

## 7 Dimenzování prvků dřevěných konstrukcí

### 7.1 Úvod

U dřevěných konstrukcí musíme ověřit jejich stavy, které se vztahují ke zřícení nebo k jiným způsobům poškození konstrukce, při nichž může být ohrožena bezpečnost lidí. Tato kapitola je věnována navrhování/dimenzování prvků dřevěných konstrukcí pozemních staveb. V úvodu jsou proto nejprve vysvětleny metody, které se pro navrhování dřevěných konstrukcí používají.

Metody pro posuzování bezpečnosti/spolehlivosti konstrukcí rozdělujeme na **deterministické** (vycházející z dlouholetých zkušeností a založené na součinitelích bezpečnosti) a **polo- nebo plněpravděpodobnostní** (založené na matematické statistice a teorii pravděpodobnosti).

Historicky nejstarší metoda pro navrhování a posuzování spolehlivosti dřevěných konstrukcí je **metoda dovolených namáhání**, která pochází z 19. století a je založena na deterministickém přístupu k posuzování spolehlivosti konstrukcí.

Základní princip, na kterém je založena filosofie **dovolených namáhání**, lze vyjádřit následujícími vztahy:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_{allow} \quad (7.1)$$

a současně

$$\sigma_{allow} = \sigma_{crit} / k. \quad (7.2)$$

Maximální napětí od zatížení ( $\sigma_{max}$ ) musí být menší, nanejvýš rovno dovolenému napětí ( $\sigma_{allow}$ ). Napětí  $\sigma_{crit}$  je napětí určené na základě zkoušek a  $k$  je součinitel, který zahrnuje veškeré nejistoty jak na straně zatížení, tak na straně únosnosti prvků. Jeho účelem je zajistit dostatečnou bezpečnost celé konstrukce. Metoda dovolených namáhání však vykazuje některé závažné nedostatky a omezení.

Zatížení, materiály a průřezové charakteristiky jsou stanoveny deterministickým způsobem. Odezva konstrukce je vyšetřována na základě teorie pružnosti. Nejistoty systému nejsou explicitně vyjádřeny. Jsou uvažovány implicitně v konzervativních předpokladech o rozdělení napětí, ve způsobu stanovení zatížení a dovolených namáhání.

Současná evropská norma pro navrhování dřevěných konstrukcí (Eurokód 5), jehož příprava začala v 80. letech dvacátého století, je již založen na zjednodušené aplikaci filosofie mezních stavů, kde charakteristické hodnoty účinků zatížení, vlastností materiálů a geometrických veličin jsou upravovány dílčími součiniteli, a proto tato metoda nese název **metoda dílčích součinitelů**.

U této metody rozlišujeme tyto dvě skupiny mezních stavů:

- mezní stavy únosnosti (únosnost, překlopení, posunutí a nadzdvihnutí konstrukce);
- mezní stavy použitelnosti (přetvoření a kmitání konstrukce).

Cílem navrhování je nízká pravděpodobnost selhání konstrukce, tj. nízká pravděpodobnost, že její zatížení je větší než její únosnost. U metody dílčích součinitelů se toho dosáhne použitím návrhových hodnot, které se stanoví pro zatížení vynásobením jeho charakteristických hodnot dílčími součiniteli a pro únosnost vydělením charakteristických hodnot vlastností příslušnými dílčími součiniteli. U všech rozhodujících návrhových situací se potom musí prokázat, že mezní stavy nebudou dosaženy.

Zejména se musí zajistit, že

- u mezních stavů únosnosti návrhové účinky zatížení nepřekročí návrhové hodnoty odolnosti konstrukčního prvku či spoje, a že
- u mezních stavů použitelnosti návrhové hodnoty účinků zatížení nepřekročí příslušné mezní hodnoty průhybů a kmitání konstrukce.

U mezního stavu únosnosti odpovídajícího stavu porušení konstrukce se musí prokázat, že

$$S_d \leq R_d \quad (7.3)$$

U mezního stavu statické rovnováhy konstrukce, má příslušné ověření tvar

$$S_{d,dst} \leq S_{d,stb} \quad (7.4)$$

U mezních stavů použitelnosti se musí prokázat, že

$$S_d \leq C_d \quad (7.5)$$

kde  $S_d$  je návrhová hodnota účinku zatížení jako např. osová síla, ohybový moment, průhyb;

$R_d$  - návrhová hodnota odolnosti (únosnosti) konstrukčního prvku;

$S_{d,dst}$  - návrhová hodnota nepříznivě působících účinků zatížení;

$S_{d,stb}$  - návrhová hodnota příznivě působících účinků zatížení;

$C_d$  - předepsaná mezní hodnota jako např. mezní hodnota průhybu.

Konstrukční prvky mohou být obecně namáhány různým způsobem. V dalším textu jsou vysvětleny podrobněji pouze základní způsoby jejich namáhání.

## 7.2 Prvky namáhané tahem

Dřevěné konstrukční prvky mohou být namáhány tahem rovnoběžně s vlákny a tahem kolmo k vláknům dřeva. S tahem kolmo k vláknům se setkáváme především ve spojích dřevěných konstrukcí.

U prvků, které jsou namáhány tahem ve směru své osy, tj. rovnoběžně s vlákny dřeva musí být splněna podmínka

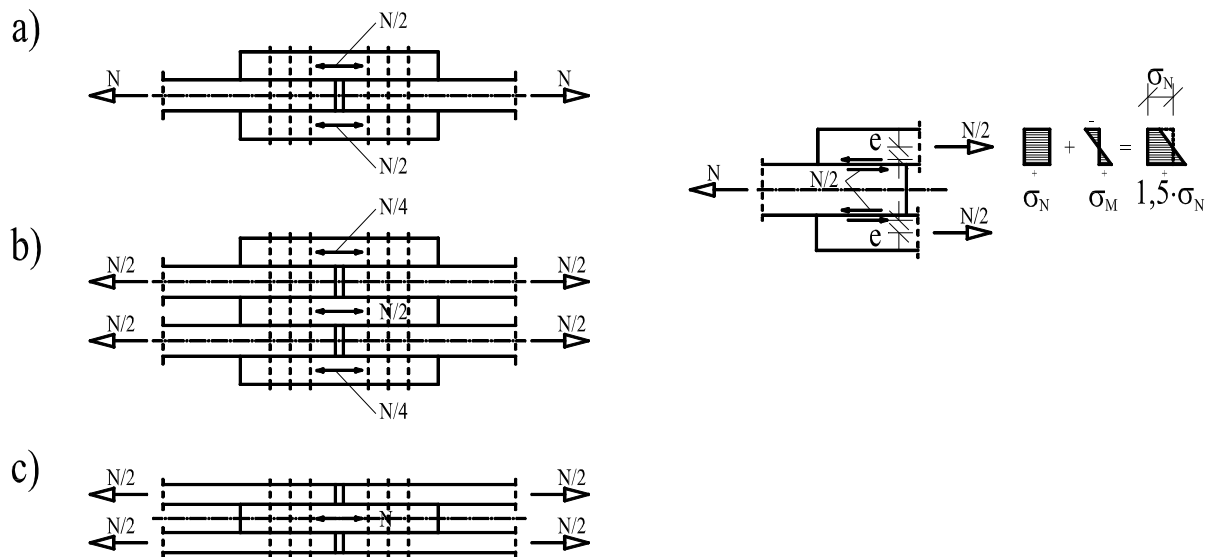
$$\sigma_{t,0,d} \leq f_{t,0,d} \quad (7.6)$$

kde  $\sigma_{t,0,d}$  je návrhové napětí v tahu;

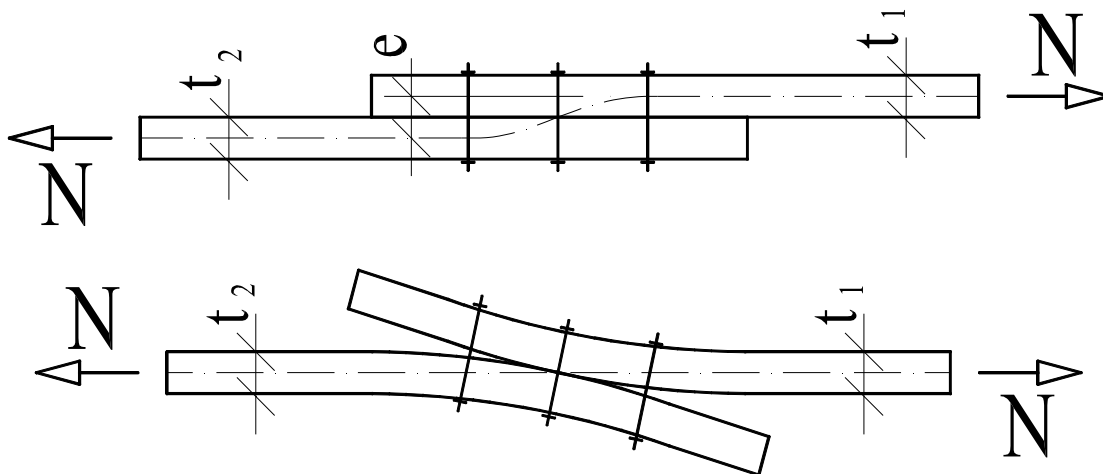
$f_{t,0,d}$  - návrhová pevnost v tahu.

Při nastavování prvků namáhaných na tah je třeba příložky a vložky rozmístit pokud možno souměrně k ose prvku (obr. 7.1), aby nedocházelo k páčení spojovacích prostředků a k ohybu

prvků ohybovým momentem  $M = N \cdot e = N \left( \frac{t_1}{2} + \frac{t_2}{2} \right)$ , viz obr. 7.2.



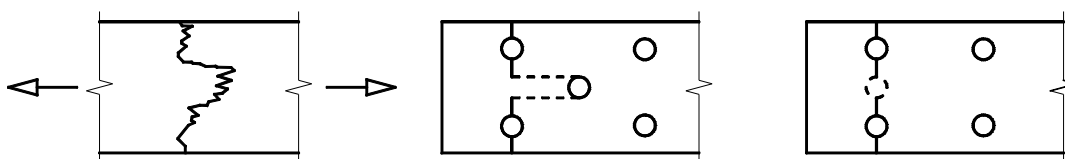
Obr. 7.1 Rozmístění přílozek a vložek taženého prvku



Obr. 7.2 Tažený prvek bez přílozek

Příložky nebo krajní části taženého prvku se navrhují na 1,5násobek osové síly, kterou přenášejí. Tímto způsobem se zohledňuje zvýšené namáhání krajních částí ve stycích tažených prvků přidáním ohybovým momentem (obr. 7.1).

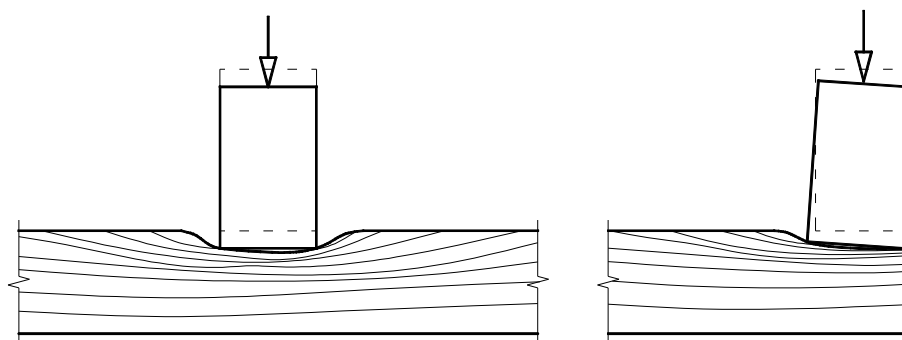
Stanovíme-li účinný průřez u spoje s několika spojovacími prostředky, mají se všechny otvory v rozmezí poloviční minimální rozteče spojovacích prostředků, měřeno rovnoběžně s vlákny od daného průřezu, považovat za otvory vyskytující se v tomto průřezu, viz obr. 7.3.



Obr. 7.3 Oslabení průřezu prvku namáhaného tahem

### 7.3 Prvky namáhané tlakem

Také v případě tlaku mohou být dřevěné konstrukční prvky namáhány rovnoběžně a kolmo k vláknům dřeva. Tlak kolmo k vláknům dřeva způsobuje především deformace (otlačení) ve stycích konstrukčních prvků – viz obr. 7.4.



