

## **Część 2.**

# **SPRAWDZANIE STANÓW GRANICZNYCH** **NOŚNOŚCI I UŻYTKOWALNOŚCI**

## WYMAGANIA OGÓLNE

Elementy konstrukcji drewnianych wymiaruje się metodą stanów granicznych, sprawdzając **stan graniczny nośności (SGN)** i **stan graniczny użytkowalności (SGU)**.

Sprawdzenie SGN sprowadza się na ogół do porównania maksymalnych naprężeń wyznaczonych w rozpatrywanych przekrojach konstrukcji od **oddziaływań obliczeniowych** z **wytrzymałością obliczeniową drewna**.

Sprawdzenie SGU polega zazwyczaj na wyznaczeniu strzałki ugięcia elementu zginanego od **obciążeń charakterystycznych** i porównaniu jej z wartością graniczną podaną w normie PN-EN 1995-1-1. Sztywność elementu oblicza się z uwzględnieniem **średnich wartości współczynników sprężystości drewna**.

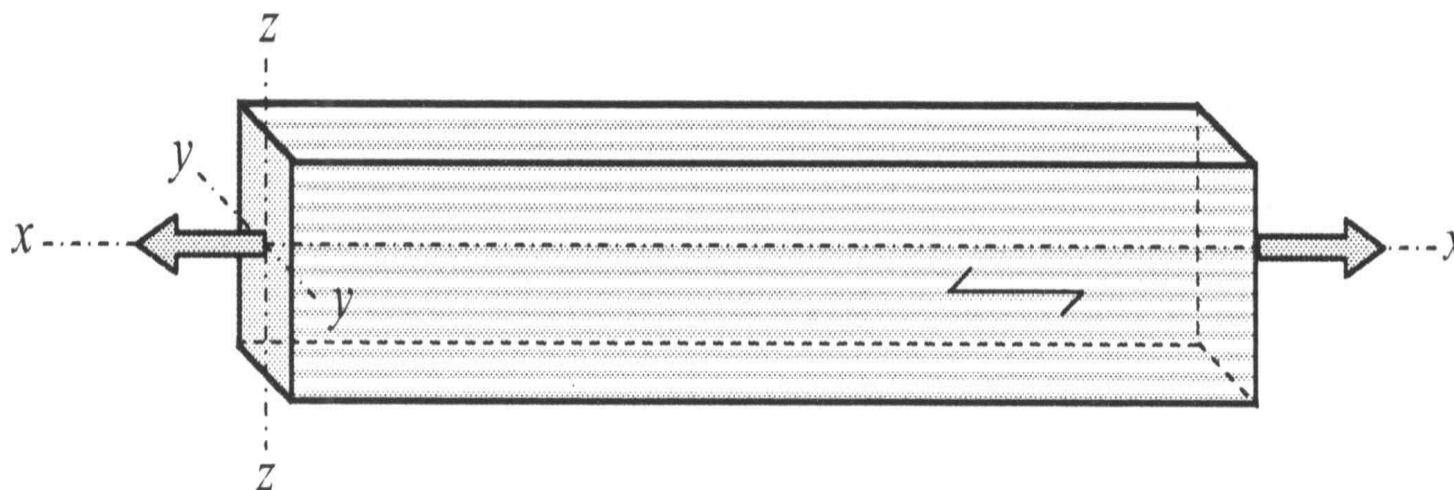
**Temperatura drewna** w konstrukcjach drewnianych nie powinna przekraczać 60 °C. W warunkach występowania temperatur wyższych, nie przekraczających 75 °C, należy stosować współczynnik zmniejszający wytrzymałość drewna  $k_{temp} = 0,80$ .

## Rozdział 6 Stany graniczne nośności

### 6.1 Obliczanie przekrojów pracujących w jednokierunkowym stanie naprężenia

#### 6.1.1 Postanowienia ogólne

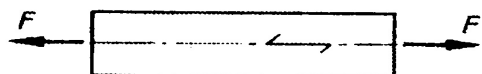
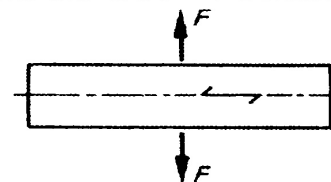
(1) Rozdział 6.1 dotyczy elementów konstrukcyjnych o stałym przekroju, wykonanych z drewna litego, klejonego warstwowo, lub wyrobów wykonanych z materiałów drewnopochodnych, o kierunku włókien na ogół równoległym do osi podłużnej elementu. Zakłada się, że element jest poddany naprężeniom skierowanym wyłącznie wzdłuż jednej ze swych osi głównych (patrz Rysunek 6.1).



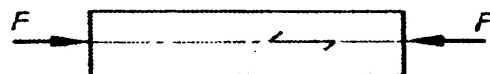
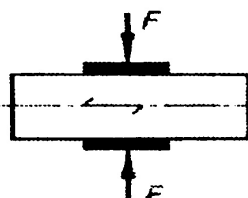
**Rysunek 6.1 – Osie elementu**

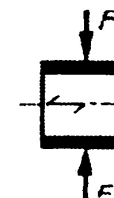
**Obciążenia****Rozciąganie**

2


 rozciąganie  
 wzdłużne  
 ( $\parallel$  do włókien)

 rozciąganie poprzeczne  
 ( $\perp$  do włókien)
**Ściskanie <sup>3)</sup>**

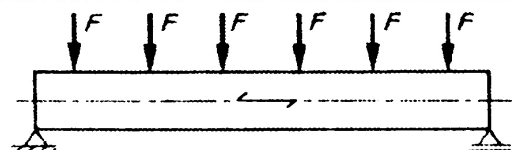
3


 ściskanie wzdłużne  
 ( $\parallel$  do włókien)

 ściskanie poprzeczne ( $\perp$  do włókien)  
 z występami  $\parallel$  do włókien

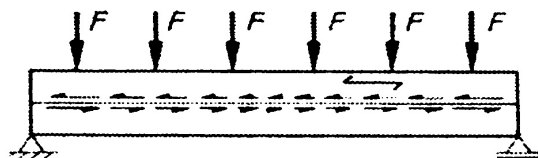
 (nacisk na część  
 powierzchni)

 ściskanie poprzeczne ( $\parallel$  do włókien)  
 bez występów  $\parallel$  do włókien

 (nacisk na całą  
 powierzchnię)
**Zginanie**

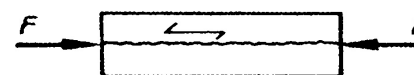
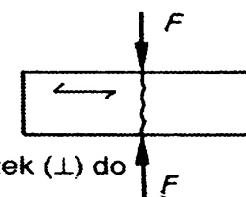
4


 strefa ściskana jest „u góry”  
 strefa rozciągana jest „na dole”  
 siły ścinające patrz: wiersz 5
**Ścinanie przy zginaniu <sup>4)</sup>**

5



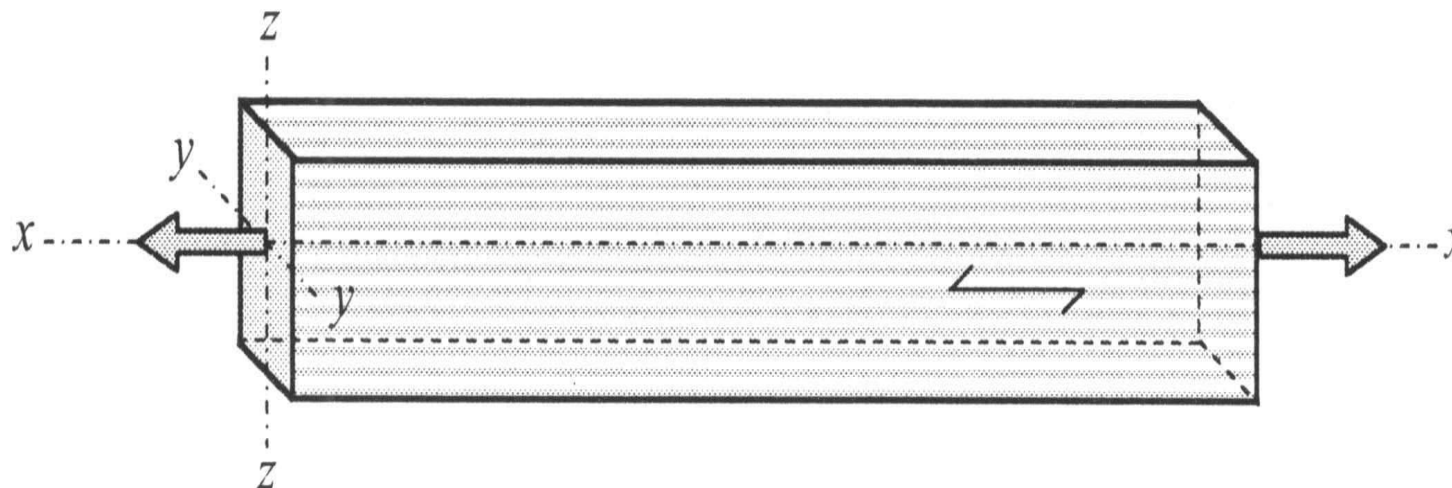
w belce zginanej siły ścinające usiłują przesunąć poszczególne płaszczyzny w kierunku wzdłużnym

**Przecinanie (przesuwanie)**
 wzdłuż ( $\parallel$ ) do  
 włókien

 w poprzek ( $\perp$ ) do  
 włókien

 w jednej płaszczyźnie  
 (ściskanie rozciągające lub ściskające)



### 6.1.2 Rozciąganie wzdłuż włókien



(1)P Należy spełnić następujący warunek:

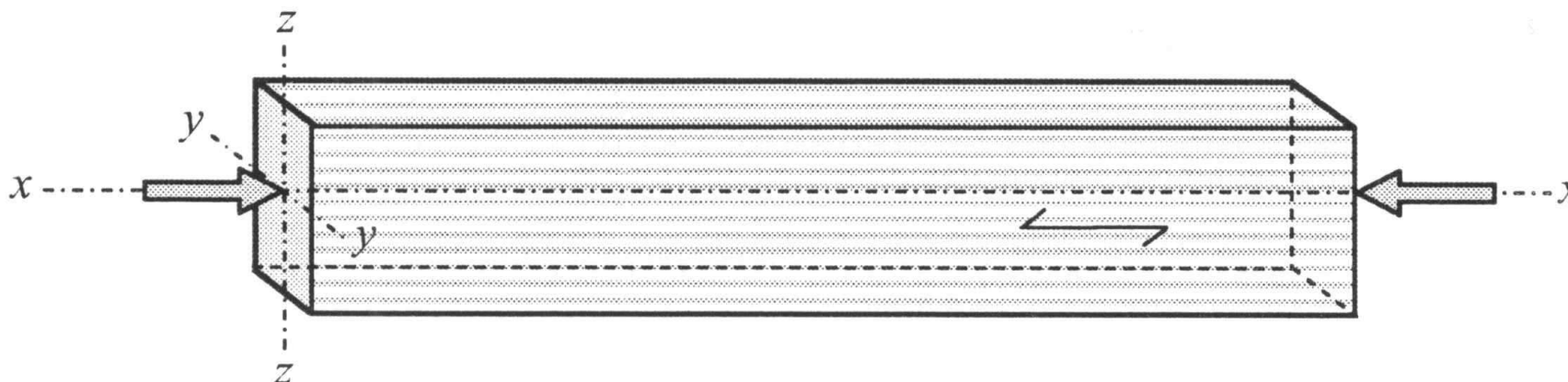
$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (6.1)$$

gdzie:

$\sigma_{t,0,d}$  – obliczeniowe naprężenie rozciągające wzdłuż włókien,

$f_{t,0,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na rozciąganie wzdłuż włókien.

### 6.1.4. Ściskanie wzdłuż włókien



(1)P Należy spełnić następujący warunek:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (6.2)$$

gdzie:

$\sigma_{c,0,d}$  – obliczeniowe naprężenie ściskające wzdłuż włókien,

$f_{c,0,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien.

UWAGA: Postanowienia dotyczące niestateczności elementów podano w 6.3.

### 6.1.5 Ściskanie w poprzek włókien

(1)P Należy spełnić następujący warunek:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} \quad (6.3)$$

w którym:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} \quad (6.4)$$

gdzie:

$\sigma_{c,90,d}$  – obliczeniowe naprężenie ściskające w poprzek włókien, w efektywnym polu docisku,

$F_{c,90,d}$  – obliczeniowa siła ściskająca w poprzek włókien,

$A_{ef}$  – efektywne pole docisku,

$f_{c,90,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie w poprzek włókien,

$k_{c,90}$  – współczynnik uwzględniający rozkład obciążenia, możliwość powstania pęknięć oraz stopień odkształcenia przy ściskaniu.

Efektywne pole docisku  $A_{ef}$  należy określać z uwzględnieniem efektywnej długości kontaktu wzdłuż włókien, biorąc pod uwagę to, że długość kontaktu  $\ell$  jest obustronnie powiększona o 30 mm, lecz nie więcej niż  $a$ ,  $\ell$  lub  $\ell_1/2$ ; patrz Rysunek 6.2.

(2) Wartość współczynnika  $k_{c,90}$  należy przyjmować za równą 1,0, z wyjątkiem przypadków określonych w poniższych punktach. W tych szczególnych przypadkach współczynnik  $k_{c,90}$  może zostać zwiększony do wartości granicznej  $k_{c,90} = 1,75$ .

(3) W przypadku elementów podpartych w sposób ciągły, pod warunkiem że  $\ell \geq 2h$ , patrz Rysunek 6.2a, wartości  $k_{c,90}$  należy przyjmować następująco:

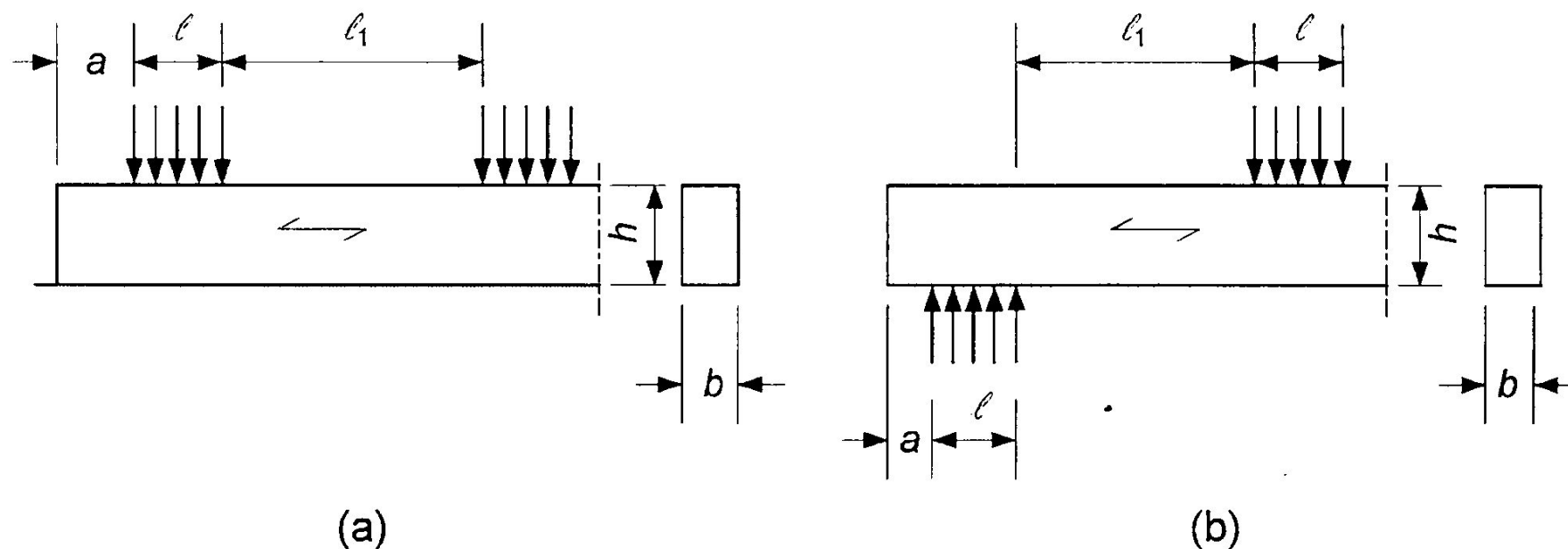
- $k_{c,90} = 1,25$  w przypadku iglastego drewna litego,
- $k_{c,90} = 1,5$  w przypadku iglastego drewna klejonego warstwowo.

gdzie  $h$  – wysokość elementu, a  $\ell$  – długość kontaktu.

