

KSZTAŁTOWNIKI GI TE NA ZIMNO PROCEDURY OBLICZENIOWE DLA BELEK

WSTĘP

Cienko cienne elementy gi te na zimno s stosowane do przenoszenia obci e , takich jak na przykład obci enia grawitacyjne na dachach. Na ich zachowanie mo e mie wpływ lokalne wyboczenie, efekt szerokiego pasa, zgniecenie rdownika, pofalowanie swobodnej kraw dzi oraz zwichrzenie.

Wpływ wyboczenia miejscowego jest uwzgl dniony w obliczeniach przez efektywne szeroko ci przekroju w oparciu o rozkład napr e pochodz cy od momentów zginaj cych i siły osiowej.

W przypadku efektu szerokiego pasa, zgniecenia rdownika i pofalowania swobodnej kraw dzi pasa, zasady podano podano w Eurokodzie 3, cz 1.3.

Wyboczenie skr tno-skr tne nale y ocenia podobnie jak przekroje walcowane na gor co, bior c pod uwag efektywne warto ci przekroju.

Cienko cienne formowane na zimno elementy gi tkie maj swoje najwa niejsze zastosowanie w konstrukcjach cian i dachów jako płatwie. Poł czenie konstrukcyjne z poszyciem z blachy fałdowej zapewnia płatwiom utwierdzenia boczne i skr tne na jednym pasie. To poł czenie zapewnia płatwi wysokiej dodatkowej sztywno ci w porównaniu do płatwi o schemacie beki swobodnie podpartej rozci gaj cej si od ramy do ramy. Warto ci utwierdze skr tnych nale y potwierdzi poprzez badania do wiadczalne.

PROCEDURY PROJEKTOWE

No no na zginanie M_{Rd}

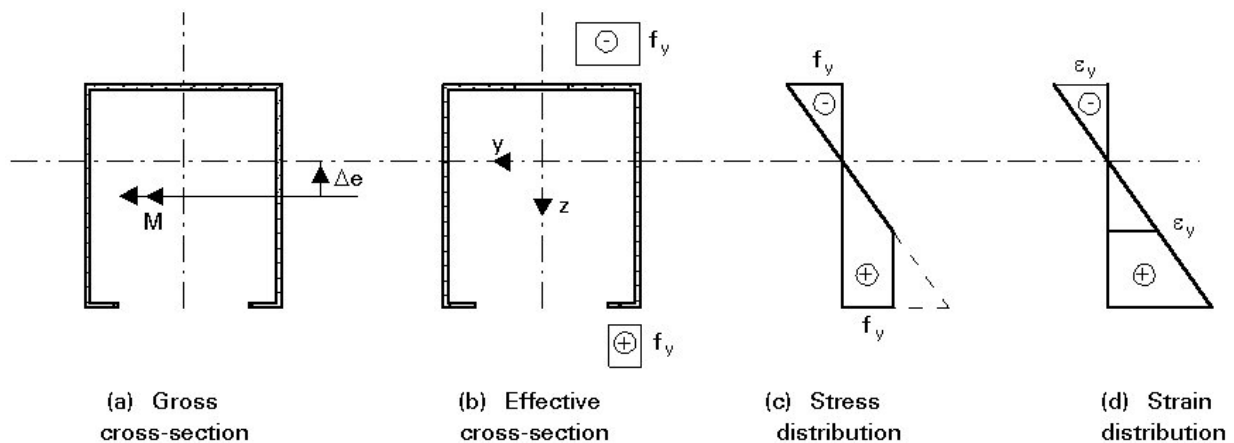
No no na zginanie M_{Rd} jest graniczn warto ci no no ci przekroju poprzecznego przy czystym zginaniu.

Plastyczna no no na zginanie

Je eli elementy zginane nie zostan poddane skr caniu lub wyboczeniu gi tno-skr tnemu, no no na zginanie M_{Rd} mo e zosta wyznaczona z wykorzystaniem rezerwy plastycznej. No no na zginanie M_{Rd} mo na okre li poprzez obliczenia iteracyjne przy uwzgl dnieniu nast puj cych warunków:

W cz ci ciskanej przekroju stosowane s szeroko ci efektywne ze wzgl du na dany rozkład napr e ciskaj cych w kolejnym kroku iteracji. W szczególnych warunkach graniczne odkształcenie ciskaj ce mog osi gn maksymalne odkształcenie wy sze ni f_y/E . W przeciwnym razie na kraw dzi pasa ciskanego napr enia mog osi gn jedynie granic plastyczno ci f_y .

Po stronie rozci ganej mo na wykorzysta pełny przekrój. Mo e tam równie wyst pi odkształcenie plastyczne. Napr enia rozci gaj ce nie s ograniczone, determinuje je zdolno do odkształce przekroju.



Δe - Shift of neutral axis (elastic \rightarrow plastic behaviour)

No momentu M_{Rd} w odniesieniu do zwichrzenia

Wzrost momentu zginającego M_{Rd} uwzględniający wyboczenie lub zwichrzenie oblicza się na podstawie wartości k_d z europejskich krzywych wyboczenia (parametr α). Wartość ta jest współczynnikiem redukcji do określenia M_{Rd} na podstawie momentu oporu plastycznego $f_y \cdot W_{eff}$ ze względu na smukłość elementu. Wzory podano poniżej:

$$\bar{\lambda}_{LT}^2 = \frac{W_{eff} \cdot f_y}{M_{cr}}$$

$$\phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_d \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2]$$

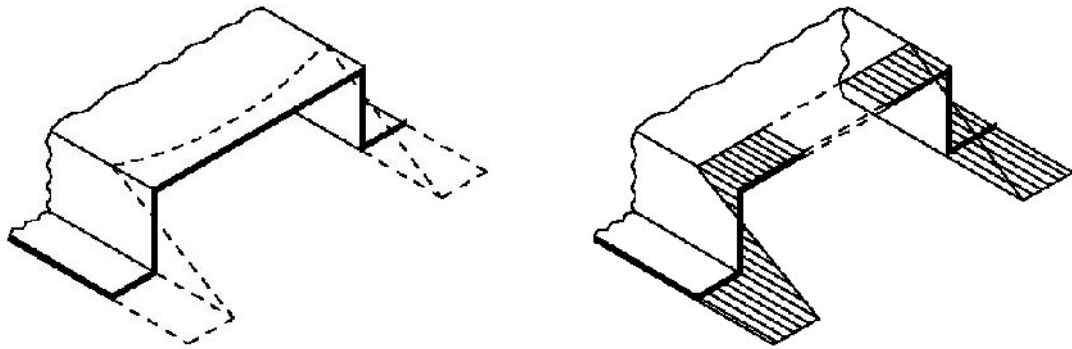
$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \text{ale } \chi_{LT} \leq 1,0$$

$$M_{Rd} = \chi_{LT} \cdot f_y \cdot W_{eff}$$

Efekt szerokiego pasa

W szerokich pasach ($b > L/20$) na rozkład naprężeń normalnych, wywołanych siłami osiowymi i momentem zginającym mogą wpływać odkształcenia przy ścinaniu panelu pasa. Efekt szerokiego pasa pojawia się w miejscach o dużych naprężeniach ścinających, na przykład przy podporach. Powierzchnia efektywna jest obliczana podobnie do efektywnej szerokości ze względu na utratę stateczności miejscowej poprzez pomnożenie powierzchni brutto przez współczynnik redukcji ψ_s . Ostateczne efektywne szerokości, które uwzględniają utratę stateczności miejscowej i efekt szerokiego pasa, są określone z:

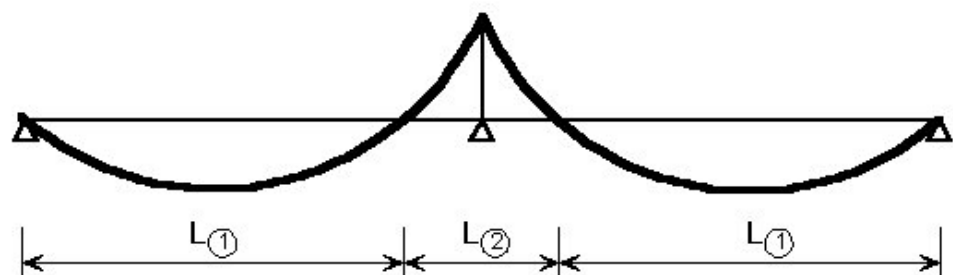
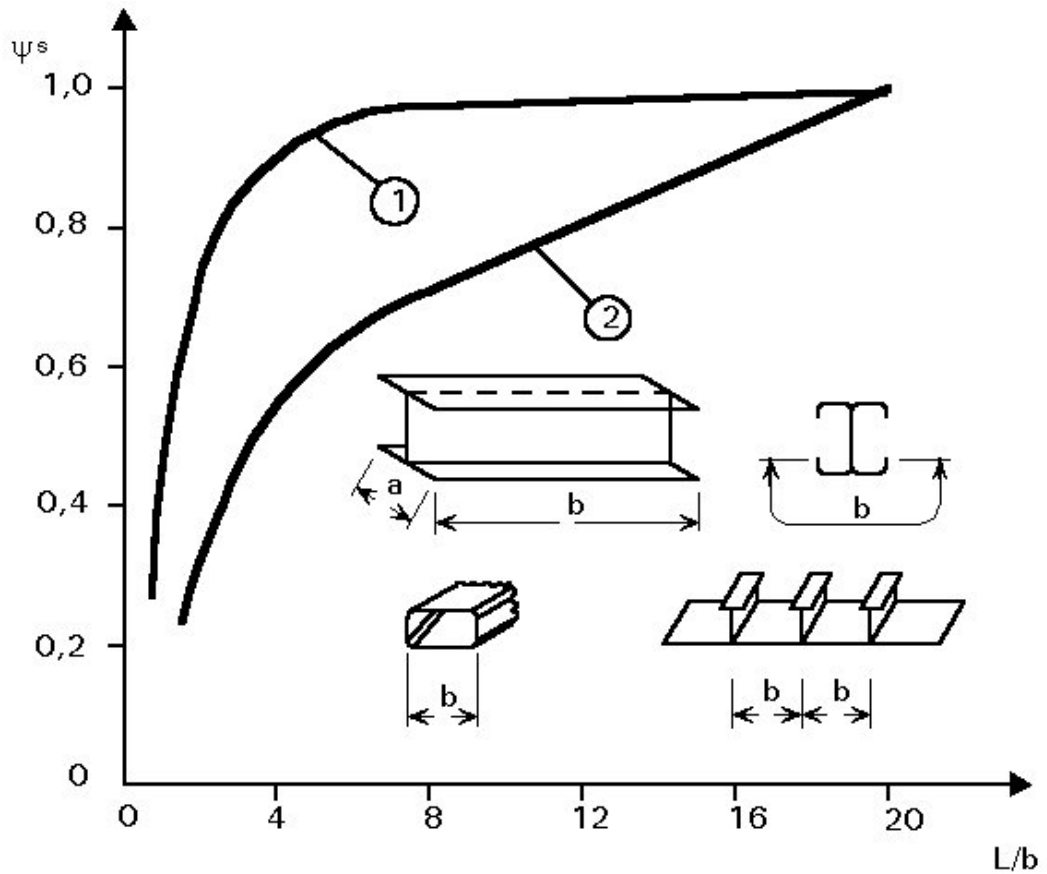
$$b_{eff} = \psi_s \cdot \rho \cdot b_p$$



(a) Normal stress distribution across the gross cross-section

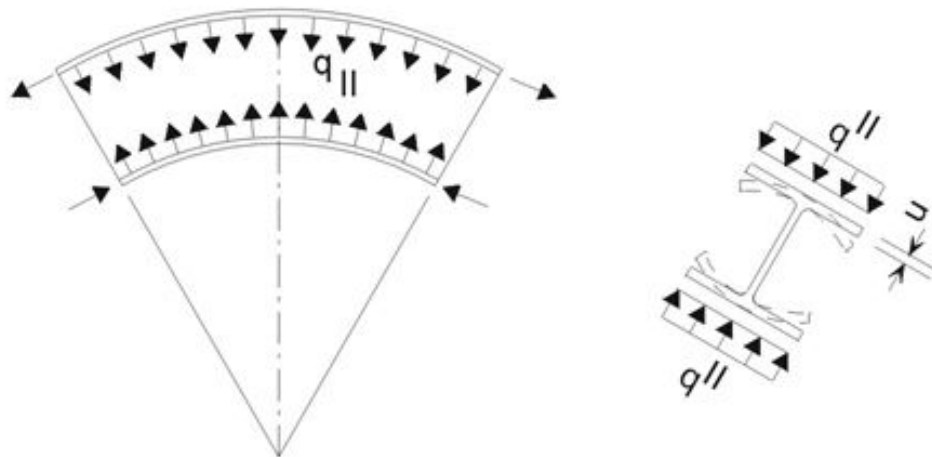
(b) Idealised stress distribution across the effective cross-section

cianki jednostronnie podarte (wspornikowe) mają współczynnik redukcyjny w iksy o 15% od cianek podpartych dwustronnie. Współczynnik redukcji ψ_s można w sposób przybliżony przyjmować z Rysunku.

