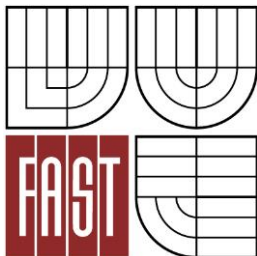




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV KOVOVÝCH A DŘEVĚNÝCH KONSTRUKCÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF METAL AND TIMBER STRUCTURES

KLOPENÍ TENKOSTĚNNÝCH OCELOVÝCH NOSNÍKŮ S OTVORY VE STĚNĚ

LATERAL TORSIONAL BUCKLING OF THIN-WALLED STEEL BEAMS WITH WEB HOLES

TEZE DIZERTAČNÍ PRÁCE
DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. MARTIN HORÁČEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. JINDŘICH MELCHER, DrSc.

BRNO 2016

Abstrakt

Současný trend navrhování nosných ocelových konstrukcí vede z důvodu úspory materiálu k častému používání tenkostěnných za studena tvářených ocelových profilů. V praxi jsou rozsáhle používané různé systémy tenkostěnných vaznic a paždíků široké škály tvarů příčného řezu. Tenkostěnné za studena tvarované profily jsou často vyráběny s otvory ve stěně. Tyto otvory jsou používány především z důvodu vedení elektroinstalací, vodovodních a odpadních potrubí, vzduchotechniky, sprinklerových systémů apod. Konkrétním příkladem tenkostěnných ocelových profilů jsou nosníky typu Sigma používané v systémech dodatečně instalovaných podlaží ve skladovacích objektech.

Tématem dizertační práce je analýza, posouzení a experimentální ověření technického řešení tenkostěnného profilu s otvory se zřetelem na problematiku klopení při ohybu. Cílem je rozvíjet poznání o reálných vlastnostech nosných ocelových dílců uvažovaného konstrukčního uspořádání a umožnit upřesnění metod jejich analýzy a navrhování v průmyslové praxi.

Klíčová slova

klopení, nosník s otvory ve stěně, náhradní průřez, experimentální verifikace

Abstract

The current trend in the design of steel structures leads, due to the saving of the material, to the frequent use of thin-walled cold formed steel sections. In practice are widely used various systems of thin-walled steel purlins and wall girders of different types of cross-sectional shapes. Thin cold-formed steel profiles are often manufactured with web holes. These web openings are primarily used for the installation of wiring, water or drain piping, ventilation or sprinkler systems, etc. A specific example of thin-walled steel profiles are Sigma beams used in additionally installed built-in floors systems in warehouses.

The aim of doctoral thesis is the analysis, assessment and experimental verification of the technical solution of thin-walled steel beams with web openings loaded in bending with respect to lateral torsional buckling. The objective is to develop knowledge about the real properties of steel members of considered structural arrangement in order to specify the methods of analysis and design in industrial practice.

Key words

lateral torsional beam buckling, beam with web holes, substitute cross-section, experimental verification

OBSAH

1 ÚVOD.....	4
1.1 Charakteristika nosníků typu Sigma	4
1.2 Praktické aplikace.....	5
2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY	6
2.1 Vývoj teorie klopení	6
2.2 Teorie stability ohybu v pružném oboru	7
2.3 Vzpěrná únosnost skutečného nosníku	8
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	10
4 TEORETICKÁ ANALÝZA	10
4.1 Výpočet průřezových charakteristik.....	10
4.2 Stanovení únosnosti při klopení prutu s náhradním průřezem.....	11
4.2.1 Stanovení únosnosti při klopení dle ČSN EN 1993-1-1.....	11
4.2.2 Ověření prutu s náhradním průřezem MKP výpočtem.....	12
5 NUMERICKÁ ANALÝZA	13
6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA.....	15
6.1 Experimentální stanovení průřezových charakteristik.....	15
6.1.1 Stanovení torzní tuhosti při prostém a složeném kroucení	16
6.1.2 Stanovení ohybové tuhosti při ohybu v rovině větší a menší tuhosti	19
6.2 Experimentální ověření únosnosti při klopení	22
6.2.1 Popis zkušební sestavy	22
6.2.2 Vyhodnocení experimentů z hlediska mezní únosnosti	25
7 ZÁVĚRY DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	27
8 LITERATURA	29
8.1 Publikace	29
8.2 Publikace autora (výběr)	29
8.3 Technické předpisy a normy	30
8.4 Odkazy.....	30

1 ÚVOD

Tato dizertační práce se zabývá otázkami skutečného působení tenkostěnných ocelových nosníků s otvory ve stěně s ohledem na verifikaci jejich spolehlivosti (odolnosti) a efektivnosti. Řešená problematika vychází z požadavků inženýrské praxe na stanovení zjednodušeného způsobu návrhu a posuzování ohýbaných tenkostěnných prutů oslabených otvory ve stěně.

Dizertační práce shrnuje dosavadní poznatky z problematiky ohýbaných tenkostěnných ocelových nosníků se zřetelem na možnost prostorové ztráty stability při tzv. klopení (sklopení nosníku charakterizované jeho vybočením z roviny prvotního ohybu při současném zkroucení).

Teoretické řešení popisuje chování nosníků prostřednictvím řešení diferenciálních rovnic rovnováhy přetvořeného elementu tenkostěnného ohýbaného prutu. Obecnými výchozími parametry analýzy a návrhu nosných dílců jsou hodnoty jejich skutečné ohybové tuhosti a tuhosti při kroucení. V případě nosníků s otvory je diskutabilní prakticky používané řešení vycházející z váženého průměru náhradních průřezových charakteristik plného a oslabeného průřezu. Přínosem této práce má být ověření tohoto řešení či případný návrh alternativních postupů verifikovaných na základě numerických a experimentálních analýz.

Numerické analýzy jsou zaměřeny na využití dostupných softwarů za účelem predikce únosnosti nosníků s otvory při klopení. Detailněji je řešeno zahrnutí otvorů ve stěně do výpočtových modelů, které není u základních softwarů pro řešení prutových soustav možné modelovat.

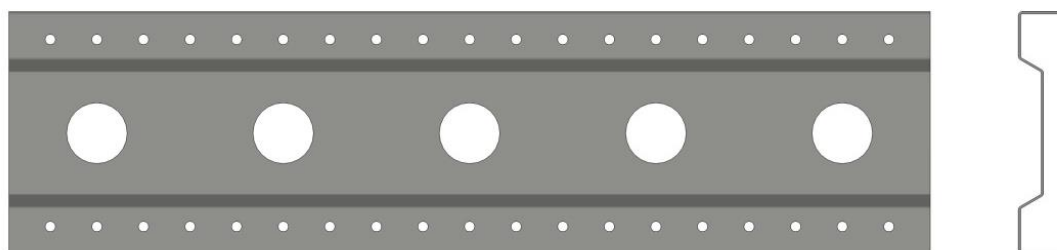
Experimentální analýzy jsou zaměřeny na dva dílčí úkoly. Prvním úkolem je ověření skutečných průřezových charakteristik definujících ohybovou a torzní tuhost nosníků. Vyšetřovány jsou jak ohybové tuhosti při ohybu na tuhou a měkkou osu, tak i tuhosti při prostém a vázaném kroucení. Z provedených experimentů lze vyčíslit hodnoty základních průřezových charakteristik, jako jsou momenty setrvačnosti k oběma osám, moment tuhosti v prostém kroucení a výsečový moment setrvačnosti. Druhým dílčím úkolem je následné ověření skutečné ohybové únosnosti nosníků s otvory se zřetelem na ztrátu stability při klopení.

1.1 CHARAKTERISTIKA NOSNÍKŮ TYPU SIGMA

Nosníky typu Sigma jsou tenkostěnné za studena tvářené profily vyráběné zejména z oceli konstrukčních tříd S355MC nebo S420MC.

Nosníky jsou po celé své délce ve stěně v úrovni neutrálné osy oslabeny kruhovými otvory \varnothing 65 mm v osové vzdálenosti 200 mm. Výška činí 260 mm, šířka pásnic 50 mm, tloušťka stěny materiálu je rovna 2.5 mm. Po výšce profilu jsou situovány 2 řady

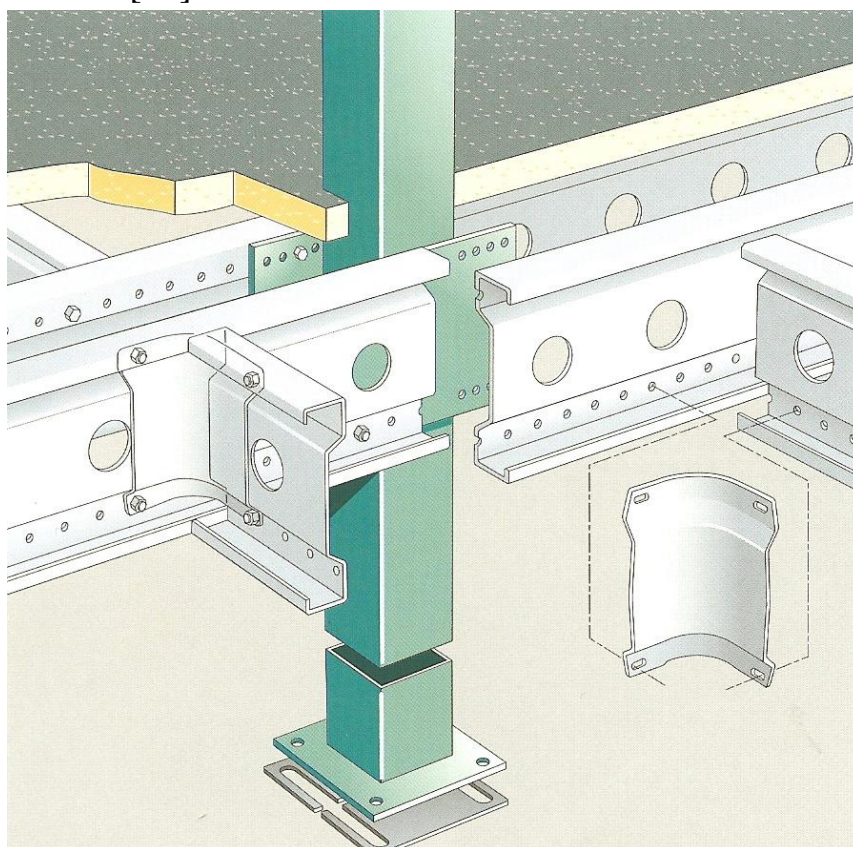
kruhových otvorů Ø 11 mm sloužících pro vzájemné spojování těchto nosníků prostřednictvím šroubovaných konektorů.



Obr. 1.1 Nosníky typu Sigma - schéma

1.2 PRAKTICKÉ APLIKACE

Nosníky typu Sigma jsou používány především jako stropní nosníky u vestavěných podlaží ve skladovacích prostorech. Konstrukční systém vestavných podlaží je ilustrován na Obr. 1.2 [35].



Obr. 1.2 Konstrukční systém vestavného podlaží

Vestavná podlaží jsou vynášena ocelovými sloupy, ke kterým se přes navařené styčnickové desky šroubově připojují tzv. primární nosníky (průvlaky). Mezi jednotlivé primární nosníky jsou vkládány tzv. sekundární nosníky (stropnice) stejného průřezu. Spojení průvlaků a stropnic je realizováno prostřednictvím šroubovaných konektorů.

2 SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY

2.1 VÝVOJ TEORIE KLOPENÍ

Podrobné shrnutí vývoje teorie klopení uvedl ve své doktorské dizertační práci J. Melcher [9]. Následující informace jsou stručným výtahem z této publikace.

Problémem stability úzkého obdélníkového průřezu při ohybu se již v roce 1899, nezávisle na sobě, zabývali L. Prandtl [12] a A. G. Michell [10]. V roce 1905 předložil S. P. Timošenko analýzu klopení příčně zatížených tenkostěnných ocelových prutů, ve které se zabýval stabilitou rovinného ohybu nosníku průřezu I s uvážením vlivu ohybové tuhosti pásnic při vybočení z roviny prvotního přetvoření. Později (1910) aplikoval na tento případ svou nově rozpracovanou energetickou metodu. Řešení problému stability ohybu přibližnou metodou postupných aproximací rozpracoval v roce 1935 F. Stussi, který se zabýval též vlivem počátečního zakřivení nosníku. Souhrnné pojednání o stabilitě nosníků dvouose symetrického průřezu I zveřejnil v roce 1939 E. Chwalla. V roce 1940 publikoval V. Z. Vlasov [18] obecnou teorii pevnosti a stability tenkostěnných prutů, která obsahovala i rovnice stability při ohybu. V této teorii Vlasov zobecnil Prandtlovy a Timošenkovy dílčí výsledky řešení problému klopení nosníků. Teorií prostorové ztráty stability prutů a nosníků se dále (1942) zabýval J. N. Goodier [6] a dílčí případ řešení pro jednoose souměrný průřez I následně (1943) rozpracoval G. Winter [19]. Obecnou teorií ohybu, kroucení a klopení tenkostěnných prutů otevřeného průřezu uzavřel S. P. Timošenko v roce 1945 cyklus svých významných prací věnovaných problému stability nosníků. K. de Vries [5] se později (1947) zabýval zjednodušením výpočtu klopení válcovaných nosníků dvouose symetrického průřezu I.

