

KROUCENÍ DLE EC2 – PROBLÉMY A CHYBY ANALYTICKÉHO MODELU

Jan Vesecký, *

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.
jan.vesecky@fsv.cvut.cz

ABSTRAKT

Zatímco je velká část současného výzkumu v oblasti betonu zaměřena na reologické změny a betony speciálních vlastností (vláknobeton, vysokohodnotné betony), zůstávají stranou pozornosti nedostatky analytického modelu pro jeden ze základních typů namáhání – kroucení.

Ukazuje se, že analytický model v Eurokódu 2, založený na analogickém tenkostěnném dutém průřezu, je v mnoha ohledech nepřesný a problematický. Například pro typický obdélníkový průřez udává až o 50 % vyšší únosnost před vznikem trhlin v porovnání s únosností dle teorie pružnosti. Model dále nerespektuje skutečnou polohu výztuže a tenkostěnný tvar selhává pro některé průřezy. Zcela zanedbán zůstává vliv deplanace a vázaného kroucení.

V předloženém článku jsou blíže představeny výše zmíněné a některé další nedostatky normového analytického modelu. Na závěr je nastíněn budoucí výzkum, jehož cílem bude zjištěné nedostatky zmírnit, odstranit nebo případně vyvinout nový přesnější analytický model.

KLÍČOVÁ SLOVA

Kroucení • Železobeton • Eurokód 2 • Analytický model • Deplanace • Střed smyku

ABSTRACT

While the most of current research in concrete is focused on rheological changes and concrete with special properties (fibre-concrete, high-performance concrete), flaws of an analytical model for one of the basic kinds of loading – torsion, remain aside of attention.

It turns out that the analytical model in Eurocode 2 based on the analogical thin-walled hollow section, is inaccurate and problematic in many cases. For example, for a typical rectangular section it gives up to 50 % higher capacity prior to cracks initiation in comparison with capacity calculated by the theory of elasticity. Moreover, analytical model does not respect a real position of the reinforcement and the thin-walled shape fails for the certain sections. The effect of a warping torsion remains completely neglected.

Submitted article presents aforementioned problems and some other flaws of the Eurocode 2 analytical model. At the end of the article is outlined future research. Its aim will be

mitigation and elimination of the described shortcomings or possible development of a new more accurate analytical model.

KEYWORDS

Torsion • Reinforced Concrete • Eurocode 2 • Analytical Model • Warping • Shear Centre

1. PŘEDMLUVA

V následujícím textu je pro stručnost zpravidla uvedeno slovní spojení „železobetonové konstrukce“. Přesto je většina uvedených informací (s výjimkou pasáží věnovaných návrhu a posouzení betonářské výztuže) obecně platná i pro předpjatý beton a vláknobeton.

2. ÚVOD DO KROUCENÍ

Prutové prvky mohou být obecně namáhány napětím od čtyř různých typů vnitřních sil – normálové síly, posouvajících sil, ohybových momentů a kroutícího momentu.



Obrázek 1: Tenkostěnné konstrukce z UHPC:
a) prefabrikovaná lávka průřezu U (KŠ Prefa); b) předpjatý nosník, tloušťka stojiny 38 mm (Pontex & Skanska);
c) dvouvrátová lávka v obci Čeperka, mostovka tloušťky 50 mm (Pontex & Skanska)

* Školitel: doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng.

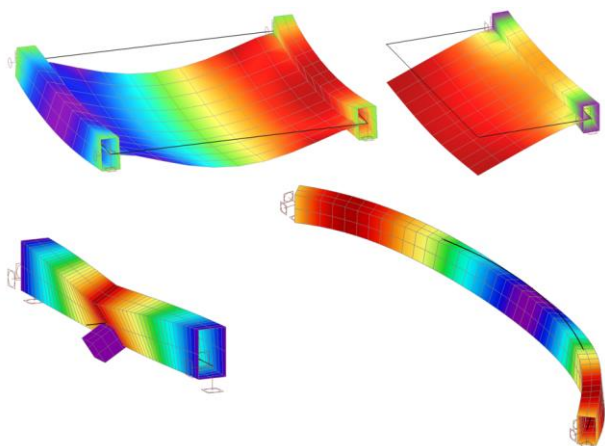
První tři jmenované u železobetonových konstrukcí zpravidla dominují a proto je jim věnována většina pozornosti, rozsáhlá teorie a osvědčené návrhové postupy. Opačnou situaci lze pozorovat v případě kroucení. Jelikož u mnoha železobetonových konstrukcí kroucí moment vůbec nevzniká, je tomuto typu namáhání věnováno obecně málo pozornosti. Přesto lze nalézt nemálo případů, kdy kroucí moment na konstrukci vzniká a ačkoli není jeho vliv dominantní, zanedbáním dochází ke značné chybě při posouzení průřezu a při návrhu výztuže.