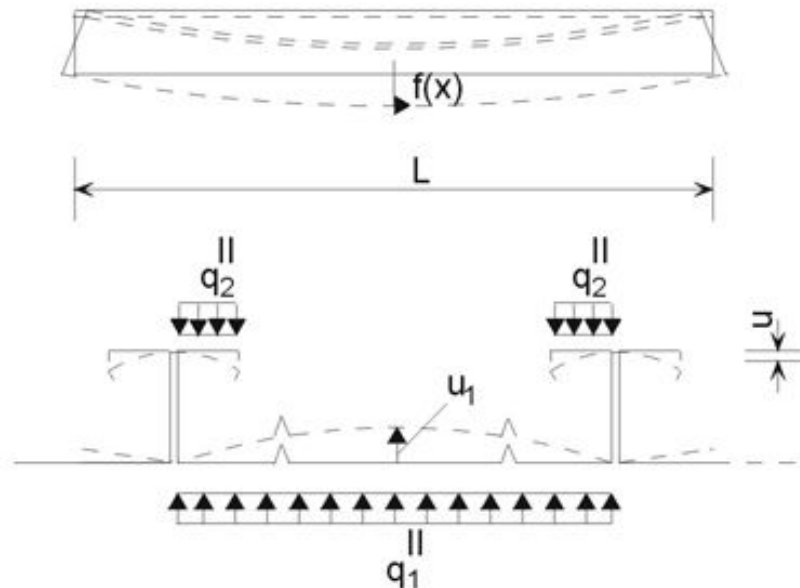


Pofalowanie pasa

Przekroje z szerokimi pasem lub profilami łukowymi poddany zginaniu mogą wykazywać efekt zwany „pofalowaniem pasa”: Naprężenia w panelu wynikające z momentu zginającego muszą zostać przeniesione wzdłuż zakrzywionego lub odkształconego elementu, powodując obciążenia boczne. Stąd szeroki pas jest dodatkowo zginany. W wyniku tego, sztywność przekroju elementu i jego wskaźnik na zginanie W maleje. Amplitudę tego odkształcenia można oszacować za pomocą wzorów podanych w Eurokodzie 3. Właściwości przekroju powinny być obliczane na podstawie przekroju o zakrzywionej geometrii z powodu pofalowania pasa.



(a) Bending of an arched profile

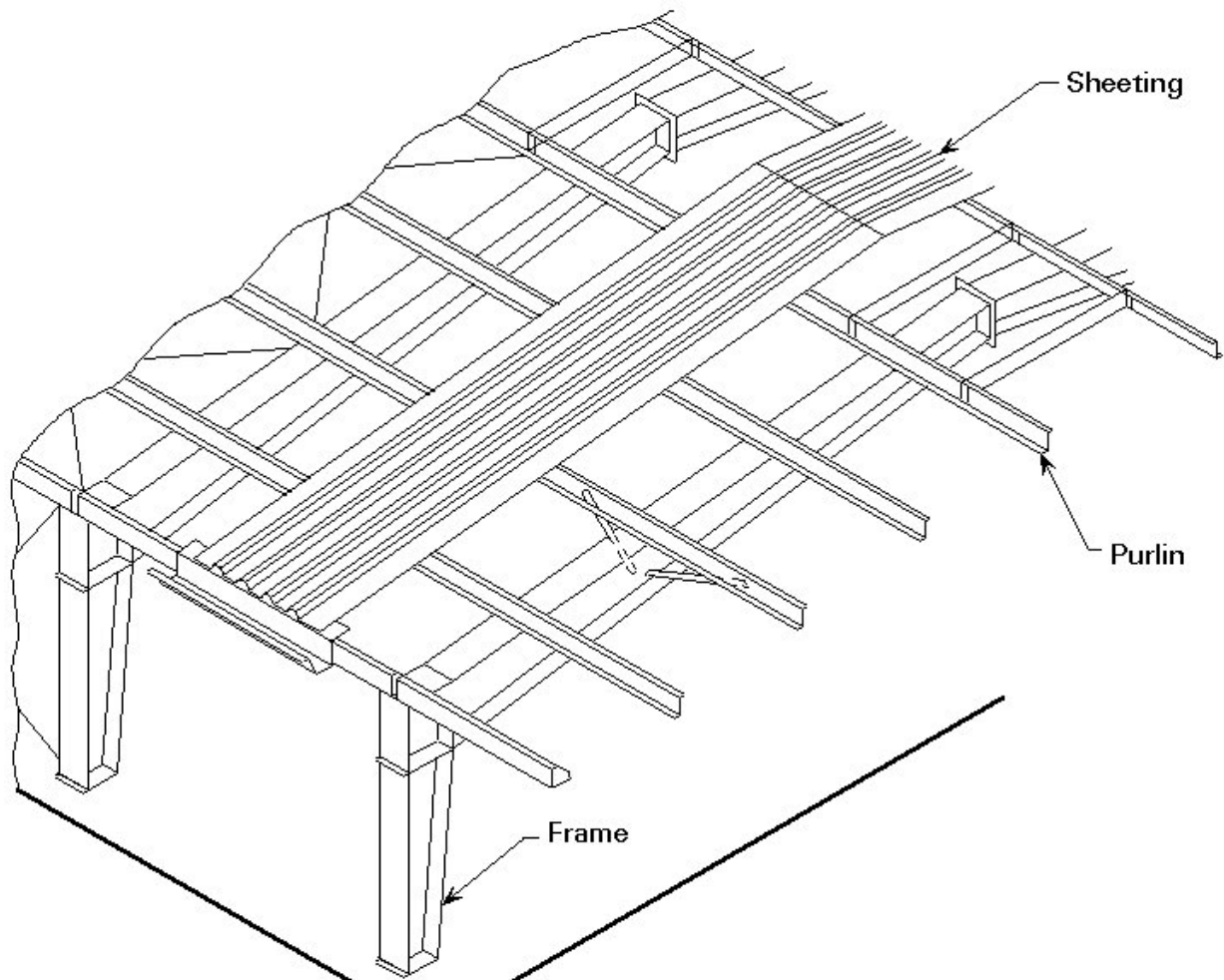


(b) Bending of flat panel

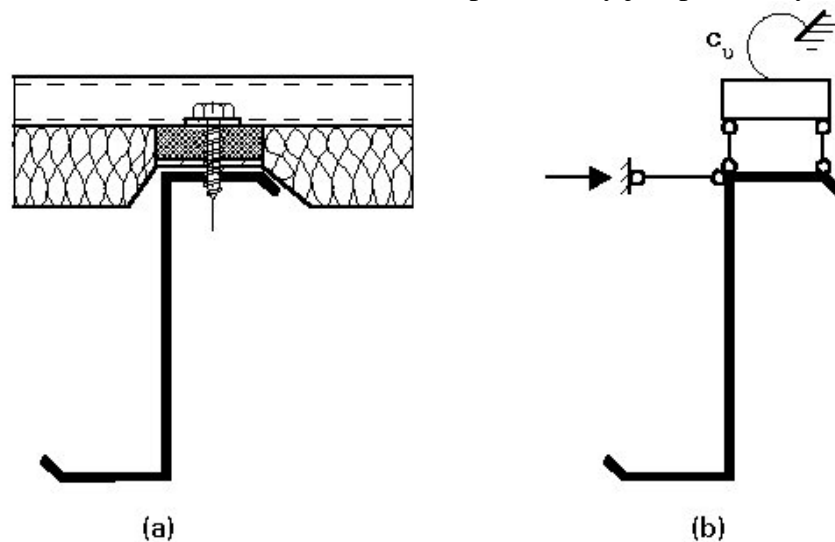
Pofalowanie pasa zalicza się do efektów drugiego rzędu. Jednak w wielu przypadkach odkształcenia przekroju podobne do pofalowania pasa występują z powodu zjawisk zaliczanych do teorii pierwszego rzędu. To zniekształcenie przekroju poprzecznego może stać się znacznie większe niż zjawisko pofalowania pasa i należy je uwzględnić, stosując odpowiednią teorię. Takie zachowanie wykazują na przykład kasetony cienkie bez bocznych usztywnień na skrajnych pasach.

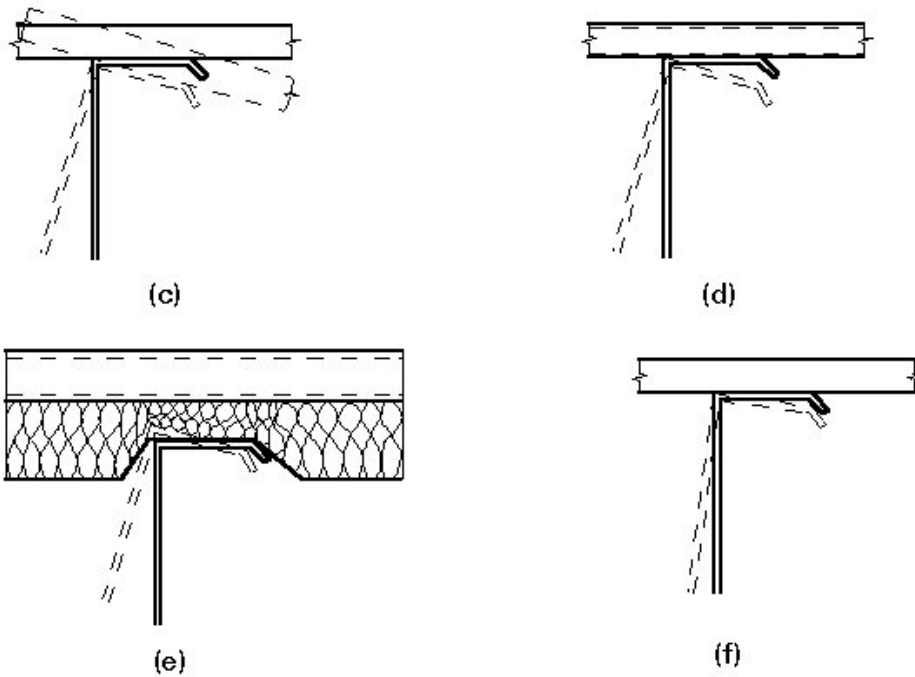
Stężenia boczne i przeciwskrętne

Jako stępnienia boczne i przeciwskrętnie belki zginanej można użyć przylegające elementy konstrukcji. Stępnienia te występują głównie w przypadku płatwi, które są bezpośrednio połączone z blachą falowaną poszycia dachu.



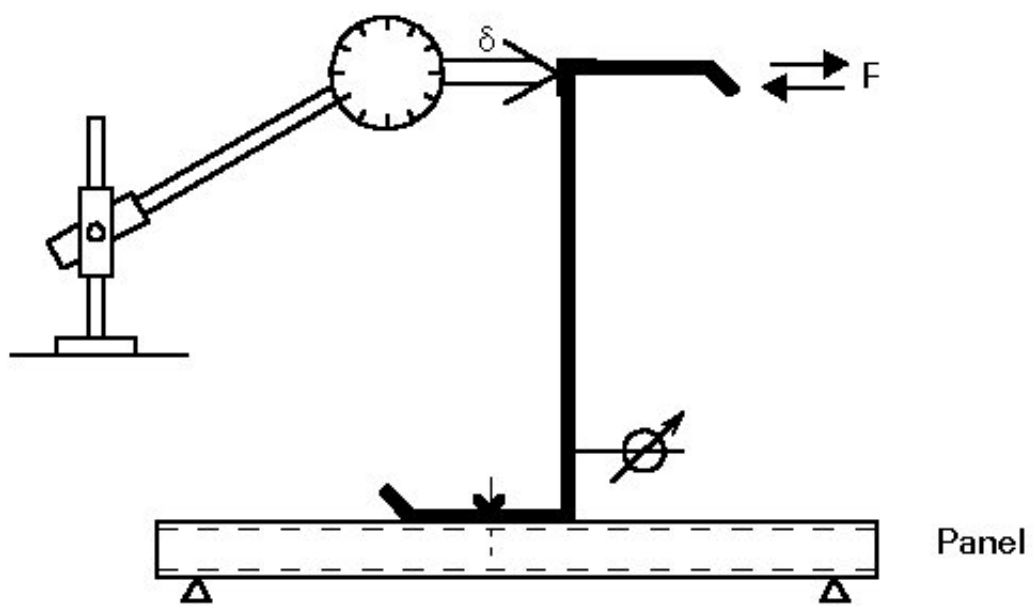
W przypadku belek konstrukcyjnych, zabezpieczenia boczne i przeciwskrętnie można idealizować jako sztywne podparcie boczne i utwierdzenie skrętnie c_v na pasie, który jest połączony z blachą





- (a) Real construction
- (b) Idealisation
- (c) Deformation of sheeting
(to be calculated)
- (d), (f) Local deformation of
sheeting and purlin at
connection
- (e) Deformation of insulation
(d-f to be found by testing)
- (c)-(f) Deformation parts
contributing to c_v

Sztywność c_v musi być określona częściowo przez badanie, a częściowo przez obliczenia. c_v jest szeregiem kombinacji sztywności pokrycia i połączenia lokalnego. Sztywność połączenia lokalnego można określić za pomocą zestawu badawczego. Ponieważ odkształcenie δ obejmuje zgięcie rodniczki, ugięcie kołnierza musi zostać zmniejszone przez odkształcenie przekroju poprzecznego.

