

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

**Experimentální a numerická analýza železobetonových
prvků zesílených kompozitními lamelami**

Experimental and numerical analysis of reinforced concrete
structural members strengthened by composite plates

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Konstrukce pozemních staveb
Vedoucí práce: Ing. Radek Štefan, Ph.D., FEng.

Valeriia Kazmina

Praha, 2023

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kazmina** Jméno: **Valeriia** Osobní číslo: **484678**
Fakulta/ústav: **Fakulta stavební**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra betonových a zděných konstrukcí**
Studijní program: **Stavební inženýrství**
Studijní obor: **Konstrukce pozemních staveb**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Experimentální a numerická analýza železobetonových prvků zesílených kompozitními lamelami

Název diplomové práce anglicky:

Experimental and numerical analysis of reinforced concrete structural members strengthened by composite plates

Pokyny pro vypracování:

Rešerše literatury.
Návrh experimentu – vzorky, vyztužení, způsob zatěžování a měření atd.
Provedení experimentu.
Vyhodnocení experimentu.
Porovnání změřených výsledků s výsledky numerických výpočtů.
Vyhodnocení a závěr.

Seznam doporučené literatury:

fib Bulletin 14. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. 2001
fib Bulletin 40. FRP reinforcement in RC structures. 2007
ČSN EN 1992-1-1. Eurokód 2 (včetně nové generace).
ACI PRC-440.2-17. ACI PRC-440.2-17: Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Radek Štefan, Ph.D. katedra betonových a zděných konstrukcí FSv

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **05.10.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **08.01.2024**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Ing. Radek Štefan, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Jiří Máca, CSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 8. ledna 2024

Valeriia Kazmina

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucímu této diplomové práce Ing. Radkovi Štefanovi, Ph.D., FEng., a konzultantovi této práce Ing. Romanovi Chylíkovi za odborné vedení, trpělivost a podporu při celém průběhu psaní této práce.

Také bych chtěla poděkovat Ing. Přemyslovi Khemlovi a kolegům, kteří pomáhali s realizací experimentů.

Tato práce vznikla za podpory projektu TAČR FW06010142 „Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí“ a také za podpory projektu Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS23/033/OHK1/1T/11 „Elektromobilita a požár – vývoj nástrojů pro numerickou simulaci požáru a analýzu konstrukcí“.

V Praze dne 8. ledna 2024

Valeriia Kazmina

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na problematiku zesilování konstrukcí pomocí vláknových kompozitů. Předmětem této práce je první fáze grantového projektu „Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí“. Cílem této práce je analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za běžných teplot.

Na začátku práce je stručně popsána problematika zesilování konstrukcí a jsou uvedeny praktické a teoretické přístupy. Další část práce je věnována experimentální analýze, v rámci které je navržen experiment a stanoveny dvěma metodami síly při porušení zkušebních těles. Za účasti autorky práce byla vyrobena a otestována zkušební tělesa, s následným stanovením materiálových parametrů a zhodnocením výsledků. Následně byl popsán návrh budoucích experimentů, které budou řešeny v dalších fázích výzkumu.

Numerická část práce je věnována nově vytvořenému výpočetnímu nástroji, který slouží pro numerickou analýzu zesílených prvků. Výpočetní nástroj je založen na numerické analýze průřezu s využitím metody moment–křivost. Pro porovnání výsledků stanovených pomocí numerického modelu s experimentálně změřenými daty je nástroj rozšířen o výpočet průhybu analyzovaného prvku. Na závěr této části byly porovnány veškeré výsledky stanovené experimentální a numerickou analýzou.

Klíčová slova: uhlíkové lamely, FRP, zesilování železobetonových prvků, experimenty, moment–křivost.

Abstract

This thesis focuses on structures strengthened using fibre reinforced composites. The subject of this thesis represents the first phase of a grant project "New generation carbon plates with increased fire resistance for strengthening of existing structures". The aim of this work is to analyse the effect of FRP reinforcement on the behaviour of reinforced concrete structural elements at normal temperature.

In the first part of the thesis, the problem of FRP reinforcement is briefly described and practical and theoretical approaches are presented. The next part of the thesis is dedicated to the experimental analysis, in which an experiment is designed and the failure forces of the test specimens are numerically determined by two methods. Test specimens were manufactured and tested with the author's participation, followed by the determination of material parameters and the evaluation of results. Subsequently, the design of future experiments, to be addressed in the next phases of the research, was described.

The numerical part of the thesis is devoted to a newly created computational tool for numerical analysis of reinforced elements. The computational tool is based on numerical analysis of the cross-section using the moment–curvature method. To compare the results determined by the numerical model with experimentally measured data, the tool is extended by calculating the deflection of the analysed element. At the end of this section, all results determined by experimental and numerical analysis are compared.

Key words: carbon plates, FRP, reinforce reinforced concrete elements, experiments, moment–curvature.

Obsah

Úvod	1
1 Teoretická část	2
1.1 Úvod do problematiky	2
1.2 Zesilování konstrukcí	2
1.2.1 Materiály a technologie	3
1.2.2 Výroba	4
1.2.3 Aplikace	5
1.3 Výpočty	6
1.3.1 Výpočtové postupy	6
1.3.2 Výpočetní softwary	7
2 Experimentální analýza	8
2.1 Základní popis experimentu	8
2.2 Návrh experimentu	9
2.3 Zkušební stroje	11
2.3.1 Hydraulický lis	11
2.3.2 Elektromechanický lis	11
2.4 Materiály – předpoklad	11
2.4.1 Beton	12
2.4.2 Betonářská výztuž	12
2.4.3 Lamela	12
2.4.4 Lepidlo	13
2.5 Zkoušky materiálových parametrů	13
2.5.1 Zkouška pevnosti betonu v tlaku	13
2.5.2 Zkouška tahem betonářské výztuže	15
2.5.3 Zkouška pevnosti lamely v tahu	17
2.6 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku	19
2.6.1 Předpoklady výpočtu	19
2.6.2 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku – ruční výpočet	20
2.6.3 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku – software „STRECO“	25
2.6.4 Ověření smykové únosnosti	26
2.7 Výroba vzorků	27
2.8 Lepení lamel	30
2.9 Zkoušky únosnosti v ohybu	33
2.9.1 Trámky bez zesílení	33
2.9.2 Trámky zesílené v ohybu	37
2.9.3 Trámky zesílené v ohybu a smyku	43

2.9.4	Zhodnocení experimentů	47
2.10	Návrh budoucího experimentu	50
2.10.1	Předpoklady výpočtu	50
2.10.2	Stanovení předpokládané síly při porušení trámku bez zesílení	51
2.10.3	Stanovení předpokládané síly při porušení trámku se zesílením v ohybu	53
3	Numerická analýza	56
3.1	Úvod k numerické části	56
3.2	Popis výpočetního algoritmu	56
3.2.1	Stanovení křivky moment–křivost	56
3.2.2	Materiálové vlastnosti	58
3.2.3	Výpočet průhybu	61
3.3	Výsledky a diskuze	63
3.3.1	Křivky moment–křivost	63
3.3.2	Křivky síla–průhyb	65
3.3.3	Diskuze	69
	Závěr	70
	Reference	71
	Seznam obrázků	73
A	Výsledky zkoušek materiálových parametrů	76
A.1	Zkouška pevnosti betonu v tlaku	76
A.2	Zkouška tahem betonářské výztuže	78
B	Popis zkušebních trámků	80

Popis použitých symbolů

A_c	průřezová plocha betonu
A_f	průřezová plocha lamely
A_{s1}	průřezová plocha spodní výztuže
A_{s2}	průřezová plocha horní výztuže
A_{sw}	průřezová plocha třmínku
A_s	průřezová plocha výztuže
E_s	modul pružnosti výztuže
E_{cm}	průměrná hodnota sečnového modulu pružnosti betonu
E_c	tečnový modul pružnosti betonu
E_f	modul pružnosti lamely v tahu
F_c	síla v tlačeném betonu
F_{3bod}	maximální síla pro třibodový ohyb
F_{4bod}	maximální síla pro čtyřbodový ohyb
F_{ci}	síla v každém proužku betonu
F_f	síla v lamele
F_{max}	maximální zatěžovací síla
F_{s1}	síla v spodní výztuži
F_{s2}	síla v horní výztuži
F_s	síla ve výztuži
F	síla
L	délka prvku
M_R	moment únosnosti
S	směrodatná odchylka
V_{Ed}	působící posouvající síla
V_{Rd}	únosnost tlačené diagonály
V	variační koeficient vlastností
\varnothing_s	průměr výztuže
\varnothing_t	průměr třmínků
ν	redukční součinitel pevnosti betonu
σ_{ci}	napětí v každém proužku betonu
σ_c	napětí v tlačeném betonu
σ_f	napětí v lamele
σ_{s1}	napětí ve spodní výztuži
σ_{s2}	napětí v horní výztuži
σ_s	napětí ve výztuži
θ	úhel sklonu diagonály (odpovídá předpokládanému sklonu trhlin)
ε_{c1}	poměrné přetvoření betonu při dosažení maximálního napětí

