 3.0 \quad - \text{współczynnik}$$

$$k_b := \begin{cases} \sqrt{\frac{2 - \frac{n_f \cdot b_f}{b}}{1 + \frac{n_f \cdot b_f}{400(\text{mm})}}} & \text{if } \frac{n_f \cdot b_f}{b} \geq 0.33 \\ \sqrt{\frac{2 - 0.33}{1 + \frac{n_f \cdot b_f}{400(\text{mm})}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 1.13 \quad - \text{współczynnik geometryczny}$$

$$\Gamma_{Fk} := 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{ck} \cdot f_{ctm}} = 0.445 \cdot \text{MPa} \quad - \text{energia pękania betonu}$$

Odształcenia graniczne w kompozycie ze względu na odspojenie (ICD):

$$\Delta \varepsilon_{f, \text{lim1}} := \frac{k_{cr}}{E_f \cdot \gamma_f \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{Fk}}{\frac{t_f}{\text{mm}}}} = 4.21 \cdot \text{‰}$$

Odształcenia graniczne w kompozycie podczas ze względu na zerwanie:

$$\kappa_f := 0.75 \quad - \text{współczynnik korelacji odkształceń dla kompozytu (0,65-0,80)}$$

$$\Delta \varepsilon_{f, \text{lim2}} := \kappa_f \cdot \left(\frac{\varepsilon_{fu}}{\gamma_f} - \varepsilon_{fp} \right) = 5 \cdot \text{‰} \quad - \text{dopuszczalny przyrost odkształceń kompozytu}$$

$$\Delta \varepsilon_f := \min(\Delta \varepsilon_{f, \text{lim1}}, \Delta \varepsilon_{f, \text{lim2}}) = 4.21 \cdot \text{‰}$$

$$\varepsilon_c(x) := -\Delta \varepsilon_f \cdot \frac{x}{h - x} + \varepsilon_{cgl} \quad - \text{odkształcenia górnych włókien betonu}$$

$$\varepsilon_{s1}(x) := \Delta \varepsilon_f \cdot \frac{d_1 - x}{h - x} + \varepsilon_{s1l} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia dolnego}$$

$$\varepsilon_{s2}(x) := -\Delta \varepsilon_f \cdot \frac{x - d_2}{h - x} + \varepsilon_{s2l} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia górnego}$$

$$\varepsilon_f(x) := \Delta \varepsilon_f + \varepsilon_{fp} \quad - \text{odkształcenia kompozytu}$$

Współczynniki kształtu rozkładu naprężeń w stre e ściskanej betonu k_1 i k_2 :

$$k_1(x) := \begin{cases} \frac{-1000}{6} \cdot (500 \varepsilon_c(x)^2 + 3 \cdot \varepsilon_c(x)) & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \\ 1 + \frac{1}{1500 \varepsilon_c(x)} & \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰} \end{cases}$$

$$k_2(x) := \begin{cases} 1 - \frac{750 \cdot \varepsilon_c(x) + 4}{2 \cdot (500 \varepsilon_c(x) + 3)} & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \\ \left[\frac{0.5 - (3 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon_c(x)^2)^{-1}}{1 + (1500 \cdot \varepsilon_c(x))^{-1}} \right] & \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰} \end{cases}$$

$$F_c(x) := -\eta \cdot k_1(x) \cdot x \cdot b \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{cd} \quad - \text{siła przenoszona przez beton}$$

$$F_{s1}(x) := \begin{cases} A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s1}(x) < \varepsilon_{slimd} \text{ - siła przenoszona przez zbrojenie dolne} \\ A_{s1} \cdot f_{yd} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_{s2}(x) := \begin{cases} A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s2}(x) < \varepsilon_{slimd} \text{ - siła przenoszona przez zbrojenie górne} \\ A_{s2} \cdot f_{yd} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$F_f(x) := A_f \cdot \varepsilon_f(x) \cdot E_f \quad \text{- siła przenoszona przez taśmy}$$

Sformułowanie warunków brzegowych i rozwiązanie równania równowagi sił w przekroju:

Given $x := 1\text{cm}$ - wstępna wysokość strefy ściskanej

$$F_{s1}(x) + F_c(x) + F_{s2}(x) + F_f(x) = 0 \quad \text{- warunek równowagi sił poziomych}$$

$0\text{cm} < x \leq x_{lim}$ - warunek położenia osi obojętnej

$x := \text{Find}(x) = 10.09 \cdot \text{cm}$ - wysokość strefy ściskanej

BŁĄD:

Jeżeli $\varepsilon_c(x) < -3.5\text{‰}$ wyświetlić komunikat: "Odkształcenia w betonie powyżej wartości granicznych, nastąpi zniszczenie betonu w strefie ściskanej. Należy zmniejszyć stopień zbrojenia kompozytowego."

