

NÁVRH PŘEDPJATÝCH TRÁMŮ PRO EXPERIMENT VLIVU SOUDRŽNOSTI PŘEDPÍNAČÍ VÝZTUŽE NA VZNIK A ROZVOJ TRHLIN

Tomáš Vízner, *

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

ABSTRAKT

Trvanlivost předpjatých betonových konstrukcí má zásadní vliv na životnost konstrukce. Je proto důležité se zabývat tím, jaký je vliv soudržnosti předpínací výztuže na působení konstrukce, deformace a vznik trhlin. Proto se bude provádět experiment, kde budou vystaveny krátkodobému a dlouhodobému zatížení tři typy předpjatých betonových nosníků s T průřezem.

Prvním typem je nosník předepnutý soudržnou předpínací výztuží, druhým typem je nosník předepnutý nesoudržnou předpínací výztuží a posledním typem je nosník předepnutý nesoudržnou předpínací výztuží a vyztužený betonářskou výztuží. Množství předpětí a betonářská výztuž je navržena tak, aby byl z následného experimentu patrný průběh vzniku a vývoje trhlin na všech typech nosníků. Navržené předpětí je u všech typů nosníků totožné. Šířka trhliny je vypočtena podle ČSN EN 1992-1-1. Dále byla pomocí grafu vykreslena závislost šířky trhliny a deformace nosníku na ohybovém momentu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Trvanlivost předpjatých konstrukcí • Soudržná předpínací výztuž • Nesoudržná předpínací výztuž • Trhliny • Předpjatý beton

ABSTRACT

The durability of prestressed concrete structures has a major impact on the service life of the structure. Therefore, it is important to consider the effect of bond of prestressed reinforcement on structural performance, deformation and cracking. Therefore, an experiment will be conducted where three types of prestressed concrete T-section beams will be subjected to short and long term loading.

The first type is a beam prestressed with bonded prestressing, the second type is a beam prestressed with unbonded prestressing and the last type is a beam prestressed with unbonded prestressing reinforced with additional steel bars. The amount of prestressing and concrete reinforcement is designed so that the subsequent experiment shows the formation and development of cracks in all types of beams. The designed prestressing is identical for all beam types. The

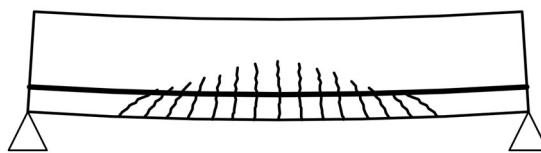
crack width is calculated according to EN 1992-1-1. Furthermore, the dependence of the crack width and the deformation of the beam on the bending moment were plotted using a graph.

KEYWORDS

Durability of prestressed structures • Bonded prestressing • Unbonded prestressing • Cracks • Prestressed concrete

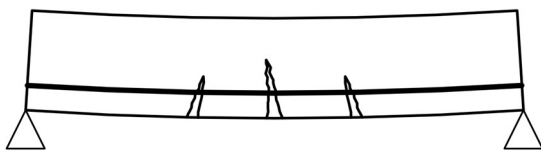
1. ÚVOD

Typ předpínací výztuže z hlediska soudržnosti má zásadní vliv na vznik a rozvoj trhlin. U prvků vyztužených soudržnou předpínací výztuží díky soudržnosti výztuže dochází ke vzniku více menších trhlin.



Obrázek 1: Trhliny u prvku se soudržnou předpínací výztuží

I z hlediska výpočtu šířky trhlin dle ČSN EN 1992-1-1 lze soudržnou předpínací výztuž ve výpočtu uvažovat. U konstrukcích vyztužených nesoudržnou předpínací výztuží dochází ke vzniku méně trhlin s větším rozevřením a nelze nesoudržnou předpínací výztuž uvažovat pro řízení šířky trhlin.



