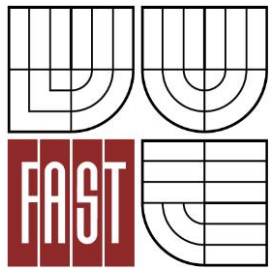




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

# **EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA ZESÍLENÍ ŽB PRVKU NA OHYB**

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STRENGTHENED REINFORCED  
CONCRETE MEMBER LOADED TO BENDING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**  
DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**Bc. KAREL VEPŘEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**Ing. PETR ŽÍTT**

BRNO 2015



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	N3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
<b>Pracoviště</b>	Ústav stavebního zkušebnictví

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Diplomant</b>	Bc. Karel Vepřek
<b>Název</b>	Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na ohyb
<b>Vedoucí diplomové práce</b>	Ing. Petr Žitt
<b>Datum zadání diplomové práce</b>	4. 3. 2014
<b>Datum odevzdání diplomové práce</b>	16. 1. 2015
V Brně dne 4. 3. 2014	

.....  
prof. Ing. Leonard Hobst, CSc.  
Vedoucí ústavu

.....  
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **Podklady a literatura**

- [1] ČSN 731201-86 Navrhování betonových konstrukcí
- [2] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [3] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [4] Schmid, P., kol, Základy zkušebnictví, FAST VUT v Brně, 2000
- [5] Ostatní související ČSN, EN, ISO
- [6] Manuál programu ATENA 2D, ATENA 3D, 1.-4. část, Červenka Consulting

## **Zásady pro vypracování**

Návrh způsobu provedení zatěžovacích zkoušek železobetonových prvků namáhaných tří a čtyřbodovým ohybem při prostém uložení, popř. oboustranném vetknutí. Teoretický návrh vyztužení ŽB prvku včetně návrhu jeho zesílení (statický výpočet). Vypracování projektu měření statické zatěžovací zkoušky a doprovodných měření (pevnosti materiálů, moduly pružnosti atd.). Tvorba matematického modelu softwarem Atena 2D, Atena 3D. Vyhodnocení a porovnání výsledků analytické a experimentální části řešení. Doporučení pro realizace experimentálních zkoušek obdobného typu.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
Ing. Petr Žítt  
Vedoucí diplomové práce

## **Abstrakt**

Návrh a výroba zkušebních prvků pro experimentální laboratorní zkoušení. Provedení zkoušek vybraných mechanických vlastností zkušebních prvků. Experimentální analýza zkušebních prvků v laboratoři, tvorba matematického modelu softwarem ATENA a statického výpočtu. Vyhodnocení experimentální analýzy a porovnání s hodnotami numerické analýzy. Grafické porovnání výsledků a závěrečné celkové zhodnocení.

## **Klíčová slova**

beton, měření, zesilování, kotvení, zatěžovací zkouška, únosnost prvku, numerický model, zatěžovací zkouška, čtyřbodový ohyb, zesilování konstrukcí, externí zesílení, lepená výztuž

## **Abstract**

Design and manufacture of test elements for experimental testing laboratory. Testing of selected mechanical characteristics of test elements. Experimental analysis of test elements in the lab, creating a mathematical model in ATENA software and static calculation. Evaluation of experimental analysis and comparison with the values of numerical analysis. Graphic comparing the results of a final overall evaluation.

## **Keywords**

concrete, measurement, strengthening, anchoring, compression test, load element, mathematical model, load test, four-point bending, strengthening of structures, external reinforcement, bonded reinforcement



### **Bibliografická citace VŠKP**

Bc. Karel Vepřek *Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na ohyb*. Brno, 2015. 54 s., 51 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.1.2015

.....  
podpis autora

Bc. Karel Vepřek

**Poděkování:**

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Ing. Petru Žittovi za odborné vedení, dobré rady a podporu při zpracování práce. Poděkování patří i spolužákům, kteří mi byli nápomocni při praktické části diplomové práce.

## OBSAH

1	ÚVOD .....	10
2	CÍLE .....	11
3	ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ .....	12
3.1	Případy pro použití zesilování .....	13
3.2	Externí zesílení ocelovými prvky .....	14
3.3	Externí zesílení nekovovými prvky .....	15
3.3.1	<i>Zesilování pomocí uhlíkových lamel</i> .....	16
3.3.2	<i>Dobetonování části prvku</i> .....	17
4	NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES .....	18
4.1	Obecné zásady pro návrh čerstvého betonu .....	19
4.1.1	<i>Cement</i> .....	20
4.1.2	<i>Kamenivo</i> .....	20
4.1.3	<i>Záměsová voda</i> .....	21
4.1.4	<i>Přísady</i> .....	22
4.1.5	<i>Příměsi</i> .....	22
4.2	Návrh čerstvého betonu na výrobu zkušebních prvků a doprovodných těles .....	22
5	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES .....	24
5.1	Výroba .....	24
5.1.1	<i>Příprava betonáže</i> .....	24
5.1.2	<i>Betonáž</i> .....	25
5.1.3	<i>Ošetřování betonu</i> .....	25
5.2	Dodatečné zesílení prvku .....	26
5.2.1	<i>Použité prvky pro zesílení</i> .....	26
5.2.2	<i>Zesílení konstrukce pomocí CFK lamel</i> .....	28

6	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA.....	29
6.1	Laboratorní zkoušení .....	29
6.2	Doprovodné zkoušky .....	35
6.2.1	<i>Pevnost betonu v tlaku</i> .....	36
6.2.2	<i>Statický modul pružnosti</i> .....	36
6.2.3	<i>Pevnost oceli v tahu</i> .....	39
6.2.4	<i>Vyhodnocení doprovodných zkoušek</i> .....	41
7	NUMERICKÁ ANALÝZA .....	42
7.1	Analýza pomocí softwaru ATENA.....	42
7.1.1	<i>Řešení modelu</i> .....	42
7.1.2	<i>Grafické zobrazení modelu</i> .....	44
7.2	Statický výpočet.....	46
8	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ .....	47
8.1	Vyhodnocení výsledků experimentální analýzy .....	47
8.2	Vyhodnocení výsledků numerické analýzy .....	48
8.2.1	<i>Vyhodnocení výsledků programu ATENA 2D</i> .....	48
8.2.2	<i>Vyhodnocení výsledků statického výpočtu</i> .....	49
8.3	Porovnání výsledků.....	50
9	ZÁVĚR .....	52
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ .....	53
10.1	Seznam norem.....	53
10.2	Seznam skript a opor.....	53
10.3	Seznam diplomových, bakalářských a disertačních prací .....	53
10.4	Seznam internetových zdrojů.....	54
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	55

# 1 ÚVOD

V dnešní době velice často dochází k různým změnám v užívání stavebních konstrukcí, což vede ve většině případů k většímu užitému zatížení konstrukce. Problémy s přenesením užitého zatížení mají také konstrukce, u kterých dochází k rozrušování betonu a korozi oceli. To vede k rekonstruování staveb a tím zvýšení únosnosti dané konstrukce. Jedním z možných způsobů zesilování je použití externí lepené výztuže pomocí lamel. První pokusy o zesilování pomocí lamel byly provedeny v Anglii v roce 1949, lamely byly vyrobeny z ropy. Tato technologie se dodnes používá v Japonsku.

Diplomová práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou železobetonového prvku zesíleného externí lepenou výztuží. K porovnání nezesíleného a následně zesíleného prvku nám poslouží trémové nosníky. Zkušební tělesa se budou laboratorně zkoušet pomocí čtyřbodového ohybu.

Zkušební tělesa byla zhotovena ze stejné receptury, aby odpovídala zvolené pevnosti a kvalitě zkušebních prvků. V průběhu betonáže byly odebírány reprezentativní vzorky k výrobě zkušebních těles pro doprovodné zkoušky. U výroby armokoše byly taktéž ponechány vzorky výztuží pro zkoušení reálných vlastností.

V programu ATENA 2D budou vytvořeny modely zkušebních prvků a řešeny numerickými výpočty. Výsledky programu ATENA 2D budou následně porovnány s experimentální analýzou prováděnou v laboratoři.

## 2 CÍLE

Cílem diplomové práce je seznámení s metodami zesilování konstrukcí, teoretický návrh železobetonového nosníku s vyztužením a jeho následná výroba pro zatěžovací zkoušku čtyřbodovým ohybem. Experimentální a numerickou analýzou budeme zkoušet a porovnávat nezesílený nosník a zesílený nosník pomocí externí lepené výztuže.

- experimentálně analyzovat zesílený a nezesílený prvek na ohyb
- numericky analyzovat zesílený a nezesílený prvek na ohyb
- vytvořit numerický model ve výpočetním programu ATENA s laboratorně stanovenými charakteristikami
- porovnat hodnoty zjištěných vlastností experimentální a numerické analýzy a udělat vyhodnocení metod

### 3 ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ

Zesilování a vyztužování stavebních konstrukcí pomocí externí lepené výztuže je nedílnou součástí moderního stavitelství, především realizovatelné při provádění rekonstrukcí staveb. Tímto vyztužováním lze dosáhnout požadované spolehlivosti konstrukce na působící zatížení, které následně musí vyhovět meznímu stavu únosnosti a spolehlivosti. Při zesilování konstrukce musíme dbát na životnost, odolnost konstrukce a dále její ochranu proti požáru a agresivnímu prostředí. Těchto požadavků nejlépe dosáhneme díky důsledné diagnostice a zhodnocení konstrukce.

Mezi oblasti použití patří zesilování železobetonových prvků (desek, trámů, sloupů, atd.) a dále mostních konstrukcí, dřevěných stropních a trémových prvků, ztužování kruhových a oválných železobetonových konstrukcí ovíjením. [3-3]



Obr. 3.1 Externí zesilování překlady [4-7]



Obr. 3.2 Zesilování stropní konstrukce [4-2]

#### Zesílení lze provádět:

- Dobetonováním části prvku.
- Externím zesílením ocelovými prvky:
  - mechanicky kotvené zesílení,
  - externě lepené zesílení,
  - dodatečné zesílení předpjetím,



- Externím zesílením prvky na bázi skleněných a uhlíkových vláken:
  - aplikace helikální výztuže,
  - aplikace uhlíkových lamel a tkanin na konstrukci
  - aplikace uhlíkových lamel formou předpjetí

### 3.1 PŘÍPADY PRO POUŽITÍ ZESILOVÁNÍ

Případy zesilování železobetonových a jiných konstrukcí v dnešní době jsou:

#### - Zvýšení užitého zatížení nebo nedostatečné únosnosti změny účelu stavby

Stávající konstrukce často mění vlastníka a tím i požadavky na užívání. Podobný případ vzniká u mostních konstrukcí, kdy dochází k velkému rozvoji dopravy a tím konstrukce nevyhoví, jak z hlediska únosnosti, tak i na dynamické účinky. Konstrukce nejsou na tyto změny navrženy což vede k dodatečnému zesilování.

#### - Odstranění chyby v projektu nebo výrobní chyby

V některých případech může docházet k tomu, že konstrukce je nedostatečně naddimenzovaná díky špatnému statickému výpočtu. Nedostatečné množství výztuže nebo malá velikost průřezu způsobí, že konstrukce nepřenesou užité zatížení.

#### - Poškození nosných prvků

Stávající konstrukce často trpí na stárnutí použitých stavebních materiálů, což způsobuje rozrušování krycí vrstvy výztuže. Hlavní příčinou tohoto problému je zvýšená agresivita prostředí, která způsobuje korozi výztuže a nadále špatnou statickou funkci konstrukce. K další poruchám konstrukce může dojít nárazem vozidla, havárií nebo při požáru.

### - Změna statického systému

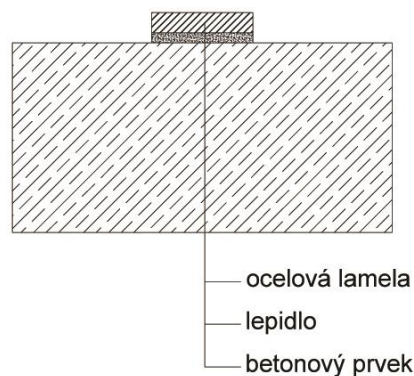
Při změnách stávajících konstrukcí dochází často ke změnám statického systému. Dochází k tomu při snížení počtu podpěr a to při vybourání nosných prvků jako jsou sloupy nebo nosné stěny. [3-3]

## 3.2 EXTERNÍ ZESÍLENÍ OCELOVÝMI PRVKY

Externí zesílení konstrukce ocelovými prvky je běžné zesilování stávajících konstrukcí s určitými výhodami i nevýhodami. Zesílená konstrukce dále zůstává a je brána jako železobetonová konstrukce. Výhodou ocelových lamel je jejich svařitelnost, možnost mechanického kotvení nebo pevného lepeného spoje. Na trhu se nachází velké množství typů a druhů ocelových prvků, které jsou cenově dostupné. Nevýhodami je náchylnost na korozi externí výztuže, které můžeme předejít antikorozními nátěry nebo jinou ochranou výztuže, dále překonávání dlouhých vzdáleností, kdy musí někdy dojít ke spojování výztuže. Ocelovou výztuží se výrazně zvyšuje objemová hmotnost výsledné konstrukce, kterou je potřeba také zohlednit. [3-3]

### Použití externích ocelových prvků

Ocelové prvky používané pro externí výztuž jsou ve většině případů ocelové pásy tloušťky 3 mm až 5 mm a více. Jestliže je potřeba použití větší tloušťky ocelových pásů, je lepší připevnit na sebe postupně více pásnic. Šířky pásnic jsou různé, pohybují se od 15 mm až po 600 mm s přírůstkem po 5 mm.



Obr. 3.3 Schéma externího zesílení pomocí ocelových prvků

### **Poloha externích ocelových prvků**

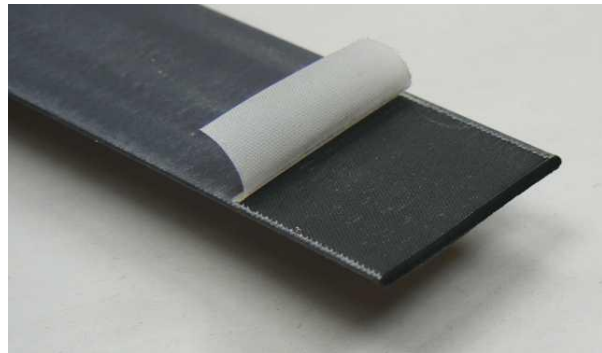
- ve spodní tažené oblasti prvku,
- v horní tlačené oblasti prvku,
- v oblasti působení smykových napětí,
- na horním líci prvku v tažené oblasti u spojitých nosníku,
- kombinací více možností.

### **3.3 EXTERNÍ ZESÍLENÍ NEKOVOVÝMI PRVKY**

Zesilování konstrukce pomocí nekovových prvků se provádí vlákny z polymerního materiálu, kompozity z vysokopevnostních vláken obalených polymerní matricí. Hlavním nositelem pevnosti těchto materiálu jsou jejich vlákna. Tyto kompozitní materiály se ve stavitelství nejčastěji používají k zesilování betonových, zděných, dřevěných a ocelových konstrukcí. [3-3]



*Obr. 3.4 Uhlíková tkanina [4-9]*



*Obr. 3.5 Uhlíková lamela [4-8]*

Mezi hlavní přednosti kompozitních materiálů patří:

- vysoká pevnost v tahu, antikoroziční vlastnosti
- nízká hmotnost, odolnost proti poškození, lehká manipulace a doprava
- dobrá únavová odolnost
- výhodný poměr tuhosti materiálu vzhledem k vlastní hmotnosti

Dodatečné vyztužování stavebních konstrukcí pomocí externí syntetické výztuže je nedílnou součástí moderního stavitelství, především využitelné při provádění rekonstrukcí a zvyšování únosnosti prvků stavebních konstrukcí.

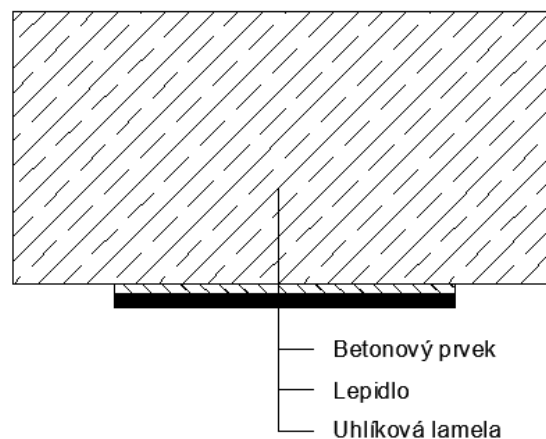
### 3.3.1 Zesilování pomocí uhlíkových lamel

Lamela CFK (Carbon-Faser-Kunststoff) je složena z kombinace dvou hlavních prvků, kterými jsou matrice z epoxidového lepidla a velké množství tenkých uhlíkových vláken. Lepení lamel probíhá za pomoci lepidla na bázi epoxidové pryskyřice. Lamely vykazují v podélném směru (směru vláken) vysokou pevnost, tuhost a vynikající únavové vlastnosti při poměrně malé objemové hmotnosti. Pevnost ve smyku a kolmo na směr vláken je velmi malá. Mechanické vlastnosti v podélném směru určuje typ a výrobce lamely.

Metoda zesilování pomocí uhlíkových lamel je modernější, ale způsobem provádění velice podobná lepení ocelových lamel. Lamely mají velkou výhodu v jejich mechanických vlastnostech a jednoduchosti provádění. [3-3]

Výhody použití uhlíkových lamel:

- dlouhé stavební dílce (nosníky, mosty)
- esteticky náročné zesílení (snadné ukrytí pod omítku nebo nátěr)
- v případech, kdy dochází ke křížení lamel (křížem vyztužené desky)
- ve stísněných prostorech se špatnou přístupností
- při změně statického systému (dodatečné zřízení otvorů, vybourání stěn a podpěr)



Obr. 3.6 Schéma externího zesílení pomocí uhlíkové lamely

### 3.3.2 Dobetonování části prvku

Dřívější, u rekonstrukcí betonových objektů, často používali pro dodatečné zesilování konstrukce metodu dobetonování části prvku k původní konstrukci. Je to složitější metoda a mnohem pracnější na provedení než dnešní metody zesilování. Zde je nutný zásah od konstrukce a nelze vždy spoléhat na spolupůsobení betonu. U konstrukcí navíc dochází ke zvýšení vlastní tíhy.



*Obr. 3.7 Zvýšení únosnosti základů dobetonováním [4-1]*

## 4 NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Návrh geometrických rozměrů zkušebních prvků byl zvolen dle možností zkušební laboratoře a možnosti dobré manipulovatelnosti s prvky. Parametry tělesa pro zátěžovou zkoušku se určily na 120 x 240 x 2200 mm s objemem 63,4 litrů. Výroba bude obsahovat dvě tělesa pro zkoušení zesíleného prvku externí lepenou výztuží a nezesíleného prvku. Pro betonáž prvků se muselo vyrobit nové bednění, jednotné pro oba zkušební nosníky, aby je bylo možné vyrobit ze stejné betonové směsi.

<i>Rozměry zkušebních prvků</i>	<i>Objem <math>V</math> [<math>m^3</math>]</i>	<i>Počet těles [ks]</i>	<i>Objem <math>V</math> [<math>m^3</math>]</i>
120 x 240 x 2200 mm	0,06336	2	0,12672
<b>celkový objem zkušebních těles <math>V_{\text{celk}}</math> [<math>m^3</math>]</b>			<b>0,12672 (127 litrů)</b>

Tab. 4.1 Zkušební prvky a jejich objem

Při betonáži prvků byly odebírány vzorky směsi pro doprovodné zkoušky mechanických vlastností, které se následně zohledňovaly v numerických analýzách.

<i>Rozměry doprovodných těles</i>	<i>Objem <math>V</math> [<math>m^3</math>]</i>	<i>Počet těles [ks]</i>	<i>Objem <math>V</math> [<math>m^3</math>]</i>
Krychle 150 x 150 x 150 mm	0,003375	4	0,02025
Hranol 100 x 100 x 400 mm	0,004000	6	0,02400
<b>celkový objem doprovodných těles <math>V_{\text{celk}}</math> [<math>m^3</math>]</b>			<b>0,04425 (45 litrů)</b>

Tab. 4.2 Doprovodná tělesa a jejich objem

Pro prvek, vzhledem ke způsobu experimentu, byl proveden také návrh výztuže, dle kterého byly následně vyrobeny armokoše. Zásady návrhu výztuže a její krytí byly stanoveny podle normy ČSN EN 1992-1-1 a zbylé vyztužení bylo provedeno podle konstrukčních zásad.

Výztuž zkušebního prvku se skládá ze spodní výztuže, která obsahuje dva pruty  $\varnothing 10$  mm a horní výztuže s dvěma pruty  $\varnothing 6$  mm. Třmínky sloužící jako smyková a konstrukční výztuž byly rozloženy symetricky dle návrhu a celkový jejich počet byl 19 o  $\varnothing 6$  mm.

#### **4.1 OBECNÉ ZÁSADY PRO NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU**

Beton je kompozitní stavební materiál sestávající z pojiva a plniva. Složení betonu obsahuje cement, různé frakce kameniva, vodu a doplňky jako jsou přísady a příměsi pro zlepšování vlastností hotové betonové směsi nebo její výrobu. Prostý beton je odolný především proti namáhání tlakem, naproti tomu snese jen malé tahové zatížení. Proto se beton kombinuje s železnou výztuží – vznik železobetonu. Další možnosti betonu jsou použití jako drátkobeton, vláknobeton nebo předpjatý beton. [1-1]

Dle normy ČSN EN 206-1 se beton označuje písmenem C (concrete - beton) a dvěma čísly rozdělující lomítkem (např. C20/25). První číslo značí charakteristickou válcovou pevnost v tlaku betonu a druhé označuje krychelnou pevnost v tlaku betonu. Beton je nehořlavý materiál, má dobrou zpracovatelnost, výbornou pevnost v tlaku a trvanlivost.

Beton se dělí podle:

- druhu použitého pojiva
- stupně vlivu prostředí
- konzistence čerstvého betonu
- způsobu dopravy čerstvého betonu
- způsobu uložení betonu do konstrukce
- pevnostní třídy ztvrdlého betonu
- objemové hmotnosti ztvrdlého betonu

#### 4.1.1 Cement

Cement je hydraulické pojivo, jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou tvoří kaši, jež následně tuhne a tvrdne následkem hydratace vápenatých silikátů. Ztvrdlý cement si zachovává svoji pevnost a stálost. Cement se rozděluje dle normy ČSN EN 197-1 podle směsnosti do druhů I., II., III., IV., V. a třídy cementu 32,5, 42,5 a 52,5 podle pevnosti v tlaku MPa. [3-2]

Nejdražší složkou betonové směsi je cement, a proto se dodržuje, při tvorbě kvalitního betonu požadované pevnosti, přidávání minimálního množství cementu.

U běžných konstrukcí můžeme vycházet z normativních hodnot:

- Prostý beton: 200 kg cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu
- Železobeton: 204 kg cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu, u hospodářských staveb 300kg

Maximální množství cementu, po kterém už se pevnost nezvyšuje je 450 kg/1 m<sup>3</sup>

#### 4.1.2 Kamenivo

Kamenivo je zrnitý materiál, který vytváří nosnou kostru betonu. Jeho původ je anorganický, přírodní nebo umělý.

##### Rozdělení kameniva:

- Podle původu: přírodní, umělé
- Podle objemové hmotnosti: hutné, pórovité
- Podle velikosti zrn:
  - drobné (velikost 0 – 4 mm)
  - hrubé (velikost 4 – 63 mm)
  - ŠP – štěrkopísek (směs drobného a hrubého těžného kameniva)
  - ŠD – štěrkodrt' (směs drobného a hrubého drceného kameniva)



Velikost zrn určuje frakce konkrétního kameniva, která je dána v rozmezí minimálního  $D_{\min}$  a maximálního zrna  $D_{\max}$ . Základní frakce kameniva jsou 0/2, 0/4, 4/8, 4/16, 8/16, 11/22 a další.