$F_c(x) = -828 \cdot \text{kN}$ - siła przenoszona przez beton

$F_{s1}(x) = 639 \cdot \text{kN}$ - siła przenoszona przez zbrojenie dolne

$F_{s2}(x) = -194 \cdot \text{kN}$ - siła przenoszona przez zbrojenie górne

$F_f(x) = 382 \cdot \text{kN}$ - siła przenoszona przez taśmy

$\varepsilon_c(x) = -1.3\text{‰}$ - odkształcenia górnych włókien betonu

$\varepsilon_{s1}(x) = 3.47\text{‰}$ - odkształcenia zbrojenia dolnego

$\varepsilon_{s2}(x) = -0.66\text{‰}$ - odkształcenia zbrojenia górnego

$\varepsilon_f(x) = 14.2\text{‰}$ - odkształcenia taśm kompozytowych

$k_1(x) = 0.51$ - współczynniki kształtu rozkładu naprężeń

$k_2(x) = 0.36$ w strefie ściskanej betonu

Nośność obliczeniowa przekroju ze wzmocnieniem czynnym:

$$M_{Rd} := F_f(x) \cdot h + F_{s1}(x) \cdot d_1 + F_c(x) \cdot k_2(x) \cdot x + F_{s2}(x) \cdot d_2 \quad M_{Rd} = 357 \cdot \text{kNm}$$

Stopień wzmocnienia

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Rd0}} = 1.6$$

II. Stan Graniczny Użytkowości

Ograniczenie naprężeń

Kombinacja charakterystyczna

Given $x_e := 1\text{cm}$

$$\frac{1}{2} b \cdot x_e^2 + (\alpha_s - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d_2) = \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x_e) + \alpha_f \cdot A_f \cdot (h - x_e)$$

$0\text{cm} < x_e$

$x_e := \text{Find}(x_e)$

$$x_e = 9.39 \cdot \text{cm}$$

$$\varepsilon_c := \frac{M_{Sk1}}{E_{cm} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) A_{s2} \cdot \frac{(x_e - d_2)}{x_e} \cdot (h - d_2) - \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot \frac{(d_1 - x_e)}{x_e} \cdot (h - d_1) \right]}$$

$$\varepsilon_c = 0.67 \cdot \text{‰}$$

$$\varepsilon_{cSLS1} := \varepsilon_c + \varepsilon_{cgp} = 0.74 \cdot \text{‰}$$

$$\sigma_{c1} := E_{cm} \cdot \varepsilon_{cSLS1}$$

$$\sigma_{c1} = 26.5 \cdot \text{MPa}$$

$$1.0 \cdot f_{ck} = 45 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Warunek}(\sigma_{c1} \leq 1.0 \cdot f_{ck}) = \text{"spełniony"}$$

$$\varepsilon_{sSLS1} := \varepsilon_c \cdot \frac{d_1 - x_e}{x_e} + \varepsilon_{s1p} = 1.87 \cdot \text{‰}$$

$$\sigma_{s1} := \begin{cases} \varepsilon_{sSLS1} \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{sSLS1} < \varepsilon_{slimk} \\ f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{s1} = 374 \cdot \text{MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Warunek}(\sigma_{s1} \leq 0.8 \cdot f_{yk}) = \text{"spełniony"}$$

