

# ANALÝZA PŘEDPJATÉHO VAZNÍKU VČETNĚ VYŠETŘENÍ OBLASTÍ DISKONTINUIT

Jan Janata, \*

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

## ABSTRAKT

Tento článek se zabývá analýzou předpjatého sedlového vazníku. Příspěvek je shrnutím části prakticky zaměřené autorovy diplomové práce, jež se mimo jiné zabývá problematikou a úskalím správného návrhu předpjatého vazníku se soudržnou předpínací výztuží. Samotná analýza předpjatého sedlového vazníku je provedena v autorem vytvořeném programu, v tabulkovém procesoru MS Excel. Velká pozornost je pak věnována analýze jednotlivých poruchových oblastí – tzv. oblastí diskontinuit, ve kterých se autor musel vypořádat s přítomností předpínací síly a jejím zavedením do analytického modelu. V případě analýzy jednotlivých oblastí diskontinuit je použit program *CAST*, který k posouzení oblastí nespojitosti využívá metody příhradové analogie. Cílem tohoto článku je dospět k optimálnímu návrhu předpjatého vazníku.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Železobeton • Předpjatý vazník • Posouzení • D-oblasti • Příhradová analogie

## ABSTRACT

This article deals with analysis of prestressed concrete girder. The paper is a summary of a part of the author's practically oriented diploma thesis, which deals with an issue of correct design of a prestressed concrete girder with a coherent prestressed steel strands. The analysis of the prestressed girder is performed in the program created by the author, in the MS Excel spreadsheet. Great attention is paid to the analysis of individual discontinuity regions – so-called D-regions, in which the author had to deal with presence of prestressing force and implementing the force into the analytical model. For analysis of individual D-regions, the *CAST* software is used. The *CAST* designed for assessment of D-regions is based on Strut-and-tie method (STM). The aim of this article is to bring an optimal design of a prestressed concrete girder.

## KEYWORDS

Reinforced concrete • Prestressed concrete girder • Assessment • D-regions • Strut and tie model

## 1. ÚVOD

Ve stavebnictví se často setkáme s realizací rozsáhlých průmyslových hal a stavebních konstrukcích určených pro komerční či soukromé účely. Tyto konstrukce jsou typické svým požadavkem na volnou dispozici vnitřního prostoru. Trváme-li na železobetonovém konstrukčním systému, neekonomičtější řešení, které se nabízí, je jít cestou prefabrikace. Využijeme-li zároveň výhod předpínání, je pro nás v kombinaci s prefabrikací velmi efektivním řešením, jak se vypořádat s požadavkem na volnou dispozici objektu.

Nejen volba konstrukčního systému, ale v neposlední řadě i samotný návrh a optimalizace prefabrikované konstrukce svou měrou přispívá k ekonomičnosti návrhu. Optimalizuje-li autor návrhu prvek, který se v konstrukci vyskytuje zřídka, je vliv úspor pro celkovou cenu konstrukce zanedbatelný. Snahou autorů návrhu konstrukce by tak měla být co největší opakovatelnost výskytu daného konstrukčního prvku v konstrukci, a to ze zřejmého důvodu. Optimalizujeme-li jeden prvek, ušetříme na desítkách, ne-li stovkách dílců. Tyto úspory se pak jistě promítnou celkové ceny konstrukce.

Předpokladem ekonomičnosti návrhu je znalost problematiky a úskalí návrhu předpjatých prefabrikovaných konstrukcí.