V české či slovenské odborné literatuře se problémy teorie či experimentálního výzkumu tenkostěnných ocelových nosníků a jejich navrhování se zřetelem na stabilitní jevy zabývali V. Březina [3], [4], J. Melcher [9], [8], I. Balázš[1], E. Chladný, J. Djubek, A. Mrázik, P. Juhás, J. Studnička [15] a další.

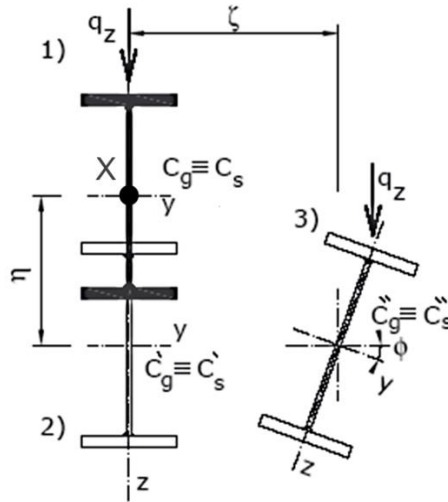
V případě tenkostěnných za studena válcovaných ocelových nosníků s otvory ve stěně je v posledních desetiletí věnována pozornost problematice globální stability, lokálního boulení a distorzního vzpěru. Předními autory zabývající se těmito tématy patří B. W. Schafer [14], Z. Li a C.D. Moen, [11] z Johns Hopkins University v USA, kteří k řešení používají tzv. Direct Strength Method, která byla implementována do severoamerických normativních podkladů pro navrhování tenkostěnných za studena tvářených ocelových profilů [32], [33].

Významným přínosem pro rozvoj navrhování tenkostěnných ocelových konstrukcí se zohledněním pokritického chování štíhlých stěn a s ohledem na problémy týkající se únavy ocelových nosníků s „dýchajícími“ stěnami jsou práce M. Škalouda [16].

2.2 TEORIE STABILITY OHYBU V PRUŽNÉM OBORU

Výchozími rovnicemi teoretické analýzy štíhlých tenkostěnných prutů jsou diferenciální rovnice rovnováhy přetvořeného elementu prutu.

V případě obecného zatížení a tvaru průřezu se tenkostěnný přímý prut prostorově přetvoří, tj. vzniknou tři složky posunutí průřezu v jeho rovině - posun $\xi(x)$ ve směru souřadnicové osy Y, posun $\eta(x)$ ve směru souřadnicové osy Z a pootočení $\varphi(x)$ kolem osy ohybu - a dále posunutí $u(x,y,z)$ bodů střednice průřezu ve směru podélné osy prutu X (deplanace). Jednotlivé složky přetvoření jsou zobrazeny na Obr. 2.1 [9].



Obr. 2.1 Značení složek přetvoření při ztrátě stability při ohybu

Dle Vlasovovy teorie tenkostěnných prutů [18] (podmínky rovnováhy pro přetvořený element - teorie 2. řádu štíhlých prutů) je působení tenkostěnného prutu otevřeného průřezu popsáno následujícími rovnicemi (s příslušnými okrajovými podmínkami) [4]:

$$E \cdot I_z \cdot \xi^{IV} + [N \cdot (\xi' + a_z \cdot \varphi')] + (M_y \cdot \varphi)'' = q_y(x) \quad (2.1)$$

$$E \cdot I_y \cdot \eta^{IV} + [N \cdot (\eta' + a_y \cdot \varphi')] + (M_z \cdot \varphi)'' = q_z(x) \quad (2.2)$$

$$E \cdot I_\omega \cdot \varphi^{IV} - G \cdot I_t \cdot \varphi'' + [i_a^2 \cdot N - 2 \cdot b_z \cdot M_y + 2 \cdot b_y \cdot M_z - 2 \cdot b_\omega \cdot B \cdot \varphi'] + a_z \cdot (N \cdot \xi') - a_y \cdot (N \cdot \eta') - M_z'' \cdot \eta + M_z \cdot \eta'' - M_y'' \cdot \xi + M_y \cdot \xi'' + q_y [\eta + (e_y - a_y) \cdot \varphi] - q_z [\xi + (e_z - a_z) \cdot \varphi] = m(x) \quad (2.3)$$

kde značí

$$i_a^2 = a_y^2 + a_z^2 + i_y^2 + i_z^2 \quad (2.4)$$

$$U_y = \int z \cdot (y^2 + z^2) dA \quad (2.5)$$

$$b_y = \frac{U_z}{2 \cdot I_z} - a_y \quad (2.6)$$

$$U_z = \int y \cdot (y^2 + z^2) dA \quad (2.7)$$

$$b_z = \frac{U_y}{2 \cdot I_y} - a_z \quad (2.8)$$

$$U_\omega = \int \omega \cdot (y^2 + z^2) dA \quad (2.9)$$

$$b_\omega = \frac{U_\omega}{2 \cdot I_\omega} \quad (2.10)$$

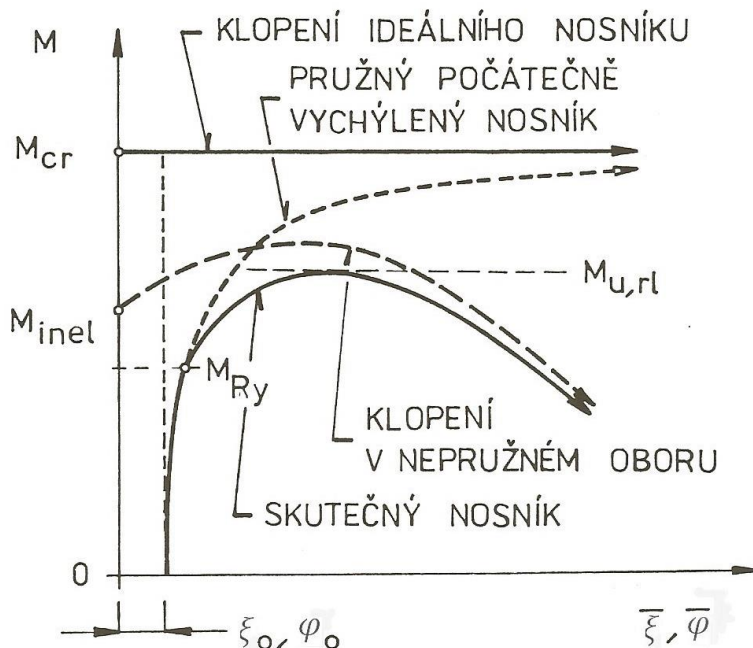
V souladu s pojetím Vlasova je uvažován problém stability ideálního tenkostěnného prutu otevřeného průřezu, který je příčně zatížen. Zatížení prochází středem smyku C_s a působí v rovině, případně rovnoběžně s rovinou větší tuhosti průřezu. V prvotním rovnovážném stavu, tj. při zatížení menším než je kritické, se ideální nosník pouze ohýbá a jeho plné únosnosti (s ohledem na pevnost základního materiálu) lze dosáhnout jen tehdy, je-li zabezpečen proti sklopení. Pokud tomu tak není, dojde v určitém stadiu namáhání ideálního tenkostěnného prutu k rozvětvení (bifurkaci) rovnováhy, nosník ztratí stabilitu a prostorově se přetvoří - vybočí z roviny prvotního ohybu a přitom se zkroutí.

Velikost kritického zatížení lze v závislosti na uložení nosníku, způsobu jeho zatížení a tvaru průřezu stanovit řešením příslušných diferenciálních rovnic stability, jež lze odvodit z výchozího systému rovnic (2.1)(2.2)(2.3).

2.3 VZPĚRNÁ ÚNOSNOST SKUTEČNÉHO NOSNÍKU

Chování skutečného nosníku je oproti chování ideálního nosníku ovlivněno počátečními odchylkami. Mezi ty nejvýznamnější patří počáteční zakřivení osy nosníku v rovině kolmé k rovině ohybu a počáteční pootočení mezipodporových průřezů. Vlivem těchto imperfekcí narůstá od počátku postupně s nárůstem zatížení i odpovídající přetvoření charakterizované vybočením nosníku z roviny prvotního ohybu a jeho zkroucením. Místo řešení problému stability v ohybu je třeba analyzovat příslušný problém vzpěrné pevnosti při ohybu a kroucení [9].

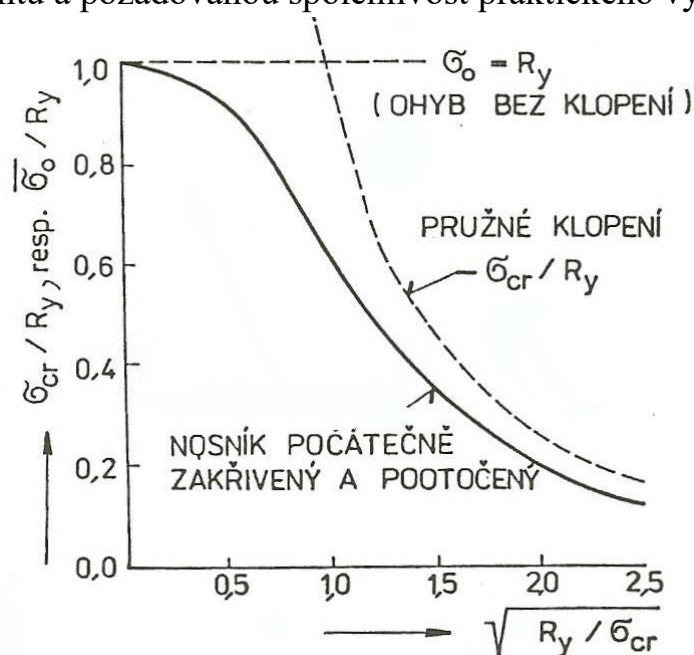
Skutečný nosník vykazuje řadu počátečních odchylek, které snižují jeho únosnost v porovnání s idealizovaným teoretickým modelem, a to při plynulém nárůstu přetvoření již od počátku působení příčného zatížení (viz Obr. 2.2) [9].



Obr. 2.2 Závislost ohybového momentu a odpovídajícího celkového přetvoření

Teorie stability ohybu v pružném a nepružném oboru umožňuje orientaci v problematice klopení nosníků se zřetelem na vliv štiřlostních parametrů, způsob zatížení, typu okrajových podmínek i materiálových charakteristik na kritické hodnoty účinků zatížení v rámci předpokladů příslušného výpočetního modelu. Nicméně reálnou návrhovou (normativní) hladinu únosnosti nosníku je třeba stanovit s přihlédnutím k souhrnnému vlivu všech počátečních imperfekcí, který lze v celém komplexu parametrů této úlohy ověřit vyhodnocením experimentů realizovaných v podmínkách odpovídajících skutečnému působení nosného konstrukčního systému vyrobeného a sestaveného běžnou průmyslovou technologií [9].

Výsledky zkoušek klopení lze výstižně aproximovat spojitou funkční závislostí podle Obr. 2.3 [9] pro vzpěrnou pevnost nosníku počátečně vychýleného z roviny prvotního ohybu. Vhodnou volbou ekvivalentní počáteční odchylky i definováním výchozí únosnosti při nulové štiřlosti nosníku můžeme účelně regulovat a definovat hladinu konvenčního mezního normativního napětí při klopení v návaznosti na výsledky experimentů a požadovanou spolehlivost praktického výpočtu.



Obr. 2.3 Funkční závislost pro vzpěrnou pevnost počátečně vychýleného nosníku

Uvedeným způsobem byla odvozena normativní vzpěrná pevnost tlačných prutů ve smyslu našich předpisů pro navrhování ocelových konstrukcí [9].

V současné době je aplikována spojitá jednoparametrická závislost mezního normativního (návrhového) ohybového momentu $M_{b,Rd}$ na plastickém mezním momentu průřezu M_{pl} a kritickém momentu M_{cr} podle výrazu:

$$\frac{M_{b,Rd}}{M_{pl}} = \frac{1}{\sqrt[n]{1 + \left(\frac{M_{pl}}{M_{cr}}\right)^n}}, \quad (2.11)$$

kde n je volitelný číselný parametr (systémový faktor).

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Tato dizertační práce se zabývá otázkami skutečného působení tenkostěnných ocelových nosníků s otvory ve stěně s ohledem na verifikaci a návrh metod jejich spolehlivosti a efektivnosti.

Cílem teoretické analýzy je shrnutí dosavadních poznatků z oblasti problematiky navrhování tenkostěnných ocelových profilů s hlavním důrazem kladeným na ztrátu globální stability při ohybu – tzv. klopení. Výsledkem teoretické analýzy je vytvoření výpočtového modelu pro stanovení ohybové únosnosti při klopení, který vychází z návrhových procedur uvedených v příslušných platných evropských normách [29], [30]. Oslabení nosníků kruhovými otvory ve stěně je v těchto výpočetních postupech zohledněno zavedením průřezových charakteristik pro tzv. náhradní průřez, které jsou definovány jako vážený průměr průřezových charakteristik plného průřezu a oslabeného průřezu v ose otvoru. Za základ pro stanovení únosnosti při klopení jsou použity výpočetní postupy dle ČSN EN 1993-1-1 [29] a ČSN EN 1993-1-3 [30].