Kombinacja quasi-stała

$$E_{c,eff} := \frac{E_{cm}}{1 + \phi} = 12 \cdot \text{GPa}$$

$$\alpha_{s,eff} := \frac{E_s}{E_{c,eff}} = 16.67$$

$$\alpha_{f,eff} := \frac{E_f}{E_{c,eff}} = 13.33$$

$$\text{Given } x_e := 1 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e^2 + (\alpha_{s,eff} - 1) \cdot A_{s2} \cdot (x_e - d_2) = \alpha_{s,eff} \cdot A_{s1} \cdot (d_1 - x_e) + \alpha_{f,eff} \cdot A_f \cdot (h - x_e)$$

$$0 \text{ cm} < x_e$$

$$x_e := \text{Find}(x_e)$$

$$x_e = 13.4 \cdot \text{cm}$$

$$\varepsilon_c := \frac{M_{Sk2}}{E_{c,eff} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot b \cdot x_e \cdot \left(h - \frac{x_e}{3} \right) + (\alpha_s - 1) A_{s2} \cdot \frac{(x_e - d_2)}{x_e} \cdot (h - d_2) - \alpha_s \cdot A_{s1} \cdot \frac{(d_1 - x_e)}{x_e} \cdot (h - d_1) \right]}$$

$$\varepsilon_c = 0.93 \cdot \text{‰}$$

$$\varepsilon_{cSLS2} := \varepsilon_c + \varepsilon_{cgp} = 0.99 \cdot \text{‰}$$

$$\sigma_{c2} := E_{c,eff} \cdot \varepsilon_{cSLS2}$$

$$\sigma_{c2} = 11.9 \cdot \text{MPa}$$

$$0.45 \cdot f_{ck} = 20.3 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Warunek}(\sigma_{c2} \leq 0.45 \cdot f_{ck}) = \text{"spełniony"}$$

$$\epsilon_{sSLS2} := \epsilon_c \cdot \frac{d_1 - x_e}{x_e} + \epsilon_{s1p} = 1.54 \cdot \text{‰}$$

$$\sigma_{s2} := \begin{cases} \epsilon_{sSLS2} \cdot E_s & \text{if } \epsilon_{sSLS2} < \epsilon_{s\text{limk}} \\ f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\sigma_{s2} = 307 \cdot \text{MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Warunek}(\sigma_{s2} \leq 0.8 \cdot f_{yk}) = \text{"spełniony"}$$

$$\epsilon_{fSLS2} := \epsilon_c \cdot \frac{h - x_e}{x_e} + \epsilon_{fp} = 11.99 \cdot \text{‰}$$

$$\sigma_{f2} := \epsilon_{fSLS2} \cdot E_f = 1918 \cdot \text{MPa}$$

$$\sigma_{f2} = 1918 \cdot \text{MPa}$$

$$0.8 \cdot f_{fu} = 2560 \cdot \text{MPa}$$

$$\text{Warunek}(\sigma_{f2} \leq 0.8 \cdot f_{fu}) = \text{"spełniony"}$$

Szerokość rozwarcia rys

$$A_{c,eff} := \min \left[2.5 \cdot (h - d_1) \cdot b, (h - x_e) \cdot \frac{b}{3} \right] = 477 \cdot \text{cm}^2 \text{ - efektywny przekrój betonu przy rozciąganiu}$$

$$\tau_{sm} := 1.8 \cdot f_{ctm} = 6.84 \cdot \text{MPa} \quad \text{- średnie naprężenie ścinające w stali}$$

$$\tau_{fm} := 1.25 \cdot f_{ctm} = 4.75 \cdot \text{MPa} \quad \text{- średnie naprężenie ścinające w kompozycie}$$

$$u_f := n_f \cdot b_f = 12 \cdot \text{cm} \quad \text{- długość styku kompozytu z betonem}$$

$$\xi_b := \frac{\tau_{fm} \cdot E_s \cdot \phi_{s1}}{\tau_{sm} \cdot E_f \cdot 4 \cdot t_f} = 3.88$$

$$s_{rm} := \frac{2 \cdot f_{ctm} \cdot A_{c,eff}}{\tau_{fm} \cdot u_f} \cdot \frac{\xi_b \cdot E_f \cdot A_f}{E_s \cdot A_{s1} + \xi_b \cdot E_f \cdot A_f} = 16.63 \cdot \text{cm} \quad \text{- średnia odległość między rysami}$$

$$\beta_1 := 1 \quad \begin{array}{l} \text{- dla stali żebrowanej} \\ \text{(0.5 dla stali gładkiej)} \end{array}$$