Obrázek 2: Trhliny u prvku s nesoudržnou předpínací výztuží

Vznik větších trhlin po zřátě tlakové rezervy je nežádoucí, proto se u nesoudržných kabelů navíc navrhuje soudržná betonářská výztuž, kterou lze navrhnout tak, aby se při daném zatížení dala šířka trhlin omezit. Povoleno šířku trhlin pro

* Školitel: prof. Ing. Jan L. Víték, CSc., FEng.

železobetonové a předpjaté betonové konstrukce definuje ČSN EN 1992-1-1 a pro mosty ČSN EN 1992-2.

1.1. Přípravovaný experiment

Je třeba připravit experiment tak, aby byl realizovatelný a výsledky vzešlé z experimentu byly jednoznačné a srozumitelné.

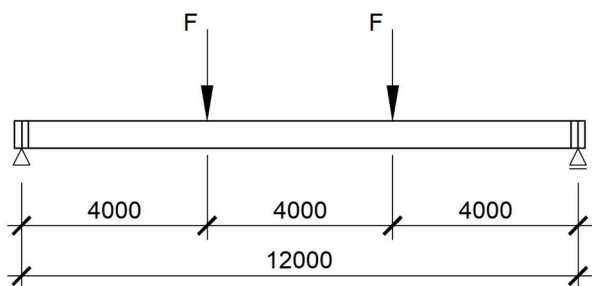
Experiment bude spočívat v zatěžování tří různých typů předpjatých nosníků T průřezu čtyřbodovým ohybem.

Nosník prvního typu bude předepnutý soudržnou předpínací výztuží zainjektovanou cementobetonovou směsí. Druhým typem je krajní případ, který by při návrhu reálné konstrukce nebylo možné navrhout. Jedná se o nosník vyztužený pouze nesoudržnou předpínací výztuží, která bude zainjektována tukem, tedy bez soudržnosti. Třetí typ betonového nosníku bude vyztužený též nesoudržnou předpínací výztuží zainjektovanou tukem a navíc betonářskou výztuží, která zajistí rozdělení trhlin. U všech typů nosníků bude navržena stejná plocha předpínací výztuže se stejnou geometrií vedení kabelu a všechny budou předepnuty stejnou předpínací silou.

Část nosníků bude zatěžována krátkodobým zatížením do mezního stavu únosnosti a část nosníků bude zatížena dlouhodobým zatížením pomocí stálých břemen (betonové bloky). Velikost břemen by měla ideálně způsobit takové namáhání, aby došlo k rozevření trhlin.

Během zatěžování se u všech nosníků bude měřit a vyhodnocovat průhyb a šířka vzniklých trhlin.

Zatěžovací schéma je vykresleno na obrázku níže.



Obrázek 3: Zatěžovací schéma

Tento článek se dále zabývá návrhem jednotlivých nosníků, především návrhem ideálního množství předpínací a betonářské výztuže, tak aby došlo ke vzniku trhlin při velikosti takových břemen, která lze v rámci experimentu realizovat.

2. METODIKA VÝPOČTU

2.1. Materiály

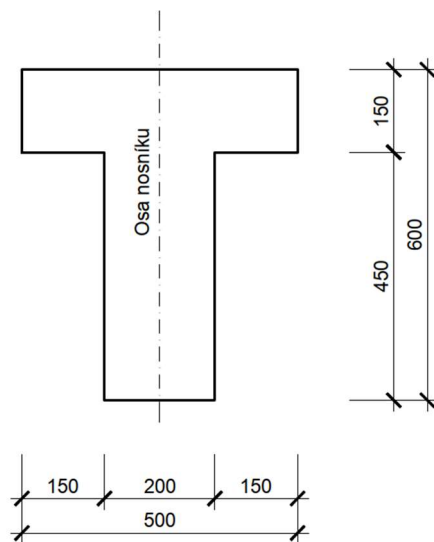
Nosníky jsou navrženy z betonu C35/45. Betonářská výztuž je navržena B500B a předpínací výztuž Y1860S7-15,7.

