

POSOUZENÍ TRHLIN U VODOTĚSNÝCH ŽELEZOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ ■ CRACK CONTROL IN REINFORCED CONCRETE LIQUID RETAINING STRUCTURES

Jaroslav Navrátil, Petr Foltyn

Článek se zabývá problematikou výpočtu a posouzení šířky a vzniku trhlin železobetonových nádrží na kapaliny a zásobníků podle Eurokódů. Je proveden podrobný rozbor části normy ČSN/STN EN 1992-3 zabývající se výpočtem šířky trhlin a je vysvětlena interpretace normových ustanovení a její použití v programu IDEA StatiCa. Je uveden rovněž postup výpočtu na příkladu posouzení šířky trhlin železobetonové nádrže. ■ The paper deals with calculation and assessment of crack width and crack resistance of reinforced concrete tanks for liquids and containers according to the Eurocode. Detailed analysis of the provisions of EN 1992-3 related to the calculation of cracks is made. The interpretation of code provisions used in IDEA StatiCa software is explained and the procedure is documented on the example of crack width calculation of reinforced concrete tank.

Posouzení šířky trhlin u vodotěsných železobetonových konstrukcí (bílých van) v poslední době nabývá na důležitosti s rostoucím počtem staveb zakládaných pod hladinou spodní vody a rostoucími požadavky na jejich nepropustnost, estetický vzhled a dlouhodobou použitelnost. Proto byla vydána norma ČSN/STN EN 1992-3, na jejíž základě byl vyvinut program IDEA StatiCa [3], který řeší veškeré požadavky normy na posouzení průřezu z pohledu tříd nepropustnosti.

VÝPOČET ŠÍŘKY TRHLIN DLE ČSN/STN EN 1992-1-1

Při výpočtu odolnosti průřezu proti vzniku trhlin podle čl. 7.1 (2) EN 1992-1-1 [1] se uplatňují dále uvedené předpoklady řešení. Ohýbaný průřez se považuje za neporušený trhlami, pokud napětí betonu v tahu nepřesáhne průměrnou hodnotu pevnosti v tahu za ohybu $f_{ct,eff}$. V tom případě beton v tažené oblasti průřezu působí a napětí v betonu (v tahu i tlaku) je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy (je lineární). Rovněž napětí ve výztuži je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy.

Uvažujme např. průřez podle obr. 7, který je od účinků kvazistálé kombinace zatížen ohybovým momentem $M_y = 19$ kNm. Ten působí jako jediný

zatížení. Odezva (rozdělení napětí v závislosti na poměrném přetvoření) takového průřezu je zobrazena na obr. 1. Trhliny v tomto případě nevznikají.

Postup používaný pro výpočet šířky trhlin je definován v čl. 7.3.4 EN 1992-1-1 [1]. Předpokládá se, že napětí betonu v tahu za ohybu přesáhlo hodnotu $f_{ct,eff}$. V tom případě je průřez porušený trhlami, beton v tažené oblasti průřezu nepůsobí a napětí tažené oblasti je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy. Rovněž napětí ve výztuži je přímo úměrné vzdálenosti od neutrální osy.

Kritérium pro posouzení vzniku trhlin však musí zohlednit reálné chování průřezu v průběhu životnosti konstrukce. Změna 3 české přílohy EN 1992-1-1 [1] požaduje, aby v případě, že se poruší posuzovaný řez trhlami např. od charakteristické kombinace zatížení, bylo toto porušení trhlami zohledněno i při posouzení šířky trhlin např. od kvazistálé kombinace. Tento způsob výpočtu byl implementován jako standardní řešení i do prezentovaného programu [3] a je demonstrován na příkladu (obr. 1). Jediným rozdílem je, že kromě momentu od kvazistálé kombinace zatížení působí i moment $M_y = 22$ kNm od charakteristické kombinace. Odezva takového průřezu zatíženého ohybovým momentem $M_y = 19$ kNm od kvazistálé kombinace zatížení zobrazená na obr. 2 se potom výrazně liší od odezvy na obr. 1. V důsledku toho je třeba vypočítat šířku trhliny podle čl. 7.3.4 [1] ($w = 0,178$ mm) a posoudit podle čl. 7.3.1 [1].

POSOUZENÍ ŠÍŘKY TRHLIN PODLE ČSN/STN EN 1992-3

Třídy nepropustnosti

Konstrukce nádrží na kapaliny se klasifikují podle třídy nepropustnosti dle ČSN/STN EN 1992-3 [2], tab. 7.105 (tab. 1).