$$\beta_2 := 0.5 \quad \begin{array}{l} \text{- dla obciążeń długotrwałych} \\ \text{(1.0 dla obciążeń krótkotrwałych)} \end{array}$$

$$\zeta := 1 - \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \left(\frac{M_{cr2}}{M_{Sk2}} \right)^n = 0.55 \quad \text{- współczynnik określający sztywność przy rozciąganiu}$$

$$z_e := \frac{(h + d_1)}{2} - \frac{x_e}{3} = 35.03 \cdot \text{cm}$$

$$N_{rk} := \frac{M_{Sk2}}{z_e} = 428.16 \cdot \text{kN}$$

$$\varepsilon_2 := \frac{N_{rk} + E_f \cdot A_f \cdot (\varepsilon_{cdII})}{E_s \cdot A_{s1} + E_f \cdot A_f} = 1.33 \cdot \text{‰}$$

- odkształcenia w stali zbrojeniowej w stanie pełnego zarysowania

$$\beta := 1.7$$

- współczynnik określający zależność między wartościami średnimi i charakterystycznymi szerokości rys

$$w_k := \max(\beta \cdot s_{rm} \cdot \zeta \cdot \varepsilon_2, 0 \text{ mm})$$

- szerokość rozwarcia rysy

$$w_k = 0.2 \cdot \text{mm}$$

$$w_{\max} := 0.3 \text{ mm}$$

- dopuszczalna szerokość rozwarcia rys

$$\text{Warunek}(w_k < w_{\max}) = \text{"spełniony"}$$

Moment uplastycznienia stali zbrojeniowej w przekroju ze wzmocnieniem czynnym

$$\varepsilon_{s1}(x) := \varepsilon_{s1\limk} + -\varepsilon_{s1p}$$

- odkształcenia zbrojenia dolnego odpowiadające uplastycznieniu zwiększone o odkształcenie wynikające ze sprężenia taśm

$$\varepsilon_{s2}(x) := -\varepsilon_{s1}(x) \cdot \frac{x - d_2}{d_1 - x} + \varepsilon_{s2II}$$

- odkształcenia zbrojenia górnego

$$\varepsilon_c(x) := -\varepsilon_{s1}(x) \cdot \frac{x}{d_1 - x} + \varepsilon_{cgII}$$

- odkształcenia górnych włókien betonu

$$\varepsilon_f(x) := \varepsilon_{s1}(x) \cdot \frac{h - x}{d_1 - x} + \varepsilon_{fp}$$

- odkształcenia kompozytu

Współczynniki kształtu rozkładu naprężeń w stre e ściskanej betonu k_1 i k_2 :

$$k_1(x) := \begin{cases} \frac{-1000}{6} \cdot (500 \varepsilon_c(x)^2 + 3 \cdot \varepsilon_c(x)) & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \end{cases}$$

$$1 + \frac{1}{1500 \varepsilon_c(x)} \quad \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰}$$

$$k_2(x) := \begin{cases} 1 - \frac{750 \cdot \varepsilon_c(x) + 4}{2 \cdot (500 \varepsilon_c(x) + 3)} & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \end{cases}$$

$$\left[\frac{0.5 - (3 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon_c(x)^2)^{-1}}{1 + (1500 \cdot \varepsilon_c(x))^{-1}} \right] \quad \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰}$$

$$F_c(x) := -\eta \cdot k_1(x) \cdot x \cdot b \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck}$$

- siła przenoszona przez beton

$$F_{s1}(x) := \begin{cases} A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s1}(x) < \varepsilon_{s1\limk} \\ A_{s1} \cdot f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- siła przenoszona przez zbrojenie dolne

$$F_{s2}(x) := \begin{cases} A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s2}(x) < \varepsilon_{s1\limk} \\ A_{s2} \cdot f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases}$$