ε_{ci}	poměrné přetvoření v každém proužku betonu
ε_{ctu}	mezní poměrné přetvoření betonu v tahu
ε_{cu1}	mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku pro obecný pracovní diagram betonu
ε_{cu}	mezní poměrné přetvoření betonu v tlaku
ε_c	poměrné přetvoření betonu
ε_{fu}	mezní poměrné přetvoření lamely
ε_f	poměrné přetvoření lamely
ε_{hv}	poměrné přetvoření horních vláken
ε_{s1}	poměrné přetvoření v těžišti spodní výztuže
ε_{s2}	poměrné přetvoření v těžišti horní výztuže
ε_{su}	mezní poměrné přetvoření výztuže
ε_{sy}	poměrné přetvoření výztuže na mezi kluzu
ε_s	poměrné přetvoření výztuže
ξ_{bal}	limitní hodnota poměrné výšky tlačené oblasti
ξ	poměrná výška tlačené oblasti
b_f	šířka lamely
b	šířka průřezu
c	tloušťka krycí vrstvy výztuže
d_1	vzdálenost výztuže od spodních vláken
d	účinná výška průřezu
f_{ck}	charakteristická hodnota pevnosti betonu v tlaku
f_{cm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku
f_{ctm}	průměrná hodnota pevnosti betonu v tahu
f_{fm}	průměrná hodnota pevnosti lamely v tahu
$f_{m(n)}$	průměr hodnot
f_n	pevnost jednotlivých krychlí
f_{tk}	charakteristická hodnota pevnosti v tahu betonářské výztuže
f_{tm}	průměrná hodnota pevnosti v tahu betonářské výztuže
f_{uk}	charakteristická hodnota meze pevnosti betonářské výztuže
f_{yd}	návrhová hodnota meze kluzu betonářské výztuže
f_{yk}	charakteristická hodnota meze kluzu betonářské výztuže
f_{ym}	průměrná hodnota meze kluzu betonářské výztuže
h_{ci}	výška i -tého proužku betonu
h_f	tloušťka lamely
h	výška průřezu
k_n	součinitel závislý na počtu zkoušek
k	součinitel
l_1	vzdálenost mezi podporou a působící silou prvku
l_{ef}	vzdálenost mezi podporami prvku
n	počet prutů v průřezu / střížnost třmínku
s_{req}	požadovaná rozteč třmínků
u_{ci}	osová vzdálenost i -tého proužku betonu od horních vláken
u_f	osová vzdálenost lamely od horních vláken
u_{s1}	osová vzdálenost spodní výztuže od horních vláken
u_{s2}	osová vzdálenost horní výztuže od horních vláken
x	vzdálenost neutrální osy od nejvíce tlačného okraje
y''	křivost

y průhyb
 z_c rameno síly v tlačeném betonu
 z_f rameno síly v lamele
 z rameno vnitřních sil v průřezu

Seznam zkratk

CFRC	carbon fiber reinforced composites (kompozity z uhlíkových vláken)
EC	Experimentální centrum
fib	fédération internationale du béton (Mezinárodní federace konstrukčního betonu)
FRP	fibre reinforced polymer reinforcement (vláknový kompozit)
FRP EBR	externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement (vláknový kompozit s vnějším lepením)
MSP	mezní stav použitelnosti
MSÚ	mezní stav únosnosti

Úvod

Zesilování konstrukcí je dnes populární a efektivní metodou. Pomocí této metody lze s minimálními náklady a nároky na pracnost buď prodloužit životnost konstrukcí, nebo efektivně vylepšit návrh konstrukcí. V současném kontextu udržitelnosti a snahy o omezení odpadu má zesílení konstrukcí také ekologické výhody, jelikož minimalizuje množství stavebního odpadu. Celkově lze říct, že zesilování konstrukcí je metoda, která spojuje technické, ekonomické a environmentální aspekty pro efektivní a udržitelný rozvoj stavebnictví.

Cílem této práce je analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků a porovnat experimentální výsledky s numerickými výsledky. Celá práce je rozdělena do tří částí.

První část popisuje důležitost zesilování, principy a metody zesilování, technologii výroby, praktické použití a způsoby návrhu.

Druhá část práce je praktická a je zaměřena na experimentální analýzu. V rámci této části byl navržen experiment, podle kterého byla vyrobena, otestována a analyzována zkušební tělesa. Zkušební tělesa tvořily jak nezesílené trámky jako referenční vzorky, tak trámky zesílené uhlíkovými lamelami. Před zkoušením byla stanovena předpokládaná síla při porušení nezesíleného a zesíleného průřezu. Stanovení síly bylo provedeno pomocí ručního výpočtu a pomocí softwaru „STRECO“ [31]. Následně byla tělesa zkoušena a analyzována na základě průběhu zatěžování a deformace. Součástí této části bylo i stanovení parametrů materiálů, ze kterých byla tělesa vyrobena. Stanovení parametrů materiálů bylo realizováno na základě materiálových zkoušek a následného statistického zpracování dat. Byly stanoveny vlastnosti použitého betonu a betonářské výztuže. Byla provedena také zkouška vlastností použité lamely v tahu.

Třetí část práce je věnována popisu a výsledkům nově vytvořeného výpočetního nástroje, založeného na numerické analýze průřezu s využitím metody moment–křivost. Výpočetní nástroj slouží pro numerickou analýzu nezesílených a zesílených prvků. Pro porovnání výsledků stanovených pomocí numerického modelu s experimentálně změřenými daty je nástroj rozšířen o výpočet průhybu. Výpočet průhybu uprostřed rozpětí analyzovaného prvku je stanoven pomocí numerické integrace křivosti přes polovinu rozpětí prvku. Celkový výpočetní algoritmus je implementován do podoby výpočetního nástroje v jazyce Python [19].

Kapitola 1

Teoretická část

1.1 Úvod do problematiky

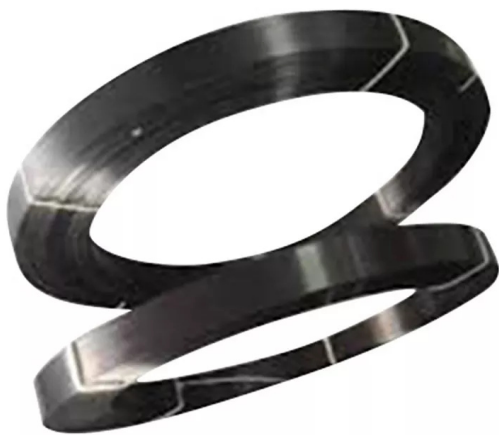
Problematika modernizace stávajících stavebních konstrukcí je významným a dlouhodobým tématem, který se zkoumá v posledních desetiletích. Větší pozornost tomuto tématu věnují publikace Mezinárodní federace konstrukčního betonu (fib) – Bulletin No. 14 [2] a Bulletin No. 40 [3]. Nejdůležitější úvahy jsou zmíněny v této kapitole.

Postupné zhoršování stavu pozemních a dopravních staveb může být způsobeno množstvím faktorů, jako je stárnutí, negativní vlivy životního prostředí, nedostačující původní návrh, který v dnešní době nevyhovuje současným požadavkům a normám, nekvalitní provedení, nedostatečná údržba a mimořádné události, které jsou vyvolané buď činností člověka nebo přírodními jevy. [2]

Většina těchto konstrukcí je stále provozuschopná, ale mohou se například měnit podmínky užívání nebo se očekává zvětšení působícího zatížení. Méně časově a technologicky náročné je zesílit stávající konstrukce než bourat a stavět konstrukci novou. Je ale třeba věnovat pozornost správnému návrhu zesílení a jeho kvalitnímu provedení.

1.2 Zesilování konstrukcí

V poslední době došlo k významnému pokroku v oblasti materiálů, metod a technologií pro zesilování železobetonových konstrukcí. Jedna z nejmodernějších variant, která je dnes považována za velmi perspektivní v oblasti stavebnictví, je využití vláknových kompozitů s vnějším lepením – FRP EBR (z angl. externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement) [2]. Příklad vláknových kompozitů je uveden na Obr. 1.1 a na Obr. 1.2.