(4) W przypadku elementów podpartych w sposób nieciągły, pod warunkiem że  $\ell_1 \geq 2h$ , patrz Rysunek 6.2b, wartości  $k_{c,90}$  należy przyjmować następująco:

- $k_{c,90} = 1,5$  w przypadku iglastego drewna litego,
- $k_{c,90} = 1,75$  w przypadku iglastego drewna klejonego warstwowo, pod warunkiem że  $\ell \leq 400$  mm.

gdzie  $h$  – wysokość elementu, a  $\ell$  – długość kontaktu.



Rysunek 6.2 – Element podparty w sposób (a) ciągły i (b) nieciągły

### 6.1.6 Zginanie

(1)P Należy spełnić następujące warunki:

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.11)$$

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.12)$$

gdzie:

$\sigma_{m,y,d}$  i  $\sigma_{m,z,d}$  – obliczeniowe naprężenia zginające, określone względem osi głównych poka  
sunku 6.1, Ry-

$f_{m,y,d}$  i  $f_{m,z,d}$  – wytrzymałości obliczeniowe na zginanie odpowiadające tym naprężeniom.

UWAGA: Współczynnik  $k_m$  wyraża możliwość redystrybucji naprężeń, jak również niejednorodność materiału w danym przekroju.

(2) Wartości współczynnika  $k_m$  należy przyjmować następująco:

Dla elementów z drewna litego, drewna klejonego warstwowo oraz LVL:

- dla przekrojów prostokątnych:  $k_m = 0,7$ ,
- dla innych przekrojów:  $k_m = 1,0$ .

Dla elementów z materiałów drewnopochodnych:

- dla wszystkich przekrojów:  $k_m = 1,0$ .

(3) Należy również sprawdzić warunek stateczności (patrz 6.3).

### 6.1.7 Ścinanie

(1) W przypadku ścinania o składowej naprężenia równoległej do włókien, Rysunek 6.5(a), jak również ścinania o dwóch składowych prostopadłych do włókien, Rysunek 6.5(b), należy spełnić następujący warunek:

$$\tau_d \leq f_{v,d} \quad (6.13)$$

gdzie:

$\tau_d$  – obliczeniowe naprężenie ścinające,

$f_{v,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie w danym przypadku.

UWAGA: Wytrzymałość na ścinanie przy ścinaniu tarczowym (w płaszczyźnie płyty) jest w przybliżeniu równa dwukrotnej wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien.

(2) W przypadku sprawdzania wytrzymałości na ścinanie elementów zginanych należy uwzględnić wpływ pęknięć przez wprowadzenie efektywnej szerokości elementu:

$$b_{ef} = k_{cr} b \quad (6.13a)$$

gdzie:  $b$  – szerokość odpowiedniego przekroju poprzecznego elementu.

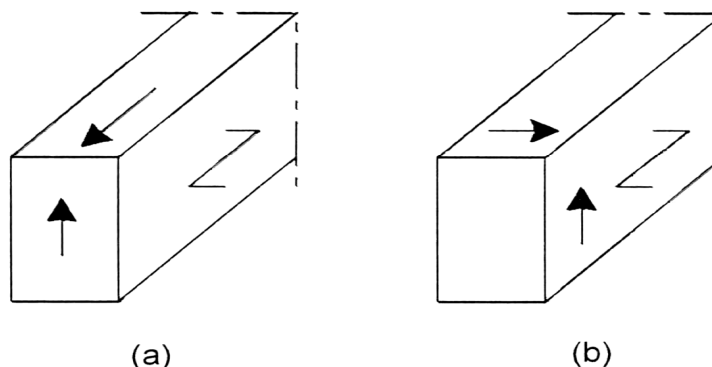
UWAGA: Zaleca się przyjmowanie następujących wartości współczynnika  $k_{cr}$ :

$k_{cr} = 0,67$  dla drewna litego,

$k_{cr} = 0,67$  dla drewna klejonego warstwowo,

$k_{cr} = 1,0$  dla materiałów drewnopochodnych wg EN 13986 i EN 14374.

Informację o wyborze krajowym można podać w załączniku krajowym.



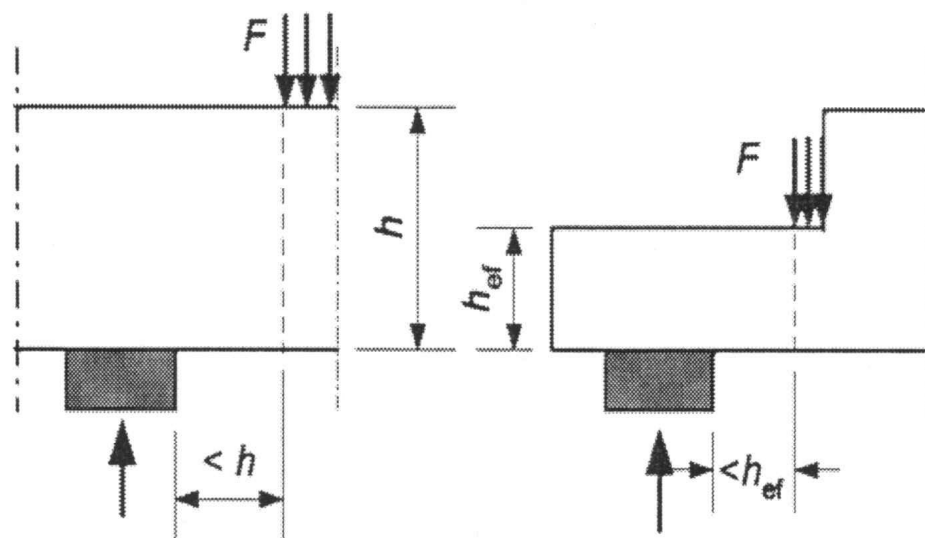
**Rysunek 6.5 – (a) Element, w którym występuje składowa naprężeń ścinających równoległa do włókien, (b) Element, w którym występują dwie składowe naprężeń ścinających prostopadłe do włókien (ścinanie tarczowe)**



Wzory na naprężenia ścinające dla przekroju prostokątnego  $b \times h$  oraz dla przekroju kołowego średnicy  $d$

$$\tau_{v,d} = \frac{3}{2} \frac{V_{Ed}}{b \cdot h} \qquad \tau_{v,d} = \frac{4}{3} \frac{V_{Ed}}{\pi \cdot d^2}$$

(3), Całkowitą siłę poprzeczną na podporach można zredukować, pomijając wpływ obciążenia  $F$  przyłożonego do górnej płaszczyzny belki w odległości nie większej niż  $h$  lub  $h_{ef}$  od wewnętrznej krawędzi podpory (Rysunek 6.6). W przypadku belek podciętych na podporze, redukcję siły poprzecznej stosuje się tylko wtedy, gdy podcięta jest płaszczyzna znajdująca się po przeciwnej stronie płaszczyzny podparcia.



Rysunek 6.6 – Warunki na podporach umożliwiające pominięcie obciążenia skupionego  $F$  przy obliczaniu siły poprzecznej

### 6.1.8 Skręcanie

(1)P Należy spełnić następujący warunek:

$$\tau_{\text{tor,d}} \leq k_{\text{shape}} f_{\text{v,d}} \quad (6.14)$$

w którym:

$$k_{\text{shape}} \begin{cases} 1,2 & \text{dla przekroju okrągłego} \\ \min \begin{cases} 1+0,15 \frac{h}{b} \\ 2,0 \end{cases} & \text{dla przekroju prostokątnego} \end{cases} \quad (6.15)$$

gdzie:

- $\tau_{\text{tor,d}}$  – naprężenie obliczeniowe wywołane skręcaniem,
- $f_{\text{v,d}}$  – wytrzymałość obliczeniowa na ścinanie,
- $k_{\text{shape}}$  – współczynnik zależny od kształtu przekroju poprzecznego,
- $h$  – dłuższy bok przekroju poprzecznego,
- $b$  – krótszy bok przekroju poprzecznego.

### 6.2.2 Ściskanie pod kątem do włókien

(1)P Należy uwzględnić jednoczesne oddziaływanie naprężeń ściskających skierowanych w dwóch lub więcej kierunkach.

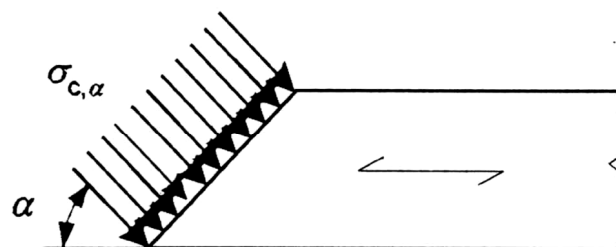
(2) Naprężenia ściskające skierowane pod kątem do włókien (patrz Rysunek 6.7) powinny spełnić następujący warunek:

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} \quad (6.16)$$

gdzie:

$\sigma_{c,\alpha,d}$  – obliczeniowe naprężenie ściskające pod kątem  $\alpha$  do włókien,

$k_{c,90}$  – współczynnik podany w 6.1.5, związany z naprężeniami prostopadłymi do włókien.



Rysunek 6.7 – Naprężenia ściskające pod kątem do włókien

### 6.2.3 Zginanie z rozciąganiem osiowym

(1)P Należy spełnić następujące warunki:

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.17)$$

$$\frac{\sigma_{t,0,d}}{f_{t,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.18)$$

(2) Wartości współczynnika  $k_m$  podano w 6.1.6.

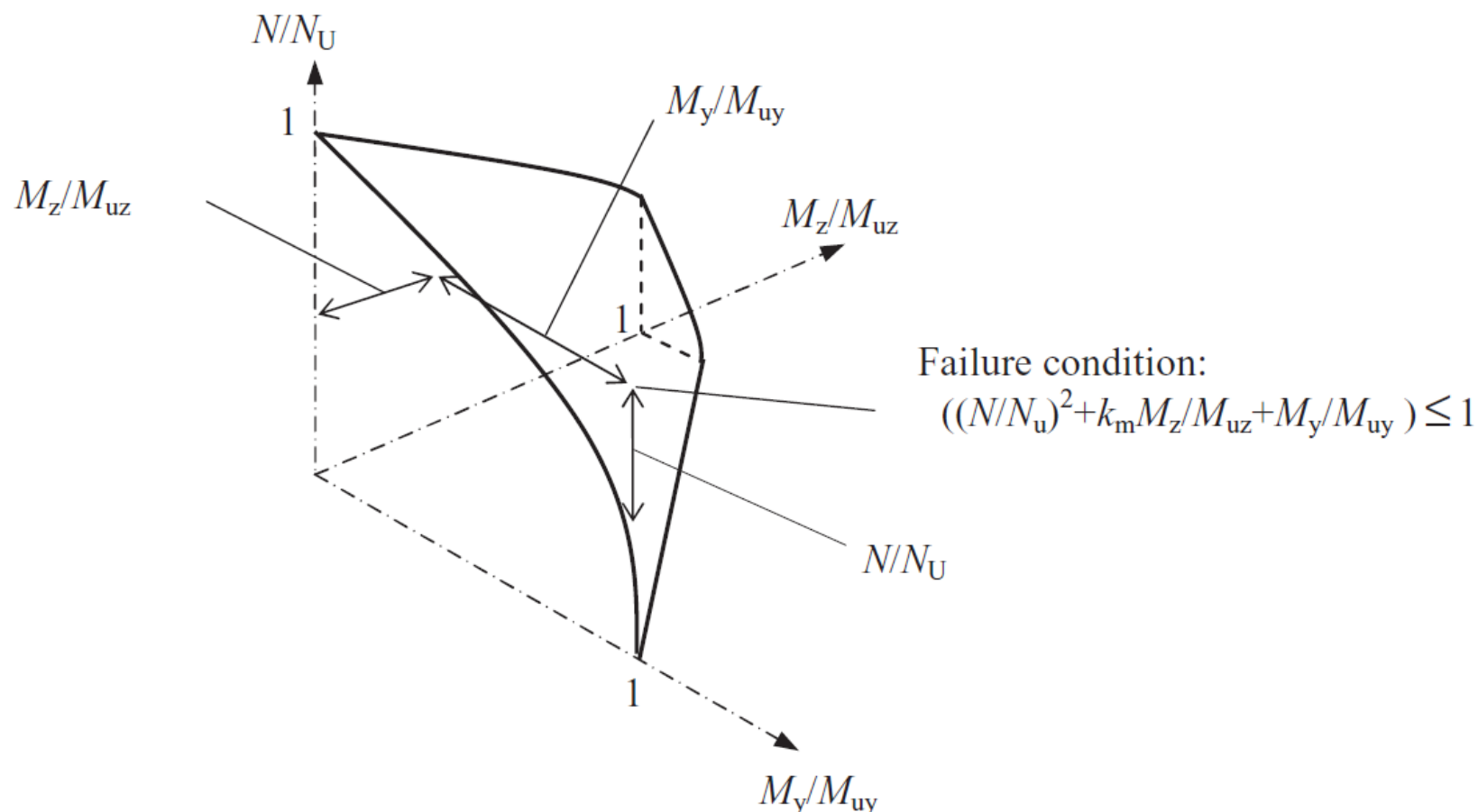
### 6.2.4 Zginanie ze ściskaniem osiowym

(1)P Należy spełnić następujące warunki<sup>N2)</sup>:

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.19)$$

$$\left( \frac{\sigma_{c,0,d}}{f_{c,0,d}} \right)^2 + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.20)$$

(2)P Wartości współczynnika  $k_m$  podano w 6.1.6.



Interakcyjne zależności pomiędzy dwukierunkowym zginaniem a ściskaniem z wyboczeniem – wzór (6.20) dla pręta o przekroju prostokątnym, współczynnik  $k_m = 0,7$  dla osi  $z - z$ ;  $\lambda_{rel, y}$  lub  $\lambda_{rel, z} \leq 0,3$  – brak wyboczenia, jedynie ściskanie osiowe.

## 6.3 Stateczność elementów

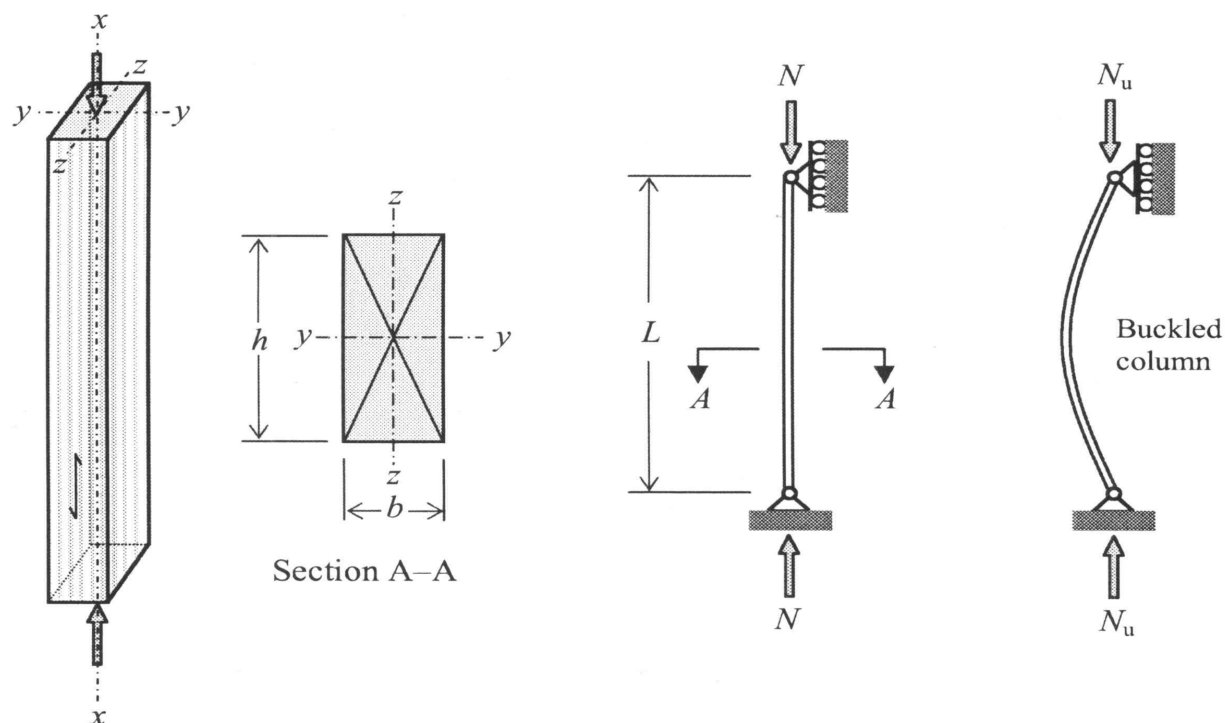
### 6.3.1 Postanowienia ogólne

- (1)P Przy określaniu naprężeń zginających należy uwzględnić zarówno wpływ obciążeń prostopadłych do osi pręta, jak i naprężenia wywołane jego krzywizną początkową oraz mimośrodami przypadkowymi.
- (2)P Przy sprawdzaniu wyboczenia i stateczności skrętnej słupów należy stosować właściwości charakterystyczne, np.  $E_{0,05}$ .
- (3) Stateczność słupów pracujących na ściskanie lub na ściskanie ze zginaniem należy sprawdzać zgodnie z 6.3.2.
- (4) Stateczność skrętną belek pracujących na zginanie lub na zginanie ze ściskaniem należy sprawdzać zgodnie z 6.3.3.