Kroucení lze navíc rozložit na volné a vázané. Přestože je podíl vázaného kroucení u masivních a uzavřených tenkostěnných průřezů obecně malý, začínají se spolu s vývojem UHPC objevovat konstrukční prvky, které se svými rozměry blíží spíše otevřeným tenkostěnným průřezům (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). Nepochybně existuje určitá hranice štíhlosti průřezu, při které již nelze vázané kroucení jednoduše zanedbat.

2.1. Železobetonové prvky vystavené kroucení

Ke kroucení prvku dochází tehdy, neprochází-li výslednice příčného zatížení středem smyku průřezu. Střed smyku přitom pro dvouose symetrické průřezy leží v těžišti, pro jednoose symetrické na stejné ose jako těžiště a pro nesymetrické (např. tvar L) zcela mimo těžiště. Na následujících příkladech je uvedeno, u kterých konstrukcí vzniká (nezanedbatelný) kroucí moment:

- krajní stropní průvlak;
- průvlak s vykonzolovanou deskou;
- nesymetricky zatížený průvlak;
- schodiště se středovou schodnicí;
- prefabrikovaný průvlak tvaru L s ozubem;
- průvlak s nepřímo uloženou konzolou;
- půdorysně zakřivený nosník (nepředepnutý);
- předpjatý půdorysně zakřivený most.



Obrázek 2: Příklady kroucených železobetonových prvků.

2.2. Kroucení dle teorie pružnosti

Jak již bylo uvedeno, kroucení lze dělit na volné a vázané, přičemž první jmenované způsobuje pouze smyková napětí, zatímco druhé jak smyková tak normálová napětí. U většiny

prvků se vyskytují oba typy kroucení s různým poměrem vlivu. Pouze prvky s kruhovým (plným i dutým) průřezem nejsou vystaveny žádnému vázanému kroucení. Napjatost od volného (vlevo) a vázaného (vpravo) kroucení, shrnují následující tenzory napětí, kde červené prvky jsou obecně nenulové.

$$\sigma_t = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_x & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_x \end{pmatrix} \quad \sigma_\omega = \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_x & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_x \end{pmatrix}$$

Volné kroucení zpravidla výrazně převládá nad vázaným u běžných železobetonových prvků. Pro analýzu volného kroucení je důležitou veličinou moment tuhosti ve volném kroucení I_t , který se obecně stanoví z rovnice (1). Pro lineární pružný materiál (tedy i železobeton před vznikem trhlin), lze maximální smykové napětí od volného kroucení stanovit ze známého vztahu (2), který bude uplatněn dále.

$$I_t = \iint \left(y^2 + z^2 + \frac{\partial \psi}{\partial z} \cdot y - \frac{\partial \psi}{\partial y} \cdot z \right) dA \quad (1)$$

$${}^1\tau_{xs} = \frac{{}^1M_x}{W_t} \quad (2)$$

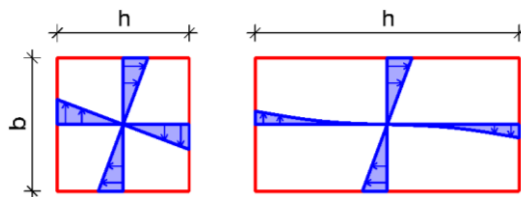
kde ψ je deplanační funkce
 1M_x vnitřní kroucí moment volného kroucení
 W_t modul průřezu ve volném kroucení

