

## ŘEŠENÍ STĚN A DETAILŮ BETONOVÝCH KONSTRUKCÍ



### Abstrakt

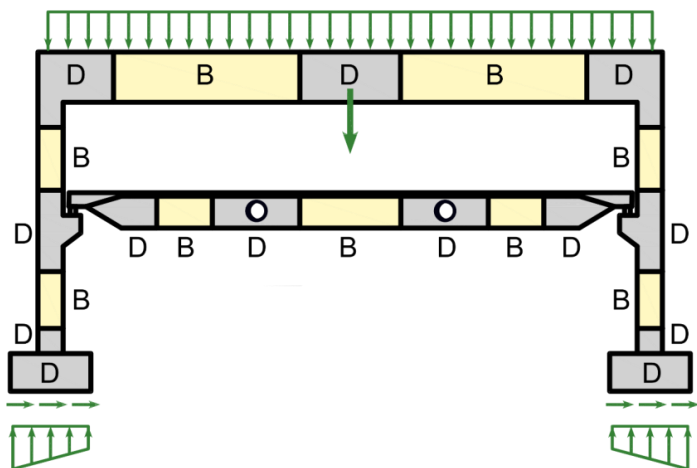
Každá betonová konstrukce obsahuje části s nějakou formou nespojitosti – krátkou konzolu, otvor, kotvení apod. Navzdory tomu, že se diskontinuity nacházejí v každé betonové konstrukci, doposud neexistuje žádné jasné a jednoznačné řešení pro kompletní návrh a posouzení betonových detailů, stěn a diafragmat. V současné době se pro posouzení oblastí nespojitosti používají jednoúčelové specializované programy nebo excelovské tabulkové procesory založené na metodě příhradové analogie. Nebo naopak mohou být výjimečně využity vědecky orientované programy bez vazby na národní normy a předpisy a bez možnosti návrhu a optimalizace výztuže. Tato praxe vede k přílišnému zjednodušování nebo naopak k pokusu zbytečně simulovat realitu. Nová metoda a softwarový nástroj umožňují inženýrům efektivně, bezpečně a hospodárně navrhnout vhodné dimenze betonového prvku, umístění a množství výztuže, a to na základě platných norem. Metoda je založena na počítačové implementaci modelu tlakových polí. Uvažují se podobné zjednodušené předpoklady jako pro ruční výpočty, přitom však vylepšení modelu umožňuje řešení mezních stavů použitelnosti včetně deformací a je založeno na jasných materiálových vlastnostech. Model tlakových polí lze považovat za zobecněnou metodu příhradové analogie, ve které jsou však uvažovány skutečné oblasti namáhané napětím namísto výslednic sil. Ověření metody bylo provedeno vůči případům nezávislým na normách, jakož i porovnáním s výpočty podle existujících norem s materiálovými zákony definovanými těmito normami.

**Klíčová slova:** beton, stěna, detail, oblast diskontinuit, výztuž

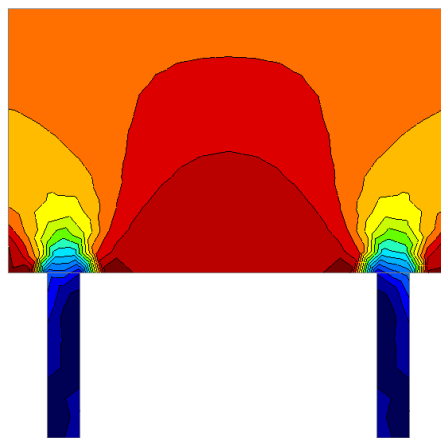
## 1 Úvod

Návrh a posouzení betonových prvků běžně provádíme na úrovni řezu (prvky 1D) nebo bodu (prvky 2D). Tento postup je popsán ve všech normách pro dimenzování a je používán v každodenní praxi statika. Ne vždy se však ví či respektuje, že je možný pouze v oblastech, kde platí Bernoulli – Navierova hypotéza o rovinnosti průřezu (tzv. B oblast).

