

POSOUZENÍ MEZNÍHO STAVU POUŽITELNOSTI V OBLASTI DISKONTINUIT

Abstrakt

Nová metoda modifikovaných tlakových polí poskytuje z pohledu řešení oblasti diskontinuit posouzení mezního stavu použitelnosti. Materiálové modely, které uvažují vliv krátkodobých a dlouhodobých účinků zatížení (zejména dotvarování) a vliv tahového zpevnění v závislosti na stupni vyztužení jsou jedny z několika aspektů, které se odráží na výsledných posudcích např. omezení napětí MSP. Výpočet šířky trhlin, z pohledu rozvoje stabilizovaných a nestabilizovaných trhlin, je porovnán s reálnými experimenty. Výpočty průhybů, napjatosti betonu a betonářské výztuže jsou porovnány s analytickými výpočty.

Klíčová slova: beton, výztuž, napětí, trhlina, stěna, detail, posudky MSP.

1 Úvod

V oblastech tzv. „Diskontinuit“, kde neplatí Bernoulli – Navierova hypotéza o zachování rovinnosti průřezu nelze uplatnit posouzení na úrovni „řezu“ či „bodu“ tak, jak je popsáno v normě.

Tyto oblasti jsou v současné době nejčastěji řešeny pomocí metody tzv. příhradové analogie, která je ovšem závislá na stanovení topologie modelu betonových vzpěr a táhel (výztuže). Metoda je i přes tuto svoji nevýhodu velmi rychlá, doporučována normami a lze dle ní vcelku spolehlivě posoudit mezní stav únosnosti. Co ovšem tato metoda není schopna postihnout je posouzení mezního stavu použitelnosti (MSP).

Model tlakových polí, tak jak byl prezentován v [2] a [3], lze považovat za zobecněnou metodu příhradové analogie, ve které jsou však uvažovány skutečné oblasti namáhané napětím namísto výslednic sil v modelu vzpěr a táhlo. IDEA StatiCa Detail byl poprvé představen na konci roku 2017 a v první verzi obsahoval pouze posouzení MSÚ, byl doplněn právě o posouzení MSP. Implementaci samotného modelu tlakových polí tento článek nepopisuje (ta je popsána v [2][3][4]) a zaměřuje se pouze na posouzení MSP.

2 Základní principy

Jak bylo zmíněno výše, pro posouzení se použije model tlakových polí implementovaný metodou konečných prvků. Předpokladem je pouze tlakové působení v betonu a tahové ve výztuži.

Samotný výpočet MSP běží na dvou výpočetních modelech:

Krátkodobý model

Tento model postihuje okamžitou odezvu konstrukce na zatížení. Pro obě složky zatížení, jak pro stálou, tak i nahodilou je pro beton uvažován lineární pracovní diagram se sečným modulem pružnosti E_{cm} .

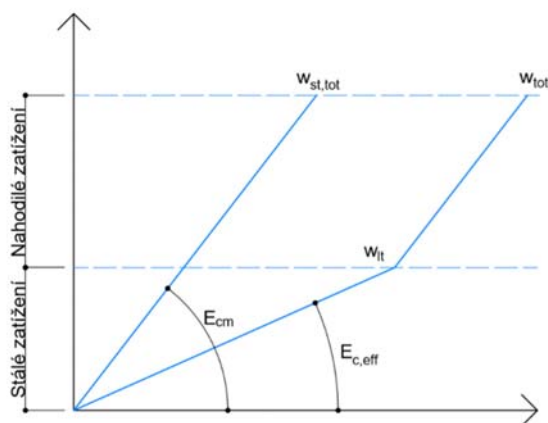
#

Dlouhodobý(složený) model

Model postihuje dlouhodobou odezvu konstrukce na zatížení. Vzhledem k tomu, že při výpočtu jsou uvažována, jak stálá (dlouhodobá), tak i nahodilá (krátkodobá) zatížení, mění se modul pružnosti v závislosti na aplikované složce zatížení. Pro dlouhodobé zatížení je v betonu uvažováno s tzv. efektivním modulem pružnosti $E_{c,eff}$ a pro krátkodobé zatížení je použit sečný modul pružnosti E_{cm} .