Modul průřezu ve volném kroucení lze vyjádřit v uzavřeném tvaru jen pro velmi malé množství průřezů (kruh, elipsa), neboť jeho hodnota závisí na vztahu (1) a ten je závislý na deplanační funkci, jež je řešením Laplaceovy rovnice s velmi náročnou okrajovou podmínkou. I pro tak jednoduchý průřez, jakým je obdélník, lze hodnotu W_t stanovit pouze přibližně, porovnáním deplanační funkce a průběhu smykového toku (Timoshenko & Goodier, 1987) jako poměr dvou nekonečných geometrických řad s hyperbolickými funkcemi:

$$W_t = \frac{\pi^2}{24} \cdot \frac{1 - \frac{192}{\pi^5} \frac{b}{h} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^5} \tanh\left(\frac{n\pi h}{2b}\right)}{\sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{1}{n^2} \left[1 - \frac{1}{\cosh\left(\frac{n\pi h}{2b}\right)} \right]} \cdot b^2 \cdot h \quad (3)$$

kde b je kratší strana obdélníku;
 h delší strana obdélníku

Maximální smykové napětí přitom vzniká uprostřed delších stran obdélníku. Výše uvedené vztahy pro průřezové charakteristiky v kroucení jsou invariantní k natočení souřadného systému.



Obrázek 3: Idealizovaný průběh smykového napětí od volného kroucení obdélníkového průřezu s různým poměrem stran (analytické řešení).

Vliv vázaného kroucení je značně závislý na tvaru průřezu a zároveň na způsobu podepření konstrukce. Vznikající napětí se pro lineárně pružný materiál stanoví ze vztahů (4) a (5), přičemž (5) platí pro tenkostěnné průřezy. Pokud je umožněna volná deplanace (zpravidla ale není) pak se průřez volně zdeformuje ze své roviny, ale nevzniknou žádná přídavná napětí.

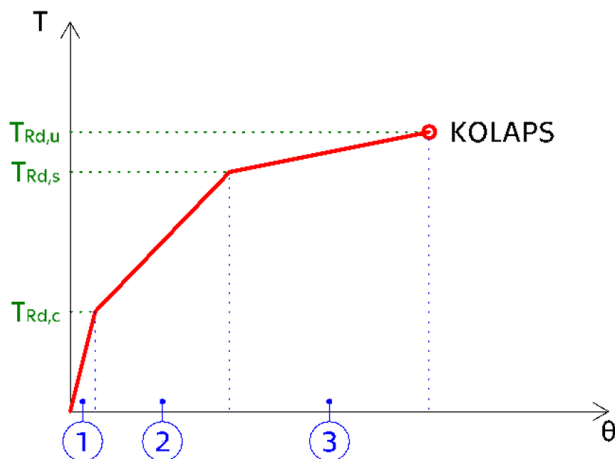
$$\sigma_{x,\omega} = \frac{B}{I_\omega} \cdot \omega \quad (4)$$

$$2\tau_{xs} = \frac{2M_x \cdot S_\omega}{\delta_n \cdot I_\omega} \quad (5)$$

kde B je bimoment
 ω výsečová souřadnice
 $2M_x$ vnitřní krout. moment vázaného kroucení
 a význam ostatních veličin lze nalézt v literatuře.

2.3. Chování krouceného železobetonového prvku a příhradová analogie

Postupným zvyšováním působícího krouticího momentu lze u železobetonových prvků pozorovat celkem 3 fáze chování, charakterizované skokovou změnou tuhosti na pracovním diagramu (T- θ): 1) kroucení plného průřezu bez trhlin; 2) kroucení průřezu s trhlinami; 3) kolaps (Hassoun et al., 2008).



Obrázek 4: Schématický pracovní diagram krouceného železobetonového prvku s uvážením zpevnění výztuže.

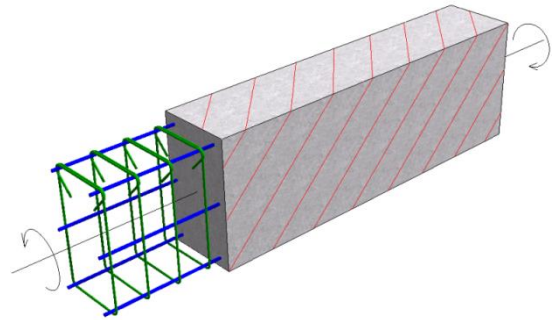
2.3.1. Kroucení plného průřezu bez trhlin.