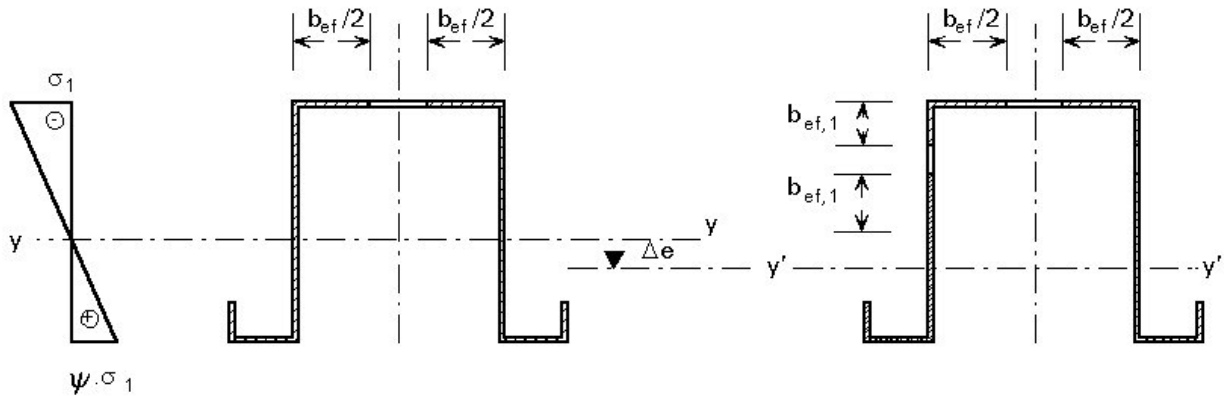


PROJEKTOWANIE BELEK

W-2. Kształtowniki gięte na zimno – Belki

Projektowanie belek bez uwzględnienia zwichrzenia

Belki mogą być obciążone siłami osiowymi i momentami zginającymi. Jeśli konieczne jest rozwiązanie miejscowego wybożenia, w przekroju należy wprowadzić szeroki i efektywne cianki. W rezultacie obojętna, określona na podstawie przekroju brutto może się przesunąć. Należy wtedy wziąć pod uwagę dodatkowy moment zginający $\Delta M = N \cdot \Delta e$.



Location of the neutral axis y - y preliminary location

y' - y' final location

Δe shift of neutral axis

Zwichrzenie elementu można pominąć, jeśli konstrukcja stajaca zapobiega skręceniu przekroju. Wzór na nośność elementu z uwzględnieniem niestateczności podaje osobno różne wypadkowe naprężenia związane z obciążeniami plastycznymi jedynie ze względu na zróżnicowanie rozkładu naprężeń wypadkowych. Jeśli nie można zapobiec bocznym przemieszczeniom przekroju poprzecznego, działająca siła osiowa wywołuje wybożenie sprężyste w płaszczyznach obydwu osi, co należy uwzględnić w obliczeniach. Do wzoru na nośność należy wziąć mniejszą wartość współczynnika wybożenia :

$$\frac{N}{N_{Rd,min}} + \frac{M_y + \Delta M_y}{M_{Rd,y}} \cdot k_y + \frac{M_z + \Delta M_z}{M_{Rd,z}} \cdot k_z \leq 1,0$$

gdzie k_y i k_z są współczynnikami uwzględniającymi oddziaływanie siły zginającej i osiowej. Dokładniejsze zasady są podane w normie.

Projektowanie belek z uwzględnieniem zwichrzenia

Reguła konstrukcyjna dla belek, w których nie można uniknąć zwichrzenia jest bardzo podobna do przypadku opisanego dla belek bez zwichrzenia. Istnieją tylko dwie różnice:

- Nośność na zginanie $M_{Rd,y}$ uwzględnia wpływ wybożenia giętno skrętnego.
- Współczynnik k dla wybożenia giętno skrętnego jest zastąpiony współczynnikiem k_{LT} , a zatem uwzględnia interakcję między siłami osiowymi i momentem zginającym w innej formie.

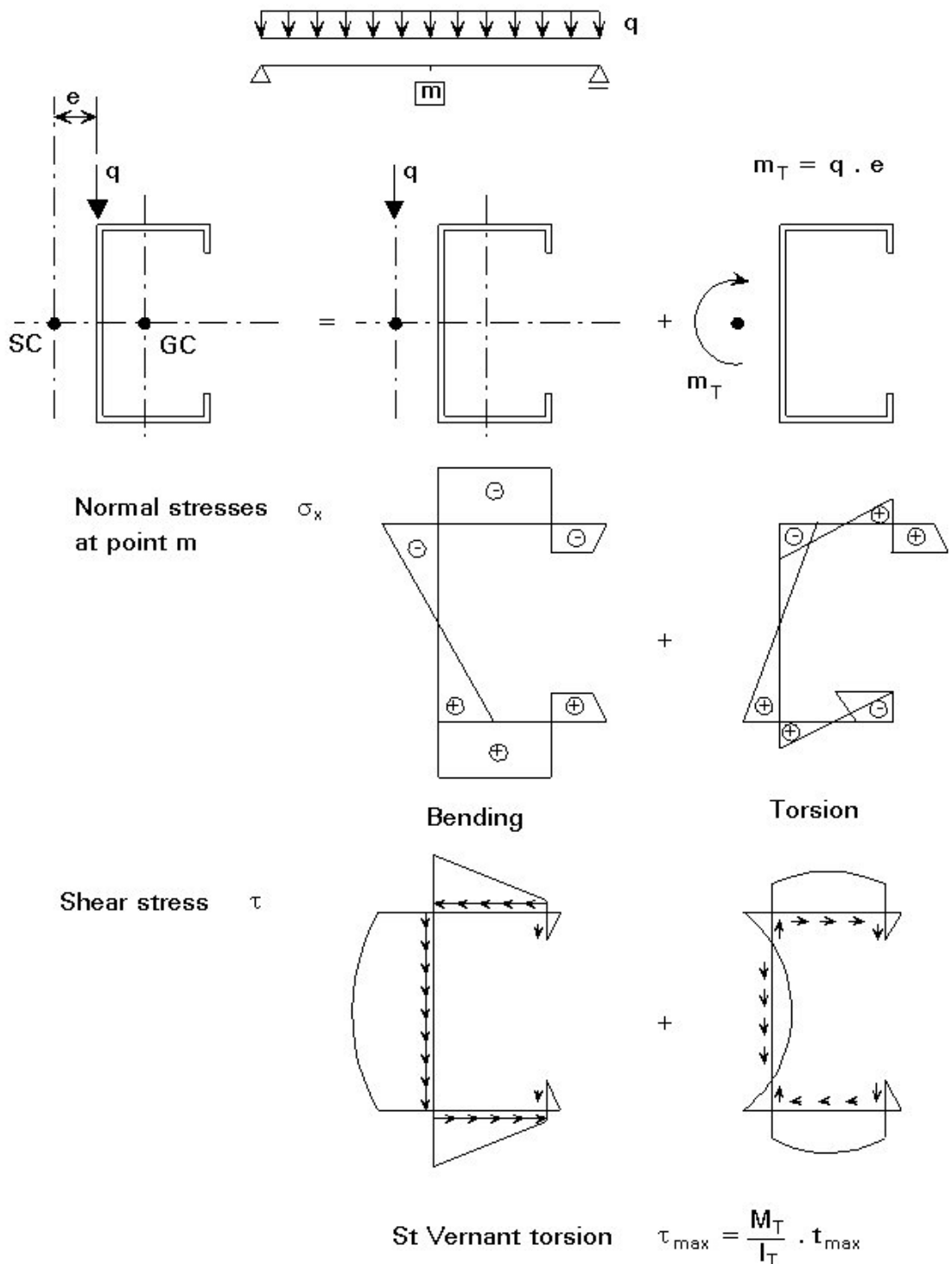
Dokładniejsze zasady są podane w normie.

Projektowanie z uwzględnieniem skręcania

Jeśli obciążenie jest przykładane mimośrodowo w stosunku do osi cienia belki, należy uwzględnić skutki skręcania. Otwarte przekroje cienkościenne mają bardzo małą sztywność na skręcanie. Zatem całkowita nośność elementu jest znacznie zmniejszona przez skręcanie, dlatego należy unikać momentu skręcającego w konstrukcji.

Jeśli występują momenty skręcające, należy uwzględnić naprężenia wypaczające w przekroju. (Naprężenia wypaczające powstają następujący sposób. Przekroje o mniej niż trzech osiach symetrii

b d zasadniczo odkształca się poza płaszczyznę podczas ruchów skrętnych. Gdy te wypaczenia zostaną w pewien sposób ograniczone, powstanie system podłużnych naprężeń wypaczających (pochodzących od bimomentu). W projektowanych elementach musimy zapewnić superpozycję naprężeń wywołanych siłami osiowymi, momentami zginającymi i momentem skręcającym tak, by pozostawały one poniżej granicy plastyczności. Dodatkowo należy uwzględnić superpozycję naprężeń zginających. Na rysunku pokazano wpływ skręcania na rozkład naprężeń.



PROCEDURY PROJEKTOWE WEDŁUG NORMY PN_EN-1993-1-3

Nośność sprężysta i sprężysto plastyczna

Obliczeniowa nośność przekroju na zginanie względem osi głównej $M_{c,Rd}$ jest określona wzorami:

– gdy $W_{eff} < W_{el}$

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

– gdy $W_{eff} = W_{el}$

$$M_{c,Rd} = f_{yb} (W_{el} + (W_{pl} - W_{el}) \lambda (1 - \bar{\lambda}_{e,max} / \bar{\lambda}_{e0})) / \gamma_{M0} \text{ lecz nie więcej niż } W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

gdzie:

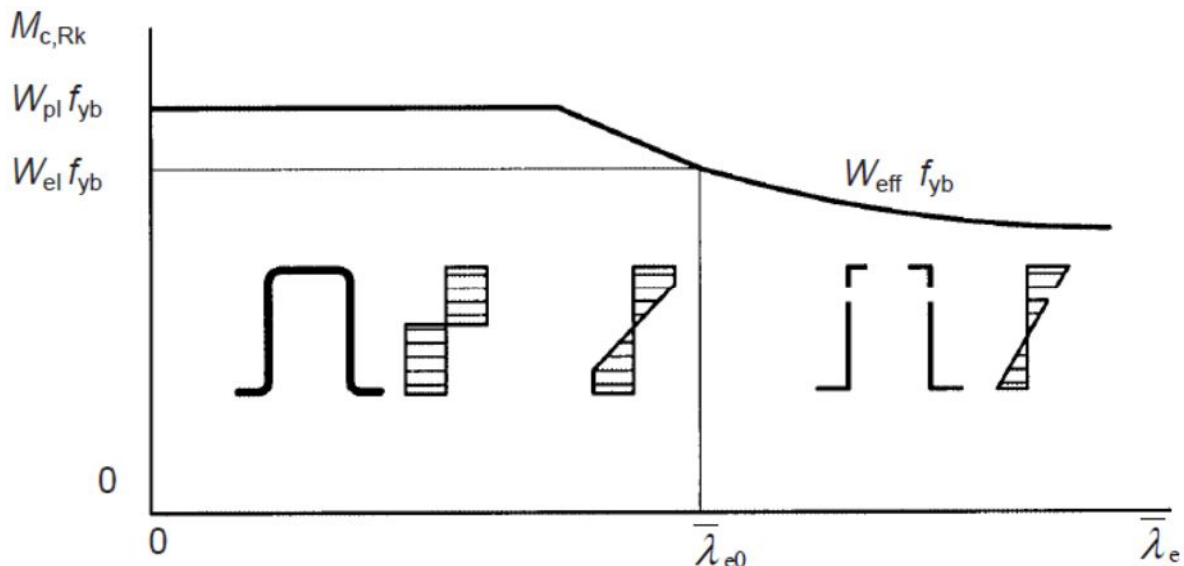
W_{eff} – wskaźnik wytrzymałości przekroju współpracującego;

W_{el} – wskaźnik sprężystości przekroju brutto;

$\bar{\lambda}_{e,max}$ – względna smukłość ścianki, która odpowiada największemu stosunkowi $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$;

dla cianek wspornikowych $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ i $\bar{\lambda}_{e0} = 0,673$

dla cianek z usztywnieniami $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_d$ i $\bar{\lambda}_{e0} = 0,65$



Wyrażenie można stosować pod następującymi warunkami:

- Moment zginający działa względem jednej osi głównej przekroju;
- Element nie jest narażony na skręcanie, zwichrzenie ani wyboczenie: skrętnie, giętno-skrętnie lub dystorsyjne;
- Kąt między rodniem a pasem jest większy niż 60° .