2.1 Beton

Efektivní modul pružnosti $E_{c,eff}$ zohledňuje efekt dotvarování a smršťování pomocí základního koeficientu dotvarování φ . $E_{c,eff} = E_{cm} / (1 + \varphi)$

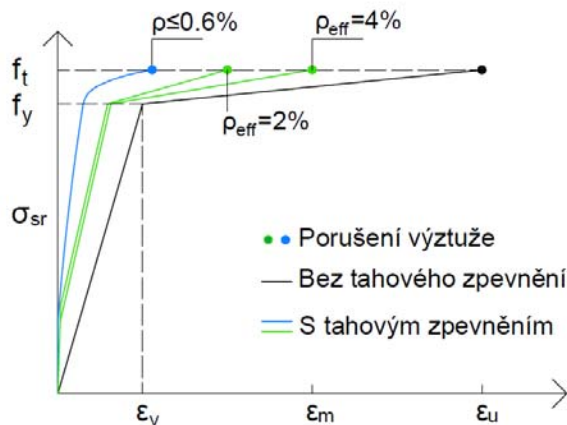


Obr. 1 Princip použití modulů pružnosti betonu pro jednotlivé zatěžovací stavy

2.2 Výztuž

Ve výchozím nastavení je aplikován idealizovaný bilineární tahový diagram pro výztuž „bez tahového zpevnění“ definovanou v normě (obr 2.). Definice tohoto diagramu vyžaduje pouze základní vlastnosti výztuže známé během fáze návrhu (jako třída pevnosti a tažnost). Model tahového zpevnění výztuže s vlivem tuhosti spolupůsobícího betonu se provede úpravou tahového diagramu výztuže bez vlivu tahového zpevnění. Ve výsledném modelu se uvažují průměrné tuhosti spolupůsobící výztuže a betonu.

Implementace tahového zpevnění rozlišuje mezi případy stabilizovaného a nestabilizovaného rozvoje trhlin.



Obr. 2 Pracovní diagram betonářské výztuže bez a s tahovým zpevněním. (převzato z [2])

2.3 Stabilizovaný rozvoj trhlin

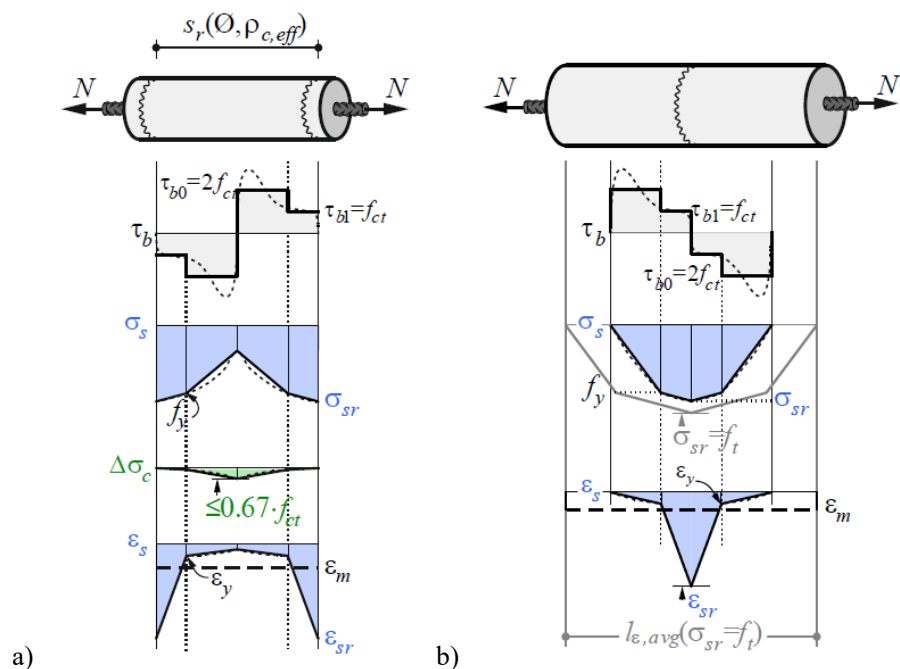
V případě plně rozvinutých stabilizovaných trhlin se pro vyjádření tahového zpevnění používá tzv. Tension Chord Model (TCM) (Marti et al. 1998, Alvarez 1998) – Obr. 3 a. S ohledem na to, že v TCM závisí tahové zpevnění na stupni vyztužení a na jeho přiřazení ke každé výztužné vložce či vrstvě, je určení příslušné účinné tažené (spolupůsobící) plochy betonu zásadní. Z toho důvodu byla implementována automatická prostorová identifikace odpovídající účinné tažené ploše betonu pro libovolnou konfiguraci výztuže. Maximální vzdálenost mezi trhlinami s_{r0} se stabilizuje na hodnotě, při níž napětí v betonu mezi dvěma sousedními trhlinami nedosáhne hodnoty napětí na mezi vzniku trhlin. Tím se ukončí rozvoj dalších trhlin. IDEA StatiCa Detail ve výchozím nastavení uvažuje průměrnou vzdálenost trhlin na hodnotě $0,67 s_{r0}$.