Při nízkých hodnotách krouticího momentu není výztuž téměř využita a napětí je přenášeno betonem. Průřez vykazuje nejvyšší tuhost v kroucení až do okamžiku vzniku trhlin, které se objeví při dosažení smykové pevnosti betonu. Jelikož ta není běžně vůbec definována – ačkoli se již uskutečnily pokusy o její stanovení (Ráček et al., 2016) – nahrazuje se tahovou pevností betonu (f_{ctd}). Krouticí moment při vzniku trhlin ($T_{Rd,c}$) lze stanovit úpravou rovnice (2).

$$T_{Rd,c} = W_t \cdot f_{ctd} \quad (6)$$

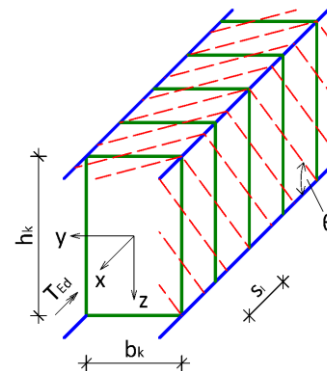
2.3.2. Kroucení průřezu s trhlinami

Po vzniku trhlin tuhost v kroucení výrazně klesá a aktivuje se výztuž. Trhliny přitom vznikají přibližně ve sklonu 45° po celém obvodu průřezu.



Obrázek 5: Kroucený železobetonový prvek po vzniku trhlin.

Všechny návrhové postupy, které budou uvedeny dále, vychází z předpokladu, že beton nadále nepůsobí a veškerý krouticí moment je přenášen výztuží. Maximální krouticí moment, který může být výztuží přenesen je stanoven na prostorovém modelu příhradové analogie, kde podélná výztuž tvoří hlavní pásy příhrady, třmínky tvoří svislíce a beton tvoří diagonály a zajišťuje statickou určitost modelu.



Obrázek 6: Model příhradové analogie pro kroucení.

Krouticí moment na mezi kluzu výztuže ($T_{Rd,s}$) se stanoví mezní plastickou analýzou (rovnice (7)) a nastává v okamžiku, kdy dojde ke zplastizování podélné i příčné výztuže (Lampert & Thürlimann, 1972). Betonové diagonály se uvažují jako dokonale tuhé a nedisipují žádnou energii.

$$T_{Rd,s} = 2 \cdot A_k \cdot \sqrt{\frac{A_{sw} \cdot f_{ywd}}{s_l} \cdot \frac{\sum A_{sl} \cdot f_{yd}}{u_k}} \quad (7)$$

kde A_k je plocha uzavřená spojnici os podél. prutů
 A_{sw} plocha jedné větve třmínku
 f_{ywd} návrhová mez kluzu třmínků
 s_l podélná osová vzdálenost třmínků
 $\sum A_{sl}$ celková plocha podél. výztuže na kroucení
 f_{yd} návrhová mez kluzu podélné výztuže
 u_k obvod plochy A_k

2.3.3. Kolaps

Ke kolapsu krouceného železobetonového prvku může dojít dvěma způsoby:

- drcením tlakových diagonál
- přetržením výztuže

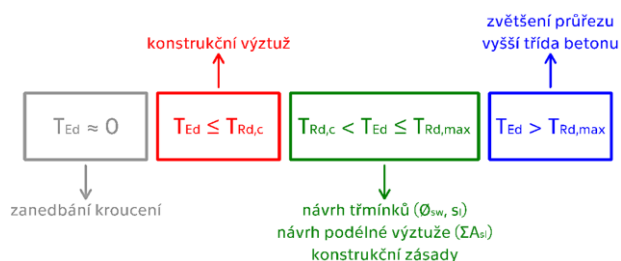
Porušení drcením tlakových diagonál ($T_{Rd,max}$) je nepřijatelné, neboť takový kolaps je náhlý, bez předchozího varování výraznou deformací.