Obr. 7.4 Příklad otlačení dřeva

U tlaku rovnoběžně s vlákny dřeva rozlišujeme dva způsoby namáhání:

- prostý tlak;
- vzpěrný tlak.

### 7.3.1 Prostý tlak

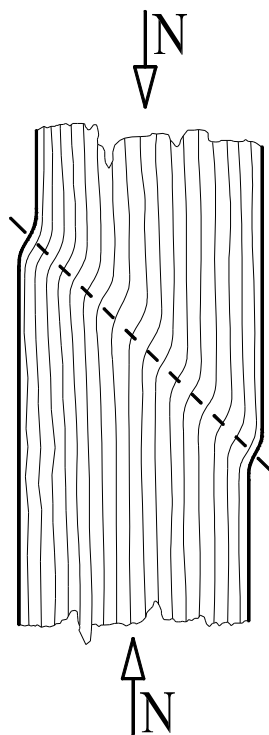
U prvků namáhaných pouze prostým tlakem musí být splněna podmínka

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (7.7)$$

kde  $\sigma_{c,0,d}$  je návrhové napětí v tlaku;

$f_{c,0,d}$  - návrhová pevnost v tlaku.

Prvky namáhané prostým tlakem se poruší tehdy, když se dosáhne meze pevnosti v tlaku rovnoběžně s vlákny v každém vláknu průřezu prvku viz obr. 7.5. Sklon roviny smyku od vodorovné roviny je obvykle 50 - 65 °.



Obr. 7.5 Porušení prvku namáhaného prostým tlakem

### 7.3.2 Vzpěrný tlak

U tlačných prutů se musí uvážit napětí za ohybu stanovené s vlivem počátečních zakřivení, excentricit a z nich vyplývajících přetvoření.

Důležitou charakteristikou tlačného prutu je jeho štíhlost, která je dána poměrem jeho vzpěrné délky a poloměru setrvačnosti jeho průřezu. U dřevěných konstrukcí se většinou setkáváme s případy, kdy vzpěrná délka (účinná délka) prutu je rovna délce tlačného prutu, což odpovídá předpokladu, že prut je na obou koncích uložen kloubově. Tento předpoklad souvisí se skutečností,

že v uchycení konců dřevěných tlačných prutů téměř vždy dochází k malému prokluzu ve spojích s ohledem na otláčení dřeva pod spojovacími prostředky a tím k natočení konce prutu.

Poměrné štíhlostní poměry jsou dány vztahy

$$\lambda_{rel,y} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,y}}} \quad (7.8)$$

$$\lambda_{rel,z} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit,z}}} \quad (7.9)$$

$$\text{kde } \sigma_{c,crit,y} = \frac{\pi^2 E_{0,05}}{\lambda_y^2}; \quad (7.10a)$$

$$\sigma_{c,crit,z} = \frac{\pi^2 E_{0,05}}{\lambda_z^2}; \quad (7.10b)$$

$\lambda_y$  a  $\lambda_{rel,y}$  odpovídají vzpěru k ose y (vybočení ve směru osy z);

$\lambda_z$  a  $\lambda_{rel,z}$  odpovídají vzpěru k ose z (vybočení ve směru osy y).

Osy tyčových prvků zavádíme stejně u tlačných prvků, jako u ohýbaných prvků, viz obr. 7.7.

Napětí mají splňovat podmínku

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (7.11)$$

kde  $\sigma_{c,0,d}$  je návrhové napětí v tlaku;

$f_{c,0,d}$  - návrhová pevnost;

$k_{c,z}$ ,  $k_{c,y}$  - součinitelé vzpěrnosti.

Součinitelé  $k_{c,z}$  a  $k_{c,y}$  se určí ze vztahů

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (\text{obdobně pro } k_{c,y}) \quad (7.12)$$

$$k_z = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2 \right] \quad (\text{obdobně pro } k_y) \quad (7.13)$$

kde  $\beta_c$  je součinitel, který platí pouze pro prvky splňující meze zakřivení (dané třisetinou délky u rostlého dřeva a pětisetinou délky u lepeného lamelového dřeva).

Hodnota součinitele  $\beta_c$  se má uvažovat

- pro rostlé dřevo  $\beta_c = 0,2$ ;

- pro lepené lamelové dřevo  $\beta_c = 0,1$ .

K předložené metodice řešení vzpěru tlačných prutů je třeba si říci několik teoretických poznámek. U dokonale pružného dostředně tlačného prutu, který je kloubově uložen na obou koncích

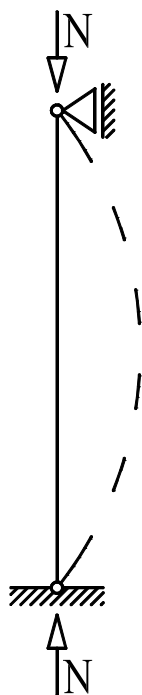
(obr. 7.6), se určuje kritická osová síla, při které dojde k vybočení prutu ve směru hlavní centrální osy průřezu, podle Eulerova vztahu

$$N_{c,crit} = \frac{\pi^2 EI}{\ell^2} \quad (7.14)$$

kde  $I$  je nejmenší moment setrvačnosti průřezu prutu;

$E$  - modul pružnosti materiálu prutu v ohybu (u dřeva na hladině 5% kvantilu);

$\ell$  - délka prutu.



Obr. 7.6 Kloubově uložený tlačенý prut

Kritické napětí ideálně přímého pružného homogenního prutu konstantního průřezu je

$$\sigma_{c,crit} = \frac{N_{c,crit}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{\ell^2 A} \quad (7.15)$$

a po úpravě

$$\sigma_{c,crit} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (7.16)$$

kde  $A$  je plocha průřezu prutu;

$$\lambda = \frac{\ell}{i}; \quad (7.17)$$

kde  $\lambda$  je štíhlost prutu;

$\ell$  - vzpěrná délka;

$i$  - poloměr setrvačnosti.

Součinitel vzpěrnosti  $k_c$  můžeme brát jako převodní součinitel, kterým se převádí případ prostého tlaku na vzpěrný tlak

$$k_c = \frac{\sigma_{c,crit}}{\sigma_{c,f}} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2 \sigma_{c,f}} \quad (7.18)$$

kde  $\sigma_{c,f}$  je mez pevnosti materiálu prutu v tlaku;

$\sigma_{c,crit}$  - kritické napětí v prutu při ztrátě stability;

$\lambda$  - štíhlost prutu;

$E$  - modul pružnosti materiálu prutu v ohybu.

## 7.4 Prvky namáhané ohybem

Dřevěné nosníky mohou být namáhány prostým ohybem, nebo ohybem s klopením.

### 7.4.1 Prostý ohyb

K prostému ohybu dochází tehdy, když nosník má malý poměr mezi svojí výškou a šířkou nebo jeho příčná a torzní stabilita je zajištěna.

Potom musí být splněna následující obecná podmínka pro šikmý ohyb (v případě rovinného ohybu je jedno z normálových napětí nulové)

$$k_m \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7.19)$$

$$\frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,y,d}} + k_m \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,z,d}} \leq 1 \quad (7.20)$$

kde  $\sigma_{m,y,d}$  a  $\sigma_{m,z,d}$  jsou návrhová napětí v ohybu k hlavním osám (obr. 7.7);

$f_{m,y,d}$  a  $f_{m,z,d}$  - návrhové pevnosti v ohybu;

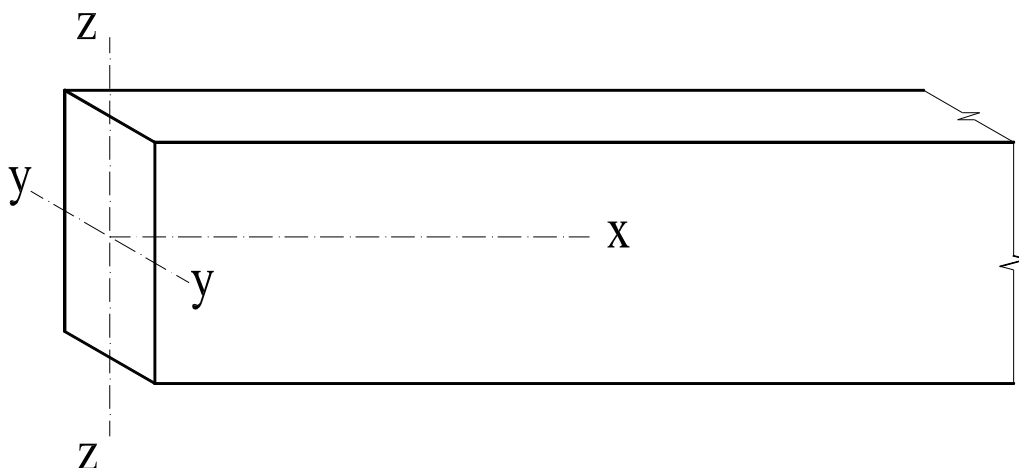
$k_m$  - součinitel pro šikmý ohyb.

Hodnota součinitele  $k_m$  se má uvažovat:

- pro obdélníkové a čtvercové průřezy  $k_m = 0,7$ ;

- pro ostatní průřezy  $k_m = 1,0$ .





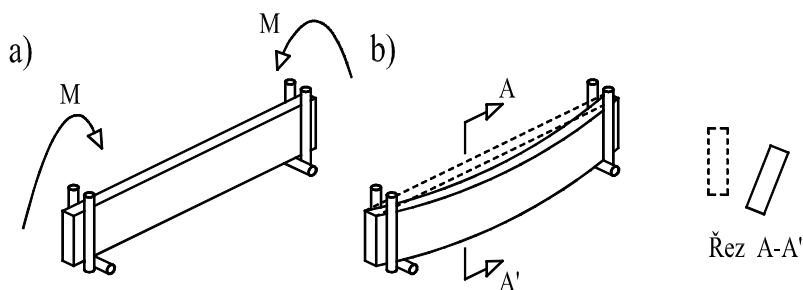
Obr. 7.7 Osy nosníku

Součinitel pro šikmý ohyb se zavádí do výpočtu s ohledem na skutečnost, že prostý součet dílčích normálových napětí (zjištěných podle klasické teorie pružnosti), který platí pro hrany ohýbaného nosníku nevystihuje dostatečně přesně únosnost nosníku při šikmém ohybu s ohledem na vazkopružnou povahu dřeva.

Při nastavování prvku namáhaného ohybem pomocí příložek musí být průřezový modul příložek stejný nebo větší než průřezový modul nastavovaného prvku v místě styku. Je třeba též zabezpečit přenesení posouvajících sil. U dřevěných příložek se doporučuje volit jejich průřezový modul o 20 % větší než průřezový modul nastavovaného prvku.

### 7.4.2 Ohyb s klopením

Při ohybu nosníku je tlakem namáhán jeho horní okraj a může dojít ke klopení nosníku, tj. příčnému vybočení a zkroucení jeho průřezu – viz obr. 7.8.



Obr. 7.8 Klopení nosníku

U nosníků se musí uvážit napětí za ohybu stanovené s vlivem jejich počátečních zakřivení, excentricit a z nich vyplývajících přetvoření.

Napětí mají splňovat podmínku

$$\sigma_{m,d} \leq k_{crit} f_{m,d} \quad (7.21)$$

kde  $\sigma_{m,d}$  je návrhové napětí v ohybu;

$f_{m,d}$  - návrhová pevnost v ohybu;

$k_{crit}$  - součinitel klopení (příčné a torzní stability).

Pro nosníky splňující meze počáteční příčné amplitudy zakřivení, stejné jako pro tlačené pruty (viz 7.3.2), se  $k_{crit}$  určuje podle následujících vztahů

$$k_{crit} = 1 \text{ pro } \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \quad (7.22)$$

$$k_{crit} = 1,56 - 0,75 \lambda_{rel,m} \text{ pro } 0,75 < \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \quad (7.23)$$

$$k_{crit} = 1/\lambda_{rel,m}^2 \text{ pro } \lambda_{rel,m} > 1,4 \quad (7.24)$$

Součinitel  $k_{crit}$  se může uvažovat hodnotou 1 pro nosník, jehož tlačенý okraj je po celé délce zajištěn proti vybočení a u něhož je zamezeno torznímu natočení v podpěrách.