Předpoklady výpočtu dle tříd nepropustnosti jsou stanoveny v [2]. Na základě těchto výpočtů byly odvozeny postupy výpočtu v prezentovaném programu s vlastní interpretací v případech, kdy tato norma není dostatečně jasná.

Třída nepropustnosti 0:

v tomto případě je posouzení šířky trhlin provedeno dle [1].

Třída nepropustnosti 1:

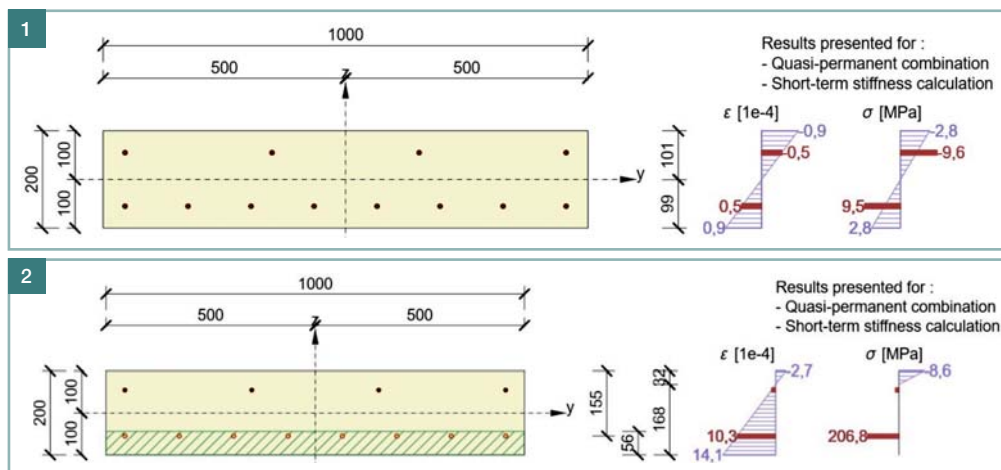
v tomto případě se posouzení šířky trhlin provádí podle následující kapitoly, a to v závislosti na splnění podmínek čl. 7.3.1 (112), (113) [2].

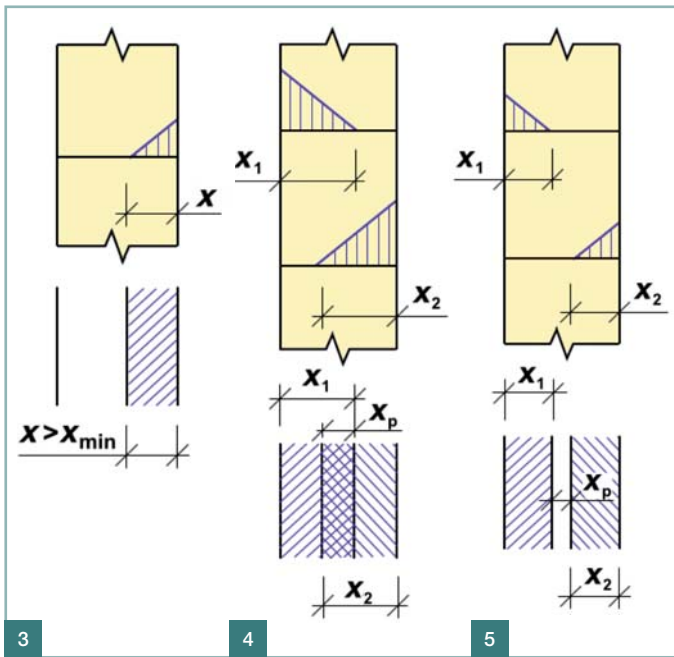
Třída nepropustnosti 2:

pokud není splněna některá z podmínek čl. 7.3.1 (112), (113) [2], (tzn. že trhliny procházejí celou tloušťkou průřezu nebo není splněna podmínka pro

Obr. 1 Průřez neporušený trhlami, $M_y = 19$ kNm ■ Fig. 1 Cross section prior to the formation of any cracks, $M_y = 19$ kNm

Obr. 2 Průřez již porušený trhlami, $M_y = 19$ kNm ■ Fig. 2 Cross section after the formation of cracks, $M_y = 19$ kNm