Obr. 1.1: Lamely v rolích [30]



Obr. 1.2: Lamely nařezané na kusy [30]

Vláknové kompozity s vnějším lepením lze využívat k zesílení buď převážně tlačných prvků nebo prvků namáhaných smykem a kroucením [2] (Obr. 1.3), ale předmětem této diplomové práce je výzkum zesílení ohýbaných prvků.



Obr. 1.3: Znázornění zesílených prvků [27]

1.2.1 Materiály a technologie

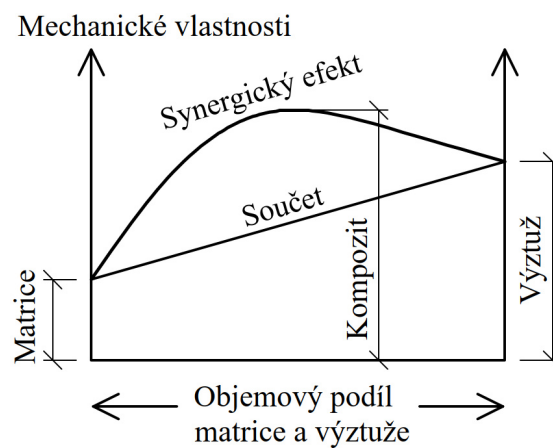
Jak je shrnuto např. v práci [17], vláknové kompozity fungují na principu synergického efektu, který lze chápat tak, že výsledný materiál má lepší vlastnosti než jeho jednotlivé složky samostatně.

Vláknový kompozit je složen ze dvou hlavních složek: vláknité výztuže a polymerní matrice.

Vláknitá výztuž tvoří strukturální jádro FRP a poskytuje materiálu vysokou pevnost a tuhost. Vlákenná výztuž je často vyrobena z uhlíkových, skleněných nebo aramidových vláken. Každý typ vlákna má jiné charakteristiky, co se týče pevnosti, tuhosti a odolnosti proti korozi. Samostatná vlákna jsou křehká a náchylná na poškození. Vlákna mohou být uspořádána různými způsoby – jednosměrně, nebo vícesměrně. [2, 17]

Polymerní matrice je základním prvkem FRP a tvoří většinu hmotnosti materiálu. Funguje podobně jako pojivo, které drží uhlíková vlákna pohromadě a přenáší síly mezi vlákny. Tato matrice může být vyrobena z různých polymerních materiálů, včetně epoxidů, polyesterů nebo vinylesterů. Mezi výhody patří nízká hustota, snadná zpracovatelnost a odolnost proti chemikáliím. Nevýhodou je však její nízký modul pružnosti, malá pevnost a křehkost. Z tohoto důvodu se v konstrukcích nepoužívá samostatně. Volba polymerní matrice závisí na konkrétních požadavcích aplikace. [2, 17]

Na Obr. 1.4 je znázorněn graf, podle kterého lze říct, že samy o sobě matrice a výztuž vykazují horší mechanické vlastnosti než při spolupůsobení.



Obr. 1.4: Znázornění synergického efektu [9]

Vláknové kompozity jsou dnes k dispozici v několika formách [2]:

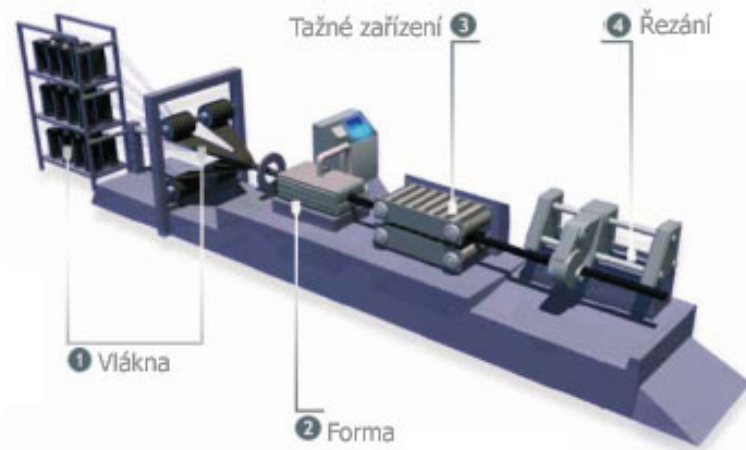
- Tenké jednosměrné lamely s tloušťkou řádově kolem 1 mm, které jsou vytvořeny technikou pultruze (tažením).
- Flexibilní tkaniny složené z vláken směřujících v jednom nebo alespoň dvou různých směrech, někdy předem nasycené pryskyřicí.

1.2.2 Výroba

Existuje velké množství způsobů výroby vláknových kompozitů, většina z nich je popsána např. v práci [17]. Nejrozšířenějším způsobem výroby vláknových kompozitů ve formě uhlíkových lamel je pultruze (tažení). Metoda pultruze je efektivnější, rychlejší, méně pracná a cenově přijatelná. Vstupní materiál je směs tekuté pryskyřice a vysoce pevnostních vláken.

Podle [25] „výrobní proces spočívá v tažení materiálu skrz vyhřívanou ocelovou formu pomocí tažného zařízení. Vlákna navinutá na cívkách vstupují do srovnávače, který zajistí rovnoměrné rozmístění vláken. V dalším kroku se takto srovnaná vlákna ve vyhřívací formě smáčí směsí pryskyřice, plniva, barviva, katalyzátoru a mohou se přidat další přísady pro zlepšení vlastností výsledného materiálu. Ve vyhřívané formě proběhne termosetická reakce (trvalé tvrzení při zahřátí) a výrobek se vytvrzuje. Z formy je tažen hotový výrobek, který je dělen na výsledný požadovaný rozměr.“

Celý proces je graficky znázorněn na Obr. 1.5. Výsledkem je pevná, lehká a odolná lamela z tažených uhlíkových vláken.



Obr. 1.5: Schéma výroby [25]

1.2.3 Aplikace

V této podkapitole je na základě metodické příručky od společnosti Sika [22] popsána ruční technika aplikace uhlíkové lamely na betonový prvek.

1. **Kontrola okolních podmínek:** Je nutné monitorovat teplotu vzduchu a povrchu (kontrola rosného bodu) a také vlhkost povrchu, která by měla být menší než 4 %. Pokud je vlhkost příliš vysoká, je třeba provést opatření, jako je zvýšení teploty a intenzivní větrání.
2. **Příprava lamel:** Lamely musí být důkladně očištěny od zbytků uhlíkového prachu, aby se zajistila silná přilnavost mezi lamelou a lepidlem. Lamela se položí na pracovní stůl a očistí se. Čištění se provádí vždy na straně bez potisku, což je strana, která bude přilepena na beton.
3. **Míchání epoxidového lepidla:** Lepidlo je dvousložkové. Obě složky musí být pečlivě smíchány elektrickým šroubovým míchadlem při nízkých otáčkách.
4. **Nanesení lepidla na podklad:** Lepidlo se nanese na připravený betonový povrch v první vrstvě s maximální tloušťkou 1 mm. Je důležité, aby lepidlo bylo dokonale vetřeno do povrchu a všechny póry byly plně vyplněny.

5. **Nanesení lepidla na lamely:** Lepidlo se nanáší rovnoměrně na lepicí plochu lamel (strana bez potisku) pomocí speciálně tvarované stěrky nebo nástroje tvaru korýtka. Tím vzniká příčný tvar stříšky s výškou cca 2 mm. Spotřeba lepidla se řídí tabulkou od výrobce.
6. **Montáž lamel:** Po nanesení lepidla se lamely umísťují na předem připravené a označené místo na konstrukci. Lamela se přitlačí rovnoměrně pomocí gumového válečku do okamžiku, kdy začne lepidlo vytékat po stranách lamel. Tím se zajistí pevné spojení. Lepidlo na obou stranách lamely by mělo vytékat ze spáry, aby byla zachována minimální tloušťka lepidla 1 mm.
7. **Kontrola správného nalepení:** Po aplikaci se odstraní přebytečné lepidlo kolem okrajů lamely, aby bylo možné provést estetickou a vizuální kontrolu spoje.