- siła przenoszona przez zbrojenie górne

$$F_f(x) := A_f \cdot \varepsilon_f(x) \cdot E_f$$

- siła przenoszona przez taśmy

Sformułowanie warunków brzegowych i rozwiązanie równania równowagi sił w przekroju:

$$\text{Given} \quad x := 1 \text{ cm}$$

- wstępna wysokość strefy ściskanej

$$F_{s1}(x) + F_c(x) + F_{s2}(x) + F_f(x) = 0$$

- warunek równowagi sił poziomych

$$\begin{aligned}
 0\text{cm} < x &\leq x_{\text{lim}} && \text{- warunek położenia osi obojętnej} \\
 \varepsilon_{s1}(x) &\geq \varepsilon_{s\text{limk}} && \text{- warunek uplastycznienia zbrojenia} \\
 x &:= \text{Find}(x) = 0.103 \cdot m && \text{- wysokość strefy ściskanej} \\
 x_{\text{pl}} &:= x \\
 F_c(x) &= -940 \cdot \text{kN} && \text{- siła przenoszona przez beton} \\
 F_{s1}(x) &= 735 \cdot \text{kN} && \text{- siła przenoszona przez zbrojenie dolne} \\
 F_{s2}(x) &= -147 \cdot \text{kN} && \text{- siła przenoszona przez zbrojenie górne} \\
 F_f(x) &= 352 \cdot \text{kN} && \text{- siła przenoszona przez taśmy} \\
 \varepsilon_c(x) &= -0.97 \cdot \text{‰} && \text{- odkształcenia górnych włókien betonu} \\
 \varepsilon_{s1}(x) &= 2.61 \cdot \text{‰} && \text{- odkształcenia zbrojenia dolnego} \\
 \varepsilon_{s2}(x) &= -0.5 \cdot \text{‰} && \text{- odkształcenia zbrojenia górnego} \\
 \varepsilon_f(x) &= 13.1 \cdot \text{‰} && \text{- odkształcenia taśm kompozytowych} \\
 k_1(x) &= 0.407 && \text{- współczynniki kształtu rozkładu naprężeń} \\
 k_2(x) &= 0.35 && \text{w strefie ściskanej betonu}
 \end{aligned}$$

Moment uplastycznienia stali zbrojeniowej dla przekroju ze wzmocnieniem czynnym:

$$M_{\text{pl}} := F_f(x) \cdot h + F_{s1}(x) \cdot d_1 + F_c(x) \cdot k_2(x) \cdot x + F_{s2}(x) \cdot d_2 \quad M_{\text{pl}} = 379 \cdot \text{kNm}$$

Nośność charakterystyczna przekroju ze wzmocnieniem czynnym

Wyznaczenie maksymalnych odkształceń kompozytu ze względu na odspojenie
wg CNR - DT 200/2004

$$\begin{aligned}
 k_{\text{cr}} &:= 3.0 && \text{- współczynnik} \\
 k_b &:= \begin{cases} \sqrt{\frac{2 - \frac{n_f \cdot b_f}{b}}{1 + \frac{n_f \cdot b_f}{400(\text{mm})}}} & \text{if } \frac{n_f \cdot b_f}{b} \geq 0.33 \\ \sqrt{\frac{2 - 0.33}{1 + \frac{n_f \cdot b_f}{400(\text{mm})}}} & \text{otherwise} \end{cases} = 1.13 && \text{- współczynnik geometryczny}
 \end{aligned}$$

$$\Gamma_{\text{Fk}} := 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{f_{\text{ck}} \cdot f_{\text{ctm}}} = 0.445 \cdot \text{MPa} \quad \text{- energia pękania betonu}$$

Odształcenia graniczne w kompozycie ze względu na odspojenie (ICD):

$$\Delta \varepsilon_{f,\text{lim1}} := \frac{k_{\text{cr}}}{E_f} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_f \cdot \Gamma_{\text{Fk}}}{t_f}} = 5.98 \cdot \text{‰}$$

Odształcenia graniczne w kompozycie podczas ze względu na zerwanie:

$$\kappa_f := 0.75 \quad \text{- współczynnik korelacji odkształceń dla kompozytu (0,65-0,80)}$$

$$\Delta \varepsilon_{f,\text{lim2}} := \kappa_f \cdot (\varepsilon_{fu} - \varepsilon_{fp}) = 7.5 \cdot \text{‰} \quad \text{- dopuszczalny przyrost odkształceń kompozytu}$$

$$\Delta \varepsilon_f := \min(\Delta \varepsilon_{f, \text{lim1}}, \Delta \varepsilon_{f, \text{lim2}}) = 5.98 \cdot \text{‰}$$