### 6.3.2 Słupy pracujące na ściskanie lub na ściskanie ze zginaniem

(1) Przyjmuje się następujące smukłości względne:

$$\lambda_{\text{rel},y} = \frac{\lambda_y}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.21)$$



*RYSUNEK UTRATY STATECZNOŚCI OGÓLNEJ (WYBOCZENIA) SŁUPA ŚCISKANEGO*

oraz

$$\lambda_{\text{rel},z} = \frac{\lambda_z}{\pi} \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (6.22)$$

gdzie:

$\lambda_y$  i  $\lambda_{\text{rel},y}$  – smukłości odpowiadające zginaniu względem osi y (przemieszczenia w kierunku osi z),

$\lambda_z$  i  $\lambda_{\text{rel},z}$  – smukłości odpowiadające zginaniu względem osi z (przemieszczenia w kierunku osi y),

$E_{0,05}$  – 5 % kwantyl modułu sprężystości wzdłuż włókien.

Smukłości przekroju prostokątnego:

$$\lambda_y = \frac{L_{e,y}}{i_y} = \frac{L_{e,y}}{h/\sqrt{12}} \quad \text{and} \quad \lambda_z = \frac{L_{e,z}}{i_z} = \frac{L_{e,z}}{b/\sqrt{12}}$$

Promienie bezwładności prostokąt  $b \times h$  wynoszą:  $i_y = 0,289 h$ ;  $i_z = 0,289 b$



(2) Jeżeli  $\lambda_{\text{rel},y} \leq 0,3$  i  $\lambda_{\text{rel},z} \leq 0,3$ , naprężenia powinny spełniać warunki (6.19) i (6.20) podane w 6.2.4.

(3) W pozostałych przypadkach naprężenia, zwiększone ze względu na odkształcenie elementu, powinny spełniać następujące warunki:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.23)$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (6.24)$$

gdzie:

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}} \quad (6.25)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (6.26)$$

$$k_y = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2 \right] \quad (6.27)$$

$$k_z = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] \quad (6.28)$$

gdzie:

$\beta_c$  – współczynnik dotyczący prostoliniowości elementów, której granice podano w Rozdziale 10.

$$\beta_c = \begin{cases} 0,2 & \text{dla drewna litego} \\ 0,1 & \text{dla drewna klejonego warstwowo i LVL} \end{cases} \quad (6.29)$$

$k_m$  – współczynnik określony w 6.1.6.

Strength class C24			Strength class C27			Strength class C30			Strength class C35		
$f_{c,0,k}$ 21 N/mm <sup>2</sup> $E_{0.05}$ 7400 N/mm <sup>2</sup>			$f_{c,0,k}$ 22 N/mm <sup>2</sup> $E_{0.05}$ 7700 N/mm <sup>2</sup>			$f_{c,0,k}$ 23 N/mm <sup>2</sup> $E_{0.05}$ 8000 N/mm <sup>2</sup>			$f_{c,0,k}$ 25 N/mm <sup>2</sup> $E_{0.05}$ 8700 N/mm <sup>2</sup>		
$\lambda$	$\lambda_{rel}$	$k_{c,y}(k_{c,z})$	$\lambda$	$\lambda_{rel}$	$k_{c,y}(k_{c,z})$	$\lambda$	$\lambda_{rel}$	$k_{c,y}(k_{c,z})$	$\lambda$	$\lambda_{rel}$	$k_{c,y}(k_{c,z})$
17.692	0.300	1.000	17.632	0.300	1.000	17.577	0.300	1.000	17.582	0.300	1.000
20	0.339	0.991	20	0.340	0.991	20	0.341	0.991	20	0.341	0.991
25	0.424	0.971	25	0.425	0.970	25	0.427	0.970	25	0.427	0.970
30	0.509	0.948	30	0.510	0.947	30	0.512	0.947	30	0.512	0.947
35	0.593	0.920	35	0.596	0.919	35	0.597	0.919	35	0.597	0.919
40	0.678	0.887	40	0.681	0.886	40	0.683	0.885	40	0.683	0.885
45	0.763	0.846	45	0.766	0.844	45	0.768	0.843	45	0.768	0.843
50	0.848	0.796	50	0.851	0.794	50	0.853	0.793	50	0.853	0.793
55	0.933	0.739	55	0.936	0.736	55	0.939	0.734	55	0.938	0.734
60	1.017	0.676	60	1.021	0.674	60	1.024	0.671	60	1.024	0.672
65	1.102	0.614	65	1.106	0.611	65	1.109	0.608	65	1.109	0.608
70	1.187	0.554	70	1.191	0.551	70	1.195	0.548	70	1.194	0.549
75	1.272	0.499	75	1.276	0.496	75	1.280	0.494	75	1.280	0.494
80	1.357	0.450	80	1.361	0.447	80	1.365	0.445	80	1.365	0.445
85	1.441	0.406	85	1.446	0.404	85	1.451	0.402	85	1.450	0.402
90	1.526	0.368	90	1.531	0.366	90	1.536	0.364	90	1.536	0.364
95	1.611	0.335	95	1.616	0.333	95	1.621	0.331	95	1.621	0.331
100	1.696	0.305	100	1.701	0.303	100	1.707	0.302	100	1.706	0.302
105	1.780	0.279	105	1.787	0.278	105	1.792	0.276	105	1.792	0.276
110	1.865	0.256	110	1.872	0.255	110	1.877	0.253	110	1.877	0.253
115	1.950	0.236	115	1.957	0.235	115	1.963	0.233	115	1.962	0.233
120	2.035	0.218	120	2.042	0.217	120	2.048	0.216	120	2.048	0.216
125	2.120	0.202	125	2.127	0.201	125	2.133	0.200	125	2.133	0.200
130	2.204	0.188	130	2.212	0.186	130	2.219	0.185	130	2.218	0.185
135	2.289	0.175	135	2.297	0.174	135	2.304	0.173	135	2.304	0.173
140	2.374	0.163	140	2.382	0.162	140	2.389	0.161	140	2.389	0.161
145	2.459	0.153	145	2.467	0.152	145	2.475	0.151	145	2.474	0.151
150	2.544	0.143	150	2.552	0.142	150	2.560	0.141	150	2.559	0.141
155	2.628	0.134	155	2.637	0.133	155	2.645	0.133	155	2.645	0.133
160	2.713	0.126	160	2.722	0.126	160	2.731	0.125	160	2.730	0.125
165	2.798	0.119	165	2.807	0.118	165	2.816	0.118	165	2.815	0.118
170	2.883	0.112	170	2.892	0.112	170	2.901	0.111	170	2.901	0.111
175	2.967	0.106	175	2.978	0.106	175	2.987	0.105	175	2.986	0.105
180	3.052	0.101	180	3.063	0.100	180	3.072	0.099	180	3.071	0.100

Wybrane wartości współczynnika  $k_{c,y}$  ( $k_{c,z}$ )

EUROKODY nie ograniczają smukłości prętów, należy się jednak kierować zaleceniami konstrukcyjnymi wynikającymi z wieloletnich doświadczeń. Racjonalne smukłości prętów nie powinny przekraczać wartości podanych poniżej:

Pręty jednolite – 150;

Pręty złożone z podatnymi łącznikami – 175;

Pręty wiatrownic i stężeń – 200.

Smukłość pręta kratownicy przy wyboczeniu z płaszczyzny kraty powinna być zbliżona do smukłości wyboczenia w płaszczyźnie.

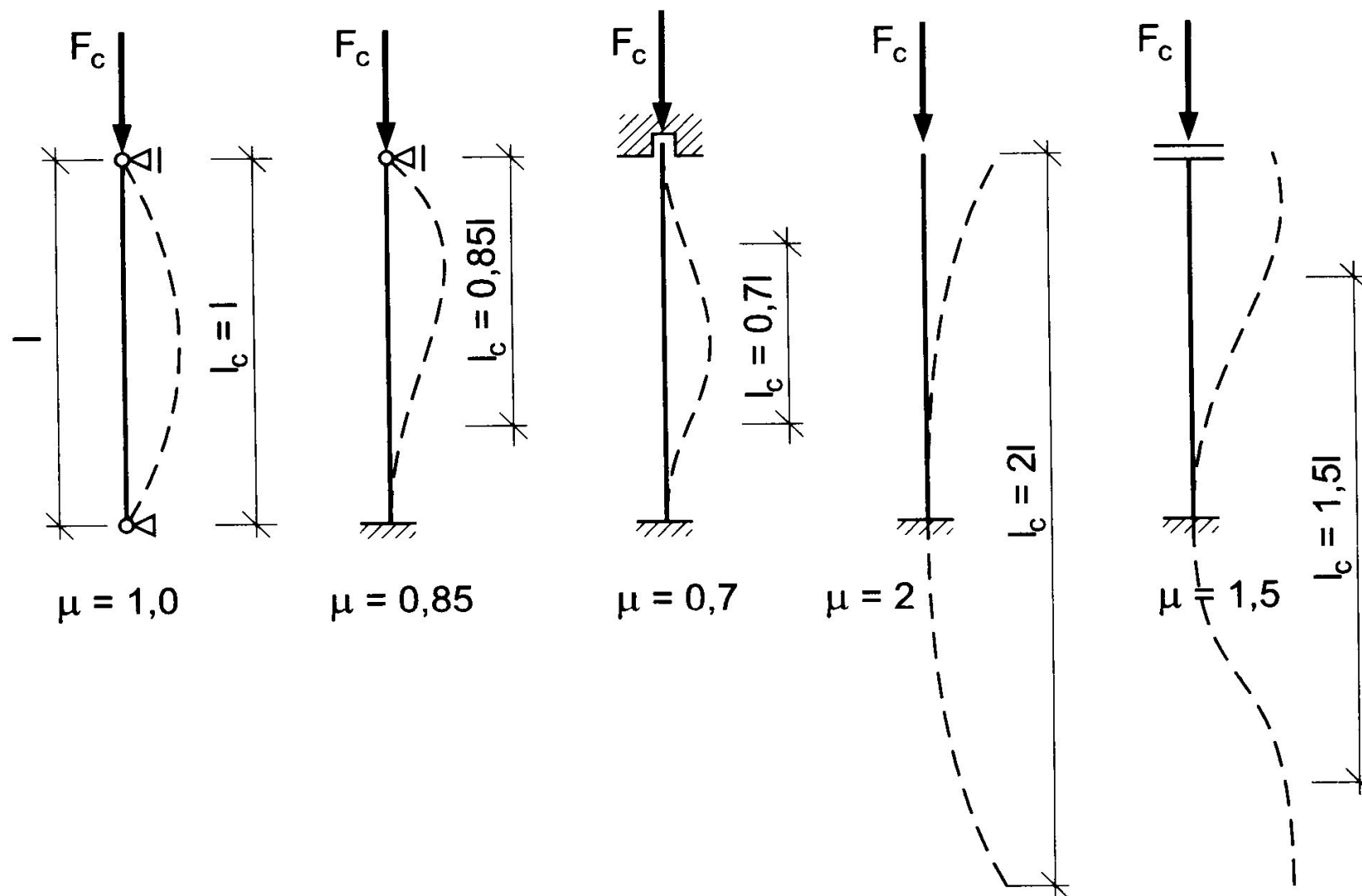
Długość wyboczeniową  $l_c$  elementów ściskanych należy obliczać, odpowiednio dla kierunku y i/lub z, ze wzoru:

$$l_c = l_{\text{eff}} = \mu l,$$

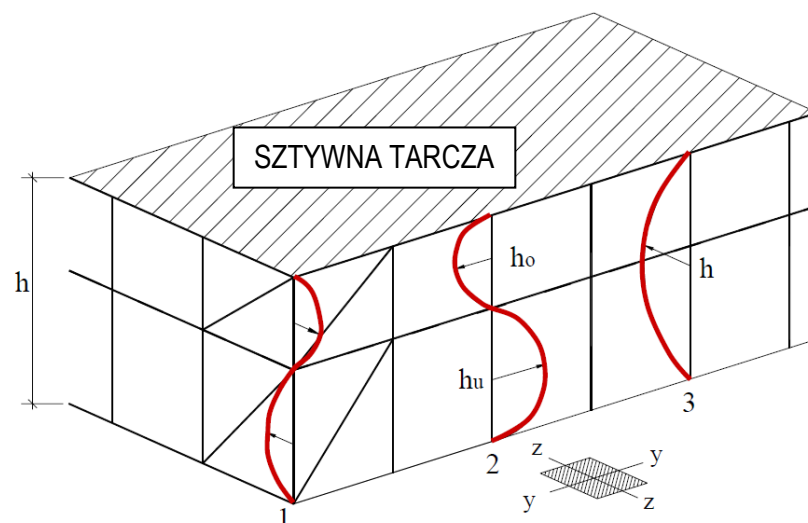
gdzie:

$\mu$  – współczynnik długości wyboczeniowej;

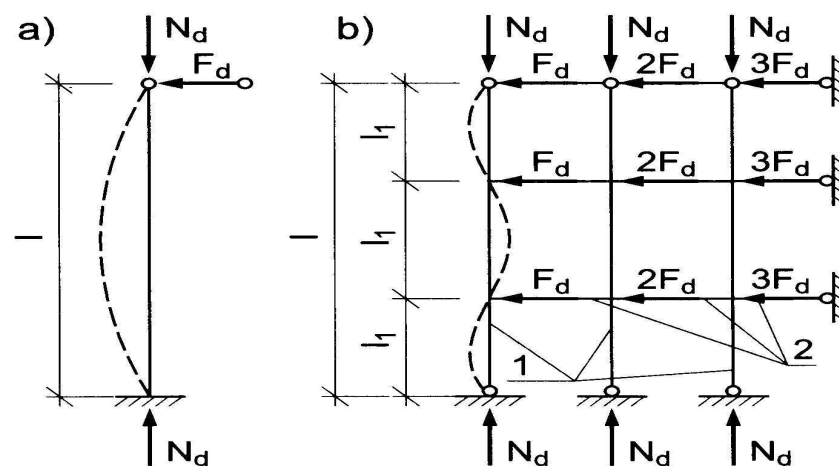
$l$  – obliczeniowa (teoretyczna) długość elementu = odległość między podparciami bocznymi elementu.