Obr. 3 Jednostranně namáhaný průřez – výška tlačené oblasti průřezu je větší než x_{min} ■ Fig. 3 Unilaterally loaded cross section, depth of compression zone is greater than x_{min}

Obr. 4 Oboustranně namáhaný průřez – tlačené výšky betonu se vzájemně překrývají ■ Fig. 4 Bilaterally loaded cross section, depths of compression zones overlap

Obr. 5 Oboustranně namáhaný průřez – tlačené výšky betonu se vzájemně nepřekrývají ■ Fig. 5 Bilaterally loaded cross section, depths of compression zones do not overlap

Obr. 6 Stanovení rozměrů pro výpočet tlakového spádu v bílé vaně ve vztahu k hladině spodní vody ■ Fig. 6 Determination of the hydrostatic pressure in bathtub in relation to the water table

Obr. 7 Rozměry průřezu a vyztužení ■ Fig. 7 Dimensions of the cross section and the reinforcement

Tab. 1 Klasifikace nepropustnosti ■ Tab. 1 Classification of tightness

Třída nepropustnosti	Požadavek na průsak
0	jistý stupeň průsaku se připouští nebo je průsak kapalin irrelevantní
1	průsak je omezen na malé množství; připouští se několik povrchových skvrn nebo vlhkých míst
2	průsak je minimální; vzhled nesmí být znehodnocen skvrnami
3	průsak není povolen

rozmezí poměrných přetvoření betonu), má být provedeno zajištění pomocí vystýlek nebo bariér proti vodě. Norma v tomto případě mezní hodnoty šířky trhlin neuvádí a prezentovaný program šířku trhliny neposuzuje. V případě, že obě podmínky splněny jsou, je posouzení provedeno stejným způsobem jako pro třídu nepropustnosti 1.

Třída nepropustnosti 3:

norma mezní hodnoty šířky trhlin neuvádí a zajištění má být provedeno vždy pomocí vystýlek nebo bariér proti vodě. Prezentovaný program v tomto případě šířku trhlin neposuzuje.

Předpoklady a zásady posouzení šířky trhlin pro třídy nepropustnosti 1 a 2

Použijme následující označení veličin: x je výška tlačené oblasti betonového průřezu (obr. 3), obdobně x_1, x_2 (obr. 4 a 5), h tloušťka (výška) průřezu, $x_p = x_1 + x_2 - h$, x_{min} limitní výška tlačené ob-

lasti vypočtena dle [2], čl. 7.3.1 (112), $\epsilon_{ct,max}$ maximální přetvoření v krajních vláknech betonového průřezu za provozních podmínek, $\epsilon_{ct,min}$ minimální přetvoření v krajních vláknech betonového průřezu za provozních podmínek, $\Delta\epsilon_{ct} = \epsilon_{ct,max} - \epsilon_{ct,min}$ rozmezí poměrných přetvoření v betonu dle [2], čl. 7.3.1 (113) a w_{k1} limitní šířka trhliny vypočtená dle [2], kap. 7.3.1 (111).

Čl. 7.3.1 (112) [2] stanoví, že postačující zárukou, že trhliny nebudou prostupovat celou tloušťkou průřezu, je podmínka

$$x > x_{min}, \text{ resp. } x_p > x_{min} \quad (1)$$

Čl. 7.3.1 (113) [2] stanoví, že postačující zárukou, že se trhliny do šířky w_{k1} samoutěsní i v případě, že budou prostupovat celou tloušťkou průřezu, je podmínka

$$\Delta\epsilon_{ct} < 150 \times 10^{-6} \quad (2)$$

V závislosti na rozložení napětí rozeznáváme následující případy řešení:

Třída nepropustnosti 1

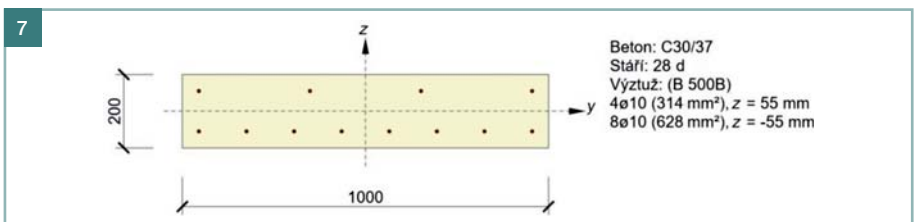
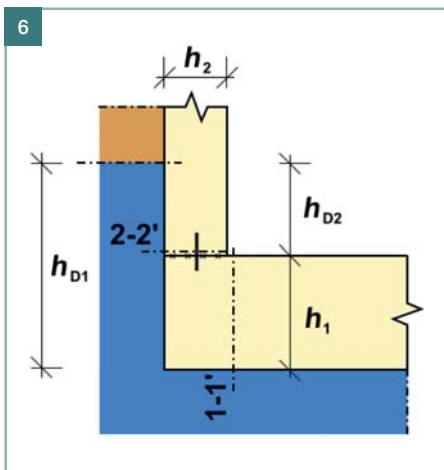
- Jsou-li splněny zároveň obě podmínky (1) i (2), lze pro posouzení šířky trhlin použít ustanovení 7.3.1 EN 1992-1-1 [1].
- Je-li splněna podmínka (1) – trhliny