Poměrná štíhlost pro ohyb je definována vztahem

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{f_{m,k} / \sigma_{m,crit}} \quad (7.25)$$

kde  $\sigma_{m,crit}$  je kritické napětí za ohybu vypočtené podle klasické teorie stability s modulem pružnosti na hladině 5% kvantilu;

$f_{m,k}$  je charakteristická pevnost v ohybu.

U nosníků obdélníkového průřezu se kritické napětí za ohybu  $\sigma_{m,crit}$  přibližně určí ze vztahu

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,78 b^2 E_{0,05}}{h \ell_{ef}} \quad (7.26)$$

kde  $b$  je šířka nosníku;

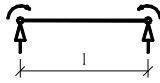
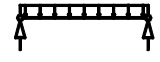
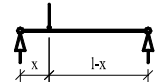
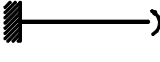
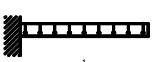
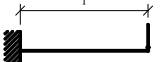
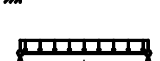
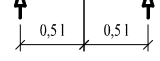
$h$  - výška nosníku;

$\ell_{ef}$  - účinná délka nosníku;

$E_{0,05}$  - modul pružnosti v ohybu na hladině 5% kvantilu.

Účinné délky nosníku (závislé na podmínkách uložení nosníku a na jeho zatížení) je možno určit podle tab. 7.1.

Tab. 7.1 Poměr  $l_{ef} / \ell$  pro posouzení příčné a torzní stability nosníků

Typ nosníku	Zatížení působí na horním okraji nosníku
	1
	0,95
	$0,8/\alpha$ $(\alpha = 1,35 - 1,4 \frac{x}{l} \frac{l-x}{l})$
	2
	1,2
	1,7
	0,4
	0,25

Poznámka: Proti příčné a torzní nestabilitě (klopení) jsou nosníky zajištěny v podpěrách. V posledních dvou případech jsou ještě nosníky uprostřed rozpětí zajištěny proti příčnému posunutí horního okraje nosníku, ale nikoliv proti svislému posunutí a zkroucení nosníku.

### 7.4.3 Průhyb a kmitání

Ohýbané prvky se musí posoudit na průhyb a v případě jejich použití ve stropních konstrukcích též na kmitání.

Okamžitý průhyb  $u_{inst}$  od vlivu zatížení se určí tak, že se použije průměrná hodnota příslušných modulů pružnosti v ohybu.

Konečný průhyb  $u_{fin}$  od vlivu zatížení se stanoví takto:

$$u_{fin} = u_{inst} (1 + k_{def}) \quad (7.27)$$

kde  $k_{def}$  je součinitel, který bere v úvahu zvětšení deformace v čase následkem kombinovaného účinku dotvarování a vlhkosti. Hodnoty tohoto součinitele jsou pro dřevo a jednotlivé materiály na bázi dřeva různé a jsou uvedeny v Eurokódu 5.

Vliv posouvajících sil na průhyb dřevěných nosníků nemůžeme obecně zanedbávat vzhledem k tomu, že hodnota modulu pružnosti dřeva ve smyku je velmi malá. Přesto lze ale konstatovat, že posouvající síly významně ovlivní průhyb pouze u nosníku profilového průřezu a u štíhlého nosníku obdélníkového průřezu. U prostě podepřeného nosníku obdélníkového průřezu zatíženého

rovnoměrným zatížením, určíme přibližně poměr průhybu od posouvajících sil ( $u_V$ ) a momentů ( $u_M$ ) takto:

$$\frac{u_V}{u_M} = 0,96 \frac{E}{G} \left( \frac{h}{\ell} \right)^2 \quad (7.28)$$

kde  $h$  je výška nosníku;

$\ell$  - rozpětí nosníku;

$E$  - modul pružnosti dřeva v ohybu;

$G$  - modul pružnosti dřeva ve smyku.

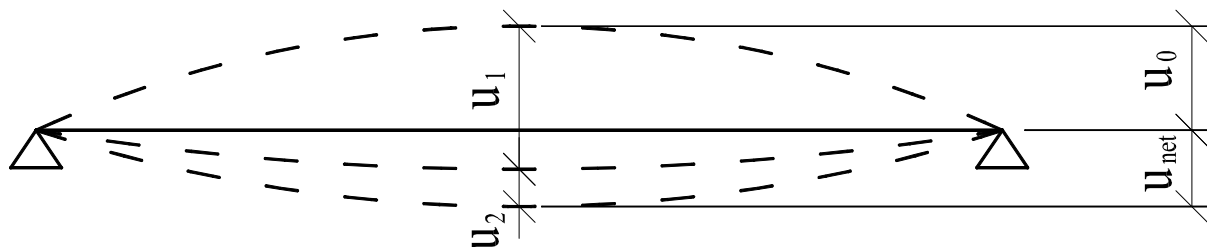
Mezní hodnoty průhybu se předepisují na základě dlouholetých zkušeností získaných při realizaci dřevěných konstrukcí.

Jednotlivé složky průhybu jsou znázorněny na obr. 7.9 a označují se takto:

$u_0$  - nadvýšení (pokud lze provést a provede se);

$u_1$  - průhyb od stálého zatížení;

$u_2$  - průhyb od nahodilého zatížení.



Obr. 7.9 Složky průhybu

Celkový průhyb vztažený k přímce spojující podpěry  $u_{\text{net}}$  je dán vztahem

$$u_{\text{net}} = u_1 + u_2 - u_0 \quad (7.29)$$

Tam, kde je vhodné omezit okamžité průhyby od nahodilého zatížení, jsou doporučeny tyto hodnoty, pokud zvláštní podmínky nevyžadují jiné požadavky:

$$u_{2,\text{inst}} \leq \ell / 300 \text{ (konzola } \ell / 150)$$

kde  $\ell$  je rozpětí nosníku nebo délka konzoly.

Tam, kde je vhodné omezit konečný průhyb  $u_{fin}$ , jsou doporučeny tyto hodnoty, pokud zvláštní podmínky nevyžadují jiné požadavky:

$$u_{2,fin} \leq \ell / 200 \text{ (konzola } \ell / 100) \quad (7.30)$$

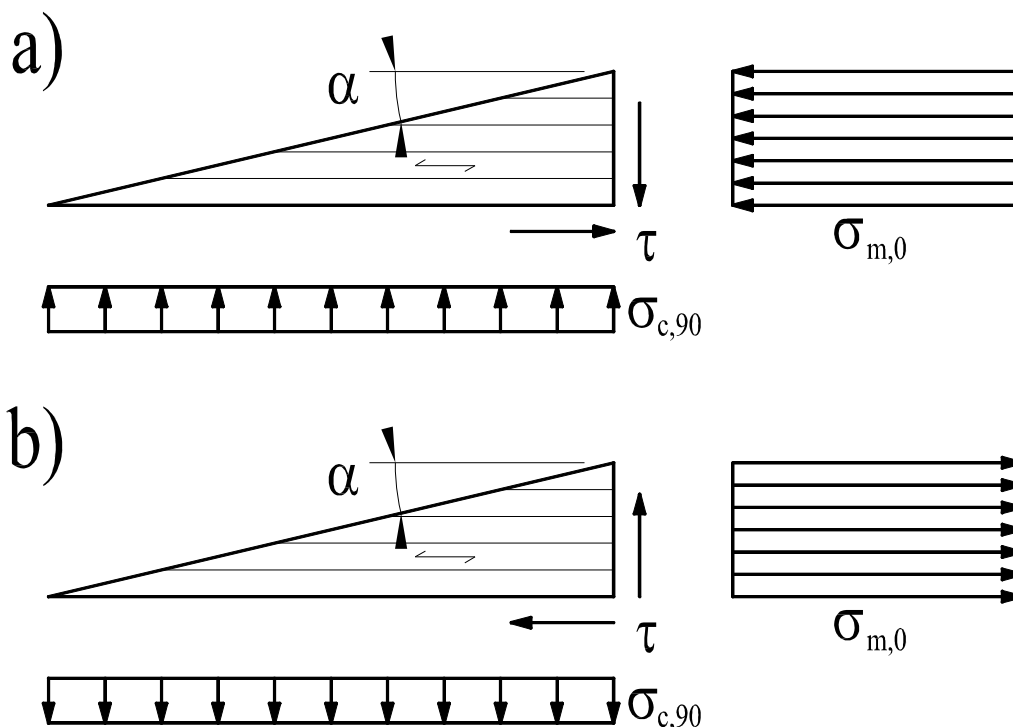
$$u_{net,fin} \leq \ell / 200 \text{ (konzola } \ell / 100). \quad (7.31)$$

Pro příhradové nosníky platí stejné mezní hodnoty průhybu jako pro nosníky, a to jak pro celé rozpětí, tak pro průhyby jednotlivých prutů mezi styčníky.

#### 7.4.4 Pultové nosníky

U nosníků s proměnnou výškou průřezu (obr. 7.13) musíme (nad rámec posouzení platných obdobně jako u nosníků s konstantní výškou průřezu) uvážit i vliv náběhu na napjatost na okrajích nosníku.

Nosníky s proměnnou výškou se vyrábějí většinou pouze z lepeného lamelového dřeva. Napjatost na zkoseném okraji těchto nosníků je velmi komplikovaná, neboť vedle normálových napětí rovnoběžně s vlákny dřeva se zde vyskytují i normálová napětí kolmo k vláknům a napětí smyková. V případě normálových napětí rovnoběžně s vlákny dřeva pak hraje roli jestli se jedná o normálová napětí v tlaku či v tahu za ohybu - viz obr. 7.10.

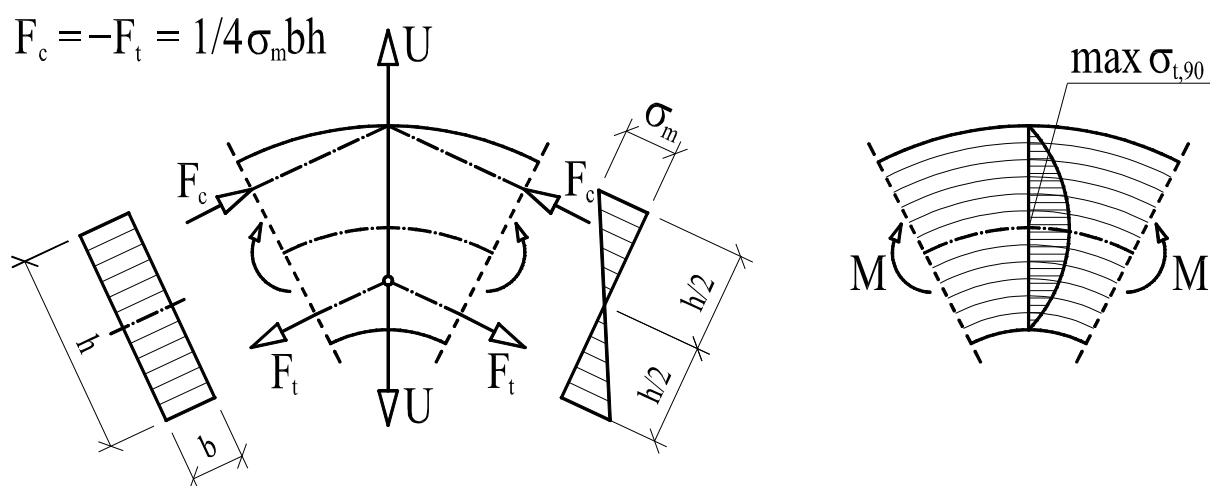


Obr. 7.10 Napětí na okrajích ohybaných nosníků proměnného průřezu  
a) normálové napětí v tlaku za ohybu, b) normálové napětí v tahu za ohybu