Gdy powyższe warunki nie są spełnione, to można stosować następujące wyrażenie:

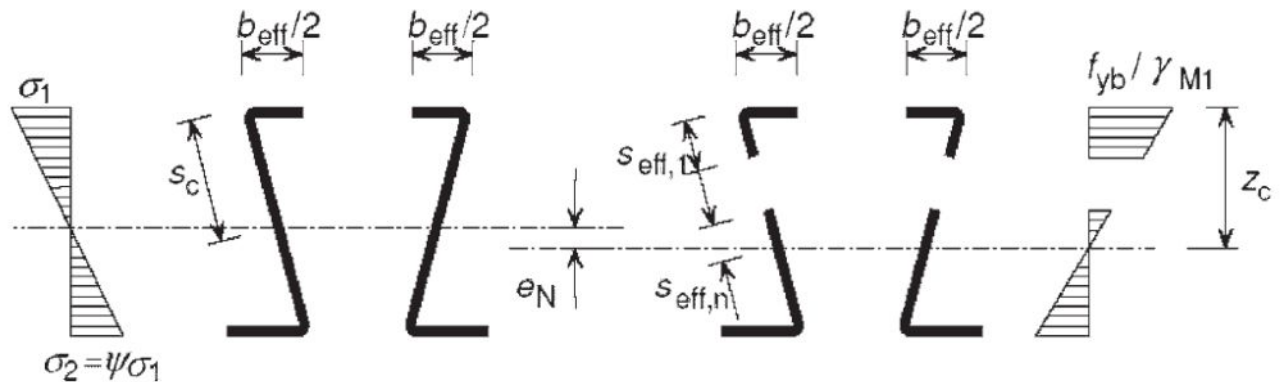
$$M_{c,Rd} = W_{el} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Wskaźnik wytrzymałości W_{eff} oblicza się dla przekroju współpracującego poddanego zginaniu względem osi głównej, przy maksymalnych naprężeniach $\sigma_{max,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$, uwzględniając wpływ miejscowego i dystorsyjnego wybożenia i ewentualnie efekt szerokiego pasa.

Warunek nośności przy dwukierunkowym zginaniu ma postać:

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \leq 1,0$$

Rozkład naprężeń na przekroju współpracującym



Ścinanie

Obliczeniowa nośność przy ścinaniu $V_{b,Rd}$ jest określona wzorem:

$$V_{b,Rd} = \frac{h_w \sin \phi f_{bv}}{\gamma_{M0}}$$

gdzie: h_w – wysokość środnika w osiach pasów,

ϕ – kąt nachylenia środnika,

f_{bv} – wytrzymałość wyboczeniowa stali przy ścinaniu.

Tablica 6.1: Wytrzymałość wyboczeniowa przy ścinaniu f_{bv}

Smukłość względna środnika	Środniki bez żeber podporowych	Środniki z żebrami podporowymi ¹⁾
$\bar{\lambda}_w \leq 0,83$	$0,58 f_{yb}$	$0,58 f_{yb}$
$0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,40$	$0,67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0,48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

¹⁾ Chodzi o usztywnienia przenoszące reakcje i zabezpieczające środnik przed dystorsją.

Smukłość względna środnika $\bar{\lambda}_w$ jest określona wzorami:

– w przypadku środników bez usztywnień podłużnych:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}}$$

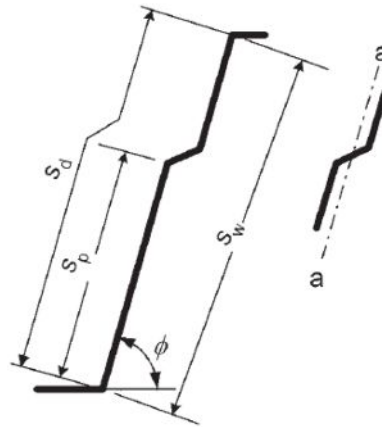
– w przypadku środników z usztywnieniami podłużnymi, patrz

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5,34 f_{yb}}{k_r E}} \quad \text{lecz} \quad \bar{\lambda}_w \geq 0,346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}}$$

przy czym:

$$k_r = 5,34 + \frac{2,10}{t} \left(\frac{\sum I_s}{s_d} \right)^{1/3}$$

gdzie: I_s – moment bezwładności przekroju usztywnienia względem osi a-a,
 s_d – długość rozwinięcia ukośnej wysokości ciarownika,
 s_p – ukośna wysokość największej części płaskiej ciarownika,
 s_w – ukośna wysokość ciarownika między punktami rodkowymi narożnymi.



Skręcanie

Gdy obciążenie jest przyłożone mimośrodowo względem ośrodkowania przekroju, to należy uwzględnić wpływ skręcania elementu. Rodek ciarownika, rodek cianienia oraz wymuszony rodek obrotu przyjmuje się jak w przypadku przekroju brutto. Naprężenia normalne od siły podłużnej N_{Ed} i momentów zginających $M_{y,Ed}$ i $M_{z,Ed}$ oblicza się na podstawie efektywnych cech przekroju współpracującego. Naprężenia cianienne od sił poprzecznych, naprężenia cianienne od skręcania swobodnego (St. Venanta) oraz naprężenia normalne i cianienne od skręcania skrępowanego oblicza się na podstawie cech geometrycznych przekroju brutto.

Warunki nośności mają postać:

$$\sigma_{tot,Ed} \leq f_{ya} / \gamma_{M0}$$

$$\tau_{tot,Ed} \leq \frac{f_{ya} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}}$$

$$\sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3\tau_{tot,Ed}^2} \leq 1,1 \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}}$$

Sumaryczne naprężenia normalne i cianienne wyznacza się następująco:

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{M_y,Ed} + \sigma_{M_z,Ed} + \sigma_{w,Ed}$$

$$\sigma_{N,Ed} + \sigma_{M_y,Ed} + \sigma_{M_z,Ed} \text{ (w przekroju współpracującym)}$$

$$\tau_{tot,Ed} = \tau_{V_y,Ed} + \tau_{V_z,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed}$$

$\sigma_{M_y,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie normalne od momentu $M_{y,Ed}$ (w przekroju współpracującym);

$\sigma_{M_z,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie normalne od momentu $M_{z,Ed}$ (w przekroju współpracującym);

$\sigma_{N,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie normalne od siły podłużnej N_{Ed} (w przekroju współpracującym);

$\sigma_{w,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie normalne od bimomentu (w przekroju brutto);

$\tau_{V_y,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie ścinające od siły poprzecznej $V_{y,Ed}$ (w przekroju brutto);

$\tau_{V_z,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie ścinające od siły poprzecznej $V_{z,Ed}$ (w przekroju brutto);

$\tau_{t,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie ścinające (St. Venanta) od momentu skręcania swobodnego (w przekroju brutto);

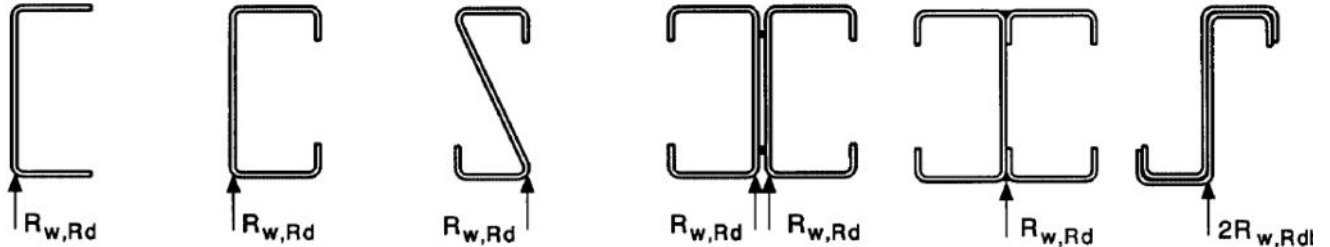
$\tau_{w,Ed}$ – obliczeniowe naprężenie ścinające od momentu skręcania skrępowanego (w przekroju brutto).

Obciążenie skupione

Aby uniknąć zniszczenia rodniaka obciążonego reakcją podporów lub inną poprzeczną siłą skupioną przyłożoną za pośrednictwem pasa, siła poprzeczna F_{Ed} powinna spełniać warunek:

$$F_{Ed} \leq R_{w,Rd}$$

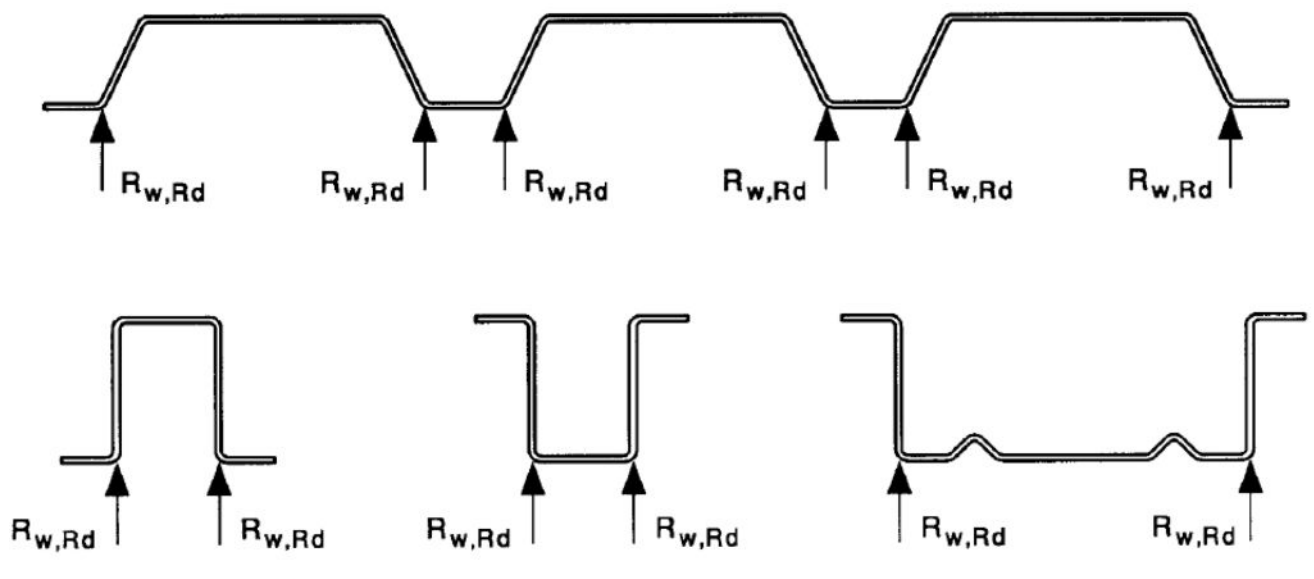
W elementach o pojedynczych rodniakach:



	<p>a) Pojedyncze obciążenia skupione lub reakcje</p> <p>i) gdy odległość skrajna $c \leq 1,5 h_w$:</p> <ul style="list-style-type: none"> – elementy z usztywnionymi pasami: $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[9,04 - \frac{h_w/t}{60} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15a)$ <ul style="list-style-type: none"> – elementy z nieusztywnionymi pasami: – gdy $s_s/t \leq 60$: $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15b)$ <ul style="list-style-type: none"> – gdy $s_s/t > 60$: $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{h_w/t}{132} \right] \left[0,71 + 0,015 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15c)$
	<p>ii) gdy odległość skrajna $c > 1,5 h_w$:</p> <ul style="list-style-type: none"> – gdy $s_s/t \leq 60$: $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[1 + 0,007 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15d)$ <ul style="list-style-type: none"> – gdy $s_s/t > 60$: $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{h_w/t}{49,5} \right] \left[0,75 + 0,011 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15e)$

	<p>b) Dwustronne przeciwne obciążenia skupione we wzajemnym oddaleniu nie większym niż $1,5 h_w$:</p> <p>i) gdy odległość skrajna $c \leq 1,5 h_w$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[6,66 - \frac{h_w/t}{64} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15f)$
	<p>ii) gdy odległość skrajna $c > 1,5 h_w$:</p> $R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[21,0 - \frac{h_w/t}{16,3} \right] \left[1 + 0,0013 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15g)$

No no ci elementów obciążonych pojedynczym obciążeniem i reakcja podporowa oraz przypadki elementów z dwoma łożyskami jest obliczane z innych wzorów.



Zginanie ze cinaniem i sił podłu n

W przypadku elementów obciążonych jednocześnie siłą podłużną N_{Ed} momentem zginającym M_{Ed} i siłą poprzeczną $V_{Ed} \leq 0,5 \cdot V_{w,Rd}$ warunek nośności ma postać:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1\right)^2 \leq 1,0$$

gdzie $M_{f,Rd}$ – nośność przekroju złożonego względnie z efektywnych części pasów,

Wyboczenie skrętne i giętko-skrętne

W przypadku elementów o przekroju punktowo symetrycznym (jak np. płatywie zeta z jednakowymi pasami) należy brać pod uwagę ewentualnie, że nośność na wyboczenie skrętne może okazać się niższą niż nośność na wyboczenie giętko-skrętne. W przypadku elementów o przekroju otwartym monosymetrycznym, należy brać pod uwagę ewentualnie, że nośność na wyboczenie giętko-skrętne może okazać się niższą niż nośność na wyboczenie giętko-skrętne. W przypadku elementów otwartych o przekroju niesymetrycznym należy brać pod uwagę wszystkie trzy niestateczności – skrętne, giętko-skrętne i giętko-skrętne. Obliczeniowo nośność na wyboczenie $N_{b,Rd}$ przy wyboczeniu skrętnym lub giętko-skrętnym, wyznacza się wg EN 1993-1-1/ 6.3.1.1, przyjmując krzywe wyboczenia wg Tablicy 6.3 jak przy wyboczeniu względem osi z-z.

Siła krytyczna $N_{cr,T}$ przy sprężystym wyboczeniu skrętnym belki swobodnie podpartej jest określona wzorem:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^2} \left(G I_t + \frac{\pi^2 E I_w}{l_T^2} \right) \quad i_o^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_o^2 + z_o^2$$

W przypadku przekrojów symetrycznych względem osi y-y, gdy ($z_o = 0$), siła krytyczna przy sprężystym wyboczeniu giętko-skrętnym $N_{cr,TF}$ oblicza się ze wzoru;

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

Przy czym, $\beta = 1 - \left(\frac{y_o}{i_o}\right)^2$.