neprostupují celou tloušťkou průřezu –, ale není splněna podmínka (2), je třeba omezit šířku trhliny na hodnotu w_{k1} , tj. podle [2], kap. 7.3.1 (111).

- **Není-li splněna podmínka (1) –** trhliny prostupují celou tloušťkou průřezu –, je třeba omezit šířku trhliny na hodnotu w_{k1} , tj. podle [2], kap. 7.3.1 (111), a to bez ohledu na splnění podmínky (2).

Třída nepropustnosti 2

- Jsou-li splněny zároveň obě podmínky (1) i (2), lze pro posouzení šířky trhlin použít ustanovení 7.3.1 EN 1992-1-1 [1]. Musíme připustit, že jde o autorskou interpretaci ustanovení normy použitou v prezentovaném programu a v normě nelze takovýto výklad explicitně nalézt.
- Je-li splněna podmínka (1) – trhliny neprostupují celou tloušťkou průřezu –, ale není splněna podmínka (2), je třeba provést zajištění pomocí vystýlek nebo bariér proti vodě. Šířka trhlin se v tomto případě neposuzuje.
- **Není-li splněna podmínka (1) –** trhliny prostupují celou tloušťkou průřezu –, je třeba provést zajištění pomocí vystýlek nebo bariér proti vodě, a to bez ohledu na splnění podmínky (2). Šířka trhlin se v tomto případě neposuzuje.



Výpočet limitní šířky trhliny w_{k1} a limitní tlačené výšky x_{min}

Výpočet limitní šířky trhliny závisí na hydrostatickém tlakovém spádu, který je vyjádřen jako podíl hydrostatické výšky h_D a tloušťky stěny h (obr. 6). Pro různé poměry hydrostatického tlakového spádu jsou definovány limitní šířky trhliny (pro $h_D/h \leq 5$ je $w_{k1} = 0,2$ mm; pro $h_D/h \geq 35$ je $w_{k1} = 0,05$ mm) v [2], čl. 7.3.1 (111), přičemž výsledná limitní šířka se vypočte lineární interpolací pro mezilehlé hodnoty.

Limitní výška tlačené oblasti x_{min} je vypočtena jako menší z hodnot $0,2h$; 50 mm dle [2], čl. 7.3.1 (112).

PŘÍKLAD POSOUZENÍ ŠÍŘKY TRHLIN ŽELEZOBETONOVÉ NÁDRŽE

V rámci řešeného příkladu je konstrukce klasifikována v třídě nepropustnosti 1, přičemž konstrukce je řešena jako jednostranně namáhaná deska tloušťky 0,2 m, beton C30/37, vyztužení 4Ø10 B500 při horním povrchu, 8Ø10 B500 při dolním povrchu s hydrostatickou výškou 100 mm. Hodnota součinitele dotvarování $\phi(t, t_0) = 3,2$.

Příklad je řešen pro krátkodobé i dlouhodobé účinky, přičemž pro krátkodobé účinky není splněna podmínka limitní výšky x_{min} a pro dlouhodobé účinky podmínka rozmezí poměrných přetvoření. Proto je v obou případech vypočtena limitní šířka trhliny w_{k1} (tab. 2). Příklad nevyhovuje, přičemž cílem nebylo udělat perfektní návrh, ale provést ukázkový výpočet podle normy [2]. Je třeba upozornit, že hodnota vnitřních sil u jedné z kombinací MSP vyvodila napětí betonu v tahu větší, než je pevnost betonu v tahu (průřez je potrhán). Proto se předpokládá vyloučení působení betonu v tahu v posudcích MSP pro všechny kombinace daného extrému.