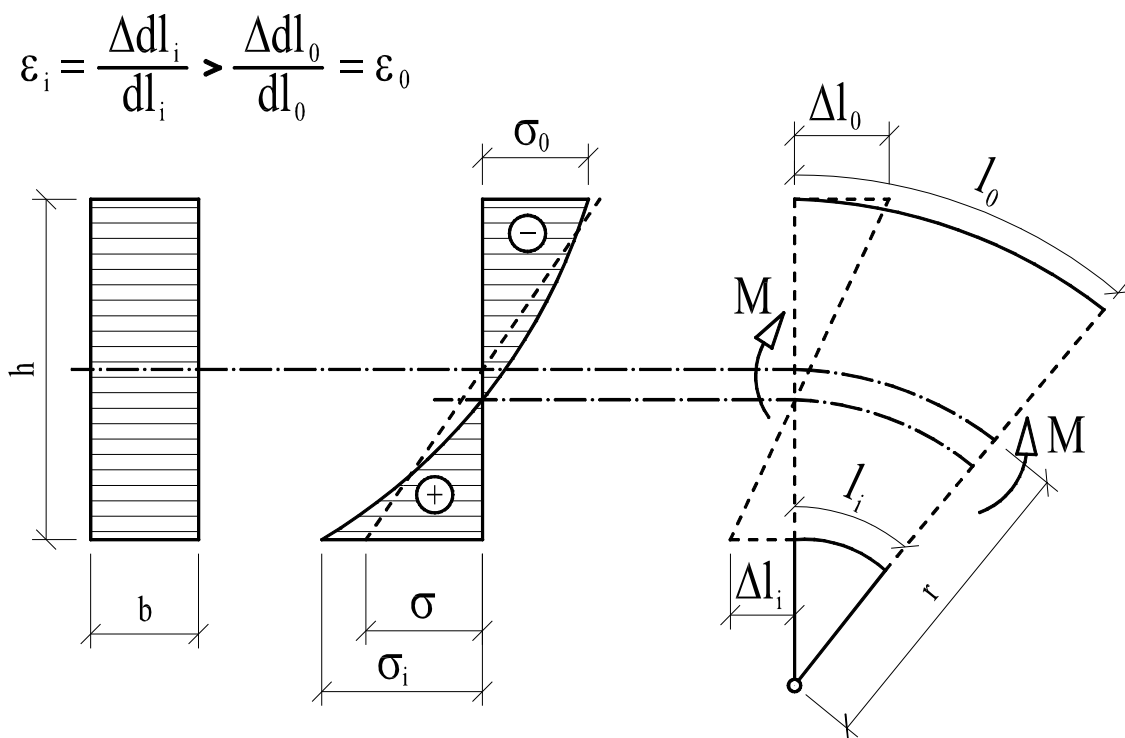
### 7.4.5 Sedlové, zakřivené a vyklenuté nosníky

Při návrhu sedlových, zakřivených a vyklenutých nosníků (obr. 7.13) musíme vzít v úvahu (nad rámec posouzení platných obdobně jako u nosníků pultových a s konstantní výškou průřezu) i tyto skutečnosti:

- že u těchto nosníků vznikají ve vrcholové oblasti nebezpečná tahová napětí kolmo k vláknům (obr. 7.11), která mohou způsobit porušení (rozvrstvení) nosníků a tak snížení jejich ohybových tuhostí;
- že normálová napětí za ohybu v zakřivených částech shora uvedených nosníků nemají zcela lineární průběh. Průběh normálových napětí za ohybu u zakřiveného nosníku vycházející z Navierovy teorie je znázorněn na obr. 7.12.

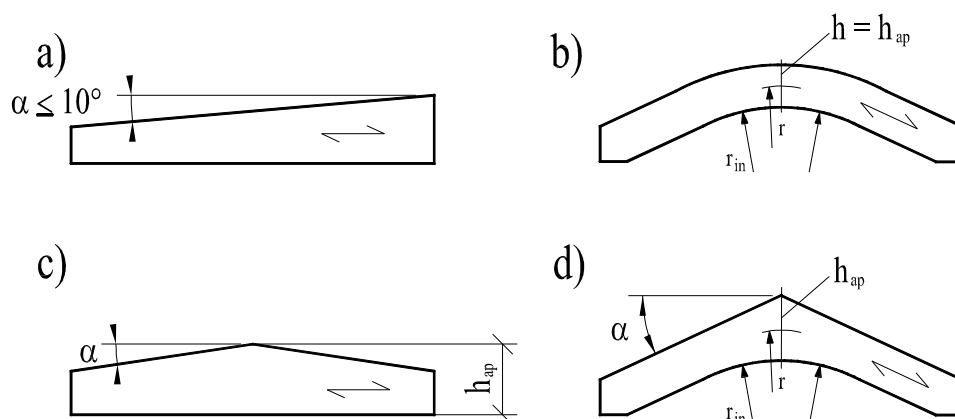


Obr. 7.11 Normálová napětí v tahu kolmo k vláknům za předpokladu lineárního průběhu normálového napětí po výšce průřezu



Obr. 7.12 Průběh normálových napětí za ohybu u zakřiveného nosníku

Za třetí potom skutečnost, že u nosníků se zakřivenou střednicí vznikají při jejich výrobě v průřezu počáteční napětí od ohybu lamel do tvaru střednice nosníku. Tato napětí jsou však podstatně nižší než napětí, která bychom odvodili výpočtem podle klasické teorie pružnosti s ohledem na vazkopružnou povahu dřeva.



Obr. 7.13 Nosníky

a) pultový, b) zakřivený (konstantní výšky), c) sedlový, d) vyklenutý

## 7.5 Prvky namáhané smykem

U dřevěných konstrukcí mohou nastat dva případy smyku:

- prostý smyk;
- smyk za ohybu.

V obou případech musí být splněna podmínka

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d} \quad (7.32)$$

kde  $\tau_{v,d}$  je návrhové napětí ve smyku;

$f_{v,d}$  - návrhová pevnost ve smyku.

S prostým smykem se setkáváme hlavně u tesařských spojů a se smykem za ohybu v podpěrách nosníků.

## 7.6 Plošné prvky

S plošnými prvky se nejvíce setkáváme v případě střešních, stropních a stěnových deskových konstrukcí budov na bázi dřeva.

### 7.6.1 Sendvičové panely

Sendvičové panely se skládají ze třech vrstev. Vnějších, relativně tenkých vrstev většinou z třískových nebo OSB desek, které plní základní nosnou funkci panelu. Vnitřní, relativně tlusté vrstvy, která zabezpečuje spolupůsobení vnějších vrstev a jejich stabilitu proti vyboulení. Vedle toho vnitřní vrstva plní i izolační funkci. Většinou se provádí z lehkých pórovitých materiálů jako je polyuretanová nebo polystyrolová pěna, které mají malý modul pružnosti v ohybu. Vnitřní vrstva však má mít dostatečnou pevnost a tuhost ve smyku a musí být k vnějším vrstvám přilepena po celé styčné ploše.

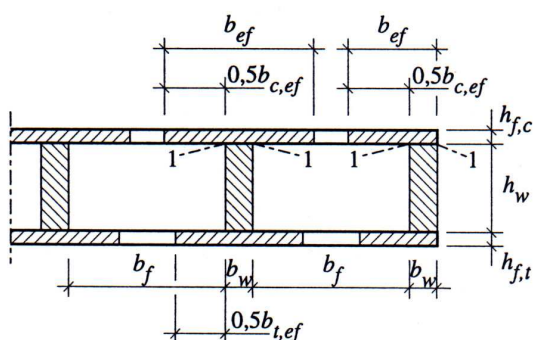
Pro výpočet sendvičových panelů lze použít návrhové postupy platné pro nosníky složeného průřezu s poddajnými spoji za těchto předpokladů:

- neúčinnosti středové vrstvy při přenosu normálových napětí;
- nahrazení spojitého modulu prokluzu  $k = K/s$  ( $K$  a  $s$  jsou modul prokluzu a vzdálenost spojovacích prostředků) mezi pláštěm a vnitřní vrstvou panelu hodnotou  $G_{\text{mean}} / h$  ( $G_{\text{mean}}$  a  $h$  jsou modul pružnosti ve smyku a výška vnitřní vrstvy).

### 7.6.2 Žebrové panely

Žebrové panely se skládají ze žebér, která probíhají ve směru rozpětí panelu, a desek tvořících plášť panelu při horním nebo i dolním okraji žebér (obr. 7.14).





Obr. 7.14 Žebrový panel

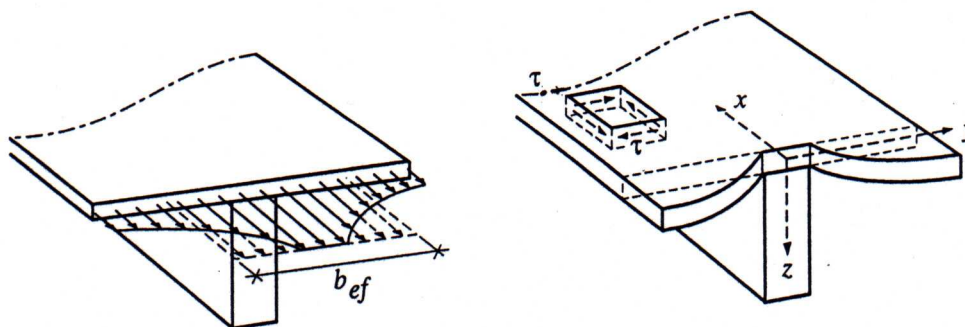
Žebra jsou zpravidla z rostlého dřeva a pláště z desek na bázi dřeva - překližek, OSB desek, třískových a vláknitých desek. Spoj mezi žebry a pláštěm panelu je buď lepený nebo provedený s použitím mechanických spojovacích prostředků – hřebíků, sponek nebo vrtů. Takto provedené panely staticky působí jako prvky složeného průřezu a to buď celistvé (v případě lepených spojů), nebo s poddajnými spoji (v případě spojů s mechanickými spojovacími prostředky).

Ohybová únosnost a tuhost žebrových panelů je proto v porovnání s únosností samotných žebor podstatně vyšší.

Při navrhování panelů se vychází z předpokladu lineárního průběhu poměrného přetvoření po výšce panelů.

Musí se ale uvážit nerovnoměrné rozdělení napětí v pláštích s ohledem na jejich smykové ochabnutí a boulení.

V důsledku smykových deformací nemají normálová napětí v pláštích mezi žebry panelu rovnoměrný průběh - viz obr. 7.15.



Obr. 7.15 Napjatost v plášti panelu

Podíl pláště na ohybové tuhosti a únosnosti průřezu panelu se zmenšuje se zvětšováním vzájemné vzdálenosti žebor panelu od sebe. Pláště ovlivňují tuhost a únosnost průřezu panelu především v závislosti na poměrech  $b_f / \ell$  a  $E/G$ ; kde  $b_f$  je vzdálenost žebor panelu od sebe,  $\ell$  je rozpětí panelu,  $E$  je modul pružnosti pláště v ohybu ve směru rozpětí panelu a  $G$  je modul pružnosti pláště ve smyku. Účinná šířka pláště  $b_{ef}$  se zmenšuje se zvětšováním poměrů  $E/G$  a  $b_f / \ell$ .

Poměr mezi  $b_{ef} / b_f$  lze v případě rovnoměrně zatíženého, prostě podepřeného panelu odvodit z následujících vztahů:

$$\frac{b_{ef}}{b_f} = \frac{(\lambda_1 \operatorname{tgh} \alpha_1 - \lambda_2 \operatorname{tgh} \alpha_2) 2 \ell}{\pi (\lambda_1^2 - \lambda_2^2)} \frac{2 \ell}{b_f} \quad (7.33)$$

$$\text{kde } \alpha_1 = \frac{\lambda_1 \pi b_f}{2 \ell} \quad (7.34)$$

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_2 \pi b_f}{2 \ell} \quad (7.35)$$

$$\lambda_1 = \sqrt{a + \sqrt{a^2 - c}} \quad (7.36a)$$

$$\lambda_2 = \sqrt{a - \sqrt{a^2 - c}} \quad (7.36b)$$

$$a = \frac{E_x}{2G} - \nu_{yz} \quad (7.37)$$

$$c = E_x / E_y \quad (7.38)$$

$\nu_{yz}$  je součinitel příčné kontrakce.