Obliczeniowo nośność elementu na zwichrzenie wyznacza się wg EN 1993-1-1/ 6.3.2.2, przyjmując krzywe zwichrzenia 'b'.

Podany sposób nie powinien być stosowany, gdy główne osie przekroju współpracującego kształtownika są znacząco obrócone w stosunku do głównych osi przekroju brutto.

Interakcję siły podłużnej z momentem zginającym można uwzględnić stosując analizę drugiego rzędu wg EN 1993-1-1 i przyjmując efektywne cechy przekroju określone zgodnie z 5.5, a także 5.3.

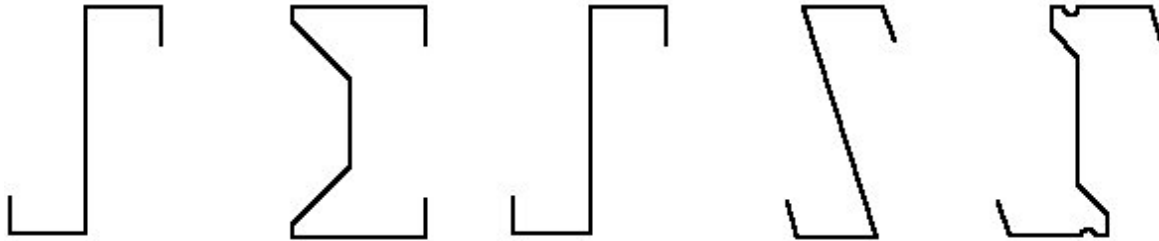
Alternatywnie można stosować wzór:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1,0$$

PROJEKT PŁATWI

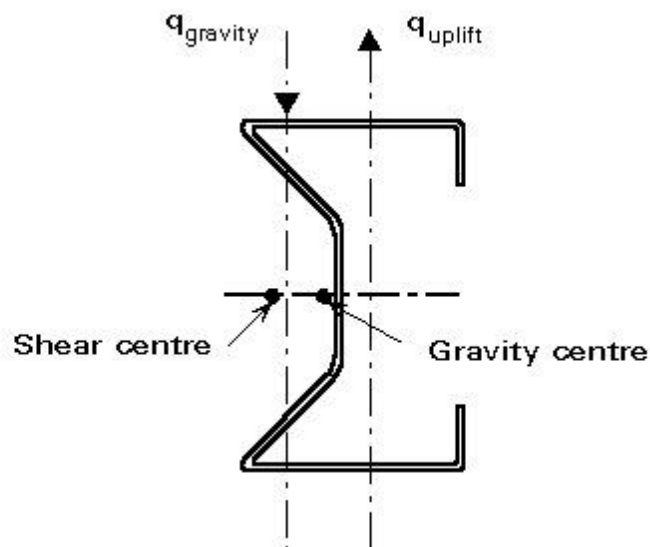
Przekroje kształtowników

Główne zastosowanie formowanych na zimno belek w budownictwie stanowi pŁatwie. Opracowano kilka rodzajów przekrojów dla pŁatwi.



Przyjmowane załoenia projektowe to:

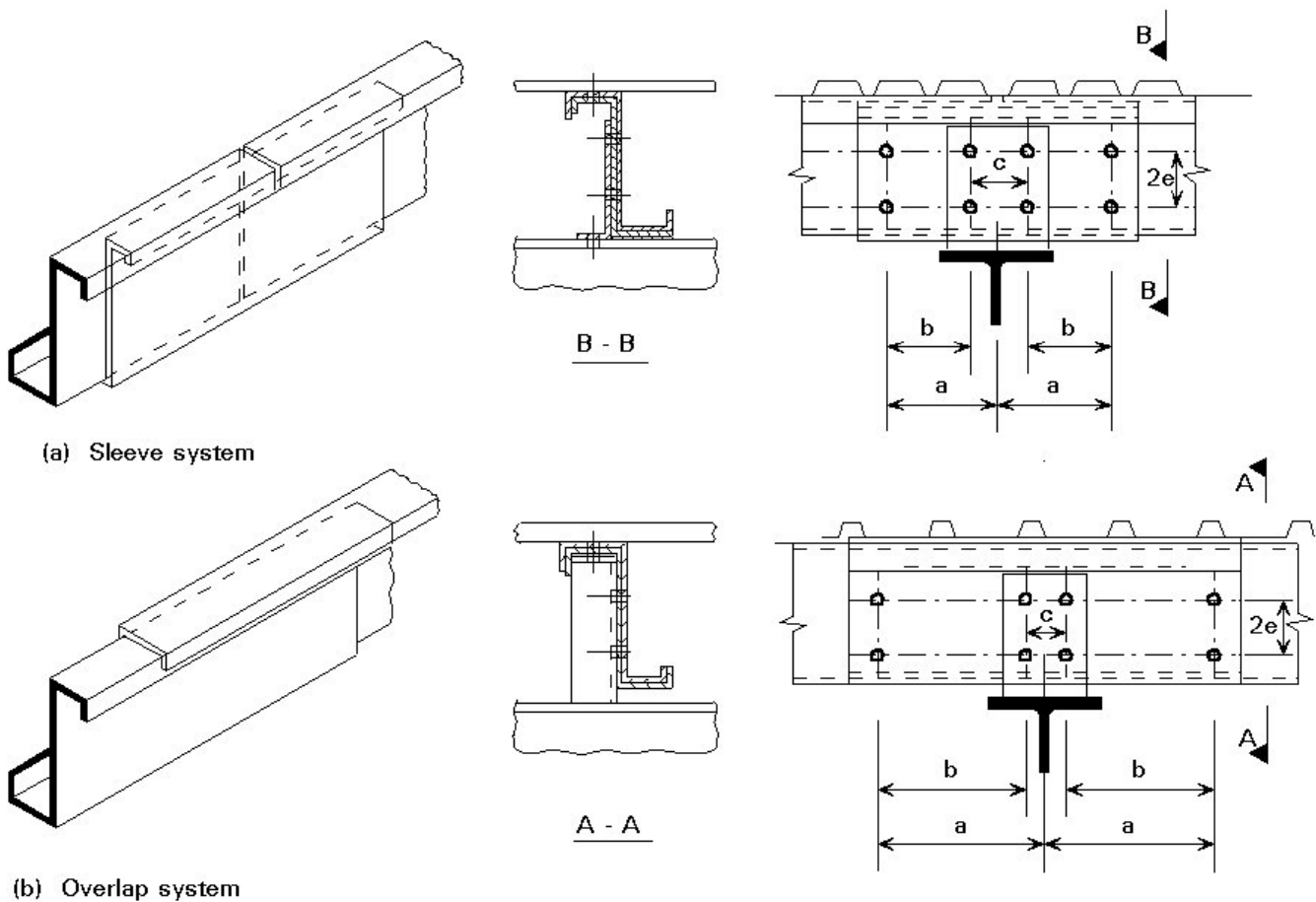
- Przekrój powinien mie peŁn efektywn szeroko w strefie ciskania. Cel ten osi ga si dzi ki usztywnieniu lub ograniczeniu smukłoci.
- Przyłoenie obci enia powinno znajdowa si jak najbli ej rodka cinania. Na przykŁad pŁatwie sigma maj rodek cinania i rodek ci ko ci blisko siebie i prawie bezpo rednio poni ej punktu przyłoenia obci enia.
- PŁatwie powinny si łatwo układa w stopy do transportu. Dlatego pasy kształtowników cz sto maj niewielkie ró nice w szeroko ci. Na zakładkach poŁ czenie dwóch pŁatwi mo na łatwo wykona , bior c drug pŁatew i odwracaj c j do o 180°.



Systemy pŁatwiowe

W zale no ci od konstrukcji no nej hal, na rynku dost pne s systemy pŁatwi jedno prz słowych i systemy wieloprz słowe. W systemach wieloprz słowych, dla pŁatwi uci gonych nad podpor opracowano dwa systemy:

- W systemach przykŁadkowych (sleeve systems) dwie pŁatwie ł czone s za pomoc krótkiego elementu -przykŁadki - o dopasowanym przekroju, który zachodzi na ko ce obydwu pŁatwi.
- W systemach na zakład (overlap systems) jedna z pŁatwi zachodzi na koniec drugiej pŁatwi, i obydwie pŁatwie s poŁ czone bezpo rednio ze sob na rodniku.



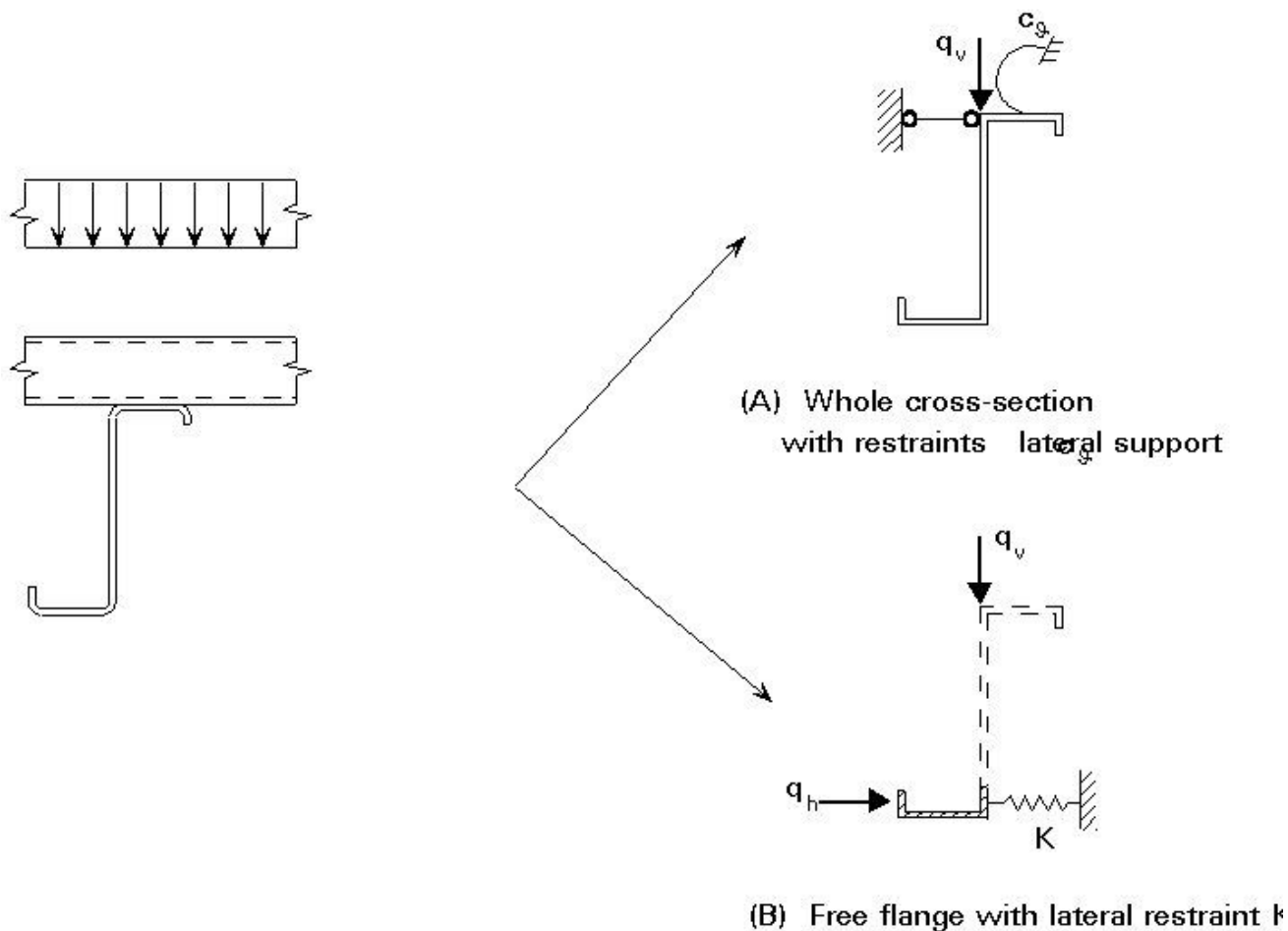
W obu przypadkach należy wziąć pod uwagę wpływ poślizgu w złączach rubowych na rozkład momentu zginającego układu cięgięgo. Dodatkowo projektant powinien zwrócić szczególną uwagę na obciążenie graniczne połączeń rubowych tak, aby spełniały one normy ze względu na uciążliwość płatwi.