Ve výpočtu je uvažováno se střední hodnotu pevnosti betonu v tlaku $f_{cm} = 43$ MPa a v tahu $f_{ctm} = 3,2$ MPa. Pro betonářskou výztuž je uvažováno s charakteristickou mezí

kluzu $f_{yk} = 500$ MPa a pro předpínací výztuž s charakteristickou pevností $f_{pk} = 1860$ MPa.

2.2. Geometrie

Nosník je navržen o rozpětí $L = 12$ m. Výška průřezu je $h = 0,6$ m, šířka horní desky je $b = 0,5$ m, tloušťka horní desky je $t_d = 0,15$, tloušťka stojiny je $t_s = 0,2$ m.



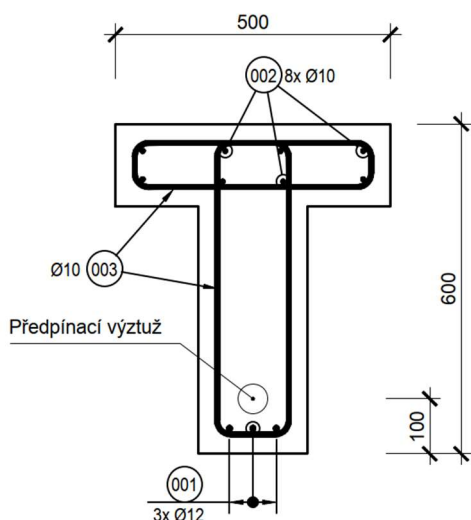
Obrázek 4: Rozměry průřezu nosníku

2.3. Ohybová únosnost jednotlivých nosníků

Moment únosnosti jednotlivých nosníků byl stanoven podle teorie mezních přetvoření se zahrnutím počáteční napjatosti v betonovém průřezu a předpínací výztuží. Dále bylo uvažováno s charakteristickými hodnotami pevností materiálů, u betonu bylo uvažováno se středními hodnotami pevností. Pracovní diagram betonu byl použit bilineární. Pro předpínací výztuž bylo uvažováno s tahovým zpevněním, kdy k porušení výztuže dojde při poměrném přetvoření v předpínací výztuži $\epsilon_{uk} = 20,0$ ‰. Maximální napětí v nesoudržných předpínacích kabelech bylo uvažováno jako napětí v kabelu po odečtení ztrát s navýšením o 100 MPa.

Předpínací výztuž byla navržena 2x lano ($A_{p1} = 150$ mm²) s počátečním napětím po zakotvení 1200 MPa. Dlouhodobé ztráty v 28 dnech byly spočteny pomocí softwaru MIDAS. Předpínací lana jsou navržena jako přímá s excentricitou od spodních vláken 100 mm.

Pro nosník s betonářskou výztuží byla navržena podélná výztuž u spodních vláken 3x Ø12. Betonářská výztuž je navržena tak, aby šířka trhlin byla přiměřená pro danou úroveň zatížení v MSP.



Obrázek 5: Schéma vyztužení

2.4. Výpočet kritického momentu vzniku trhlin M_{cr}

Šířka trhlin a průhyb nosníku byl spočten pro nosník s nesoudržnou předpínací a s betonářskou výztuží.

Kritický moment M_{cr} na mezi vzniku trhlin byl spočten za ideálního průřezu neporušeného trhlinou, kdy bylo uvažováno s tahovou pevností betonu. Nejprve byla stanovena úroveň neutrálné osy x ze součtové výminky sil působících na průřez a následně spočteny průřezové charakteristiky průřezu. Moment vzniku trhlin byl vypočten dle následujícího vztahu se zahrnutím působící normálové síly od předpětí v absolutní hodnotě a pevnosti betonu v tahu.

$$M_{cr} = \frac{(f_{ctm} + \sigma_{p,a}) \cdot I_i}{(h-x)} \quad (1)$$

2.5. Výpočet šířky trhlin

Výpočet šířky trhlin byl proveden podle přímého výpočtu uvedeném v ČSN EN 1992-1-1, kap. 7.3.4. Výpočet byl proveden pro hodnoty zatížení od vzniku prvních trhlin až po stav, kdy došlo ke zplaztizování betonářské výztuže.