Numerická analýza má za úkol ověřit spolehlivý návrh nosníků s otvory pomocí dostupných softwarů používaných v inženýrské praxi. Jelikož základní softwarové produkty provádějí výpočty na nosnících s konstantním průřezem a nenabízejí možnost modelování otvorů ve stěně, je v rámci numerické analýzy ověřen výpočetní model uvažující otvory ve formě redukované tloušťky stěny materiálu v zóně oslabení konstantně po celé délce profilu. Při numerické analýze je využíván software RFEM od společnosti Dlubal s přídatným modulem RF-FE-LTB [34], který je zaměřený na analýzu ohýbaných prutů s ohledem na ztrátu stabilit při klopení.

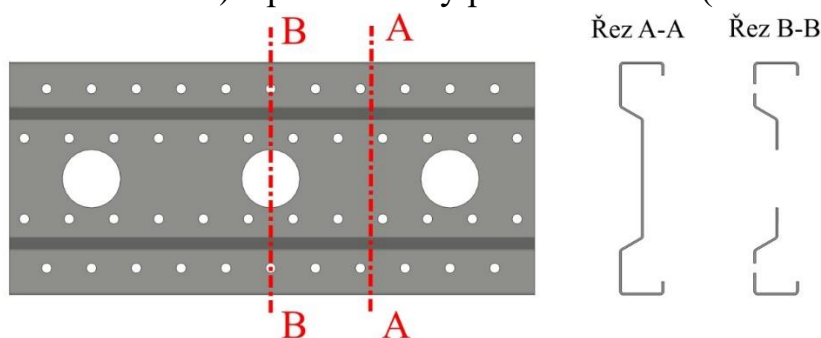
Obecnými výchozími parametry analýzy a návrhu nosných dílců jsou hodnoty jejich skutečné ohybové tuhosti a tuhosti při kroucení. Dílčím úkolem experimentální analýzy je proto verifikace skutečných ohybových a torzních tuhostí nosníků s otvory ve stěně formou stanovení skutečných hodnot základních charakteristik průřezu s otvory. Hlavním cílem experimentální analýzy je vyšetřování skutečného působení tenkostěnných ocelových za studena tvářených nosníků typu Sigma s otvory ve stěně při globální ztrátě stability při ohybu. Vyšetřovány jsou prostě podepřené nosníky tří různých délek. Zvolený způsob zatěžování dvojicí osamělých břemen situovaných ve třetinách rozpětí nosníků umožňuje vodorovné vybočení a volné pootočení průřezu v poli nosníku (tj. volné klopení nosníků).

4 TEORETICKÁ ANALÝZA

4.1 VÝPOČET PRŮŘEZOVÝCH CHARAKTERISTIK

Stanovení průřezových charakteristik je provedeno prostřednictvím počítačového řešení výpočtu ve studentské verzi programu ShapeThin od společnosti Dlubal [34].

Průřezové charakteristiky jsou pomocí tohoto softwaru získány pro plný průřez nosníku (viz Obr. 4.1 řez A-A) a pro oslabený průřez nosníku (řez B-B).



Obr. 4.1 Vyznačené řezy pro výpočet průřezových charakteristik

V návaznosti na požadavky pro další analýzy a výpočty teoretické únosnosti při klopení nosníků oslabených otvory ve stěně je zaváděn tzv. náhradní průřez, kterým se substituuje nosník s otvory s proměnnou geometrií příčných řezů po jeho délce za nosník s konstantním, tzv. náhradním průřezem. Výpočet průřezových charakteristik vychází z analogického postupu pro prolamované nosníky, kdy náhradní průřezové charakteristiky jsou určeny jako vážený průměr z průřezových charakteristik plného a oslabeného průřezu dle následujícího vzorce:

$$X_{sub} = \frac{a \cdot X_A + b \cdot X_B}{a + b} \quad (4.1)$$

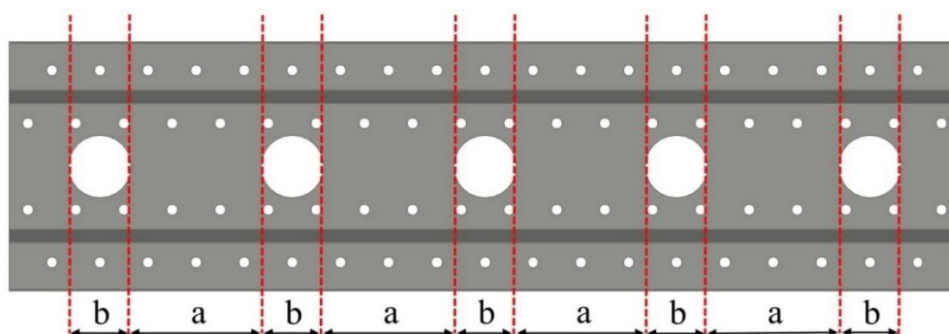
kde X_{sub} je vyšetřovaná průřezová charakteristika náhradního průřezu,

X_A je vyšetřovaná průřezová charakteristika plného průřezu,

X_B je vyšetřovaná průřezová charakteristika oslabeného průřezu,

a je délka úseku nosníku s plným průřezem (viz Obr. 4.2),

b je délka úseku nosníku v místě oslabení průřezem (viz Obr. 4.2).



Obr. 4.2 Dělení nosníku na segmenty a , b

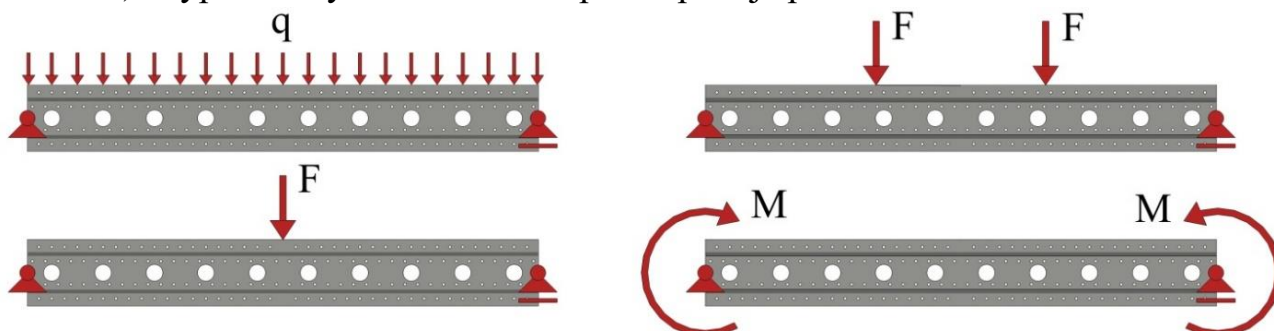
4.2 STANOVENÍ ÚNOSNOSTI PŘI KLOPENÍ PRUTU S NÁHRADNÍM PRŮŘEZEM

4.2.1 Stanovení únosnosti při klopení dle ČSN EN 1993-1-1

Pro stanovení ohybové únosnosti tenkostěnných ocelových nosníků typu Sigma s ohledem na ztrátu příčné a torzní odolnosti je použita metodika uvedená

v současných platných evropských normativních podkladech. Jedná se o kapitolu 6.3.2.1 dokumentu ČSN EN 1993-1-1 [29], která je pro případ tenkostěnných profilů zpřesněna kapitolou 6.2.4 dokumentu ČSN EN 1993-1-3 [30]. Zpřesnění se týká volby křivky vzpěrnosti, které pro případ tenkostěnných nosníků doporučuje užití křivky b se součinitelem imperfekce $\alpha_{LT} = 0,34$.

Pružný kritický moment je stanoven dle národní přílohy NB. 3 normy ČSN EN 1993-1-1 [29]. Při analýze jsou uvažovány prostě podepřené nosníky ($k_y = 1,0$) o třech různých délkách (2, 3 a 4 m), zatížené čtyřmi základními zatěžovacími schémata (viz Obr. 4.3). Výpočet ohybové únosnosti při klopení je proveden v Tab. 4.1.



Obr. 4.3 Uvažovaná zatěžovací schémata

Tab. 4.1 Přehled parametrů výpočtu a výsledných ohybových únosností při klopení

Uložení v kroucení	Zatížení	Délka nosníků L	L_{SUPP} [mm]	k_z	k_w	C_1	C_2	κ_{wt}	ζ_g	ζ_j	μ_{cr}	M_{cr} [kNm]	$M_{el,Rd}$ [kNm]	$\bar{\lambda}_{LT}$	χ_{LT}	$M_{b,Rd}$ [kNm]
Prostě uložení v kroucení	Spojitě zatížení	2 m	1 960	1,00	1,00	1,13	0,46	3,65	3,42	0,00	2,86	11,35	22,61	1,41	0,38	8,52
		3 m	2 960	1,00	1,00	1,13	0,46	2,42	2,27	0,00	2,01	5,28	22,61	2,07	0,20	4,45
		4 m	3 960	1,00	1,00	1,13	0,46	1,81	1,69	0,00	1,61	3,18	22,61	2,67	0,12	2,80
	1 břemeno v L/2	2 m	1 960	1,00	1,00	1,36	0,55	3,65	3,42	0,00	3,19	12,68	22,61	1,34	0,41	9,28
		3 m	2 960	1,00	1,00	1,36	0,55	2,42	2,27	0,00	2,25	5,91	22,61	1,96	0,22	4,93
		4 m	3 960	1,00	1,00	1,36	0,55	1,81	1,69	0,00	1,82	3,57	22,61	2,52	0,14	3,12
	2 břemena v L/3	2 m	1 960	1,00	1,00	1,10	0,51	3,65	3,42	0,00	2,67	10,63	22,61	1,46	0,36	8,09
		3 m	2 960	1,00	1,00	1,10	0,51	2,42	2,27	0,00	1,88	4,95	22,61	2,14	0,19	4,21
		4 m	3 960	1,00	1,00	1,10	0,51	1,81	1,69	0,00	1,52	2,98	22,61	2,75	0,12	2,64
	Koncové momenty	2 m	1 960	1,00	1,00	1,00	0,00	3,65	3,42	0,00	3,79	15,05	22,61	1,23	0,46	10,50
		3 m	2 960	1,00	1,00	1,00	0,00	2,42	2,27	0,00	2,62	6,89	22,61	1,81	0,25	5,63
		4 m	3 960	1,00	1,00	1,00	0,00	1,81	1,69	0,00	2,07	4,06	22,61	2,36	0,16	3,51

4.2.2 Ověření prutu s náhradním průřezem MKP výpočtem

Pro ověření teoretického modelu náhradního prutu byl použit výpočetní programu založený na MKP pro výpočet prostorové ztráty stability s vlivem klopení, jehož autorem je J. Brodniansky ml. (STU Bratislava) [2]. Sestavený program je založený na řešení soustavy diferenciálních rovnic popisujících ztrátu stability při klopení v pružném oboru (viz kapitola 2.2) a umožňuje výpočet stabilitních úloh při zadávání různých tuhostí jednotlivých částí prutu (rozdílná tuhost jednotlivých elementů konstrukce), a proto je vhodný pro řešení pro nosníky s proměnným průřezem. V Tab. 4.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty pružného kritického momentu.

Tab. 4.2 Ověření prutu s náhradním průřezem MKP výpočtem

Uložení v kroucení	Zatížení	Délka nosníků L	L_{SUPP} [mm]	Pružný kritický moment M_{cr} [kNm]					Rozdíl *)
				EC náhradní průřez	Plný průřez	Oslabený průřez	Náhradní průřez	Proměnný průřez	
Prosté uložení v kroucení	Spojitě zatížení	2 m	1 960	11,35	11,72	10,68	11,38	11,36	-0,1%
		3 m	2 960	5,28	5,46	4,93	5,29	5,28	-0,1%
		4 m	3 960	3,18	3,30	2,65	3,18	3,18	-0,1%
	1 břemeno v L/2	2 m	1 960	12,68	12,98	11,85	12,61	12,60	0,7%
		3 m	2 960	5,91	6,07	5,49	5,88	5,87	0,8%
		4 m	3 960	3,57	3,67	3,29	3,55	3,54	0,8%
	2 břemena v L/3	2 m	1 960	10,63	10,96	10,00	10,65	10,61	0,2%
		3 m	2 960	4,95	5,12	4,62	4,96	4,94	0,1%
		4 m	3 960	2,98	3,09	2,76	2,99	2,98	0,3%
	Koncové momenty	2 m	1 960	15,05	15,53	14,05	15,05	15,02	0,2%
		3 m	2 960	6,89	7,12	6,40	6,89	6,87	0,2%
		4 m	3 960	4,06	4,21	3,76	4,06	4,05	0,2%

■ Výpočet dle ČSN EN 1993-1-1 a národní přílohy NB.3 pro náhradní průřez

■ Výsledky získané programem na řešení prostorové ztráty stability při klopení pro prut konstantního průřezu

■ Výsledky získané programem na řešení prostorové ztráty stability při klopení pro prut proměnného průřezu

*) Rozdíl mezi hodnotami stanovenými softwarem pro prut s proměnným průřezem a hodnotami získanými výpočtem dle EC s uvažováním průřezových charakteristik náhradního průřezu.