Modele obliczeniowe

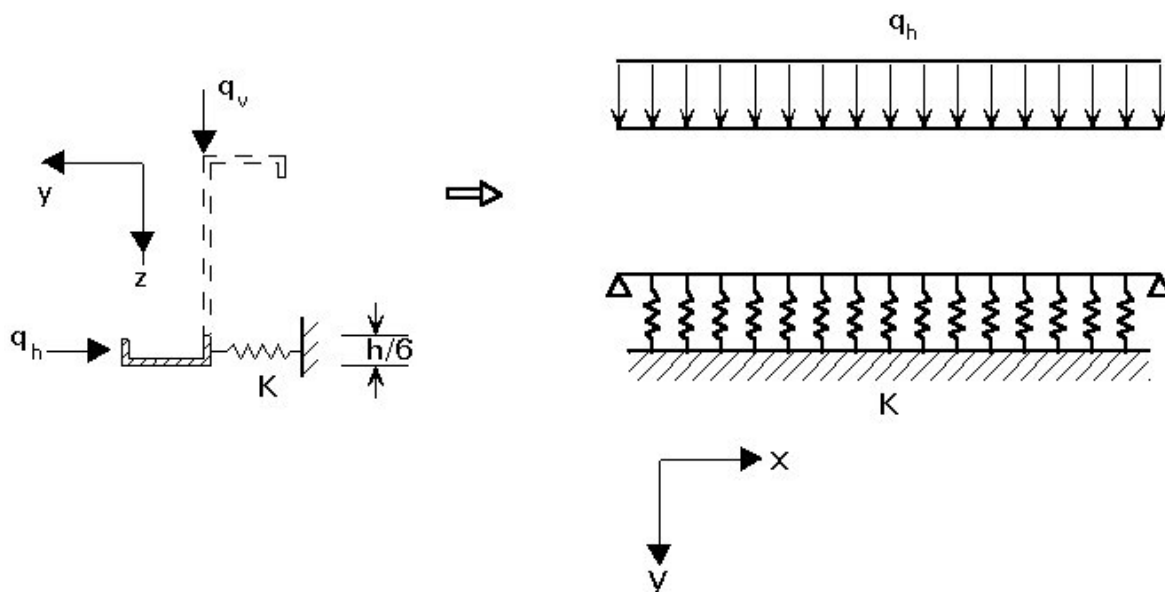
Ponieważ zachowanie płatwi jest dość skomplikowane, opracowano różne modele do projektowania. Istnieją dwa główne tryby deformacji: zginanie względem silnej osi przekroju i skręcanie. Do obliczenia efektów skręcania i stabilności swobodnego pasa istnieją dwa typy modeli projektowych:

Modele uwzględniające cały przekrój poprzeczny z ograniczeniami i odkształceniami poprzecznymi i skręcanymi: Model ten obejmuje główne tryby deformacji i odpowiednie współczynniki obciążenia dla zginania i skręcania, ale konieczne jest określenie funkcji spłaszczenia spowodowanych skręcaniem.

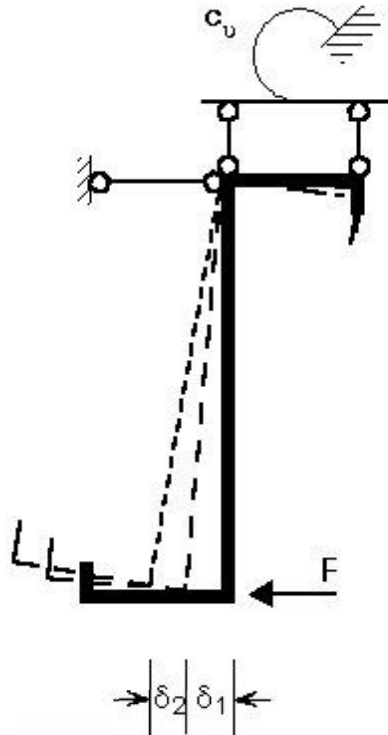
Modele uwzględniające jedynie swobodny pas płatwi, z rozpatrywaniem bocznym podparciem jako belki na sprężystym podłożu: parametr sprężystości podparcia wynika z ograniczeń skrętnych górnego pasa i odkształceń przekroju. Ten model jest często stosowany, ale głównym trudnym jest określenie, która cząstka rdzenia należy do pasa ciskanego. Wyniki obliczeń w znacznym stopniu zależą od odpowiedniego przyjęcia tej wartości.



Eurokod 3, cz 1.3 przyj ął model drugiego typu jako podstawowy do oblicze ń p łątwi. Napr ężenia powsta ę w wyniku zginania wok ół silnej osi i si ły osiowej s ą okre lane dla ca ęego przekroju i szeroko ći efektywnych. Dodatkowo napr ężenia powstaj ą w wyniku zgi ęcia swobodnego pasa wok ół osi pionowej. Napr ężenia te s ą obliczane za pomoc ę schematu belki ze spr ystym podparciem ći g ęym. Spr yste podparcie pasa ma warto ść liniowej spr ysto ći K .



Moduł sprężystości K można oszacować za pomocą przemieszczeń sprężystych paska nieusztwnionego. Zależy to od ograniczenia skręcania na pasie usztwnionym i odkształceń przekroju płatwi.



Moduł sprężystości podparcia bocznego:

$$K = \frac{F}{\delta_1 + \delta_2}$$

gdzie: $\delta_1 = c_v$ – sztywność połączenia płatwi i blachy poszycia,
 δ_2 – sztywność dystorsyjna przekroju płatwi.

Rzeczywiste naprężenia są obliczane za pomocą następujących wzorów:

Pas usztwniony:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{W_{eff}} + \frac{N}{A_{eff}} \leq f_y$$

Pas nieusztwniony:

$$\sigma_x = \frac{M_y}{W_{eff}} + \frac{M_z}{W_{eff,z}} + \frac{N}{A_{eff}} \leq f_y$$

Sprawdzenie stateczności płatwi

Jeżeli swobodny pas płatwi jest ściskany, należy również wykonać kontrolę stateczności ogólnej tego pasa. Swobodny pas płatwi jednoprzęsłowych jest ściskany jedynie w przypadku, gdy występuje tylko ssanie wiatru (obciążenia unoszące). Swobodny pas płatwi wieloprzęsłowych jest ściskany w obszarze przęsła w przypadku ssania wiatru, natomiast w obszarze podparcia jest ściskany pod obciążeniem grawitacyjnym. Ssanie wiatru jest bardziej dotkliwym przypadkiem obciążenia pod względem stateczności, gdy dotyczy zwykle znacznie większej długości elementu.

W celu sprawdzenia stateczności, Norma PN-EN-1993-1-3 proponuje regułę: naprężenia powodujące niestateczność są zwikszczone przez wartość w superpozycji naprężenia.

W-2. Kształtowniki gięte na zimno – Belki

$$\sigma_x = w \cdot \left(\frac{M_y}{W_{eff}} + \frac{N}{A_{eff}} \right) + \frac{M_z}{W_{eff,z}} \leq f_y$$

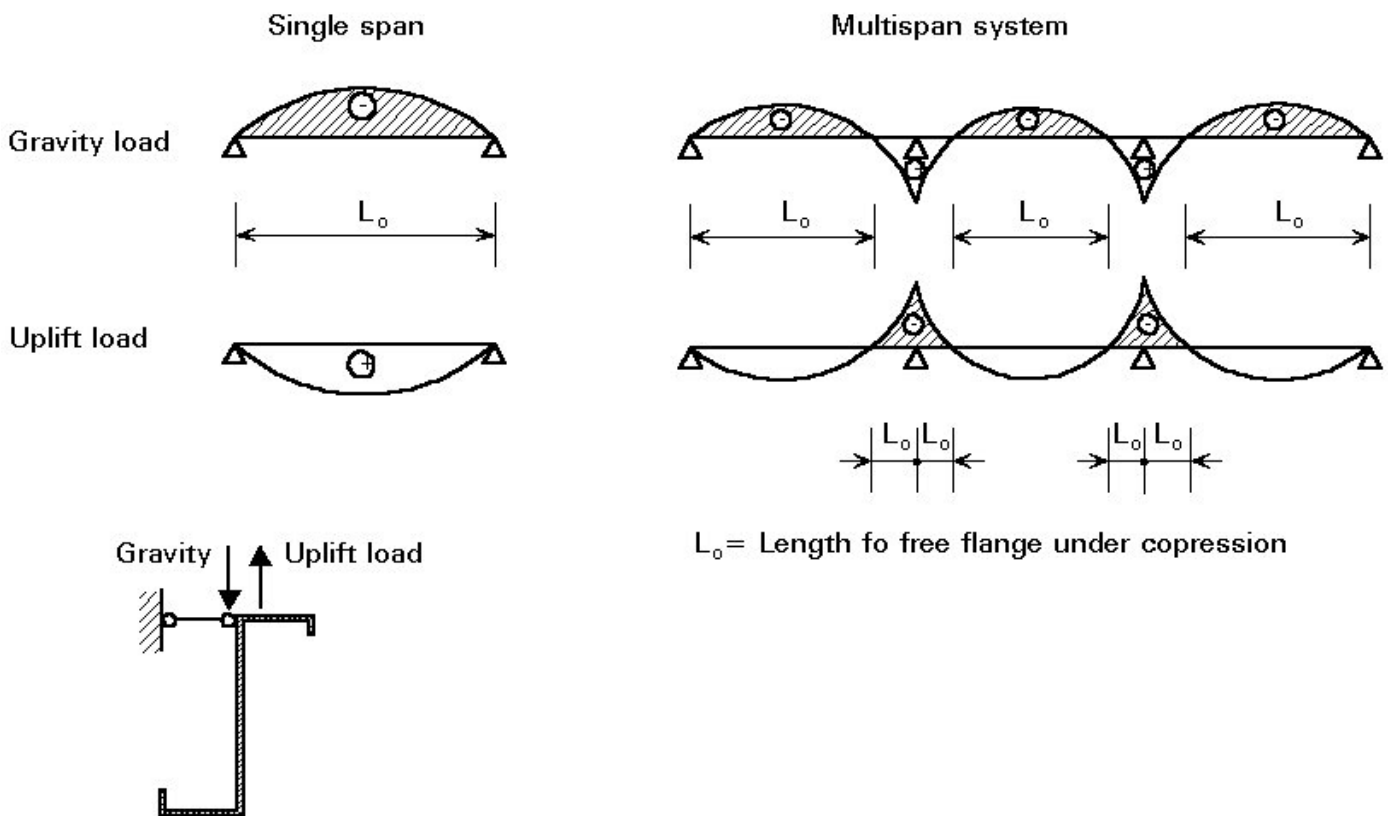
Wartość współczynnika w zależy od smukłości ciskanego swobodnego pasa płatwi.

Projektowanie specjalnych systemów płatwiowych

Systemy jednoprzęsłowe

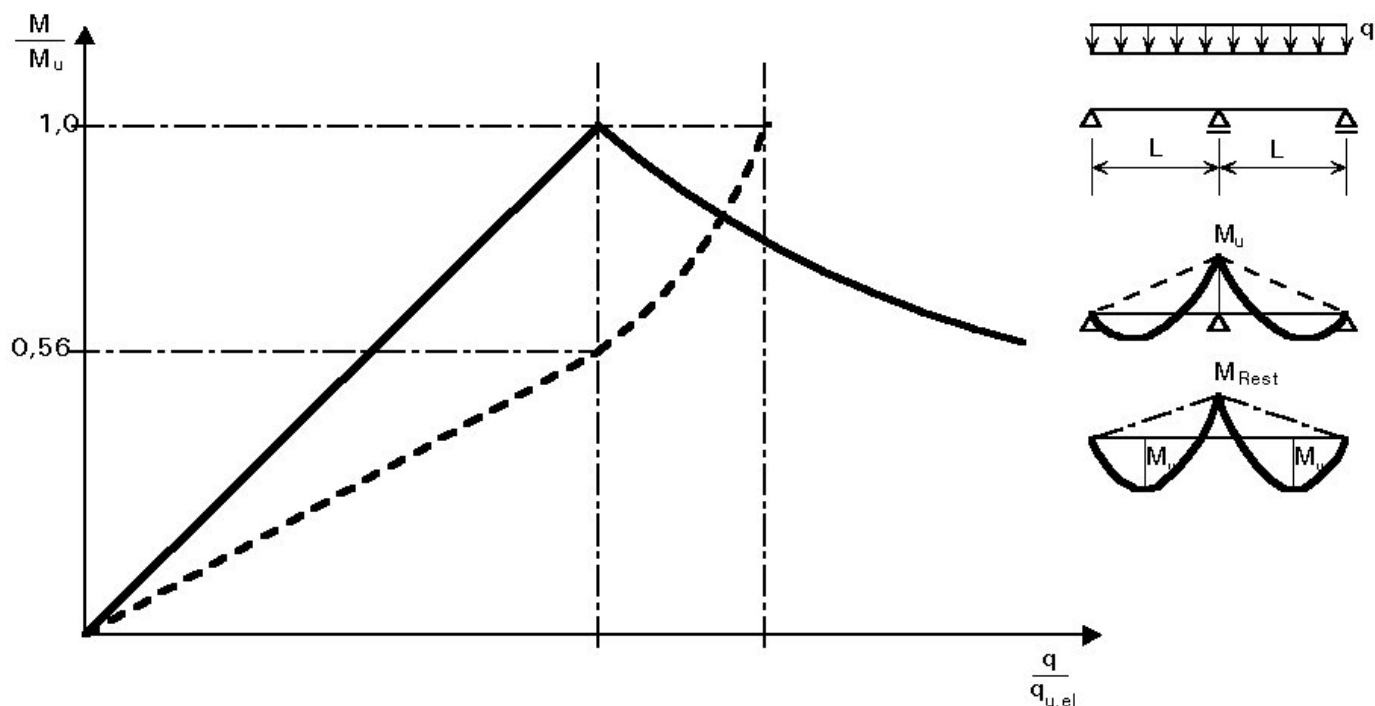
Pod obciążeniem grawitacyjnym bez siły osiowej swobodny pas płatwi jest rozciągany. Zginanie pasa może być pominięte. Podczas projektowania uwzględnia się tylko naprężenia od zginania w głównej płaszczyźnie płatwi i reakcje podporowej. Należy również sprawdzić ugięcia.