Výpočet byl proveden postupnou iterací výšky tlačené oblasti betonu x a přetvoření v horních vláknech tlačeného betonu ε_{cc} na ideálním průřezu porušeném trhlinou bez uvážení betonu působícího v tahu. Do výpočtu bylo zahrnuto zatížení normálovou silou způsobenou předpětím jako externí zatížení, které ovlivnilo polohu neutrálné osy x . Pro každý ideální průřez v závislosti na zatěžovacím momentu byly vypočteny průřezové charakteristiky průřezu a napětí v betonářské výztuži. Z těchto průřezových charakteristik bylo možné dopočítat pro každý zatěžovací stav i odpovídající šířku trhliny.

Pro každý zatěžovací stav byla určena velikost zatěžovacích břemen.

Šířka trhliny je pro prvky předpjeté nesoudržnou předpínací výztuží při kvazistálé kombinaci zatížení omezena na 0,2 mm.

2.6. Výpočet průhybu

Průhyb nosníku ve středu rozpětí byl vypočten pro každý zatěžovací stav s uvážením ohybové tuhosti ideálního průřezu po celé délce nosníku. Průhyb byl vypočten z natočení průřezu.

Průhyb uprostřed rozpětí byl vypočten dle následujících vztahů:

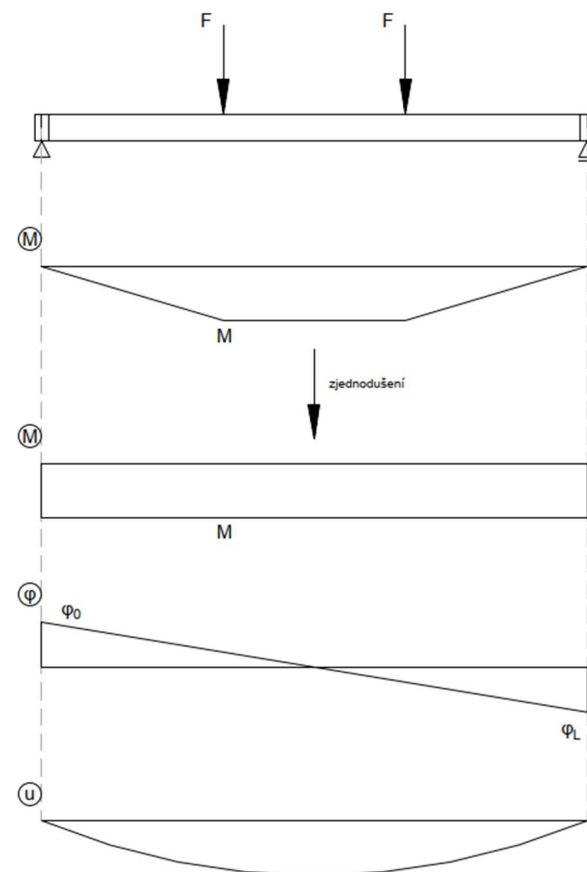
$$u = \int \varphi dx = \varphi_0 \cdot x + \frac{\varphi_L - \varphi_0}{L} \cdot \frac{x^2}{2} \quad (2)$$

Kde natočení φ je dáno vztahem:

$$\varphi(x) = \varphi_0 + \frac{\varphi_L - \varphi_0}{L} \cdot x \quad (3)$$

$$\varphi_0 = \frac{(\varepsilon_{ct} - \varepsilon_{cc})}{H} \cdot \frac{L}{2} = -\varphi_L \quad (4)$$

ε_{cc} a ε_{ct} jsou přetvoření tlačeného betonu u horních vláken a u dolního povrchu tažených vláken nejvíce namáhaného průřezu.