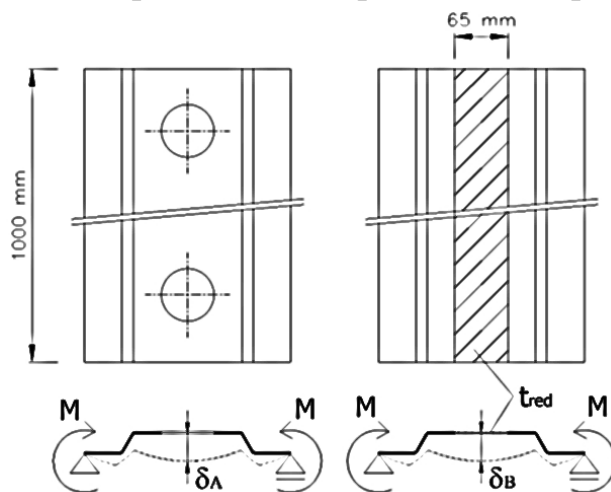
Porovnány jsou hodnoty získané softwarovým výpočtem založeným na MKP analýze na prutu proměnného průřezu s pružným kritickým momentem získaným dle výpočetní procedury zakotvené v národní příloze NB. 3 normy ČSN EN 1993-1-1 [29]. Rozdíly v hodnotách získaných ze srovnání výsledků, pohybující se v řádech desetin procenta, dokazují zcela přesné vystižení chování nosníků s otvory ve stěně prostřednictvím prizmatického prutu s náhradním průřezem.

5 NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerické modelování klopení bylo provedeno pomocí programu RFEM společnosti Dlubal, respektive v přídatném modulu RF-FE-LTB [34]. Tento přídatný modul umožňuje provádět analýzy na prutech s konstantním průřezem, přičemž není možné vytvářet otvory ve stojině nosníků. Ty jsou uvažovány při výpočtu zavedením náhradního pásu konstantní šířky s redukovanou tloušťkou po celé délce prutu v oblasti perforace. Velikost redukované tloušťky ($t_{red} = 2,17$ mm) byla odvozena na základě podmínky zachování stejné příčné ohybové tuhosti stojiny (tedy z rovnosti deformací δ_A a δ_B - viz Obr. 5.1).

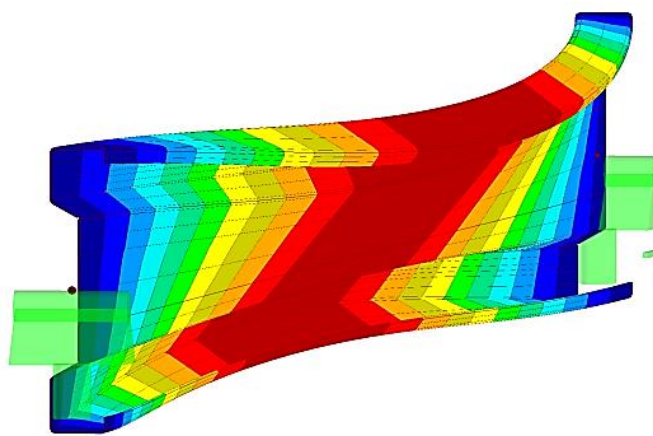
Numerické modelování bylo provedeno na nosnících tří délek (2, 3 a 4 metry) v kombinaci se čtyřmi typy zatížení specifikovaných v kapitole 4.2. Pro každou kombinaci délky nosníku a typu zatížení byly provedeny tři výpočty. První výpočet byl proveden na ideálním nosníku (bez geometrických imperfekcí). Zbývající dvě kalkulace byly provedeny na nosnících s počáteční geometrickou imperfekcí odpovídající prvnímu vlastnímu tvaru prostě podepřeného nosníku typu Sigma

stanoveného stabilitní analýzou (viz Obr. 5.2). Velikosti počátečních zakřivení byly zadány na základě doporučení uvedených v ČSN EN 1993-1-1 [29] pro elastický výpočet ($L/250$ pro křivku klopení b a $L/200$ pro křivku klopení c).



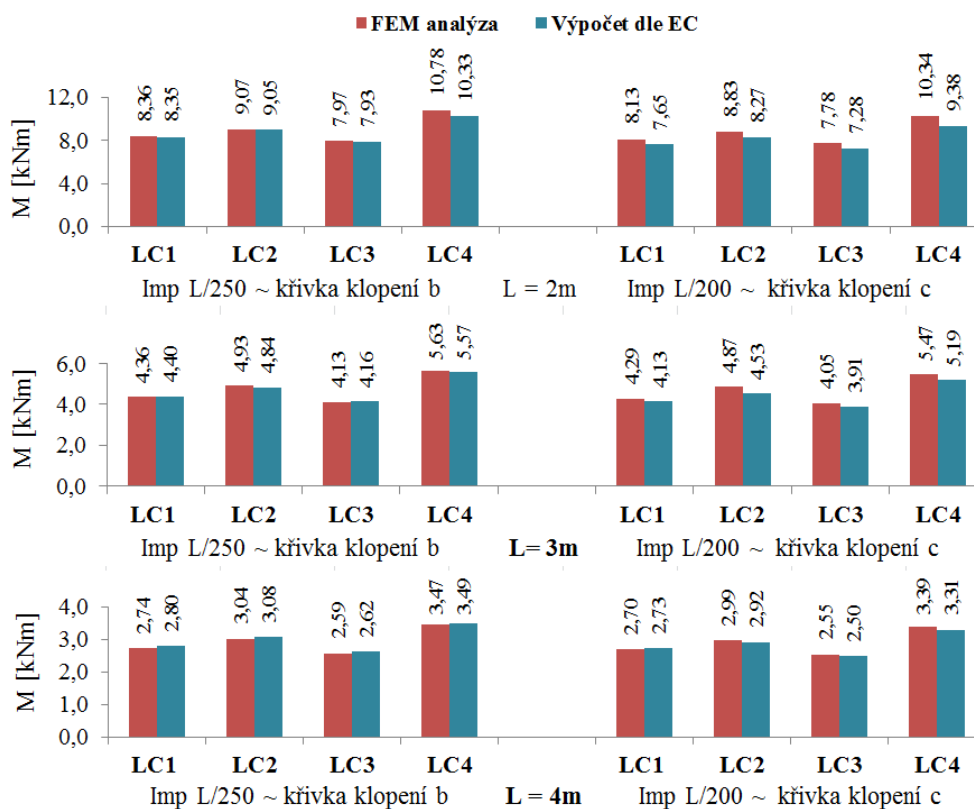
Obr. 5.1 Schéma modelů stěny s perforací a s pásem redukované tloušťky

Numerické výpočty jsou limitovány napětím odpovídajícím mezi kluzu materiálu (355 MPa). Spojité zatížení a zatížení osamělými břemeny byly aplikovány na horní tlačené pásnici horizontálně zarovnané se středem smyku. Výsledky analýzy, které jsou díky uvažovanému působišti zatížení vůči středu smyku porovnatelné s charakteristickými únosnostmi stanovenými dle EC [29] (viz Graf 5.1).



Obr. 5.2 První vlastní tvar prostě podepřeného nosníku typu Sigma

Graf 5.1 vykazuje velmi dobrou shodu výsledků FEM analýzy klopení nosníků s redukovanou tloušťkou stěny stojiny v místě perforace za předpokladu výpočtu s počáteční geometrickou imperfekcí odpovídající $1/250$ délky nosníku s vypočtenými únosnostmi dle národní přílohy NB.3 normy ČSN EN 1993-1 při použití křivky klopení b. Lze tudíž konstatovat, že uvažováním geometrické imperfekce odpovídající $1/250 L$ lze FEM analýzou na prutu s otvory, zavedenými pomocí redukované tloušťky stojiny v místě perforace, spolehlivě stanovit únosnost nosníků při klopení ve smyslu normativní únosnosti dle národní normy ČSN EN 1993-1 [29] při použití křivky klopení b doporučené normou ČSN EN 1993-1-3 [30] pro tenkostěnné průřezy.



Graf 5.1 Srovnání výsledků FEM analýzy s výpočtem provedeným dle Eurokódu

6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

V rámci komplexní experimentální analýzy byly v laboratorních podmínkách nejdříve ověřovány skutečné průřezové charakteristiky nosníků oslabených otvory ve stěně. Následně probíhala verifikace reálného působení nosníků typu Sigma v ohybu kolem osy větší tuhosti se zřetelem na ztrátu stability při klopení.

Pro zkoušky bylo výrobcem dodáno celkem 20 ks nosníků s otvory délky 6 m. Z dodaných profilů délky 6 metrů byla vytvořena zkušební tělesa délek 2, 3 a 4 metry po 12 kusech od každé délky.

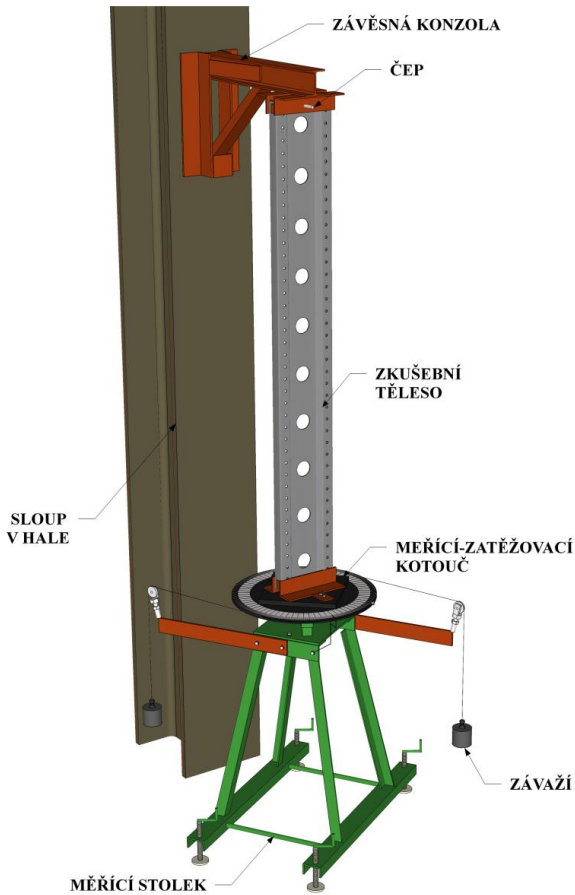
6.1 EXPERIMENTÁLNÍ STANOVENÍ PRŮŘEZOVÝCH CHARAKTERISTIK

Předmětem vyšetřování byly průřezové charakteristiky ovlivňující únosnost nosníků při ztrátě stability za ohybu. V rámci experimentální analýzy byly ověřovány následující průřezové charakteristiky:

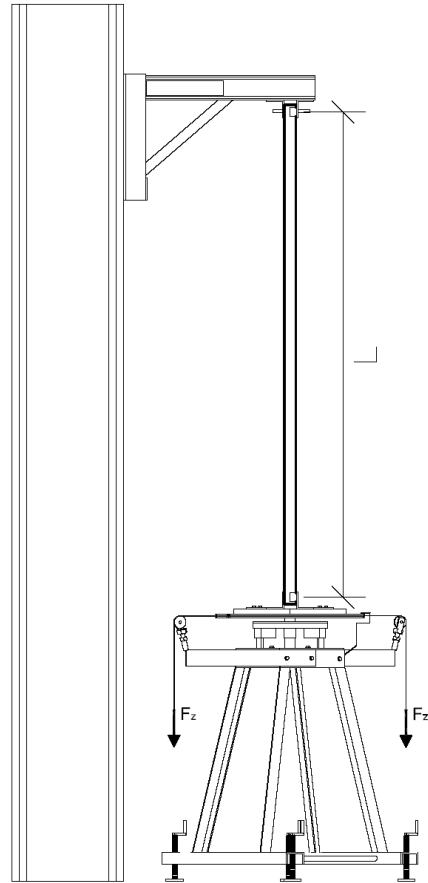
- Moment tuhosti v prostém kroucení I_t odvozený z testů při prostém kroucení
- Výsečový moment setrvačnosti I_ω odvozený z testů při složeném kroucení
- Moment setrvačnosti I_y z testů při ohybu v rovině větší tuhosti
- Moment setrvačnosti I_z z testů při ohybu v rovině menší tuhosti

6.1.1 Stanovení torzní tuhosti při prostém a složeném kroucení

Experimentální ověření skutečné tuhosti při prostém a složeném kroucení bylo provedeno na speciálním zkušebním zařízení (J. Melcher [7]). Funkční schéma zkušebního zařízení je vyznačeno na Obr. 6.1.