Pod obciążeniami odciążającymi, cały nieusztyniony pas płatwi jest ściskany. Poza zginaniem płatwi należy uwzględnić również stateczność ogólną pasa.



Systemy dwuprzęsłowe z ciągłymi przekrojami

W systemach ciągłych (bez systemów nakładkowych i przykładowych) zachowanie materiału na środkowej podporze może być brane pod uwagę w stanie granicznym nośności. Oznacza to, że wraz ze wzrostem obciążenia moment zginający nad podporą rośnie, a osiowo wartość uogólnionego przegubu plastycznego M_u przekroju. Zwiększenie obciążenia dodatkowo prowadzi do redystrybucji momentów. Zachowanie momentu obrotowego pokazuje spadek momentu na podporze, podczas gdy moment środkowy rozpiętości rośnie z powodu warunków równowagi. Stan graniczny zostaje osiągnięty, gdy moment w połowie rozpiętości jest równy nośności przekroju na zginanie. Dodatkowo należy brać pod uwagę warunki stateczności elementu.



Systemy nakładkowy i zakładkowy

Sztywno połączenia zakładkowego lub nakładkowego należy ustalić poprzez badanie. Rozkład momentu oblicza się na podstawie tej sztywności. Naprężenia wynikające z rozkładu momentu muszą mieścić się w granicach ograniczonych naprężeń. Szczególną uwagę należy zwrócić na przęsła skrajne, które korzystają z cięgien tylko na jednym końcu. Dodatkowo należy sprawdzić stateczność pasów ciskanych i warunki stanu granicznego użytkownika. Utrata stateczności miejscowej, czy ścinanie w strefie podporowej może być oszacowane na podstawie badań do wiadczenia.

Inne aspekty projektowe

Oprócz sprawdzenia nośności przekroju płatwi należy wziąć pod uwagę kilka innych aspektów:

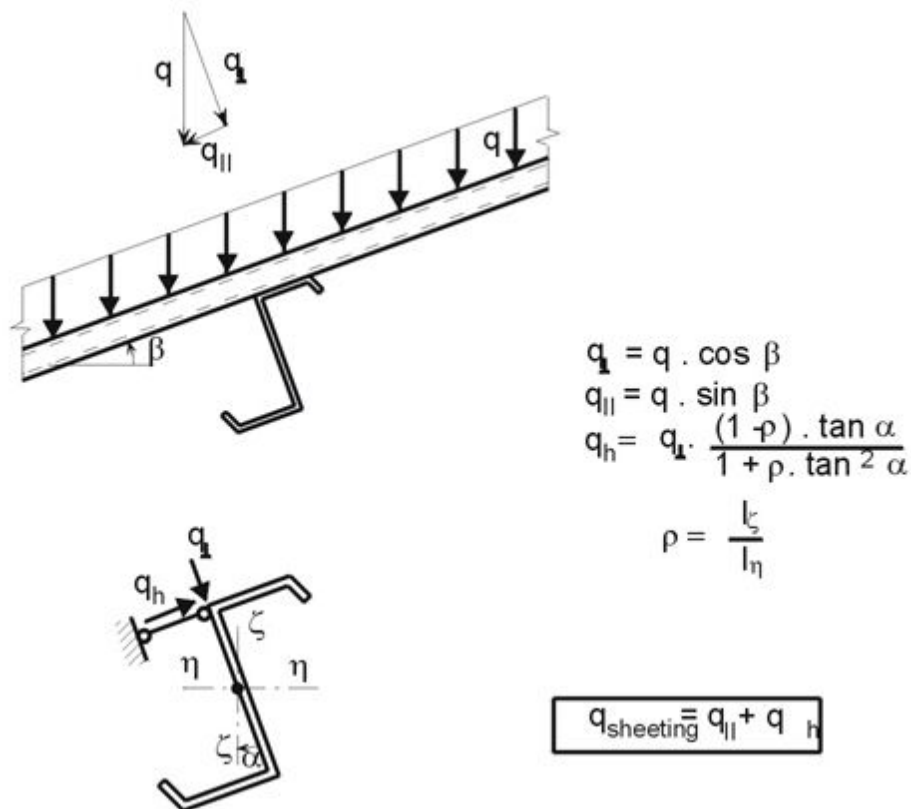
Arkusze poszycia dachów lub ścian muszą przenosić obciążenia w płaszczyźnie połączenia dachowej. Wtedy płatwie liczymy jako jednokierunkowo zginane. Obciążenia te będące w płaszczyźnie połączenia dachowej są składowane z dwóch efektów:

- Pierwszy element jest składnikiem obciążenia zewnętrznego w kierunku równoległym do blachy. Ten prostopadły element jest przenoszony przez płatwie.
- Drugi element to imperfekcyjna siła boczna na górnym pasie płatwi o niesymetrycznym przekroju.

Siły te w płaszczyźnie arkuszy poszycia należy przenieść na przęsła, lub bezpośrednio przez blachę poszycia. Zwykle odbywa się to za pomocą tynika połączeniowego podłogowego lub połączenia połączenia w kalenicy. Połączenie poszycia z płatwiami należy sprawdzać również pod kątem tego warunku.

Należy również sprawdzić strefy podporowe płatwi. Jednym z rodzajów awarii jest zgniecenie tynika; innym rodzajem zniszczenia jest ścinanie w pobliżu podpory. Należy wziąć pod uwagę interakcje między momentami zginającymi i reakcjami podparcia.

Ugięcia nie powinny przekraczać zakresu 1/180 w celu ułatwienia użytkownika dachu.



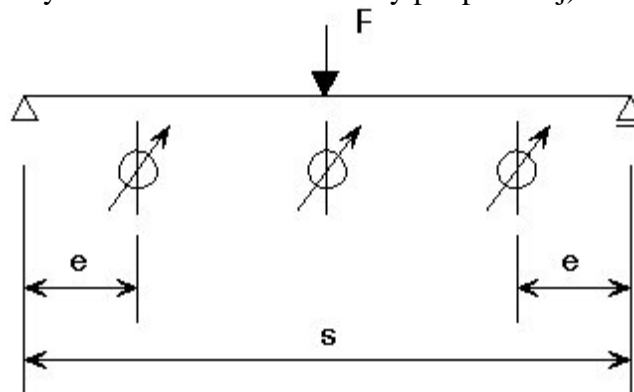
Projektowanie na podstawie badań do wiadczalnych

Badania są konieczne w celu zbadania właściwości i zachowania części konstrukcji, których nie można analizować teoretycznie z niezbędną dokładnością.

W części 1.3 Eurokodu 3 podano wytyczne dotyczące liczby badań i ich konfiguracji.

W projektowaniu płatwi można zbadać kilka aspektów konstrukcji:

- Zabezpieczenie przed skruszeniem płatwi za pomocą blachy poszycia.
- Maksymalna nośność płatwi i zdolność do obrotu przekroju płatwi po utworzeniu się przegubu plastycznego. Maksymalna nośność płatwi na zginanie można również określić na podstawie obliczeń (granica plastyczności pomnożona przez efektywny wskaźnik wytrzymałości na zginanie przekroju), ale plastyczną zdolność do obrotu można oszacować tylko poprzez badanie.
- Nośność na zniszczenie miejscowe przy oparciu spowodowaną interakcją między momentem zginającym a reakcją podparcia. W tym przypadku podporowym, odległość s jest równa odległości między punktami momentu zerowego.
- Sztywność zachodzących na siebie lub zdwojonych części belek wieloprzewłokowych (oceniać można również w badaniu strefy podporowej).

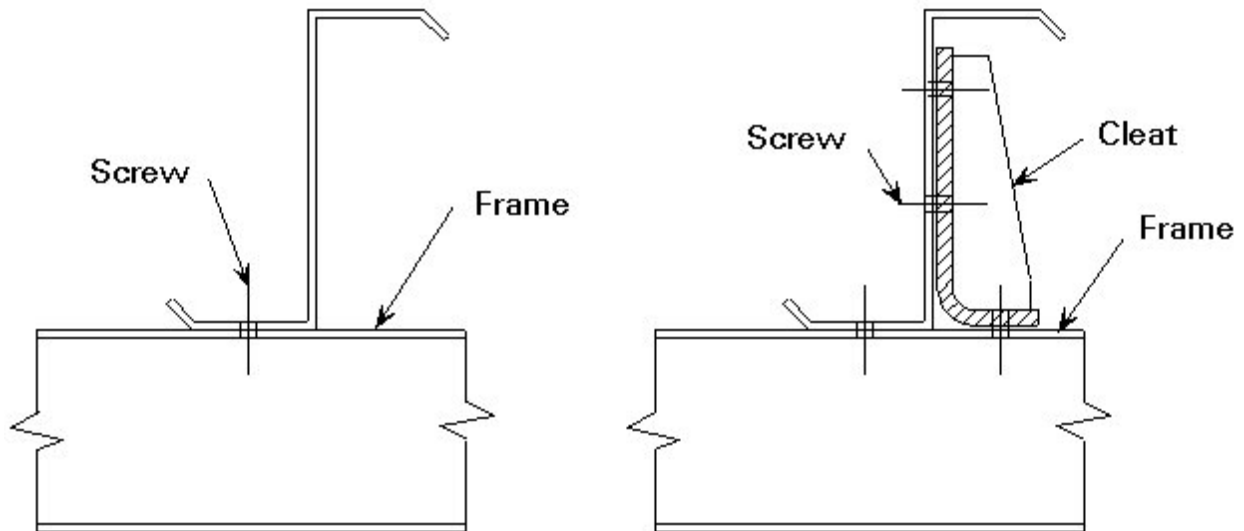


Niektóre praktyczne aspekty

Istnieje wiele szczegółów konstrukcyjnych w systemach dachowych dołączenia płatwi między sobą lub z ramami głównych układów konstrukcyjnych, spełniających warunki przenoszenia sił w płaszczyźnie blachy lub do zapobiegania wyboczeniu giętno-skrętnemu płatwi.

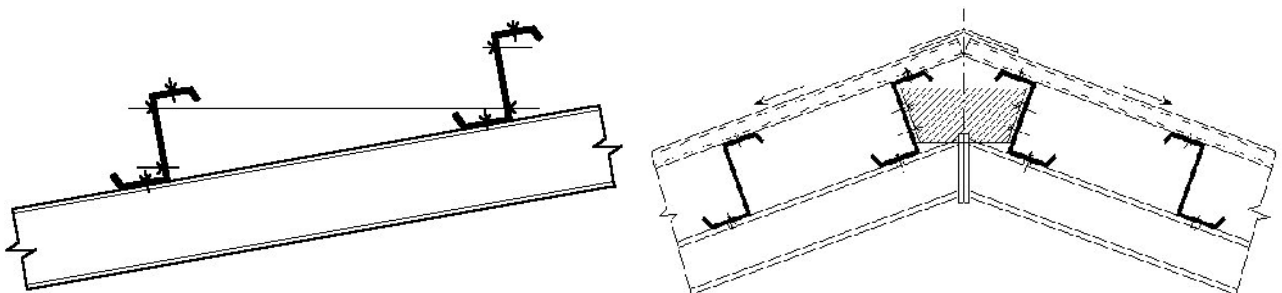
Połączenie płatwi z ramami

W niektórych konstrukcjach płatwie są przymocowane bezpośrednio do ramy za pomocą śrub. Inne systemy używają elementów pośrednich. Elementy te powinny być zaprojektowane do przenoszenia sił pionowych i poziomych zgodnie z zasadami dla konstrukcji stalowych, oraz zapewniać podparcie widełkowe płatwi.