$$\varepsilon_c(x) := -\Delta \varepsilon_f \cdot \frac{x}{h-x} + \varepsilon_{cgl} \quad - \text{odkształcenia górnych włókien betonu}$$

$$\varepsilon_{s1}(x) := \Delta \varepsilon_f \cdot \frac{d_1 - x}{h - x} + \varepsilon_{s1l} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia dolnego}$$

$$\varepsilon_{s2}(x) := -\Delta \varepsilon_f \cdot \frac{x - d_2}{h - x} + \varepsilon_{s2l} \quad - \text{odkształcenia zbrojenia górnego}$$

$$\varepsilon_f(x) := \Delta \varepsilon_f + \varepsilon_{fp} \quad - \text{odkształcenia kompozytu}$$

Współczynniki kształtu rozkładu naprężeń w stre e ściskanej betonu k_1 i k_2 :

$$k_1(x) := \begin{cases} \frac{-1000}{6} \cdot (500 \varepsilon_c(x)^2 + 3 \cdot \varepsilon_c(x)) & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \end{cases}$$

$$1 + \frac{1}{1500 \varepsilon_c(x)} \quad \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰}$$

$$k_2(x) := \begin{cases} 1 - \frac{750 \cdot \varepsilon_c(x) + 4}{2 \cdot (500 \varepsilon_c(x) + 3)} & \text{if } 0 > \varepsilon_c(x) \geq -2\text{‰} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \left[\frac{0.5 - (3 \cdot 10^6 \cdot \varepsilon_c(x)^2)^{-1}}{1 + (1500 \cdot \varepsilon_c(x))^{-1}} \right] & \text{if } -2\text{‰} > \varepsilon_c(x) \geq -3.5\text{‰} \end{cases}$$

$$F_c(x) := -\eta \cdot k_1(x) \cdot x \cdot b \cdot \alpha_{cc} \cdot f_{ck} \quad - \text{siła przenoszona przez beton}$$

$$F_{s1}(x) := \begin{cases} A_{s1} \cdot \varepsilon_{s1}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s1}(x) < \varepsilon_{s1\text{lim}} \\ A_{s1} \cdot f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie dolne}$$

$$F_{s2}(x) := \begin{cases} A_{s2} \cdot \varepsilon_{s2}(x) \cdot E_s & \text{if } \varepsilon_{s2}(x) < \varepsilon_{s2\text{lim}} \\ A_{s2} \cdot f_{yk} & \text{otherwise} \end{cases} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie górne}$$

$$F_f(x) := A_f \cdot \varepsilon_f(x) \cdot E_f \quad - \text{siła przenoszona przez taśmy}$$

Sformułowanie warunków brzegowych i rozwiązanie równania równowagi sił w przekroju:

$$\text{Given } x := 1\text{cm} \quad - \text{wstępna wysokość strefy ściskanej}$$

$$F_{s1}(x) + F_c(x) + F_{s2}(x) + F_f(x) = 0 \quad - \text{warunek równowagi sił poziomych}$$

$$0\text{cm} < x \leq x_{\text{lim}} \quad - \text{warunek położenia osi obojętnej}$$

$$x := \text{Find}(x) = 8.205 \cdot \text{cm} \quad - \text{wysokość strefy ściskanej}$$

$$x_n := x$$

BŁĄD:

Jeżeli $\varepsilon_c(x) < -3.5\text{‰}$ wyświetlić komunikat: "Odkształcenia w betonie powyżej wartości granicznych, nastąpi zniszczenie betonu w stre e ściskanej. Należy zmniejszyć stopień zbrojenia kompozytowego."

$$F_c(x) = -1002 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez beton}$$

$$F_{s1}(x) = 735 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie dolne}$$

$$F_{s2}(x) = -163 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez zbrojenie górne}$$

$$F_f(x) = 429 \cdot \text{kN} \quad - \text{siła przenoszona przez taśmy}$$

$\varepsilon_c(x) = -1.42 \cdot ‰$	- odkształcenia górnych włókien betonu
$\varepsilon_{s1}(x) = 5.01 \cdot ‰$	- odkształcenia zbrojenia dolnego
$\varepsilon_{s2}(x) = -0.55 \cdot ‰$	- odkształcenia zbrojenia górnego
$\varepsilon_f(x) = 16 \cdot ‰$	- odkształcenia taśm kompozytowych
$k_1(x) = 0.543$	- współczynniki kształtu rozkładu naprężeń
$k_2(x) = 0.36$	w stre e ściskanej betonu