Účinná šířka pláště panelu  $b_{ef}$  se zavádí do výpočtu proto, aby bylo možné panel řešit jako soubor dílčích jednoduchých nosníků. Účinná šířka  $b_{ef}$  je přitom definována jako idealizovaná šířka pláště, při které jsou normálová napětí, zjištěná na dílčím jednoduchém nosníku, rovna maximálním napětím vyplývajícím z řešení panelu jako celku s uvážením smykových deformací v pláštích. Na základě uvedených předpokladů se v běžných výpočtech panel považuje za příslušný počet nosníků I nebo U (obr. 7.14) s účinnými šířkami pláštů  $b_{ef}$ , kde

$$b_{ef} = b_{c,ef} + b_w \quad (\text{nebo } b_{t,ef} + b_w) \quad (7.39)$$

nebo

$$b_{ef} = 0,5 b_{c,ef} + b_w \quad (\text{nebo } 0,5 b_{t,ef} + b_w) \quad (7.40)$$

Účinné šířky  $b_{c,ef}$  a  $b_{t,ef}$  nemají být větší než maximální účinná šířka určená pro smykové ochabnutí pláště. Mimoto účinná šířka  $b_{c,ef}$  nemá být větší než maximální účinná šířka určená pro boulení pláště.

Maximální účinné šířky pláštů s ohledem na jejich smykové ochabnutí a boulení jsou uvedeny v tab. 7.2, kde  $\ell$  je rozpětí panelu a  $h_f$  tloušťka pláště.

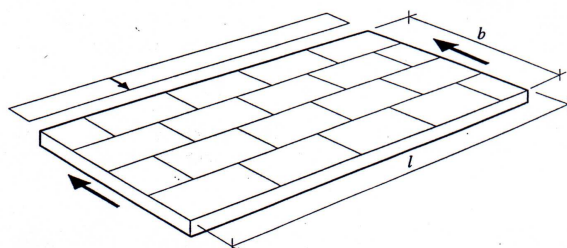
Jestliže se neprovede podrobný výpočet boulení, nemá být volná šířka pláště větší než dvojnásobek účinné šířky s ohledem na boulení.

Tab. 7.2 - Maximální účinné šířky pláštů s ohledem na smykové ochabnutí a boulení pláště

Materiál pláště	Smykové ochabnutí	Boulení
Překližka se směrem vláken v krajních dýchách:		
- rovnoběžným se žebry	0,1 $\ell$	25 $h_f$
- kolmým na žebra	0,1 $\ell$	20 $h_f$
Deska s orientovanými třískami	0,15 $\ell$	25 $h_f$
Třísková nebo vláknitá deska s nahodilou orientací vláken	0,2 $\ell$	30 $h_f$

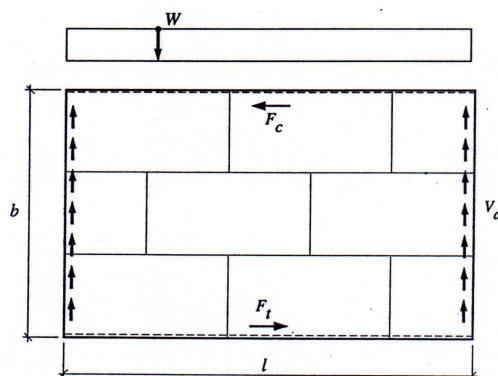
### 7.6.3 Vodorovné výztužné desky

Pro přenos vodorovných sil do stěn mohou být využity podlahy, stropy a střechy. U dřevěných montovaných domů jsou tyto nosné elementy vytvořeny z dřevěných prken a fošen, které jsou oplášťovány různými deskami na bázi dřeva. U podlah a střeš se obvykle používá překližka, třískové desky nebo desky OSB, které se připojují k dřevěným prvkům pomocí hřebíků, sponek, nebo vrutů. Typický strop je tvořen jednou nebo dvěma vrstvami sádkartonových desek, připojených pomocí vrutů nebo hřebíků ke kontralatím, které jsou opět připojeny pomocí hřebíků ke stropním nosníkům. Tento typ stropu je možno uvažovat též jako výztužnou desku. Tato část publikace se zabývá pouze stropními výztužnými deskami podle obr.7.16.



Obr. 7.16 Stropní výztužná deska

U tohoto typu výztužných desek lze předpokládat, že nosné chování je podobné jako u vysokého I nosníku. Podle EC5 je to možné, pokud rozpětí  $\ell$  je menší než šestnásobek šířky desky  $b$ . Oplášťování stropní desky působí jako stěna, která přenáší posouvající síly, zatímco okrajové pásy stropní desky přenášejí působící ohybový moment, viz obr. 7.17.



Obr. 7.17 Princip nosného působení stropní výztužné desky

U montovaných domů na bázi dřeva se jako pás výztužné desky využívá zdvojený horní rám stěn. Alternativně je možné použít jako pás výztužné desky okrajový nosník. Jednotlivé desky pláště výztužné desky se ukládají s vystřídáním podélnými styky. Řešení desky vychází z toho, že celý ohybový moment je přenášen pásy. Pásové prvky proto musí být navrženy na tahovou nebo tlakovou sílu

$$F_{t,d} = F_{c,d} = M_{\max,d} / b \quad (7.41)$$

kde  $M_{\max,d}$  je návrhová hodnota největšího ohybového momentu;

$b$  - šířka výztužné desky.

Smykový tok  $q_{t,d}$  mezi pláštěm a pásem může být vypočten ze vztahu:

$$q_{f,d} = F_{v,d} / b_c \quad (7.42)$$

kde  $F_{v,d}$  je návrhová hodnota největší posouvající síly;

$b_c$  - vzdálenost těžišť pásů.

Plášť musí být navržen na smykový tok:

$$v_d = F_{v,d} / b \quad (7.43)$$

kde  $F_{v,d}$  je návrhová hodnota největší posouvající síly;

$b$  - šířka výztužné desky.

Rozteč spojovacích prostředků, kterými se připojuje plášť k dřevěným žebřům, se určí ze vztahu:

$$s = R_d / v_d \quad (7.44)$$

kde  $R_d$  je návrhová hodnota únosnosti jednoho spojovacího prostředku;

$v_d$  - smykový tok.

U výztužných desek, podepřených na koncích podle obrázků 7.16 a 7.17 je posouvající síla přenášena z výztužné desky do výztužných stěn v čelech výztužné desky. Vychází se z předpokladu, že posouvající síla je na okraji výztužné desky rovnoměrně rozdělena. Okrajové prvky výztužné desky se musí náležitě připojit do výztužných stěn, které jsou pod nimi.

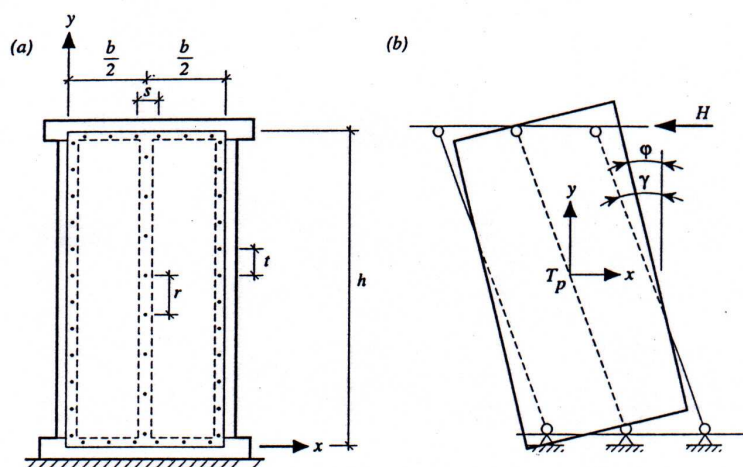
Má-li pás nebo okrajový dřevěný prvek také funkci překladu/průvlaku, musí být navržen na kombinaci svislých a osových zatížení.

U předloženého výpočetního modelu se předpokládá, že opláštění působí jako jediná deska a proto mají být ve styčných jednotlivých desek příčná žebra. Tuhost výztužné desky závisí na orientaci desek vzhledem k žebřům nebo příčným žebřům. U podlahy se dosáhne nejlepšího působení vystřídáním uspořádáním desek. Protože se však výztužná deska často používá pro zavětrování ve dvou protilehlých směrech, má se vystřídání styků orientovat na nejnepříznivější směr zatížení. Boulení desek je zamezeno dřevěnými žebry a tloušťka desky vyplývá v prvé řadě z navrhování pro svislá zatížení.

Při velkých otvorech v podlaze výztužné desky je důležité, aby v oblasti otvorů byly síly spolehlivě přeneseny. Tlakové a tahové síly mohou být přeneseny pomocí výměn a ocelových pásů. Pro přenos posouvajících sil je důležité, aby desky byly náležitě spojeny s výměnami a žebry na okraji otvorů a to pomocí hřebíků, sponek, nebo vrutů. Rozhodující je konstrukční řešení jednotlivých detailů připojení.

#### 7.6.4 Výztužné stěny

Stěny montovaných domů na bázi dřeva obecně tvoří svislé sloupky rozmístěné v pravidelných vzdálenostech, které společně s dolním a horním rámovým prvkem vytvářejí rám podobný žebříku. Tento rám je obvykle jednostranně nebo oboustranně opláštěván různými typy desek na bázi dřeva, které jsou připojeny k rámu hřebíky, sponkami, nebo vruty. Stěnu je možné ve výpočtu uvažovat jako konzolu, která je v úrovni horního rámu zatížena vodorovným osamělým břemenem. Tím, že plášť působí jako vyztužení, může být tato síla přenesena do základů. Statické působení je znázorněno na obr. 7.18.



Obr. 7.18 a) Typický stěnový prvek, b) Princip nosného chování

Sloupky jsou připojeny k dolnímu prahu a hornímu prvku pomocí hřebíků nebo jiných kovových spojovacích prostředků. Spoje rámu mohou být ze statického hlediska uvažovány jako klouby (viz obr. 7.18). Posunutí dřevěného rámu musí být proto zamezeno pláštěm a spojovacími prostředky mezi pláštěm a rámem. Nejvíce namáhané spojovací prostředky jsou v rozích, protože zde dochází k největšímu posunutí mezi rámem a pláštěm. V horním levém rohu a dolním pravém rohu jsou spojovací prostředky namáhány ve směru volných okrajů pláště. Ve zbývajících dvou rozích působí síly opačným směrem. Na obr. 7.18 se předpokládá, že sloupky jsou zakotveny k základu. Okolnost, zda může nebo nemůže být zamezeno nadzdvížení sloupku, má často největší vliv na únosnost výztužných stěn montovaných domů na bázi dřeva. Vedle ověření nadzdvížení se sloupek musí posoudit na soustředěnou tlakovou sílu. Dalšími důležitými faktory, které ovlivňují únosnost výztužných stěn, jsou únosnost spojovacích prostředků a smyková pevnost pláště.

Největší celkové zatížení stěny, která je vytvořena z více stěnových prvků, se může zjednodušeně stanovit jako součet největších zatížení pro každý prvek, i když stěnové prvky obsahují různé plášťové materiály i spojovací prostředky. Když jsou však použity rozdílné plášťové materiály a spojovací prostředky na obou stranách rámu, má se podle EC5 v tomto případě zavést únosnost slabší strany pouze poloviční hodnotou. U stěny s okenními nebo dveřními otvory se při výpočtu únosnosti celé stěny mají stěnové prvky s těmito otvory zanedbat.

Při výpočtu rozdělení vnitřních sil na spojovací prostředky připojující plášť k rámu se dovoluje použít zjednodušený model. Tento model vychází z předpokladu lineárně pružného chování spojovacích prostředků, kloubového spojení jednotlivých dřevěných prvků rámu a účinného zakotvení sloupků proti nadzdvížení. Dřevěné prvky rámu i pláště se kromě toho předpokládají dokonale tuhé v ohybu i v tahu v rovině zatížení. Za těchto předpokladů se vypočte rozdělení vnitřních sil ze vztahů:

$$F_{xi} = \frac{H h y_i}{\sum y_i^2} \quad \text{a} \quad F_{yi} = \frac{H h x_i}{\sum x_i^2} \quad (7.45 \text{ a } 7.46)$$

kde  $F_{xi}$  a  $F_{yi}$  jsou složky síly ve směru osy  $x$  příp.  $y$  pro spojovací prostředek se souřadnicemi  $x_i$ ,  $y_i$ .