Siły w płaszczyźnie arkuszy poszycia

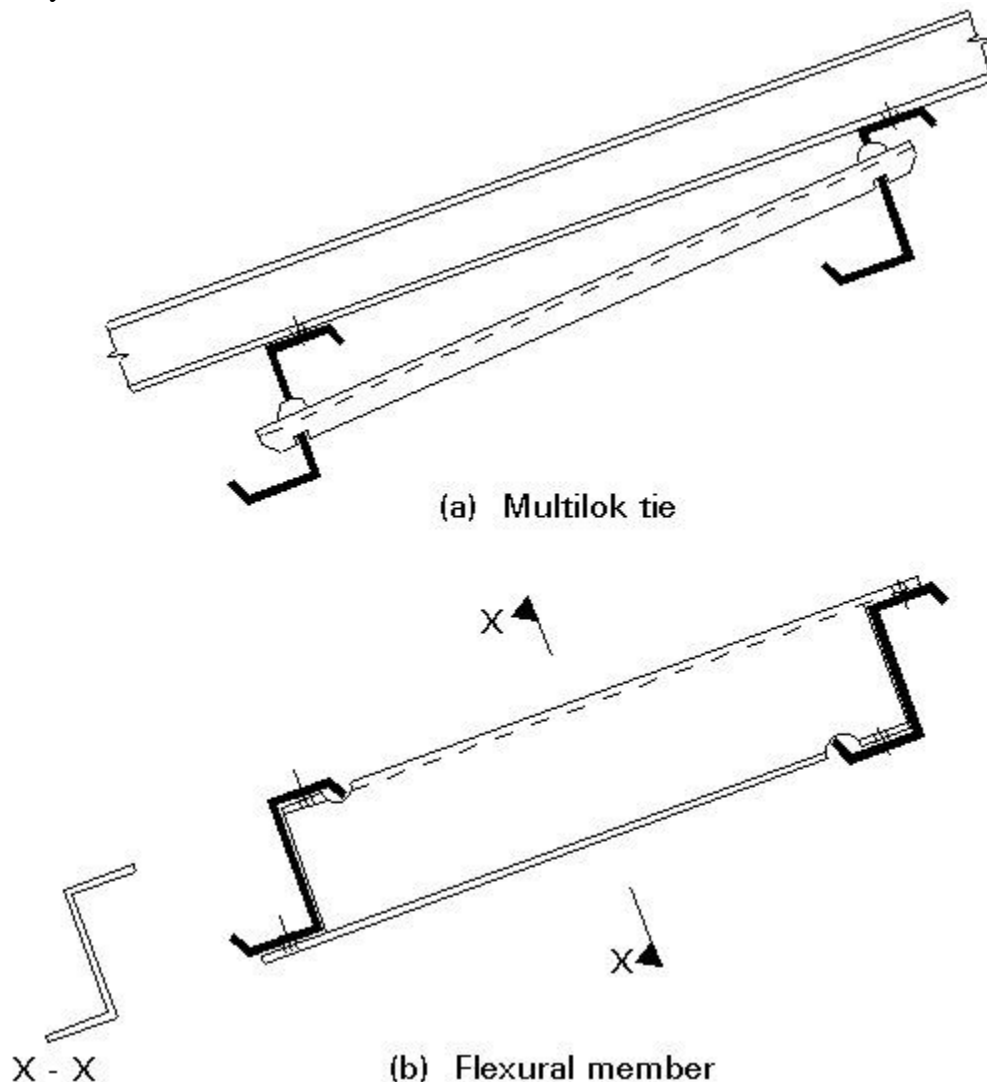
Siły w płaszczyźnie poszycia dachowego należy uwzględnić w analizie połączenia. Siły te muszą być przenoszone na ramy za pomocą odpowiednich elementów łącznikowych na podporach płatwi lub dodatkowych elementów (ściągów) na długości płatwi między nimi wzdłuż ramy. Niektóre konstrukcje dachowe łączą pokrycie jednej części dachu na kalenicy z drugą częścią pokrycia o przeciwnym nachyleniu. Płatwie w kalenicy należy następnie usztywnić i sprawdzić warunki połączenia.



Alternatywnie do zastosowania membranowego działania blachy można zastosować metalowe paski do przytrzymania górnego pasa płatwi. Paski te muszą być wykonane na całej szerokości i długości dachu, a ich rozstaw musi być mniejszy niż graniczna długość płatwi przy wyboczeniu giętno-skrętnym. Paski te muszą być zamocowane do ramy również w kalenicy.

Zapobieganie wyboczeniu gi tno-skr tnemu płatwi

Je eli usztywnienie skr tne płatwi ma zbyt małą sztywność, aby zapobiec bocznemu odkształceniu, należy dodać do konstrukcji dodatkowe elementy, które będą usztywniały swobodny pas płatwi. Rozwiązania konstrukcyjne wykorzystywane przy zapobieganiu skręcaniu się przekroju u ywają dwóch elementów:



- Elementy gi tne Multilok przenoszą tylko siły rozciągające i stabilizują swobodny pas płatwi. Jest to najczystszy sposób.
- Elementy gi tne na zimno utrzymują płatwie i zabezpieczają je przed skręcaniem, oraz przenoszą również siły ścisłe.

SZCZEGÓLNE WARUNKI NORMOWE DLA PŁATWI

Postanowienia podane w rozdziale 10 normy stosuje się do płatwi wykonanych z kształtowników gi tnych o przekrojach typu Z, C, U oraz kształtowników kapeluszowych, o smukłościach $h/t < 233$, $c/t \leq 20$ przy pojedynczym zgięciu i $d/t \leq 20$ przy podwójnym zgięciu brzegowym.

Podane postanowienia odnoszą się do systemów płatwi ze ściągami, płatwi ciętych, płatwi łączonych na zakład lub za pomocą nakładki. Te same postanowienia można również stosować w odniesieniu do profilowanych na zimno rygli ściennych, belek stropowych oraz podobnych elementów stalowych poszyciem. Rygle ścienne projektuje się podobnie jak płatwie, traktując nacisk wiatru analogicznie jak obciążenie grawitacyjne płatwi, a sam wiatr – jak obciążenie płatwi skierowane do góry. Pełne cięgi

stanie boczne można uzyskać za pomocą blachy trapezowej lub innego profilowanego poszycia o odpowiedniej sztywności, połączonych w sposób ciągły (głęboko) dolnymi fałdami z pasem płatwi. Płatew w miejscu połączenia z blachą trapezową można traktować jako stopy (podparcie) w kierunku bocznym. W innych przypadkach stopie zamocowania płatwi powinien być oszacowany na podstawie dotychczasowej praktyki lub badań do wiadczalnych.

Płatew w miejscu połączenia blach trapezowych można uważać za stopy w płaszczyźnie poszycia, jeżeli spełniony jest następujący warunek:

$$S \geq \left(EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25 h^2 \right) \frac{70}{h^2}$$

Maksymalne naprężenia w przekroju powinny spełniać następujące warunki:

– w pasie stężonym:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{\text{eff},y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{\text{eff}}} \leq f_y / \gamma_M$$

– w pasie swobodnym:

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{\text{eff},y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{\text{eff}}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{tz}} \leq f_y / \gamma_M$$

gdzie:

A_{eff} – pole przekroju współpracującego przy równomiernym ściskaniu;

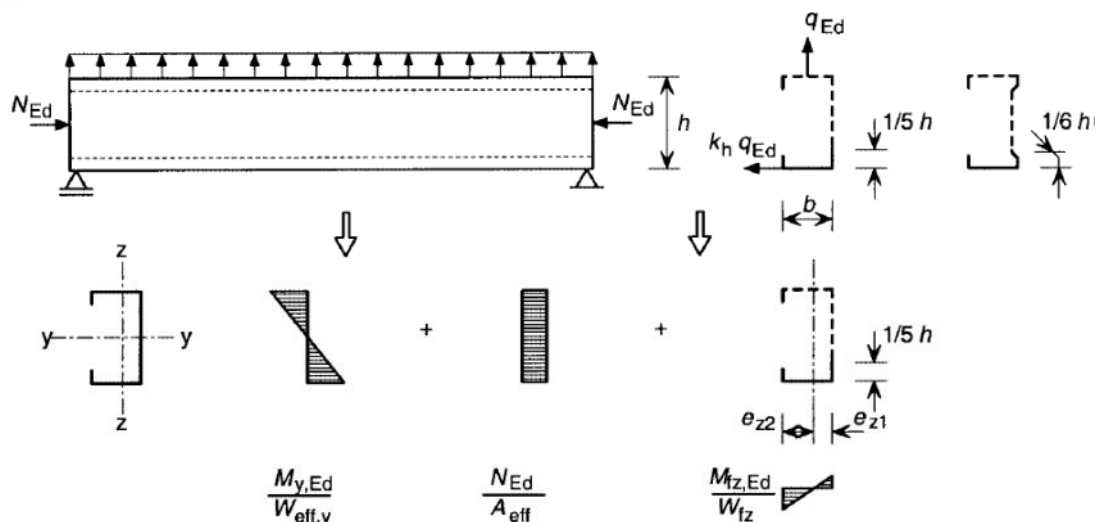
f_y – granica plastyczności wg 3.2.1(5);

$M_{z,Ed}$ – moment zginający w pasie od obciążenia bocznego $q_{h,Ed}$, wg (10.4);

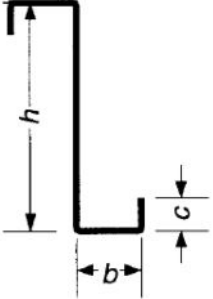
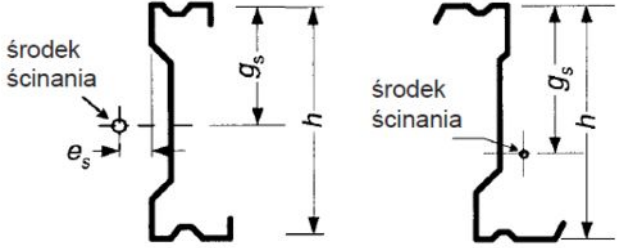
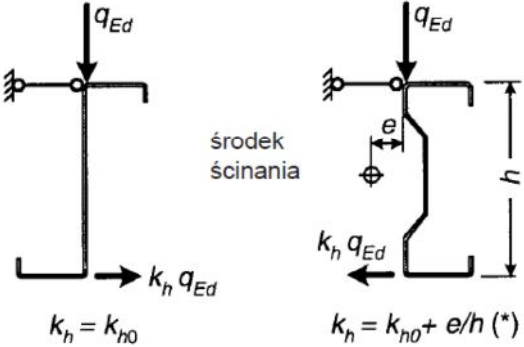
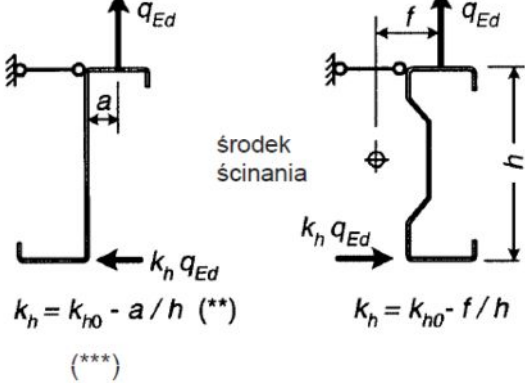
$W_{\text{eff},y}$ – wskaźnik wytrzymałości przekroju współpracującego przy zginaniu względem osi $y - y$;

W_{tz} – wskaźnik wytrzymałości przekroju pasa brutto, łącznie ze współpracującą częścią środnika, względem osi $z - z$; część tę można przyjmować równą $1/5$ wysokości środnika w przypadku płatwi typu C i Z lub równą $1/6$ wysokości środnika w przypadku płatwi typu Σ , patrz Rysunek 10.2;

przy czym: gdy $A_{\text{eff}} = A_g$ lub gdy $N_{Ed} = 0$ oraz $W_{\text{eff},y} = W_{el,y}$ przyjmuje się $\gamma_M = \gamma_{M0}$, w pozostałych przypadkach $\gamma_M = \gamma_{M1}$.



Zastępcze obciążenie boczne $q_{h,Ed}$ pasa swobodnego, odwzorowujące wpływy skręcania i zginania bocznego, wyznacza się według zależności $q_{h,Ed} = k_h \cdot q_{Ed}$. Współczynnik k_h dla typowych płatek określa się następująco:

 $k_{h0} = \frac{ht(b^2 + 2cb - 2c^2b/h)}{4I_y}$ <p>Kształtowniki typu Z (symetryczne)</p>	 $k_{h0} = \frac{I_{yz} \cdot g_s}{I_y \cdot h}$ <p>Kształtowniki typu Z, C i Σ</p>
<p>a) k_{h0} – współczynnik obciążenia bocznego (gdy wypadkowa obciążeń zewnętrznych przechodzi przez środek ścinania)</p>	
 <p>b) Obciążenie grawitacyjne</p>	 <p>c) Obciążenie unoszące</p>
<p>k_h – współczynnik zastępczego obciążenia bocznego</p>	

(*) Gdy środek ścinania jest po prawej stronie obciążenia q_{Ed} , to obciążenie działa w przeciwnym kierunku.

(**) Gdy $a/h > k_{h0}$, to obciążenie działa w przeciwnym kierunku.

(***) Wartość f odpowiada punktowi przyłożenia obciążenia q_{Ed} między brzegami pasa.

Moment zginający $M_{fz,Ed}$ można wyznaczyć według wzoru:

$$M_{fz,Ed} = R \cdot M_{0,fz,Ed}$$

gdzie: $M_{0,fz,Ed}$ = moment wyjściowy w pasie swobodnym, ustalony z pominięciem sprężystego podparcia;

R – współczynnik korekcyjny ze względu na sprężyste podparcie pasa.

Gdy pas swobodny jest rozciągany mo na przyjmowa $M_{fz,Ed} = 0$. Momenty wyj ciowe $M_{0,fz,Ed}$ w przekrojach krytycznych pasa swobodnego mo na wyznacza w zale no ci od schematu obci enia, przy czym zakres stosowania podanych formuł jest ograniczony do warto ci $R \leq 40$.

Współczynniki korekcyjne χ_R w poszczególnych przekrojach krytycznych mo na wyznacza na podstawie teorii belek na spr ystym podło u typu Winklera lub stosuj c formuły w których współczynnik R jest okre lony wzorem:

$$R = \frac{K L_a^4}{\pi^4 E I_{fz}}$$

Warunek stateczno ci ciskanego pasa swobodnego ma posta :

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_{yb} / \gamma_{M1}$$

Dalsze warunki zostan omówione w temacie tarczowej pracy poszycia dachowego.