Po zplastizování výztuž obecně vykazuje jisté zpevnění, díky kterému může přenášený krouticí moment narůstat. Toto navýšení je ovšem minimální a zároveň dochází k výraznému rozevírání trhlin. Proto je za moment únosnosti zpravidla považován krouticí moment na mezi kluzu výztuže $T_{Rd,s}$ (7).

3. KROUCENÍ DLE EC2

Podle ČSN EN 1992-1-1 se má únosnost průřezu v kroucení vypočítat za předpokladu tenkostěnného uzavřeného průřezu s uzavřeným smykovým tokem. Plné (konvexní) průřezy se mají přímo převést na tenkostěnný průřez, zatímco složené (nekonvexní) průřezy se mají rozdělit na sérii dílčích průřezů a teprv poté převést na tenkostěnné průřezy.

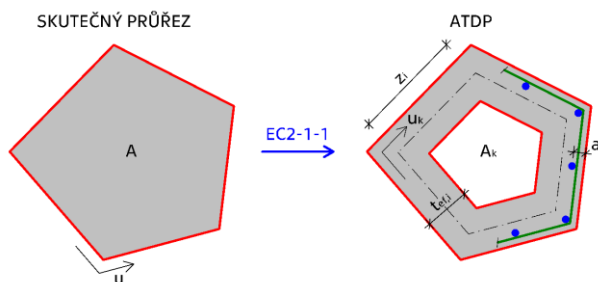
Při uvážení superpozice účinků smyku od kroucení a od posouvající síly se má zároveň stanovit, zda-li dojde ke vzniku trhlin v betonu (8) a zda-li není překročena únosnost tlakových diagonál (9). Pokud ke vzniku trhlin nedojde, pak je možné navrhnout výztuž pouze na základě konstrukčních zásad. Posouzení krouceného prvku dle EC2 lze schématicky popsat následujícím diagramem:



Obrázek 7: Diagram návrhu krouceného ŽB prvku dle EC2.

3.1. Analogický tenkostěnný dutý průřez

Převod skutečného průřezu na analogický tenkostěnný dutý průřez (ATDP), znázorňuje následující obrázek:



Obrázek 8: Tenkostěnná náhrada skutečného průřezu dle EC2.

Hlavními charakteristikami ATDP jsou přítomná účinná tloušťka jednotlivých stěn ($t_{ef,i}$), plocha omezená střednicemi spojených stěn průřezu (A_k) a obvod vymezený plochou A_k (u_k). Účinná tloušťka stěny se stanoví ze vztahu (8) s omezením (9):

$$t_{ef,i} = \frac{A}{u} \quad (8)$$

$$2 \cdot a \leq t_{ef,i} \leq t_{skut,i} \quad (9)$$

kde A je plocha skutečného průřezu
 u je obvod skutečného průřezu
 a je vzdálenost osy podélné výztuže od vnějšího okraje ATDP
 t_{skut} skutečná tloušťka stěny dutého průřezu

3.2. Skutečná vs. výpočtová poloha výztuže na kroucení

Vzhledem k převodu skutečného průřezu na tenkostěnný se předpokládá konstantní smykový tok ve stěnách ATDP. Smykové napětí se poté stanoví ze vztahu:

$$\tau_{t,i} = \frac{T_{Ed}}{2 \cdot A_k \cdot t_{ef,i}} \quad (10)$$

kde T_{Ed} je působící návrhový krouticí moment

Vyjádřením ekvivalentní posouvající síly a dalšími úpravami vztahů, viz (Kohoutková et al., 2014) lze nakonec vypočítat krouticí moment na mezi kluzu výztuže:

$$T_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s_l} \cdot 2 \cdot A_k \cdot f_{ywd} \cdot \cotg(\theta) \quad (11)$$

kde θ je (zvolený) úhel sklonu tlak. diagonál

Z (11) vyplývá, že únosnost výztuže na kroucení je přímo úměrná ploše A_k . To je v souladu se vztahem pro únosnost modelu příhradové analogie (7). Problémem je, že plocha A_k není v případě EC2 vypočtena ze skutečné polohy výztuže, ale ze střednic stěn fiktivního tenkostěnného průřezu. Omezení (9) nicméně zajišťuje, že takto stanovená plocha nikdy nepřekročí skutečnou plochu příhradového modelu.