Výsledná síla vychází ze vztahu:

$$F_i = \sqrt{F_{xi}^2 + F_{yi}^2} \quad (7.47)$$

kde  $x_i$ ,  $y_i$  jsou souřadnice uvažovaného spojovacího prostředku;  
 $H$  - celková vodorovná síla na stěnový prvek;  
 $h$  - výška stěnového prvku;

$\sum x_i^2, \sum y_i^2$  jsou součty čtverců vzdáleností všech spojovacích prostředků.

Mezní podmínkou únosnosti je selhání nejvíce namáhaných spojovacích prostředků, které se nacházejí v rozích pláště.

Návrhová hodnota únosnosti výztužné stěny se vypočte podle EC5 ze vztahu:

$$F_{v,d} = F_{f,d} b / s \quad (7.48)$$

kde  $F_{f,d}$  je návrhová hodnota únosnosti spojovacího prostředku;

b - šířka stěnového prvku;

s - vzdálenost spojovacích prostředků.

U tohoto výpočetního modelu se vychází z toho, že síly jsou stejnoměrně rozděleny na spojovací prostředky mezi pláštěm a rámem a nepřihlíží se ke koncentraci sil v rozích výztužné stěny.

Tažený sloupek a kotvení mají být navrženy na sílu

$$F_{t,d} = F_{v,d} h / b \quad (7.49)$$

a tlačení sloupek na sílu

$$F_{c,d} = 0,67 F_{t,d} \quad \text{pro oboustranný plášť, nebo} \quad (7.50)$$

$$F_{c,d} = 0,75 F_{t,d} \quad \text{pro jednostranný plášť} \quad (7.51)$$

Krajní sloupky výztužné stěny a patní rám musí být přiměřeně zakotveny do základu, aby mohly přenášet silové účinky, které na ně působí. U vícepodlažních budov musí být výztužné stěny vzájemně spojeny tak, aby tyto síly mohly být přenášeny z jednoho podlaží budovy do druhého.

## 7.7 Příklady

### Příklad 7.1 Posouzení sloupu na vzpěr

Posouzení kloubově uloženého sloupu čtvercového průřezu 100 x 100 mm, délky  $\ell = 3$  m, centricky zatíženého střednědobou návrhovou silou  $N_d = 30$  kN. Sloup je z rostlého dřeva a je zabudován v prostředí, ve kterém průměrná vlhkost dřeva bude 12 %. Parametry pevnosti a tuhosti dřeva jsou  $f_{c,0,k} = 20$  MPa a  $E_{0,05} = 6\,700$  MPa.

Návrhová pevnost v tlaku

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{20}{1,3} = 12,3 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{30 \cdot 10^3}{10 \cdot 10^3} = 3,0 \text{ MPa}$$

Štíhlostní poměr

$$\lambda = \frac{\ell_{\text{ef}}}{i} = \frac{3\,000}{0,289 \cdot 100} = 103,8$$

$$\sigma_{c,\text{crit}} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda^2} = 3,14^2 \frac{6\,700}{103,8^2} = 6,1 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{\text{rel}} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,\text{crit}}}} = \sqrt{\frac{20}{6,1}} = 1,8$$

Součinitel vzpěrnosti

$$k = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{\text{rel}} - 0,3) + \lambda_{\text{rel}}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,2(1,8 - 0,3) + 1,8^2 \right] = 2,27$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{\text{rel}}^2}} = \frac{1}{2,27 + \sqrt{2,27^2 - 1,8^2}} = 0,29$$

Posouzení sloupu na vzpěr

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{3,0}{0,29 \cdot 12,4} = 0,83 < 1$$

Sloup na vzpěr vyhovuje.

**Příklad 7.2 Posouzení prutu na vzpěr a ohyb**

Kloubově uložený prut čtvercového průřezu 200x200 mm, délky  $\ell = 4$  m je zatížen návrhovou osovou silou  $N_d = 100$  kN (dlouhodobou) a návrhovým příčným rovnoměrným zatížením  $q_d = 5$  kNm<sup>-1</sup> (krátkodobým). Prut je z rostlého dřeva a je zabudován ve třídě provozu 1. Parametry pevnosti a tuhosti dřeva jsou  $f_{c,0,k} = 20$  MPa,  $f_{m,k} = 22$  MPa a  $E_{0,05} = 6\,700$  MPa.

Návrhové pevnosti v tlaku a v ohybu

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{20}{1,3} = 13,85 \text{ MPa}$$

$$f_{m,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{22}{1,3} = 15,23 \text{ MPa}$$

Normálové napětí v tlaku a v ohybu

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A} = \frac{100 \cdot 10^3}{40 \cdot 10^3} = 2,5 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{m,d} = \frac{q_d \ell^2}{8W} = 7,5 \text{ MPa}$$

Štíhlostní poměry

$$\lambda = \frac{\ell_{ef}}{i} = 69,2$$

$$\sigma_{c,crit} = \pi^2 \frac{E_{0,05}}{\lambda^2} = 13,8 \text{ MPa}$$

$$\lambda_{rel} = \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{\sigma_{c,crit}}} = \sqrt{\frac{20}{13,8}} = 1,2$$

Součinitel vzpěrnosti

$$k = 0,5 \left[ 1 + \beta_c (\lambda_{rel} - 0,3) + \lambda_{rel}^2 \right] = 0,5 \left[ 1 + 0,2 (1,2 - 0,3) + 1,2^2 \right] = 1,31$$

$$k_c = \frac{1}{k + \sqrt{k^2 - \lambda_{rel}^2}} = \frac{1}{1,31 + \sqrt{1,31^2 - 1,2^2}} = 0,54$$

Vzpěr a ohyb

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_c f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,d}}{f_{m,d}} \leq 1$$

$$\frac{2,5}{0,54 \cdot 12,4} + \frac{7,5}{13,7} = 0,9 < 1$$

Prut na vzpěr a ohyb vyhovuje.



**Příklad 7.3 Posouzení nosníku na ohyb a smyk**

Posouzení prostě podepřeného nosníku obdélníkového průřezu 50 x 200 mm, o rozpětí 3,5 m, zatíženého střednědobým návrhovým rovnoměrným zatížením 2 kNm<sup>-1</sup>. Nosník je z rostlého dřeva a je zabudován v prostředí, ve kterém průměrná vlhkost dřeva bude 12 %. Parametry pevnosti a tuhosti dřeva jsou

$$f_{m,k} = 22 \text{ MPa}, f_{v,k} = 2,4 \text{ MPa} \text{ a } E_{0,05} = 6\,700 \text{ MPa}.$$

Návrhová pevnost v ohybu a ve smyku

$$f_{m,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{22,0}{1,3} = 13,54 \text{ MPa}$$

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{2,4}{1,3} = 1,48 \text{ MPa}$$

a) Normálové napětí za ohybu (nosník je po celé délce zajištěn proti příčné a torzní nestabilitě)

$$\sigma_{m,d} \leq f_{m,d}$$

Normálová napětí za ohybu

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{1}{8} \frac{q_d \ell^2}{W} = \frac{1}{8} \frac{2 \cdot 3500^2 \cdot 6}{50 \cdot 200^2} = 9,2 \text{ MPa} < 13,54 \text{ MPa}$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

b) Normálové napětí za ohybu (nosník není po celé délce zajištěn proti příčné a torzní nestabilitě)

$$\sigma_{m,d} \leq k_{\text{crit}} \cdot f_{m,d}$$

Kritické napětí za ohybu

$$\sigma_{m,\text{crit}} = \frac{0,78 b^2 E_{0,05}}{h \ell_{\text{ef}}} = \frac{0,78 \cdot 50^2 \cdot 6\,700}{200 \cdot (0,9 \cdot 3500 + 400)} = 18,4 \text{ MPa}$$

Poměrná štíhlost

$$\lambda_{\text{rel},m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,\text{crit}}}} = \sqrt{\frac{22}{18,4}} = 1,06$$

Součinitel příčné a torzní stability

$$k_{\text{crit}} = 1,56 - 0,75 \lambda_{\text{rel},m} = 1,56 - 0,75 \cdot 1,06 = 0,76$$

Redukovaná návrhová pevnost

$$k_{\text{crit}} \cdot f_{m,d} = 0,76 \cdot 13,54 = 10,3 \text{ MPa}$$

Normálové napětí za ohybu

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W} = \frac{1}{8} \frac{q_d \ell^2}{W} = \frac{2 \cdot 3500^2 \cdot 6}{8 \cdot 50 \cdot 200^2} = 9,2 \text{ MPa} < 10,3 \text{ MPa}$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

c) Smykové napětí

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

účinná šířka průřezu

$$b_{ef} = k_{cr} b$$

$$k_{cr} = 0,67$$

$$\tau_{v,d} = \frac{3 V_d}{2 A} = \frac{3 \cdot 1 \cdot 2 \cdot 3500}{2 \cdot 2 \cdot 0,67 \cdot 50 \cdot 200} = 0,78 \text{ MPa} < 1,48 \text{ MPa}$$

Nosník na smyk vyhovuje.

**Příklad 7.4 Posouzení okapové vaznice na smyk a kroucení**

Vaznice průřezu 140x300 mm je z lepeného lamelového dřeva a je zabudována ve třídě provozu 2. Namáhána je návrhovou posouvající silou  $V_d = 15$  kN (krátkodobou) a návrhovým kroučícím momentem

$M_{tor,d} = 2$  kNm (krátkodobým).

Charakteristická pevnost dřeva ve smyku  $f_{v,g,k} = 2,7$  MPa.

Návrhová pevnost ve smyku

$$f_{v,g,d} = k_{mod} \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,9 \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v kroucení

$$f_{tor,g,d} = k_{shape} \cdot f_{v,g,d} = 1,32 \cdot 1,94 = 2,56 \text{ MPa}$$

Smyk za ohybu

$$\tau_{v,d} = \frac{3V_d}{2A_{ef}} < f_{v,g,d}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{3 \cdot 15 \cdot 10^3}{2 \cdot 0,67 \cdot 140 \cdot 300} = 0,80 \text{ MPa} < 1,94 \text{ MPa}$$

Kroucení

$$\tau_{tor,d} = \frac{M_{tor,d}}{k_{tor} h b^2} \leq f_{tor,g,d}$$

$$\tau_{tor,d} = \frac{2 \cdot 10^6}{0,249 \cdot 300 \cdot 140^2} = 1,37 \text{ MPa} < 2,56 \text{ MPa}$$

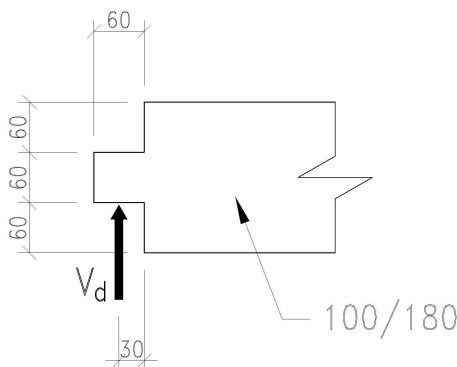
Tab. Součinitel  $k_{tor}$

$h/b$	1	1,2	1,5	2	3	5	10	>10
$k_{tor}$	0,208	0,219	0,231	0,246	0,267	0,291	0,313	0,333

Vaznice na smyk a kroucení vyhovuje.

**Příklad 7.5 Posouzení čepu nosníku**

Nosník s čepem (viz obr.) je proveden z rostlého dřeva a zabudován je ve třídě provozu 1. Materiálové parametry dřeva jsou  $f_{v,k} = 2,4$  MPa a  $f_{c,90,k} = 5,1$  MPa. Čep je zatížen návrhovou posouvající silou  $V_d = 2,7$  kN (střednědobou).