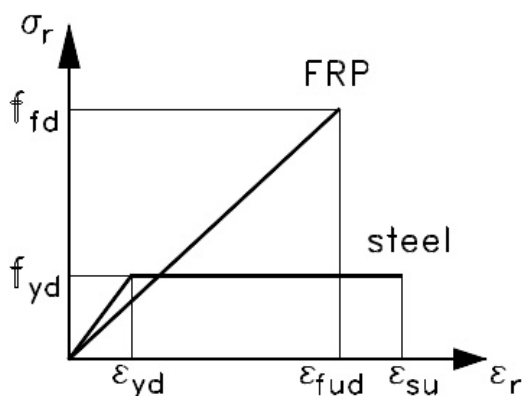


Obr. 1.6: Proces lepení lamely [30]

1.3 Výpočty

1.3.1 Výpočtové postupy

Vláknové kompozity se chovají odlišně od betonářské výztuže. Na Obr. 1.7 je znázorněno porovnání pracovních diagramů oceli a vláknového kompozitu. Je patrné, že u vláknového kompozitu chybí plastická větev, což znamená náhlé selhání materiálu při dosažení meze pevnosti. Je tedy zřejmé, že nelze použít stejné výpočtové postupy, které jsou používány pro betonářskou výztuž.



Obr. 1.7: Pracovní diagram oceli (steel) a vláknového kompozitu (FRP) [2]

Jak je popsáno v práci [31], dnes je k dispozici velké množství přístupů k návrhu prvků zesílených kompozitními materiály a namáhaných ohybovým momentem. Světově nejpoužívanější je směrnice ACI 440.2R-17 [14], vydaná americkým betonářským institutem, avšak tento postup je méně používán v Evropě, jelikož má odlišné symboly, součinitele a jiné uspořádání částí výpočtu. Postup využívaný v celé Evropě je popsán v již zmíněném technickém reportu od mezinárodní federace konstrukčního betonu Bulletin No.14 [2], tento postup bude implementován také v nové generaci Eurokódů. Dále je méně používán, ale také známý přístup popsáný v italské normě CNR-DT 203/2006 [5] a kanadský postup popsáný v normě CSA S806-12 [1]. Podrobný popis výpočetních přístupů je uveden v práci [31].

1.3.2 Výpočetní softwary

Stejně jako výpočetních přístupů je i velké množství softwarů, ve kterých jsou tyto výpočetní přístupy implementovány. Jedná se zpravidla o softwary od výrobců, které mají nevýhodu v tom, že je lze využít pouze pro návrh a posouzení jejich vlastních výrobků. Z tohoto důvodu byl v práci [31] vyvinut univerzální software, do kterého lze vložit libovolné vlastnosti materiálů. V této podkapitole budou popsány a porovnány dva softwary. První z nich, software „Sika CarboDur“ [22], je od výrobce systémů pro zesilování konstrukcí. Druhý z nich, software „STRECO“, byl vytvořen v rámci diplomové práce [31].

Podle uživatelské příručky „Sika CarboDur“ [22] lze tento software využít pro návrh požadovaných rozměrů FRP za účelem zesílení v ohybu, zesílení ve smyku nebo ovinutí průřezů železobetonových nebo předpjatých konstrukcí. Výpočty pro dimenzování nosníků nebo desek lze provádět pro prostý, spojitý nebo konzolový nosník. Výpočet lze provádět podle normy ACI 440.2R-17 [14], vydané americkým betonářským institutem, podle švýcarské normy SIA 166-SIA 262 [32], podle evropské návrhové normy EN 1992-1-1 [7], případně podle italské normy CNR-DT 200 R1/2013 [5].

Podle popisu v práci [31] lze software „STRECO“ použít pro posouzení mezního stavu únosnosti (MSÚ) a mezního stavu použitelnosti (MSP) jednostranně a oboustranně vyztužených průřezů zesílených vnější FRP lamelou. Výpočet lze provádět podle normy ACI 440.2R-17 [14] nebo podle přístupu popsáného ve fib Bulletin No.14 [2], což je obdobný postup, jako je v připravované revizi normy EN 1992-1-1 [7].

Kapitola 2

Experimentální analýza

2.1 Základní popis experimentu

Předmětem této práce je první fáze grantového projektu „Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí“.

„Cílem projektu je zavedení systému vysoce odolných lamel poskytujících různou úroveň protipožární ochrany do praxe a tím zvýšit odolnost stávající infrastruktury a zabezpečit ochranu života a zdraví osob při zachování stávajících užitných vlastností stavebního objektu. Současné lamely mají nulovou požární odolnost. Řešení projektu spočívá ve zvýšení požární odolnosti a zajištění vysoké odolnosti lepených lamel vůči vysokým teplotám pomocí pokročilých materiálů.“ [12]

Hlavním cílem tohoto projektu je tedy analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za vysokých teplot, což ale není předmětem této diplomové práce. V rámci experimentální části této práce je navržen, proveden a vyhodnocen experiment, jehož hlavním cílem je analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků za běžných teplot, což je první krok k tomu, aby mohlo být přistoupeno k analýze za vysokých teplot.

V Tab. 2.1 je uveden harmonogram řešení jednotlivých aktivit praktické části této diplomové práce.

Rok	2023									2024
Měsíc	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	I	
Návrh experimentu	■	■								
Návrh betonové směsi (EC)			■	■	■					
Příprava bednicích forem (EC)			■	■	■					
Příprava (ohýbání) výztuže (EC)					■	■				
Výroba vzorků						■	■			
Experimenty							■	■		
Výhodnocení							■	■	■	

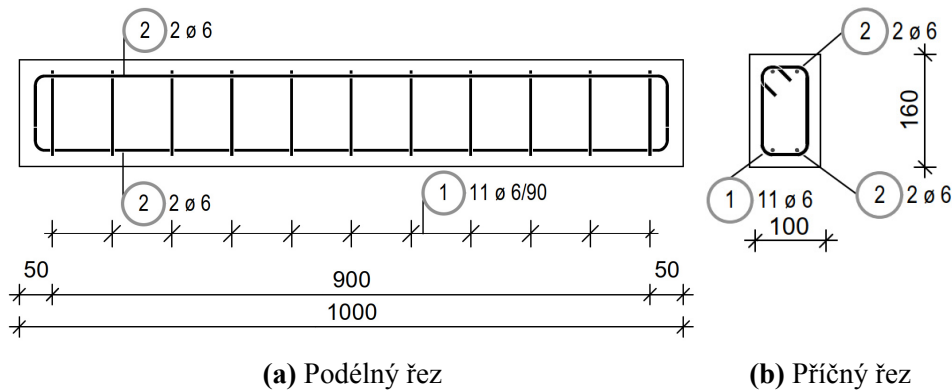
EC - zařízení Experimentálním centrem

Tab. 2.1: Harmonogram

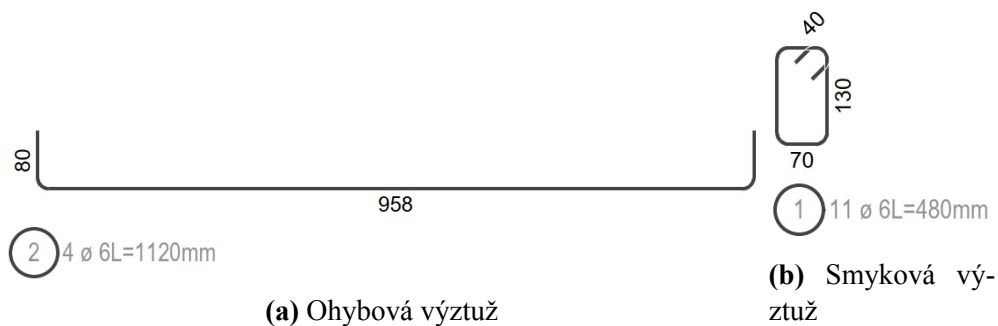
2.2 Návrh experimentu

Cílem návrhu experimentu je určit tvary a velikost vzorků, schéma a způsob zatěžování, materiály, množství potřebných vzorků a měřené veličiny.

Pro analýzu vlivu zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků jsou provedeny experimenty na železobetonových trámcích o velikosti $100 \text{ mm} \times 160 \text{ mm} \times 1000 \text{ mm}$. Hlavní ohybová výztuž trámek je o průměru $\varnothing_s = 6 \text{ mm}$, smyková výztuž je také o průměru $\varnothing_t = 6 \text{ mm}$ s roztečí 90 mm . Vyztužení vzorků je patrné z Obr. 2.1 a 2.2. Krytí výztuže se uvažuje jako $c = 15 \text{ mm}$.