Základní [mm]	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	32	63
Doplňková [mm]	0,045	0,09	0,18	0,355	0,71	1,4	2,8	6	11	22	45

Tab. 4.3 Velikost otvorů jednotlivých sít

Kamenivo spojené cementovou maltou tvoří kompaktní pevnou hmotu. Použití různých frakcí kameniva ve směsi snížíme spotřebu cementu, a tedy zajistíme ekonomičtější návrh betonu. Pro výrobu kvalitního betonu používáme kamenivo s dobrou pevností, trvanlivostí, odolností proti vlivu povětrnosti a mrazu, s minimální nasákavostí. Ideální poměr zrn by měl být 40% drobného kameniva a 60% hrubého kameniva, který také zajistí dobrou zpracovatelnost směsi. [3-2]

#### 4.1.3 Záměsová voda

Při výrobě čerstvého betonu má přidávaná voda dvě základní funkce - vliv na hydrataci a zpracovatelnost. Promíchání cementu s vodou způsobuje chemickou reakci (hydrataci) díky které začíná beton tuhnout a následně tvrdnout. Minimální množství vody k množství cementu je 25-35% hmotnosti.

Vyšší dávka vody zlepšuj zpracovatelnost, ale způsobuje tvorbu většího množství pórů a kapilár, menší pevnost a nižší odolnost vůči vlivu prostředí, a proto se nedoporučuje dodatečné přidávání vody na staveništi. [3-2]

Rozhodující parametrem množství vody v betonu je jeho vodní součinitel, kdy určuje výslednou pevnost betonu v tlaku. Větší pevnost betonu v tlaku se získá větším vodním součinitelem. Při tvorbě cementového tmelu s přidáním přísad a plastifikátorů se používá vodní součinitel 0,35 až 0,50. Vodní součinitel je poměr hmotnosti vody a cementu:

$$w = v / c [-]$$

v .....je hmotnost vody [kg]

c.....je hmotnost cementu [kg]

#### 4.1.4 Přísady

Přísady se přidávají během výroby – míchání čerstvého betonu za účelem modifikace vlastností čerstvého betonu a ztvrdlého betonu. Jejich složení je na chemické bázi.

Rozdělení přísad záleží na jejich použití:

- Zrychlovače tuhnutí – beton rychleji dosáhne počáteční pevnosti
- Zpomalovače tuhnutí – zpomalují hydrataci, beton je déle zpracovatelný
- Provzdušňovací přísady – vytvářejí mikroskopické dutiny
- Plastifikátory – zlepšují zpracovatelnost betonové směsi
- Protizmrazovací přísady – urychlují v zimním období dřívější dosažení pevnosti
- Vodotěsnicí přísady – zvyšuje nepropustnost betonu

#### 4.1.5 Příměsi

Materiálům pro zlepšení specifických vlastností čerstvého betonu se obecně říká příměsi a slouží k docílení lepší hutnosti struktury nebo jiných vlastností vzhledem k potřebě v dané situaci. Nejpoužívanější příměsi jsou kamenná moučka, popílek, vysokopevnostní struska nebo křemičitanové úlety. [3-2]

## 4.2 NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Čerství beton pro zkušební tělesa a jejich doprovodné vzorky byl navržen podle normy ČSN EN 206-1 s ohledem na jeho pevnost a technologii zpracování. Složení betonové směsi se provádí pomocí několika výpočtových metod, které vychází z vlastností použitých materiálů, požadované konzistence čerstvého betonu a výsledné pevnosti v tlaku. Návrh směsi musí splňovat všechny požadované kritéria příslušné normy při uvážení vlastností použitého materiálu a technologie vyrábění.

Receptura našeho čerstvého betonu byla navrhována o objemu zkoušených prvků a doprovodných těles, což bylo cca 175 litrů třídy betonu C25/30. Betonová směs obsahovala tři frakce kameniva 0/4, 4/8 a 8/16, cement, patřičné množství záměsové vody a plastifikační přísadu. Vodní součinitel pro dobrou zpracovatelnost byl určen na hodnotu 0,46. Výroba byla rozdělena na několik záměsí o objemu 50 litrů, které obsahovaly přesné množství přidávaných složek (viz níže v tabulce). K výrobě jsme potřebovali 4 záměsí.

<i>MATERIÁL</i>	<i>OZNAČENÍ</i>	<i>hmotnost</i>	<i>obj. hm.</i>	<i>objem</i>		<i>hmotnost</i>
		<i>m</i> [kg]	<i>ρ</i> [kg/m <sup>3</sup> ]	<i>V</i> [m <sup>3</sup> ]	<i>V<sub>sol</sub></i> [m <sup>3</sup> ]	<i>m<sub>sol</sub></i> [kg]
<b>cement</b>	CEM II/B-M 42,5 R	320	3100	0,103	0,005	16,0
<b>kamenivo 0/4</b>	Bratčice 0-4 mm	800	2700	0,296	0,015	40,0
<b>kamenivo 4/8</b>	Tovačov 4-8 mm	250	2700	0,093	0,005	12,5
<b>kamenivo 8/16</b>	Tovačov 8-16 mm	900	2700	0,333	0,017	45,0
<b>záměsová voda</b>	bez označení	175	1000	0,175	0,009	8,8
<b>plastifikátor</b>	Sika Viscocrete	1	1080	0,001	0,000	0,05

*Tab. 4.4 Složení čerstvého betonu*

Doprovodná tělesa byla vyrobena pro dodatečné zkoušky mechanických vlastností, které nám pomohly analyzovat reálné hodnoty zkoušeného betonu. Výsledky zkoušek budou použity u numerické analýzy pro srovnání s charakteristickými hodnotami.

Zkušební tělesa byla vyráběna ve formách krychle o vnitřních rozměrech  $a = 150$  mm a kvádrech o vnitřních rozměrech  $a = 100$ ,  $b = 100$ ,  $c = 400$  mm. Vzorky do forem byly postupně odebírány ze záměsí při betonáži zkušebních prvků. Doba zrání vzorků před samotným laboratorním zkoušením byla jako u zkušebních těles 28 dní a poté se postupně začaly zkoušet. V laboratoři byly prováděny zkoušky krychelné pevnosti, hranolové pevnosti, statického modulu pružnosti (*a také zkouška tahem oceli použité pro výztuž v nosníku*).

## 5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

### 5.1 VÝROBA

#### 5.1.1 Příprava betonáže

Příprava spočívala v kompletní výrobě bednění pro zkušební trámce, ke které bylo potřeba voděodolná překližka s tloušťkou stěny 20 mm a spojovací materiál ve formě samořezných šroubů. Pro úsporu materiálu a zjednodušení práce bylo bednění vyrobeno společně pro oba prvky. Bednění obsahovalo dvě komory pro zkušební tělesa o vnitřních rozměrech 120 x 240 x 2200 mm.

Následně byly vyrobeny dva totožné armokoše pro vyztužení trámců. Výztuž byla krácena pomocí elektrické brusky a následně spojována ručně vyrobenými třmínky. Třmínky byly uchyceny v přesných rozměrech pomocí vázacího drátu. Před usazením armokošů do bednění byla forma vymazána pro snadnější odejmutí bednění. Při osazení výztuže bylo krytí zajištěno distančníky požadované velikosti, dle statického výpočtu.

Formy pro doprovodná tělesa byla vyčištěna, následně vymazána prostředkem proti uchycení s povrchem formy a připravena pro vzorky z betonáže hlavních zkušebních těles. Počet forem byl předem určen, aby výsledky zkoušek fyzikálně mechanických vlastností byly co nejpřesnější.



Obr. 5.1 Distančník



Obr. 5.2 Bednění, armokoš

### 5.1.2 Betonáž

Betonování zkušebních prvků bylo provedeno dne 11. 10. 2014 v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví. Zde nám posloužil míchací stroj s nuceným oběhem pro důkladné promíchání a zhotovení betonové směsi. Velikost jedné záměsi byla rovna maximálnímu objemu míchacího stroje.

Míchání bylo provedeno s výpomocí spolužáků pro urychlení plnění bednicích nádob. Jednotlivé složky byly do záměsi pro přesnost váženy na desetiny a vkládány do míchacího stroje dle navržené směsi. Pro výrobu zkušebních těles byly umíchány čtyři záměsi, ze kterých byly postupně odebrány vzorky pro doprovodné zkoušky.

Namíchaný beton byl následně převážen a umístěn do bednění, kde za pomoci ponorného vibrátoru (MEGAVIB +) byl ztuhnut. Doprovodná tělesa se hutnila na vibračním stole ihned po naplnění forem. Povrchy těles byly zapraveny a zarovnané do vodorovné polohy, aby zkoušení mechanických vlastností bylo co nejpřesnější.



Obr. 5.3 Betonáž



Obr. 5.4 vibrování betonové směsi

### 5.1.3 Ošetřování betonu

Zkušební trávce a doprovodná tělesa byly po vybetonování po dobu 7 dní vlhčeny ošetřovací vodou (voda používaná k vnějšímu ošetřování při zrání betonu) a zakryty igelitovou folií proti vysychání. Následně byla tělesa odbedněna a ponechána minimální dobu 28 dní pro vyzrání betonu ve stálých teplotních podmínkách.

## 5.2 DODATEČNÉ ZESÍLENÍ PRVKU

### 5.2.1 Použité prvky pro zesílení

#### Lepidlo

Pro spojení betonového povrchu s externí výztuží používáme dvousložkovou epoxidovou pryskyřici. Složky lepidla se musí dokonale promíchat ručně nebo mechanicky v přesném poměru, aby vznikla dokonalá homogenní hmota. Lepidlo je nanášeno na celou plochu, a proto je napětí rovnoměrné po celé ploše a nedochází ke špičkám napětí jako u šroubového spojení výztuže s konstrukcí.

Pro spojení betonové plochy s uhlíkovou výztuží je vhodné lepidlo Sikadur 30, které jsme také použili u našeho experimentu. Toto lepidlo má vysokou mechanickou pevnost a dobrou odolnost proti agresivnímu prostředí. Další důležitou vlastností je rychlé tuhnutí a s tím spojený rychlý nástup předepsané pevnosti.



*Obr. 5.5 Lepidlo Sikadur 30 [3-3] Obr. 5.6 Míchání obou složek lepidla [4-4]*

Mezi hlavní vlastnosti lepidla Sikadur 30 patří:

- vysoce odolné proti teplotám
- silná přilnavost spojovaných částí
- lze použít na svislých stěnách i při práci nad hlavou
- vytvrzuje se i při nízkých teplotách vzduchu

### Další vlastnosti lepidla Sikadur 30 patří:

- lze nanášet i na matově vlhký podklad
- vytvrzuje se i při vysoké relativní vlhkosti vzduchu
- při vytvrzení se nesmršťuje
- jednotlivé komponenty barevně odlišeny, dobrá kontrolovatelnost homogenity

### Uhlíková lamela

Použitá uhlíková lamela CFK typ 50 s danými rozměry průřezu prvku 50 mm x 1,2 mm byla zvolena 2000 mm délky – nezasahuje do ukončení prvku, aby se zde nekřížila s podporami. [4-10]

### **Vlastnosti CFK lamela typ 50:**

Kriterium	CFK lamela typ 50
Objemová hmotnost	1600 kg/m <sup>3</sup>
Porovnání rozměrů pro stejný účinek	50*1,2 mm
Porovnání hmotnosti pro stejný účinek	96 g/bm
Stavební výška	Velmi malá (cca 2 mm)
Zachycení sil	Jen v podélném směru
Délka	2000 mm
Pevnost v tahu	3000 Mpa



*Obr. 5.7 Nosník s externí uhlíkovou lamelou*



### 5.2.2 Zesílení konstrukce pomocí CFK lamel

#### Postup nalepení lamely na prvek:

1. Příprava lamely – zkrácení lamely na požadovanou délku pomocí ruční pily, následná úprava řezaného konce a očištění lamely od nečistot.
2. Příprava podkladu – zbrúšení povrchu betonu bruskou na beton a následné zdrsnění povrchu, odstranění prachových částic pomocí průmyslového vysavače.
3. Příprava a nanesení lepidla – cenově náročné lepení se provádí pomocí přesného poměru dvousložkového lepidla a rychlou dobou zpracování cca 30 min. Nanášeno paralelně na oba slepované prvky.
4. Nanesení lepidla na lamelu a na podklad - lepidlo je nanášeno na povrch lamely i na povrch zbrúšeného prvku.
5. Nalepení a fixace lamely – lepení je provedeno prostým přitisknutím na lepené místo a dotlačením od středu lamely k okrajům, aby byl odstraněn vzduch. Lamela je zatížena, aby nedošlo k porušení lepícího procesu do ztvrdnutí.
6. Dokončovací práce – lamela je odtížena a vizuálně překontrolována proti možnému nedostatku a špatnému lepení lamely.



*Obr. 5.8 Lepená cfk lamela*



## 6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

### 6.1 LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ

#### **Příprava laboratorní zatěžovací zkoušky**

Pro experimentální analýzu musely být zkušební prvky přemístěny do sousední laboratoře Ústavu stavebního zkušebnictví s patřičným vybavením, kde se pojízdým jeřábem umístily na laboratorní podporové stolice pomocí kterých se následně vytvořilo uložení nosníku. Pevné i posuvné uložení podpor bylo opatřeno podložkami umožňující svislý posun pro vyrovnání nerovností. Uložení krajní podpory bylo dodrženo jako v návrhu vždy 100 mm od kraje nosníku. Podporové stolice, vyrobeny z ocelových obdélníkových profilů, nebylo potřeba pro tento typ zkoušek jinak zajišťovat.

Zatížení použité na nosník bylo realizováno hydraulickým válcem o maximální síle 250 kN připevněným ke konstrukci připravené pro konkrétní zatížení. Vháněná síla válce byla pro provedení čtyřbodového ohybu směřována na ocelový nosník s H-profilem s krajními podporami, které působí bodově na zkušební prvek.

#### Příprava měřících zařízení pro experiment:

- Příprava míst pro osazení snímačů
- Přilepení odporových tenzometrů (odporový tenzometr pro výztuž v betonu byl připevněn při výrobě armokoše)
- Osazení prvku snímači pro svislý posun v podporách
- Osazení prvku snímači dráhy celkového průhybu prvku
- Zapojení jednotlivých snímačů
- Kontrola zapojení a funkčnosti snímačů

## Rozmístění snímačů

Každé těleso pro zatěžovací zkoušku bylo osazeno několika typy snímačů, pro co nejlepší záznam chování zkoušeného prvku v průběhu zkoušky. Snímače byly po přesném připevnění zapojeny do sběrné stanice HBM Spider 8. Všechny data ze sběrné stanice zaznamenával v reálném čase připojený notebook s příslušným softwarem. Data byla snímána s frekvencí 5 Hz.



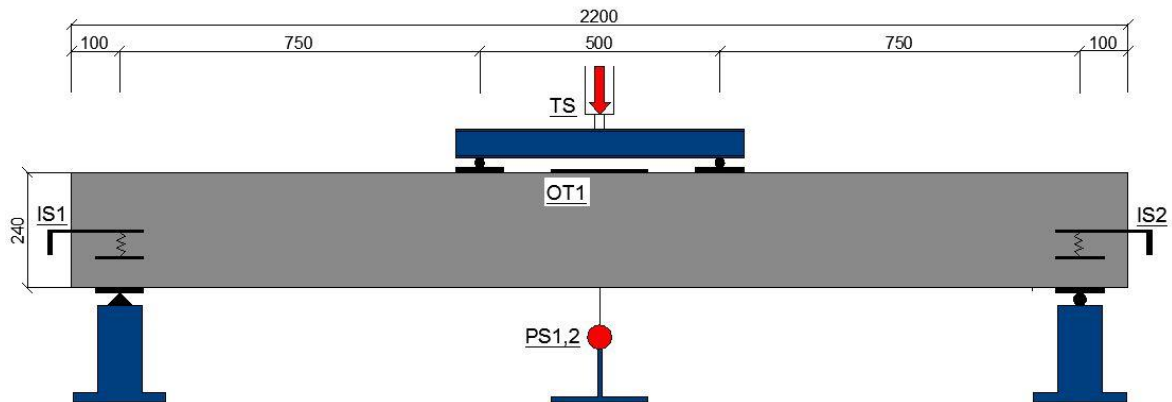
*Obr. 6.1 Měřicí stanice snímačů*

Síla od hydraulického válce o nosnosti 25 tun (250 kN) byla snímána tenzometrickým siloměrem CSP 25t a pro měření svislého průhybu ve středu nosníku byly použité dva potenciometrické snímače dráhy MS 04 13-18. Svislé poklesy v podporách byly měřeny vždy jen jedním snímačem na každé straně a to křížně pro přesnější výsledek průměrného poklesu podpor. Posuny v podporách se měřily indukčnostními snímači dráhy WA 10mm. Snímače byly uchyceny na prvcích, které nezasahovaly do zkušební konstrukce a tím neovlivnili měření posunu.

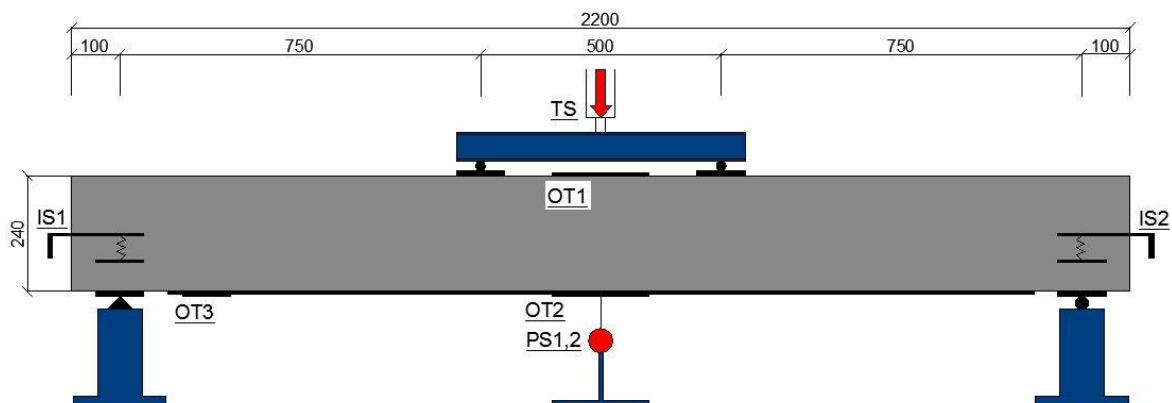
Výsledky zkoušky obsahovaly i měření přetvoření betonu na tlačném části prvku pomocí odporového tenzometru HBM 1-LY41-100/120 lepeného pomocí lepidla HBM X60. Dále u zesíleného prvku bylo měřeno přetvoření na uhlíkové výztuži pomocí odporového tenzometru HBM 1-LY11-10/350 lepeného na očištěný povrch sekundovým lepidlem.

Měření přetvoření ve výztuži (spodní tažená výztuž) uvnitř betonu byla provedena pomocí odporového tenzometru HBM 1-LY11-10/350, který byl přilepen na výztuž během výroby armokoše a tedy při provádění zkoušky byl pouze zapojen pomocí předem vyvedených kontaktů z betonu v horní části zkoušeného nosníku.

**Schéma rozmístění snímačů nezesíleného a zesíleného prvku:**



Obr. 6.2 Schéma rozmístění snímačů nezesíleného prvku



Obr. 6.3 Schéma rozmístění snímačů zesíleného prvku

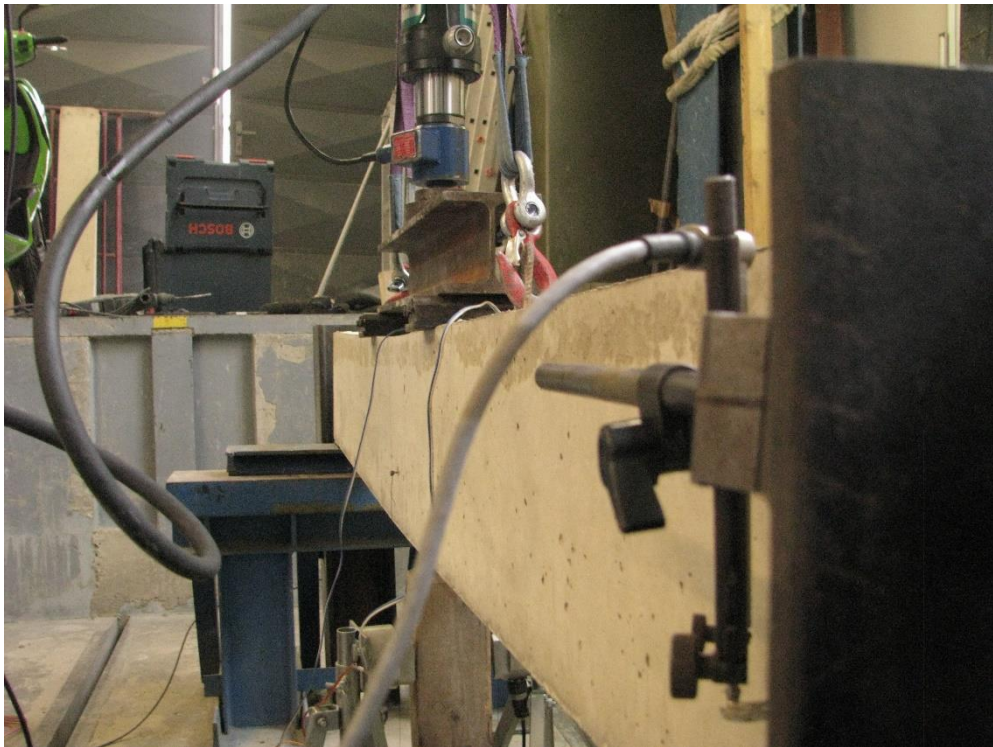
Legenda snímačů zkušebního prvku:

- TS                    soustava hydraulického válce s tenzometrickým siloměrem
- PS1,2                potenciometrické snímače dráhy průhybu prvku
- IS1,2                indukčnostní snímače dráhy posunu v podporách
- OT1,2,3,4          odporový tenzometr měřící přetvoření betonu (1), lamely (2),  
kraj lamely (3), pro dolní taženou výztuž je uvnitř nosníku (4)

### **Průběh experimentální analýzy**

Zkoušky zkušebních těles probíhaly jednotlivě vždy po důkladném umístění a zapojení měřicího zařízení. Zkoušky byly provedeny po uplynutí minimální doby zrání hotového betonu dvaceti osmi dní. Experiment byl realizován v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví.

Zatěžovací zkouška byla provedena pomocí hydraulického válce a to postupným zatěžováním (po 5kN) s přestávkami na zaznamenání rozvoje trhlin a fotografické dokumentace. Zatěžování probíhalo opatrně, aby nedošlo k poškození měřicí techniky a jiných pomocných zařízení. První zkoušený prvek byl nezesílený a následně potom zesílený. Po dosažení maximálního zatížení prvku byly odejmuty snímače a zkoumáno celkové porušení tělesa dalším zatěžováním po úplný kolaps nosníku.