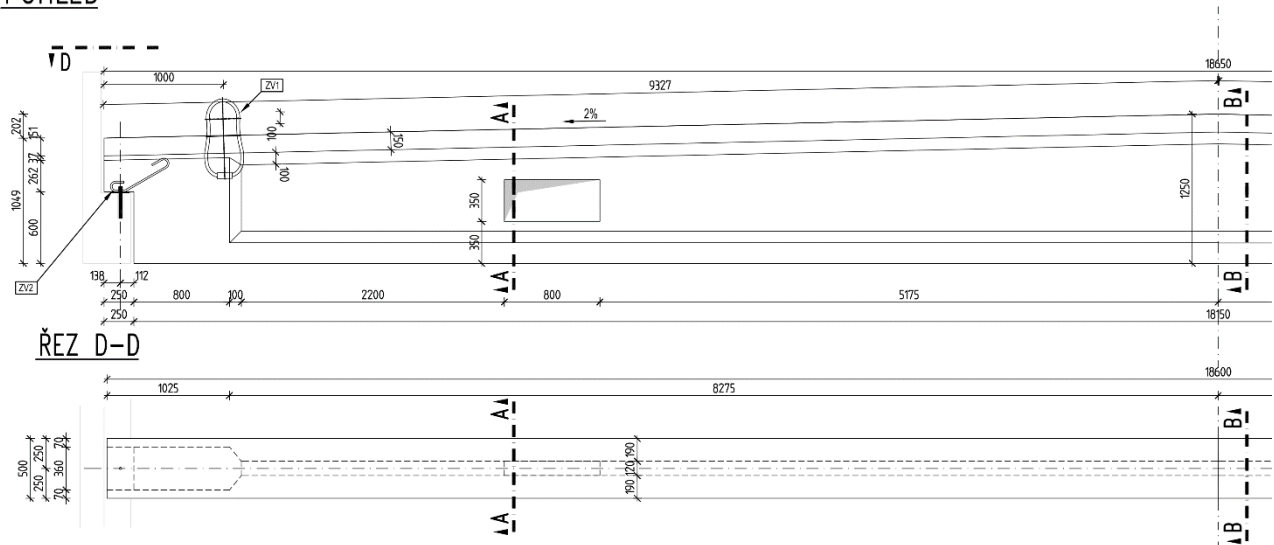
Tento příspěvek se konkrétněji zabývá návrhem, analýzou a posouzením předpjatého sedlového vazníku. Nedílnou a neméně důležitou součástí návrhu předpjatého sedlového vazníku je také vyšetření oblastí diskontinuit.

## 2. ILUSTRATIVNÍ PŘÍPAD

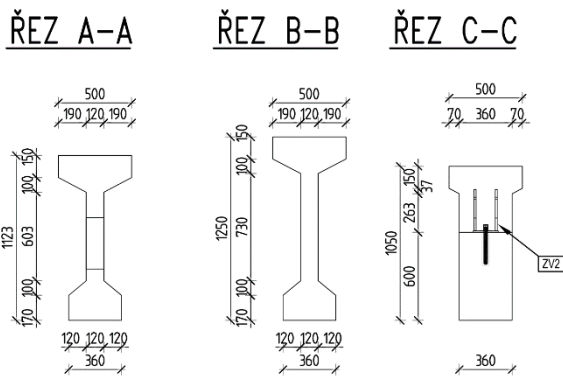
Posuzovaný předpjatý sedlový vazník se nachází v provozně-administrativní budově s železobetonovým, částečně monolitickým a částečně prefabrikovaným konstrukčním systémem. Vazník je oboustranně uložen na masivní obvodový monolitický průvlak, jedná se tedy o prostý nosník.

\* Školitel: Ing. Radek Štefan, Ph.D.

## POHLED



Obrázek 1: Tvar předpjatého vazníku – vazník je osově symetrický (zobrazena polovina dílce)



Obrázek 2: Tvar předpjatého vazníku – vazník je osově symetrický (zobrazena polovina dílce)

### 2.1. Zatížení a zatěžovací stavy

Kromě vlastní tíhy vazníku je uvažováno se zatížením od ostatního stálého zatížení od skladby střešní konstrukce  $4,85 \text{ kN.m}^{-2}$  se zatěžovací šířkou rovné šířce modulové  $5,4 \text{ m}$ . Užité zatížení zatížení je dle ČSN EN 1991-1-1 uvažováno jako kategorie H s hodnotou plošného zatížení  $0,75 \text{ kN.m}^{-2}$ . Klimatické zatížení od sněhu je v našem případě  $0,8 \text{ kN.m}^{-2}$  a zatížení od tlaku větru je  $0,2 \text{ kN.m}^{-2}$  (zjednodušeně uvažováno stejně v celé zatěžovací ploše).