Místa, kde tato hypotéza neplatí, nazýváme oblasti diskontinuit neboli poruchová oblasti (D oblasti). Příklady B a D oblastí jsou u 1D prvků uvedeny na Obr. 1. Jde o oblasti uložení, okolí osamělých břemen, místa změn průřezů, otvorů apod.



Obr. 1 B a D oblasti na konstrukci



Obr. 2 D oblasti v přechodu sloupového nosného systému na stěnový

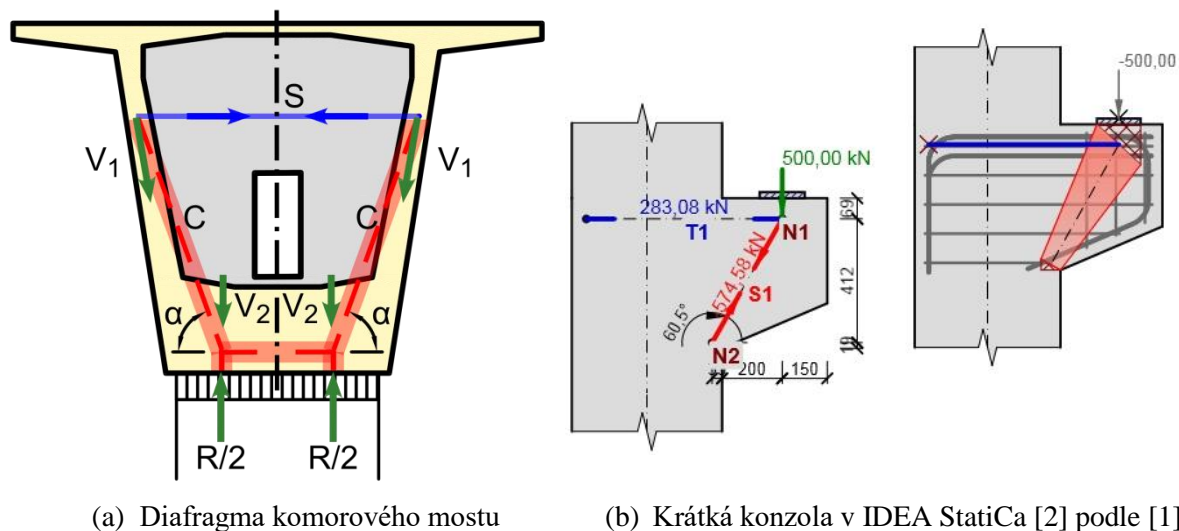
Oblasti diskontinuit se vyskytují rovněž na stěnových prvcích monolitických a prefabrikovaných objektů. V současné praxi používané lineárně pružné deskostěnové modely tuto skutečnost sice výpočtem odhalí, viz Obr. 2, ale nejsou schopny postihnout snížení tuhosti a přerozdělení napětí vlivem trhlin, tahové zpevnění, změkčení betonu v tlaku apod. Výsledkem řešení je pak barevný obrázek nereálných vnitřních sil a napětí s nedimenzovatelnými špičkami, přecenění tuhosti konstrukce, vznik a šíření trhlin a nadměrné průhyby.

Příkladem může být obvodový plášť s otvory pro okna. Vysoké koncentrace v rozích v nadpraží ukáže i lineární výpočet. Poskytované výsledky jsou však nepřehledné a obtížná orientace v tom, jak vyztužit, vede ke vzniku trhlin v parapetech. Problémy vznikají dále např. v přechodech sloupového nosného systému na stěnový, viz Obr. 2. Velký tlak ve sloupech v kombinaci s nedostatečným příčným vyztužením stěny způsobuje příčné rozestupování stěny, sloupy ji „propichují“ a vznikají téměř svislé trhliny.