Jednoduchým výpočtem lze dokázat, že pro běžný obdélníkový průřez je plocha A_k stanovená dle normy mnohem menší než skutečná plocha příhradového modelu a krouticí moment na mezi kluzu je proto podhodnocen (Vesecký, 2017).

3.3. Tloušťka stěny ATDP pro tenký obdélník

Jedním z nejtypičtějších železobetonových průřezů je obdélník. Proto je vhodné jeho kroucení věnovat více pozornosti a to především v souvislosti s různým poměrem výšky a šířky (h/b). V této kapitole bude blíže zkoumán tvar ATDP, v následující analýze únosnosti při vzniku trhlin.

Pro zjednodušení vztahů je vhodné zavést substituci vyjadřující poměr stran obdélníku:

$$N = \frac{h}{b} \quad (12)$$

Rozměr h přitom vždy odpovídá delší straně, nezávisle na natočení obdélníku a rozměr b je vždy kratší stranou.

Účinná tloušťka stěny ATDP je poté:

$$t_{ef} = \frac{A}{u} = \frac{N \cdot b^2}{2 \cdot b \cdot (1+N)} = \frac{b}{2} \cdot \frac{N}{1+N} \quad (13)$$

A pro rostoucí poměr stran N konverguje účinná tloušťka k hodnotě:

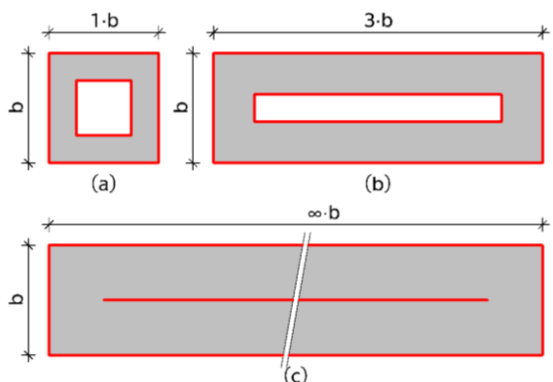
$$\lim_{N \rightarrow \infty} (t_{ef}) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{b}{2} \cdot \frac{N}{1+N} \right) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{b}{2} \cdot \frac{\frac{N}{N}}{1 + \frac{1}{N}} \right) = \frac{b}{2} \quad (14)$$

Ze vztahu (14) vyplývá, že ATDP limitně vyplňuje celou plochu obdélníkového průřezu. Konvergence k hodnotě $b/2$ navíc probíhá velice rychle a tloušťka stěny je výrazná i pro zcela typické poměry stran obdélníku, viz následující tabulka.

Tabulka 1: Účinná tloušťka stěny obdélníkového průřezu v závislosti na poměru stran.

$N=b/h$	t_{ef}
1	$0,25 \cdot b$
2	$0,33 \cdot b$
3	$0,38 \cdot b$
∞	$0,50 \cdot b$

Nabízí se proto otázka, zda-li lze takový náhradní průřez považovat stále za tenkostěnný a uplatnit pro něho předpoklad konstantního smykového toku – pro porovnání viz rovnice (10) s konstantním smykovým tokem a Obrázek 3 se skutečným lineárním průběhem smykového napětí na obdélníkovém průřezu.



Obrázek 9: ATDP pro obdélníkový průřez s různým poměrem stran.

3.4. Nahodnocený kroučící moment při vzniku trhlin

V Eurokódu 2 je dále uvedeno, že se ATDP může uplatnit i pro posouzení přibližně obdélníkového průřezu před vznikem trhlin. Kroučící moment při vzniku trhlin se má stanovit ze vztahu:

$$T_{Ra,c} = 2 \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot f_{ctd} \quad (15)$$

Při porovnání se vztahem dle teorie pružnosti (6) je zřejmé, že výraz $2 \cdot A_k \cdot t_{ef}$ má význam zobecněného modulu průřezu ve volném kroucení W_t .

$$W_t \cdot f_{ctd} \equiv 2 \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot f_{ctd} \quad (16)$$

$$W_t \equiv 2 \cdot A_k \cdot t_{ef} \quad (17)$$

Bylo by proto možné předpokládat, že tyto výrazy udávají stejné nebo velice podobné hodnoty s tím, že normové postupy by měly být vždy na straně bezpečné. V tomto případě je tomu naopak a hodnoty dle EC2 jsou výrazně na straně nebezpečné, viz následující tabulka.