Nośność charakterystyczna przekroju ze wzmocnieniem czynnym:

$$M_{Rk} := F_f(x) \cdot h + F_{s1}(x) \cdot d_1 + F_c(x) \cdot k_2(x) \cdot x + F_{s2}(x) \cdot d_2 \quad M_{Rk} = 415 \cdot \text{kNm}$$

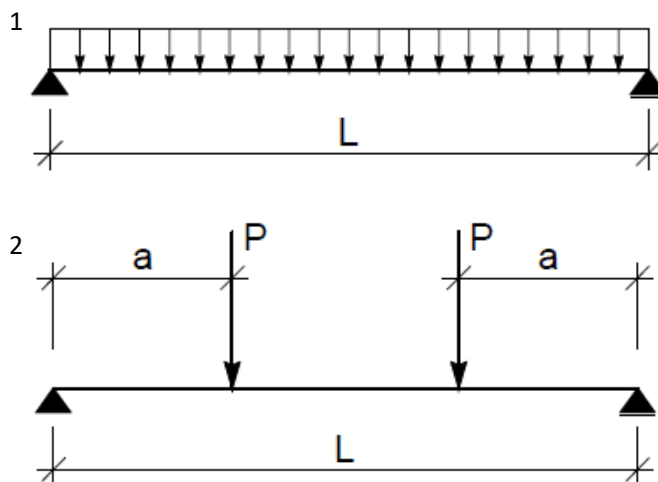
Ugięcia

Schemat obciążenia

1 - obciążenie równomiernie rozłożone

2 - dwie siły skupione

Schemat = 2



$$a_1 := \begin{cases} a & \text{if Schemat} = 2 \\ \left(\frac{\sqrt{2}}{4} \cdot L \right) & \text{if Schemat} = 1 \end{cases}$$

$$a_1 = 1.8 \text{ m}$$

$$M_{cr2} = 143 \cdot \text{kNm}$$

- moment rysujący

$$P_{cr2} := \frac{M_{cr2}}{a} = 79.4 \cdot \text{kN}$$

- wartość siły skupionej wywołującej moment rysujący

$$M := 0 \text{ kNm}, 1 \text{ kNm} \dots M_{Rk}$$

- moment zginający

$$P(M) := \frac{M}{a_1}$$

- siła wywołująca moment

$$F_{fp} = 268.8 \cdot \text{kN}$$

- siła sprężająca

$$e_p = 21 \cdot \text{cm}$$

- mimośród działania siły sprężającej

$$\Delta_p := \frac{-F_{fp} \cdot e_p \cdot L^2}{8E_{cm} \cdot J_{cs0}} = -1.79 \cdot \text{mm}$$

- wygięcie od sprężenia

Ugięcie przed zarysowaniem:

$$\theta_{cr2} := \frac{M_{cr2}}{E_{cm} \cdot J_{cs2}} = 0.001123 \cdot \frac{1}{m} \quad \text{- krzywizna odpowiadająca zarysowaniu}$$

$$\theta_a(M) := \frac{P(M) \cdot a_1}{E_{cm} \cdot J_{cs2}} \quad \text{- krzywizna w miejscu przyłożenia obciążenia}$$

$$\Delta_{uncracked}(M) := \frac{\theta_a(M)}{24} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a_1^2) + \Delta_p$$

Ugięcie po zarysowaniu:

$$x_{pl} = 10.26 \cdot \text{cm} \quad \text{- położenie osi obojętnej przy uplastycznieniu stali zbrojeniowej}$$

$$\theta_{pl2} := \frac{\epsilon_{slimk}}{d_1 - x_{pl}} = 0.00935 \cdot \frac{1}{m} \quad \text{- krzywizna odpowiadająca uplastycznieniu zbrojenia}$$

$$\theta_a(M) := \frac{(\theta_{pl2} - \theta_{cr2}) \cdot (M - M_{cr2})}{(M_{pl} - M_{cr2})} + \theta_{cr2} \quad \text{- krzywizna w miejscu przyłożenia obciążenia}$$

$$g(M) := \frac{M_{cr2}}{P(M)} \quad \text{- odległość początku strefy zarysowanej od podpory}$$

$$\Delta_{postcracked}(M) := \frac{\theta_a(M)}{24} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a_1^2) + \frac{(a_1 + g(M))}{6} \cdot (\theta_{cr2} \cdot a_1 - \theta_a(M) \cdot g(M)) + \Delta_p$$