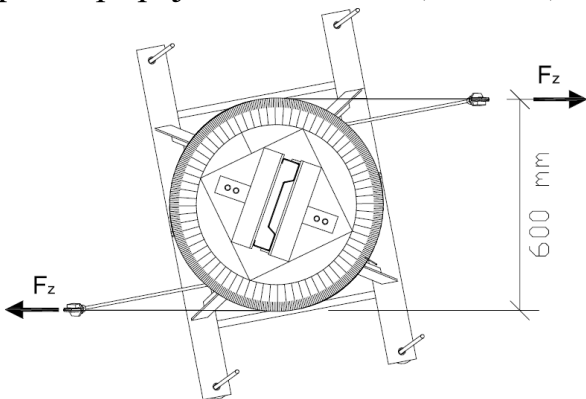


Obr. 6.1 Schéma zkušebního zařízení

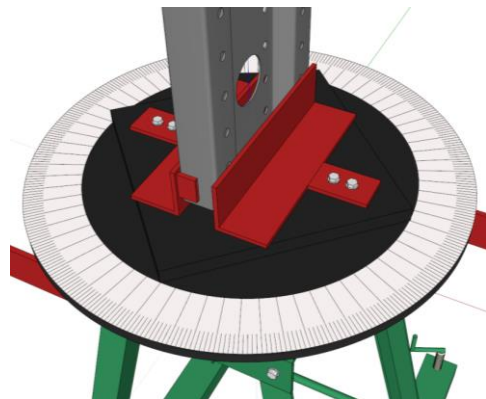


Obr. 6.2 Výpočtové rozpětí nosníku

Zkoušený profil je svisle zavěšen, ve vztahu ke kroučícímu zatížení je zkušební těleso uloženo jako konzola. Horní závěs je pevný, brání kroucení, dolní konec prutu je volný a při experimentu je zatěžován kroučícím zatížením realizovaným dvojicí sil na rameni $d = 600$ mm vyvozenou působením zátěže na antisymetricky umístěná lanka pevně připojená ke kotouči (Obr. 6.3)[7].

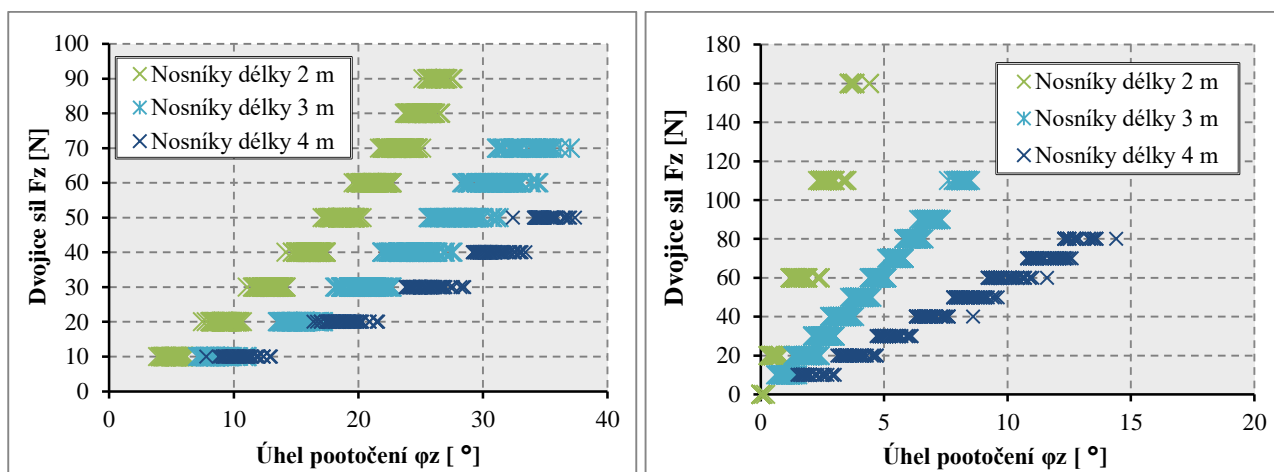


Obr. 6.3 Rameno dvojice sil F_z



Obr. 6.4 Schéma zatěžovacího kotouče

Při zkoušce se měří úhel pootočení volného dolního konce krouceného prutu proti pevnému hornímu průřezu. Rozsah zatěžování jednotlivých zkušebních těles byl stanoven tak, aby se smyková napětí od kroucení pohybovala pouze v oblasti pružného stavu napjatosti. Prostého kroucení bylo dosaženo u prutů s volnou deplanací jejich koncových průřezů, složené kroucení (kombinace prostého a vázaného kroucení) bylo docíleno u vybraných zkušebních těles úpravou jejich konců bránící volné deplanaci průřezu. Pro jednotlivé stupně zatížení závažím F_z bylo odečítáno odpovídající čtení φ_z na měřicím kotouči.



Graf 6.1 Záznam dat při prostém kroucení (vlevo) a složeném kroucení (vpravo)

Graf 6.1 zobrazuje závislost velikosti působící dvojice sil F_z na úhlu natočení φ_z volného dolního konce nosníku oproti hornímu pevnému konci na nosnících délek 2 m, 3 m a 4 m.

Vztah pro výpočet momentu tuhosti v prostém kroucení stanoveného pro i -tý zatěžovací krok má tvar:

$$I_{t,i} = \frac{180 \cdot k_i \cdot d \cdot L}{\pi \cdot G}, \quad (6.1)$$

kde k_i je směrnice lineární závislosti $F_{z,i} - \varphi_{z,i}$ [°] i -tého zatěžovacího kroku [-],

d je rameno dvojice sil [mm],

L je rozpětí nosníku mezi teoretickými podporami [mm],

G je modul pružnosti ve smyku oceli [MPa].

Hodnotu výsečového momentu setrvačnosti získat řešením diferenciální rovnice pro tenkostěnný prut otevřeného průřezu s nulovou (bráněnou) deplanací na koncích prutu zatíženého dvojicí koncových kroučících momentů stejné velikosti s opačným směrem působení, jež vede na tvar (6.2), ve které je úhel zkroucení prutu při vázaném kroucení vyjádřen jako:

$$\varphi_z = \frac{M}{G \cdot I_t} \left(z - \frac{l}{k} \frac{\sinh \frac{k}{l} z}{\cosh \frac{k}{2}} \right) \quad (6.2)$$

kde M je kroutící moment,

I_t moment setrvačnosti v prostém kroucení,

G je modul pružnosti ve smyku oceli,

z je vzdálenost měřená od středu rozpětí nosníku k vyšetřovanému řezu,

l je délka nosníku,

k je parametr kroucení definovaný výrazem jako:

$$k = l \sqrt{\frac{G \cdot I_t}{E \cdot I_w}} \quad (6.3)$$

Uvažováním rovnic (6.2)(6.3) lze iterativním výpočtem určit hodnotu výsečového momentu setrvačnosti získaného na základě experimentu.

Výpočet dílčích tuhostí v prostém kroucení pro jednotlivé zatěžovací kroky je proveden dle vztahu (6.1) v Tab. 6.1. Z výsledných tuhostí v prostém kroucení odvozených z druhého zatěžovacího kroku vyplývá, že skutečná torzní tuhost nosníků nabývá hodnot torzní tuhosti plného průřezu. Přístup v podobě zavedení náhradního průřezu je tudíž v případě stanovování momentu tuhosti v prostém kroucení konzervativní a lze ho spolehlivě použít při dimenzování nosníků s otvory.

V Tab. 6.2 jsou dílčí vypočtené směrnice závislosti $F_z - \varphi_z$ pro jednotlivé zatěžovací kroky. Výsledné výsečové momenty setrvačnosti stanovené pro jednotlivé délky nosníků jsou získány řešením rovnic (6.2)(6.3).

Tab. 6.1 Výpočet momentu tuhosti v prostém kroucení perforovaných nosníků

Délka	Nosníky délky 2 m			Nosníky délky 3 m			Nosníky délky 4 m		
	L = 1960 mm			L = 2960 mm			L = 3960 mm		
$F_{z,i}$ [N]	$\varphi_{z,i}$ [°]	k_i [-]	$I_{t,i}$ [mm ⁴]	$\varphi_{z,i}$ [°]	k_i [-]	$I_{t,i}$ [mm ⁴]	$\varphi_{z,i}$ [°]	k_i [-]	$I_{t,i}$ [mm ⁴]
0	0,0	-	-	0,0	-	-	0,0	-	-
10	5,2	1,94	1 615	8,5	1,17	1 473	10,5	0,96	1 607
20	9,2	2,44	2 033	15,1	1,52	1 912	18,6	1,23	2 069
30	13,0	2,68	2 227	20,4	1,89	2 380	25,3	1,48	2 488
40	16,2	3,13	2 608	24,6	2,40	3 013	30,5	1,95	3 273
50	18,8	3,79	3 155	28,1	2,81	3 533	34,9	2,26	3 792
60	21,4	3,88	3 230	31,1	3,37	4 227	-	-	-
70	23,4	4,93	4 101	33,7	3,80	4 769	-	-	-
80	25,1	5,98	4 977	-	-	-	-	-	-
90	26,4	7,30	6 074	-	-	-	-	-	-

Plný průřez: $I_t = 2\,007\text{ mm}^4$ Oslabený průřez: $I_t = 1\,566\text{ mm}^4$ Náhradní průřez: $I_t = 1\,863\text{ mm}^4$

Hodnoty verifikovaného výsečového momentu setrvačnosti jsou v případě nosníků délky 2 a 4 metry téměř shodné, přičemž o 5% převyšují hodnotu výsečového momentu setrvačnosti náhradního průřezu. Zkušební tělesa délky 3 m vykazují o 2% nižší hodnoty oproti výsečovému momentu náhradního průřezu. Tuto odchylku lze přisoudit

chybě měření. Na základě výsledků experimentálního vyšetřování skutečných hodnot výsečového momentu setrvačnosti lze potvrdit teoretický model prutu s náhradním průřezem.

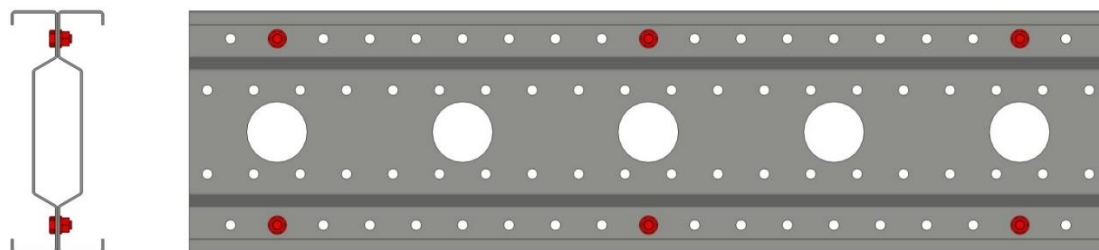
Tab. 6.2 Stanovení výsečového momentu setrvačnosti I_w

Nosníky délky 2 m			Nosníky délky 3 m			Nosníky délky 4 m		
F_{zi} [N]	L = 1960 mm		F_{zi} [N]	L = 2960 mm		F_{zi} [N]	L = 3960 mm	
	φ_{zi} [°]	k_i [-]		φ_{zi} [°]	k_i [-]		φ_{zi} [°]	k_i [-]
0	0,0	-	0	0,0	-	0	0,0	-
20	0,6	32,26	10	1,0	9,88	10	2,0	4,93
60	1,6	41,96	20	1,8	12,16	20	3,6	6,21
110	2,7	45,05	30	2,6	13,48	30	5,2	6,35
160	3,8	46,58	40	3,3	13,70	40	6,8	6,13
-	-	-	50	4,0	14,08	50	8,4	6,42
-	-	-	60	4,8	13,19	60	9,9	6,71
-	-	-	70	5,5	14,35	70	11,5	6,19
-	-	-	80	6,2	13,86	80	12,8	7,58
-	-	-	90	6,9	14,49	-	-	-
-	-	-	110	8,2	15,58	-	-	-
I_t [mm ⁴]	2 033		I_t [mm ⁴]	1 912		I_t [mm ⁴]	2 069	
I_w [mm ⁶]	4 008 866 319		I_w [mm ⁶]	3 657 105 624		I_w [mm ⁶]	4 018 394 184	

Plný pr.: $I_w = 3\,815\,580\,000\text{ mm}^6$ Oslabený pr.: $I_w = 3\,562\,560\,000\text{ mm}^6$ Náhradní pr.: $I_w = 3\,733\,348\,500\text{ mm}^6$

6.1.2 Stanovení ohybové tuhosti při ohybu v rovině větší a menší tuhosti

Při vyšetřování skutečného chování Sigma nosníků při ohybu v rovině větší tuhosti osu byla z důvodu asymetrického tvaru příčného řezu k těžištní ose z zkoušena dvojice nosníků (viz Obr. 6.5). V případě ověřování skutečného momentu setrvačnosti I_z při ohybu na měkkou osu byl zkoušen každý nosník samostatně.



Obr. 6.5 Šroubové spojení dvojice nosníků typu Sigma

Nosníky byly prostě uloženy na ocelových blocích a zatěžovány 2 břemeny ve třetinách rozpětí nosníků. (viz Obr. 6.6 pro případ ohybu v rovině větší tuhosti). Velikost průhybu při zatěžování je volena tak, aby napětí v ohýbaném nosníku nepřekročila pružnou oblast a nedocházelo tím k trvalým deformacím zkušebních těles.