Při posouzení vazníku bylo uvažováno se zatěžovacím stavem, který v provozním stádiu vyvoluje největší tahová namáhání v dolní přírubě vazníku.

### 2.2. Parametry vazníku

Předpjatý sedlový železobetonový vazník je navrhován na rozpon  $18,35 \text{ m}$ . V místě uložení má vazník výšku  $1050 \text{ mm}$  a v místě vrcholu disponuje výškou průřezu  $1250 \text{ mm}$ . Průřez má tvar I s dominantní horní přírubou. Příruby jsou opatřeny náběhy. Šířka horní příruby je  $500 \text{ mm}$  (z konstrukčních důvodů) s výškou  $150 \text{ mm}$ . Dolní příruba má

šířku  $360 \text{ mm}$  a výšku příruby  $170 \text{ mm}$ . Stojina má tloušťku  $120 \text{ mm}$ . Rozměry jsou patrné viz Obrázek 1 a Obrázek 2.

Třída betonu je zvolena C50/60. Betonářská výztuž je navržena třídy B500 s třídou tažnosti B a krytím  $25 \text{ mm}$ . Jako předpínací výztuž byla zvolena sedmhrátová stabilizovaná lana se jmenovitou pevností v tahu  $1860 \text{ MPa}$  nesoucí označení Y1860. Zvolený jmenovitý průměr lan  $15,3 \text{ mm}$ .

### 2.3. Časová osa

Vazník je navrhován na  $50 \text{ let}$ . Osazení vazníků na konstrukci bylo předpokládáno těsně před vnesením stálého zatížení –  $28 \text{ dní}$  od betonáže vazníku. Proměnné zatížení pak  $50 \text{ dní}$  po betonáži dílce.

Okamžitě po prefabrikaci byl prvek intenzivně ošetřován po dobu  $7 \text{ dní}$ . Předpětí bylo vneseno po  $24 \text{ hodinách}$  a podržení napínacího napětí trvalo  $5 \text{ min}$ .

## 3. METODA VÝPOČTU

Analýza předpjatého sedlového vazníku jako prutového prvku je provedena v autorem vytvořeném programu, v tabulkovém procesoru MS Excel. Finální návrh je výsledkem několika iteračních kroků, který vedl k efektivnímu návrhu dílce. Následně jsou pro zjištění vnitřní síly analyzovány jednotlivé poruchové oblasti vazníku tzv. oblasti diskontinuit.

### 3.1. Analýza vazníku jako prutového prvku

Autor pro analýzu 1D prvku využil diferenciálních rovnic pro výpočet vnitřních sil. Následně byl prutový prvek diskretizován s krokem  $0,1 \text{ m}$  v intervalu od místa uložení vazníku do vrcholu vazníku včetně.

Samotný výpočet byl zaměřen na vyšetření kritických průřezů, či průřezů před a za, ve kterých se odehrály skokové změny napětí. Dále byly odečteny hodnoty, na hranicích

uvažovaných oblastí diskontinuit, kterých bylo využito při vyšetření D-oblastí.

Při analýze byly vypočteny veškeré potřebné průřezové charakteristiky, které vzhledem k sedlovému tvaru vazníku byly přímo závislé na poloze průřezu v 1D prvku.

Komplexní návrh předpětí byl proveden v souladu s ČSN EN 1992-1. Program umožňuje umístit předpínací lana do několika vrstev a zároveň umožňuje určit jednotlivým lanům délku jejich separace v soudržnosti s okolním betonem. Iterací předpínací síly a počtem lan, potažmo jejich separací, došlo k optimalizaci návrhu předpětí prvku.