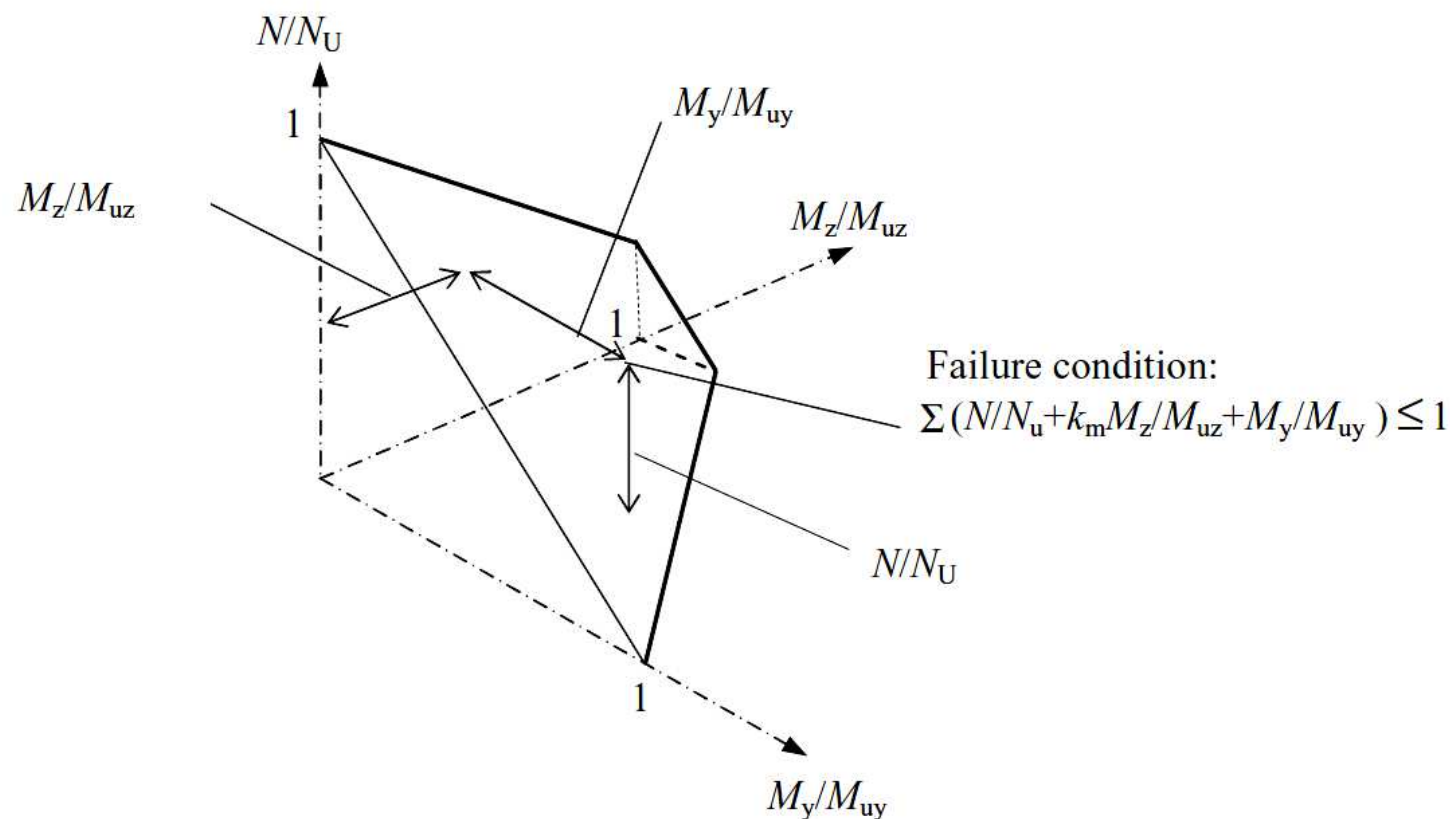
Ogólne zasady ustalania współczynnika długości wyboczeniowej – wartości współczynnika  $\mu$



## Różne długości wyboczeniowe $l_{c,y}$ i $l_{c,z}$



**Długość podlegająca wyboczeniu = rozstaw podparć bocznych**

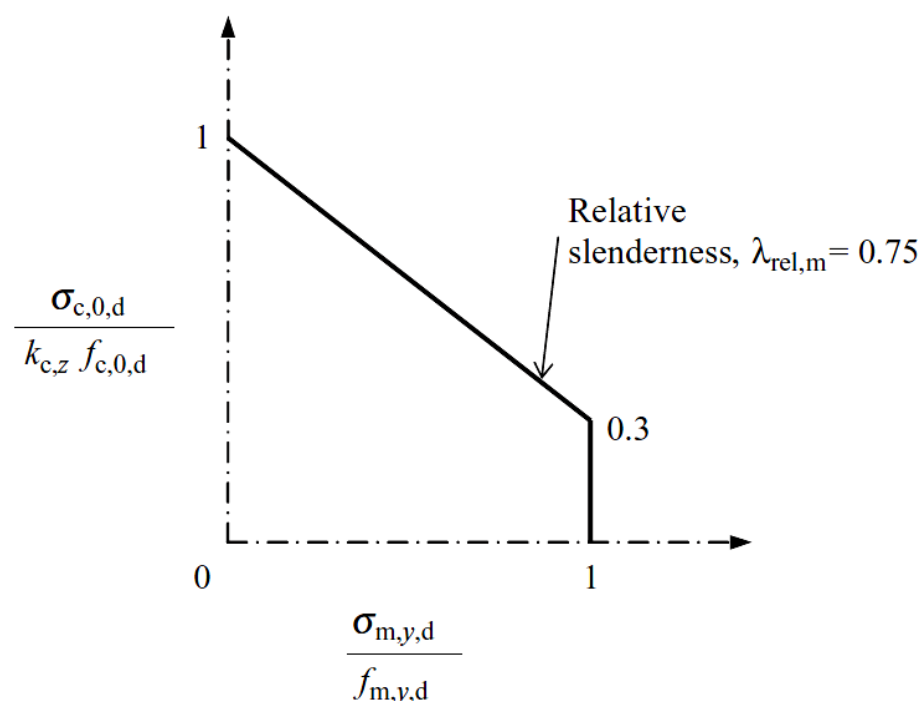


Interakcyjne zależność pomiędzy dwukierunkowym zginaniem a ściskaniem z wyboczeniem dla pręta o przekroju prostokątnym, współczynnik  $k_m$  dla osi  $z - z$ ;  $\lambda_{rel, y}$  lub  $\lambda_{rel, z} > 0,3$  – uwzględniona stateczność (wyboczenie) pręta

Sprawdzenie warunków nośności (wytrzymałości) pręta ściskanego osiowo z jednokierunkowym zginaniem bez możliwości zwichrzenia

W tym przypadku wzory (6.23) i (6.24) upraszczają się do następującej zależności

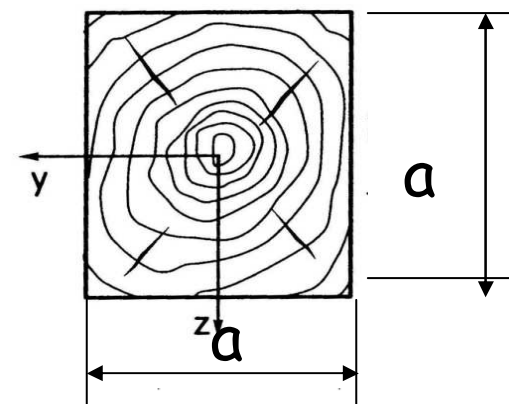
$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} \leq 1,0 \quad (6.24^*)$$



Interakcyjna zależność pomiędzy zginaniem względem osi y – y a ściskaniem z wyboczeniem dla pręta o przekroju prostokątnym, współczynnik  $k_{crit} = 1$  – brak zwichrzenia ( $\lambda_{rel, m} \leq 0,75$ )



*Nośność obliczeniowa na ściskanie  $N_d$   
 słupa o przekroju kwadratowym,  
 drewno klasy C24, klasa użytkowania 2,  
 klasa trwania obciążenia – obciążenie  
 średniotrwale*



a	A	$N_{d,max}$ w [kN] dla długości wyboczeniowej $l_c$ w [m]										
mm	mm <sup>2</sup>	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00
100	10000	72	50,4	36,4	27,4	21,3	17	13,9	11,5	9,7	8,3	7,2
120	14400	130	97,6	72,5	55,2	43,2	34,6	28,3	23,6	20	17,1	14,8
140	19600	202	164	127	98,7	78	62,9	51,6	43,1	36,6	31,4	27,2
160	25600	284	247	202	161	129	105	86,5	72,5	61,5	52,9	45,9
180	32400	375	340	293	243	199	163	136	114	97,1	83,6	72,7
200	40000	476	444	399	343	288	240	201	170	146	126	109
220	48400	587	557	514	459	397	337	286	244	209	181	158
240	57600	709	679	639	586	522	454	391	336	290	252	221
260	67600	841	812	773	723	660	588	515	448	390	340	299

### 6.3.3 Belki pracujące na zginanie lub na zginanie ze ściskaniem

(1) Stateczność przy zginaniu należy sprawdzić zarówno przy obciążeniu belki momentem  $M_y$  ( $y$  – oś przekroju, względem której sztywność belki ma największą wartość), jak i przy obciążeniu momentem  $M_y$  i siłą osiową  $N_c$ .

(2) Smukłość względną przy zginaniu należy określić ze wzoru

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit}}}} \quad (6.30)$$

gdzie:

$\sigma_{m,\text{crit}}$  – naprężenie krytyczne przy zginaniu, obliczone zgodnie z klasyczną teorią stateczności, z zastosowaniem 5 % kwantyli modułów sprężystości.

Naprężenie krytyczne przy zginaniu należy wyznaczyć ze wzoru

$$\sigma_{m,\text{crit}} = \frac{M_{y,\text{crit}}}{W_y} = \frac{\pi \sqrt{E_{0,05} I_z G_{0,05} I_{\text{tor}}}}{\ell_{\text{ef}} W_y} \quad (6.31)$$

gdzie:

$E_{0,05}$  – 5 % kwantyl modułu sprężystości wzdłuż włókien,

$G_{0,05}$  – 5 % kwantyl modułu odkształcenia postaciowego,

$I_z$  – moment bezwładności przekroju względem słabszej osi  $z$ ,

$I_{\text{tor}}$  – moment bezwładności przy skręcaniu,

$\ell_{\text{ef}}$  – efektywna długość belki zależna od warunków podparcia i układu obciążenia, zgodnie z Tablicą 6.1,

$W_y$  – wskaźnik wytrzymałości względem osi  $y$ .

W przypadku elementów z drewna iglastego o przekroju prostokątnym,  $\sigma_{\text{m,crit}}$  należy obliczać ze wzoru

$$\sigma_{\text{m,crit}} = \frac{0,78b^2}{h\ell_{\text{ef}}} E_{0,05} \quad (6.32)$$

gdzie:

$b$  – szerokość belki,

$h$  – wysokość belki,

Naprężenia krytyczne dla elementów zginanych o przekroju prostokątnym, wykonanych z drewna klejonego warstwowo lub LVL (fornir klejony warstwowo), można obliczać z następującej zależności:

$$\sigma_{\text{crit}} = \frac{\pi \cdot b^2}{h \cdot \ell_{\text{ef}}} \sqrt{E_{0,g,05} \cdot G_{0,g,05} \left(1 - 0,63 \cdot \frac{b}{h}\right)}$$

w której:

**$E_{0,g,05}$**  – 5% kwantyl modułu sprężystości wzdłuż włókien dla drewna klejonego warstwowo i LVL,

**$G_{0,g,05}$**  – 5% kwantyl modułu odkształcenia postaciowego dla drewna klejonego warstwowo i LVL.

Pozostałe oznaczenia jak we wcześniejszych wzorach.

**Tablica 6.1 – Długość efektywna określona w stosunku do długości rzeczywistej**

Rodzaj belki	Rodzaj obciążenia	$\ell_{ef} / \ell^*)$
Swobodnie podparta	Stały moment zginający	1,0
	Obciążenie równomiernie rozłożone	0,9
	Obciążenie skupione w środku rozpiętości	0,8
Wspornik	Obciążenie równomiernie rozłożone	0,5
	Siła skupiona na końcu wspornika	0,8
*) Wartości stosunku długości efektywnej $\ell_{ef}$ do długości rzeczywistej $\ell$ dotyczą belek podpartych w sposób ograniczający możliwość skręcania i obciążonych w osi środkowej belki. W przypadku obciążeń przyłożonych do górnej powierzchni belki, obliczoną wartość $\ell_{ef}$ należy zwiększyć o $2h$ , a w przypadku obciążeń przyłożonych do dolnej powierzchni belki – można zmniejszyć o $0,5h$ , gdzie $h$ – wysokość belki.		

(3) W przypadku, gdy belka jest obciążona wyłącznie momentem  $M_y$  ( $y$  – oś przekroju, względem której sztywność belki ma największą wartość), naprężenia powinny spełniać następujący warunek:

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \quad (6.33)$$

gdzie:

$\sigma_{m,d}$  – obliczeniowe naprężenie zginające,

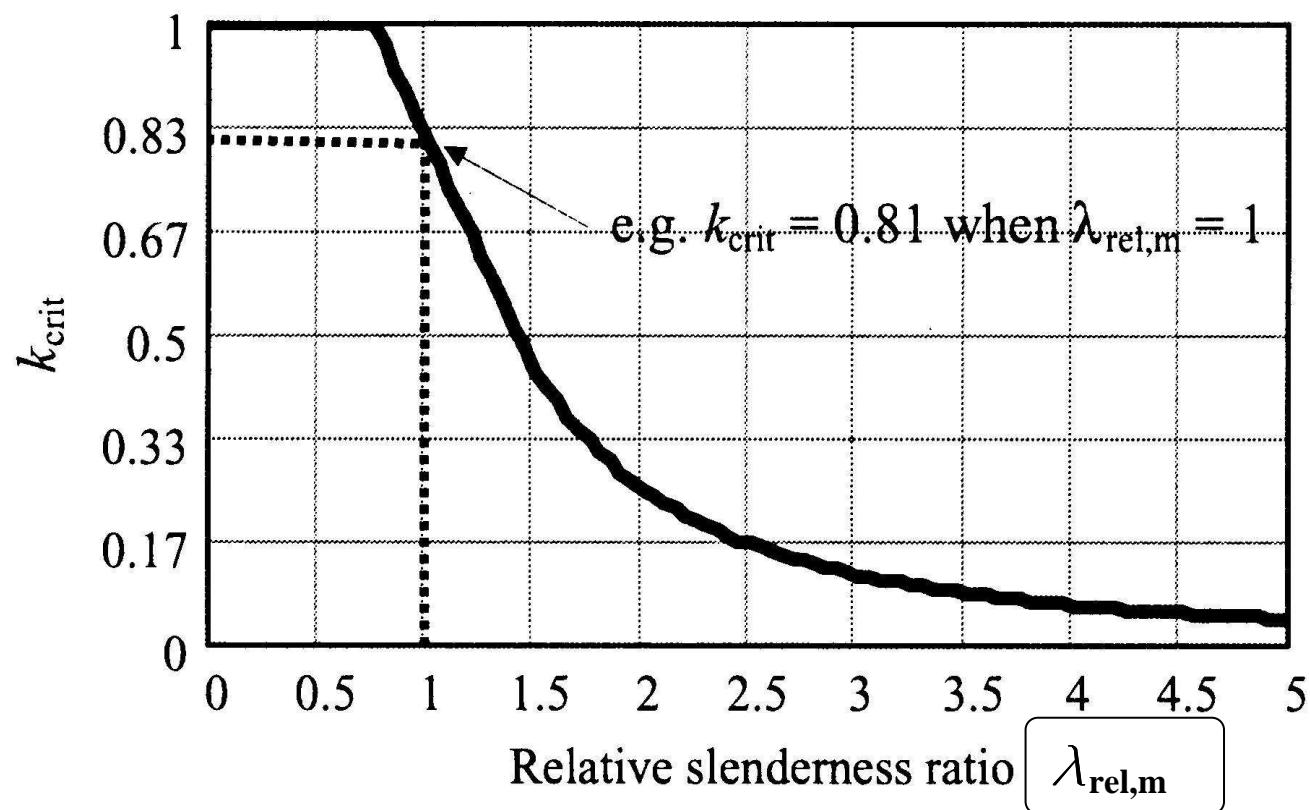
$f_{m,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na zginanie,

$k_{crit}$  – współczynnik uwzględniający redukcję wytrzymałości ze względu na zwichrowanie elementu.