2.4 Nestabilizovaný rozvoj trhlin

Nestabilizovaný rozvoj trhlin je zvažován pro lokální trhliny vyvolané geometrickými nespojitostmi (např. oblasti změny průřezu, konkávní rohy...) stejně jako oblastmi s malým procentem vyztužení. V případě, že stupeň vyztužení je menší než ρ_{cr} (~0.6 %) výztuž není schopna přenést zatížení na mezi vzniku trhlin bez překročení meze kluzu.

Trhliny existující v oblastech s poměry vyztužení, které jsou nižší, než ρ_{cr} jsou, buď generovány nemechanickými vlivy (např. smrštění) nebo progresí trhlin, které jsou řízeny jinými výztužemi. V těchto případech je trhlina nestabilizována a tahové zpevnění je uvažováno pomocí tzv. „Pull-Out“ modelu – Obr. 3 b. Tento model analyzuje chování jediné trhliny bez ohledu na mechanickou interakci mezi jednotlivými trhlinami, zanedbání působení betonu v tahu a předpoklad tuhého-ideálně plastického chování v soudržnosti v TCM.

Vzhledem k tomu, že pro nestabilizovaný rozvoj trhlin není známá vzdálenost mezi trhlinami, se průměrné napětí vypočítá pro libovolnou úroveň zatížení a vzdálenost mezi body s nulovým pokluzem výztuže v betonu, kdy napětí na výztuži dosáhne své pevnosti v tahu v místě trhliny.



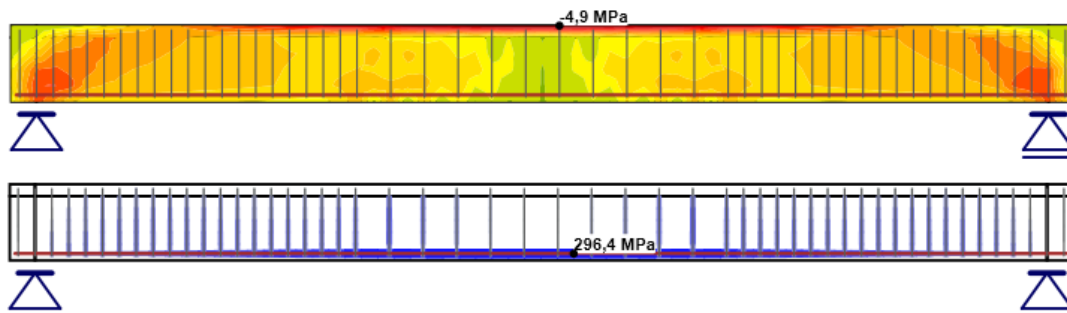
Obr. 3 a) „TCM“ prvek pro stabilizovaný rozvoj trhlin, b) „Pull-Out“ předpoklad pro nestabilizovaný rozvoj trhlin. (převzato z [2])

3 Návaznost na normy

Sestavení modelu je nad normové, ale veškeré vyhodnocení a interpretace výsledků je dle platných norem [1]. IDEA StatiCa Detail umožňuje posoudit omezení napětí (kapitola 7.2), vznik a šířku trhlin (kapitola 7.3) a deformace (kapitola 7.4) dle (Evropského výboru pro normalizaci, 2015).