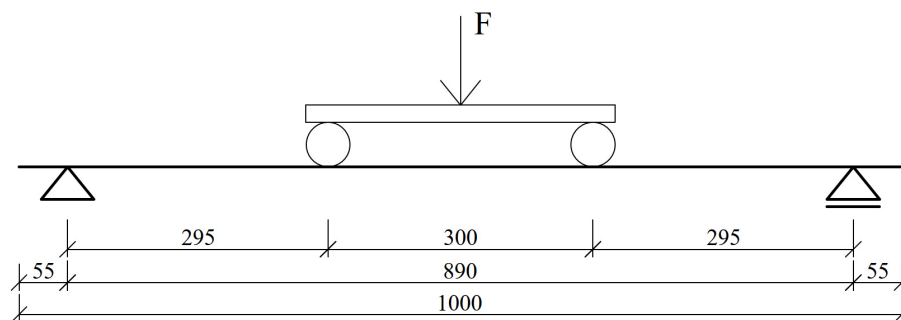
Obr. 2.1: Výztuž trámku [13]



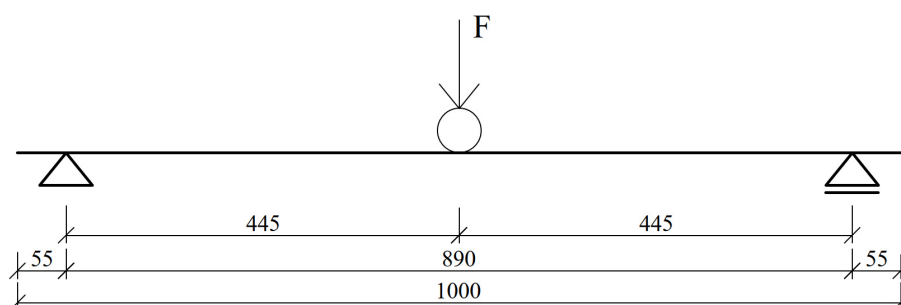
Obr. 2.2: Výkaz výztuže [13]

Pro zjištění mechanických charakteristik betonu jsou provedeny zkoušky tlakové pevnosti na krychlích s délkou hrany 150 mm . Dohromady je připraveno 36 trámek, ze kterých 18 trámek obsahuje termočlánky pro analýzu za vysokých teplot, což ale není předmětem této diplomové práce, a 18 trámek je bez termočlánků pro analýzu za běžných teplot. Betonáž probíhá po sériích, jedna série je 9 trámek. Vzhledem k omezenému počtu bednicích forem lze za jeden den připravit pouze 3 trámky. Součástí každé betonáže je i příprava třech krychlí. V rámci této diplomové práce je zkoušeno a vyhodnoceno 9 trámek, 3 bez zesílení a 6 se zesílením uhlíkovými lamelami. Všechny vzorky jsou zkoušeny za běžné teploty.

Zkoušení trámek probíhá jak čtyřbodovým ohybem (Obr. 2.3), tak třibodovým ohybem (Obr. 2.4). Trámek se umístí z obou stran na dvě podpory ve vzdálenosti 55 mm od kraje a následně je zatěžován silou, která se v místě působení na trámek rozdělí v případě čtyřbodového ohybu na dvě stejně velké síly ve vzdálenosti mezi sebou 300 mm .



Obr. 2.3: Schéma zatížení – čtyřbodový ohyb

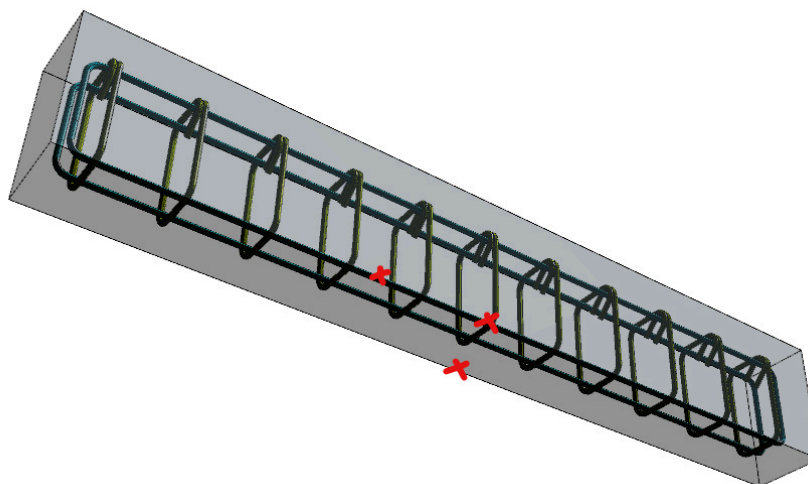


Obr. 2.4: Schéma zatížení – třibodový ohyb

V první fázi experimentálního programu řešeného grantového projektu jsou analyzovány běžně dostupné lamely Sika. Tato fáze je předmětem této práce. Podrobné materiálové řešení popsáno v kapitole 2.4.

V dalších fázích experimentálního programu projektu budou zkoušeny nově vyvinuté lamely a bude také probíhat zkoušení zesílených prvků vystavených vysokým teplotám. Tyto fáze nejsou předmětem této práce.

Při zkoušení trámku se měří síla a průhyb po celou dobu zatěžování. Měření průhybu probíhá pomocí inkrementálních snímačů dráhy, umístěných v polovině rozpětí a pod působícím zatížením, jak je znázorněno na Obr. 2.5.



Obr. 2.5: 3D model trámku s vyznačenými místy měření průhybů při čtyřbodovém ohybu[13]

2.3 Zkušební stroje

Zkoušení probíhá na dvou typech lisů v závislosti na účelu zkoušky a způsobu řízení.

2.3.1 Hydraulický lis

Hydraulický lis je řízen přírůstkem síly a je určen pro vyšetřování mechanických a fyzikálních charakteristik charakteristik. Maximální síla, kterou dokáže vyvinout, je 5000 kN. Pomocí hydraulického lisu je zjištěna hodnota krychelné pevnosti betonu v tlaku. Lis je znázorněn na Obr. 2.6a.



(a) Hydraulický lis

(b) Elektromechanický lis

Obr. 2.6: Zkušební stroje

2.3.2 Elektromechanický lis

Jedná se o „šroubový“ lis s maximální silou 100 kN. Zkoušky mohou být řízeny jak přírůstkem síly, tak přírůstkem deformace (tzn. dráhou). Pomocí elektromechanického lisu je analyzováno chování ohýbaných trámů. Lis je znázorněn na Obr. 2.6b.

2.4 Materiály – předpoklad

V této kapitole jsou popsány mechanické vlastnosti materiálů podle jejich normových parametrů. Skutečné mechanické vlastnosti materiálů jsou stanovené v kapitole 2.5.

2.4.1 Beton

Při návrhu experimentu se uvažuje s tím, že uhlíkové lamely se často používají k zesílení starších konstrukcí, např. konstrukcí navržených v 50.–60. letech minulého století. Z tohoto důvodu je zvolen pro výrobu vzorků beton s nižší pevností, aby simuloval dříve využívané, méně kvalitní konstrukční betony. Je tedy navržena jednoduchá betonová směs s vysokým vodním součinitelem a bez plastifikátorů, přísad a příměsí, které se v minulém století tak rozšířeně nepoužívaly. Podrobná receptura je znázorněna v Tab. 2.2. Přesná pevnost betonu je stanovena pomocí zkoušek pevnosti betonu v tlaku na krychlích, které se betonují zároveň se vzorky. Předpokládaná střední hodnota krychelné pevnosti je $f_{cm} = 30$ MPa.

Směs betonu	Hmotnostní poměry	Hmotnost [kg/m ³]
Cement CEM II - 32,5 R	1	300
Voda	0,6	180
Kamenivo 8/16	3,6	1 080
Písky 0-4 mm	2,8	840
Celková hmotnost	8	2 400

Tab. 2.2: Receptura betonu (navrženo EC)

2.4.2 Betonářská výztuž

Je použita standardní žebírková betonářská výztuž třídy B500B. Charakteristická hodnota meze kluzu, uvedená v normě [7] pro tuto výztuž, se uvažuje jako $f_{yk} = 500$ MPa. Střední hodnota meze kluzu f_{ym} se stanoví jako $1,15 \cdot f_{yk}$, tedy $f_{ym} = 1,15 \cdot f_{yk} = 575$ MPa [11]. Modul pružnosti oceli $E_s = 200$ GPa.

2.4.3 Lamela

Jako zesilující prvek bude použita komerčně dostupná lamela Sika CarboDur S 512 o tloušťce 1,2 mm a o šířce 50 mm. Lamela je z uhlíkových vláken vyztužených polymery (CFRC).