*Obr. 6.4 Experimentální analýza*

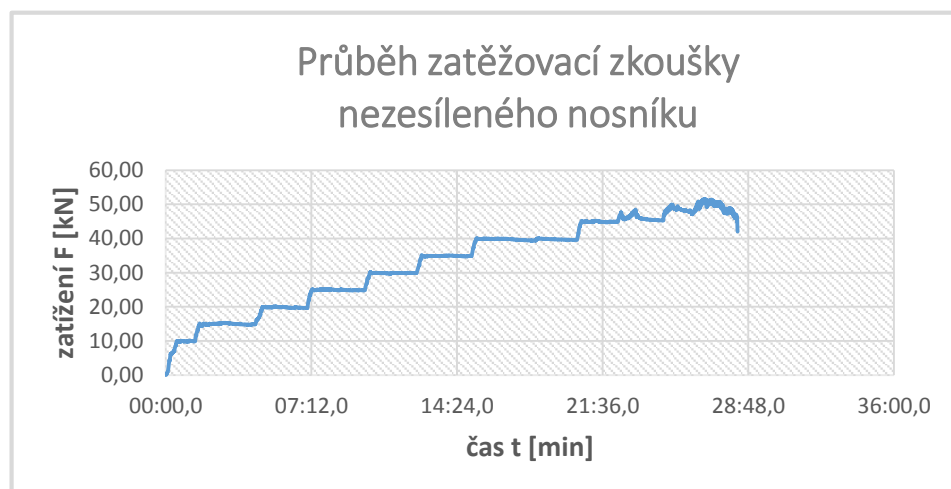
## Zatěžovací zkouška nezesíleného prvku

Zatěžování:

1. Spuštění válce na H-profil pro přímý kontakt s prvkem
2. Začátek zatěžování a snímání posunů a deformací
3. Vznik prvních trhlin ( $F = 10$  kN - tažená část)
4. Zastavení vzniku nových trhlin – jen rozšiřování stávajících trhlin ( $F = 35$  kN)
5. Maximální zatížení dosaženo při síle  $F = 47,63$  kN
6. Další zatěžování – pouze zvětšení deformací
7. Konec zkoušky nezesíleného prvku



Obr. 6.5 Experimentální analýza nezesíleného prvku



Obr. 6.6 Graf zatěžování nezesíleného zkušebního prvku



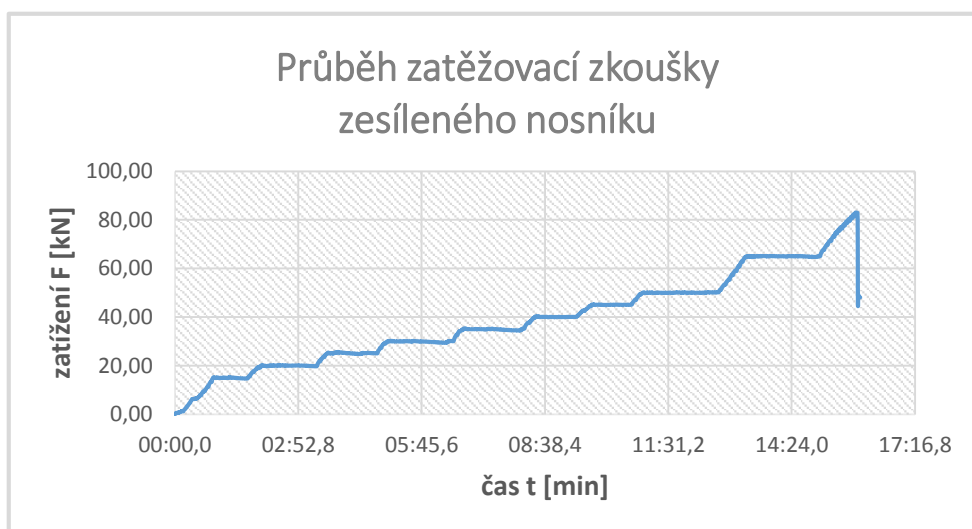
## Zatěžovací zkouška zesíleného prvku

Zatěžování:

1. Spuštění válce na H-profil pro přímý kontakt s prvkem
2. Začátek zatěžování a snímání posunů a deformací
3. Vznik prvních trhlin (  $F = 15 \text{ kN}$  - tažená část )
4. Vznik trhlin ve smykové oblasti (  $F = 40 \text{ kN}$  )
5. Odtržení lepené uhlíkové lamely – delaminace, maximální zatížení dosaženo při síle  $F = 82,97 \text{ kN}$
6. Pokles zatížení, větší rozvoj trhlin, zvětšení průhybu
7. Další zatěžování – pouze zvětšení deformací
8. Konec zkoušky zesíleného prvku



Obr. 6.7 Experimentální analýza zesíleného prvku



Obr. 6.8 Graf zatěžování zesíleného zkušebního prvku

## 6.2 DOPROVODNÉ ZKOUŠKY

Po odstranění forem byla doprovodná tělesa přeměřena posuvným měřítkem pro zjištění reálných rozměrů a zvážena na digitální váze pro následné stanovení objemové hmotnosti.

$$\rho = m / V \text{ [kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{]},$$

m.....je hmotnost tělesa [kg]

V..... je objem tělesa [m<sup>3</sup>]

Vzorek	Rozměr [mm]	Objem [m <sup>3</sup> ]	Hmotnost [kg]	Objemová hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]
<b>Krychle 1</b>	149,3 x 150,1 x 150,5	0,003373	7,4972	2220
<b>Krychle 2</b>	150,6 x 149,9 x 150,1	0,003388	7,5002	2210
<b>Krychle 3</b>	148,2 x 150,2 x 150,1	0,003341	7,3944	2210
<b>Krychle 4</b>	148,7 x 149,9 x 150,4	0,003352	7,4473	2220
<b>Hranol 1</b>	98,8 x 100,4 x 400,2	0,003970	8,7897	2210
<b>Hranol 2</b>	99,3 x 100,2 x 400,3	0,003983	8,8164	2210
<b>Hranol 3</b>	101,2 x 100,1 x 400,5	0,004057	9,1718	2260
<b>Hranol 4</b>	98,2 x 99,9 x 400,3	0,003927	8,8559	2260
<b>Hranol 5</b>	97,5 x 100,0 x 400,2	0,003902	8,7343	2240
<b>Hranol 6</b>	98,7 x 100,1 x 400,2	0,003954	8,8421	2240

*Tab. 6.1 Objemové hmotnosti betonových doprovodných těles*

Následně byly provedeny zkoušky pro laboratorní zjištění reálných mechanických vlastností těles.

## 6.2.1 Pevnost betonu v tlaku

Nejdůležitější vlastností betonu je jeho pevnost v tlaku. Pevnost betonu v tlaku značí odpor betonu proti jeho porušení nebo změně jeho tvarů vůči vnějšímu zatížení. Pevnosti se rozdělují na technickou a statickou, kde technická pevnost je zjišťována experimentální metodou a statická pevnost je dána na základě teorie pravděpodobnosti pro zajištění spolehlivosti konstrukce.

Pevnost betonu v tlaku je zkoušená na krychlích a hranolech v laboratorním lise do úplného porušení tlakem. Krychelná pevnost betonu v tlaku  $f_{c,cube}$  je zkoušena na krychlích a hranolová pevnost betonu v tlaku  $f_{c,prism}$  je zkoušená na hranolech s dosažením 70% až 80 % krychelné pevnosti betonu v tlaku. Hranolová i krychelná pevnost se určuje stejným poměrem maximální zatěžovací síly  $F$  a plochy průřezu  $A_c$  zkoušeného tělesa.

$$f_c = F / A_c \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

### Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Pevnosti betonu v tlaku byly zkoušeny na krychlích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm a hranolech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Tělesa byla vkládána do laboratorního lisu EDT 1600 kN mezi tlačné desky a postupně zatěžována s postupně přibývajícím tlakem do úplného porušení. Vyhodnocení zkoušky je uvedeno v příloze P-2

## 6.2.2 Statický modul pružnosti

Modul pružnosti se měří na normových tělesech o předem daných rozměrech 100 x 100 x 400 mm, které se cyklicky zatěžují v lise tlakem a měří se deformace tenzometrem připevněným ke zkoušeným zkušebním tělesům. Tenzometry pro zkoušení mohou být mechanické, strunové nebo odporové. Tenzometry fungují na principu změně měřící základny pomocí připevněných dotykových břitů. Zkoušení má za následek deformaci, která způsobuje změnu délky mezi břity, a tedy poměr mezi velikostí měřící základny tláčeného prvku a její původní délkou je velikost poměrné deformace.












Při zkoušení je těleso zatěžováno dolní a horní silou, kde dolní - základní napětí je volena  $0,5 \text{ N/mm}^2$  a horní napětí je vypočteno jako třetina z hranolové pevnosti betonu v tlaku srovnávacích těles. Z daných napětí a vypočtené plochy zkušebního prvku se určí dolní síla  $F_b$  a horní síla  $F_a$ , které budou potřeba na vyvození pro zkušební lis. Zatěžovací cykly probíhají mezi zjištěnými silami. [1-5]

*Třetinová napětí betonu v tlaku:*

$$\sigma_a = f_{c,prism} / 3 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$f_{c,prism}$  je hranolová pevnost v tlaku zkoušeného tělesa  $[\text{N/mm}^2]$

měření modulu pružnosti	vyšší E	nižší E
ššíření zvuku 	 rychlé šíření	 pomalejší šíření
vlastní frekvence 	 vysoká frekvence	 nízká frekvence
tvrdost povrchu (sklerometrie) 	 tvrdý povrch	 měkčí povrch

*Obr. 6.1 Další možní ukazatelé modulu pružnosti [4-3]*

Výpočet modulu pružnosti:

*Využití Hookova zákona:*

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]}$$

$\varepsilon$  - je poměrná deformace  $[\mu\text{mm/mm}]$

$E$  - je modul pružnosti  $[\text{N/mm}^2]$

*Modul pružnosti závisí na změně napětí a změně pružného přetvoření:*

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\Delta\varepsilon}$$

$E_c$  – statický modul pružnosti betonu [N/mm<sup>2</sup>]

$\sigma_a$  – horní napětí [N/mm<sup>2</sup>]

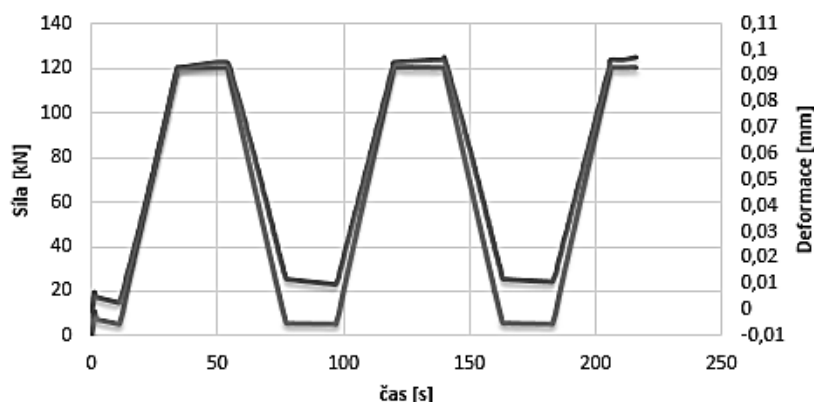
$\sigma_b$  – dolní napětí [N/mm<sup>2</sup>]

$\Delta\varepsilon$  – průměrná změna poměrného přetvoření mezi horním a dolním napětím

### Stanovení statického modulu pružnosti betonu

Statický modul pružnosti byl měřen na tělesech s normovými rozměry 100 x 100 x 400 mm. Těleso bylo vloženo dostředně do zkušebního lisu FORMTEST s osazeným snímacím rámem o délce základny 200 mm. Rám pro cyklické snímání modulu pružnosti tvoří dva tenzometry umístěné na protilehlých stranách zkušebního tělesa.

Hranol v lise byl cyklicky zatěžován dolní silou  $F_b = 5$  kN a horní silou  $F_a = 120$  kN. Celkové zatěžování se skládalo ze dvou předběžných zatížení zkušebního prvku a měření modulu pružnosti. Díky speciálnímu softwaru FORMTEST nebylo třeba do zkoušky nijak zasahovat. Naměřené hodnoty byly v časových intervalech ukládány do měřicí centrály pro další zpracování. Vyhodnocení statického modulu pružnosti je zobrazeno v příloze P – 2.



Obr. 6.2 Grafické znázornění průběhu zkoušky

### 6.2.3 Pevnost oceli v tahu

Hlavní předností oceli je její pevnost v tahu, která zajišťuje odolnost proti tahové síle. Pevnost oceli v tahu je ovlivněna několika faktory jako jsou obsah uhlíku v oceli nebo teplota dané oceli. Obsah uhlíku v oceli mění tvrdost, pevnost, houževnatost a další vlastnosti. Teplota zase výrazně mění pevnost materiálu a to u 500°C může pevnost klesat na polovinu oproti původním hodnotám čímž ztrácí i mez kluzu. Opakované namáhání oceli také mění její pevnost, která může klesnout až na hodnotu meze únavy. [1-7]

#### Mez pevnosti $f_u$ se určí ze vztahu:

$$f_u = F_{MAX} / A_s \quad [\text{MPa}],$$

kde  $F_{MAX}$  je maximální hodnota tahové síly [N],

$A_s$  je plocha zkoušeného prutu [mm<sup>2</sup>].

#### Mez kluzu $f_y$ se určí ze vztahu:

$$f_y = F_{0,2} / A_s \quad [\text{MPa}],$$

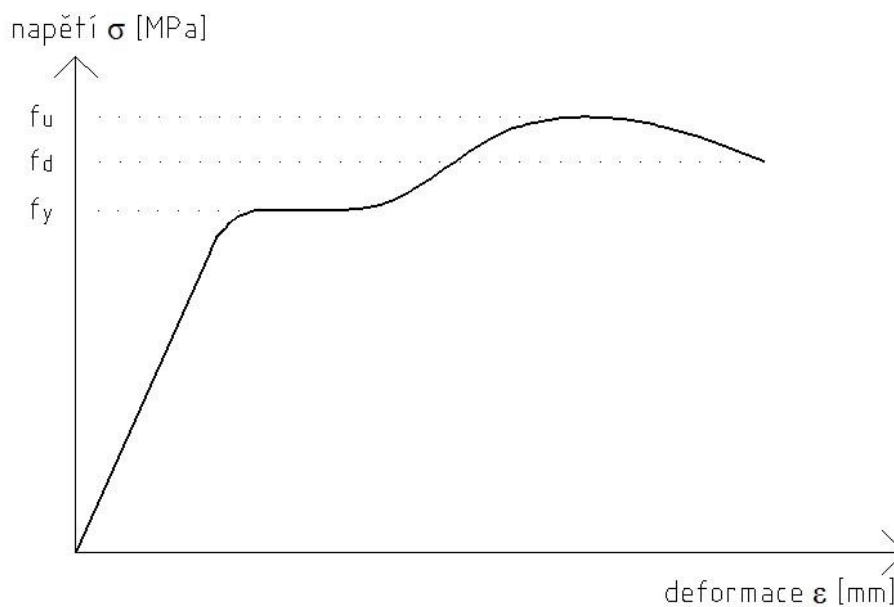
kde  $F_{0,2}$  je hodnota tahové síly v úrovni meze kluzu [N],

$A_s$  je plocha zkoušeného prutu [mm<sup>2</sup>].

#### Stanovení pevnosti oceli v tahu

Betonový nosník byl vyztužen armokošem, který obsahoval dva různé typy průměru výztuže 6 a 10 mm. Na prezentovaných prutech byla zkoušena pevnost oceli v tahu. Pruty byly postupně uchycovány do lisu s osazenými indukčnostními snímači dráhy a jednotlivě zkoušeny. Před měřením byla na prutech odečtena počáteční délka  $l_0$  a následně byly pruty zatěžovány konstantní tahovou silou do jejich přetržení. Poměrné přetvoření oceli bylo analyzováno indukčnostními snímači zapojenými do měřící centrály HBM Spider8 s frekvencí ukládání dat 5 Hz, ve které byly v intervalech zaznamenávány naměřené hodnoty pro další zpracovávání výsledků. Vyhodnocení dat proběhlo v tabulkovém editoru. [1-7]

Ze zpracovaných dat byla určena mez kluzu, pevnost v tahu a modul pružnosti oceli. Dále byly vytvořeny pracovní diagramy oceli dle jejich průřezu. Vyhodnocení je zobrazeno v příloze P – 2.



Obr. 6.5 Pracovní diagram oceli [3-3]

Legenda:  $f_y$       mez kluzu  
 $f_u$       mez pevnosti  
 $f_d$       mez přetržení

## 6.2.4 Vyhodnocení doprovodných zkoušek

### Výsledky doprovodných zkoušek vlastností betonu:

<b>Statický modul pružnosti</b>	27,53 GPa
<b>Krychelná pevnost betonu v tlaku</b>	43,19 MPa

Zatřídění betonu dle ČSN EN 206:

Kriterium 1:  $f_{cm} \geq f_{ck} + 4$        $43,19 \geq 30 + 4 = 34$

Kriterium 2:  $f_{ci(\min)} \geq f_{ck} - 4$        $42,30 \geq 30 - 4 = 26$

**Vyhovuje třídě betonu: C 25/30**

### Výsledky doprovodných zkoušek oceli:

<b>Ocelová výztuž</b>	<b>Ø6 mm</b>	<b>Ø10 mm</b>
<b>Mez kluzu</b>	520,00 MPa	614,07 MPa
<b>Mez pevnosti</b>	630,47 MPa	712,93 MPa
<b>Modul pružnosti</b>	200,37 GPa	198,03 GPa

## 7 NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerická analýza pomocí softwaru byla provedena v programu ATENA 2D, kde byl vytvořen matematický model provedených zkoušek a dále byl proveden statický výpočet. Obě metody byly následně porovnány s experimentální analýzou.

### 7.1 ANALÝZA POMOCÍ SOFTWARE ATENA

Autory výpočetního softwaru ATENA 2D jsou V. Červenka, R. Pukl a J. Margoldová. Software ATENA je program sloužící pro reálnou simulaci porušení betonových a železobetonových konstrukcí. Program disponuje velkým množstvím materiálových modelů k vytvoření přesné simulace. [3-3]

Numerický postup řešení programem ATENA se sestává ze tří částí:

- základní vztahy definující chování materiálu – vztahy mezi napětím a přetvořením
- postup metodou konečných prvků, diskretizace pole přetvoření - uzlové posuny
- řešení nelineárního problému pomocí souboru následných lineárních řešení.

#### 7.1.1 Řešení modelu

Výpočetní program ATENA 2D používá pro nelineární analýzu metody výpočtu Newton- Raphson a Arc-Length. Pro náš model byla zvolena metoda Newton – Raphson.

Experiment byl modelovaný pro varianty se zesílením i bez zesílení s reálnými hodnotami získanými doprovodnými zkouškami. Materiál pro betonový nosník byl zvolen z nelineárního betonu SBETA. Název nelineárního betonu - SBETA má stejné jméno jako dřívější výpočetní program, ve kterém byl tento materiál poprvé použit a značí zkratku pro analýzu vyztuženého betonu v německém jazyce – „StahlBETonAnalyse“. [3-3]

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
<b>Modul pružnosti</b>	E	27530	MPa
<b>Pevnost v tlaku</b>	R <sub>cu</sub>	43,19	MPa
<b>Pevnost v tahu*</b>	R <sub>c</sub>	2,6	MPa
<b>Objemová hmotnost</b>	ρ	2,217E-02	MN/m <sup>3</sup>
<b>Lomová energie*</b>	G <sub>f</sub>	7.364E-05	MN/m

Tab. 7.1 Použité reálné vlastnosti betonu (\* hodnoty z jiných zdrojů)

Externí zesílení uhlíkovou lamelou bylo vymodelováno z 3D bi-lineární oceli Von Mises. Hodnoty charakteristik uhlíkové lamely byly použity dle skutečných hodnot použité lamely. Vrstva lepidla se nahradila materiálem 3D nelineární betonem.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
<b>Modul pružnosti</b>	E	165 000	MPa
<b>Pevnost v tahu</b>	R <sub>c</sub>	3000	MPa
<b>Objemová hmotnost</b>	ρ	1,610E-02	MN/m <sup>3</sup>

Tab. 7.2 Použité reálné vlastnosti cfk lamel

Ocelová výztuž je vymodelována z materiálu Výztuž a graf oceli byl upraven na reálný graf zkoušky výztuže. Průměry výztuží se mění s ohledem, jestli je výztuž v tahové, tlakové části nebo použita jako smyková výztuž.

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
<b>Modul pružnosti</b>	E	198,03	MPa
<b>Mez kluzu</b>	f <sub>y</sub>	614,07	MPa
<b>Mez pevnosti</b>	f <sub>u</sub>	712,93	MPa
<b>Objemová hmotnost</b>	ρ	7.850E-02	MN/m <sup>3</sup>

Tab. 7.3 Použité reálné vlastnosti ocelové výztuže

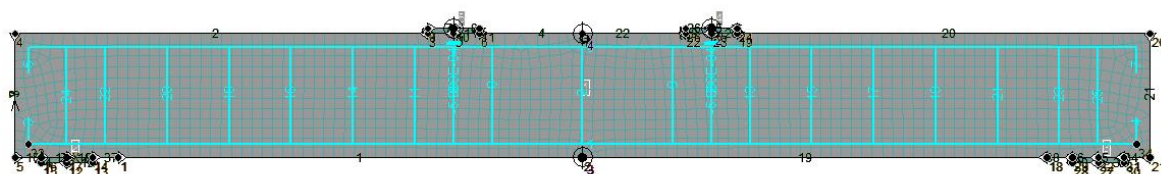
Modely pro numerickou analýzu byly zhotoveny z vypsanych materiálů pro přesnější srovnání s reálnou zkouškou. Ve 2D modelu se použily přesné rozměry včetně šířky každého materiálu. Vrstva lepidla byla minimální tloušťky, a proto pro lepší zobrazení deformací byla zvětšena na hodnotu 2 mm.

Do modelu byly přiděleny i podložky, které charakterizují svislé posunutí v podporách, aby při experimentální analýze vyrovnaly nerovnosti provedené při betonáži. Materiál použitý pro podložky byla 3D bi-lineární ocel Von Mises.

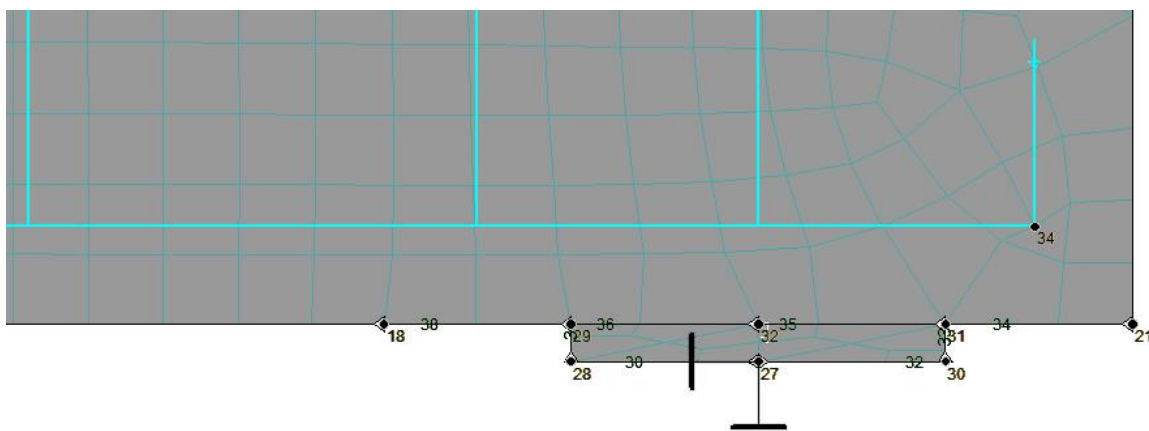
Po vytvoření modelu byly umístěny monitorovací body pro snímání deformací a posunů. Body byly umístěny do míst, kde by mohlo docházet ke změnám způsobeným zatěžovacími kroky.