3.1 Omezení napětí

Omezení napětí je implementováno dle článku 7.2 normy [1] – na základě předpokladů řešení v kapitole 2 tohoto článku. Fyzikální model vypočte napětí na síti konečných prvků a porovná s mezním napětím betonu popsáním dle 7.2 (1)(2)[1]. V posouzení omezení napětí se rovněž spočítá napětí po délce vložky a porovná se s mezním napětím výztuže 7.2 (3)[1]. Napětí v betonu σ_c a ve výztuži σ_s je kontrolováno proti limitnímu napětí z normy.



Obr. 4 Výsledné maximální napětí v betonu a ve výztuži

	$\sigma_{c,st}$ [MPa]	$\sigma_{s,st}$ [MPa]	$\sigma_{c,lt}$ [MPa]	$\sigma_{s,lt}$ [MPa]
IDEA StatiCa RCS	-7,1	290,4	-4,2	299,5
IDEA StatiCa Detail	-4,9	286,8	-4,7	287,6
IDEA StatiCa Detail – vše stálé	-4,9	286,8	-3,4	296,4

Porovnání výpočtu maximálních napětí

3.2 Posouzení vzniku a šířky trhlin

Vypočet šířky trhlin je rozdělen na výpočet stabilizovaných (rovnoměrně rozmístěných – např. při spodním okraji nosníku) a nestabilizovaných (ojedinělých) trhlin, které vznikají v místech koncentrace velkých napětí (např. v místech ostrých hran, ozubů, smykové trhliny u stěn). Veškerý výpočet napětí a přetvoření je proveden na základě předpokladů uvedených v kapitole 2. Samotný výpočet trhlin je proveden na základě metod popsanych v [2]

Výpočet šířky trhlin je aplikován na úrovni stálého zatížení. K dispozici jsou dva hlavní modely pro výpočet šířky trhlin, jak je popsáno v části 2.3 resp. 2.4:

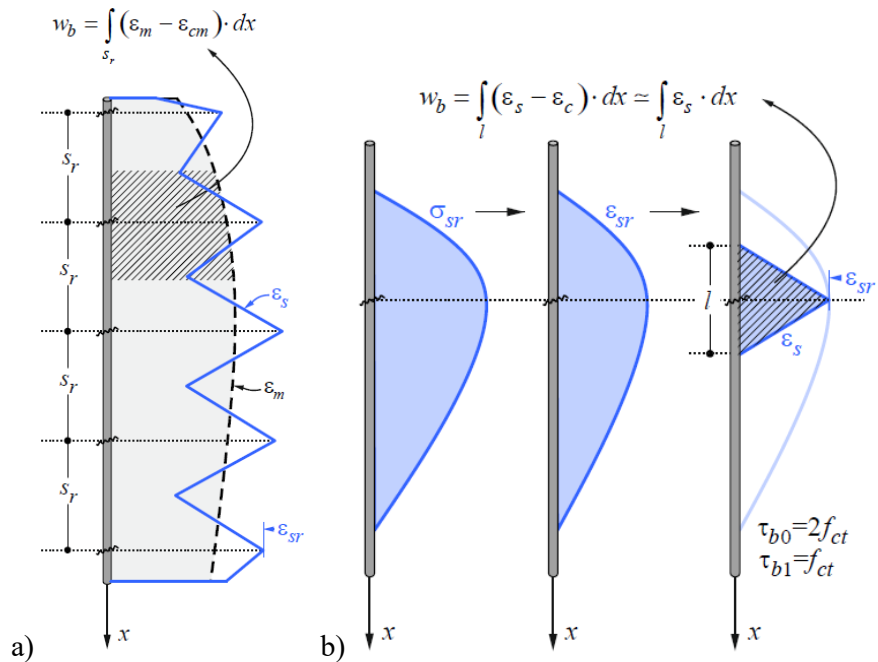
- Model stabilizovaného rozvoje trhlin
- Model nestabilizovaného rozvoje trhlin

Oba tyto modely závisí na typu vyztužení, automaticky vypočítaném stupni vyztužení a následně na tahovém zpevnění každého jednotlivého 1D prvku modelujícího výztuž. Šířka trhliny ve směru výztuže w_b je vypočtena na základě uvedených modelů tahového zpevnění integrací přetvoření na výztuži. Pro oblasti se stabilizovaným rozvojem trhlin jsou spočítány průměrné hodnoty přetvoření výztuže a integrovány na délce průměrné vzdálenosti trhlin – obr. 5 a. Pro případ nestabilizovaného rozvoje trhlin se šířka w_b vypočítá podle postupu vyznačeného na obrázku 5 b na základě výsledků maximálních napětí ve výztuži, které je pro tento případ spolehlivější než průměrné přetvoření.