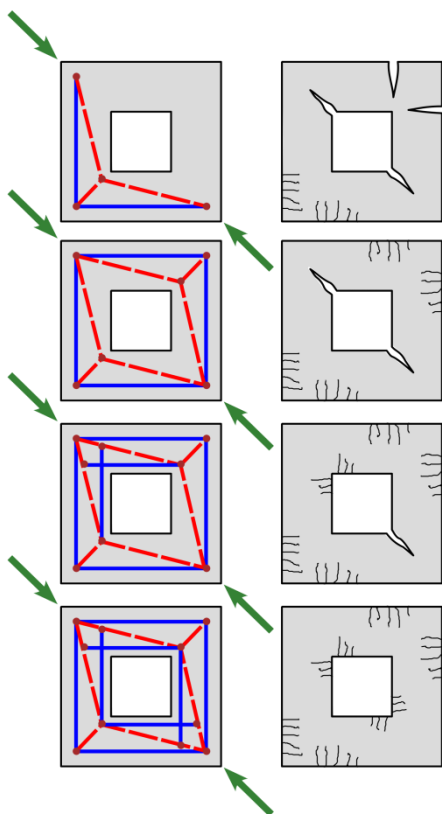
## 2 Metody pro výpočet stěn a oblastí diskontinuit

Pro složitější úlohy stavební praxe je možné využít sofistikované programy, které pracují s nelineárními výpočetními modely a metodami. Tyto metody však mohou být jen obtížně použity pro koncepční řešení konstrukce či detailu. Vyžadují totiž předem přesné dimenze, rozmístění a velikost výztuže. Navíc jsou doposud velmi náročné především na čas a zkušenosti uživatele. Je nutné správně volit materiálové modely a jejich parametry, kterým uživatel často nerozumí a z časových důvodů či z neznalosti neprovede nezbytnou verifikaci a validaci těchto modelů. Z tohoto důvodu může získat výsledky často velmi odlišné od skutečnosti. Velmi obtížná je navíc interpretace výsledků z hlediska normových ustanovení. Modely se totiž pokoušejí vystihnout virtuální realitu, nikoliv posouzení podle

normy. Pro tyto účely byly sice vyvinuty stochastické metody, které s pravděpodobnostními vlivy pracují, jejich náročnost je ale ještě mnohem vyšší a v praxi doposud nepřijatelná.



**Obr. 3** Praktické příklady metody příhradové analogie



**Obr. 4** Ukázka rozmanitosti „správných“ příhradových modelů

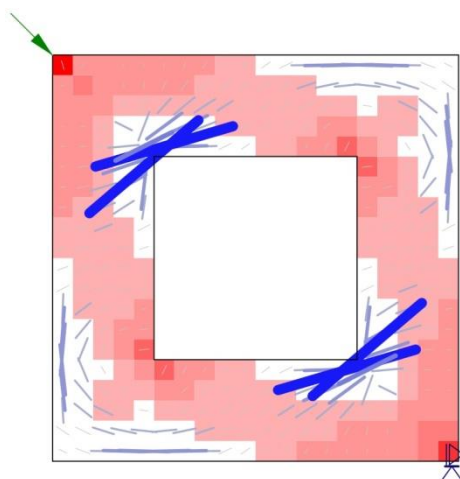
Proto jsou oblasti diskontinuit v současné době nejčastěji řešeny pomocí metody příhradové analogie (model vzpěra-táhlo). Na základě tvaru konstrukce, zatížení a okrajových podmínek navrhne inženýr náhradní příhradový model, na kterém potom stanoví únosnosti betonových vzpěr, uzlových oblastí a vyztužení (táhel). Metoda je velmi jednoduchá, výpočet příhradového modelu je rychlý a lze jej snadno provést. Existuje řada modelů ověřených praxí a doporučených normami, viz Obr. 3.