## 7.1.2 Grafické zobrazení modelu

### Nezesílený model:



Obr. 7.1 Numerický model nezesíleného zkušebního prvku

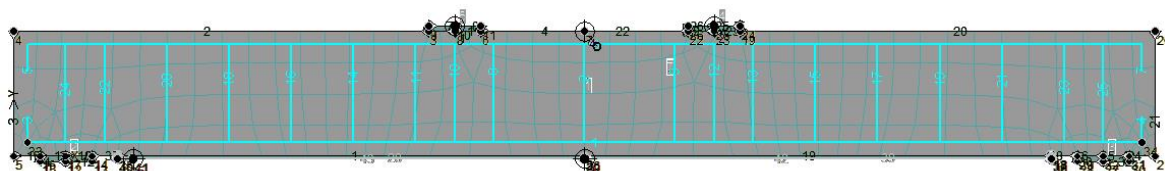


Obr. 7.2 Pevná podpora v numerickém modelu

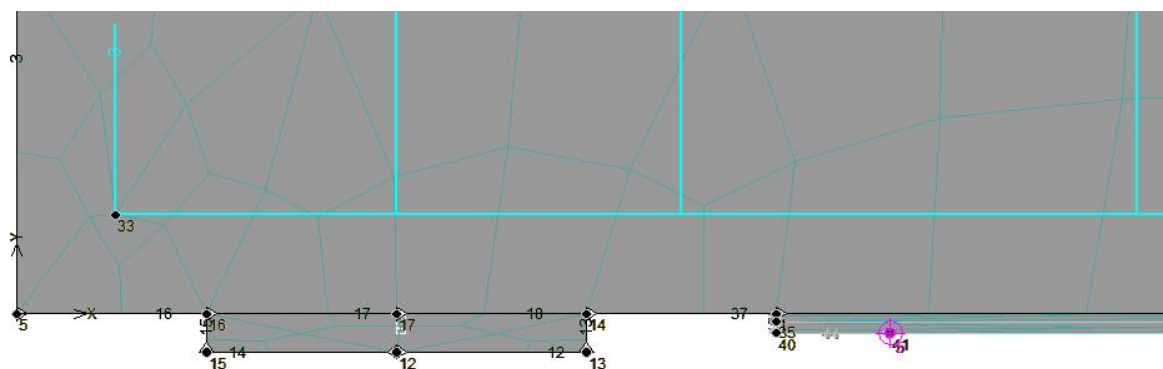


Síť pro vymodelovaná tělesa byla u nezesíleného prvku volena 20 mm, což bylo dostačující pro naše vyhodnocení vzhledem k přesnosti a časové náročnosti výpočtu. Ve výšce průřezu bylo tedy 12 konečných prvků a výsledky analýzy byly dostačující.

### **Zesílený model:**



*Obr. 7.3 Numerický model zesíleného prvku*



*Obr. 7.4 Lamela a monitorovací bod deformací*

Zesílený prvek byl pro lepší grafické zobrazení upraven na již zmiňovanou větší tloušťku vrstvy lepidla a lamely. U obou upravených prvků byla zachována průřezová plocha, aby nebyla ovlivněna únosnost prvku, mechanické vlastnosti a prvek se choval co nejméně jako při reálném zatěžování.

Při výpočtu byla z velké časové náročnosti a slabšímu hardwaru použita síť konečných prvků 50mm, což nezaručovalo úplnou přesnost řešení, ale i přes to byl výsledek uspokojivý, vzhledem k experimentální analýze.

Podpory, vlastní hmotnost zkušebního tělesa a zatěžovací síla byly tři zatěžovací stavy, které byly nutné pro výpočet. Zatěžovací stavy byly nadefinovány a postupně přiděleny do jednotlivých výpočtových kroků.

**Zatěžovací stavy a výpočtové kroky:**

1. ZS - Podpory
2. ZS - Vlastní tíha 1,2.... 1 krok
3. ZS - Přírůstek deformace 0,05 mm 1,3.... 10 krok
4. ZS - Přírůstek deformace 0,10 mm 1,4.... 20 krok
5. ZS - Přírůstek deformace 0,50 mm 1,5.... 30 krok

(počty kroků a přírůstky deformací jsou určeny z předešlého zkoušení možných variant)

Výsledky analýzy se nachází v příloze P – 4.

## **7.2 STATICKÝ VÝPOČET**

Numerická analýza pomocí statického výpočtu je provedena dle normy ČSN EN 1992-1-1. Ve výpočtu stanovujeme únosnost jednotlivých prvků dle charakteristických normových hodnot a reálných hodnot z doprovodných zkoušek. Únosnost je spočítána pro průřez oslabený trhlinami a pro průřez zcela porušený trhlinou. Dle stanovených únosností prvků je spočítán průhyb jednotlivých těles a následně sestaven idealizovaný průběh chování prvků při zatížení silou.

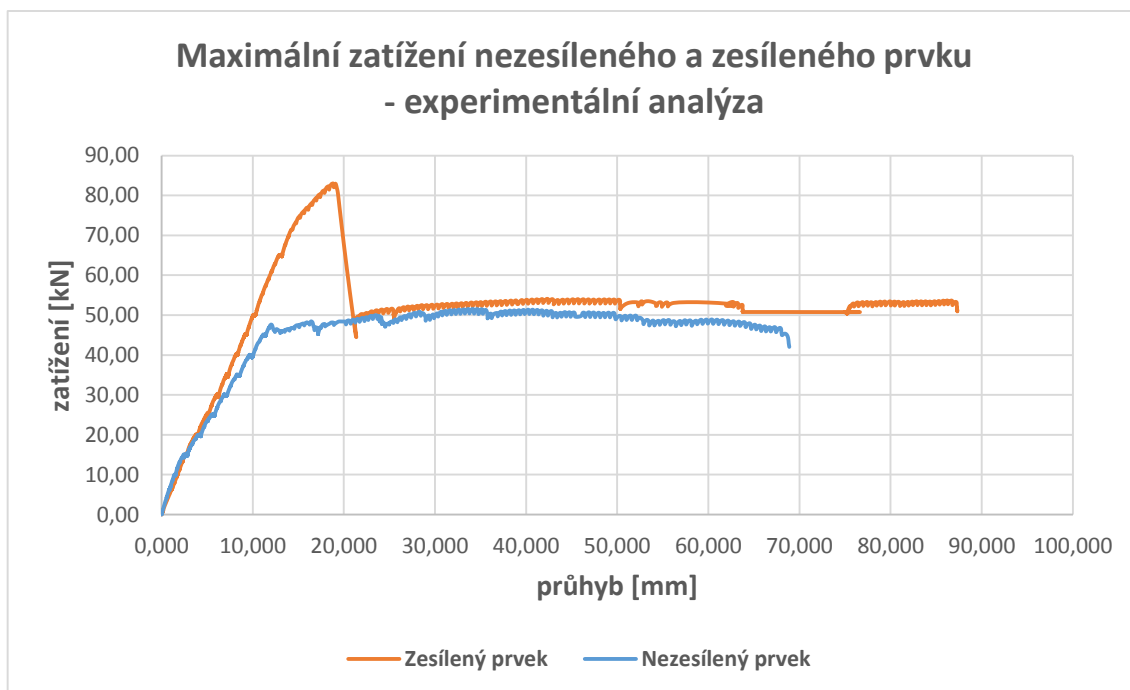
Statický výpočet je proveden v příloze P – 3.

## 8 VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

### 8.1 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY

Zatěžovacími zkouškami v laboratoři byly odzkoušeny zkušební prvky se zesílením a bez zesílení s následným vyhodnocením jejich deformací v měřených oblastech prvku (viz. Kapitola 7). Grafické zobrazení výsledků jednotlivých zkoušek a přetvoření v měřených materiálech je ukázáno v příloze P - 3.

U zkoušky nezesíleného prvku došlo k maximálnímu zatížení při síle 47,63 kN. Pro zesílený prvek, u kterého navíc působilo zesílení pomocí externí uhlíkové lamely, byla zjištěna maximální zatěžovací síla 82,97 kN. Delaminace lamely rozhodlo o hodnotě maximální zatěžovací síly, které by mohlo v případě neodtržení dále pokračovat.



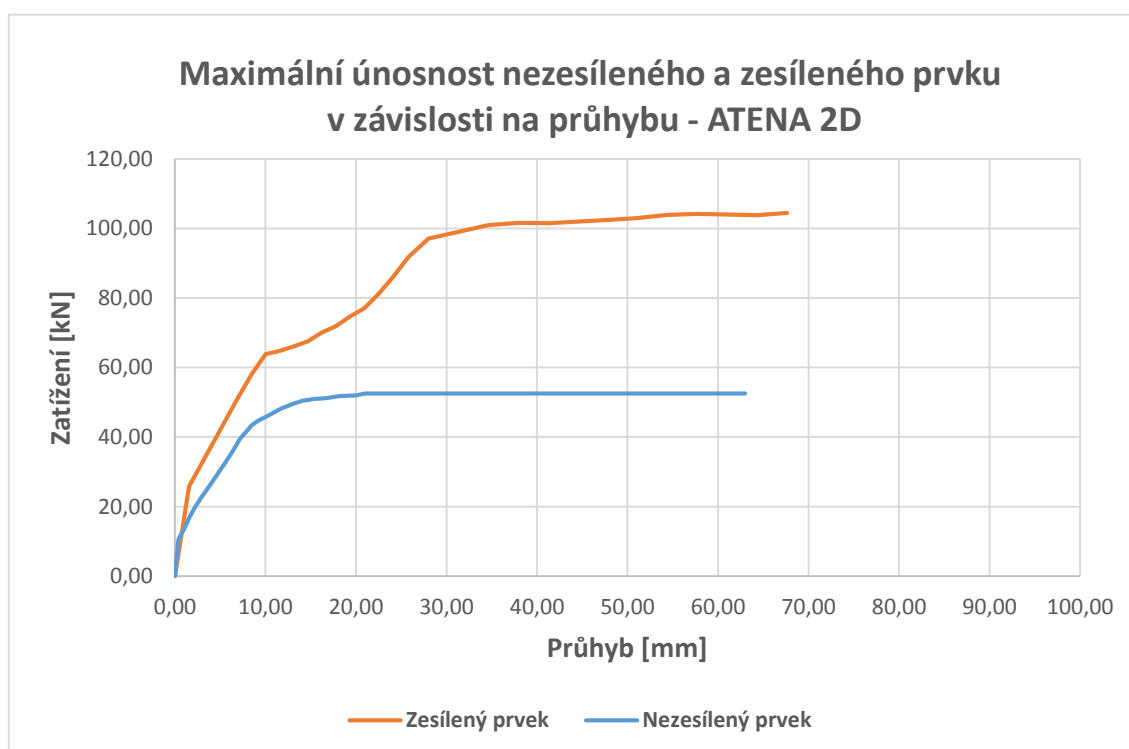
Graf. 8.1 Graf zatěžovacích zkoušek

## 8.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ ANALÝZY

### 8.2.1 Vyhodnocení výsledků programu ATENA 2D

Numerickou analýzou výpočetním programem ATENA 2D pro reálné hodnoty vlastností materiálu z doprovodných zkoušek bylo zjištěno, že nezesílený prvek reaguje podobně jako v experimentální analýze a statickém výpočtu podle reálných hodnot. Maximální zatěžovací síla na nezesílený prvek byla dosažena 52,20 kN s průhybem 18,74 mm.

Zesílený prvek, uhlíkovou lamelou s hodnotami dodanými výrobcem, měl výslednou maximální zatěžovací sílu o něco málo menší než u experimentální analýzy. Maximální zatěžovací síla u zesíleného prvku byla tedy 66,53 kN s výsledným průhybem 10,21 mm. Výsledky numerické analýzy modelu jsou zobrazeny v příloze P – 4.

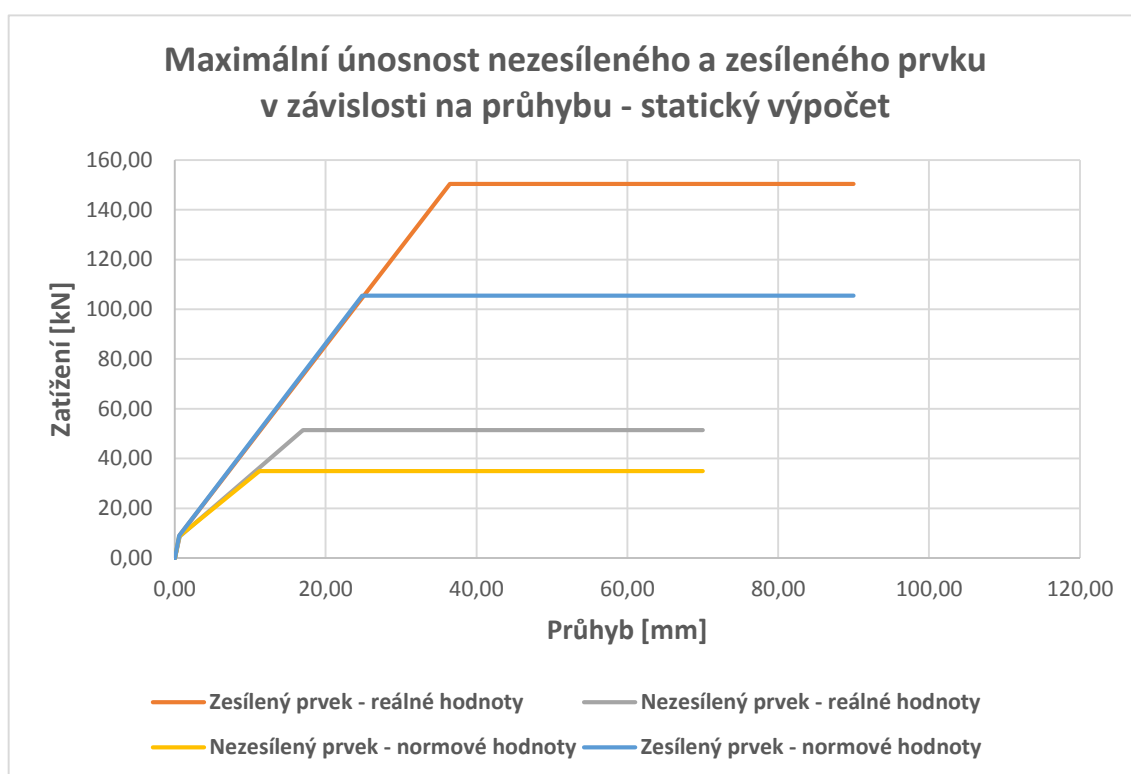


Graf. 8.2 Graf výsledků programu ATENA 2D

## 8.2.2 Vyhodnocení výsledků statického výpočtu

Statickým výpočtem byly analyzovány výsledky maximální zatěžovací síly na zkušební prvky počítané pomocí normových hodnot a reálných hodnot naměřených z doprovodných zkoušek. Výpočty byly provedeny podle ČSN EN 1992-1-1 pro výsledné srovnání s reálnými zkouškami.

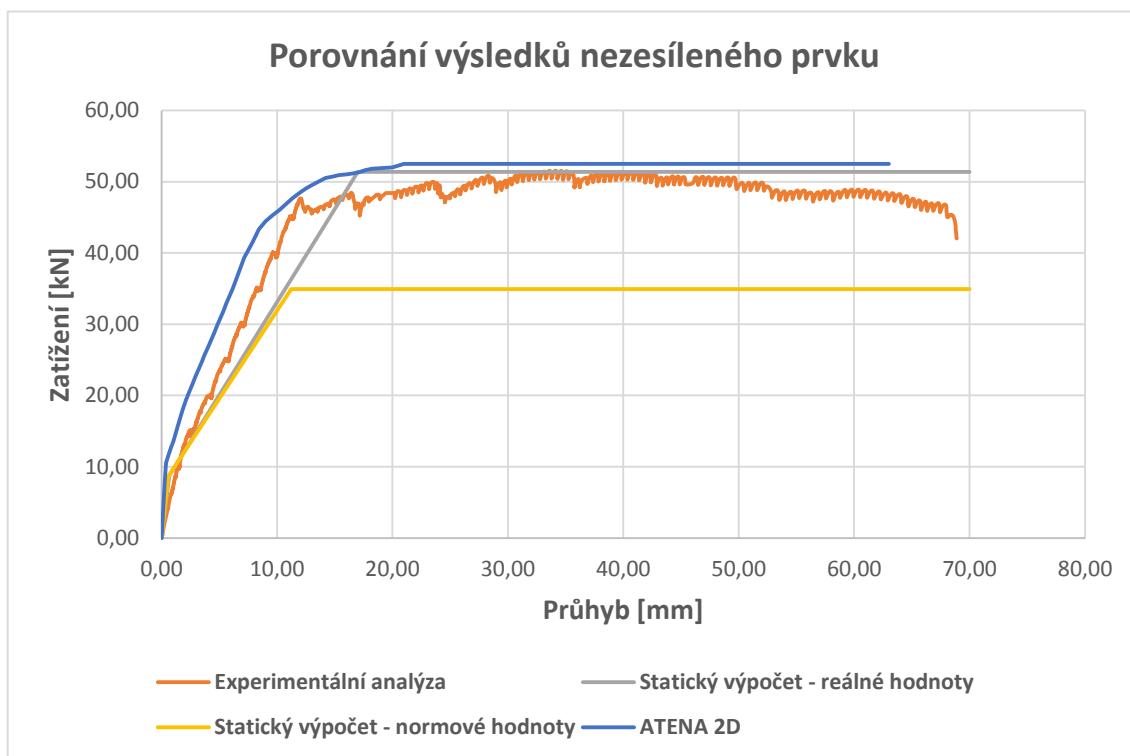
Výpočet s normovými hodnotami byl proveden pro nezesílený prvek, u kterého vyšla maximální zatěžovací síla 34,93 kN a průhyb v polovině nosníku 11,22 mm. U zesíleného prvku uhlíkovou lamelou byla vypočítána síla 105,52 kN a průhyb 24,83 mm. Při započítání reálných hodnot byla maximální síla u nezesíleného prvku spočítána na 51,36 kN a průhyb 17,00 mm. Zesílený prvek se skutečnými hodnotami byl vypočten na maximální zatěžovací sílu 150,42 kN a průhyb 36,47 mm. Výsledky a statický výpočet je zobrazen v příloze P – 4.



Graf. 8.3 Graf výsledků statického výpočtu

### 8.3 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

#### Porovnání výsledků nezesíleného prvku:

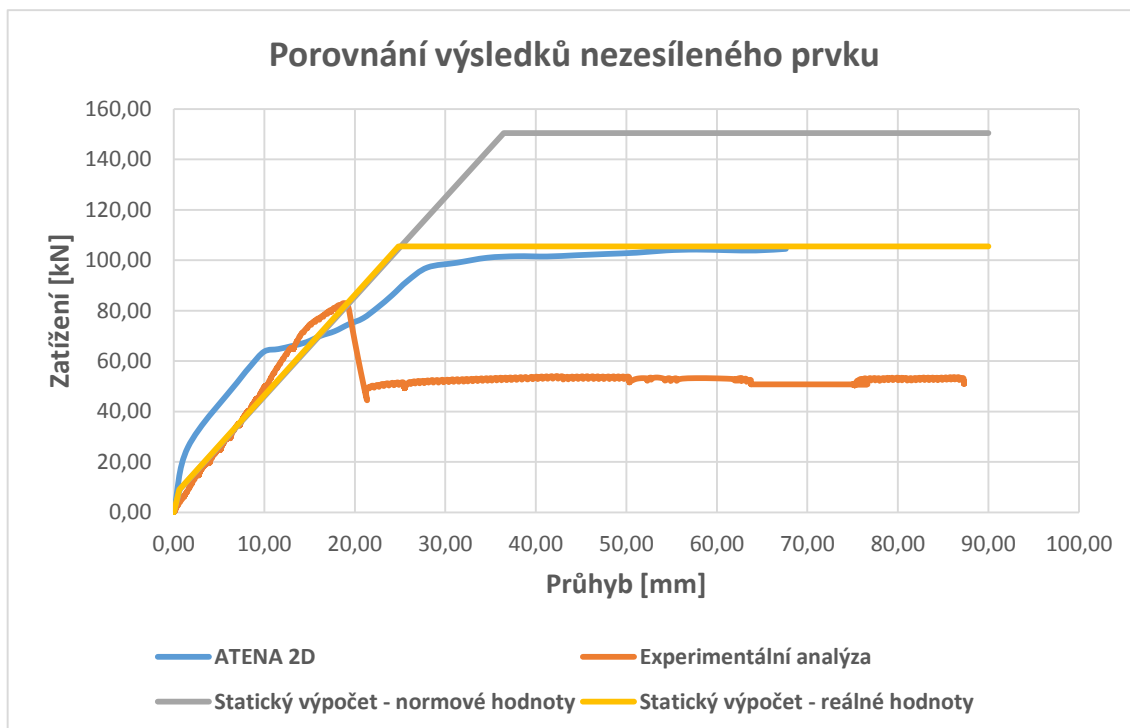


Graf. 8.4 Graf výsledků použitých metod na nezesílený prvek

NEZESÍLENÝ PRVEK	Experiment	ATENA 2D	Statický výpočet	
			Normové hodnoty	Reálné hodnoty
Vznik trhlin	10,00 kN	9,13 kN	8,64 kN	8,72 kN
Průhyb na mezi vzniku trhlin	3,64 mm	0,35 mm	0,58 mm	0,66 mm
Maximální zatížení prvku	47,63 kN	52,20 kN	34,93 kN	51,36 kN
Průhyb při maximálním zatížení prvku	13,72 mm	18,74 mm	11,22 mm	17,00 mm
Porovnání únosnosti	100%	110%	73%	108%

Tab. 8.1 Výsledky max. zatížení nezesíleného prvku použitých metod

### Porovnání výsledků zesíleného prvku:



Graf. 8.5 Graf výsledků použitých metod na zesílený prvek

NEZESÍLENÝ PRVEK	Experiment	ATENA 2D	Statický výpočet	
			Normové hodnoty	Reálné hodnoty
Vznik trhlin	15,00 kN	12,05 kN	9,01 kN	9,15 kN
Průhyb na mezi vzniku trhlin	4,29 mm	0,77 mm	0,59 mm	0,67 mm
Maximální zatížení prvku	82,97 kN	66,53 kN	105,52 kN	150,42 kN
Průhyb při maximálním zatížení prvku	18,34 mm	10,21 mm	24,83 mm	36,47 mm
Porovnání únosnosti	100%	80%	127%	181%

Tab. 8.2 Výsledky max. zatížení zesíleného prvku použitých metod

## 9 ZÁVĚR

V diplomové práci je teoreticky popsáno externí zesilování konstrukcí s různými typy vyztužovacích materiálů a jejich aplikace. Hlavním obsahem práce je praktická část, která se zabývá experimentální a numerickou analýzou nezesíleného a zesíleného železobetonového prvku dle našeho návrhu. Při analýze je vždy porovnáváno maximální zatížení obou prvků a porovnání s výsledky ostatních metod. Experimentální analýza, včetně výroby zkušebních prvků a zkoušek mechanických vlastností doprovodných těles, probíhala v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví.

Maximální zatížení nezesíleného prvku při experimentální analýze vyšlo 47,63 kN s průhybem 13,72 mm, což odpovídá přibližně i výsledku programu ATENA 2D (52,20 kN) a statickému výpočtu s reálnými hodnotami (51,36 kN). Ve statickém výpočtu pomocí normových hodnot je výsledek téměř o čtvrtinu menší (34,93 kN), jelikož reálné hodnoty betonu a oceli byly dle výsledků zkoušení doprovodných těles větší. U výsledků analýz nezesíleného prvku nedošlo k větším nesrovnalostem, a proto je toto vyhodnocení uspokojivé.

Analýza zesíleného prvku byla při experimentální zkoušce v laboratoři ovlivněna delaminací výztuže a to rozhodlo o maximálním zatížení prvku 82,97 kN, kde došlo k porušení povrchové vrstvy betonu a následným odtržením lepené výztuže v celé její délce. Příčinou odtržení je nízká únosnost povrchové vrstvy betonu zkoušeného prvku. Pro budoucí eliminaci problému je možností zvolit větší plochu lepené výztuže, mechanické kotvení vyztužení a samozřejmě zlepšení kvality betonu a povrchové vrstvy.

Výsledek numerické analýzy zesíleného prvku je u matematického modelu programu ATENA 2D o 20% menší než u reálné zkoušky (viz kapitola 8.2.1). V příštích analýzách programu ATENA bych doporučil, pro přesnější chování modelových materiálů, obohatit zkoušení na doprovodných tělesech o další zkoušky jako je zkouška lomových parametrů, zkouška přídržnosti, atd. a tím zvýšil počet zadávaných parametrů.

U statického výpočtu zesíleného prvku jsou výsledky, jak u použití normových hodnot (105,52 kN), tak u použití reálných hodnot (150,42 kN), vyšší díky výpočtu s plným využitím vnitřní i vnější výztuže prvku.