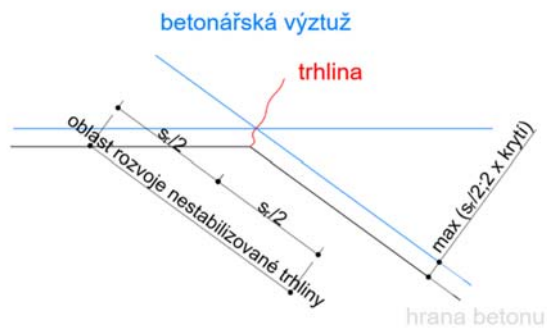
Směr trhlin se pak stanoví na základě směrů hlavních tahových přetvoření ze stejné oblasti a šířka trhliny w se upraví s ohledem na rozdíl úhlu, které mezi sebou svírají výztuž a směr hlavního tahového přetvoření v přilehlém vlákně betonu vyšetřované výztuže.

Tento přístup neodpovídá skutečné poloze trhlin, ale stále poskytuje reprezentativní výsledky, které lze porovnat s požadovanými hodnotami z normy. V podstatě lze výsledky interpretovat jako otevření trhliny za předpokladu, že se vytvoří na příslušném místě.

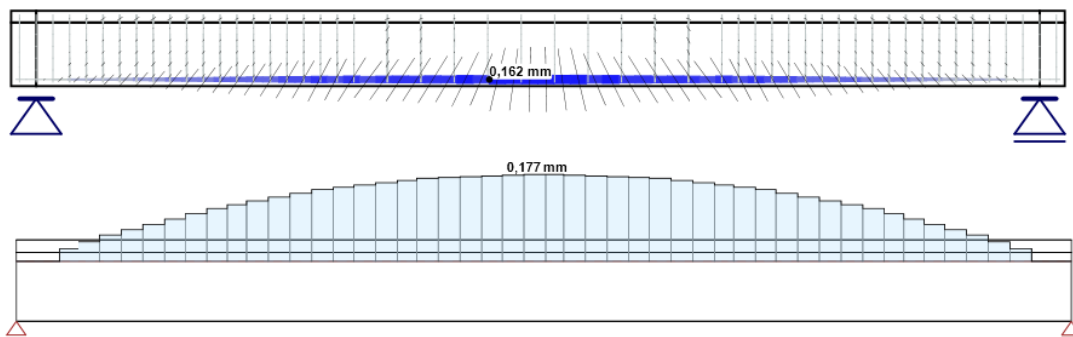
Výše uvedená metoda neumožňuje posouzení vzniku a velikosti trhlin v betonu v místech bez betonářské výztuže.



Obr. 5 a) Šířka trhliny ve směru výztuže pro stabilizovaný rozvoj trhlin b) Šířka trhliny ve směru výztuže pro nestabilizovaný rozvoj trhlin (převzato z [2])



Obr. 6 Zvláštní situace jsou pozorovány u konkávních rohů počítaných detailů či stěn. Pokud se v daném konkávním rohu vyskytne trhlina, tak její pozice je dána právě tímto rohem. Směr trhliny je dán směrem hlavního tahového přetvoření v místě tohoto rohu a samotný výpočet šířky trhliny je uvažován pak jako nestabilizovaný, i když stupeň vyztužení přilehlé betonářské výztuže předpokládá stabilizovaný rozvoj trhlin.