Návrhové pevnosti dřeva ve smyku a v tlaku kolmo k vláknům

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{2,4}{1,3} = 1,48 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{5,1}{1,3} = 3,14 \text{ MPa}$$

Součinitel koncentrace smykového napětí v místě čepu

$$k_v = \frac{k_n \left( 1 + \frac{1,1 i^{1,5}}{\sqrt{h}} \right)}{\sqrt{h} \left[ \sqrt{\alpha(1-\alpha)} + 0,8 \frac{x}{h} \sqrt{\frac{1}{\alpha} - \alpha^2} \right]} = \frac{5}{\sqrt{180} \left[ \sqrt{\frac{60}{180} \left( 1 - \frac{60}{180} \right)} + 0,8 \frac{30}{180} \sqrt{\frac{180}{60} - \left( \frac{60}{180} \right)^2} \right]} = 0,534$$

Posouzení čepu nosníku na smyk a otláčení

$$\tau_d \leq k_v f_{v,d} = 0,534 \cdot 1,48 = 0,79 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,90} f_{c,90,d} = 1 \cdot 3,14 = 3,14 \text{ MPa}$$

$$\tau_d = 1,5 \frac{V_d}{b h_{\text{ef}}} = 1,5 \frac{2,7 \cdot 10^3}{100 \cdot 60} = 0,68 \text{ MPa} < 0,79 \text{ MPa}$$

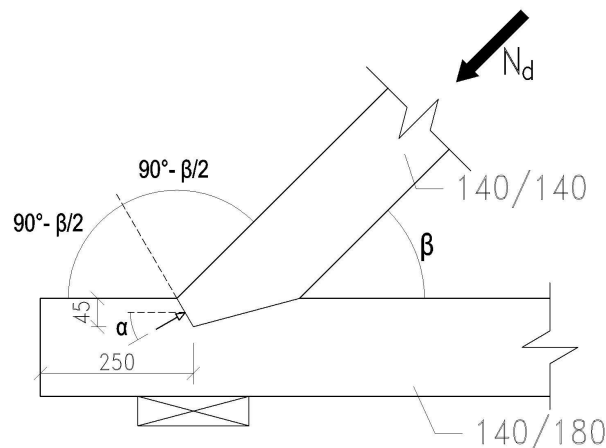
$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b \ell} = \frac{2,7 \cdot 10^3}{100 \cdot 60} = 0,45 \text{ MPa} < 3,14 \text{ MPa}$$

Čep nosníku vyhovuje.

**Příklad 7.6 Posouzení šikmého jednoduchého zapuštění**

Šikmé jednoduché zapuštění (viz obr.) je provedeno z rostlého dřeva. Materiálové parametry rostlého dřeva jsou  $f_{c,0,k} = 20$  MPa,  $f_{c,90,k} = 5,1$  MPa a  $f_{v,k} = 2,4$  MPa. Šikmý prvek zapuštění svírá s vodorovným prvkem úhel  $\beta = 45^\circ$ .

V ose šikmého prvku působí návrhová osová síla  $N_d = 55$  kN (střednědobá).



Návrhové pevnosti dřeva v tlaku rovnoběžně a kolmo k vláknům

$$f_{c,0,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,0,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{20}{1,3} = 12,31 \text{ MPa}$$

$$f_{c,90,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{c,90,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{5,1}{1,3} = 3,14 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost v tlaku šikmo k vláknům (vztahující se k posouzení otláčení v čelní ploše zapuštění výšky

45 mm),  $k_{c,90} = 1,0$ ,  $\alpha = \beta / 2$ .

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{k_{c,90} f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha} = \frac{12,31}{\frac{12,31}{3,14} \sin^2 22,5^\circ + \cos^2 22,5^\circ} = 8,62 \text{ MPa}$$

Návrhová pevnost dřeva ve smyku

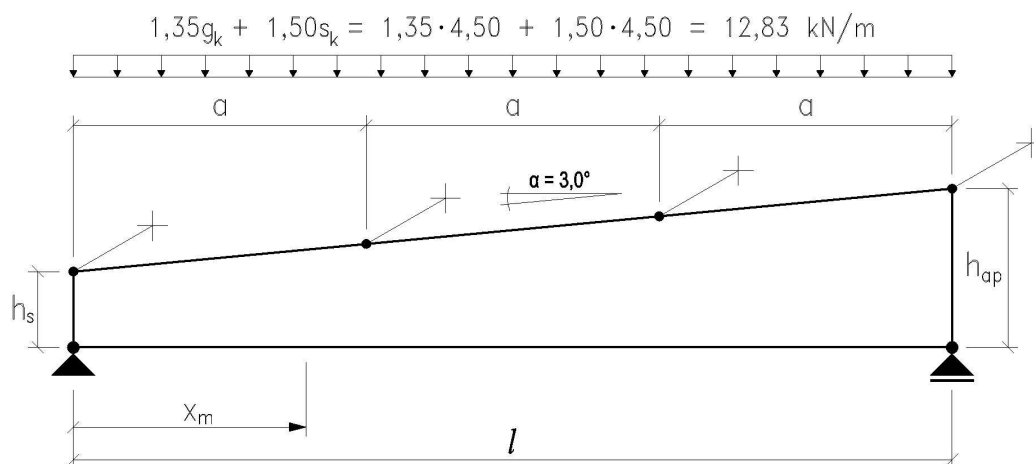
$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,k}}{\gamma_M} = 0,8 \frac{2,4}{1,3} = 1,48 \text{ MPa}$$

Posouzení zapuštění na otláčení a usmyknutí

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_d \cos^2 \alpha}{b t_z} = \frac{55 \cdot 10^3 \cos^2 22,5^\circ}{140 \cdot 45} = 7,45 \text{ MPa} < 8,62 \text{ MPa}$$

$$\tau_{v,d} = \frac{N_d \cos \beta}{b \ell_z} = \frac{55 \cdot 10^3 \cos 45^\circ}{140 \cdot 250} = 1,11 \text{ MPa} < 1,48 \text{ MPa}$$

Šikmé jednoduché zapuštění vyhovuje.

**Příklad 7.7 Posouzení pultového nosníku**

Lepené lamelové dřevo GL24h (podle EN 14080),  $\gamma_M = 1,25$ ;

Třída provozu 1,  $k_{mod} = 0,90$

Rozměry nosníku:

$b = 140 \text{ mm}$ ,  $h_s = 571 \text{ mm}$ ,  $h_{ap} = 1\,200 \text{ mm}$ ,  $l = 12\,000 \text{ mm}$ ,

$a = 4\,000 \text{ mm}$  (vzdálenost příčných výztužných podpěr)

Návrhové pevnosti

$$f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{24,0}{1,25} = 17,28 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ N/mm}^2$$

Vzdálenost průřezu s maximálním ohybovým napětím od podpěry

$$x_m = \frac{l}{\left(1 + \frac{h_{ap}}{h_s}\right)} = \frac{12\,000}{\left(1 + \frac{1\,200}{571}\right)} = 3\,869 \text{ mm}$$

Výška nosníku v místě maximálního napětí

$$h_{x_m} = h_s + \frac{(h_{ap} - h_s)}{l} \cdot x_m = 571 + \frac{(1\,200 - 571)}{12\,000} \cdot 3\,869 = 774 \text{ mm}$$

Návrhové vnitřní síly

$$V_d = \frac{(g_d + s_d) \cdot l}{2} = \frac{12,83 \cdot 12,00}{2} = 76,95 \text{ kN}$$

$$M_{x_{m,d}} = V_d \cdot x_m - (g_d + s_d) \cdot \frac{x_m^2}{2} = 76,95 \cdot 3,87 - 12,83 \cdot \frac{3,87^2}{2} = 201,76 \text{ kNm}$$

Posouzení nosníku v místě maximálního ohybového napětí

- krajní vlákna nosníku na tažené straně (vlákna nejsou seříznuta)

$$\sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h_{x_m}^2} = \frac{6 \cdot 201,76 \cdot 10^6}{140 \cdot 774^2} = 14,43 \text{ N/mm}^2$$

Pro  $\alpha = 0^0 \rightarrow k_{m,\alpha} = 1,0$

$$\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,g,d}} = \frac{14,43}{1,0 \cdot 17,28} = 0,84 < 1,0$$

- krajní vlákna nosníku na tlačené straně (vlákna jsou seříznuta)

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = 14,43 \text{ N/mm}^2$$

Pro  $\alpha = 3^0$ :

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

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{17,28}{1,5 \cdot 1,94} \cdot \operatorname{tg} 3,0\right)^2 + \left(\frac{17,28}{1,94} \cdot \operatorname{tg}^2 3,0\right)^2}} = 0,91$$

$$\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,g,d}} = \frac{14,43}{0,91 \cdot 17,28} = 0,92 < 1,0$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

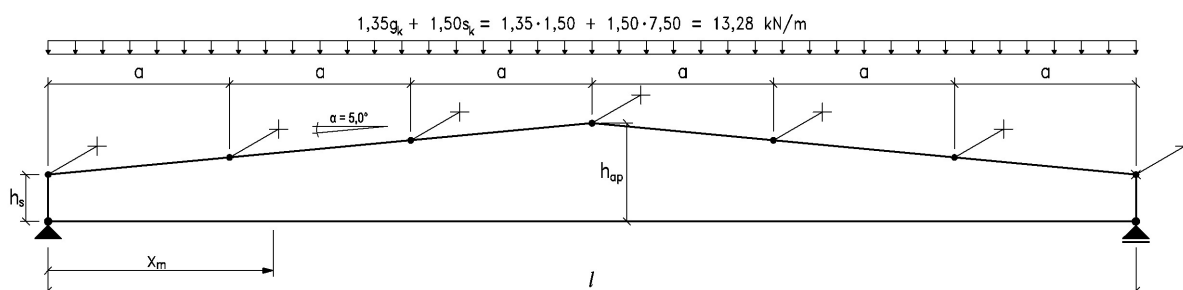
Posouzení nosníku na smyk v podpěrách

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} = 1,5 \cdot \frac{76,95 \cdot 10^3}{140 \cdot 571} = 1,44 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,g,d}} = \frac{1,44}{1,94} = 0,74 < 1,0$$

Nosník na smyk vyhovuje.



**Příklad 7.8 Posouzení sedlového nosníku**

Lepené lamelové dřevo GL24h (podle EN 14080),  $\gamma_M = 1,25$ ;

Třída provozu 2,  $k_{mod} = 0,90$

Rozměry nosníku:

$b = 180 \text{ mm}$ ,  $h_s = 750 \text{ mm}$ ,  $h_{ap} = 1800 \text{ mm}$ ,  $l = 24000 \text{ mm}$ ,

$a = 4000 \text{ mm}$  (vzdálenost příčných výztužných podpěr)

**Návrhové pevnosti**

$$f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{24,0}{1,25} = 17,28 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{v,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{v,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{c,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{c,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{2,7}{1,25} = 1,94 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{0,4}{1,25} = 0,29 \text{ N/mm}^2$$

Vzdálenost průřezu s maximálním ohybovým napětím od podpěry

$$x_m = \frac{l \cdot h_s}{2 \cdot h_{ap}} = \frac{24000 \cdot 750}{2 \cdot 1800} = 5000 \text{ mm}$$

Výška nosníku v místě maximálního napětí

$$h_{x_m} = h_s + \frac{(h_{ap} - h_s)}{l} \cdot x_m = 750 + \frac{(1800 - 750)}{24000} \cdot 5000 = 1188 \text{ mm}$$

## Návrhové vnitřní síly

$$V_d = \frac{(g_d + s_d) \cdot l}{2} = \frac{13,28 \cdot 24,00}{2} = 159,36 \text{ kN}$$

$$M_{x_m,d} = V_d \cdot x_m - (g_d + s_d) \cdot \frac{x_m^2}{2} = 159,36 \cdot 5,00 - 13,28 \cdot \frac{5,00^2}{2} = 630,80 \text{ kNm}$$

$$M_{ap,d} = \frac{(g_d + s_d) \cdot l^2}{8} = \frac{13,28 \cdot 24,00^2}{8} = 956,16 \text{ kNm}$$

## Posouzení nosníku v místě maximálního ohybového napětí

- krajní vlákna nosníku na tažené straně (vlákna nejsou seříznuta)

$$\sigma_{m,0,d} = \frac{6 \cdot M_d}{b \cdot h_{x_m}^2} = \frac{6 \cdot 630,80 \cdot 10^6}{180 \cdot 1188^2} = 14,90 \text{ N/mm}^2$$

Pro  $\alpha = 0^0 \rightarrow k_{m,\alpha} = 1,0$

$$\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,g,d}} = \frac{14,90}{1,0 \cdot 17,28} = 0,86 < 1,0$$

- krajní vlákna nosníku na tlačené straně (vlákna jsou seříznuta)

$$\sigma_{m,\alpha,d} = \sigma_{m,0,d} = 14,90 \text{ N/mm}^2$$

Pro  $\alpha = 5,0^0$ :

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

$$= \frac{1}{\sqrt{1 + \left( \frac{17,28}{1,5 \cdot 1,94} \cdot \operatorname{tg} 5,00 \right)^2 + \left( \frac{17,28}{1,94} \cdot \operatorname{tg}^2 5,00 \right)^2}} = 0,89$$

$$\frac{\sigma_{m,0,d}}{k_{m,\alpha} \cdot f_{m,g,d}} = \frac{14,90}{0,89 \cdot 17,28} = 0,97 < 1,0$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

## Posouzení nosníku na smyk v podpěrách

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{b \cdot h} = 1,5 \cdot \frac{159,36 \cdot 10^3}{180 \cdot 750} = 1,77 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,g,d}} = \frac{1,77}{1,94} = 0,91 < 1,0$$

Nosník na smyk vyhovuje.