Záznamy měření uvádějí závislosti velikostí průhybů změřených uprostřed rozpětí prutu na velikosti celkové zatěžovací síly (viz Graf 6.2). Při výpočtu skutečného momentu setrvačnosti stanoveného testem lze použít následující vztahy odvozené ze vzorců pro průhyb prostého nosníku uprostřed rozpětí zatíženého ve třetinách rozpětí dvojicí břemen:

$$I_y = \frac{23}{1296} \frac{k \cdot L_{SUPP}^3}{E}, \quad \text{respektive} \quad I_z = \frac{23}{648} \frac{k \cdot L_{SUPP}^3}{E} \quad (6.4)$$

- kde F je velikost břemene působícího ve třetině rozpětí [N],
 k je směrnice přímky lineární regrese průběhu zatěžování,
 L_{SUPP} je rozpětí nosníků [m],
 E je modul pružnosti oceli [Pa],
 I_y, I_z jsou momenty setrvačnosti jednoho nosníku k těžištním osám y, z [m⁴].

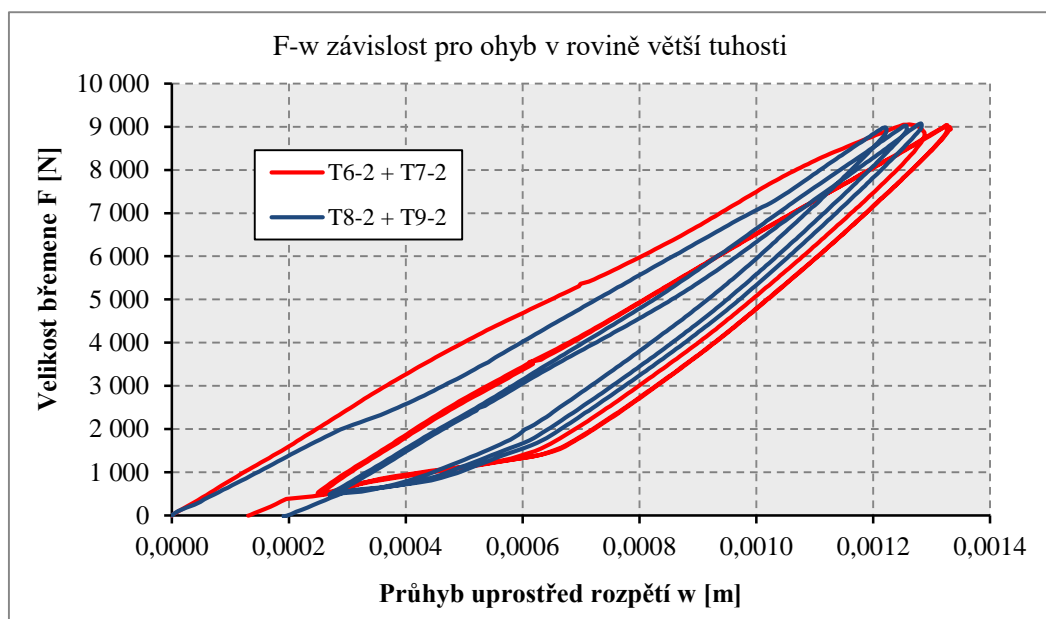


Obr. 6.6 Schéma zkušební sestavy s roznosem síly do třetin rozpětí

Přehled s postupem výpočtu I_y je doložen v Tab. 6.3. Experimentálně ověřené momenty setrvačnosti I_y dosahují nižších hodnot v porovnání s hodnotou vypočtenou pro náhradní průřez, a to zejména u nosníků kratších délek. Tento jev je způsoben vyšší úrovní zatížení, která je potřebná pro dosažení zamýšleného průhybu nosníku, přičemž v místě vnášení zatížení dochází k lokálním deformacím příčného řezu (především borcení stojiny pod osamělým břemenem), které zásadním způsobem ovlivňují ohybovou tuhost prutů.

Přehled s postupem výpočtu I_z je doložen v Tab. 6.4. Výsledky uvedené v Tab. 6.4 opět svědčí o vlivu lokálních stabilitních záležitostí na skutečnou ohybovou tuhost zkušebních těles jednotlivých délek. V případě momentu setrvačnosti I_z při ohybu na

měkkou osu je redukce ohybové tuhosti podstatně nižší, pohybuje se v rozmezí 13% u nosníků délky 2 m až 6% u nosníků délky 4 m.



Graf 6.2 Průběh $F-w$ závislosti pro ohyb v rovině větší tuhosti (tělesa délky 2 m)

Tab. 6.3 Stanovení momentu setrvačnosti k ose y na základě výsledků experimentu

Délka nosníku	2 m		3 m		4 m		
Teoretické rozpětí nosníku L_{SUP} [m]	1,90		2,90		3,90		
Označení testu	T6-2 + T7-2	T8-2 + T9-2	T6-3 + T7-3	T8-3 + T9-3	T6-4 + T7-4	T8-4 + T9-4	
Směrnice lineární regrese	2. zatěžování	7 779 264	8 691 864	3 569 888	3 496 995	1 518 100	1 558 326
	3. zatěžování	7 845 516	8 467 620	3 565 380	3 551 416	1 546 004	1 549 111
	Průměr	7 812 390	8 579 742	3 567 634	3 524 206	1 532 052	1 553 719
Moment setrvačnosti 1 nosníku I_y [mm ⁴]	Pro daný test	4 528 436	4 973 230	7 353 225	7 263 714	7 680 171	7 788 785
	Průměr	4 750 833 (57% $I_{y,sub}$)		7 308 469 (88% $I_{y,sub}$)		7 734 478 (93% $I_{y,sub}$)	

Plný průřez: $I_y = 8\,457\,690\text{ mm}^4$ Oslabený průřez: $I_y = 7\,914\,780\text{ mm}^4$ Náhradní průřez: $I_{y,sub} = 8\,281\,244\text{ mm}^4$

Tab. 6.4 Stanovení I_z na základě výsledků experimentu

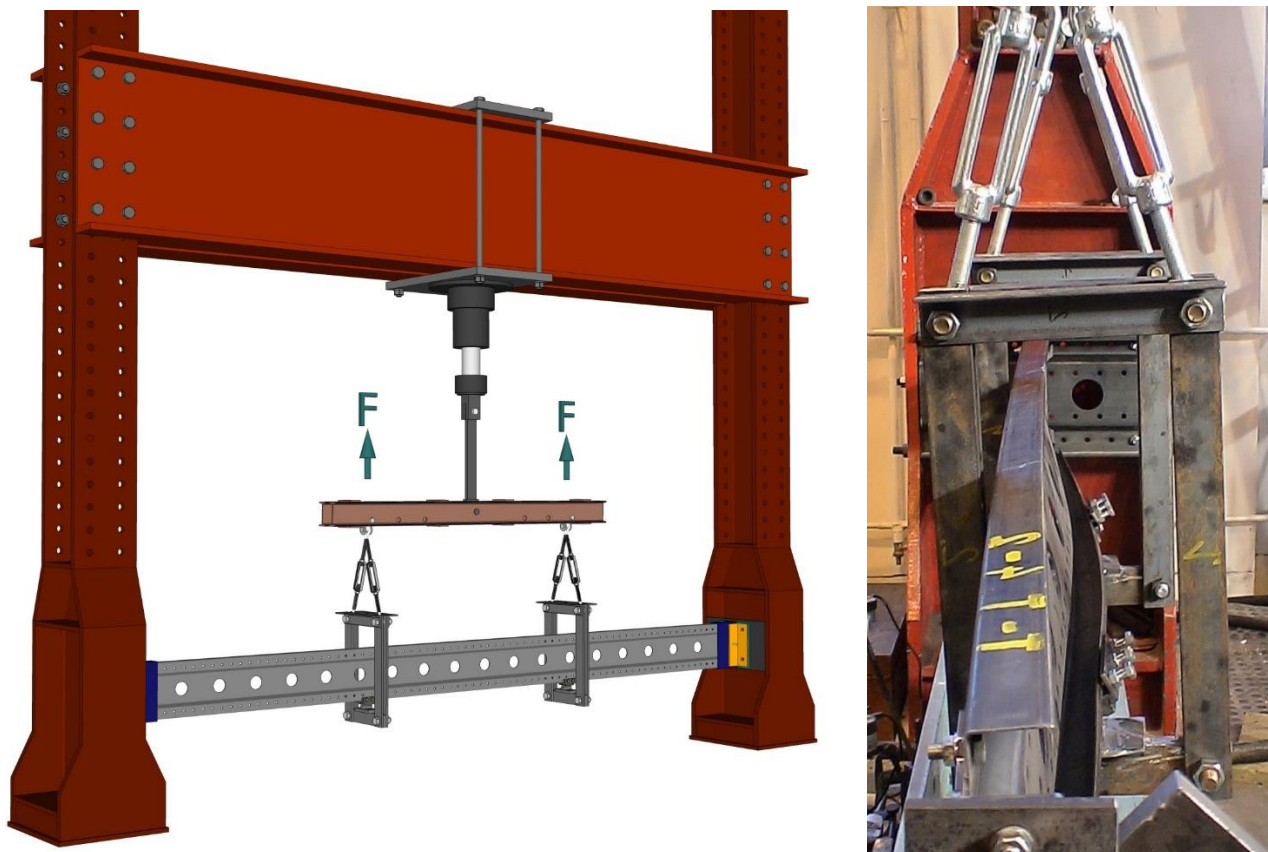
Délka nosníku	2m	3m	4m	
Označení testu	T6-2 (TYP I)	T4-3 (TYP I)	T6-4 (TYP I)	
Teoretické rozpětí nosníku L_{SUP} [m]	1,91	2,91	3,90	
Směrnice lineární regrese	2. zatěžování	143 272	43 802	18 200
	3. zatěžování	143 607	43 837	18 325
	Průměr	143 440	43 820	18 263
Moment setrvačnosti I_z [mm ⁴]	168 928	182 509	183 101	

Plný pr.: $I_z = 201\,277\text{ mm}^4$ Oslabený pr.: $I_z = 178\,666\text{ mm}^4$ Náhradní pr.: $I_{z,sub} = 193\,928\text{ mm}^4$

6.2 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ ÚNOSNOSTI PŘI KLOPENÍ

6.2.1 Popis zkušební sestavy

Celá zkušební sestava je situována do zatěžovací stolice ve zkušebně ústavu KDK na Fakultě stavební (zkušební sestava je uvedena na Obr. 6.7).

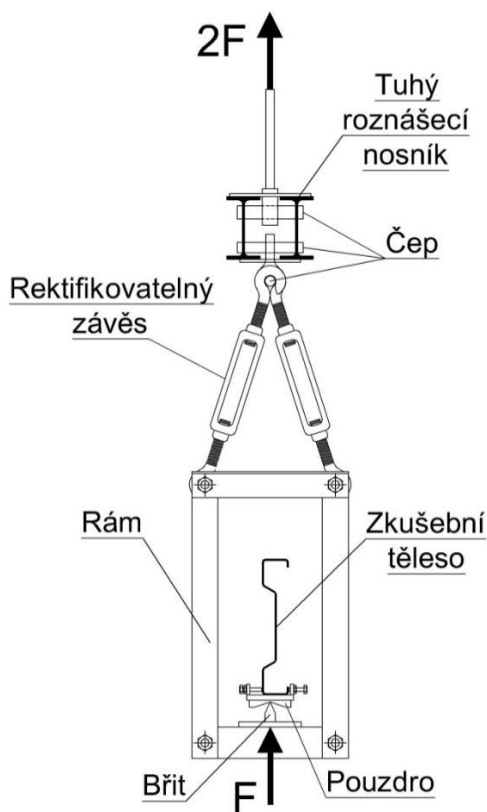


Obr. 6.7 Zkušební sestava sloužící pro testy na klopení nosníků

Zkoušeny byly nosníky o rozpětí 2 m, 3 m a 4 m. Nosníky byly zatěžovány dvojicí osamělých břemen působících ve třetinách rozpětí zkušebních těles. **Zvláštní pozornost byla věnována způsobu vnášení zatížení, který umožňuje volné klopení nosníku bez vazeb zabraňujících posunutí a pootočení v poli.**

6.2.1.1 Způsob zatěžování

Zatížení je vnášeno táhly ve třetinách rozpětí na spodní pásnici nosníku. Konstrukční řešení táhla je uvedeno na Obr. 6.8 a Obr. 6.9. Zatížení z táhel je vnášeno na zkoušený profil přes břit a pouzdro, které je nasazeno na spodní pásnici nosníku. Hlavní funkcí břitu je umožnění naklánění pouzdra a tím i příčného řezu nosníku při zatěžování. Pouzdro ve tvaru U je opatřeno stavěcími šrouby, které slouží k nastavení polohy břitu pod příčným řezem nosníku tak, aby zatížení procházelo středem smyku.