Velikost předpínací síly počítá s okamžitými ztrátami:

- ztráta prokluzem,
- ztráta poddajností opěrného zařízení,
- ztráta krátkodobou relaxací výztuže,
- ztráta předpětí vzniklá rozdílem teplot předpínací výztuže a opěrného zařízení,
- ztráta předpětí okamžitým pružným přetvořením betonu při předpínání.

Ztráta krátkodobou relaxací výztuže je částečně eliminována tzv. korekcí relaxace podržením napětí. Korekce relaxace uvažuje s vlivem vývinu hydratačního tepla jež má důsledek na průběh krátkodobé relaxace výztuže.

Z dlouhodobých ztrát výpočet zahrnuje:

- ztráta předpětí smršťováním,
- ztráta dotvarováním betonu,
- ztráta dlouhodobou relaxací předpínací výztuže.

### 3.2. Vyšetření oblastí diskontinuit (D-oblastí)

Pro oblasti, ve kterých dochází k náhlým změnám napětí po délce prvku, nelze uplatnit Bernoulliho–Navierovu hypotézu, která vychází z předpokladu zachování rovinnosti průřezu a tedy i lineárního průběhu poměrných přetvoření po průřezu prvku. Nelze zde použít standární postup při posouzení daného průřezu.

K vyšetření těchto oblastí použijeme metodu známou pod pojmem metoda příhradové analogie, která vyšetřovanou 2D oblast aproximuje do soustavy vzpěr a táhel, které v ideálním případě opisují isočáry hlavních napětí.

Pro předpjatý sedlový vazník se jedná o tyto D-oblasti:

- Uložení vazníku na podporu – tzv. ozub viz Obrázek 3 a Obrázek 4.
- Zalomení střednice v místě vrcholu sedlového vazníku – dochází ke vzniku svislé složky předpínací síly, na kterou je třeba navrhnout dodatečnou výztuž.
- Velké či malé otvory, pokud se v dílci vyskytují, viz Obrázek 6.

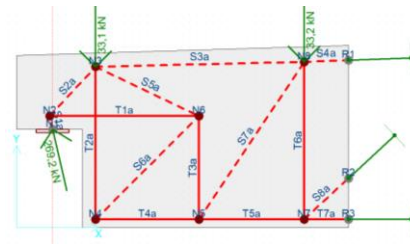
Doporučované příhradové modely dle ČSN EN 1992-1-1, ke konkrétním detailům konstrukce primárně neuvažují s možností, že je oblast ovlivněna vnesenou předpínací silou v předpínací výztuži. Z toho důvodu byl pro každý detail vytvořen další model, který uvažoval pouze s předpínací silou

(viz Obrázek 5) a pro návrh detailu byly výsledné vnitřní síly z těchto modelů superponovány.

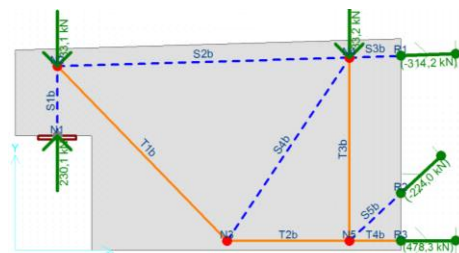
Návrh a posouzení ozubu jsou provedeny kombinací dvou odlišných příhradových modelů. Pomocí prvního modelu – Typ A (viz Obrázek 3) byla navržena výztuž ve směru hlavních os. Typ A je navrhován na 55 % zatížení a zároveň je zatížen horizontální silou v místě uložení, jež je rovna 20 % velikosti celkové svislé reakce.

Druhý model – Typ B (viz Obrázek 3) přebírá 55 % z celkového zatížení a jeho hlavním smyslem je navrhnout šikmé smyčky.