ZÁVĚR

Výpočet a posouzení trhlin železobetonových nádrží na kapaliny podle Eurokódů je časově náročná nelineární úloha. Při současných nárocích na kvalitu a rychlost projekčních prací je prakticky nemyslitelné provádět tyto výpočty ručně bez kvalitního softwaru. Zároveň je třeba upozornit, že některé případy, které při výpočtu mohou nastat, norma přesně neřeší. Autoři proto považovali za vhodné provést podrobný rozbor části normy a vysvětlit vlastní interpretaci normových ustanovení, jak jsou použita v programu IDEA StatiCa. Pro usnadnění orientace ve výpočtu je uve-

Tab. 2 Postup výpočtu a výsledky posouzení šířky trhlin železobetonové nádrže programem IDEA StatiCa ■ Tab. 2 Calculation procedure and results of assessment of the cracks width of the reinforced concrete tank in IDEA StatiCa program

Šířka trhlin – krátkodobé účinky

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	w_k [mm]	w_{lim} [mm]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	0,178	0,165	108,2	100	nevyhovuje

Šířka trhlin – dlouhodobé účinky

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	w_k [mm]	w_{lim} [mm]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	0,179	0,165	108,4	100	nevyhovuje

Mezivýsledky a součinitele pro výpočet šířky trhlin – krátkodobé účinky

x [mm]	h [mm]	d [mm]	$A_{c,eff}$ [mm ²]	$A_{s,eff}$ [mm ²]	$\rho_{p,eff}$ [-]
32	56	149	56030	628	0,01
k_1 [-]	$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ [10 ⁻⁴]	k_1 [-]	k_2 [-]	k_3 [-]	k_4 [-]
0,4	6,2	0,8	0,5	3,4	0,43
c [mm]	ϵ_1 [10 ⁻⁴]	ϵ_2 [10 ⁻⁴]	$S_{r,max}$ [mm]	Φ [mm]	σ_s [MPa]
40	14,1	-2,7	288	10	206,8

Posouzení minimální výšky tlačené oblasti x_{min}

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	x [mm]	x_{min} [mm]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	32	40	125,4	100	nevyhovuje

Posouzení rozmezí poměrných přetvoření

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\Delta\epsilon_{ct}$ [10 ⁻⁴]	$\Delta\epsilon_{ct,lim}$ [10 ⁻⁴]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	0,9	1,5	57,5	100	OK

Mezivýsledky a součinitele pro výpočet šířky trhlin – dlouhodobé účinky

x [mm]	h [mm]	d [mm]	$A_{c,eff}$ [mm ²]	$A_{s,eff}$ [mm ²]	$\rho_{p,eff}$ [-]
56	48	155	48107	628	0,01
k_1 [-]	$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$ [10 ⁻⁴]	k_1 [-]	k_2 [-]	k_3 [-]	k_4 [-]
0,4	6,7	0,8	0,5	3,4	0,43
c [mm]	ϵ_1 [10 ⁻⁴]	ϵ_2 [10 ⁻⁴]	$S_{r,max}$ [mm]	Φ [mm]	σ_s [MPa]
40	16,3	-6,3	266	10	244

Posouzení minimální výšky tlačené oblasti x_{min}

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	x [mm]	x_{min} [mm]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	56	40	71,8	100	OK

Posouzení rozmezí poměrných přetvoření

Kombinace	N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\Delta\epsilon_{ct}$ [10 ⁻⁴]	$\Delta\epsilon_{ct,lim}$ [10 ⁻⁴]	Hodnota [%]	Mez [%]	Posudek
kvazistálá	0	19	0	3,3	1,5	220	100	nevyhovuje

den rovněž postup výpočtu na příkladu posouzení šířky trhlin železobetonové nádrže.

doc. Ing. Jaroslav Navrátil, CSc.
IDEA RS, s. r. o.
& Fakulta stavební VŠB-TU Ostrava
e-mail: navratil@idea-rs.com



Ing. Petr Foltyn
IDEA RS, s. r. o.
e-mail: foltyn@idea-rs.com



Literatura:

- [1] EN 1992-1-1. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1: General rules and rules for buildings*. European Committee for Standardization, December 2004.
- [2] EN 1992-3. *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 3: Liquid retaining and containment structures*. European Committee for Standardization, June 2006.
- [3] IDEA RS. *Idea StatiCa. User guide*. Brno: Idea RS, s. r. o. Dostupné z: www.idea-rs.com