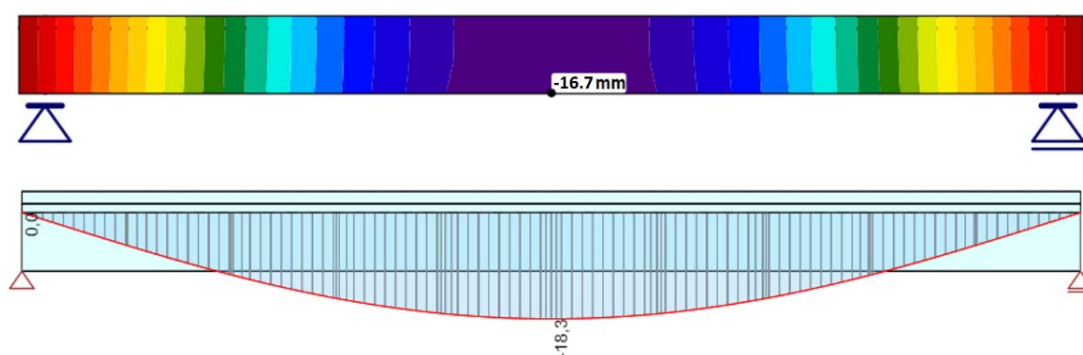


Obr. 7 Porovnání max. šířky trhlin mezi IDEA StatiCa Detail (nahore) a IDEA StatiCa RCS

3.3 Posouzení deformací

V rámci posouzení deformací jsou spočteny krátkodobé průhyby od celkového zatížení, průhyby od dlouhodobého zatížení s vlivem dotvarování, přírůstek průhybu od krátkodobého (nahodilého) zatížení a celkový průhyb. Posouzení je provedeno pro uživatelsky nastavenou limitní hodnotu. Průhyb může být posouzen pro stěny nebo staticky určité či neurčité 1 D prvky. Deformace na modelovaných částech nosníku (na koncích či uprostřed nosníku) nelze jednoduše ověřit, protože z deformace části nosníku nelze usuzovat na celkovou deformaci nosníku.

Krátkodobý $u_{z,st}$ nebo dlouhodobý $u_{z,lt}$ průhyb je spočítán a porovnán oproti uživatelsky zadané hodnotě $u_{z,lim}$



Obr. 8 Porovnání max. deformace mezi IDEA StatiCa Detail (nahore) a IDEA StatiCa Beam

4 Závěr

Počítačová implementace metody tlakových polí umožňuje bezpečné posouzení v oblasti diskontinuit betonových konstrukcí. Jedná se o transparentní metodu, která poskytuje staticovi kontrolu nad chováním konstrukce.

IDEA StatiCa Detail je nástroj pro posouzení oblastí diskontinuit v betonových konstrukcích. Nevyžaduje hluboké znalosti problematiky nelineárního chování materiálu či nutnost stanovení modelu příhradové analogie. Poskytuje efektivní způsob, jak posoudit detail či stěnu s návazností na vyhodnocení a interpretaci výsledků dle platných norem, včetně posouzení MSÚ a MSP.

5 Poděkování

Tento projekt získal finanční podporu z programu Eurostars-2, projekt ID 10 571 a MŠMT ČR Eurostars-2-7D16010 se spolufinancováním z výzkumného a inovačního programu EU Horizont 2020. Související software IDEA StatiCa Detail byl vyvinut společností IDEA StatiCa ve spolupráci s Ústavem stavebního inženýrství ETH Zürich. Kromě výše uvedených autorů se na projektu rovněž podíleli vývojáři IDEA StatiCa s.r.o. a kolektiv výzkumných pracovníků IBK ETH Zürich pod vedením Prof. Kaufmanna.

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 2004-2016
- [2] MATA-FALCÓN, J., TRAN, D., T., KAUFMANN, W., NAVRÁTIL, J. Computer-aided stress field analysis of discontinuity concrete regions, In: *Proceedings of EURO-C 2018 Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, Austria, 2018, in print
- [3] KAUFMANN, W., MATA-FALCON, J., Structural Concrete Design in the 21st Century: are Limit Analysis Methods Obsolete?, In: *Sborník ke konferenci 24.BETONÁŘSKÉ DNY 2017*, Czech Republic, ČBS ČSSI, 2017
- [4] NAVRÁTIL, J., ŠEVČÍK, P., MICHALČÍK, L., FOLTYN, P., KABELÁČ, J. Řešení stěn a detailů betonových konstrukcí, In: *Sborník ke konferenci 24. BETONÁŘSKÉ DNY 2017*, Czech Republic, 2017
- [5] Teoretický manuál IDEA StatiCa Detail 2018