## 10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

### 10.1 SEZNAM NOREM

- [1-1] ČSN EN 206 – 1 Beton – Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- [1-2] ČSN 731201-86 Navrhování betonových konstrukcí
- [1-3] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [1-4] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [1-5] ČSN 73 6174 Zkoušení statického modulu pružnosti
- [1-6] Ostatní související ČSN, EN, ISO
- [1-7] ČSN EN 10002-1 – Kovové materiály, Zkoušené tahem

### 10.2 SEZNAM SKRIPT A OPOR

- [2-1] Schmid, P., kol, Základy zkušebnictví, FAST VUT v Brně, 2000
- [2-2] Manuál programu pro nelineární výpočty železobetonových konstrukcí - ATENA 2D, ATENA 3D, 1.-4. část, Červenka Consulting

### 10.3 SEZNAM DIPLOMOVÝCH, BAKALÁŘSKÝCH A DISERTAČNÍCH PRACÍ

- [3-1] ROHRBACHER I. *Experimentální a numerická analýza ŽB prvku zesíleného externí lepenou výztuží. Brno, 2010.* Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební.
- [3-2] PTÁČKOVÁ K. *Experimentální a numerická analýza zesílení železobetonového vetknutého prvku.* Brno, 2011, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [3-3] VEPŘEK, K. *Experimentální ověření kotevních oblastí zesílení ŽB prvků ocelovými lamelami.* Brno, 2013, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.

## 10.4 SEZNAM INTERNETOVÝCH ZDROJŮ

- [4-1] STATIKA s.r.o. 2015 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z:  
[http://www.statika.cz/picts/zaklady4\\_big.jpg](http://www.statika.cz/picts/zaklady4_big.jpg)
- [4-2] Minova Bohemia s.r.o. [online]. 2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z:  
[http://www.minova.cz/images/resized/GalleryFull/186\\_0x400.jpg](http://www.minova.cz/images/resized/GalleryFull/186_0x400.jpg)
- [4-3] EBETON, [online]. 2015 [cit. 2015-01-06]. Dostupné z:  
<http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>
- [4-4] *Die Rodgau-Bahn* [online]. 2014 [cit. 2014-12-11]. Dostupné z:  
[http://www.rodgau-bahn.de/b\\_heu/PB299044.jpg](http://www.rodgau-bahn.de/b_heu/PB299044.jpg)
- [4-5] Časopis Stavebnictví [online]. 2015 [cit. 2015-01-05]. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží. Dostupné z:  
[http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi\\_A1126\\_I21](http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21)
- [4-6] Časopis Stavebnictví [online]. 2015 [cit. 2015-01-05]. Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží. Dostupné z:  
[http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi\\_A1126\\_I21](http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21)
- [4-7] EFISAN Conrete [online]. 2015 [cit. 2015-01-10]. Dostupné z:  
<http://www.efisan.cz/sluzby/sanace-betonovych-konstrukci/zesilovani-konstrukci-uhlikovymi-lamelami-a-tkaninami/>
- [4-8] 5M s.r.o. [online]. 2015 [cit. 2015-01-10]. Dostupné z:  
<http://www.5m.cz/cz/silosyst/>
- [4-9] KOMPOZITY [online]. 2015 [cit. 2015-01-10]. Dostupné z:  
<http://www.prefa-kompozity.cz/produkt/zesilovaci-systemy>
- [4-10] TESAN [online]. 2014 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z:  
<http://www.tesan.cz/externi-lepena-uhlikova-vyztuz/>

## 11 SEZNAM PŘÍLOH

*Příloha č. 1* - Vyhodnocení doprovodných zkoušek mechanických vlastností

*Příloha č. 2* - Výkresová dokumentace

*Příloha č. 3* - Vyhodnocení experimentální analýzy

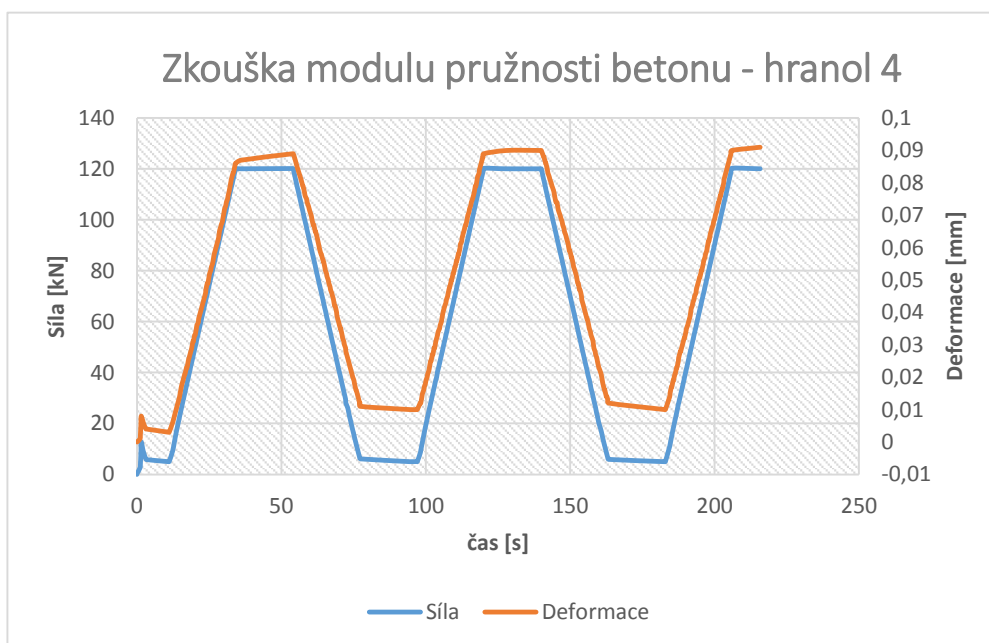
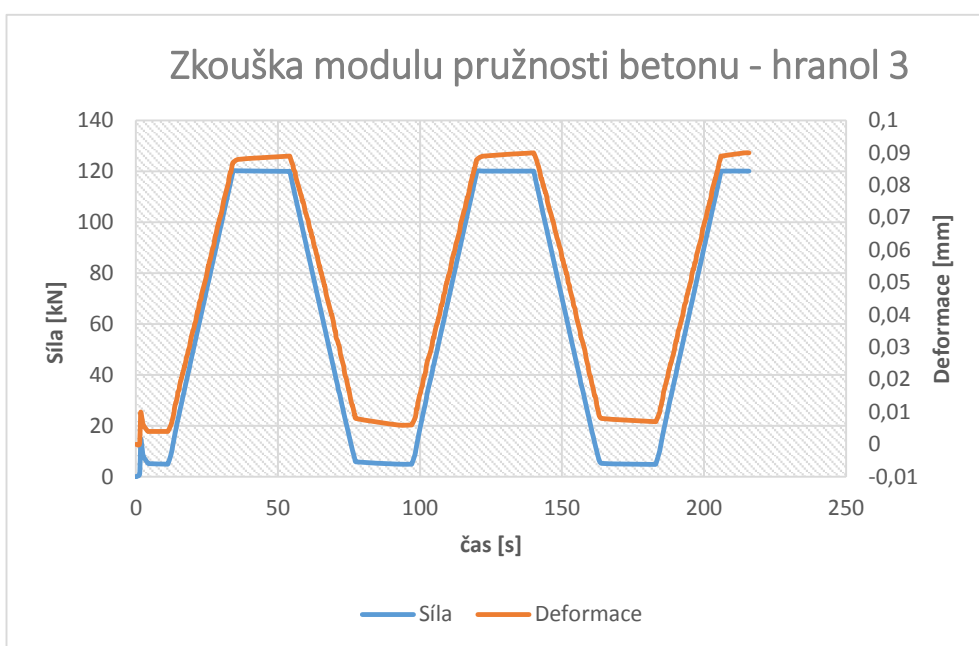
*Příloha č. 4* - Vyhodnocení numerické analýzy

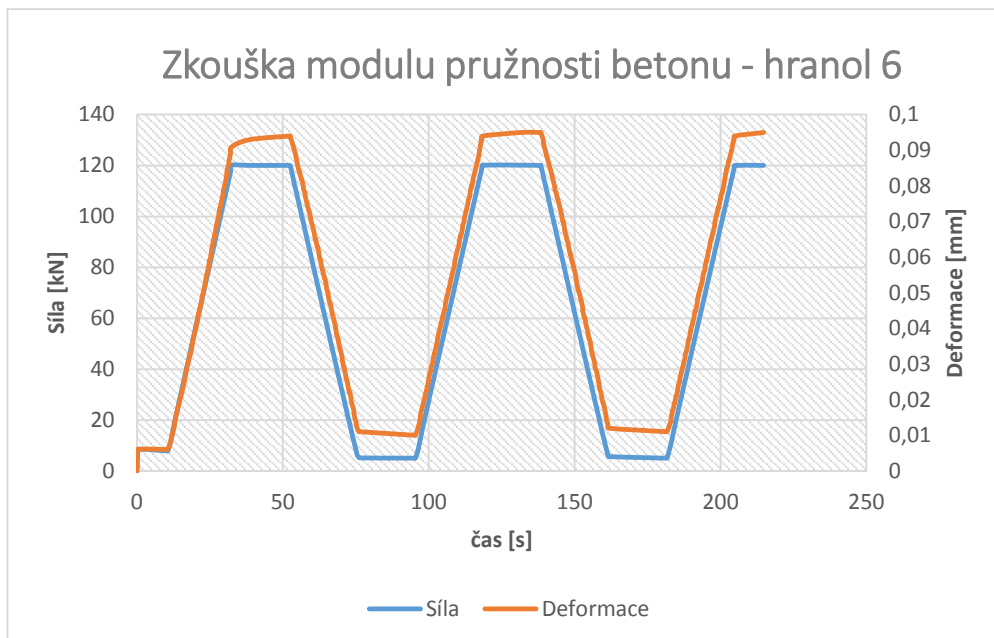
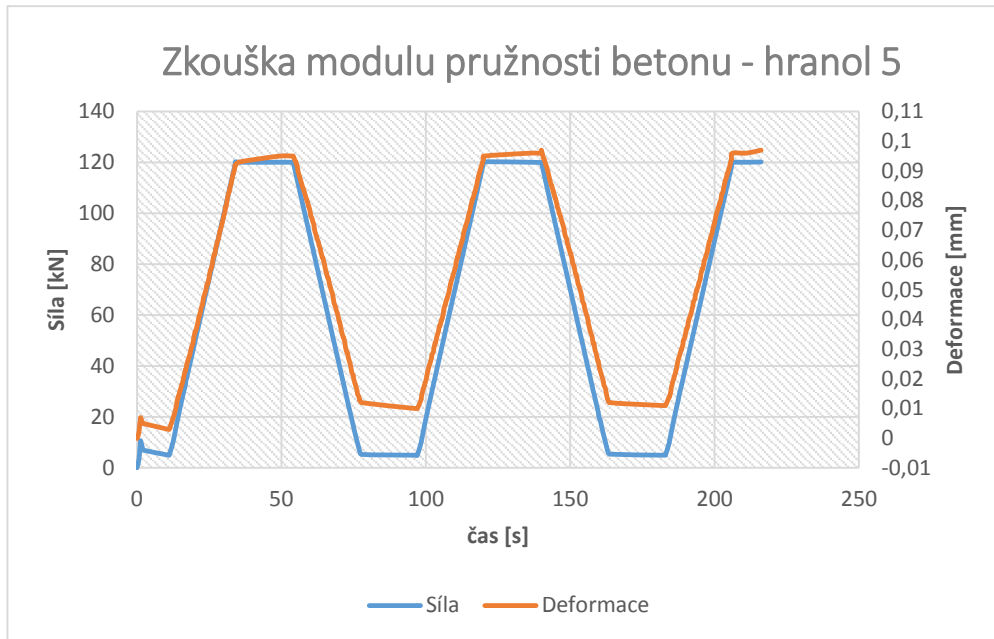
*Příloha č. 5* - Fotodokumentace

**Příloha č. 1**

**Vyhodnocení doprovodných zkoušek mechanických vlastností**

Stanovení statického modulu pružnosti na hranolech 100 x 100 x 400 mm								
Vzorek	Plocha	Základní	Dolní	Horní	Horní	Rozdíl	Poměrné	Modul pružnosti
	průřezu	zatížení	napětí	zatížení	napětí	napětí	přetvoření	
	[m <sup>2</sup> ]	[kN]	[MPa]	[kN]	[MPa]	[MPa]	ε	E <sub>b</sub> [GPa]
Hranol 3	0,010130	5,0	0,494	120,0	11,85	11,35	0,000091	28,6
Hranol 4	0,009810	5,0	0,510	120,0	12,23	11,72	0,000090	27,5
Hranol 5	0,009750	5,0	0,513	120,0	12,31	11,80	0,000097	26,8
Hranol 6	0,009880	5,0	0,506	120,0	12,15	11,64	0,000095	27,2
								<b>27,53</b>



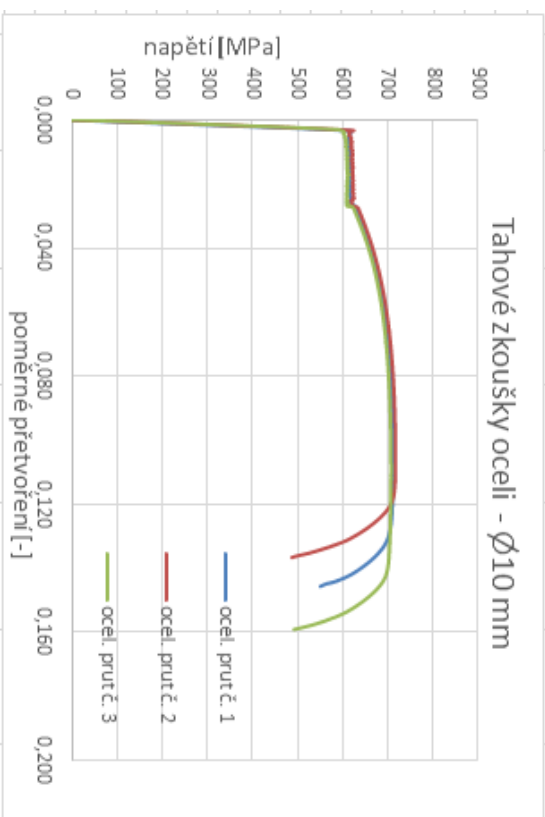
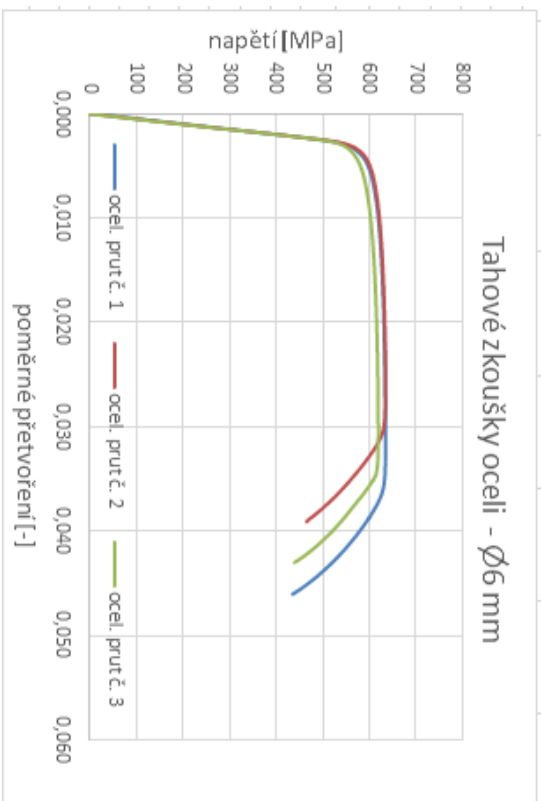


Výsledky měření a stanovení krychelné pevnosti na krychlech o rozměrech 150 x 150 x 150 mm												
Vzorek	Zrání betonu		Rozměry			Hmotnost m [kg]	Objem V [m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost ρ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Síla F [kN]	Krychelná pevnost f <sub>c,cube</sub> [MPa]		
	od	do	a [mm]	b [mm]	c [mm]							
Krychle 1	7.10.2014	14.11.2014	149,3	150,1	150,5	7,4972	0,003373	2222,91	948	42,30		
Krychle 2	7.10.2014	14.11.2014	150,6	149,9	150,1	7,5002	0,003388	2213,43	985	43,63		
Krychle 3	7.10.2014	14.11.2014	148,2	150,2	150,1	7,3944	0,003341	2213,12	983	44,16		
Krychle 4	7.10.2014	14.11.2014	148,7	149,9	150,4	7,4473	0,003352	2221,46	951	42,66		

Výsledky měření a stanovení hranolové pevnosti na hranolech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm												
Vzorek	Zrání betonu		Rozměry			Hmotnost m [kg]	Objem V [m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost ρ [kg·m <sup>-3</sup> ]	Síla F [kN]	Hranolová pevnost f <sub>c,cube</sub> [MPa]		
	od	do	a [mm]	b [mm]	c [mm]							
Hranol 1	7.10.2014	14.11.2014	98,8	100,4	400,2	8,7897	0,003970	2214,15	372,6	37,56		
Hranol 2	7.10.2014	14.11.2014	99,3	100,2	400,3	8,8164	0,003983	2213,55	380,9	38,28		

Výsledky měření a zkoušek ocelových prutů - $\phi 6$ mm							
Vzorek	Hmotnost m [g]	Délka l [mm]	Plocha As [mm <sup>2</sup> ]	Základna l0 [mm]	Mez kluzu fy [MPa]	Mez pevnosti fu [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
Prut 1	128,8	561,0	29,25	224,0	518,0	635,6	199,7
Prut 2	126,2	556,0	28,91	229,0	529,0	635,8	201,1
Prut 3	125,8	555,0	28,87	226,0	513,0	620,0	200,3
					520,00	630,47	200,37

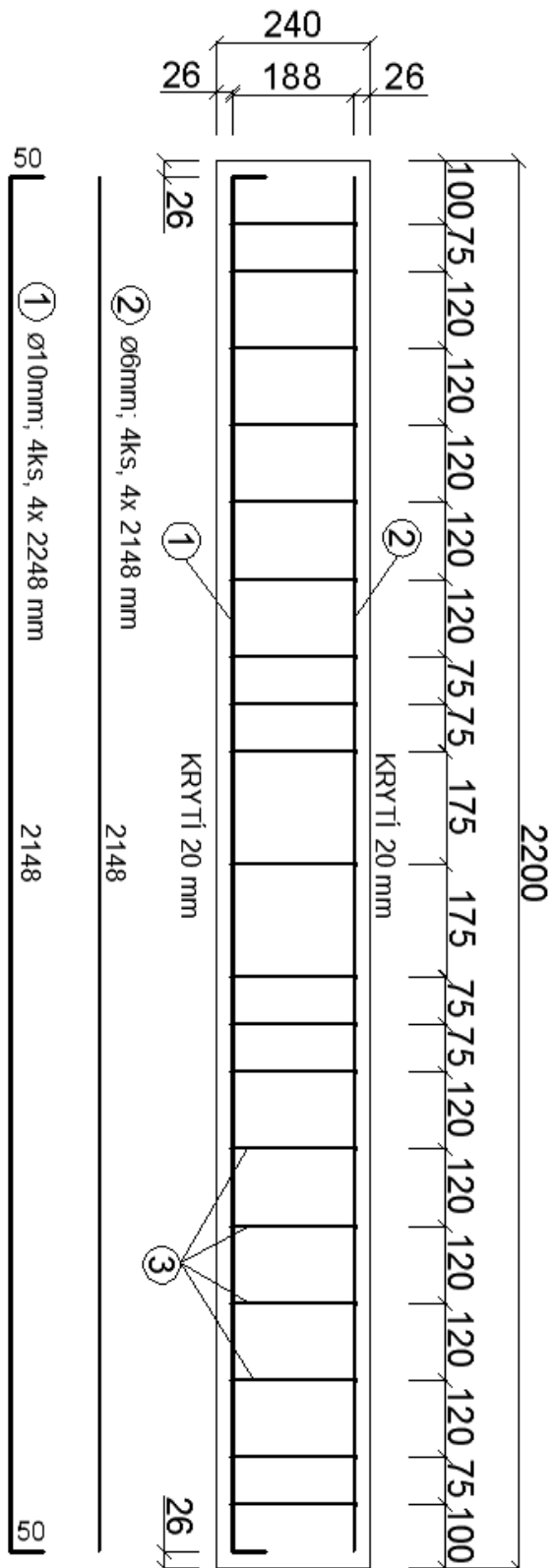
Výsledky měření a zkoušek ocelových prutů - $\phi 10$ mm							
Vzorek	Hmotnost m [g]	Délka l [mm]	Plocha As [mm <sup>2</sup> ]	Základna l0 [mm]	Mez kluzu fy [MPa]	Mez pevnosti fu [MPa]	Modul pružnosti E [GPa]
Prut 1	349,9	570,0	78,20	228,0	613,4	712,8	194,1
Prut 2	347,9	566,0	78,30	228,0	619,8	717,9	197,6
Prut 3	345,4	567,0	77,60	227,0	609,0	708,1	202,4
					614,07	712,93	198,03



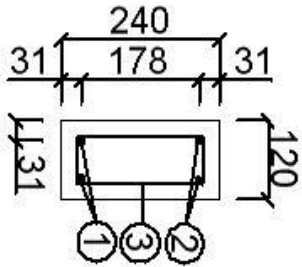


**Příloha č. 2**  
**Výkresová dokumentace**

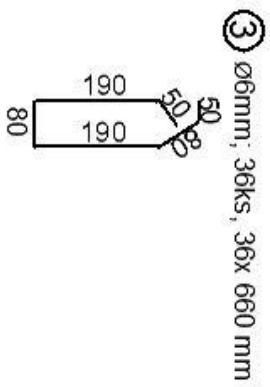
VÝKRES REÁLNÉHO PROVEDENÍ PRVKU  
 PODÉLNÝ ŘEZ:



PŘÍČNÝ ŘEZ:



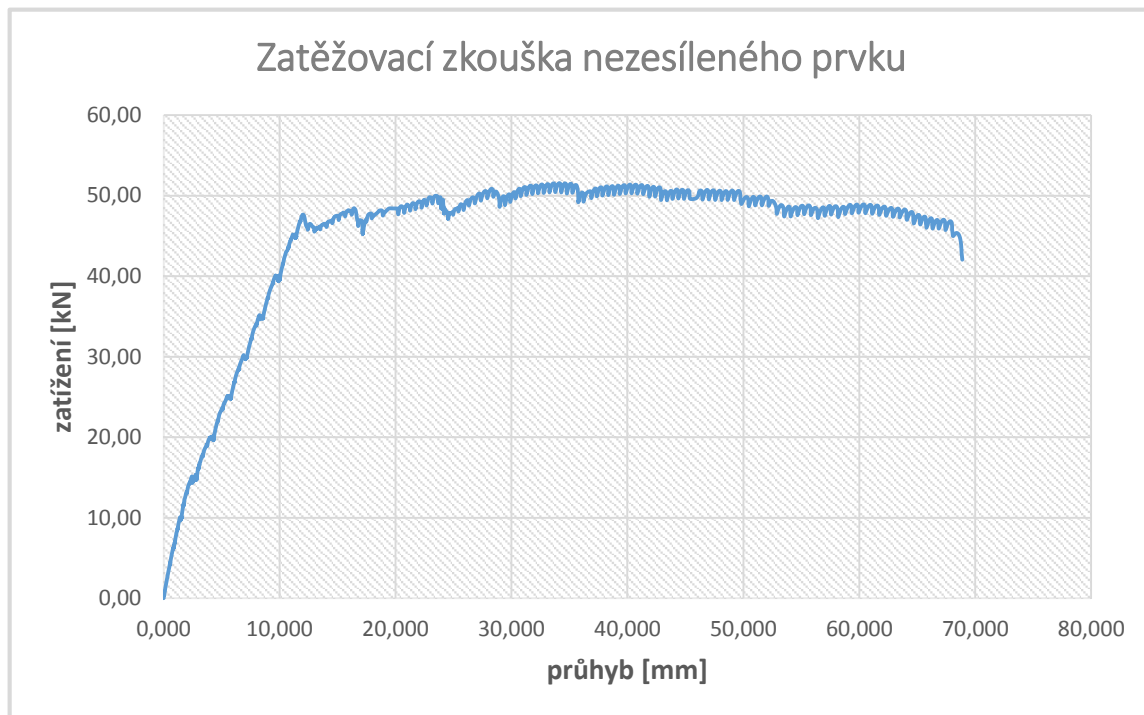
TŘMIŇEK:



BETON C25/30  
 OCEL B 500B  
 TŘÍDA VLIVU PROSTŘEDÍ X0

**Příloha č. 3**  
**Vyhodnocení experimentální analýzy**

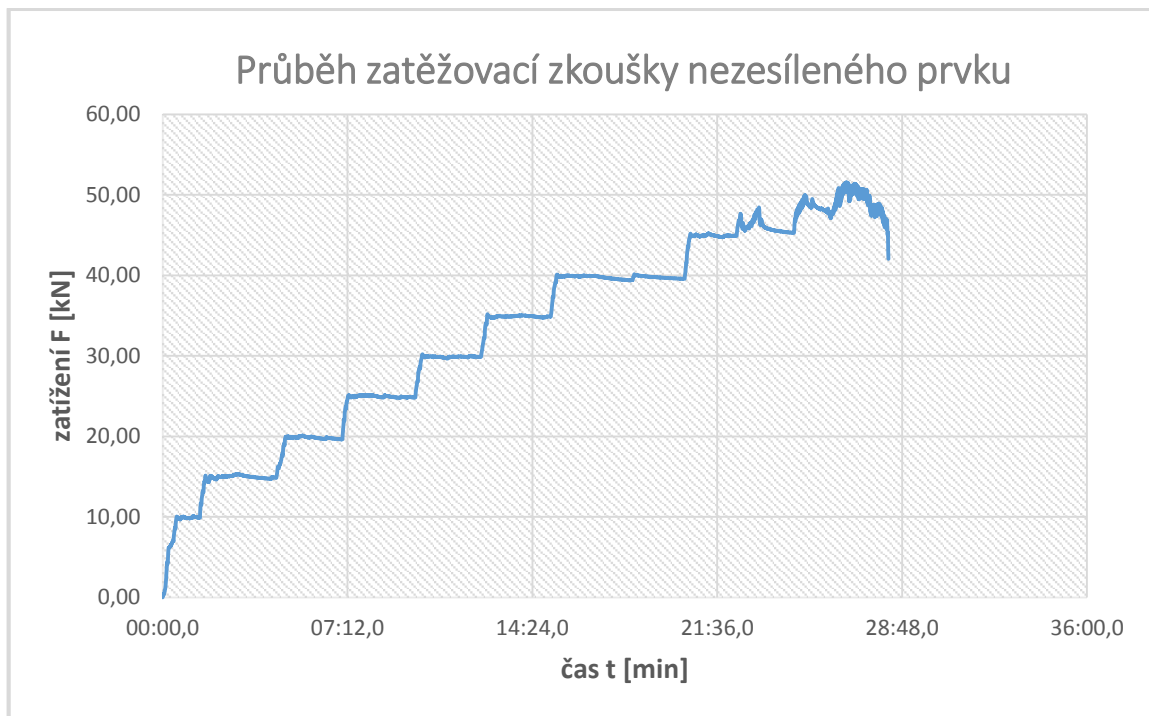
## 1. Grafy zatěžovací zkoušky nezesíleného prvku



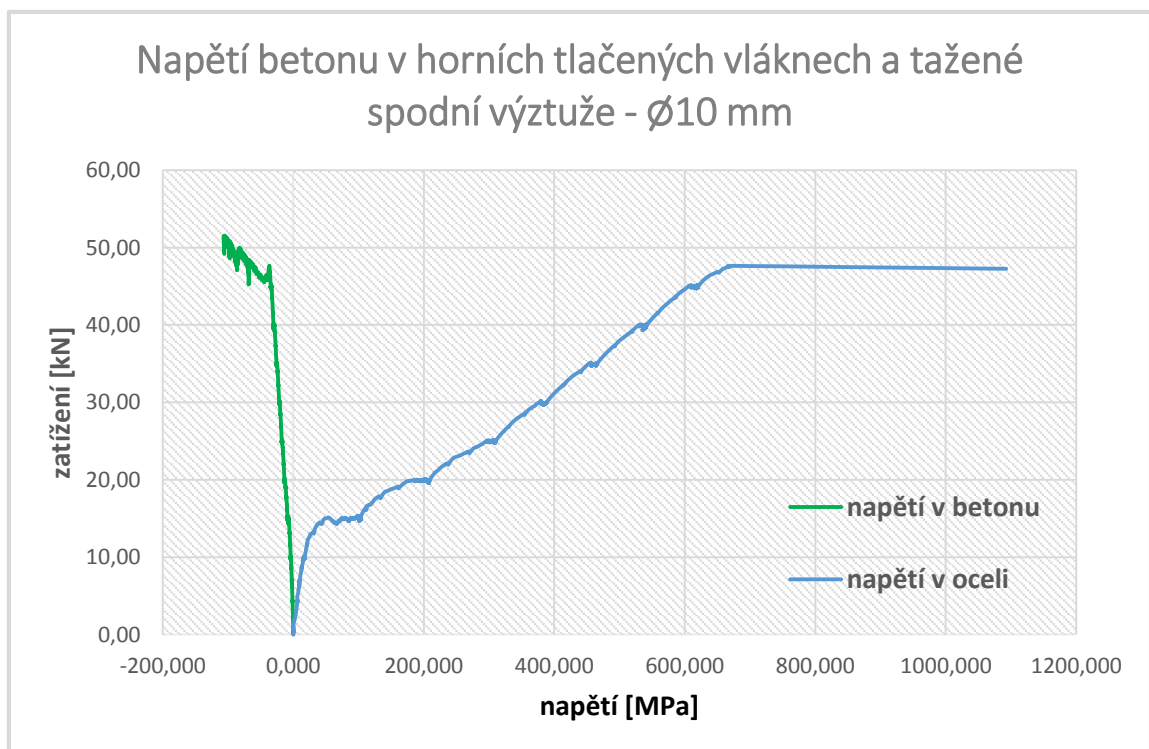
Graf. 1.1 Zkouška nezesíleného zkušebního prvku

### Graf zatížení a průhybu nosníku:

1. Graf zatěžovací zkoušky je po vznik prvních trhlin lineární a nejsou zde vidět stopy po přestávkách mezi zatěžováním, což je vidět níže v grafu (*Graf. 1.2 Průběh zatěžovací zkoušky nezesíleného prvku*)
2. Následně graf roste po mez maximálního zatížení, kde jsou vidět nepatrné následky postupného zatěžování, díky kterému je křivka schodovitě rozdělena. Prvek při zatěžování nevykazoval žádné jiné poruchy než trhliny, které způsobilo zatěžování.
3. Po maximálním zatížení prvku, byl prvek bez přerušování dále zatěžován do úplného kolapsu, kde se zatěžovací síla na nosník pohybovala na hranici maximálního zatížení.

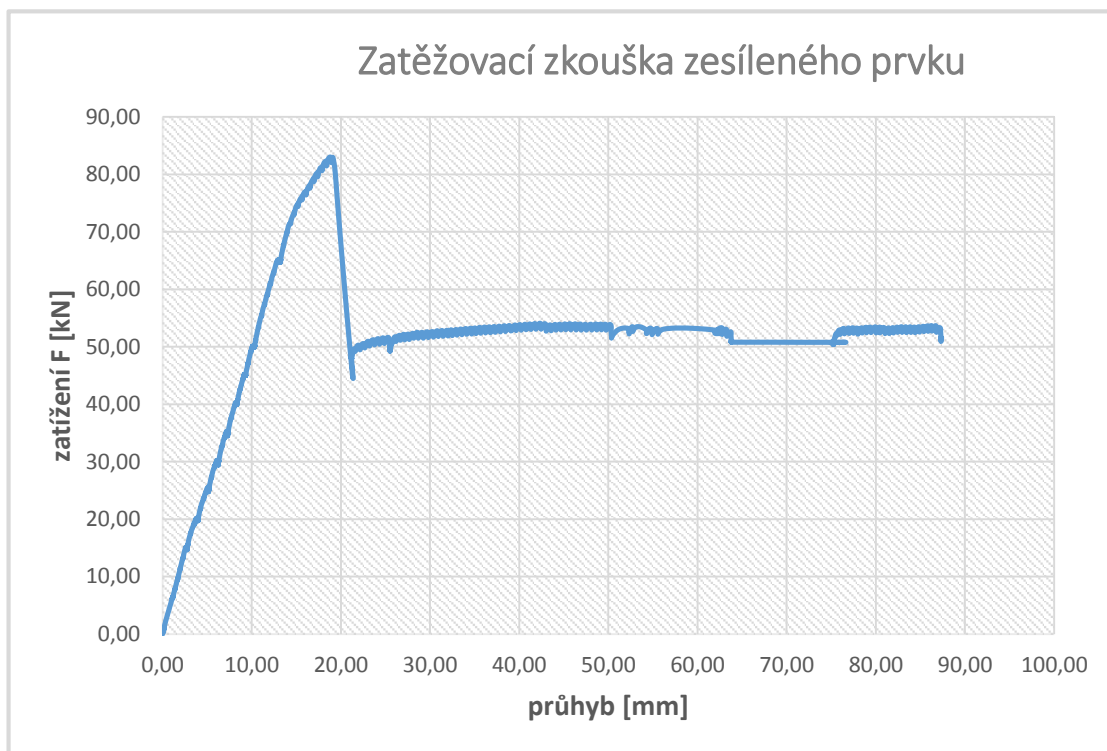


Graf. 1.2 Průběh zatěžovací zkoušky nezesíleného prvku



Graf. 1.3 Napětí v horním tlačném betonu a tažené výztuži

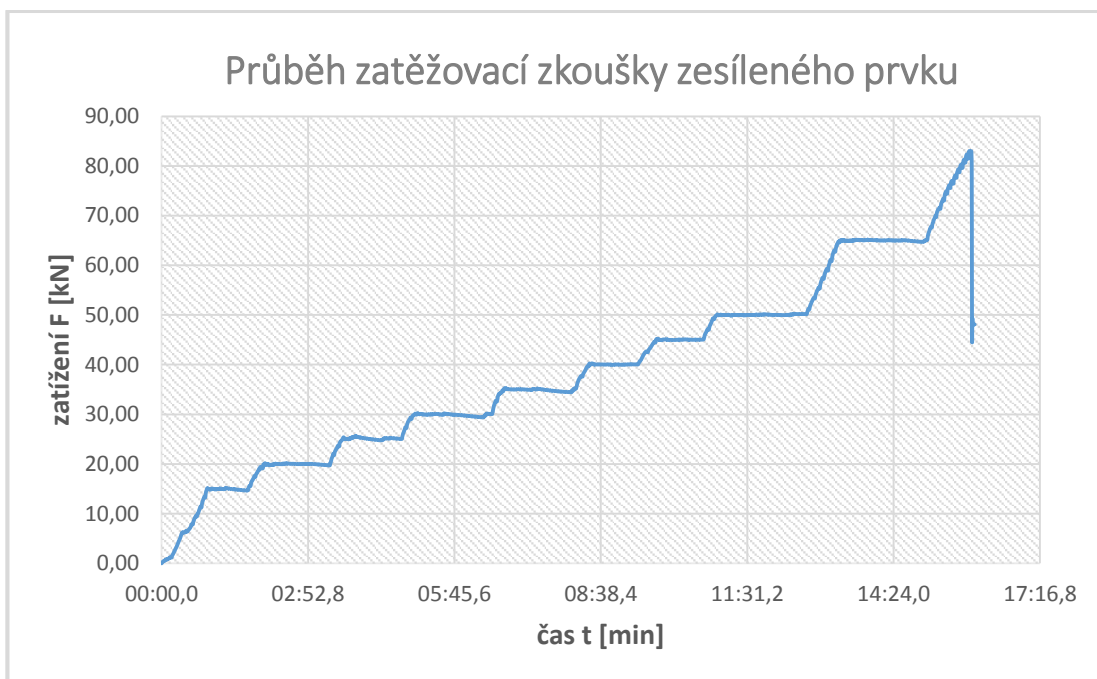
## 2. Grafy zatěžovací zkoušky zesíleného prvku



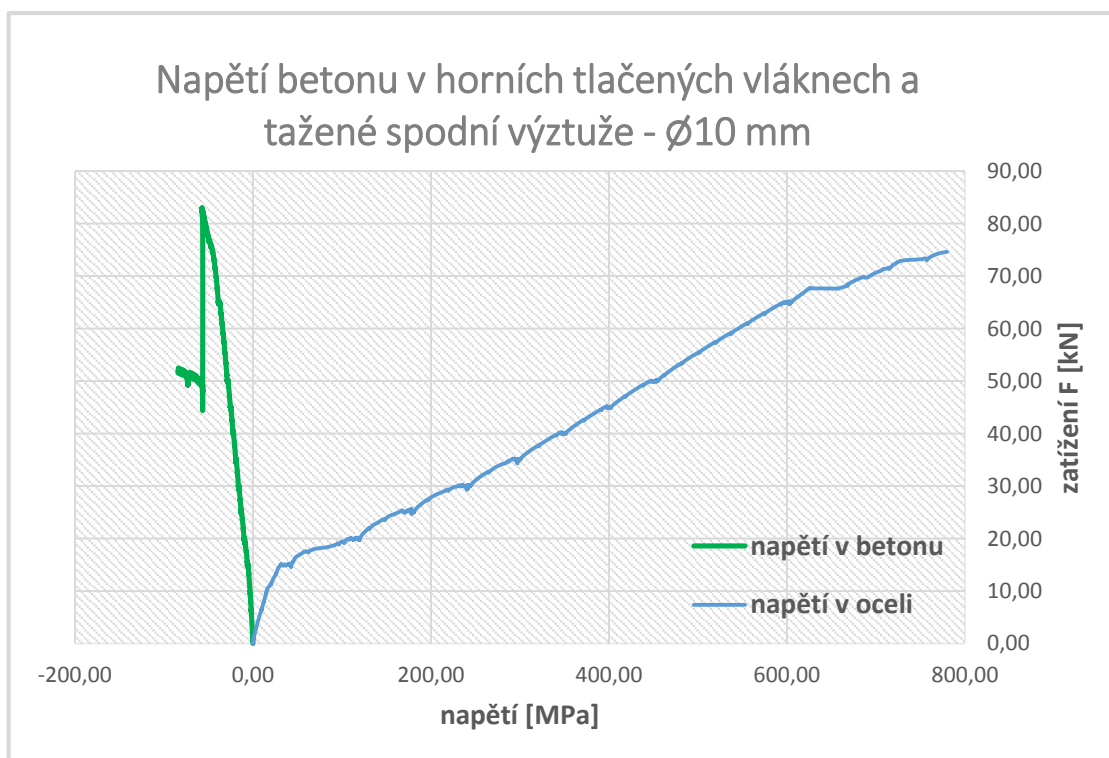
Graf. 2.1 Zkouška zesíleného zkušebního prvku

### Graf zatížení a průhybu nosníku:

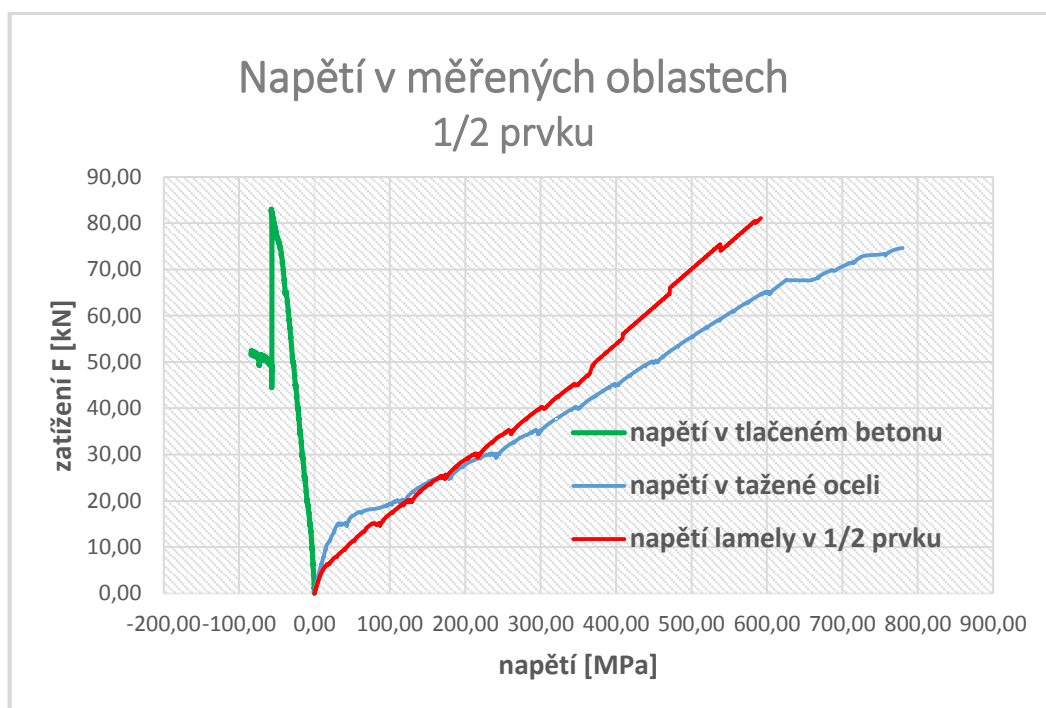
1. Graf zatěžovací zkoušky je po vznik prvních trhlin lineární a nejsou zde vidět stopy po přestávkách mezi zatěžováním, stejně jako je vidět u nezesíleného prvku.
2. Od vzniku prvních trhlin graf dále roste po maximální zatížení, které je způsobeno odtržením externího vyztužení uhlíkovou lamelou. Zde jsou také vidět nepatrné následky postupného zatěžování.
3. Po dosažení maximálního zatížení na prvek spadla zatěžovací síla na mez, kterou přenášela pouze vnitřní výztuž nosníku.
4. Dále byl prvek zatěžován do úplného kolapsu, kde se zatěžovací síla na nosník pohybovala na hranici maximálního zatížení nezesíleného prvku.



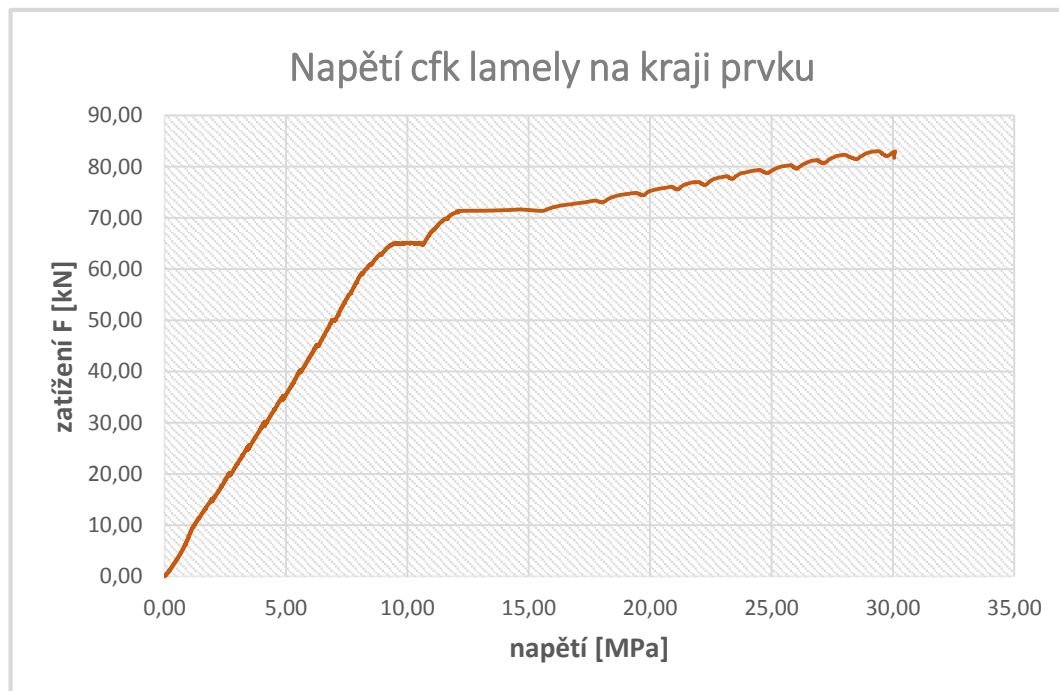
Graf. 2.2 Průběh zatěžovací zkoušky zesíleného prvku



Graf. 2.3 Napětí v horním tlačném betonu a tažené výztuži



Graf. 2.4 Napětí v 1/2 prvku



Graf. 2.5 Napětí lamely na kraji prvku

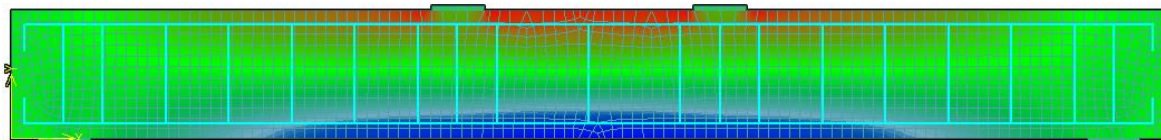


**Příloha č. 4**  
**Vyhodnocení numerické analýzy**

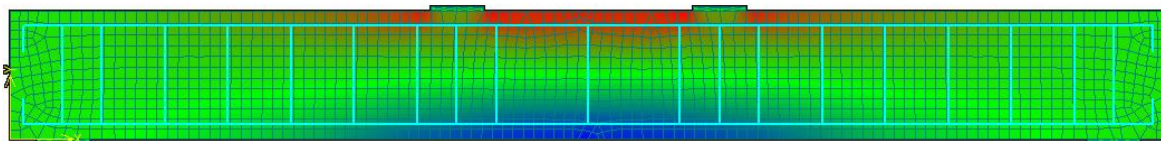
## 1. Numerická analýza – ATENA 2D

### Výstup analýzy nezesíleného prvku

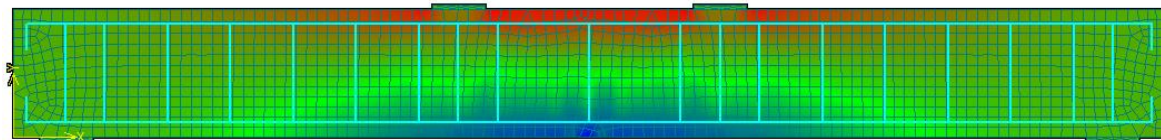
1. zatěžovací krok - napětí od vlastní tíhy