(4) W przypadku belek, w których odchylenie od prostoliniowości zawiera się w granicach określonych w Rozdziale 10,  $k_{\text{crit}}$  można określić ze wzorów (6.28):

$$k_{\text{crit},m} = \begin{cases} 1 & \text{dla } \lambda_{\text{rel},m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75\lambda_{\text{rel},m} & \text{dla } 0,75 < \lambda_{\text{rel},m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{\text{rel},m}^2} & \text{dla } \lambda_{\text{rel},m} > 1,4 \end{cases} \quad (6.34)$$

(5) Współczynnik  $k_{\text{crit}}=1,0$  można przyjmować w przypadku belek, które w strefie ściskanej są zabezpieczone na całej swej długości – przed przemieszczeniami bocznymi, a na podporach przed obrotem wskutek skręcania.

Wykres wartości współczynnika  $k_{crit}$



Strength class		C14	C16	C18	C20	C22	C24
Characteristic bending strength (N/mm <sup>2</sup> )		14	16	18	20	22	24
Relative slenderness ratio for bending, $\lambda_{rel,m}$	Value of $k_{crit}$	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$k_{crit} \times f_{m,k}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Up to 0.75	1.0	14	16	18	20	22	24
0.8	0.960	13.440	15.360	17.280	19.200	21.120	23.040
0.85	0.923	12.915	14.760	16.605	18.45	20.295	22.140
0.9	0.885	12.390	14.160	15.930	17.700	19.470	21.240
0.95	0.848	11.865	13.560	15.255	16.950	18.645	20.340
1.0	0.810	11.340	12.960	14.580	16.200	17.820	19.440
1.1	0.735	10.290	11.760	13.230	14.700	16.170	17.640
1.2	0.660	9.240	10.560	11.880	13.200	14.520	15.840
1.3	0.585	8.190	9.360	10.530	11.700	12.870	14.040
1.4	0.510	7.140	8.160	9.180	10.200	11.220	12.240
1.5	0.444	6.222	7.111	8.000	8.889	9.778	10.667
1.6	0.391	5.469	6.250	7.031	7.813	8.594	9.375
1.7	0.346	4.844	5.536	6.228	6.920	7.612	8.304
1.8	0.309	4.321	4.938	5.556	6.173	6.790	7.407
1.9	0.277	3.878	4.432	4.986	5.540	6.094	6.648
2.0	0.250	3.500	4.000	4.500	5.000	5.500	6.000
2.1	0.227	3.175	3.628	4.082	4.535	4.989	5.442
2.2	0.207	2.893	3.306	3.719	4.132	4.545	4.959
2.3	0.189	2.647	3.025	3.403	3.781	4.159	4.537
2.4	0.174	2.431	2.778	3.125	3.472	3.819	4.167
2.5	0.160	2.240	2.560	2.880	3.200	3.520	3.840
2.6	0.148	2.071	2.367	2.663	2.959	3.254	3.550
2.7	0.137	1.920	2.195	2.469	2.743	3.018	3.292
2.8	0.128	1.786	2.041	2.296	2.551	2.806	3.061
2.9	0.119	1.665	1.902	2.140	2.378	2.616	2.854
3.0	0.111	1.556	1.778	2.000	2.222	2.444	2.667

Wartość wsp.  $k_{crit}$  oraz  $k_{crit} \cdot f_{m,k}$  dla wybranych klas drewna

## Wytrzymałość obliczeniowa drewna przy zginaniu ukośnym

$$f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{k_{h,y} \cdot k_{sys} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M} \qquad f_{m,z,d} = k_{mod} \frac{k_{h,z} \cdot k_{sys} \cdot f_{m,k}}{\gamma_M}$$

Wytrzymałość obliczeniowa elementu z uwzględnieniem utraty stateczności ogólnej zwichrzenia

$$k_{crit} f_{m,y,d} = k_{mod} \frac{k_{h,y} \cdot k_{sys}}{\gamma_M} (k_{crit} \cdot f_{mk})$$

Wartość współczynnika  $k_{crit}$  według powyższej tablicy, a w obliczeniach wytrzymałościowych najlepiej posługiwać się iloczynem  $k_{crit} \cdot f_{m,k}$

ANALIZA ZWICHRZENIA ELEMENTÓW ZGINANYCH - PRZEKRÓJ PROSTOKĄTNY b x h												
klasa	f_mk	E_005	I_ef=n x h	(h/b)^2	h/b_max		klasa	f_mk	E_005	I_ef=n x h	(h/b)^2	h/b_max
C27	27	7700	30	4,1708333	2,0		C22	22	6700	30	4,453977	2,1
	27	7700	25	5,005	2,2			22	6700	25	5,344773	2,3
	27	7700	20	6,25625	2,5			22	6700	20	6,680966	2,6
	27	7700	15	8,3416667	2,9			22	6700	15	8,907955	3,0
	27	7700	10	12,5125	3,5			22	6700	10	13,36193	3,7
	27	7700	7,5	16,683333	4,1			22	6700	7,5	17,81591	4,2
	27	7700	5	25,025	5,0			22	6700	5	26,72386	5,2
klasa	f_mk	E_005	I_ef=n x h	(h/b)^2	h/b_max		klasa	f_mk	E_005	I_ef=n x h	(h/b)^2	h/b_max
C24	24	7400	30	4,509375	2,1		C18	18	6000	30	4,875	2,2
	24	7400	25	5,41125	2,3			18	6000	25	5,85	2,4
	24	7400	20	6,7640625	2,6			18	6000	20	7,3125	2,7
	24	7400	15	9,01875	3,0			18	6000	15	9,75	3,1
	24	7400	10	9,01875	3,7			18	6000	10	14,625	3,8
	24	7400	7,5	13,528125	5,2			18	6000	7,5	19,5	4,4
	24	7400	5	27,05625	5,2			18	6000	5	29,25	5,4

Realne zagrożenie zwichrzeniem elementu o przekroju prostokątnym przy proporcji wymiarów  $h/b > 3$  (4)

(6) W przypadku obciążenia momentem zginającym  $M_y$  ( $y$  – oś przekroju, względem której sztywność belki ma największą wartość) oraz ściskającą siłą osiową  $N_c$ , naprężenia powinny spełniać następujący warunek:

$$\left( \frac{\sigma_{m,d}}{k_{crit} f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0d}}{k_{c,z} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (6.35)$$

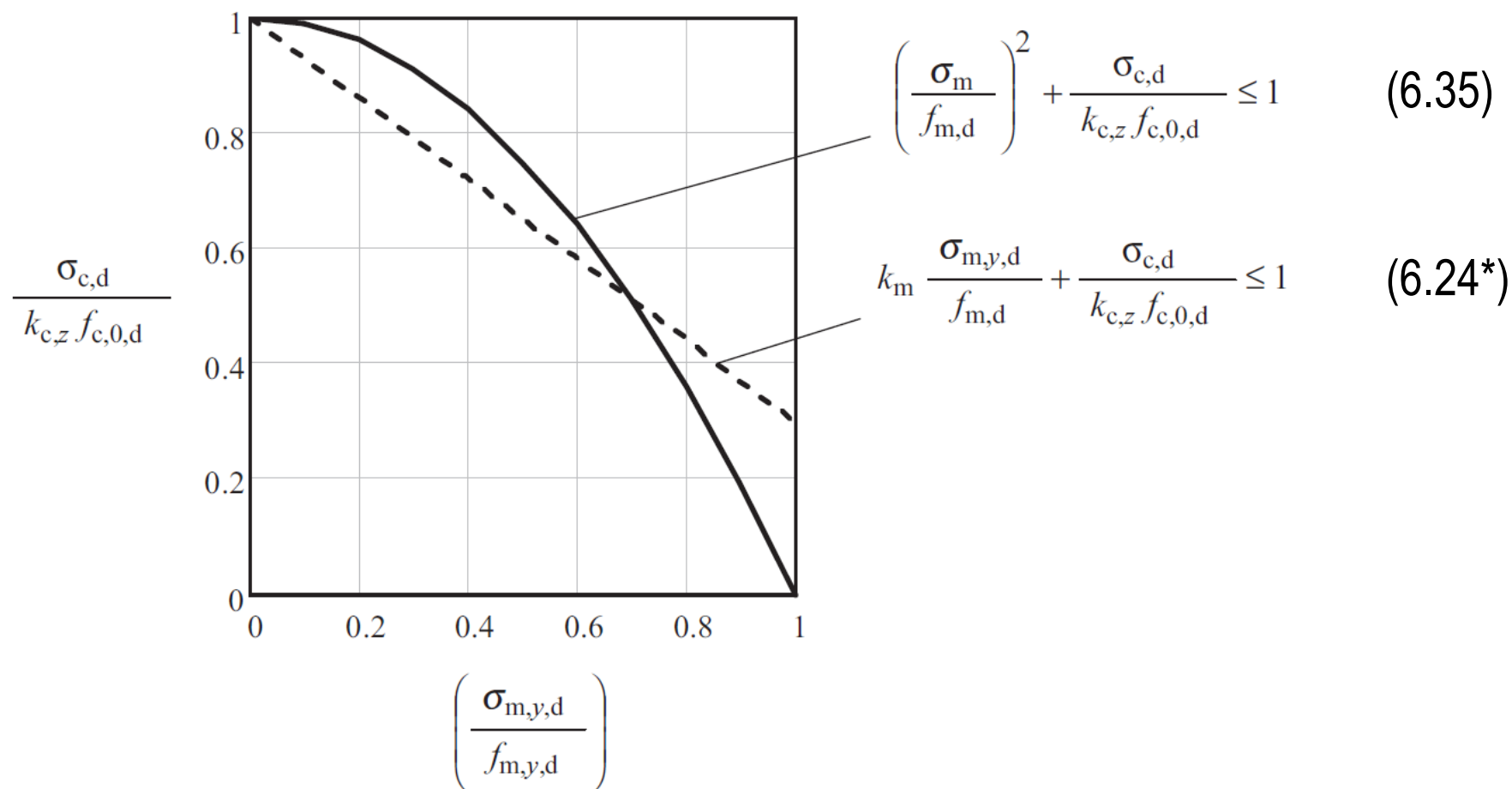
gdzie:

$\sigma_{m,d}$  – obliczeniowe naprężenie zginające,

$\sigma_{c,0,d}$  – obliczeniowe naprężenie ściskające wzdłuż włókien;

$f_{c,0,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ściskanie wzdłuż włókien,

$k_{c,z}$  – współczynnik wyznaczany z wzoru (6.26).

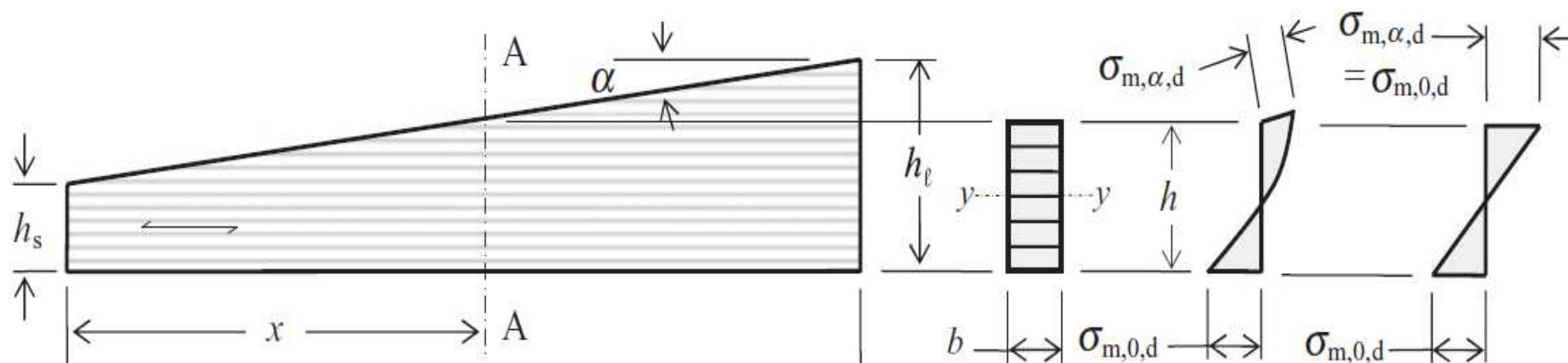


Graficzne porównanie worów (6.24\*) przy braku zwichrzenia ( $k_{crit} = 1,0$ ) i wzoru (6.35)

# OBLICZANIE ELEMENTÓW O PRZĘKROJU ZMIENNEM ORAZ ELEMENTÓW ZAKRZYWIONYCH

## 6.4.2. Dźwigary trapezowe

(1)P Należy uwzględnić wpływ zmiany wielkości przekroju na naprężenia normalne.



Rysunek 6.8 – Dźwigar trapezowy

(2) Obliczeniowe naprężenia zginające  $\sigma_{m,\alpha,d}$  i  $\sigma_{m,0,d}$  (patrz Rysunek 6.5) można określać ze wzoru

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = \frac{6M_d}{bh^2} \quad (6.37)$$

Naprężenia krawędziowe na boku nachylonym powinny spełniać warunek

$$\sigma_{m,\alpha,d} \leq k_{m,\alpha} f_{m,d} \quad (6.38)$$

gdzie:

$\sigma_{m,\alpha,d}$  – obliczeniowe naprężenie zginające pod kątem do włókien

$f_{m,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na zginanie.

Współczynnik  $k_{m,\alpha}$  należy określać w sposób następujący:

– gdy krawędź nachylona jest rozciągana:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{m,d}}{0,75f_{v,d}} \tan \alpha \right)^2 + \left( \frac{f_{m,d}}{f_{t,90,d}} \tan^2 \alpha \right)^2}} \quad (6.39)$$

– gdy krawędź nachylona jest ściskana:

$$k_{m,\alpha} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{f_{m,d}}{1,5f_{v,d}} \tan \alpha \right)^2 + \left( \frac{f_{m,d}}{f_{c,90,d}} \tan^2 \alpha \right)^2}} \quad (6.40)$$

**6.4.3 Dźwigary dwutrapezowe, dźwigary o osi zakrzywionej o stałym i zmiennym przekroju**

(1) Niniejszy rozdział dotyczy wyłącznie drewna klejonego warstwowo oraz LVL.

(2) Wymagania podane w 6.4.2 odnoszą się do części dźwigarów o stałym nachyleniu.

(3) W strefie kalenicy (patrz Rysunek 6.9) naprężenia zginające powinny spełniać następujący warunek:

$$\sigma_{m,d} \leq k_r f_{m,d} \quad (6.41)$$

gdzie

$k_r$  – współczynnik uwzględniający zmniejszenie wytrzymałości wskutek wygięcia warstw drewna w czasie produkcji.

UWAGA: W dźwigarach o osi zakrzywionej i zmiennym przekroju, strefa kalenicowa obejmuje całą zakrzywioną część dźwigara.

(4) Naprężenia normalne w kalenicy należy obliczać w sposób następujący:

$$\sigma_{m,d} = k_\ell \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} \quad (6.42)$$

gdzie:

$$k_\ell = k_1 + k_2 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + k_3 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2 + k_4 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^3 \quad (6.43)$$



$$k_1 = 1 + 1,4 \tan \alpha_{ap} + 5,4 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (6.44)$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \tan \alpha_{ap} \quad (6.45)$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \tan \alpha_{ap} - 7,8 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (6.46)$$

$$k_4 = 6 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (6.47)$$

$$r = r_{in} + 0,5 h_{ap} \quad (6.48)$$

gdzie:

$M_{ap,d}$  – obliczeniowy moment zginający w kalenicy,

$h_{ap}$  – wysokość dźwigara w kalenicy, określona na Rysunku 6.9,

$b$  – szerokość dźwigara,

$r_{in}$  – promień krzywizny wewnętrznej krawędzi dźwigara, określony na Rysunku 6.9,

$\alpha_{ap}$  – kąt nachylenia dźwigara w środku strefy kalenicowej, określony na Rysunku 6.9.