Ugięcie po uplastycznieniu zbrojenia:

$$\theta_{n2f} := \frac{\epsilon_{fu}}{d_1 - x_n} = 0.07 \cdot \frac{1}{m} \quad \text{- krzywizna przy zniszczeniu (zerwanie kompozytu)}$$

$$\theta_a(M) := \frac{(\theta_{n2f} - \theta_{pl2}) \cdot (M - M_{pl})}{(M_{Rk} - M_{pl})} + \theta_{pl2} \quad \text{- krzywizna w miejscu przyłożenia obciążenia}$$

$$y(M) := \frac{M_{pl}}{P(M)} \quad \text{- odległość początku strefy uplastycznienia zbrojenia od podpory}$$

$$\Delta_{postyielded}(M) := \frac{\theta_a(M)}{24} \cdot (3 \cdot L^2 - 4 \cdot a_1^2) + \frac{y(M)}{6} \cdot [\theta_{cr2} \cdot (g(M) + y(M)) - \theta_a(M) \cdot (y(M) + a_1)] \dots$$

$$+ \frac{\theta_{pl2}}{6} \cdot (a_1 - g(M)) \cdot (a_1 + y(M) + g(M)) + \Delta_p$$

Ugięcia belki wzmocnionej czynnie w kolejnych fazach pracy w zależności od momentu zginającego:

$$\Delta(M) := \begin{cases} \Delta_{uncracked}(M) & \text{if } M \leq M_{cr2} \\ \Delta_{postcracked}(M) & \text{if } M_{cr2} < M \leq M_{pl} \\ \Delta_{postyielded}(M) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$\Delta_1 := \Delta(M_{Sk1}) = 9.88 \cdot \text{mm}$$

$$\Delta_2 := \Delta(M_{Sk2}) = 2.64 \cdot \text{mm}$$

▣ Obliczenia

Ekran 2 - Wyniki

Stan Graniczny Nośności

Nośność obliczeniowa przekroju bez wzmocnienia:

$$M_{Rd0} = 224 \cdot \text{kNm}$$

Nośność obliczeniowa przekroju po wzmocnieniu:

$$M_{Rd} = 357 \cdot \text{kNm}$$

Stopień wzmocnienia przekroju:

$$\frac{M_{Rd}}{M_{Rd0}} = 1.6$$

Stany Graniczne Użytkowości

Ograniczenie naprężeń

Kombinacja charakterystyczna

Naprężenia w betonie

$$\sigma_{c1} = 26.5 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia dopuszczalne

$$1.0 \cdot f_{ck} = 45 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia w stali

$$\sigma_{s1} = 374 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia dopuszczalne

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \cdot \text{MPa}$$

Kombinacja quasi-stała

Naprężenia w betonie

$$\sigma_{c2} = 11.9 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia dopuszczalne

$$0.45 \cdot f_{ck} = 20.3 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia w stali

$$\sigma_{s2} = 307 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia dopuszczalne

$$0.8 \cdot f_{yk} = 400 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia w kompozycie

$$\sigma_{f2} = 1918 \cdot \text{MPa}$$

Naprężenia dopuszczalne

$$0.8 \cdot f_{fu} = 2560 \cdot \text{MPa}$$

Szerokość rozwarcia rys

Kombinacja quasi-stała

Szerokość rozwarcia rys

$$w_k = 0.2 \cdot \text{mm}$$

Wartość graniczna

$$w_{\max} = 0.3 \cdot \text{mm}$$

Ugięcia

Kombinacja charakterystyczna

$$\Delta_1 = 9.88 \cdot \text{mm}$$

Kombinacja quasi-stała

$$\Delta_2 = 2.64 \cdot \text{mm}$$