Tento produkt je schválen a certifikován v několika zemích, včetně České republiky, Francie, Slovenska a Polska, a splňuje určité technické standardy, což z něj činí důvěryhodnou volbu pro konstrukční zesílení. [23]

Mezi hlavní vlastnosti a výhody lamel Sika CarboDur S 512 patří jejich nerezavějící povaha, vysoké pevnosti, vynikající životnost a odolnost proti únavě materiálu. Tyto lamely jsou k dispozici v rolích pro snadnou přepravu a mají nízkou tloušťku, což umožňuje křížení lamel. Jsou také lehké a snadno se používají i při práci nad hlavou. Jejich použití je jednoduché a vyžaduje minimální předpřípravu. [23]

Mechanické vlastnosti, měřené na lamele s podélným průběhem vláken [23]:

- průměrná hodnota mezního přetvoření v tahu: $\varepsilon_f = 1,80$ %,
- průměrná hodnota pevnosti v tahu: $f_{fm} = 3\,100$ N/mm²,
- průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu $E_f = 170\,000$ N/mm².

2.4.4 Lepidlo

Pro lepení lamely bude použito dvousložkové epoxidové konstrukční lepidlo Sikadur-30. Lepidlo je na bázi epoxidové pryskyřice a lze jím přilepit lamelu na většinu stavebních materiálů. [24]

Jednoduché míchání a aplikace zajišťují efektivnost procesu, přičemž není vyžadován základní nátěr. Lepidlo vykazuje vysokou odolnost proti tečení při trvalém zatížení a dobrou přilnavost k různým materiálům, včetně betonu, zdiva, kamenného zdiva, oceli, litiny, hliníku, dřeva a lamel. Nedochozí k odkapávání při aplikacích ve svislých nebo stropních oblastech, což zvyšuje přesnost aplikace. Lepidlo tvrdne bez smršťování, a to i při vysoké vlhkosti. [24]

Technické informace [24]:

- pevnost v tahu po 7 dnech vytvrzování při teplotě 35°C je 29 MPa,
- modul pružnosti v tahu je 11 200 N/mm².

2.5 Zkoušky materiálových parametrů

V této kapitole je popsán postup zkoušek a následné vyhodnocení pevnostních charakteristik materiálu.

2.5.1 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Zkoušení probíhá v souladu s ČSN EN 12390-3 [20]. Jako zkušební tělesa jsou použity krychle o délce hrany 150 mm. Výroba krychlí probíhala společně s trámky, což je podrobněji popsáno v kapitole 2.7. Vzorky jsou vždy testovány ve staří minimálně 28 dní. Každý vzorek je podrobně popsán v příloze A.1.

Zkoušení vždy začíná měřením a vážením zkušební krychle. Následně se do zkušebního stroje zadají potřebné údaje o vzorku a nastaví se průběh zkoušky. Zkouška probíhá v hydraulickém lisu (kapitola 2.3.1) a je řízena přírůstkem síly (2 kN/s).

Do lisu je umístěn a vycentrován vzorek (Obr. 2.7). Nedodržení vycentrování může být příčinou nevyhovujícího způsobu porušení zkušebních těles.



Obr. 2.7: Krychle před porušením



Obr. 2.8: Porušená krychle

Po zapnutí lisu je vzorek zatěžován až do porušení. Z Obr. 2.8 je vidět, že charakter porušení krychlí je vyhovující, jak je uvedeno v ČSN EN 12390-3 [20].

Na základě proběhlých destruktivních zkoušek a podle metody uvedené v příloze D ČSN EN 1990 [6] se stanoví průměrná f_{cm} ($f_{m(n)}$) a charakteristická f_{ck} hodnota tlakové pevnosti betonu. Metoda vychází z předpokladu, že vyšetřovaná veličina má Gaussovo rozdělení. Charakteristická hodnota pevnosti betonu je definovaná jako 5% kvantil.

- Výpočet průměrné hodnoty $f_{m(n)}$:

$$f_{m(n)} = \frac{1}{n} \cdot \sum_n f_n \quad (2.5.1)$$

- Výpočet směrodatné odchylky S :

$$S = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \cdot \sum_n (f_n - f_{m(n)})^2} \quad (2.5.2)$$

- Výpočet variačního koeficientu V :

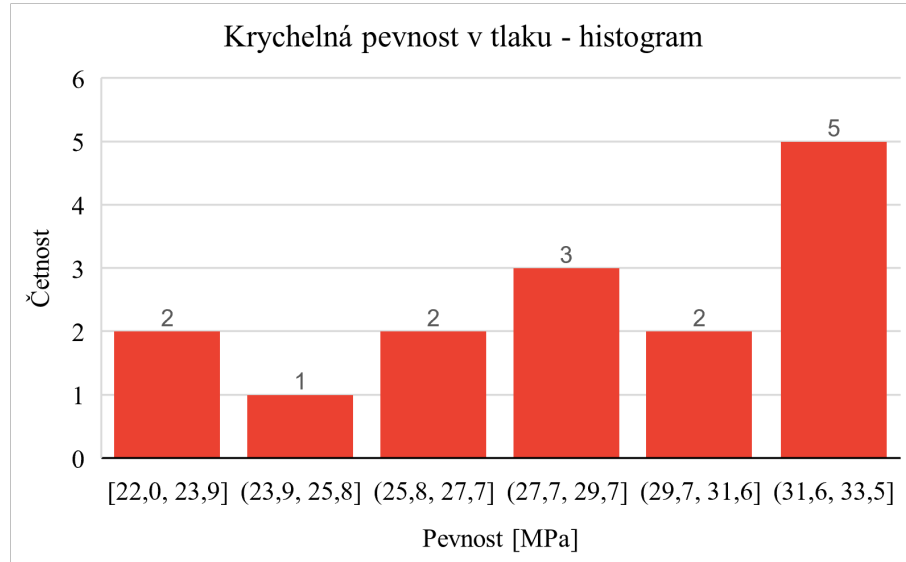
$$V = \frac{S}{f_{m(n)}} \quad (2.5.3)$$

- Součinitel k_n se stanoví podle tabulky D.1 v příloze D ČSN EN 1990 [6]. Pro V neznámé a 15 vzorků je součinitel $k_n = 1,84$.

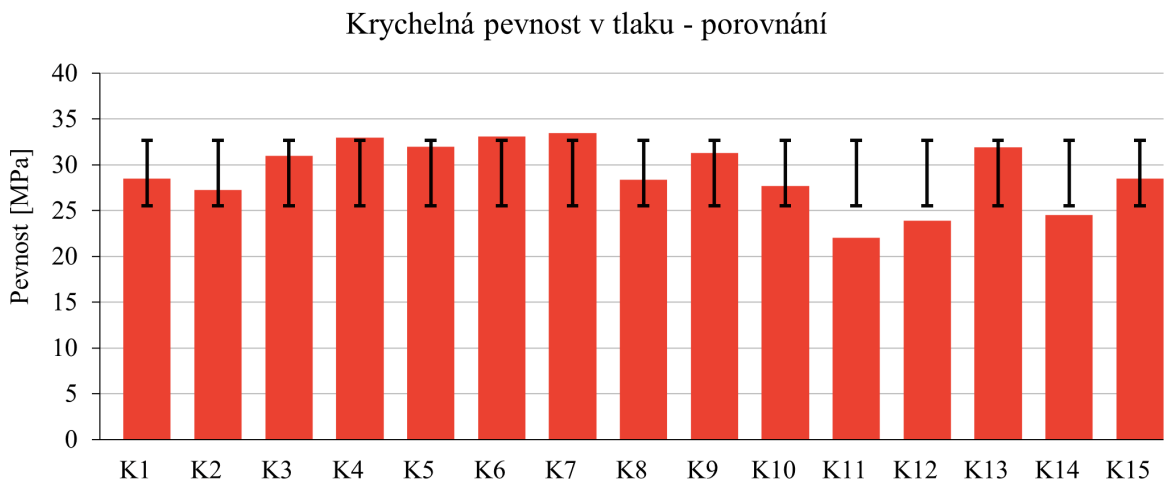
- Výpočet charakteristické hodnoty f_{ck} :

$$f_{ck} = f_{m(n)} \cdot (1 - k_n \cdot V) \quad (2.5.4)$$

Na základě výše uvedených vztahů je proveden výpočet v nástroji MS Excel – viz příloha A.1 a Obr. 2.10. Z výpočtů vyplývá, že průměrná pevnost betonu tlaku je $f_{cm} = 29$ MPa, a charakteristická pevnost betonu v tlaku je $f_{ck} = 22,5$ MPa. Na Obr. 2.9 je uveden histogram, ze kterého je patrné rozdělení krychlí podle pevnosti v rozmezí od 22 MPa až 33,5 MPa.