Posouzení nosníku na ohyb ve vrcholové oblasti

$$\sigma_{m,ap,d} = k_\ell \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

$$\text{Přičemž } k_\ell = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^3, \alpha_{ap} = 5,0^0 \text{ a } r = \infty \rightarrow \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) = 0$$

$$k_\ell = k_1 = 1 + 1,4 \cdot \text{tg } \alpha_{ap} + 5,4 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{ap} = 1 + 1,4 \cdot \text{tg } 5,0 + 5,4 \cdot \text{tg}^2 5,0 = 1,16$$

$$\sigma_{m,ap,d} = k_\ell \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 1,16 \cdot \frac{6 \cdot 956,16 \cdot 10^6}{180 \cdot 1800^2} = 11,41 \text{ N/mm}^2$$

Pro sedlový nosník  $k_r = 1,0$

$$\frac{\sigma_{m,ap,d}}{k_r \cdot f_{m,g,d}} = \frac{11,41}{1,0 \cdot 17,28} = 0,66 < 1,0$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

Posouzení nosníku na tah kolmo k vláknům

$$\sigma_{t,90,ap,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

$$\text{Přičemž } k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{ap}}{r}\right)^2, \alpha_{ap} = 5,0^0 \text{ a } r = \infty \rightarrow \left(\frac{h_{ap}}{r}\right) = 0$$

$$k_p = k_5 = 0,2 \cdot \text{tg } \alpha_{ap} = 0,2 \cdot \text{tg } 5,0 = 0,0175$$

$$\sigma_{t,90,ap,d} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2} = 0,0175 \cdot \frac{6 \cdot 956,16 \cdot 10^6}{180 \cdot 1800^2} = 0,17 \text{ N/mm}^2$$

Pro referenční objem  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  a objem vrcholové oblasti  $V$

$$V = b \cdot h_{ap}^2 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg } \alpha_{ap}}{4}\right) = 0,18 \cdot 1,80^2 \cdot \left(1 - \frac{\text{tg } 5,0}{4}\right) = 0,57 \text{ m}^3$$

stanovíme součinitel objemu

Petr Kuklík

## Dimenzování prvků dřevěných konstrukcí

proLignum

$$k_{\text{vol}} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0,2} = \left( \frac{0,01}{0,57} \right)^{0,2} = 0,45 \text{ a součinitel rozdělení napětí ve vrcholové oblasti}$$

$k_{\text{dis}} = 1,4$  pro sedlový nosník

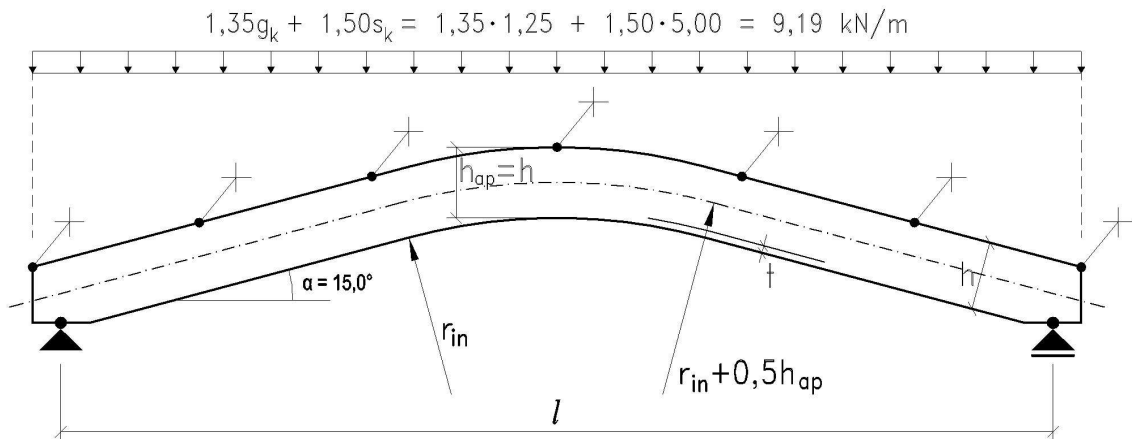
$$\frac{\sigma_{t,90,\text{ap,d}}}{k_{\text{dis}} \cdot k_{\text{vol}} \cdot f_{t,90,\text{g,d}}} = \frac{0,17}{1,4 \cdot 0,45 \cdot 0,29} = 0,93 < 1,0$$

Nosník na tah kolmo k vláknům vyhovuje.

Poznámka:

Protože uprostřed nosníku je nulová posouvající síla není nutné provést posouzení pro kombinaci smyku a tahu kolmo k vláknům.

## Příklad 7.9 Posouzení zakřiveného nosníku



Lepené lamelové dřevo GL28h (podle EN 14080),  $\gamma_M = 1,25$ ;

Třída provozu 2,  $k_{mod} = 0,90$

Rozměry nosníku:

$b = 180 \text{ mm}$ ,  $h = h_{ap} = 1600 \text{ mm}$ ,  $l = 20\,000 \text{ mm}$ ,  $r_{in} = 15\,000 \text{ mm}$ ,  $t = 40 \text{ mm}$

## Návrhové pevnosti

$$f_{m,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{m,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{28,0}{1,25} = 20,16 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{t,90,g,d} = k_{mod} \cdot \frac{f_{t,90,g,k}}{\gamma_M} = 0,90 \cdot \frac{0,45}{1,25} = 0,32 \text{ N/mm}^2$$

## Návrhové vnitřní síly

$$V_d = \frac{(g_d + s_d) \cdot l}{2} = \frac{9,19 \cdot 20,00}{2} = 91,90 \text{ kN}$$

$$M_{max,d} = M_{ap,d} = \frac{(g_d + s_d) \cdot l^2}{8} = \frac{9,19 \cdot 20,00^2}{8} = 459,50 \text{ kNm}$$

## Posouzení nosníku na ohyb

$$\sigma_{m,max,d} = \sigma_{m,ap,d} = k_\ell \cdot \frac{6 \cdot M_{ap,d}}{b \cdot h_{ap}^2}$$

$$\text{Přičemž } k_{\ell} = k_1 + k_2 \cdot \left(\frac{h_{\text{ap}}}{r}\right) + k_3 \cdot \left(\frac{h_{\text{ap}}}{r}\right)^2 + k_4 \cdot \left(\frac{h_{\text{ap}}}{r}\right)^3 \text{ a } \alpha_{\text{ap}} = 0^0$$

$$k_1 = 1 + 1,4 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} + 5,4 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{\text{ap}} = 1 + 1,4 \cdot \text{tg } 0 + 5,4 \cdot \text{tg}^2 0 = 1,00$$

$$k_2 = 0,35 - 8 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} = 0,35 - 8 \cdot \text{tg } 0 = 0,35$$

$$k_3 = 0,6 + 8,3 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} - 7,8 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{\text{ap}} = 0,6 + 8,3 \cdot \text{tg } 0 - 7,8 \cdot \text{tg}^2 0 = 0,60$$

$$k_4 = 6 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{\text{ap}} = 6 \cdot \text{tg}^2 0 = 0$$

$$r = r_{\text{in}} + 0,5 \cdot h_{\text{ap}} = 15\,000 + 0,5 \cdot 1\,600 = 15\,800 \text{ mm}$$

$$k_{\ell} = 1,00 + 0,35 \cdot \left(\frac{1600}{15800}\right) + 0,60 \cdot \left(\frac{1600}{15800}\right)^2 + 0 \cdot \left(\frac{1600}{15800}\right)^3 = 1,04$$

$$\sigma_{\text{m,ap,d}} = k_{\ell} \cdot \frac{6 \cdot M_{\text{ap,d}}}{b \cdot h_{\text{ap}}^2} = 1,04 \cdot \frac{6 \cdot 459,50 \cdot 10^6}{180 \cdot 1600^2} = 6,22 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Pro } \frac{r_{\text{in}}}{t} = \frac{15000}{40} = 375 > 240 \text{ je } k_r = 1,00$$

$$\frac{\sigma_{\text{m,ap,d}}}{k_r \cdot f_{\text{m,g,d}}} = \frac{6,22}{1,00 \cdot 20,16} = 0,31 < 1,0$$

Nosník na ohyb vyhovuje.

Posouzení nosníku na tah kolmo k vláknům

$$\sigma_{\text{t,90,ap,d}} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{\text{ap,d}}}{b \cdot h_{\text{ap}}^2}$$

$$\text{Přičemž } k_p = k_5 + k_6 \cdot \left(\frac{h_{\text{ap}}}{r}\right) + k_7 \cdot \left(\frac{h_{\text{ap}}}{r}\right)^2 \text{ a } \alpha_{\text{ap}} = 0^0$$

$$k_5 = 0,2 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} = 0,2 \cdot \text{tg } 0 = 0$$

$$k_6 = 0,25 - 1,5 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} + 2,6 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{\text{ap}} = 0,25 - 1,50 \cdot \text{tg } 0 + 2,6 \cdot \text{tg}^2 0 = 0,25$$

$$k_7 = 2,1 \cdot \text{tg } \alpha_{\text{ap}} - 4 \cdot \text{tg}^2 \alpha_{\text{ap}} = 2,1 \cdot \text{tg } 0 - 4 \cdot \text{tg}^2 0 = 0$$

$$k_p = 0 + 0,25 \cdot \left(\frac{1600}{15800}\right) + 0 \cdot \left(\frac{1600}{15800}\right)^2 = 0,0253$$

$$\sigma_{\text{t,90,ap,d}} = k_p \cdot \frac{6 \cdot M_{\text{ap,d}}}{b \cdot h_{\text{ap}}^2} = 0,0253 \cdot \frac{6 \cdot 459,50 \cdot 10^6}{180 \cdot 1600^2} = 0,15 \text{ N/mm}^2$$

Pro referenční objem  $V_0 = 0,01 \text{ m}^3$  a objem vrcholové oblasti  $V$

$$V = \frac{\beta \cdot \pi}{180} \cdot b \cdot (h_{\text{ap}}^2 + 2 \cdot r_{\text{in}} \cdot h_{\text{ap}}) = \frac{15 \cdot \pi}{180} \cdot 0,18 \cdot (1,60^2 + 2 \cdot 15,00 \cdot 1,60) = 2,38 \text{ m}^3$$

stanovíme součinitel objemu

$$k_{\text{vol}} = \left( \frac{V_0}{V} \right)^{0,2} = \left( \frac{0,01}{2,38} \right)^{0,2} = 0,335 \text{ a}$$

$k_{\text{dis}} = 1,4$  pro zakřivené nosníky

$$\frac{\sigma_{t,90,\text{ap,d}}}{k_{\text{dis}} \cdot k_{\text{vol}} \cdot f_{t,90,\text{g,d}}} = \frac{0,15}{1,4 \cdot 0,335 \cdot 0,32} = 1,00$$

Nosník na tah kolmo k vláknům vyhovuje.

### Literatura

- [1] Blass, H. J. et al.: "STEP 1 - Timber Engineering", Centrum Hout, The Netherlands, 1995
- [2] Kuklík, P.: "Timber Structures 1", ČVUT Praha, 2007, ISBN 978-80-01-03614-3
- [3] Kolektiv: Vzdělávací materiály pro navrhování a zkoušení dřevěných konstrukcí, Projekt TEMTIS
- [4] ČSN EN 1995 -1-1 Eurokód 5: Navrhování dřevěných konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla - Společná pravidla a pravidla pro pozemní stavby