Metoda má však i řadu nevýhod. Především s ohledem na zjednodušení na příhradový model je možné posoudit pouze mezní stav únosnosti (MSÚ). Stanovení šířky trhlin, omezení napětí a průhybů je touto metodou nemožné. Vzhledem ke stále většímu důrazu na mezní stav použitelnosti (MSP) je tato nevýhoda značným omezením.

Další nevýhodou je nejednoznačnost sestavení vhodného příhradového modelu. Existuje nekonečné množství možných příhradových modelů, nicméně jen jeden z nich je optimální a neexistuje zaručený způsob, jak optimální model identifikovat, viz Obr. 4. Při sestavování modelu si

především musíme uvědomit souvislost návrhu konstrukce s jejím výpočetním modelem. Návrh tvaru, dimenzí a způsobu vyztužení determinuje způsob jejího porušování. Většinou předem známe „slabá“ místa konstrukce, respektive je cíleně předurčujeme. Tím vlastně tvoříme model konstrukce v mezním stavu únosnosti. Známým příkladem může být záměrné poddimenzování průřezů nad podporami spojitého nosníku, které při dostatečném vyztužení uprostřed polí vede k přerozdělení momentů. Při tvorbě modelu musíme respektovat mj. skutečnost, že beton má prakticky nulovou únosnost v tahu, ale také v ohybu. Pokud tedy přisoudíme betonu pouze přenos tlakových sil a výztuži naopak tahové síly, získáme velmi jednoduchý příhradový model obsahující pouze tlačené a tažené prvky. Příhradový model má však vyjadřovat působení konstrukce v mezním stavu. Jeho sestavení tedy nemůže být náhodné, ale musí odpovídat podmínkám statické a kinematické věty.

### 3 Bezpečný a ekonomický návrh

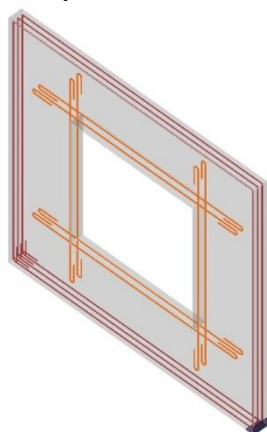


Obr. 5 Návrh příhradového modelu

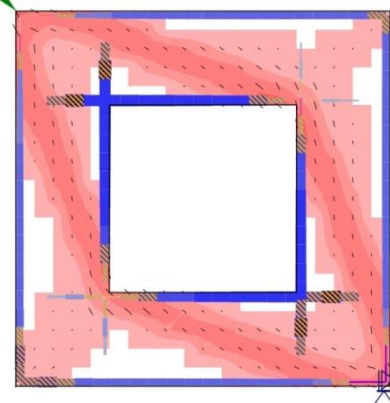
Zájem staticků o spolehlivý a rychlý nástroj pro řešení oblastí diskontinuit vedl k rozhodnutí vyvinout nový výpočetní softwarový nástroj pro návrh a posouzení detailů a stěn železobetonových konstrukcí, který je komerčně dostupný pod názvem IDEA StatiCa Detail [2]. Tento program spojuje výhody a odstraňuje všechny výše uvedené nedostatky metod popsanych v předchozí kapitole.

První výhodou metody, která se významně uplatňuje zejména u atypických detailů a stěnových konstrukcí, je možnost návrhu polohy a směrů výztuže metodou topologické optimalizace, viz [4], případně lineární analýzou, viz Obr. 5. Zejména návrh příhradového modelu topologickou optimalizací identifikuje optimální místa uložení a

směry výztuže, což může statickovi významně napomoci při rozhodování, jak danou konstrukci vyztuzit. To neumožňuje žádná z doposud používaných metod.