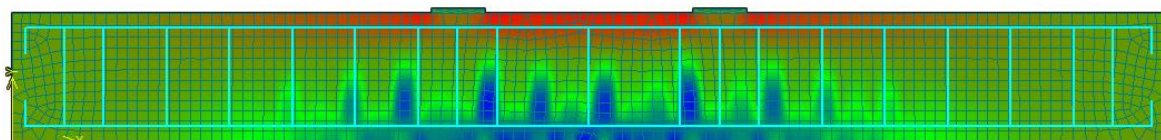
10. zatěžovací krok



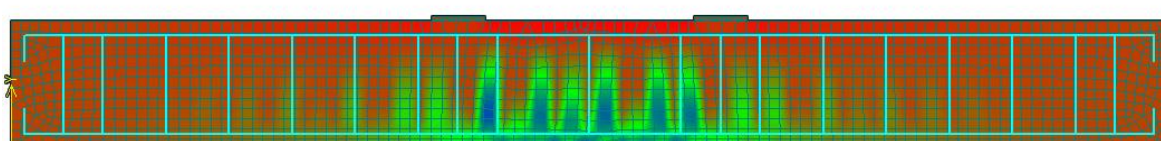
20. zatěžovací krok



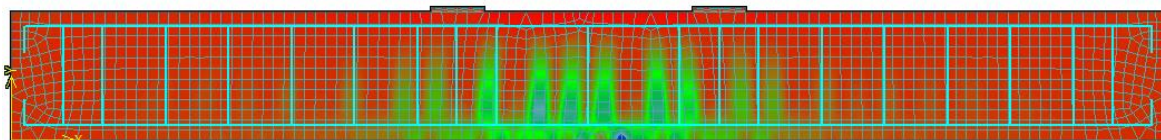
30. zatěžovací krok



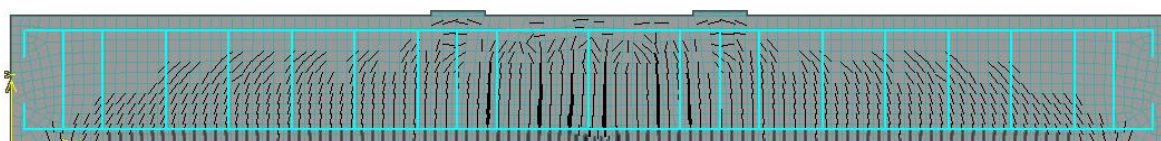
40. zatěžovací krok



48. zatěžovací krok - napětí v betonu při maximálním zatížení prvku

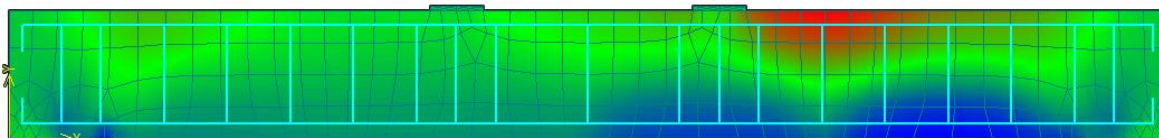


Trhliny v betonu při maximálním zatížení

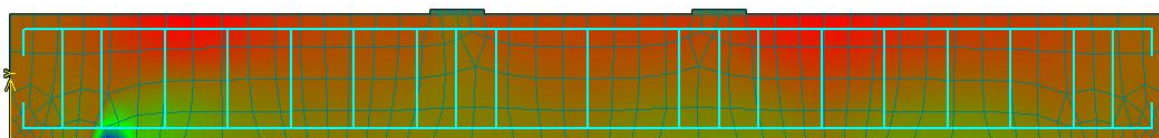


## Výstup analýzy zesíleného prvku

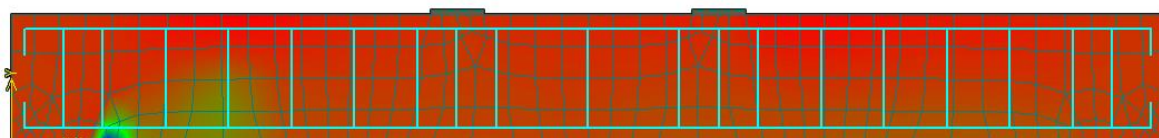
### 1. zatěžovací krok - napětí od vlastní tíhy



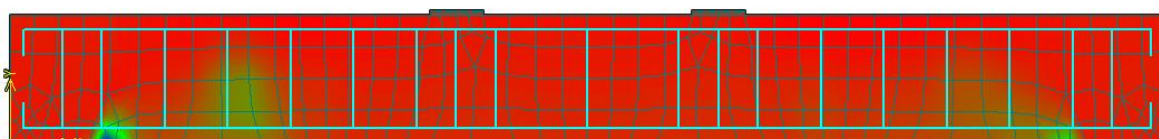
### 10. zatěžovací krok



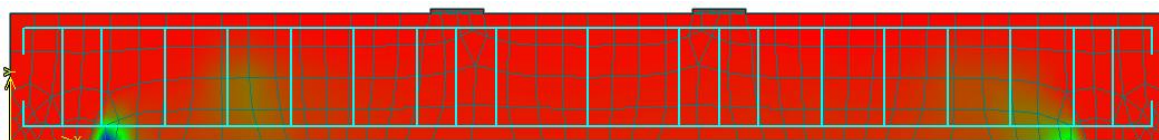
### 20. zatěžovací krok



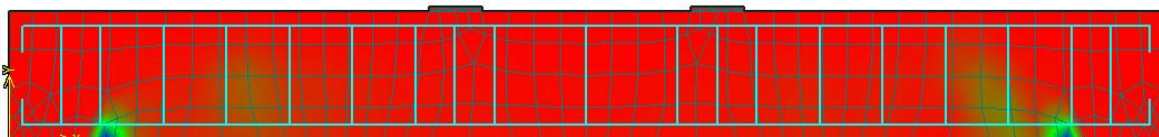
### 30. zatěžovací krok



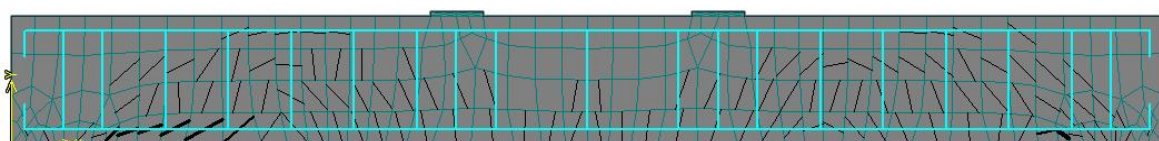
### 40. zatěžovací krok



### 55. zatěžovací krok - napětí v betonu při maximálním zatížení prvku



### Trhliny v betonu při maximálním zatížení



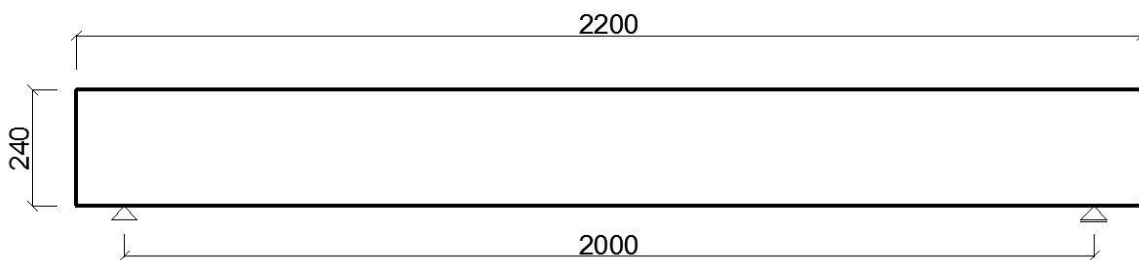
## 2. Numerická analýza - statický výpočet

### Předběžný návrh

Použití betonu: C25/30

Betonářská ocel: B 500 B

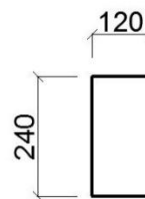
### Geometrie prvku



Délka prvku  $l = 2200 \text{ mm}$

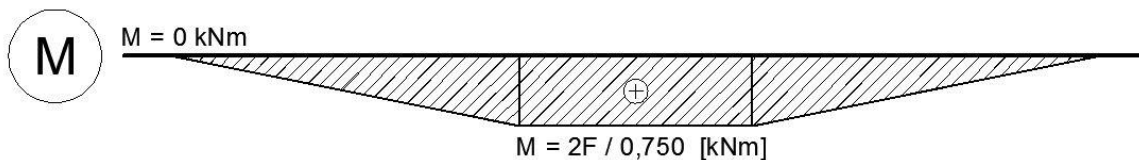
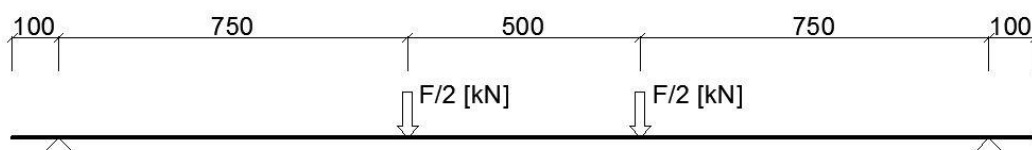
Výška průřezu  $h = 240 \text{ mm}$

Šířka průřezu  $b = 120 \text{ mm}$



### Statické schéma

Vzdálenost podpor  $l_0 = 2000 \text{ mm}$



Moment v  $l/2$   $M = 2F/0,750 \text{ [kNm]}$

## Výpočet únosnosti nezesíleného prvku s normovými parametry

### Materiálové charakteristiky

Beton C25/30

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$$

$$\gamma_f = 1,5$$

$$f_{cd} = f_{ck} / \gamma_f = 25 / 1,5 = 16,66 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 31 \text{ GPa}$$

Betonářská ocel B 500 B

$$f_y = 500 \text{ MPa}$$

$$\gamma_f = 1,15$$

$$f_{yd} = f_y / \gamma_f = 500 / 1,15 = 434,78 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200 \text{ GPa}$$

Uhlíková lamela C25/30

$$f_{y(\text{lamela})} = 3000 \text{ MPa}$$

$$\gamma_f = 1,15$$

$$f_y = f_{y(\text{lamela})} / \gamma_f = 3000 / 1,15 = 2608,70 \text{ MPa}$$

$$E_{cm1} = 165 \text{ GPa}$$

### Krytí:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm} \}$$

$$c_{min,b} = \phi_{st} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,\gamma} = \Delta c_{dur,st} = \Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$$

$$c_{min} = \max \{ 10 \text{ mm}; 10 \text{ mm}; 10 \text{ mm} \}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = 10 + 10 = 20 \text{ mm}$$

návrh krytí  $c = 20 \text{ mm} \geq c_{nom} = 20 \text{ mm}$



### Průřezové charakteristiky

$$c = 20 \text{ mm}$$

$$d_1 = c + \phi_{\text{tr}} + \phi_{\text{st}}/2 = 20 + 6 + 10/2 = 31 \text{ mm}$$

$$d = h - d_1 = 240 - 31 = 209 \text{ mm}$$

$$A_{\text{st}} = \pi \cdot \phi_{\text{st}}^2/4 \cdot n_{\text{st}} = \pi \cdot 10^2/4 \cdot 2 = 157,08 \text{ mm}^2$$

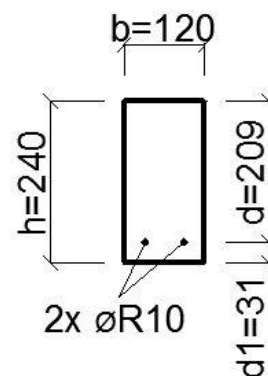
$$A_{\text{min}} = 0,26 \cdot f_{\text{ctm}}/f_{\text{yk}} \cdot b \cdot h \leq 0,0013 \cdot b \cdot d$$

$$A_{\text{min}} = 0,26 \cdot 2,6/500 \cdot 120 \cdot 240 \leq 0,0013 \cdot 120 \cdot 209$$

$$A_{\text{min}} = 38,94 \text{ mm}^2 \geq 32,60 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{max}} = 0,04 \cdot A_c = 0,04 \cdot 120 \cdot 240 = 1152 \text{ mm}^2$$

$$A_{\text{max}} = 1152 \text{ mm}^2 \geq A_{\text{st}} = 157,08 \text{ mm}^2 \geq A_{\text{min}} = 38,94 \text{ mm}^2 \rightarrow \text{vyhovuje}$$



### Výpočet únosnosti prvků

Výška tlačené oblasti betonu

$$x = \frac{A_{\text{st}} \cdot f_{\text{yd}}}{b \cdot \lambda \cdot f_{\text{cd}}} = \frac{157,08 \cdot 434,78}{120 \cdot 0,8 \cdot 16,66} = 42,70 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil

$$z = d - 0,4 x = 209 - 0,4 \cdot 42,70 = 191,92 \text{ mm}$$

### Momentová únosnost nezesíleného prvku dle EC s výpočtovými hodnotami

$$M_{\text{Rd}} = A_{\text{st}} \cdot f_{\text{yd}} \cdot z = 157,08 \cdot 10^{-6} \cdot 434,78 \cdot 10^6 \cdot 191,92 \cdot 10^{-3} = 11347 \text{ Nm} = \underline{\underline{13,10 \text{ kNm}}}$$

$$F_{\text{Rd}} = 2 \cdot M/0,750 = 2 \cdot 13,10/0,750 = \underline{\underline{34,93 \text{ kN}}}$$

## Výpočet únosnosti zesíleného prvku s normovými parametry

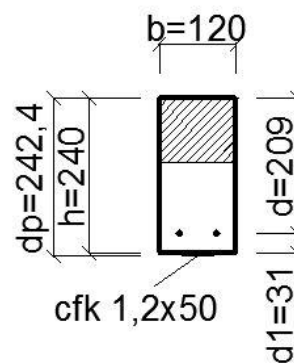
### Průřezové charakteristiky

$$d = 209 \text{ mm}$$

$$d_p = 242,4 \text{ mm}$$

2xR10:

$$A_{st} = \pi \cdot \phi_{st}^2 / 4 \cdot n_{st} = \pi \cdot 10^2 / 4 \cdot 2 = 157,08 \text{ mm}^2$$



plocha externího vyztužení uhlíkovou lamelou (cfk 50x1,2):

$$A_{sp} = a \cdot b = 50 \cdot 1,2 = 60,0 \text{ mm}^2$$

### Výpočet únosnosti prvků

Výška tlačené oblasti betonu

$$N_{Ed} = F_{cc} - F_{st} - F_{sp}$$

$$0 = A_c \cdot f_{cd} - A_{st} \cdot f_{yd} - A_{sp} \cdot f_{ydp}$$

$$x = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} + A_{sp} \cdot f_{ydp}}{b \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{157,08 \cdot 434,78 + 60 \cdot 2608,70}{120 \cdot 0,8 \cdot 16,66} = 140,57 \text{ mm}$$

Ramena vnitřních sil

$$z_s = d - 0,4x = 209 - 0,4 \cdot 140,57 = 152,77 \text{ mm}$$

$$z_p = d_p - 0,4x = 242,4 - 0,4 \cdot 140,57 = 186,17 \text{ mm}$$

### Momentová únosnost zesíleného prvku dle EC s výpočtovými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z_s + A_{sp} \cdot f_{ydp} \cdot z_p$$

$$= 157,08 \cdot 434,78 \cdot 152,77 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 2608,70 \cdot 186,17 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{39,57 \text{ kNm}}}$$

$$F_{Rd} = 2 \cdot M / 0,750 = 2 \cdot 39,57 / 0,750 = \underline{\underline{105,52 \text{ kN}}}$$

## Výpočet průhybu nezesíleného prvku s normovými parametry

### Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu bez zesílení

Plocha betonu  $A_c = h \cdot b = 240 \cdot 120 = 28\,800 \text{ mm}^2$

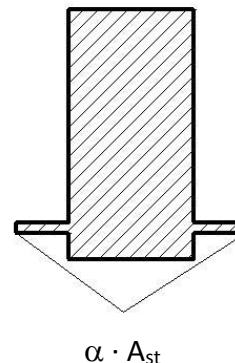
Plocha výztuže  $A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2$

Poměr modulů pružnosti  $\alpha_s = E_s/E_c = 200/31 = 6,45$

Plocha id. průřezu  $A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st}$

$$A_i = 28800 + 6,45 \cdot 157,08$$

$$A_i = 29813,17 \text{ mm}^2$$



Statický moment id. pr.  $S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d$

$$S_i = 28800 \cdot 240/2 + 6,45 \cdot 157,08 \cdot 209$$

$$S_i = 3,668 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu  $x_i = S_i/A_i$

$$x_i = 3,668 \cdot 10^6 / 29813,17$$

$$x_i = 123,02 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti id. pr.  $I_i = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot (h/2 - x_i)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$

$$I_i = 1/12 \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot (240/2 - 123,02)^2 + 6,45 \cdot$$

$$157,08 \cdot (209 - 123,02)^2$$

$$I_i = 1,4599 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 = 1,4599 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

### Výpočet momentu na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_i}{h - x_i}$$

$$M_{cr} = \frac{2,6 \cdot 1,4599 \cdot 10^{-4}}{240 - 123,02} = 3,24 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 2 \cdot M/0,750 = 2 \cdot 3,24/0,750 = 8,64 \text{ kN}$$



### Výpočet průhybu pro plně působící průřez

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$
$$w = \frac{8,64 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 31 \cdot 10^6 \cdot 1,4599 \cdot 10^{-4}} = \mathbf{0,581mm}$$

### Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

Výška tlačené části průřezu

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d}{b}}$$
$$x = -\frac{6,45 \cdot 157,08}{120} + \sqrt{\left(\frac{6,45 \cdot 157,08}{120}\right)^2 + 2 \frac{6,45 \cdot 157,08 \cdot 209}{120}}$$
$$x = 51,56 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti pr.

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} b x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2$$
$$I = \frac{1}{3} 120 \cdot 51,56^3 + 6,45 \cdot 157,08 \cdot (209 - 51,56)^2$$
$$I = 3,0596 \cdot 10^{+7} \text{ mm}^4 = 3,0596 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

### Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$
$$w = \frac{34,93 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,3^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 31 \cdot 10^6 \cdot 3,0596 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{11,22 \text{ mm}}$$

## Výpočet průhybu zesíleného prvku s normovými parametry

### Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu se zesílením

Plocha zesílení  $A_p = 60,0 \text{ mm}^2$

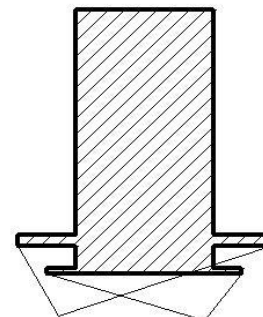
Poměr modulů pružnosti  $\alpha_p = E_s/E_c = 165/31 = 5,323$

Plocha id. průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p$$

$$A_i = 28800 + 6,45 \cdot 157,08 + 5,323 \cdot 60$$

$$A_i = 30123,55 \text{ mm}^2$$



$$\alpha \cdot A_{st} \quad \alpha \cdot A_p$$

Statický moment id. pr.

$$S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_p \cdot A_p \cdot d_p$$

$$S_i = 28800 \cdot 240/2 + 6,45 \cdot 157,08 \cdot 209 + 5,323 \cdot 60 \cdot 242,4$$

$$S_i = 3,745 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu  $x_i = S_i/A_i$

$$x_i = 3,745 \cdot 10^6 / 30123,55$$

$$x_i = 124,32 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti id. pr.  $I_i = 1/12 \cdot bh^3 + bh \cdot (h/2 - x_i)^2 + \alpha_s A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_p A_p \cdot (d_p - x_i)^2$

$$I_i = 1/12 \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot (240/2 - 124,32)^2 + 6,45 \cdot$$

$$\cdot 157,08 \cdot (209 - 124,32)^2 + 5,323 \cdot 60 \cdot (242,4 - 124,32)^2$$

$$I_i = 1,5049 \cdot 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5049 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$$

### Výpočet momentu na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_i}{h - x_i}$$

$$M_{cr} = \frac{2,6 \cdot 1,5049 \cdot 10^{-4}}{240 - 124,32} = 3,38 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 2 \cdot M/0,750 = 2 \cdot 3,38/0,750 = 9,01 \text{ kN}$$

### Výpočet průhybu pro plně působící průřez

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

$$w = \frac{9,01 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 31 \cdot 10^6 \cdot 1,5049 \cdot 10^{-4}} = \mathbf{0,589mm}$$

### Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

Výška tlačené části průřezu

$$x_{i,r} = - \frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p}{b}\right)^2 + 2 \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_p \cdot A_p \cdot d_p}{b}}$$

$$x = - \frac{6,45 \cdot 157,08 + 5,323 \cdot 60}{120} +$$

$$+ \sqrt{\left(\frac{6,45 \cdot 157,08 + 5,323 \cdot 60}{120}\right)^2 + 2 \frac{6,45 \cdot 157,08 \cdot 209 + 5,323 \cdot 60 \cdot 242,4}{120}}$$

$$x = 59,20 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti pr.

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} b x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 + \alpha_p \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i,r})^2$$

$$I = \frac{1}{3} 120 \cdot 59,20^3 + 6,45 \cdot 157,08 \cdot (209 - 59,20)^2$$

$$+ 5,323 \cdot 60 \cdot (242,4 - 59,20)^2$$

$$I = 4,1753 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 4,1753 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

### Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

$$w = \frac{105,52 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 31 \cdot 10^6 \cdot 4,1753 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{24,83 \text{ mm}}$$

## Výpočet únosnosti nezesíleného prvku s reálnými parametry

### Materiálové charakteristiky:

Beton

$$f_{ck,cube} = 43,19 \text{ MPa}$$

$$E_{cm} = 27,53 \text{ GPa}$$

Betonářská ocel

$$f_y = 614,07 \text{ MPa}$$

$$E_s = 198,03 \text{ GPa}$$

Uhlíková lamela

$$f_{y(lamela)} = 3000 \text{ MPa}$$

$$E_{cm1} = 165 \text{ GPa}$$

### Výpočet únosnosti prvků

Výška tlačené oblasti betonu

$$x = \frac{A_{st} \cdot f_y}{b \cdot \lambda \cdot f_c} = \frac{157,08 \cdot 614,07}{120 \cdot 0,8 \cdot 43,19} = 23,26 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil

$$z = d - 0,4 x = 209 - 0,4 \cdot 23,26 = 199,70 \text{ mm}$$

### Momentová únosnost nezesíleného prvku dle EC s reálnými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z = 157,08 \cdot 10^{-6} \cdot 614,07 \cdot 10^6 \cdot 199,70 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{19,26 \text{ kNm}}}$$

$$F_{Rd} = 2 \cdot M / 0,750 = 2 \cdot 19,26 / 0,775 = \underline{\underline{51,36 \text{ kN}}}$$

## Výpočet únosnosti zesíleného prvku s reálnými parametry

### Výpočet únosnosti prvků

Výška tlačené oblasti betonu

$$N_{Ed} = F_{cc} - F_{st} - F_{sp}$$

$$0 = A_c \cdot f_c - A_{st} \cdot f_y - A_{sp} \cdot f_{yp}$$

$$x = \frac{A_{st} \cdot f_y + A_{sp} \cdot f_{yp}}{b \cdot \lambda \cdot f_c} = \frac{157,08 \cdot 614,07 + 60 \cdot 3000}{120 \cdot 0,8 \cdot 43,19} = 66,68 \text{ mm}$$

Ramena vnitřních sil

$$z_s = d - 0,4x = 209 - 0,4 \cdot 66,68 = 182,33 \text{ mm}$$

$$z_p = d_p - 0,4x = 242,4 - 0,4 \cdot 66,68 = 215,73 \text{ mm}$$

### Moment. únosnost zesíleného prvku dle EC s reálnými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_y \cdot z + A_{sp} \cdot f_{yp} \cdot z_p$$

$$= 157,08 \cdot 614,07 \cdot 182,33 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 3000 \cdot 215,73 \cdot 10^{-6} = \underline{\underline{56,41 \text{ kNm}}}$$

$$F_{Rd} = 2 \cdot M / 0,750 = 2 \cdot 56,41 / 0,750 = \underline{\underline{150,42 \text{ kN}}}$$

## Výpočet průhybu nezesíleného prvku s reálnými parametry

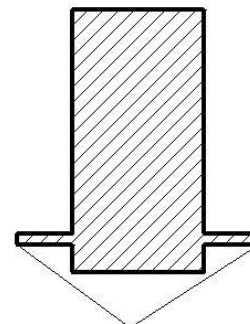
### Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu bez zesílení

Plocha betonu  $A_c = h \cdot b = 240 \cdot 120 = 28800 \text{ mm}^2$

Plocha výztuže  $A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2$

Poměr modulů  $\alpha_s = E_s/E_c = 198,03/27,53 = 7,193$

Plocha id. průřezu  $A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st}$   
 $A_i = 29929,9 \text{ mm}^2$



Statický moment id. pr.  $S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d$   
 $S_i = 3,692 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

Výška tlačené části průřezu  $x_i = S_i/A_i$   
 $x_i = 123,35 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti id. pr.  $I_i = 1/12 \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot (h/2 - x_i)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$   
 $I_i = 1,4685 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

### Výpočet momentu na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_i}{h - x_i}$$

$$M_{cr} = \frac{2,60 \cdot 1,4685 \cdot 10^{-4}}{240 - 123,35} = 3,27 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 2 \cdot M/0,750 = 2 \cdot \frac{3,27}{0,75} = 8,72 \text{ kN}$$

### Výpočet průhybu pro plně působící průřez

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

$$w = \frac{7,61 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,775 \cdot 2,3^2 - 4 \cdot 0,775^3)}{24 \cdot 25,7 \cdot 10^6 \cdot 1,3150 \cdot 10^{-4}} = 0,657 \text{ mm}$$

### **Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami**

Výška tlačené části průřezu

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d}{b}}$$

$$x = 54,02 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti pr.