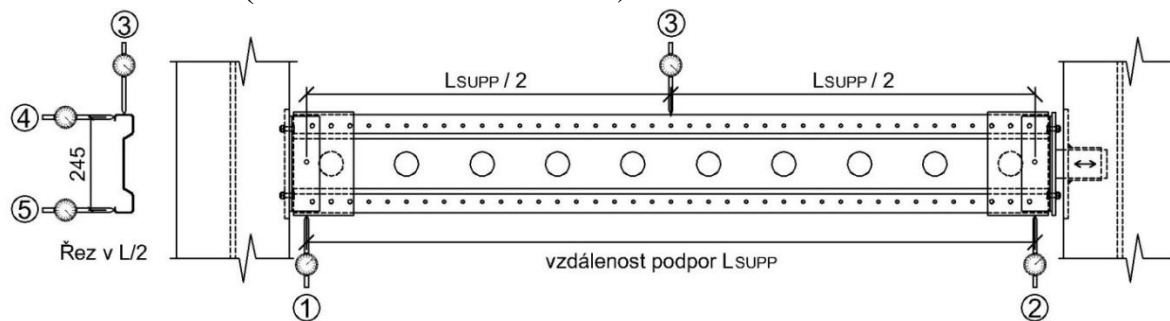
Obr. 6.8 Schéma zkušebního táhla



Obr. 6.9 Realizace zatěžovacího táhla

6.2.1.2 Monitorování posunů a přetvoření

V průběhu zatěžování jsou v předem vybraných místech na zkušebním tělese měřeny a zaznamenávány posuny a přetvoření v závislosti na hodnotě aktuálního vneseného zatížení (viz schéma na Obr. 6.10).

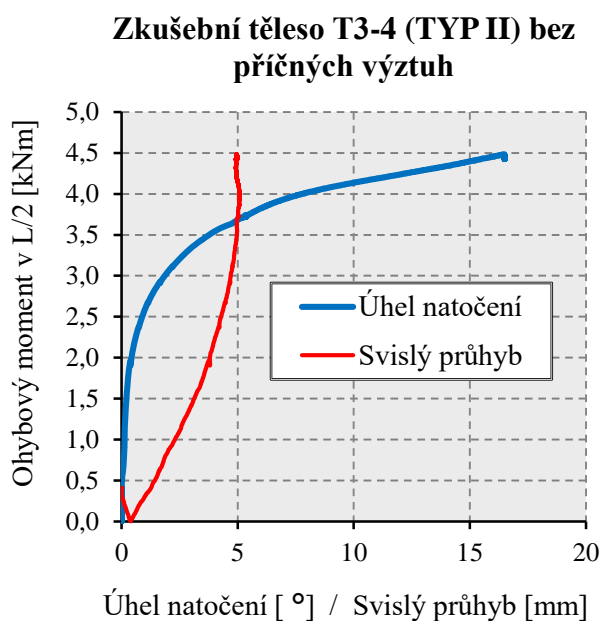


Obr. 6.10 Rozmístění snímačů deformací

6.2.1.3 Průběh zatěžování

Aplikované zatížení vyvolává v dolních vláknech prutů tlak, resp. v horních vláknech tah. V souladu s teorií působení nosníků při ohybu se zřetelem na ztrátu stability klopením dochází v počáteční fázi zatěžování téměř pouze ke svislému průhybu zkušebního tělesa (viz Obr. 6.11). Při vyšší úrovni vnášeného zatížení dochází k postupnému příčnému vybočování tlačené pásnice ve vodorovné rovině v kombinaci s natáčením příčného řezu nosníku. V dalším kroku zatěžování lze zřetelně pozorovat nárůst nadměrných deformací nosníků. Nosník dosahuje své mezní ohybové únosnosti

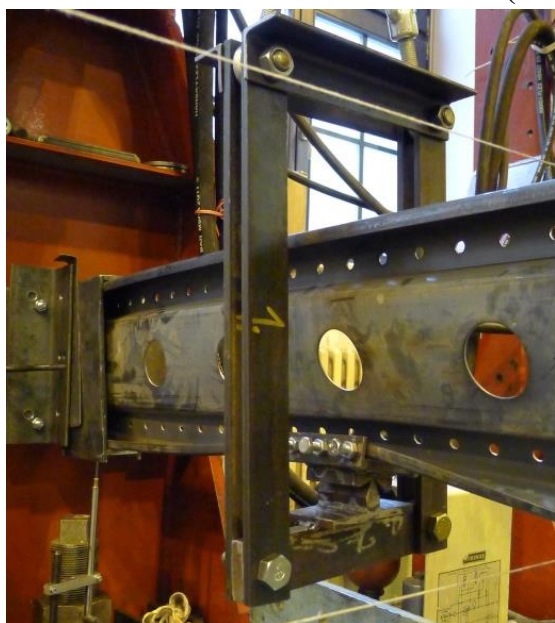
ještě před ukončením zatěžování, které nastává v okamžiku, kdy dochází ke kontaktu zdeformovaného nosníku s rámem zatěžovacího táhla (viz Obr. 6.12).



Obr. 6.11 Záznam svislého průhybu a úhlu natočení příčného řezu

Obr. 6.12 Kontakt zlušebního tělesa s rámem táhla

Během zatěžování bylo možné, zejména u nosníků kratších délek, pozorovat lokální deformace nosníků v místě vnášení zatížení, kdy docházelo k příčnému ohybu pásnice, na kterou bylo vnášeno zatížení (viz Obr. 6.13). Na základě této skutečnosti byla od každé délky nosníků tři z šesti zkušebních těles doplněna navařenými příčnými výztuhami v místě vnášení zatížení (viz Obr. 6.14).



Obr. 6.13 Příčný ohyb pásnice v místě vnášení zatížení

Obr. 6.14 Nosník vyztužený příčnými výztuhami

6.2.2 Vyhodnocení experimentů z hlediska mezní únosnosti

Mezní ohybová únosnost $M_{ult,exp}$ stanovená na základě experimentu je definovaná jako maximální ohybový moment uprostřed prostě podepřených nosníků dosažený během zatěžovací zkoušky. Pro účely porovnání experimentálně stanovené mezní únosnosti s ohybovou únosností při klopení $M_{b,Rd}$ vypočtenou v souladu s normou ČSN EN 1993-1-1 je provedena korekce experimentálně stanovené hodnoty zohledňující poměr mezi skutečnou mezí kluzu $f_{y,act}$ testovaného zkušebního tělesa a nominální hodnotou meze kluzu $f_{y,nom}$ uvažovanou při stanovení normativní únosnosti. Korekce je prováděna dle vztahu:

$$M_{ult,corr} = M_{ult,exp} \cdot \frac{f_{y,nom}}{f_{y,act}}, \quad (6.5)$$

- kde $M_{ult,corr}$ je opravená hodnota mezní momentové únosnosti,
 $M_{ult,exp}$ je mezní momentová únosnost získaná z experimentu,
 $f_{y,act}$ je skutečná mez kluzu získaná z tahových zkoušek materiálu,
 $f_{y,nom}$ je nominální mez kluzu uvažovaná při normativním.

Od každé délky nosníků byly v rámci dílčích skupin testovány tři zkušební tělesa nevyztužená příčnými výztuhami a tři zkušební tělesa vyztužená ve třetinách rozpětí nosníků (v místě vnášení zatížení) příčnými výztuhami zabraňující borcení stojiny a příčnému ohybu zatěžovaných pásnic. Výsledky každé dílčí skupiny jsou statisticky vyhodnoceny ve smyslu normy ČSN EN 1990, přílohy D – Navrhování pomocí zkoušek [28]. V Tab. 6.5 dokládá pro jednotlivé délky těles výpočet charakteristických hodnot (5%ní kvantily) ohybových únosnosti při klopení a o procentuální poměr těchto charakteristických únosností vůči únosnosti $M_{b,Rd}$ stanovené dle EC.

Výsledky zkoušek klopení potvrzují spolehlivý přístup při použití teoretického model prutu s náhradním průřezem definovaným v kapitole 4.1, jehož vzpěrná únosnost $M_{b,Rd}$, vyčíslená dle postupů v uvedených [29] a [30], je s výraznou rezervou (cca v rozmezí 10 - 40%) nižší, než je skutečná únosnost při klopení stanovená na základě statistického vyhodnocení výsledků experimentů. Toto tvrzení je platné za předpokladu, že jsou eliminovány lokální stabilitní účinky, které mohou výrazně snižovat celkovou mezní únosnost nosníků při ohybu.

Graf 6.3 zobrazuje jednotlivé výsledky testů klopení ve formě závislosti součinitele na hodnotě příslušející poměrné štíhlosti zkušebního tělesa. Závislosti jsou doplněny o průběhy vzpěrných křivek. Je zřejmé, že výsledky získané z experimentů na nosnících vyztuženými příčnými výztuhami se nacházejí se spolehlivou rezervou nad křivkou klopení b. Spolehlivost není prokázána u nevyztužených nosníků (zejména v případě kratších délek). Při návrhu je tudíž vždy nutné řádně analyzovat vliv lokálních deformací na globální ohybovou únosnost a případně navrhnout konkrétní konstrukční řešení, které by tyto negativní vlivy eliminovalo.

Tab. 6.5 Přehled výsledků experimentů pro nosníky prostě uložené v kroucení

Nosníky délky 2 m bez příčných výztuh						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T1-2	355	404,5	8,92	7,83	8,65	90%
T2-2	355	404,5	8,81	7,73	8,65	89%
T3-2	355	404,5	9,08	7,97	8,65	92%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		7,84			
směrodatná odchylka	s		0,12			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		7,44		86%	

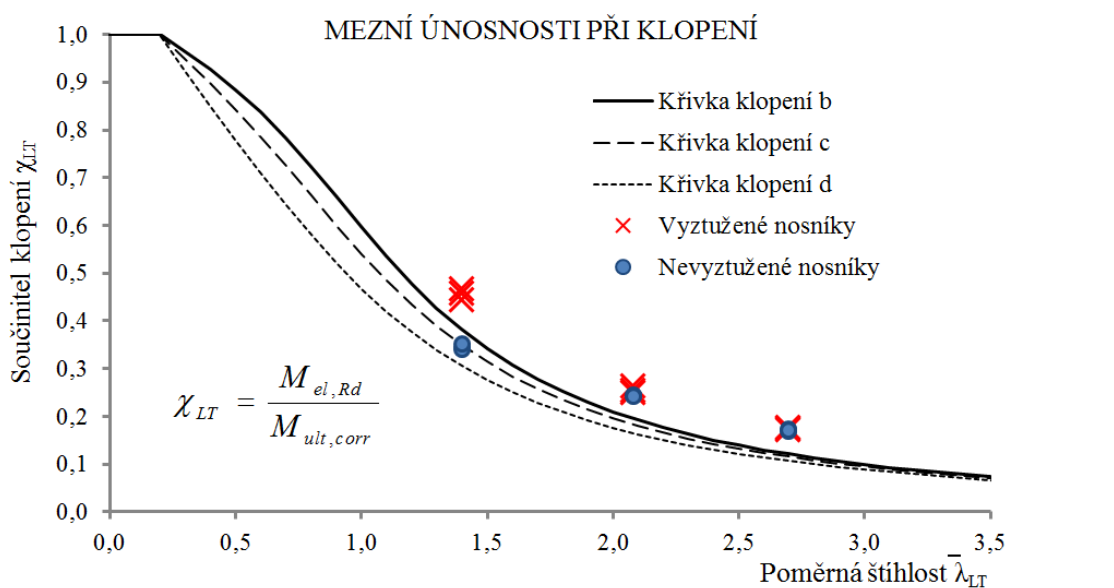
Nosníky délky 2 m s příčnými výztuhami						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T4-2	355	404,5	11,46	10,06	8,65	116%
T11-2	355	404,5	12,02	10,55	8,65	122%
T12-2	355	404,5	11,81	10,36	8,65	120%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		10,32			
směrodatná odchylka	s		0,25			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		9,49		110%	

Nosníky délky 3 m bez příčných výztuh						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T1-3	355	406,9	6,36	5,55	4,43	125%
T2-3	355	406,9	6,34	5,53	4,43	125%
T3-3	355	406,9	6,29	5,49	4,43	124%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		5,52			
směrodatná odchylka	s		0,03			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		5,42		122%	

Nosníky délky 3 m s příčnými výztuhami						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T4-3	355	406,9	6,81	5,94	4,43	134%
T11-3	355	406,9	6,46	5,64	4,43	127%
T12-3	355	406,9	6,60	5,76	4,43	130%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		5,78			
směrodatná odchylka	s		0,15			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		5,26		119%	

Nosníky délky 4 m bez příčných výztuh						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T1-4	355	414,4	4,60	3,94	2,75	143%
T3-4	355	414,4	4,48	3,84	2,75	139%
T5-4	355	414,4	4,54	3,89	2,75	141%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		3,89			
směrodatná odchylka	s		0,05			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		3,72		135%	

Nosníky délky 4 m s příčnými výztuhami						
Test	$f_{y,nom}$ [Mpa]	$f_{y,act}$ [Mpa]	$M_{ult,exp}$ [kNm]	$M_{ult,corr}$ [kNm]	$M_{b,Rd}$ [kNm]	$\frac{M_{ult,corr}}{M_{b,Rd}}$
T4-4	355	414,4	4,59	3,93	2,75	143%
T11-4	355	414,4	4,55	3,90	2,75	142%
T12-4	355	414,4	4,65	3,98	2,75	145%
Statistické vyhodnocení						
střední hodnota	m		3,94			
směrodatná odchylka	s		0,04			
	k_n		3,37 Poměr Exp / EC			
Charakteristická hodnota	M_k		3,79		138%	



Graf 6.3 Porovnání mezních ohybových únosností nosníků

7 ZÁVĚRY DIZERTAČNÍ PRÁCE

Cílem dizertační práce bylo stanovení zjednodušených postupů při navrhování tenkostěnných za studena válcovaných ocelových nosníků s otvory ve stěně se zřetelem na jejich ztrátu stability při ohybu. Nynější platné evropské normy udávají návrhové procedury pro stanovení únosnosti při klopení pouze pro prizmatické pruty, neobsahují postupy pro pruty proměnného průřezu či pro nosníky oslabené otvory.