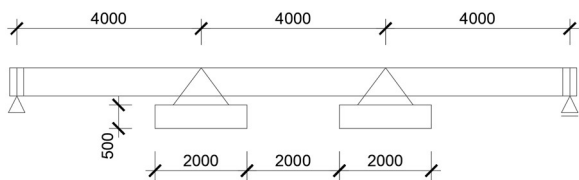


Obrázek 6: Průběh ohybového momentu, natočení průřezu a deformace na celém nosníku

2.7. Zkušební zatížení

Zkušební zatížení bylo navrženo tak, aby při dlouhodobém zatížení se na začátku zatěžování rozevřely trhliny. Velikost břemen byla tedy navržena tak, aby na konstrukci vyvolala ohybové namáhání větší než moment na vzniku trhlin M_{cr} .

Nosník bude zatížen dvěma betonovými bloky o rozměrech 2,0 x 1,0 x 0,5 m. Schéma experimentu je zobrazeno na obrázku níže.



Obrázek 7: Schéma zatížení stálými břemeny

3. VÝSLEDKY

V tabulce níže jsou zobrazeny momenty únosnosti M_{Rd} pro jednotlivé typy nosníků.

Tabulka 1: Moment únosnosti jednotlivých typů nosníků

| Nosník | M_{Rd} |
|------------------|----------|
| | [kNm] |
| Soudrž. | 264.67 |
| Nesoudrž. | 174.89 |
| Nesoudrž. + bet. | 252.68 |

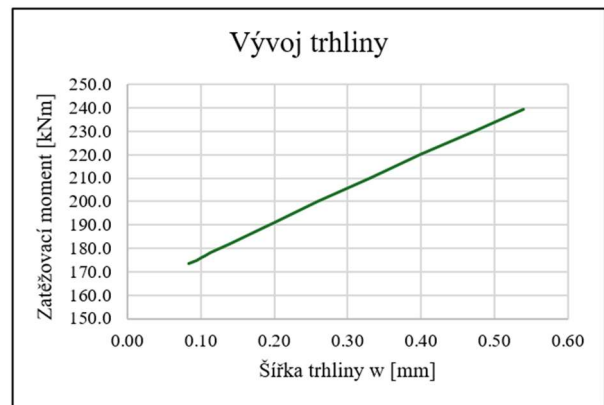
Dle výpočtů je kritický moment na vzniku trhlin nosníku s betonářskou výztuží $M_{cr} = 173,3$ kNm. Tento moment odpovídá zatížení dvěma břemeny $F = 24,8$ kN. Na základě tohoto zatížení byla navržena velikost stálých břemen pro dlouhodobé namáhání.

Vývoj vypočtené šířky trhliny v závislosti na zatížení nosníku vyztuženého nesoudržnou předpínací a betonářskou výztuží je zobrazen v tabulce a dále také pomocí grafu. Je zřejmé, že dříve než dojde k drcení betonu u horních vláken, napětí v betonářské výztuží přesáhne mez kluzu oceli. Výpočtová trhlina šířky 0,2 mm bude dosažena při zatížení, které odpovídá momentovému namáhání $M = 191,4$ kNm.

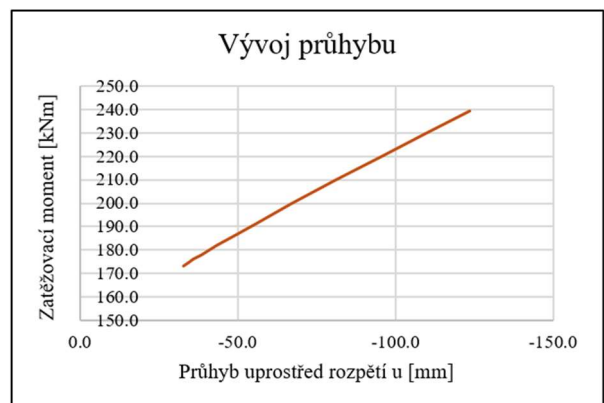
Dále jsou v tabulce a v grafu zobrazeny vypočtené velikosti předpokládaného průhybu vznikající na nosníku během zatěžování. Maximální průhyb před dosažením meze kluzu je $u = 123,5$ mm.