Tabulka 2: Porovnání modulu průřezu ve volném kroucení dle teorie pružnosti a dle EC2 pro typické průřezy.

geometrie	poměr stran	$W_t / 2 \cdot A_k \cdot t_{ef}$
kruh	-	1,13
čtverec	1:1	1,35
obdélník	2:1	1,51
	3:1	1,54
	∞ :1	1,50

Výpočtem dle EC2 je tedy okamžik vzniku trhlin pro obdélníkový průřez nadhodnocen i o více než 50 %, užití modelu je tak nevhodné.

3.5. Posouzení složených průřezů

U nekonvexních průřezů složených z několika geometrických obrazců (např. T, L apod.) již nelze ATDP jednoduše použít, jelikož by mohlo dojít k překrývání jeho stěn.

Průřez se má proto rozdělit na dílčí průřezy (nejčastěji obdélníkové) a každému má být přisouzen část působícího kroučícího momentu úměrná jeho tuhosti v kroucení bez trhlin. Každý dílčí průřez má může být poté navržen samostatně. Pro praktické uplatnění je ovšem tento postup velmi nejednoznačený a problematický.

V první řadě není definováno, jakým způsobem mají být průřezy děleny, zda-li má být vytvořen jeden masivní dílčí průřez a k němu několik menších ze zbylých částí nebo zda-li mají být naopak tvořeny dílčí průřezy s podobnou tuhostí v kroucení.

Samotná tuhost v kroucení, která má být použita pro rozdělení působícího kroučícího momentu, není definována. Dle teorie pružnosti je tuhost v kroucení dána součinem $G \cdot I_c$, ale tyto veličiny nejsou uplatněny ve vztazích pro posouzení průřezu a rozdělení momentů na základě tohoto kritéria proto není vhodné.

Dále při samostatném návrhu každého dílčího průřezu není možné stanovit kroučící moment při vzniku trhlin (15) ani kroučící moment na mezi únosnosti tlakových diagonál (18), jelikož tyto veličiny jsou závislé na chování celého průřezu a ne pouze jeho částí.

$$T_{Ra,max} = v \cdot \alpha_{cw} \cdot f_{cd} \cdot A_k \cdot t_{ef} \cdot \sin(2\theta) \quad (18)$$

kde v je součinitel redukce pevnosti betonu při porušení smykem
 α_{cw} součinitel stavu napětí v tlačném pásu

Rozdělení na dílčí průřezy lze tak prakticky uplatnit pouze pro stanovení kroučícího momentu na mezi kluzu výtuže (11).

Posledním problémem, souvisejícím s dílčími průřezy jsou konstrukční zásady pro výtuž na kroucení. Maximální

podélná osová vzdálenost třmínek je mj. závislá na nejmenším z rozměrů, účinné výšce a obvodu průřezu. Pro některé malé dílčí průřezy jsou tato pravidla tak přísná, že je není možné uplatnit.

3.6. Vázané kroucení

V úvodu tohoto článku bylo zmíněno, že s vývojem vysokohodnotných betonů se začínají stále častěji objevovat konstrukce s tenkostěnným (často otevřeným) průřezem. U takových prvků již může vznikat nezanedbatelné napětí od vázaného kroucení.

V EC2-1-1 ovšem není uveden žádný konkrétní výpočetní postup, který by vázané kroucení zohlednil. Jsou pouze uvedeny dva velmi obecně formulované odstavce:

"Pro uzavřené tenkostěnné průřezy a plné průřezy lze vázané kroucení běžně zanedbat."