(a) Vyztužení konstrukce

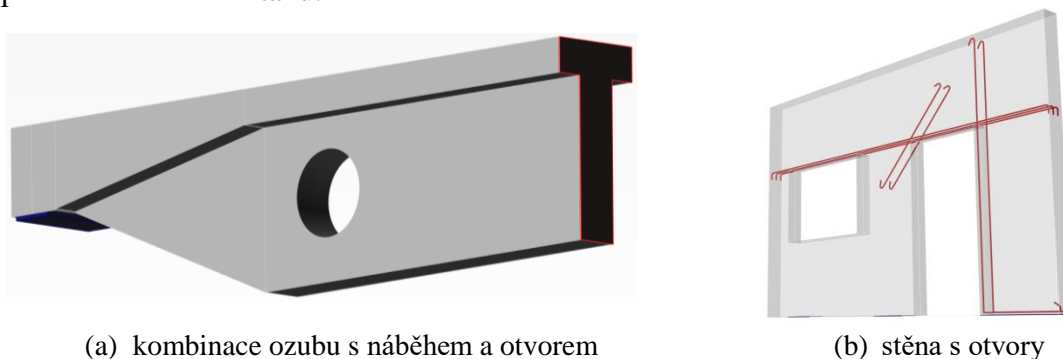


(b) Posouzení únosnosti - tlaková pole, výztuž a kotvení

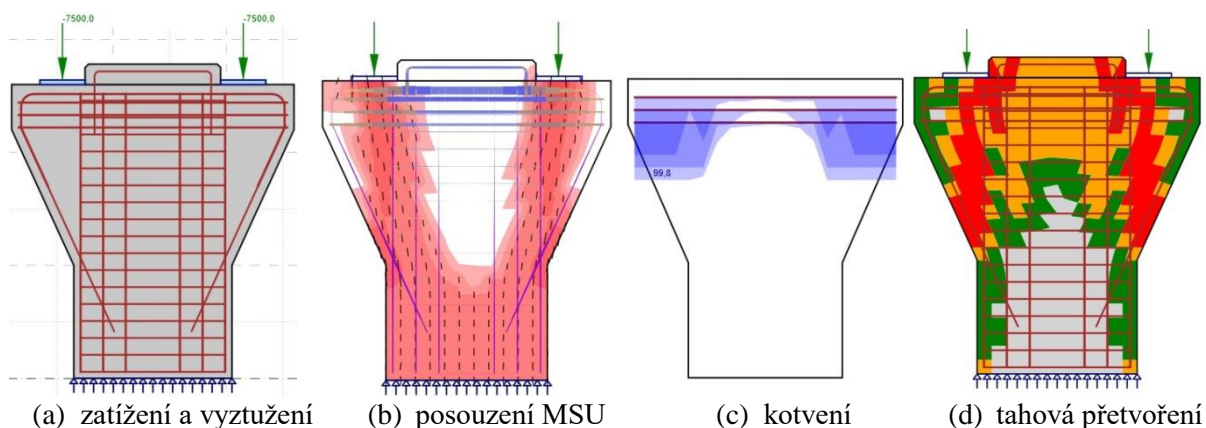
Obr. 6 Stěnový panel s otvorem v IDEA StatiCa [2]

## 4 Posouzení založené na platných normách

Podobně jako metoda příhradové analogie, je zadání úlohy, návrh výztuže, výpočet a posouzení velmi rychlé a lze jej provést, na rozdíl od obecných nelineárních programů v řádu 10 až 20 minut. Model je verifikován a validován včetně všech parametrů vstupujících do výpočtu prestižním Ústavem stavebního inženýrství ETH Zürich [3], [5], takže pro porozumění poskytovaným výsledkům není třeba žádné speciální zkušenosti či znalosti. Předpoklady řešení jsou nad úrovní normou předpokládaných modelů. Veškeré výsledky jsou však interpretovány plně z hlediska normových ustanovení [1]. Metody použité pro výpočet a posouzení jsou obecné jak z hlediska topologie řešených oblastí, viz Obr. 7, tak z hlediska poskytovaných výsledků, viz Obr. 8, které jsou srozumitelné a maximálně výstižné, mohou sloužit nejen k posouzení MSÚ, ale i MPS včetně šířky trhlin, průhybů a omezení napětí. V první verzi programu posouzení MSP není zatím dostupné, k určení oblastí s nebezpečnou šířkou trhlin slouží zobrazení zón nadměrných poměrných přetvoření betonu v tahu.