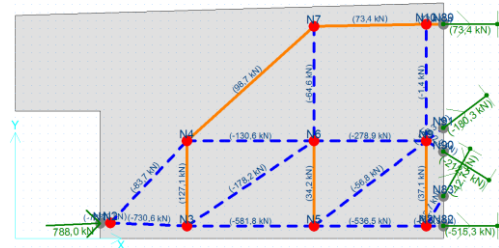
Vzniklá 10% rezerva bezpečně pokrývá rozdíl v tuhostech obou modelů.



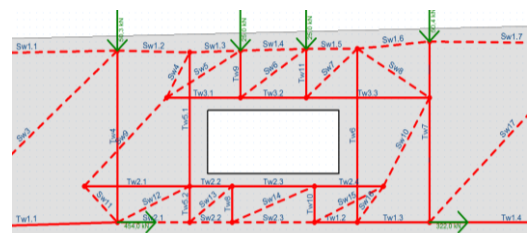
Obrázek 3: Výpočtové schéma – ozub – Typ A.



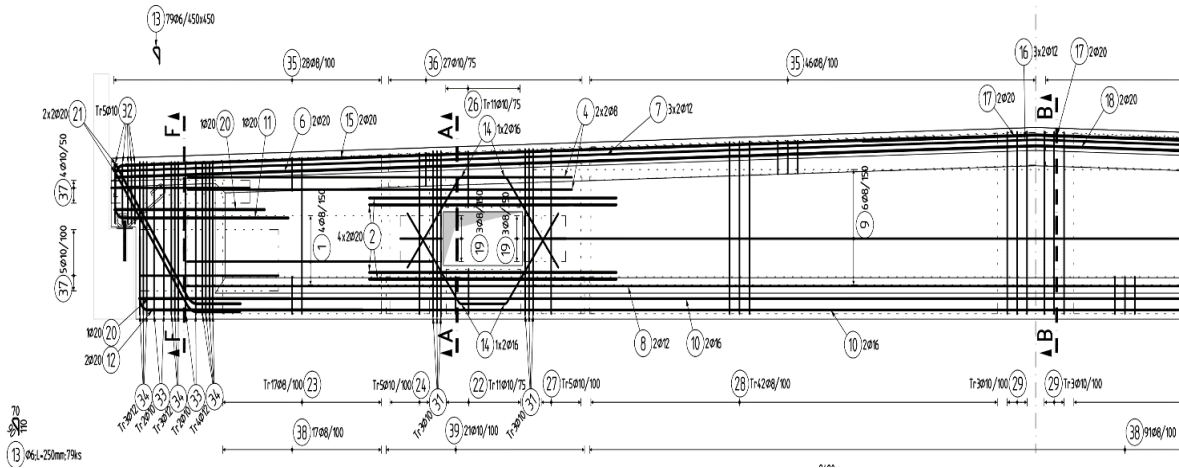
Obrázek 4: Výpočtové schéma – ozub – Typ B.



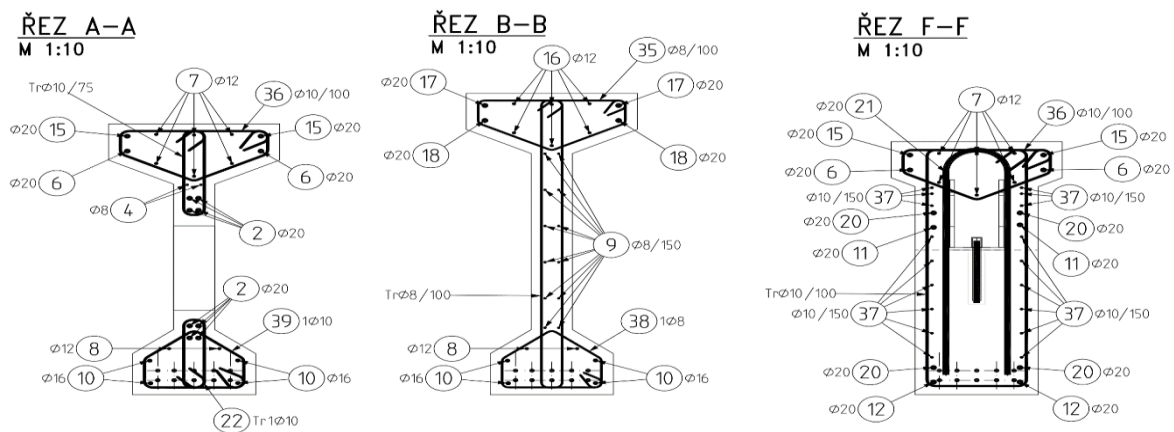
Obrázek 5: Výpočtené vnitřní síly – zavedení vlivu předpínací síly.