"U otevřených tenkostěnných průřezů může být nutné uvažovat vázané kroucení. Pro velmi štíhlé průřezy má být výpočet proveden na základě modelu nosníku konečnými prvky a v ostatních případech na základě modelu náhradní příhradoviny. Ve všech případech má být návrh proveden podle návrhových pravidel pro ohyb s podélnou normálovou silou a pro namáhání smykem."

Podrobnější pravidla lze nalézt v EC2-2, kde je doporučeno pro vázané kroucení použít tzv. sendvičový model. Ten je ale určen především pro komorové mosty a veškeré účinky zatížení jsou vyjádřeny za rovinné napjatosti. Pro prutové prvky tak tento postup není použitelný.

4. SHRUTÍ

Na předchozích stranách bylo ukázáno, že normový analytický výpočetní model pro kroucení v Eurokódu 2 obsahuje mnoho chyb, nepřesností a nedostatků.

Převedení skutečného průřezu na analogický tenkostěnný dutý průřez způsobuje značené množství problémů i pro zcela jednoduché a typické průřezy jako např. obdélník. V případě složitějších průřezů (T, L, I, ...) pak problémy dále narůstají a často není ani jednoznačné, jak správně při návrhu postupovat.

Je zřejmé, že současný normový postup není univerzálně použitelný a často poskytuje výsledky výrazně na straně nebezpečné (viz např. kapitola 3.4). Zcela nedostatečně je v normě řešeno vázané kroucení, jehož vliv bude při současném trendu zeštíhlování konstrukcí dále narůstat.

Přestože kroucení zpravidla není dominantním způsobem namáhání železobetonových prvků, není možné se s aktuálním stavem spokojit a je třeba hledat lepší řešení.

5. BUDOUCÍ VÝZKUM

Budoucí výzkum bude zaměřen na podrobné zkoumání a popis uvedené problematiky s využitím experimentálních zkoušek, numerické parametrické studie a analytických postupů založených na teorii pružnosti a plasticity, případně na jiných existujících návrhových postupech.

Výsledkem by mělo být zpřesnění nebo úplné nahrazení současného modelu na kroucení v Eurokódu 2.

Speciální pozornost bude rovněž věnována chování kroucených tenkostěnných prvků z UHPC s rozptýlenou výtzuží.

Literatura

- ČSN EN 1992-1-1 (2011). *Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. ed. 2. Praha: ÚNMZ.
- ČSN EN 1992-2 (2007). *Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: ČNI.
- Hassoun, M. N. & Al-Manaseer, A. (2008). *Structural Concrete – Theory and design*. 4th ed. Hoboken: Wiley. ISBN 978-0-470-17094-6.
- Jirásek, M. & Zeman, J. (2012). *Přetváření a porušování materiálů – Dotvarování, plasticita, lom a poškození*. 2. vyd. Praha: Česká technika. ISBN 978-80-01-05064-4.
- Kalný, M. & Komanec, J. & Tichý, J. *Lávka z UHPC u Opatovic* [prezentace]. Dostupné z: http://www.cesti.cz/wc15/08_Kalny_Opatovice.pdf
- Kohoutková, A. & Procházka, J. & Vašková, J. (2014). *Navrhování železobetonových konstrukcí – Příklady a postupy*. Praha: Česká technika. ISBN 978-80-01-05587-8.
- Lampert, P. & Thürlimann, B. (1972). *Ultimate Strength and Design of Reinforced Concrete Beams in Torsion and Bending*. Basel: Birkhäuser. ISBN 3-7643-0631-9.
- Marek, J. Lávky UHPC. In: *ksprefa.cz* [online]. cit. 27.4.2019. Dostupné z: <https://ksprefa.cz/produkty/uhpc/lavky/>
- Ráček, V. & Kadlec, L & Křístek, V. & Vítek, J. L. (2016). New experiments on shear properties of fibre-concrete, *Procedia Engineering*, **151**, 249-256.
- Timoshenko, S. P. & Goodier, J. N. (1987). *Theory of elasticity*. 3rd ed. New York: McGraw-Hill. ISBN 0-07-064720-8.
- Veseký, J. (2017). *Kroucení železobetonových prvků*. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Katedra betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce: Vašková, J.