Při řešení dané problematiky byla definována pravidla, za kterých je možné využít normativních metodik platných pro prizmatické pruty při určování návrhové únosnosti při klopení. Tato pravidla se týkají především postupu výpočtu průřezových charakteristik prutů s otvory ve stěně a doporučení pro volbu vhodné křivky vzpěrné pevnosti (křivky klopení). Pro stanovení průřezových charakteristik byl zvolen přístup v podobě zavedení tzv. náhradního průřezu, jehož charakteristiky jsou definovány jako vážený průměr z průřezových charakteristik plného průřezu a průřezu oslabeného v ose otvoru. Verifikace hodnot průřezových charakteristik náhradního průřezu byly předmětem rozsáhlého experimentálního vyšetřování. Při experimentálních analýzách byly na základě skutečného chování nosníků s otvory při ohybu a kroucení vyšetřovány reálné ohybové a torzní tuhosti s cílem odvození momentů setrvačnosti při ohybu na tuhou i měkkou osu, momentu tuhosti v prostém kroucení a výsečového momentu setrvačnosti. Experimenty byly prováděny na nosnících tří různých délek (2 m, 3 m a 4 m). Lze konstatovat, že výsledky experimentálního vyšetřování skutečných hodnot průřezových charakteristik, za předpokladu prutového chování nosníků a omezení vlivu lokálních deformací, nejsou v rozporu se zavedeným modelem náhradního průřezu.

V současnosti probíhají práce na rozšíření souboru norem EN 1993: Navrhování ocelových konstrukcí o část 1-13: Nosníky s otvory ve stěně. Dle dostupných informací tato připravovaná norma obsahuje návrhovou proceduru pro případ klopení nosníků odkazující na postupy uvedené v EN 1993-1-1, přičemž při výpočtu modulu průřezu W_y a poměrné štíhlosti prutu je doporučeno uvažovat nejslabší průřez (tedy průřez v ose otvoru). Pro stanovení součinitele klopení by měl být použit součinitel imperfekce α_{LT} hodnotou 0,49 (křivka klopení c) pro dvouose symetrické válcované profily, respektive 0,76 (křivka klopení d) pro jednoose symetrické válcované profily nebo svařované profily. Experimentální verifikace skutečného chování, provedená v rámci dizertační práce, prokázala, že v daném konkrétním případě tenkostěnných za studena válcovaných ocelových nosníků typu Sigma oslabených otvory ve stěně je tento návrh postup dimenzování konzervativní. Prokázán byl spolehlivý návrh za předpokladu výpočtu na tzv. náhradním průřezu (náhradní nosník konstantního průřezu stanovený na základě váženého průměru plného průřezu a oslabeného průřezu v ose otvoru) při uvažování součinitele imperfekce dle doporučení v EN1993-1-3, které pro tenkostěnné

nosníky uvádí hodnotu 0,34 (křivka klopení b). Avšak je důležité podotknout, že připravovaný dokument pokrývá velkou škálu tvarů otvorů a jejich geometrického uspořádání, a tudíž navrhované parametry výpočtu by bylo nutné verifikovat i pro jiné případy tvarů otvorů a jejich uspořádání.

Výše uvedené postupy jsou vhodné zejména pro jednoduché prutové soustavy (proste nosníky, konzoly, stojité nosníky) při uvažování základních zatěžovacích schémat (spojité zatížení, osamělá břemena, koncové momenty). V případě komplexnějších soustav, jako jsou například rámové konstrukce namáhané různými typy zatížení vedoucí k průběhům vnitřních sil, které nejsou uvedeny v normativních dokumentech ani odborné literatuře, je vhodné provést analýzu účinků klopení v některém ze softwarů užívaných inženýrskou praxí. Komplikací při takovém postupu bývá fakt, že tyto softwary neumožňují modelování otvorů ve stěně nosníků. Numerické analýzy provedené v rámci dizertační práce prokázaly, že vliv otvorů ve stěně nosníků lze u prizmatického prutu zahrnout prostřednictvím náhradního pásu konstantní šířky s redukovanou tloušťkou stěny po celé délce prutu v oblasti perforace. Redukovaná tloušťka se stanoví z předpokladu shodné příčné ohybové tuhosti jednotkové délky stojiny s otvory a jednotkové délky stojiny s redukovanou tloušťkou v zóně perforace (viz kapitola 5). Velikost jednotkové délky stojiny má být vhodně zvolena s ohledem na geometrické rozměry otvorů ve stěně a jejich uspořádání. Alternativně lze redukovanou tloušťku vypočítat na základě zobecnění vzorce, který odvodili D. Moen a B.W. Schafer [11] pro výpočet účinků distorzního vzpěru nosníků oslabených otvory ve stěně. Zobecněný vztah má podobu:

$$t_{web,hole} = \left(1 - \frac{L_{hole}}{L_{pattern}}\right)^{1/3} \cdot t_{web} \quad (7.1)$$

kde $L_{pattern}$ je délka úseku nosníku, v jejímž násobku se opakuje geometrické uspořádání otvorů (viz Obr. 7.1),

L_{hole} je součet délek oslabení otvory na délce $L_{pattern}$,

t_{web} je tloušťka stojiny.



Obr. 7.1 Schéma k výpočtu redukované tloušťky stojiny

8 LITERATURA

8.1 PUBLIKACE

- [1] BALÁŽ, I., Determination of the flexural buckling resistance of frames with members with non-uniform cross-sections and non-uniform axial compression forces. In *Zborník XXXIV. Celoštátny aktív pracovníkov ocelových konštrukcií so zahraničnou účasťou*. 2008, p.17-22..
- [2] BRODNIANSKY, J., Equivalent imperfection for columns and beams (FTB problem, LTB problem), In: *Sborník abstraktů 18. odborné konference doktorského studia JUNIORSTAV 2016*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2016, p.135. ISBN 978-80-214-5312-8.
- [3] BŘEZINA, V., *Vzpěrná únosnost kovových prutů a nosníků*. Praha, Nakladatelství Československé akademie věd, 1962.
- [4] BŘEZINA, V., *Vzpěrná pevnost prutů kovových konstrukcí*. STNL Praha, 1963.
- [5] DE VRIES, K., Strength of beams as determined by lateral buckling, 1947.
- [6] GOODIER, J. N., Torsional and flexural buckling of bars of thin-walled open section under compressive and bending loads, *Trans.ASME, J. Appl.Mech.*, September, A-103, 1942.
- [7] MELCHER, J., *Skutečné působení členěných centricky tlačěných prutů*. Brno, 1975.
- [8] MELCHER, J., Ohyb, kroucení a klopení ocelových nosníků, In: *Sborník prací kateder kovových a dřevěných konstrukcí a mostů*, Stavební fakulta – ČVUT, Praha, 1975.
- [9] MELCHER, J., *Tenkostěnný kovový prut v nosném konstrukčním systému – Doktorská disertační práce*. Brno, 1990.
- [10] MICHELL, A.G., Elastic stability of long beams under transverse forces, *Philosophical Mag.*, 48, 1899.
- [11] MOEN, C. D. a SCHAFER, B. W., Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. In: *Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, St. Louis, Mo, USA, 2010.
- [12] PRANDTL, L., *Kipperscheinung*, Dissertation, München, 1899.
- [13] RHODES, J., *Design of Cold-Formed Steel Members*, Elsevier Science Publishers, 1991.
- [14] SCHAFER, B. W. a ÁDÁNY, S., Buckling analysis of cold-formed steel members using cufsm: conventional and constrained finite strip methods. In: *Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, Orlando, FL, 2006.
- [15] STUDNIČKA, J., Místní a celková stabilita ohýbaných prutů, In: *Stavebnický časopis*, 1980.
- [16] ŠKALOUD, M. a ZÖRNEROVÁ, M., The post-buckled behaviour in thin-walled construction and its partial “erosion“ under repeated loading, In: *Int. Journal of Structural Stability and Dynamics*, Vol. 11, N.5, 2011, p. 805-827. ISSN 0219-45544.
- [17] TIMOSHENKO, S. P. a GERE, J. M., *Theory of Elastic Stability*. New York, 1961.
- [18] VLASOV, V. Z., *Tenkostěnné pružné pruty*, Praha: SNTL, 1962.
- [19] WINTER, G., Lateral stability of unsymmetrical I-beams and trusses in bending, *Trans. ASCE*, p.247, 1943.

8.2 PUBLIKACE AUTORA (VÝBĚR)

- [20] HORÁČEK, M. a MELCHER, J. St. Venant Torsion Stiffness of Thin-walled Beams with Holes. In: *Proceedings of 6th European Conference on Steel and Composite Structures: Vol A*. Budapešť: ECCS, 2011, p. 141-146. ISBN 978-92-9147-103-4.

- [21] HORÁČEK, M. a MELCHER, J., St. Venant Torsion Stiffness of Thin-walled Steel Beams with Web Holes. In: *Proceedings of the 5th WSEAS International Conference on Engineering Mechanics, Structures, Engineering Geology (EMESEG'12)*. Cambridge: WSEAS Press, 2012, p. 103–108. ISBN 978-1-61804-071-8.
- [22] HORÁČEK, M. a MELCHER, J., Mathematical Definitions and Experimentally Verification of the Torsion Characteristics of Perforated Steel Beams. In: *Proceedings of the 14th WSEAS International Conference on Mathematical and Computational Methods in Science and Engineering (MACMESE '12)*. Sliema: WSEAS Press, 2012, p. 91–96.
- [23] HORÁČEK, M., MELCHER, J. a BALÁZS, I., Design Bending Resistance of Thin-Walled Steel Beams with Respect to Lateral Torsional Buckling – Methods of Calculation. In: *Proceedings of the 3rd European Conference on Civil Engineering (ECCIE '12)*. Paris: WSEAS Press, 2012, p. 254–259. ISBN 978-1-61804-137-1.
- [24] HORÁČEK, M. a MELCHER, J., Lateral Torsional Buckling of Thin-Walled Cold-Formed Steel Beams with Web Holes - Finite Element Analysis. In: *Applied Mechanics and Materials: Vol 467 (2013)*. Zurich: Trans Tech Publications Inc., 2013, p 425-430. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.467.425. ISSN 1662-7482.
- [25] HORÁČEK, M. a MELCHER, J., Lateral Torsional Buckling of Beams with Web Holes - Finite Element Analysis and Experimental Verification, In: *Proceedings of 7th European Conference on Steel and Composite Structures*. Napoli: ECCS, 2014, p. 439-440.
- [26] HORÁČEK, M., MELCHER, J. a KARMAZÍNOVÁ, M., Verifikace skutečného působení tenkostěnných ocelových nosníků s otvory ve stěně, In: *Zborník prednášok - 40. aktív pracovníkov odboru ocelových konštrukcií*. Žilina: KNM, 2015. ISBN 978-80-89619-01-6.
- [27] KARMAZÍNOVÁ, M., MELCHER, J. a HORÁČEK, M., Thin-Walled Cold-Formed Steel Beams with Holes in Lateral Flexural-Torsional Buckling. In: *Advanced Materials Research*, Vol. 743, 2013, p. 170-175, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.743.170. ISSN 1022-6680.

8.3 TECHNICKÉ PŘEDPISY A NORMY

- [28] ČSN EN 1990 (73 0002). *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: ČNI, 2003.
- [29] ČSN EN 1993-1-1 (73 1401). *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- [30] ČSN EN 1993-1-3 (73 1401). *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-3: Doplnující pravidla pro tenkostěnné za studena tvarované prvky a plošné profily*. Praha: ČNI, 2008.
- [31] ČSN EN 1993-1-5 (73 1401). *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-5: Boulení stěn*, Praha: ČNI, 2008.
- [32] AISI. AISI-S100. *North American Specification for the Design of Cold-formed Steel Structural Members*, Washington (DC): American Iron and Steel Institute, 2007.
- [33] *North American Specification. Appendix 1: Design of cold-formed steel structural members using the Direct Strength Method*. In: 2004 supplement to the north American specification for the design of coldformed steel structures. Washington (DC), 2004.

8.4 ODKAZY

- [34] <http://www.dlupal.com/cs>
- [35] <http://www.nedcon.com/en/>