Obrázek 6: Výpočtové schéma – velký otvor.

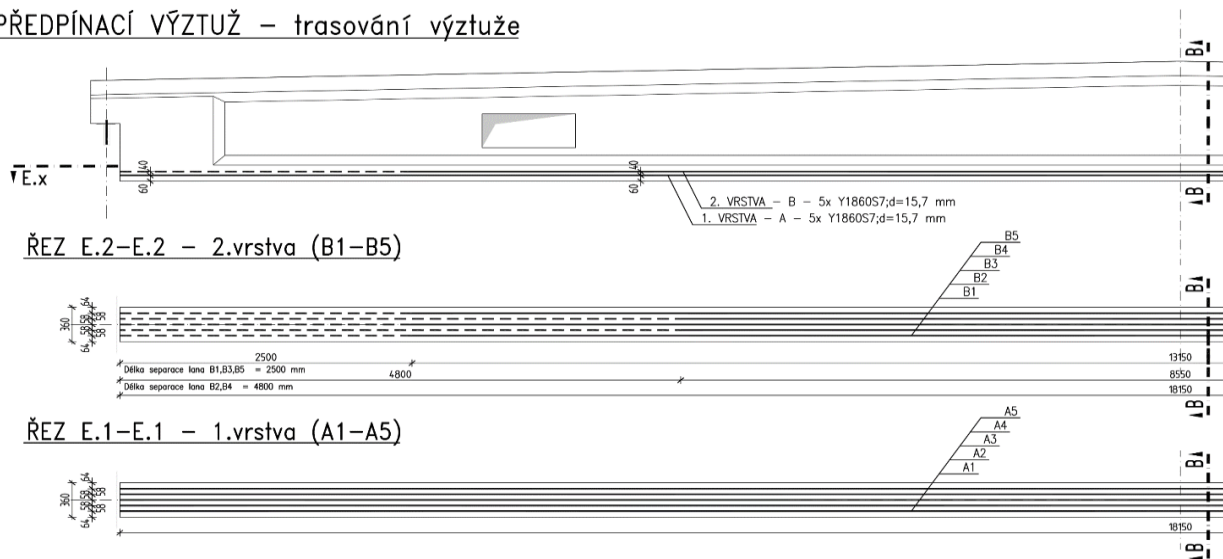


Obrázek 7: Výztuž předpjatého vazníku – bokorys, vazník je osově symetrický (zobrazena polovina dílce).



Obrázek 8: Výztuž předpjatého vazníku – řezy.

PŘEDPÍNACÍ VÝZTUŽ – trasování výztuže



Obrázek 9: Trasování předpínací soudržné výztuže včetně separace jednotlivých lan, vazník je osově symetrický (zobrazena polovina dílce).

#### 4. VÝSLEDKY

V rámci 1D prvku bylo pomocí autorova programu navrženo 2x5 předpínacích lan s předpínací silou velikosti  $P_0 = 2060$  kN. Byla provedena dvojí separace lan. Nejprve byly odseparovány 2 lana ze svrchní vrstvy ve vzdálenosti 4,8 m od místa teoretické podpory. Následně byly separovány zbylé 3 lana ze stejné vrstvy ve vzdálenosti 2,6 m od teoretické podpory.