(5) W przypadku dźwigarów dwutrapezowych  $k_r = 1,0$ . W przypadku dźwigarów zakrzywionych o stałym i zmiennym przekroju, współczynnik  $k_r$  należy obliczać w sposób następujący:

$$k_r = \begin{cases} 1 & \text{dla } \frac{r_{in}}{t} \geq 240 \\ 0,76 + 0,001 \frac{r_{in}}{t} & \text{dla } \frac{r_{in}}{t} < 240 \end{cases} \quad (6.49)$$

gdzie:

$r_{in}$  – promień krzywizny wewnętrznej krawędzi dźwigara, określony na Rysunku 6.6,

$t$  – grubość warstw.

(6) w strefie kalenicowej, maksymalne naprężenia rozciągające w poprzek włókien  $\sigma_{t,90,d}$  powinny spełniać warunek

$$\sigma_{t,90,d} \leq k_{dis} k_{vol} f_{t,90,d} \quad (6.50)$$

gdzie:

$$k_{vol} = \begin{cases} 1 & \text{dla drewna litego} \\ \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0,2} & \text{dla drewna klejonego warstwowo oraz LVL, w którym włókna wszystkich} \\ & \text{warstw forniru są równoległe do osi dźwigara} \end{cases} \quad (6.51)$$

$$k_{dis} = \begin{cases} 1,4 & \text{dla dźwigarów dwutrapezowych i dźwigarów zakrzywionych o stałym przekroju} \\ 1,7 & \text{dla dźwigarów zakrzywionych o zmiennym przekroju} \end{cases} \quad (6.52)$$

gdzie:

$k_{dis}$  – współczynnik uwzględniający wpływ rozkładu naprężeń w strefie kalenicowej,

$k_{vol}$  – współczynnik objętościowy,

$f_{t,90,d}$  – wytrzymałość obliczeniowa na rozciąganie w poprzek włókien,

$V_o$  – objętość odniesienia równa  $0,01 \text{ m}^3$ ,

$V$  – objętość strefy kalenicowej (Rysunek 6.9), w  $\text{m}^3$ . Należy przyjmować  $V \leq \frac{2}{3}V_b$ ,

gdzie

$V_b$  – całkowita objętość dźwigara.

(7) W przypadku jednoczesnego rozciągania w poprzek włókien i ścinania należy spełnić warunek:

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} + \frac{\sigma_{t,90,d}}{k_{dis} \cdot k_{vol} \cdot f_{t,90,d}} \leq 1 \quad (6.53)$$

gdzie:

$\tau_d$  – obliczeniowe naprężenie ścinające,

$f_{v,d}$  – obliczeniowa wytrzymałość na ścinanie,

$\sigma_{t,90,d}$  – obliczeniowe naprężenie rozciągające w poprzek włókien,

$k_{dis}$  i  $k_{vol}$  – współczynniki podane w (6).

(8) Maksymalne naprężenia rozciągające w poprzek włókien, wywołane momentem zginającym należy obliczyć ze wzoru:

$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} \quad (6.54)$$

lub z alternatywnego wzoru:

~~$$\sigma_{t,90,d} = k_p \frac{6M_{ap,d}}{bh_{ap}^2} - 0,6 \frac{p_d}{b} \quad (6.55)$$~~

gdzie:

$p_d$  – obciążenie równomiernie rozłożone, przyłożone do górnej powierzchni dźwigara, w strefie kalenicowej;

$b$  – szerokość dźwigara;

$M_{ap,d}$  – obliczeniowy moment zginający w kalenicy, wprowadzony do obliczenia normalnych naprężeń rozciągających na wewnętrznej zakrzywionej krawędzi dźwigara;

oraz

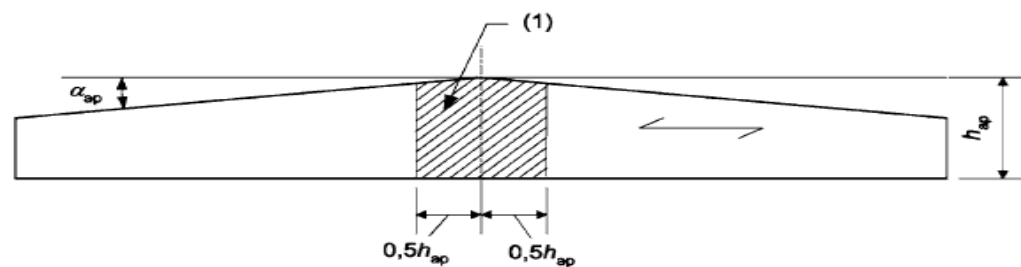
$$k_p = k_5 + k_6 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right) + k_7 \left( \frac{h_{ap}}{r} \right)^2 \quad (6.56)$$

$$k_5 = 0,2 \tan \alpha_{ap} \quad (6.57)$$

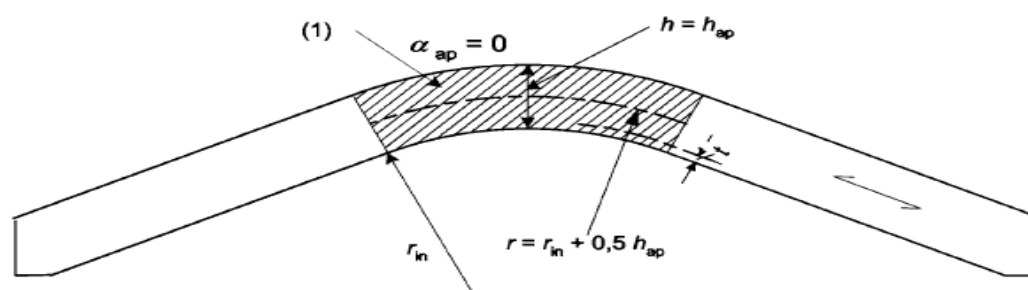
$$k_6 = 0,25 - 1,5 \tan \alpha_{ap} + 2,6 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (6.58)$$

$$k_7 = 2,1 \tan \alpha_{ap} - 4 \tan^2 \alpha_{ap} \quad (6.59)$$

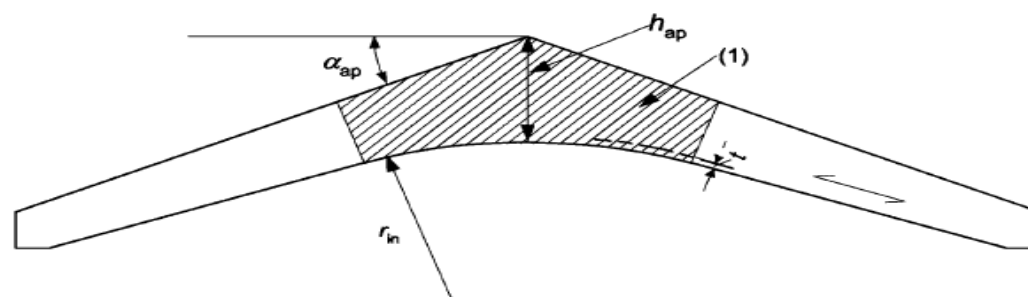
UWAGA: Zaleca się stosowanie Wzoru (6.54). Informację na temat wyboru między Wzorami (6.54) i (6.55) można zamieścić w załączniku krajowym.



(a)



(b)



(c)

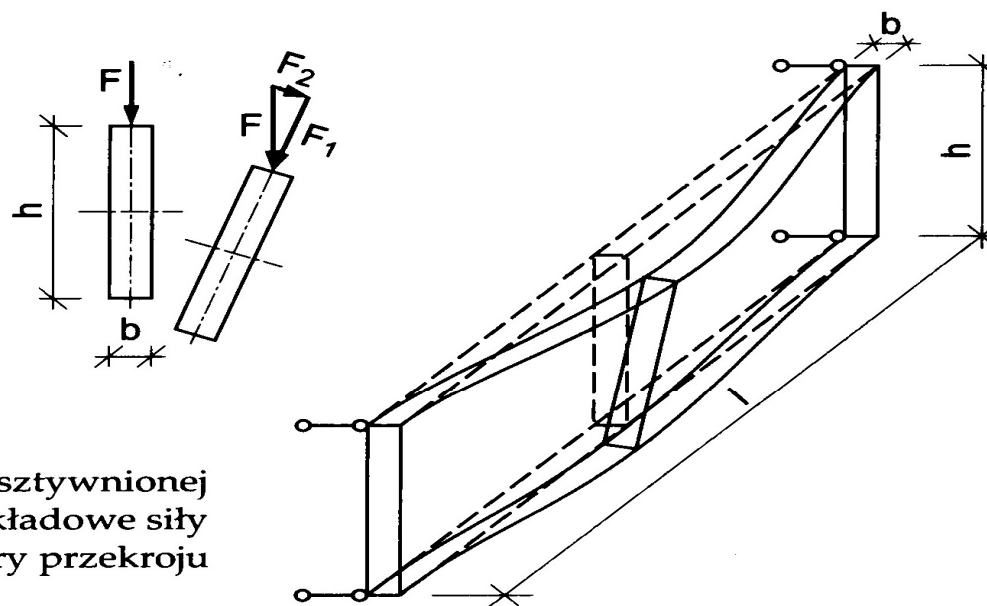
Objaśnienia  
 (1) Strefa kalenicowa

UWAGA: W dźwigarach zakrzywionych o stałym i zmiennym przekroju, strefa kalenicowa sięga do prostoliniowej części dźwigara

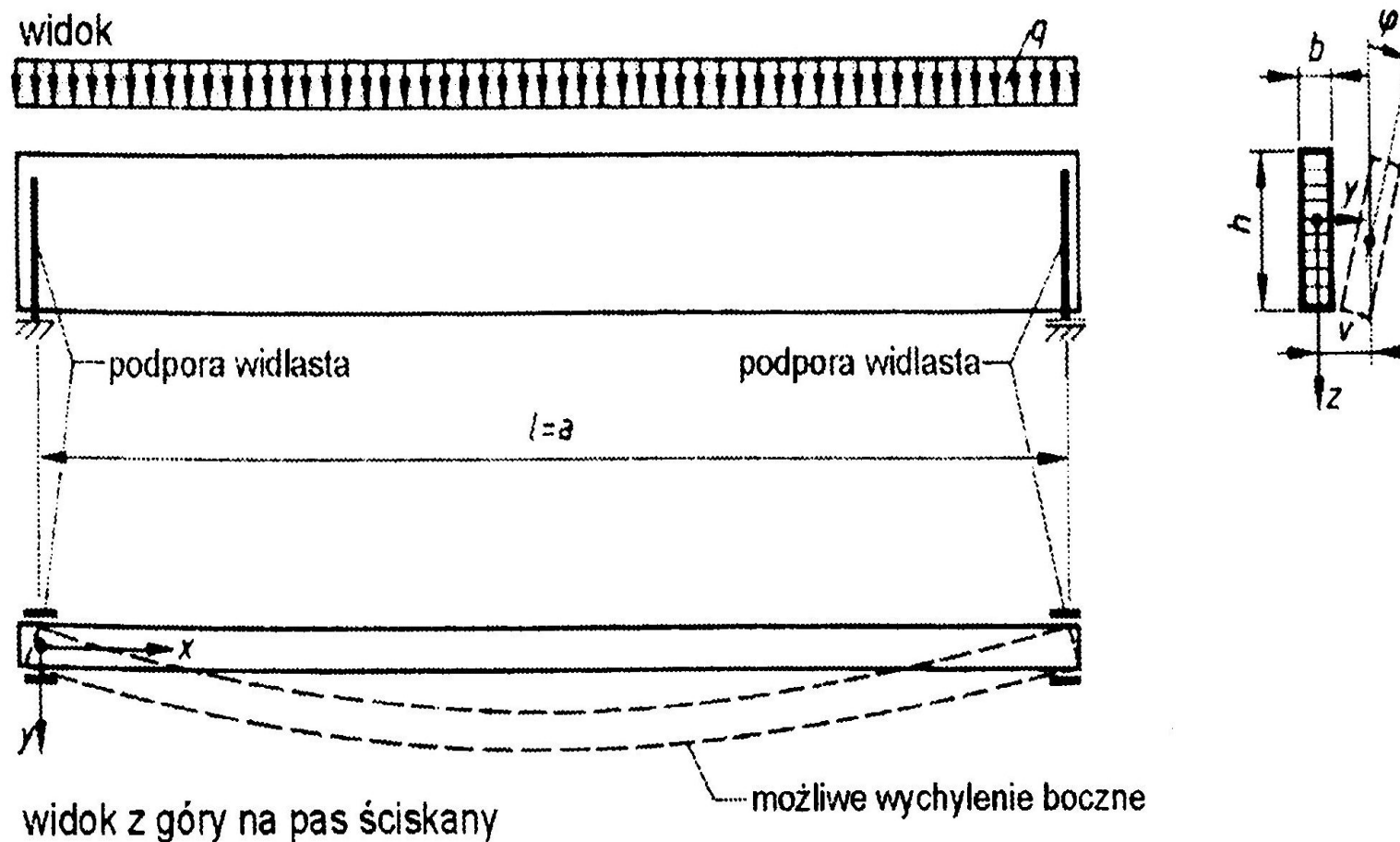
Rysunek 6.9 – Dźwigar dwutrapezowy (a), dźwigar zakrzywiony o stałym przekroju (b), o zmiennym przekroju (c) i włóknach równoległych do dolnej krawędzi dźwigara

## Stężenia belek stropowych i stropodachowych

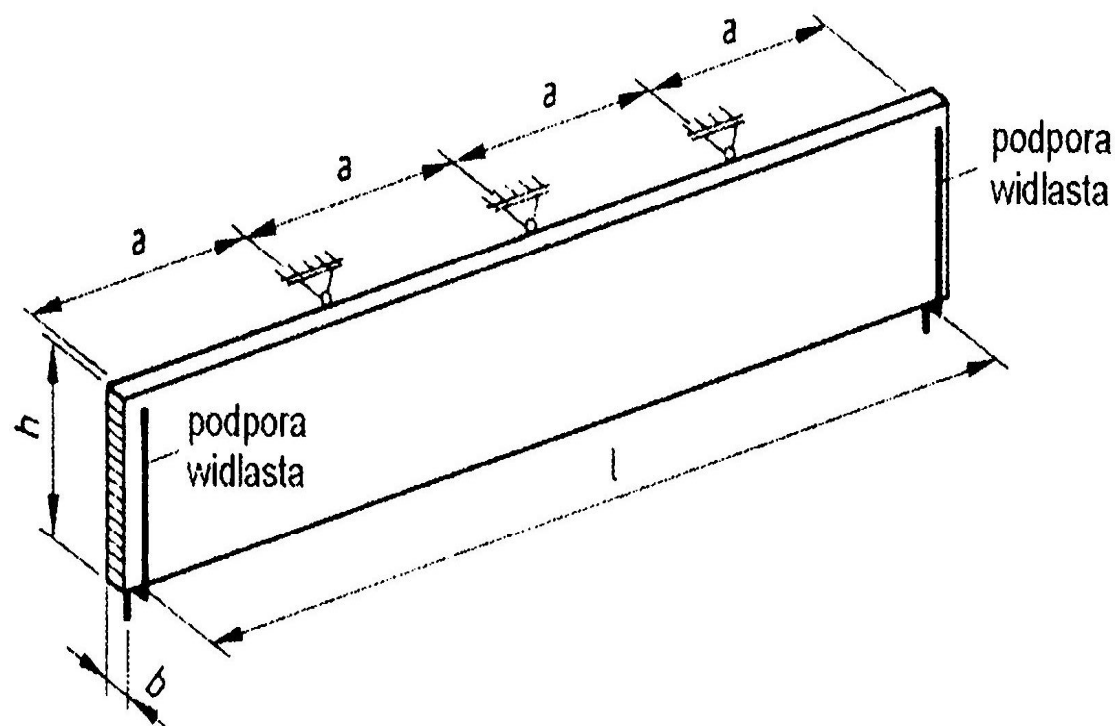
Belki drewniane stropów poddanych dużym obciążeniom mogą utracić stateczność nad podporami, a w przypadku usztywnienia podpór również w przęśle (rys. 11.17). Dotyczy to szczególnie belek o przekroju prostokątnym i dużej smukłości ( $h/b > 4$ ) oraz belek teowych ze średnikiem małej grubości. Jeśli nie jest możliwe zwiększenie wymiarów belki nad podporami, należy przewidzieć stężenia pionowe w postaci elementów sztywnych lub taśmy stalowej (rys. 11.18). Stężenie takie powinno być również wykonane w połowie rozpiętości belki. W stropach o małej rozpiętości funkcję stężeń może spełniać deskowanie przybite do górnej i dolnej płaszczyzny belek stropowych.