Obr. 2.9: Histogram



Obr. 2.10: Znázornění změřených pevností betonu v tlaku a jejich porovnání se střední hodnotou včetně směrodatné odchylky

2.5.2 Zkouška tahem betonářské výztuže

Zkoušení probíhá v souladu s ČSN EN ISO 6892-1 [21] na betonářské výztuži o průměru $\varnothing_s = 6$ mm a délce 500 mm. Zkouška spočívá v deformaci tahem až do porušení vzorků. Zatěžování vzorků probíhá s rychlostí 1 mm za minutu.

Výztuž je upnutá pomocí samosvorných čelistí tak, že její délka mezi čelistmi činí 260 mm (Obr. 2.11). Na výztuži je vyznačena vzdálenost 100 mm pro orientační měření protažení (Obr. 2.12). Při výpočtu skutečného přetvoření/protážení je uvažováno s hodnotami posunu příčnicku lisu.

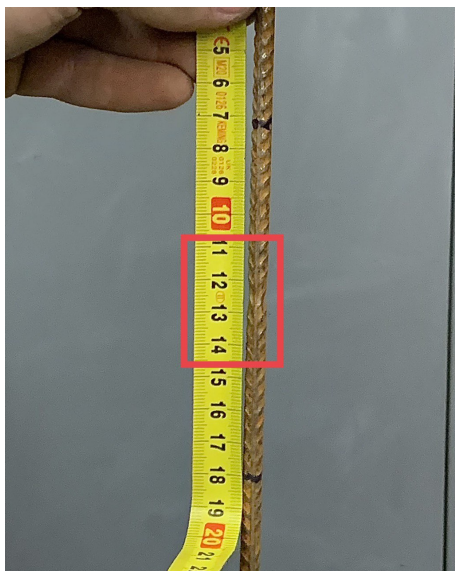


Obr. 2.11: Výztuž, upnutá mezi čelisti



Obr. 2.12: Vyznačená část

Po postupném tažení je patrný tzv. „krček“ (Obr. 2.13). Vyznačený úsek se prodloužil o 10 mm. Po 2 minutách od vzniku „krčku“ se výztuž přetrhla (Obr. 2.14).



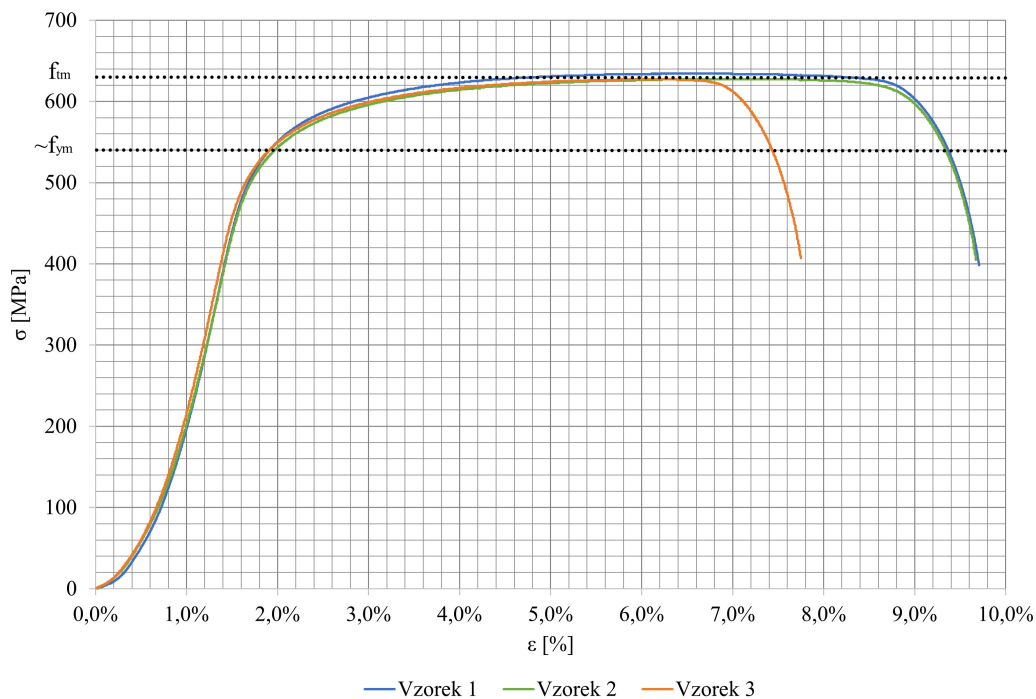
Obr. 2.13: Protažení ve vyznačené části



Obr. 2.14: Přetržená výztuž

Na základě proběhlých destruktivních zkoušek a podle vztahů uvedených v kapitole 2.5.1 je stanovena průměrná f_{tm} a charakteristická f_{tk} hodnota tahové pevnosti oceli na mezi porušení. Výpočet je proveden pomocí nástroje MS Excel (viz příloha A.2). Průměrná hodnota pevnosti výztuže v tahu je $f_{tm} = 629$ MPa. Charakteristická hodnota pevnosti výztuže v tahu je $f_{tk} = 618$ MPa. Průměrná hodnota meze kluzu výztuže podle grafu na Obr. 2.15 orientačně je $f_{ym} = 540$ MPa.

Přetvoření (vodorovné osy grafu na Obr. 2.15) lze považovat za orientační, jelikož zkušební vzorek nebyl osazen tenzometry/extenzometry. Jelikož přetvoření se měří na základě posunu příčnicku, je nutné počítat s dojžděním a usazením jednotlivých částí lisu, což podle grafu na Obr. 2.15 tvoří orientačně $\pm 0,5$ %.

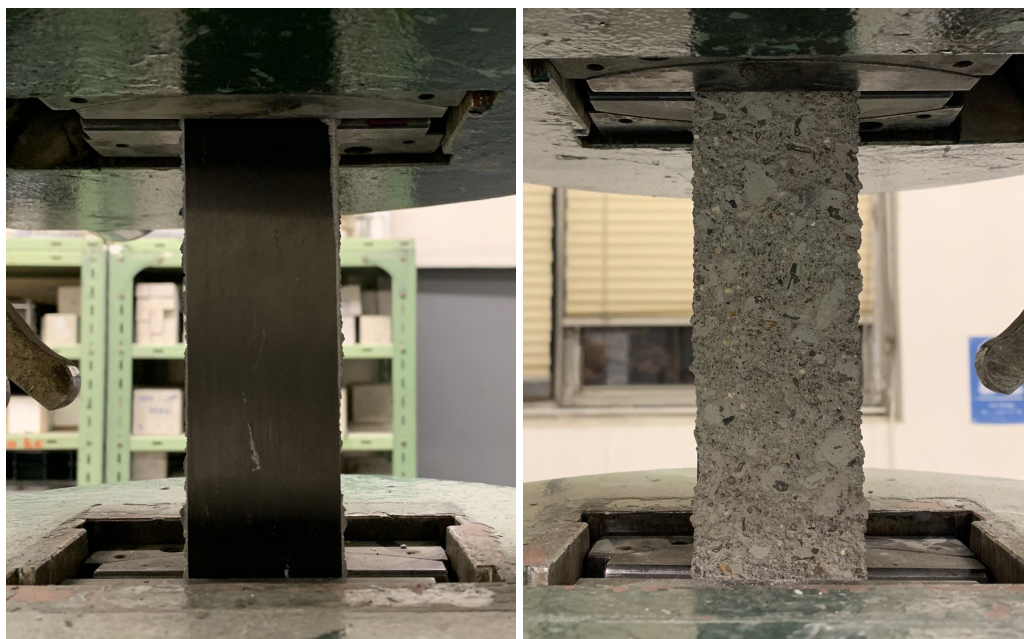


Obr. 2.15: Pracovní diagram betonářské výztuže

2.5.3 Zkouška pevnosti lamely v tahu

Zkoušení probíhá na lamelách o délce 500 mm v hydraulickém lisu (kap. 2.6a) podobným způsobem, jako se zkouší betonářská výztuž. Lamela je upnutá pomocí samosvorných čelistí tak, že její délka mezi čelistmi činí 250 mm. První pokus probíhal na samotné lamelě, ale vzhledem k nedostatečnému ukotvení mezi samosvornými čelistmi docházelo k prokluzu ukotvení, což neumožňovalo zkoušku uskutečnit.