Po takto navrženém předpětí jsme mohli přestoupit k posouzení mezních stavů.

Nejprve byly posouzeny mezní stavy použitelnosti – omezení napětí, a to ve dvou rozdílných časech. První, v čase bezprostředně po vnesení předpětí do dílce, se jeví z hlediska mezního stavu omezení napětí v betonu vůči vzniku trhlin v tlaku a v tahu jako kritický a velkou roli zde hraje vyztužení dílce betonářskou výztuží. Pokud by byl vazník vyztužen pouze minimální konstrukční výztuží, při těchto mezních stavech by návrh nevyhověl. Zaměříme-li se na posouzení v čase kdy je dosaženo min. 80 % hodnot pevnostních charakteristik betonu, lze říci, že tyto mezní stavy vyhoví s dostatečně velkou rezervou. Ostatní mezní stav použitelnosti bezpečně vyhověly, s využitím řádově desítek procent.

Mezní stav únosnosti byl posouzen na konci životnosti, kdy proběhly i dlouhodobé ztráty, a tím byla hodnota předpínací síly ve výztuži v rámci životnosti konstrukce na svém minimu.

#### 5. ZÁVĚR

Tento článek čerpá z autorovy diplomové práce, která se zabývala návrhem předpjatého sedlového vazníku. Návrh předpjatého vazníku je komplexní problém, do nějž se propisuje mnoho vstupních parametrů, a to nejen z hlediska materiálových charakteristik použitých materiálů.

Pro bezpečný a optimální návrh je nutností znát prostředí a technologie, kterými disponuje zhotovitel prefabrikovaného dílce. Je třeba pevně stanovit časové milníky jednotlivých úkonů, které by měly být koordinovány s možnostmi konkrétního výrobce prefabrikovaných prvků. Výrobce rovněž musí dodržet předepsané způsoby zacházení s prefabrikátem, např. jeho skladování. Jakékoliv odchýlení od předpokladů může mít za následek zkreslené výsledky a v případě, že je dílecek navrhován s využitím blížícím se 100 %, tyto odchylky mohou mít i nezměrné důsledky.

Autor při svém návrhu nesmí opomenout, že provozní stav není jediný, který je třeba při návrhu zohlednit. Nezbytné pro návrh prefabrikátu je dostatečně se zabývat i jeho montážními stavy, které mohou nastat před osazením prvku do konstrukce. Často je s prvky manipulováno ve fázi, kdy ještě plně neproběhl nárůst pevnosti, a ač je prvek zatížen pouze vlastní tíhou, může právě tento stav být rozhodující pro návrh dílce.

Autor by v případě pokračování na projektu pokračoval ověřením výpočtu v tabulkovém procesoru pomocí pokročilých výpočetních numerických metod, např. CSFM (Compatible stress fields method)

#### PODĚKOVÁNÍ

Tento článek byl vytvořen v rámci projektu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS20/041/OHK1/1T/11.

#### Reference

- Janata, J. (2019). *Provozně administrativní budova s vazníky*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta stavební. Katedra betonových a zděných konstrukcí. Vedoucí práce: Štefan, R.
- Kuchma, D. *Design of a double Corbel Using CAST per ACI 318-02: CAST Tutorial Double Corbel Design*.
- Schlaich, J., Schäfer, K., Jennewein, M. *Toward a Consistent Design of Structural Concrete*. PCI JOURNAL 5-6/1987 str. 74-150.
- ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: ČNI, 2006.
- Navrátil J.: *Předpjaté betonové konstrukce. 1. vydání*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2004.
- Šmejkal J., Procházka J.: *Navrhování ozubů nosníků a desek s použitím modelů náhradní přehradoviny*. In: Beton TKS 2/2010, Beton TKS s.r.o., Praha, 2010, s. 102-106.