**Rysunek 11.17.** Utrata stateczności belki usztywnionej na podporach:  $F$  – siła obciążająca,  $F_1$ ,  $F_2$  – składowe siły  $F$  w chwili utraty stateczności,  $b$ ,  $h$  – wymiary przekroju belki,  $l$  – rozpiętość belki



Zginany dźwigar jednoprzęsłowy o prostokątnym przekroju poprzecznym  $b/h$ , podparty w sposób widlasty na obu końcach; rozstaw usztywnień  $a$ , który w tym przypadku odpowiada rozpiętości  $l$ ; pokazano możliwe wychylenie boczne (utrata stateczności)



Rys. 13.12

Usztywnienie strefy ściskanej jedno-przęsłowego dźwigara zginanego o przekroju poprzecznym prostokątnym przez umieszczenie kilku poziomych stężeń na górnej krawędzi strefy ściskanej dających rozstawy usztywnień  $a$  (schemat)



Siłę stabilizującą  $F_d$  w ściskanej strefie belki o przekroju prostokątnym należy obliczać ze wzorów (11.5) i (11.6), przyjmując

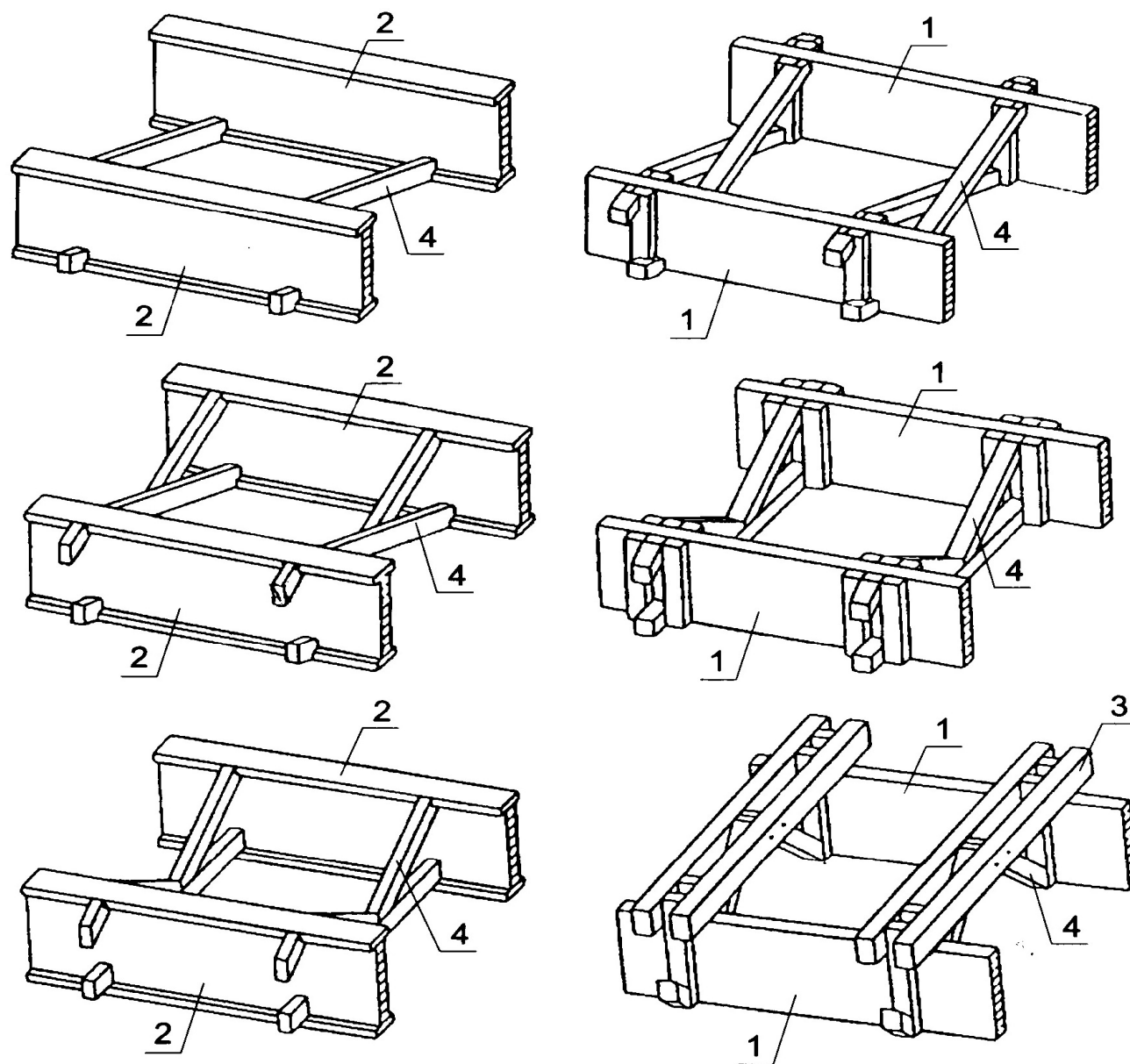
$$N_d = (1 - k_{crit}) \frac{M_d}{h} \quad (11.9)$$

gdzie:

$M_d$  — maksymalna wartość momentu zginającego w belce, N·mm,

$h$  — wysokość belki, mm,

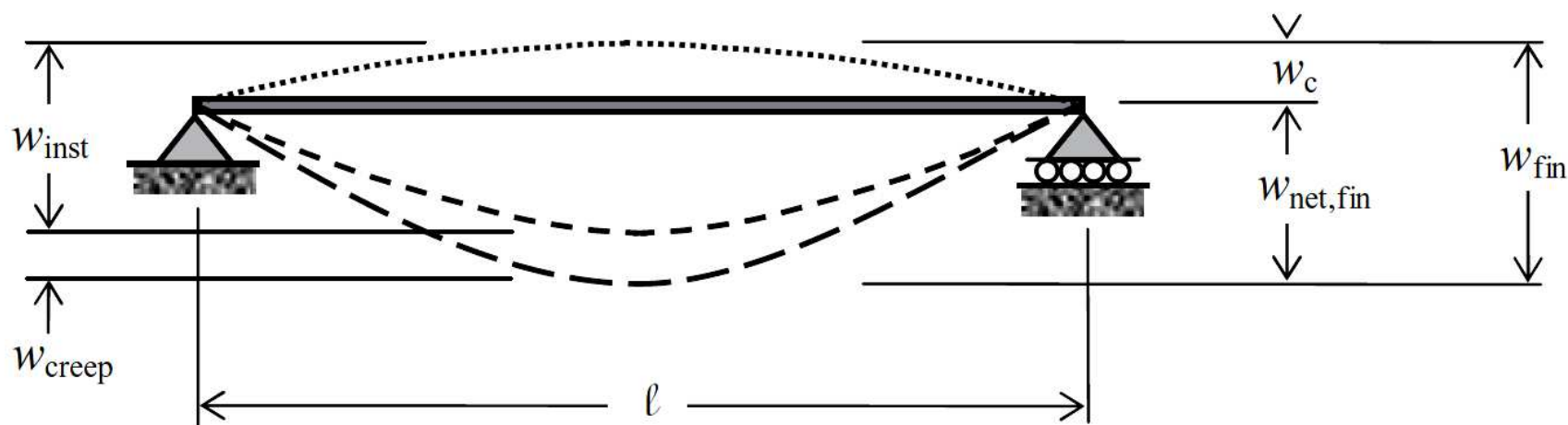
$k_{crit}$  — współczynnik stateczności giętnej (patrz p. 6.1).



## ***STAN GRANICZNY UŻYTKOWAŁNOŚCI***

(2) Ugięcie końcowe  $w_{net,fin}$  poniżej prostej łączącej punkty podparcia belki należy określać ze wzoru:

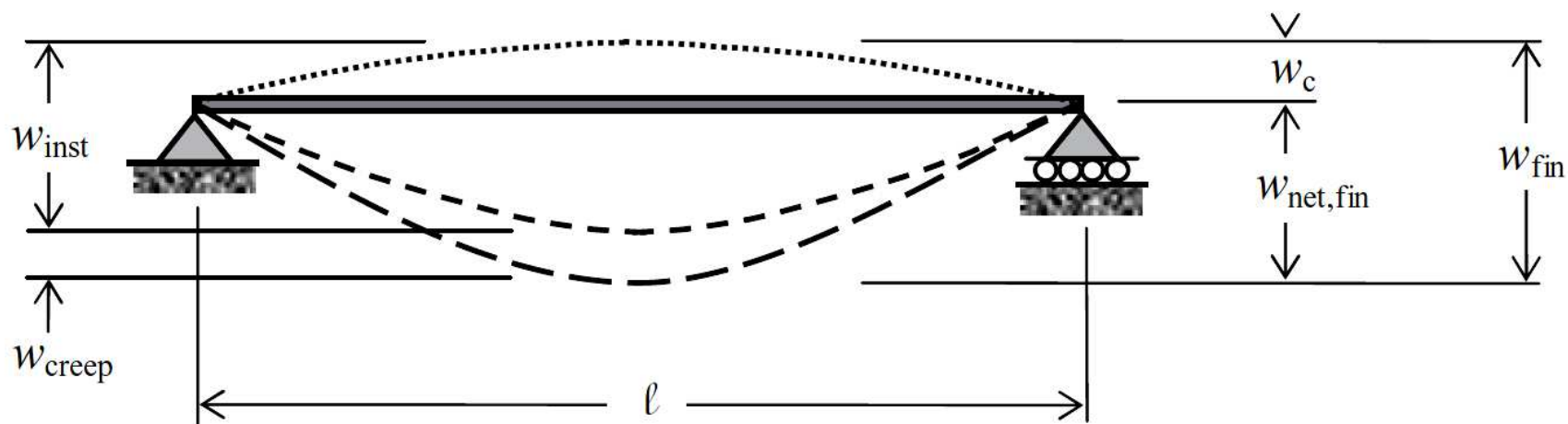
$$w_{net,fin} = w_{inst} + w_{creep} - w_c = w_{fin} - w_c \quad (7.2)$$



***Rysunek 7.1 – składowe ugięcia***

(1) Składowe ugięcia wynikające z kombinacji oddziaływań (p. 2.2.3(5)), przedstawione na rysunku 7.1, definiuje się następująco:

- $w_c$  – strzałka odwrotna (jeżeli występuje),
- $w_{inst}$  – ugięcie chwilowe,
- $w_{creep}$  – ugięcie wywołane pełzaniem,
- $w_{fin}$  – ugięcie końcowe,
- $w_{net,fin}$  – końcowe ugięcie wynikowe.



**Rysunek 7.1 – Składowe ugięcia**

## UGIĘCIA GRANICZNE WEDŁUG ZAŁĄCZNIKA KRAJOWEGO

Wartości graniczne ugięć elementów konstrukcji (wg NA3 w PN-EN 1995-1)

Elementy konstrukcyjne	$w_{lin}$
Dźwigart kratowe:	
obliczenia przybliżone	$l/500$
obliczenia dokładne	$l/300$
Belki stropowe	$l/250$
Belki w stropach wrażliwych na ugięcia	$l/300$
Płyty dachowe	$l/150$
Elementy belkowe więźby dachowej	$l/200$
Wsporniki	$l/150$
W obiektach starych, remontowanych, dopuszcza się zwiększenie podanych wartości granicznych ugięć o 50%	

Przy sprawdzaniu SGU norma PN-EN 1995-1-1 zaleca stosować metodę uproszczoną według wzoru:

$$\mathbf{U}_{fin} = \mathbf{U}_{fin,G} + \mathbf{U}_{fn,Q1} + \sum \mathbf{U}_{fin,Qi} \quad (2.2)$$

$U_{fin,G} = U_{inst,G} (1 + k_{def})$  – przemieszczenie końcowe od obciążenia stałego

$U_{fin,Q1} = U_{inst,Q1} (1 + \psi_{2,1} k_{def})$  – przemieszczenie końcowe od obciążenia zmiennego wiodące  $Q_1$

$U_{fin,Qi} = U_{inst,Qi} (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} k_{def})$  – przemieszczenia od pozostałych obciążeń zmiennych

$U_{inst,G}$ ;  $U_{inst,Q1}$ ;  $U_{inst,Qi}$  – odkształcenia chwilowe od obc.  $G$ ;  $Q_1$ ;  $Q_i$

$\psi_{2,1}$ ;  $\psi_{2,i}$  – współczynniki dla quasi-stałej kombinacji wg PN-EN1990

$\psi_{0,i}$  – współczynnik kombinacyjny wg PN-EN1990

$k_{def}$  – współczynnik modyfikujący odkształcenie, uwzględniający wpływ pełzania i zmiany wilgotności.

**Najważniejsze wartości współczynników kombinacyjnych podano w poniższej tabeli:**

Oddziaływanie	$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$
Obciążenia zmienne w budynkach, kategoria:			
A: powierzchnie mieszkalne	0,7	0,5	0,3
B: powierzchnie biurowe	0,7	0,5	0,3
C: miejsca zebrań	0,7	0,7	0,6
D: powierzchnie handlowe	0,7	0,7	0,6
E: powierzchnie magazynowe	1,0	0,9	0,8
F: powierzchnie ruchu pojazdów < 30kN,	0,7	0,7	0,6
G: powierzchnie ruchu pojazdów > 30kN,	0,7	0,5	0,3
H: dachy	0	0	0
Obciążenie śniegiem:			
miejscowości położone na wys. > 1000 m npm	0,7	0,5	0,2
miejscowości położone na wys. < 1000 m npm	0,5	0,2	0
Obciążenie wiatrem	0,6	0,2	0

**Tablica 3.2 – Wartości współczynnika  $k_{def}$  dla drewna i materiałów drewnopochodnych**

Materiał	Norma	Klasa użytkowania		
		1	2	3
Drewno lite	EN 14081-1	0,60	0,80	2,00
Drewno klejone warstwowo	EN 14080	0,60	0,80	2,00
LVL	EN 14374, EN 14279	0,60	0,80	2,00
Sklejka	EN 636			
	wg EN 636-1	0,80	–	–
	wg EN 636-2	0,80	1,00	–
	wg EN 636-3	0,80	1,00	2,50
OSB	EN 300			
	OSB/2	2,25	–	–
	OSB/3, OSB/4	1,50	2,25	–
Płyta wiórowa	EN 312			
	P 4	2,25	–	–
	P 5	2,25	3,00	–
	P 6	1,50	–	–
	P 7	1,50	2,25	–
Płyta pilśniowa twarda	EN 622-2			
	HB.LA HB.HLA1, HB.HLA2	2,25 2,25	– 3,00	– –
Płyta pilśniowa półtwarda	EN 622-3			
	MBH.LA1, MBH.LA2 MBH.HLS1, MBH.HLS2	3,00 3,00	– 4,00	– –
Płyta pilśniowa MDF	EN 662-5			
	MDF.LA MDF.HLS	2,25 2,25	– 3,00	– –



W belkach jednoprzęsłowych swobodnie podpartych o stosunku  $\ell/h > 20$  i obciążonych równomiernie strzałka ugięcia obliczana jest ze wzoru:

$$a) \quad u_{inst} = u_M = \frac{5}{384} \frac{q_k \ell^4}{E_{0,mean} I} \quad (NA.1)$$

gdzie:

$u_{inst}$  – ugięcie chwilowe (sprężyste)

$q_k$  – obciążenie charakterystyczne

$\ell$  – rozpiętość belki,

$I$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego belki względem osi zginania,

$E_{0,mean}$  – średnia wartość modułu sprężystości podłużnej materiału.