Obr. 7 Obecná topologie řešených oblastí



Obr. 8 Zhlaví mostního pilíře

## 5 Závěr

Projekční praxe přináší statikovi množství výzev, se kterými se musí řádně vypořádat. Projektanti bývají stále více pod tlakem časovým, ze strany investora i pod tlakem ekonomickým. Trendem vývoje IDEA StatiCa je poskytovat statikům obecné, úplné a snadno použitelné řešení pro navrhování a dimenzování konstrukčních prvků, průřezů a

detailů v souladu s platnými normami. Věříme, že IDEA StatiCa Detail poskytuje řešení na úrovni pokročilých nelineárních výpočetních software, které bude ale běžně použitelné pro každodenní navrhování.

## 6 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 RS ve spolupráci s Ústavem stavebního inženýrství ETH Zürich. Kromě výše uvedených autorů se na projektu rovněž podíleli vývojáři IDEA RS Michal Číhal, Rostislav Krč, Filip Svoboda, Filip Adler, Michael Konečný a kolektiv výzkumných pracovníků IBK ETH Zürich pod vedením Prof. Kaufmanna.

## Literatura

- [1] ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) *Eurokód2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, ÚNMZ Praha, 2011.
- [2] IDEA StatiCa, *User guide*, IDEA RS s.r.o., [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com).
- [3] KAUFMANN, W., MATA-FALCON, J., Structural Concrete Design in the 21<sup>st</sup> Century: are Limit Analysis Methods Obsolete?, In: *Sborník ke konferenci 24. BETONÁŘSKÉ DNY 2017*, Czech Republic, ČBS ČSSI, 2017
- [4] KONEČNÝ, M., KABELÁČ, J., NAVRÁTIL, J. Use of topology optimization in concrete reinforcement design, In: *Sborník ke konferenci 24. BETONÁŘSKÉ DNY 2017*, Czech Republic, ČBS ČSSI, 2017
- [5] MATA-FALCON, J., TRAN, D., T., KAUFMANN, W., NAVRÁTIL, J. Computer-aided stress field analysis of discontinuity concrete regions, *EURO-C 2018, Computational Modelling of Concrete and Concrete Structures*, Austria, in print, 2018

---

### Doc. Ing. Jaroslav Navrátil, CSc.

✉ IDEA RS s.r.o.  
U Vodárny 2a, 616 00 Brno  
☎ +420 511 205 263  
☺ [navratil@ideastatica.com](mailto:navratil@ideastatica.com)  
URL [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com)

### Ing. Petr Ševčík

✉ IDEA RS s.r.o.  
U Vodárny 2, 616 00 Brno  
☎ +420 511 205 263  
☺ [sevcik@ideastatica.com](mailto:sevcik@ideastatica.com)  
URL [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com)

---

### Ing. Libor Michalčík

✉ IDEA RS s.r.o.  
U Vodárny 2, 616 00 Brno  
☺ [michalcik@ideastatica.com](mailto:michalcik@ideastatica.com)  
URL [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com)

### Ing. Jaromír Kabeláč, Ph.D.

✉ Hypatia Solutions s.r.o.  
třída Kpt. Jaroše 3, 602 00 Brno  
☺ [kabelac@ideastatica.com](mailto:kabelac@ideastatica.com)  
URL [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com)

---

### Ing. Petr Foltyn

✉ IDEA RS s.r.o., U Vodárny 2, 616 00 Brno  
☺ [foltyn@ideastatica.com](mailto:foltyn@ideastatica.com), URL [www.ideastatica.com](http://www.ideastatica.com)