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} b x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2$$

$$I = 3,3444 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

### **Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami**

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

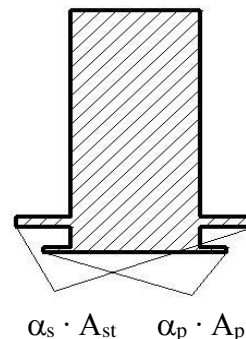
$$w = \frac{51,36 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 27,53 \cdot 10^6 \cdot 3,3444 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{16,996 \text{ mm}}$$

## Výpočet průhybu zesíleného prvku s reálnými parametry

### Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu se zesílením

Plocha zesílení  $A_p = 60,0 \text{ mm}^2$   
 Poměr modulů pružnosti  $\alpha_p = E_s/E_c = 165/27,53 = 5,993$

Plocha id. průřezu  $A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p$   
 $A_{i2} = 30289 \text{ mm}^2$



Statický moment id. pr.  $S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_p \cdot A_p \cdot d_p$   
 $S_i = 3,7793 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

Výška tlačené části průřezu  $x_i = S_i/A_i$   
 $x_i = 124,77 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti id. pr.  $I_i = 1/12 \cdot b h^3 + b h \cdot (h/2 - x_i)^2 + \alpha_s A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_p A_p \cdot (d_p - x_i)^2$   
 $I_i = 1,5188 \cdot 10^{-4} \text{ m}^4$

### Výpočet momentu na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{2,6 \cdot 1,5188 \cdot 10^{-4}}{240 - 124,77} = 3,43 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 2 \cdot M/0,750 = 2 \cdot 3,66/0,750 = 9,15 \text{ kN}$$

### Výpočet průhybu pro plně působící průřez

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

$$w_2 = \frac{9,15 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 27,53 \cdot 10^6 \cdot 1,5188 \cdot 10^{-4}} = 0,667 \text{ mm}$$



### **Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami**

Výška tlačené části průřezu

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_p \cdot A_p}{b}\right)^2 + 2 \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_p \cdot A_p \cdot d_p}{b}}$$

$$x_{,r} = 62,04 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti pr.

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} b x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 + \alpha_p \cdot A_p \cdot (d_p - x_{i,r})^2$$

$$I = 4,5650 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

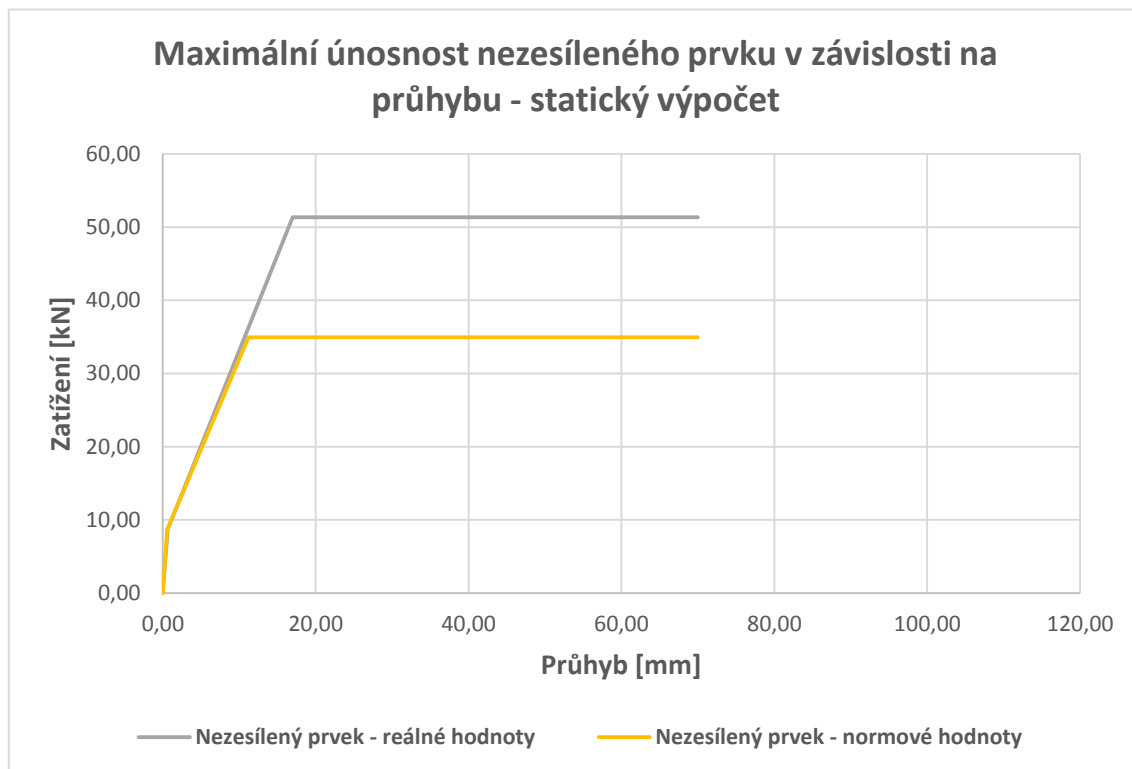
### **Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami**

$$w_i = \frac{F \cdot (3 \cdot a \cdot l^2 - 4 \cdot a^3)}{24 \cdot E \cdot I_i}$$

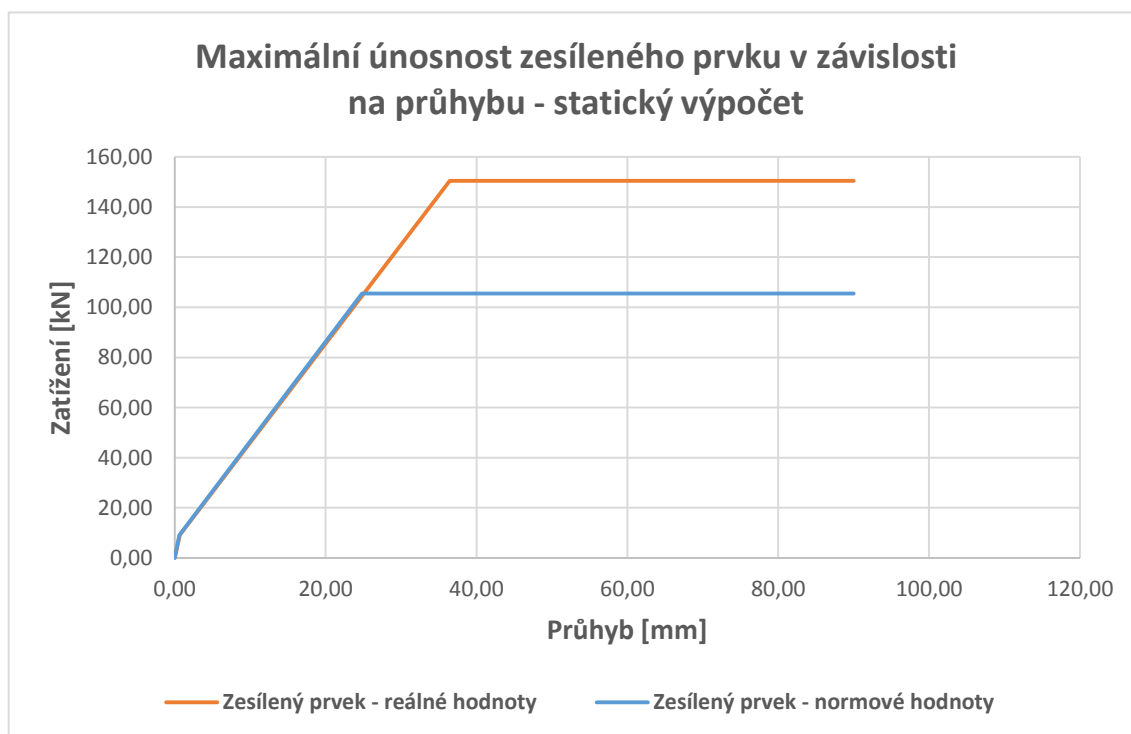
$$w = \frac{150,42 \cdot 10^3 \cdot (3 \cdot 0,750 \cdot 2,0^2 - 4 \cdot 0,750^3)}{24 \cdot 27,53 \cdot 10^6 \cdot 4,5650 \cdot 10^{-5}} = \mathbf{36,468 \text{ mm}}$$

## Výsledky statického výpočtu:

### Nezesílený prvek:



### Zesílený prvek:



**Příloha č. 5**  
**Fotodokumentace**

## 1. Doprovodné zkoušky



*Obr. 1.1 Zkouška pevnosti tlaku betonu*



*Obr. 1.2 Laboratorní lis, zkouška krychelné pevnosti v tlaku*



*Obr. 1.3 Zkouška hranolové pevnosti betonu v tlaku*



*Obr. 1.4 Zkouška hranolové pevnosti betonu*



*Obr. 1.5 Zkouška modulu pružnosti betonu*



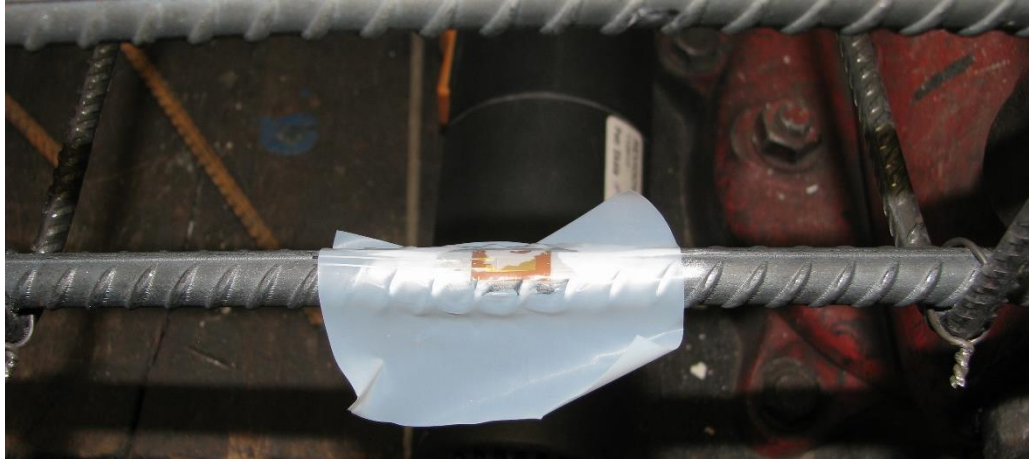


*Obr. 1.6 Zkouška oceli v tahu (výztuž  $\varnothing 6\text{mm}$ )*

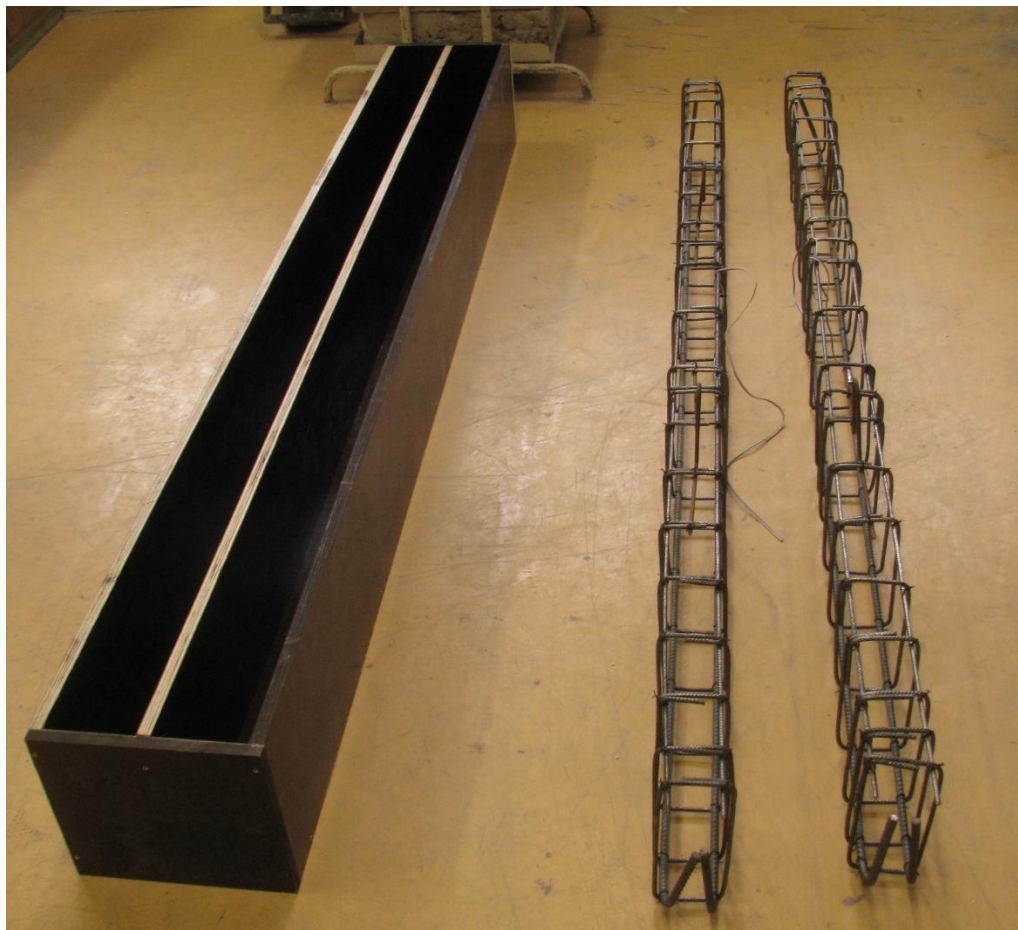


*Obr. 1.7 Přetržená zkoušená výztuž*

## 2. Experimentální analýza



*Obr. 2.1 Lepení odporového tenzometru na taženou výztuž*



*Obr. 2.2 Bedně pro zkušební tělesa, armokoše*





*Obr. 2.3 Odporový tenzometr, distančníky*



*Obr. 2.4 Příprava držáků pro přesun ŽB nosníků*





*Obr. 2.5 Příprava čerstvé betonové směsi*



*Obr. 2.6 Zavibrování čerstvé betonové směsi*





*Obr. 2.7 Betonáž zkušebních těles*



*Obr. 2.8 Zkušební tělesa připravená pro zrání*





*Obr. 2.9 Výpomoc při betonáži doprovodných těles*



*Obr. 2.10 Doprovodná tělesa*

## Experimentální analýza nezesíleného nosníku



*Obr. 2.11 Simulace pevné podpory*



*Obr. 2.12 Simulace posuvné podpory*

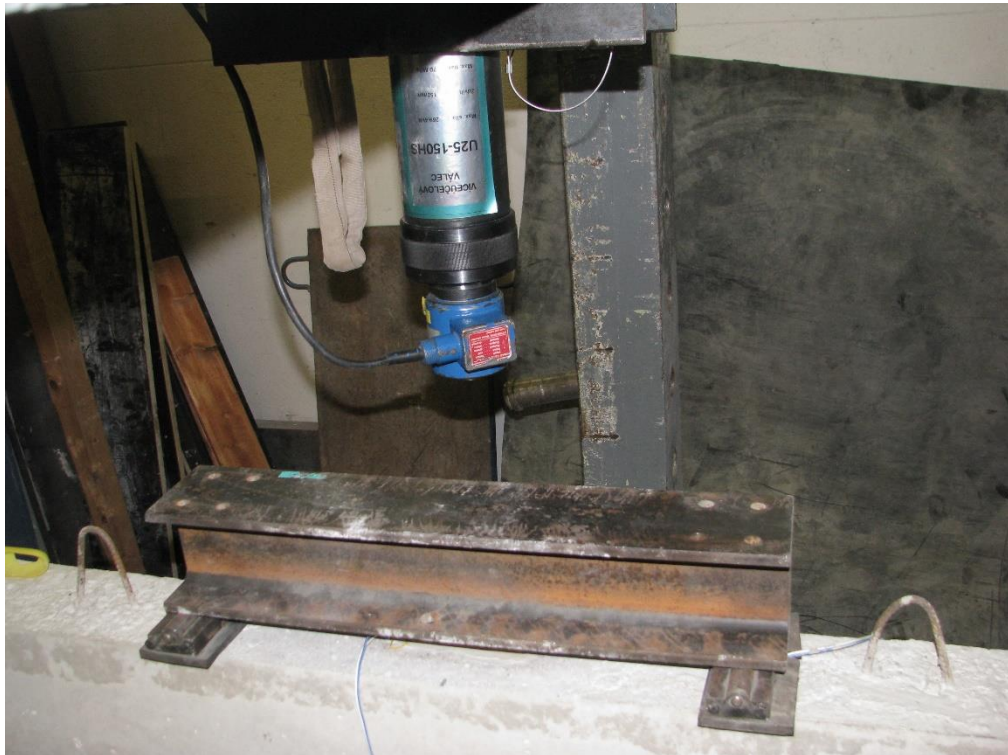


*Obr. 2.13 Odporový tenzometr*



*Obr. 2.14 Indukční snímač poklesu podpor*





*Obr. 2.15 Hydraulický píst pro experimentální zkoušku*



*Obr. 2.16 Nezesílené nosník připravený pro zkoušení*





*Obr. 2.17 První trhliny v tažené oblasti trámce*



*Obr. 2.18 Zakreslování trhlin při přerušovaném zatěžování*





*Obr. 2.19 Rozšiřování stávajících trhlin*



*Obr. 2.20 Průhyb po překročení maximálního zatížení*





*Obr. 2.21 Drcení betonu způsobené vybočením tlačené výztuže*



*Obr. 2.22 Odkrytá vybočená výztuž*



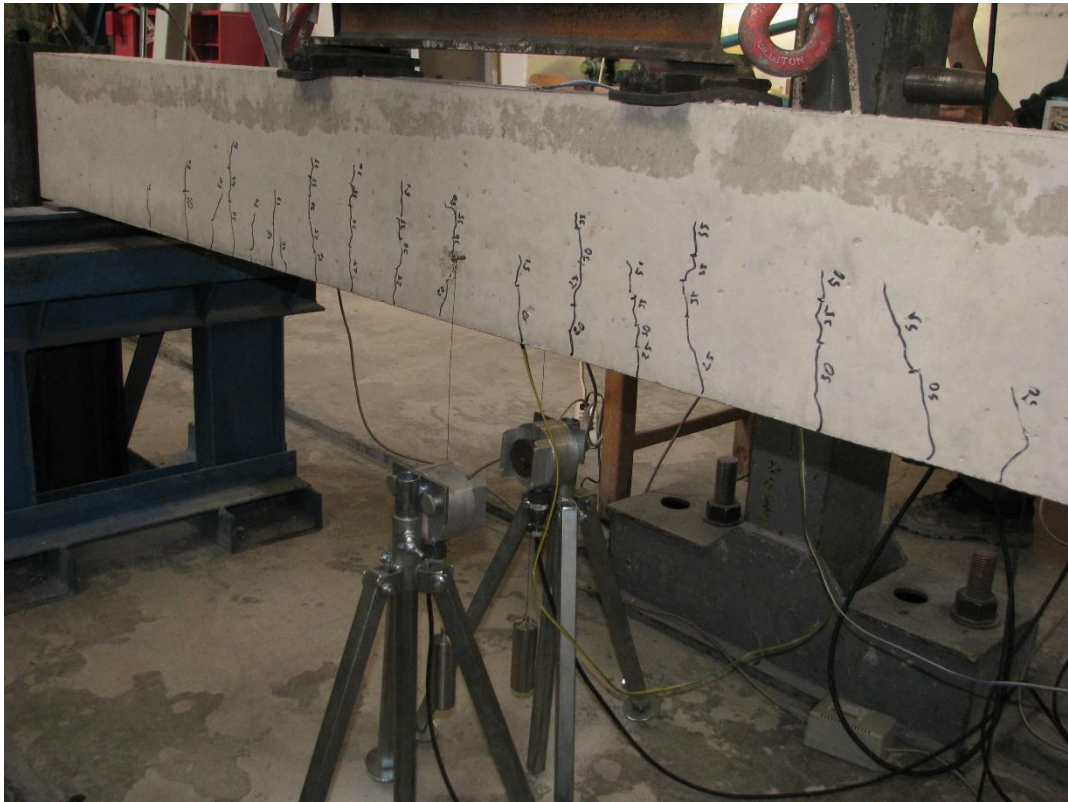
## Experimentální analýza zesíleného nosníku



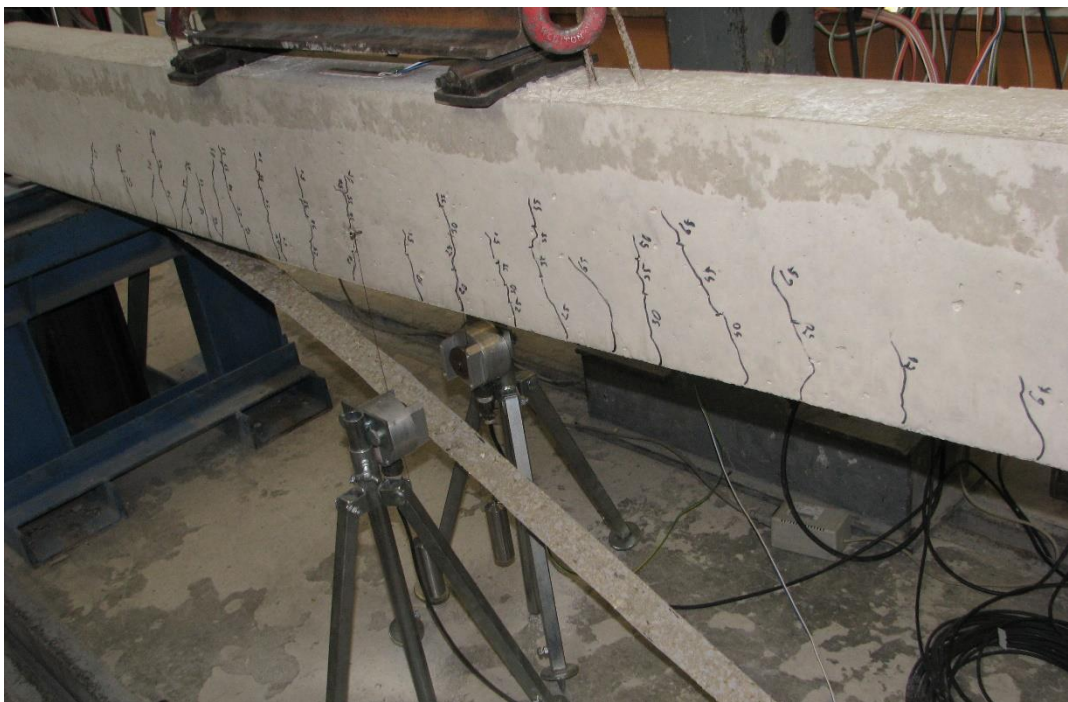
*Obr. 2.23 Zesílení nosníku pomocí uhlíkové lamely*



*Obr. 2.24 Zesílený nosník*



*Obr. 2.25 Trhliny při zatěžování zkušebního tělesa*



*Obr. 2.26 Smykové trhliny a odtržení externí výztuže*





*Obr. 2.27 Odtržená cfk lamela*



*Obr. 2.28 Průhyb po překročení maximálního zatížení*



*Obr. 2.29 Trhliny po odtržení lepené výztuže*



*Obr. 2.30 Trhliny v tažené části betonu*





*Obr. 2.31 Održená externí výztuž*



*Obr. 2.32 Trhliny při kolapsu nosníku*