W przypadku innego typu obciążenia, ugięcie belki swobodnie podpartej, można obliczać ze wzoru przybliżonego:

$$u_{inst} = u_M = \frac{5}{48} \frac{M_k \ell^2}{E_{0,mean} I}$$

gdzie:

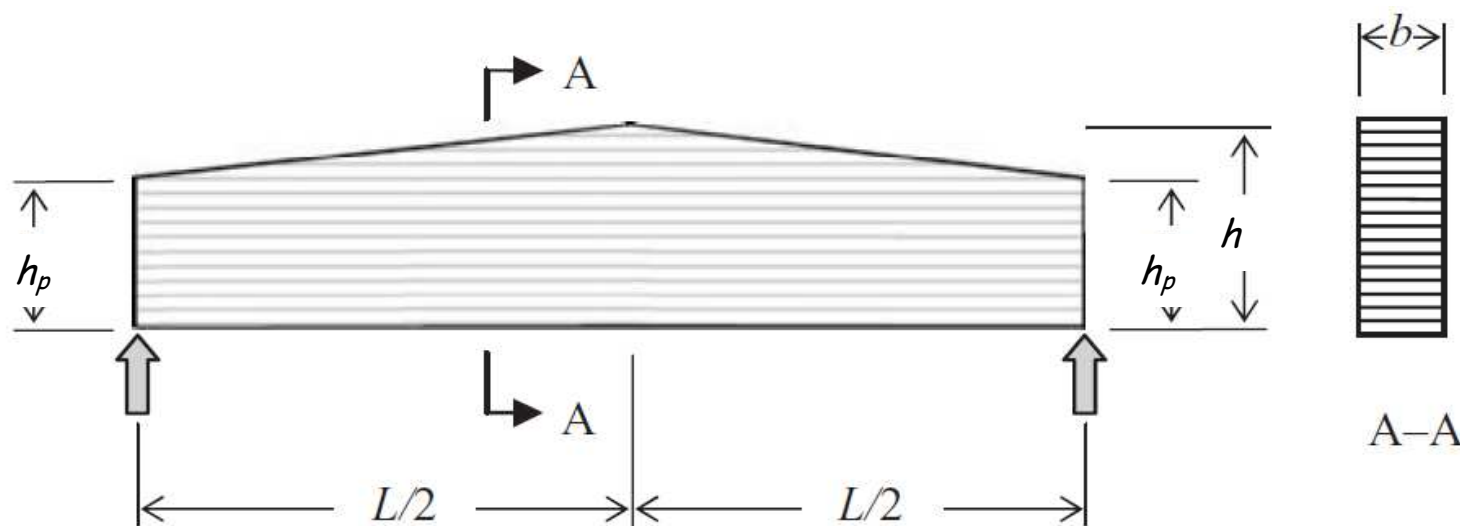
$M_k$  – maksymalny moment zginający w belce od obciążeń charakterystycznych.

b) dla belek o stosunku  $\ell / h < 20$  i stałym przekroju prostokątnym

$$u_{inst} = u_M + u_v = u_M \left[ 1 + 19,2 \left( \frac{h}{\ell} \right)^2 \right] \quad (\text{NA.2})$$

c) dla belek jak w pozycji b), lecz o przekroju prostokątnym zmiennym (Rysunek NA.1a))

$$u_{inst} = u_M \left[ \frac{1 + 19,2 \left( \frac{h}{\ell} \right)^2}{0,15 + 0,85 \frac{h_p}{h}} \right] \quad (\text{NA.3})$$



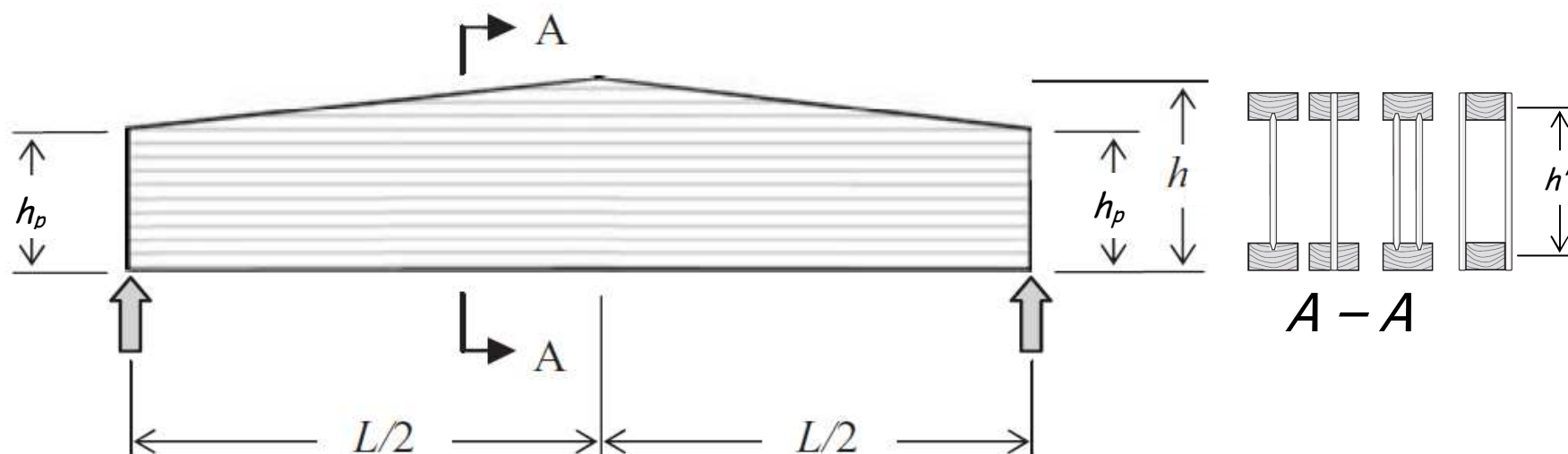
Rysunek NA.1a

d) dla belek dwuteowych lub skrzynkowych o przekroju stałym

$$u_{inst} = u_M + u_v = u_M \left[ 1 + \eta_1 \left( \frac{h}{\ell} \right)^2 \right] \quad (\text{NA.4})$$

e) dla belek dwuteowych i skrzynkowych o przekroju zmiennym (Rysunek NA.1b))

$$u_{inst} = u_M + u_v = u_M \frac{1 + \eta_1 \left( \frac{h}{\ell} \right)^2}{0,4 + 0,6 \frac{h_p}{h}} \quad (\text{NA.5})$$



w których:

- $I$  – moment bezwładności przekroju poprzecznego belki, przyjmowany odpowiednio jak dla belek jednolitych lub o przekroju złożonym,  
 $u_m$  – ugięcie belki swobodnie podpartej wywołane momentem zginającym,  
 $u_v$  – ugięcie belki swobodnie podpartej spowodowane działaniem sił poprzecznych,  
 $\eta_I$  – współczynnik wg Tablicy NA.1  
 $h, h_p$  – wysokość belki odpowiednio: w środku rozpiętości, na podporze,  
 $h', h'_p$  – odległość między osiami pasów odpowiednio: w środku rozpiętości, na podporze,  
 $(EI)$  – sztywność przekroju, obliczona jak dla belek jednolitych lub o przekroju złożonym.  
 $\ell$  – rozpiętość belki

**Tablica NA.1 – Współczynniki  $\eta_I$  do uwzględnienia wpływu sił poprzecznych na ugięcia belek dwuteowych i skrzynkowych**

Belki z drewna					Belki z drewna i materiałów drewnopochodnych		
$b_w/b_f^{1)}$	1,00	0,50	0,33	0,25	0,33	0,25	0,125
$\eta_I$	19,2	30,0	40,0	51,0	33,0	48,0	90,0
<sup>1)</sup> $b_w, b_f$ – szerokości, odpowiednio: środka, pasa							

Ugięcie belek przy zginaniu ukośnym oblicza się według wzoru:

$$u_{fin} = \sqrt{u_{fin,y}^2 + u_{fin,z}^2} ,$$

w którym:

$u_{fin,y}$  i  $u_{fin,z}$  – składowe ugięcia końcowego w dwóch prostopadłych kierunkach.

**NA.8.3 Przy obliczaniu ugięć belek** można wykorzystać niżej podane zasady:

Ugięcia belek ciągłych gdy stosunek rozpiętości największego przęsła do najmniejszego nie przekracza 1:0,8, przy jednakowym obciążeniu wszystkich przęseł lub gdy stosunek największego obciążenia jednego przęsła do najmniejszego obciążenia innego nie przekracza 1:0,8, przy zachowaniu jednakowej rozpiętości przęseł, można obliczać, w przybliżeniu, przyjmując stosunek największego ugięcia belki ciągłej do największego ugięcia belki jednoprzęsłowej swobodnie podpartej:

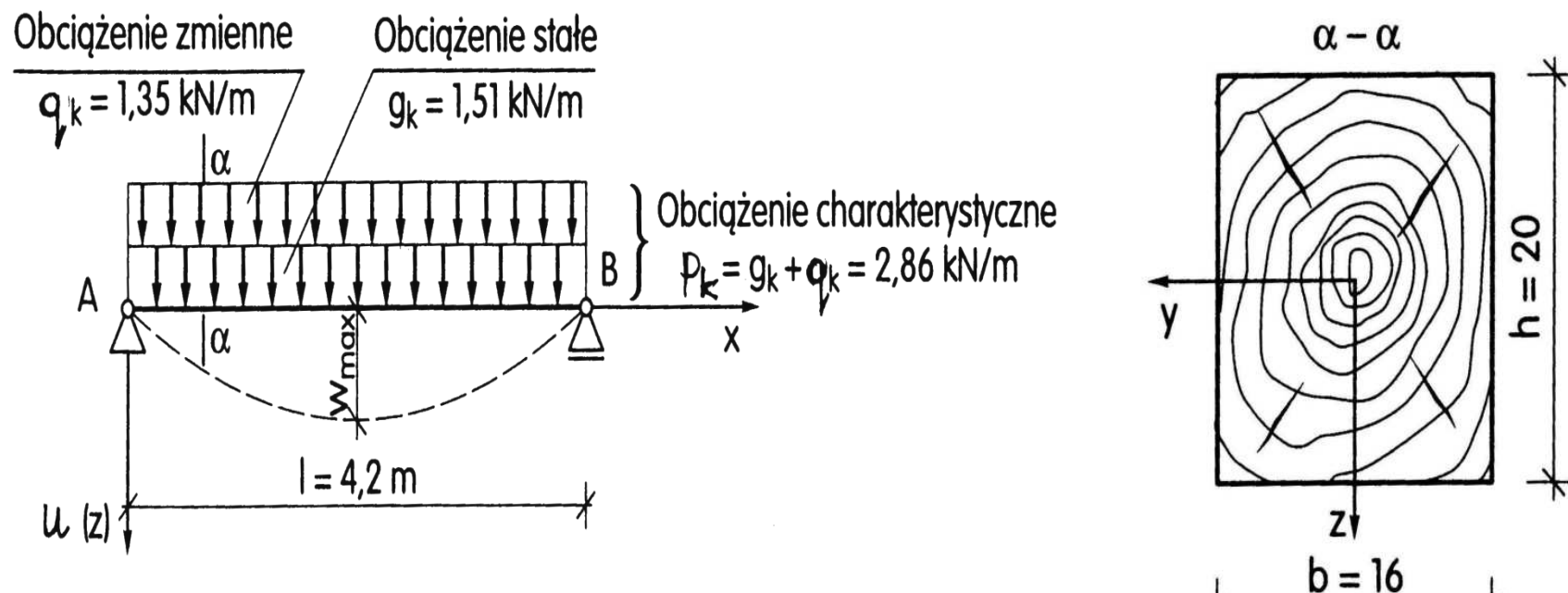
a) dla przęseł skrajnych:

0,65 – przy obciążeniu stałym, 0,90 – przy obciążeniu zmiennym,

b) dla przęseł środkowych:

0,25 – przy obciążeniu stałym, 0,75 – przy obciążeniu zmiennym.

**PRZYKŁAD** Sprawdzić, czy przedstawiona na rysunku poniżej belka stropu drewnianego spełnia warunek sztywności – SGU.



Belkę zaprojektowano z drewna iglastego klasy C27. Projektowany strop jest stropem międzykondygnacyjnym w pomieszczeniach mieszkalnych, będzie on nie tynkowany, klasa użytkowania – 2.

MOHENT BEZWŁADNOŚCI PRZĘKROJU BELKI: WZGLĘDEM  
 OŚI PROSTOKĄDŁEJ DO PŁASZCZYZNY OBCIĄŻENIA

$$I_y = \frac{bh^3}{12} = \frac{16 \times 20^3}{12} = 10667 \text{ cm}^4$$

$$I_y = 1.0667 \times 10^8 \text{ mm}^4$$

ŚREDNIA WARTOŚĆ MODUŁU SPRĘŻYSTOŚCI  
 PODKURWEJ (WZDŁUŻ WŁOKIEN DREWNA)  
 KLASY C27  $E_{0, \text{mean}} = 11.5 \text{ GPa}$

$$E_{0, \text{mean}} = 11500 \text{ N/mm}^2$$

CIĘŻAR CHWILOWE (DOPŁATNE) WYŁOKANE OBCIĄŻENIEM STAŁYM  $g_k = 1.51 \text{ kN/m} = 1.51 \text{ N/mm}$   
 WYNOŚ:

$$u_{\text{inst}, g} = \frac{5}{384} \frac{g_k L^4}{E_{0, \text{mean}} I_y} =$$

$$= \frac{5}{384} \times \frac{1.51 \times 4200^4}{11500 \times 1.067 \times 10^8} = 4.98 \text{ mm}$$

$$u_{\text{inst}, g} \approx 5.0 \text{ mm}$$

UGIĘCIE CHWILOWE OD OBCIĄŻENIA ZMIENNEGO

$$q_k = 1,35 \text{ kN/m} = 1,35 \text{ N/mm}$$

$$u_{inst,q} = \frac{5}{384} \times \frac{q_k L^4}{E_{0,mean} I_y} =$$
$$= \frac{5}{384} \times \frac{1,35 \times 4200^4}{11500 \times 1,067 \times 10^8} = 4,46 \text{ mm}$$

$$\underline{u_{inst,q} = 4,5 \text{ mm}}$$

WARTOŚĆ WSPÓŁCZYNNIKÓW:

$$k_{def} = 0,8 \text{ — 2 KL. UŻYTKOWANIA}$$

$$\psi_{2,1} = 0,3 \text{ — KATEGORIA A — POW. MIESZKALNA}$$

UGIĘCIE KOŃCOWE OD OBC. STAŁEGO

$$u_{fin,q} = u_{inst,q} (1 + k_{def})$$

$$u_{fin,q} = 5,0 \times (1 + 0,8) = \underline{9 \text{ mm}}$$



UGIĘCIĘ KONCOWE OD OBC. ZMIENNEGO

$$u_{fin,q} = u_{inst,q1} (1 + \gamma_{2,1} \cdot k_{def})$$

$$u_{fin,q} = 4,5 \times (1 + 0,3 \times 0,8) = \underline{5,6 \text{ mm}}$$

UGIĘCIĘ KONCOWE ROZPATRYWANĄJ  
BELKI LYNOS,

$$u_{fin} = u_{fin,q} + u_{fin,q1} = 9 + 5,6$$

$$\underline{u_{fin} = 14,6 \text{ mm}}$$

GRANICZNA WARTOŚĆ UGIĘCIA BELKI  
- STROP NIE OTYNKOWANY

$$u_{net, fin} = \frac{L}{250} = \frac{4200}{250} = \underline{16,8 \text{ mm}}$$

SPRAWDZENIE STANU GRANICZNEGO  
UŻYTKOWAŁNOŚCI (SBU)

$$u_{fin} \leq u_{net, fin}$$

PONIEWAŻ

$$u_{fin} = 14,6 \text{ mm} < u_{net, fin} = 16,8 \text{ mm},$$

WARUNEK SBU ZOSTAŁ SPEŁNIONY.

PRZEKROJ BELKI PRAWIDŁOWO DOBRANY,  
ZE WZGLĘDU NA WARUNEK SZYBNOŚCI.