Tabulka 2: Šířka trhlin a velikost průhybu pro nosník vyztužený nesoudržnou předp. výztuží a bet. výztuží

| | M | x | ϵ_{cc} | σ_s | w | u |
|----|-------|-------|-----------------|------------|------|--------|
| | [kNm] | [m] | [%] | [MPa] | [mm] | [mm] |
| 1 | 173.3 | 0.155 | -0.290 | 157.4 | 0.08 | -32.8 |
| 2 | 175.0 | 0.152 | -0.297 | 165.2 | 0.09 | -34.8 |
| 3 | 176.0 | 0.150 | -0.301 | 169.9 | 0.10 | -36.0 |
| 4 | 177.0 | 0.149 | -0.306 | 174.5 | 0.11 | -37.2 |
| 5 | 178.0 | 0.147 | -0.310 | 179.4 | 0.11 | -38.5 |
| 6 | 182.0 | 0.142 | -0.327 | 198.6 | 0.14 | -43.5 |
| 7 | 187.2 | 0.136 | -0.348 | 224.3 | 0.17 | -50.2 |
| 8 | 191.4 | 0.132 | -0.366 | 245.3 | 0.20 | -55.8 |
| 9 | 199.8 | 0.125 | -0.400 | 288.3 | 0.26 | -67.2 |
| 10 | 210.1 | 0.118 | -0.441 | 341.5 | 0.33 | -81.4 |
| 11 | 219.9 | 0.113 | -0.480 | 393.3 | 0.40 | -95.3 |
| 12 | 230.4 | 0.108 | -0.520 | 448.8 | 0.47 | -110.3 |
| 13 | 239.5 | 0.105 | -0.555 | 497.7 | 0.54 | -123.5 |



Obrázek 7: Závislost šířky trhliny na ohybovém namáhání



Obrázek 8: Závislost velikosti průhybu na ohybovém namáhání

4. ZÁVĚR

U všech typů nosníků byla navržena dvě předpínací lana s předpínacím napětím 1200 MPa. Nosník s betonářskou výztuží bude vyztužen třemi pruty profilu $\varnothing 12$ mm. Všechny nosníky byly navrženy s totožnou geometrií.

Jako dlouhodobé zatížení bylo navrženo zatížení betonovými bloky, kde každý blok bude vyvozovat sílu na nosník za mezi vzniku trhlin. Krátkodobé zatížení do meze únosnosti bude vyvoláno pomocí zatěžovacích lisů.

Z výpočtu je zřejmé, že velikost trhlin a průhybu bude růst lineárně a na konstrukci dojde k významnému rozvětvení trhlin dříve, než dojde ke kolapsu nosníku.

Výpočet prokázal, že navrhovaný experiment je proveditelný a poskytne důležité informace o chování jednotlivých typů nosníků při krátkodobém i dlouhodobém zatížení. Velikost navržených zatěžovacích břemen byla optimalizována tak, aby vyvolala vznik trhlin a umožnila jejich detailní analýzu.

Zjištění z tohoto experimentu mohou být využita při návrhu předpjatých betonových konstrukcí s ohledem na jejich trvanlivost a bezpečnost. Experiment rovněž přispěje k lepšímu pochopení vlivu soudržnosti předpínací výztuže na vznik a rozvoj trhlin.

PODĚKOVÁNÍ

Tento příspěvek vznikl v rámci grantu TAČR č. TS01030114 Systém řízení kvality výstavby betonových konstrukcí NJZ v lokálních podmínkách ČR.

Literatura

ČSN EN 1992-1-1 (2006), *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby*

ČSN EN 1992-2 (2007), *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*

ČSN EN 1991-1-1 (2006), *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb*

ČSN EN 1990 (2011), *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*

Bílý, Petr (2025) *Příklady navrhování železobetonových konstrukcí podle druhé generace Eurokódu*