Další pokus by proveden na lamelě s vrstvou lepidla a betonu (Obr. 2.16). Tento vzorek už bylo možné ukotvit mezi čelisti s menším prokluzem.



(a) Lamela, pohled zepředu

(b) Lamela, pohled zezadu

Obr. 2.16: Lamela při zkoušení

Po kontinuálním tažení došlo k podélné delaminaci lamely (Obr. 2.17) a zkouška byla ukončená. Maximální síla, která působila na vzorek, byla 38,2 kN. Napětí při této síle se rovná 636 MPa.



(a) Delaminovaná lamela, pohled zepředu

(b) Delaminovaná lamela, pohled zezadu

Obr. 2.17: Delaminovaná lamela

Vzhledem k nedostatečnému vybavení pro zkoušení pevnosti lamely v tahu a k porušení nevhodným způsobem není možné považovat zkoušku za platnou. Ve výpočtech se dále uvažují mechanické parametry uvedené výrobcem [23] a popsané v kapitole 2.4.3.

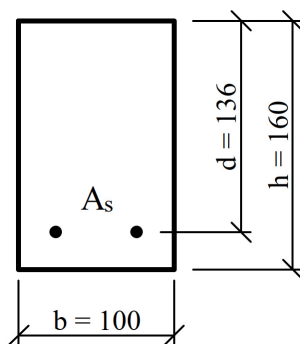
2.6 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku

Před začátkem experimentu je vhodné stanovit sílu, při které se vzorek poruší. Síla se stanoví proto, aby bylo jasné, v jakém rozmezí lze očekávat porušení. Dalším důvodem stanovení síly při porušení je zjistit, zda-li je zkušební stroj schopen tuto sílu vyvodit a porušit vzorek bezpečně.

2.6.1 Předpoklady výpočtu

Pro ruční výpočet kritické síly jsou uvažovány následující předpoklady:

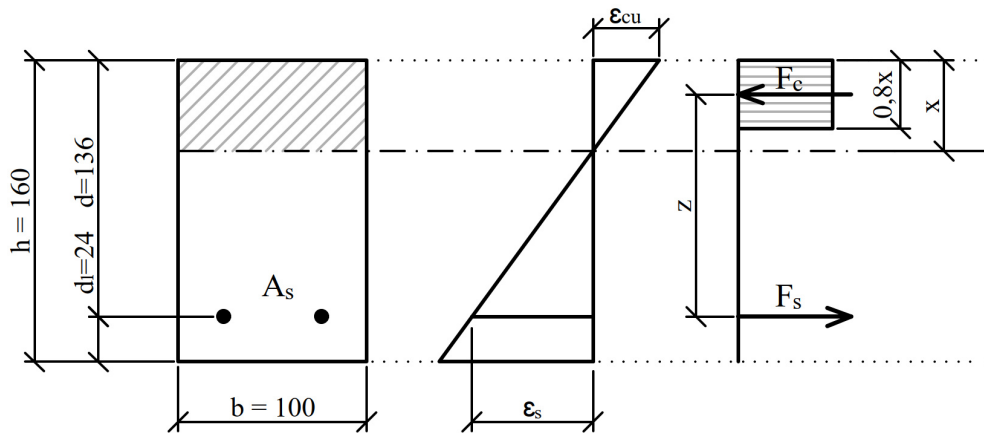
- Materiálové parametry jsou uvažovány podle kapitoly 2.4:
 - střední hodnota pevnosti betonu v tlaku $f_{cm} = 30$ MPa (kap. 2.4.1)
 - střední hodnota meze kluzu výztuže $f_{ym} = 575$ MPa (kap. 2.4.2)
 - střední hodnota modulu pružnosti lamely v tahu $E_f = 170\,000$ N/mm² (kap. 2.4.3)
- Rozměry jsou uvažovány podle kapitoly 2.2:
 - šířka $b = 100$ mm
 - výška $h = 160$ mm
 - délka $L = 1000$ mm
- Vyztužení je uvažováno podle kapitoly 2.2:
 - průměr podélné výztuže $\varnothing_s = 6$ mm
 - průměr třmíneků $\varnothing_t = 6$ mm (třmínky jsou dvoustřížné, tedy $n = 2$)
 - krytí výztuže (třmíneků) $c = 15$ mm
- Výztuž, která se uvažuje ve výpočtu, je znázorněná na Obr. 2.18 (vliv horní výztuže je zanedbán).
- Zatěžovací schéma je uvažováno jednak pro čtyřbodový ohyb (Obr. 2.3), jednak pro třibodový ohyb (Obr. 2.4).



Obr. 2.18: Analyzovaný průřez

2.6.2 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku – ruční výpočet

2.6.2.1 Trámek bez zesílení



Obr. 2.19: Rovnováha sil v železobetonovém průřezu bez zesílení

- Skutečná plocha výztuže A_s :

$$A_s = n \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varnothing_s^2}{4} \right) \quad (2.6.1a)$$

$$A_s = 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 6^2}{4} \right) = 56,5 \text{ mm}^2 \quad (2.6.1b)$$

- Účinná výška průřezu d :

$$d = h - c - \varnothing_t - \frac{\varnothing_s}{2} \quad (2.6.2a)$$

$$d = 160 - 15 - 6 - \frac{6}{2} = 136 \text{ mm} \quad (2.6.2b)$$

- Výška tlačené oblasti x :

$$x = \frac{A_s \cdot f_{ym}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cm}} \quad (2.6.3a)$$

$$x = \frac{56,5 \cdot 575}{0,8 \cdot 100 \cdot 30} = 13,54 \text{ mm} \quad (2.6.3b)$$

- Přetvoření výztuže na mezi kluzu:

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{ym}}{E_s} \quad (2.6.4a)$$

$$\varepsilon_{sy} = \frac{575}{200000} = 0,00286 \quad (2.6.4b)$$

- Ověření přetvoření výztuže (přetvoření výztuže ε_s musí být větší než přetvoření výztuže na mezi kluzu ε_{sy} , aby byl ověřen předpoklad, že napětí ve výztuži se rovná mezi kluzu výztuže):

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (d - x) \quad (2.6.5a)$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,0035}{13,54} \cdot (136 - 13,54) = 0,032 \quad (2.6.5b)$$

$$\varepsilon_s = 0,032 > \varepsilon_{sy} = 0,00286 \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.6.5c)$$

- Poměrná výška tlačené oblasti:

$$\xi = \frac{x}{d} \quad (2.6.6a)$$

$$\xi = \frac{13,54}{136} = 0,099 \quad (2.6.6b)$$

- Ověření poměrné výšky tlačené oblasti (poměrná výška tlačené oblasti ξ musí být menší než hodnota poměrné výšky tlačené oblasti ξ_{bal} , aby nedošlo k porušení drcením betonu dříve, než se výztuž dostane na mez kluzu):

$$\xi_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{sy}} \quad (2.6.7a)$$

$$\xi_{bal} = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00286} = 0,551 \quad (2.6.7b)$$

$$\xi = 0,099 < \xi_{bal} = 0,551 \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.6.7c)$$

- Rameno vnitřních sil z :

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (2.6.8a)$$

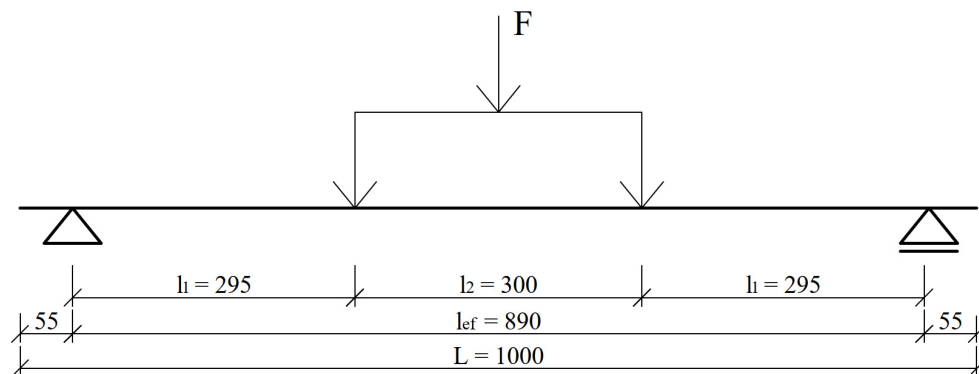
$$z = 136 - 0,4 \cdot 13,54 = 130,58 \text{ mm} \quad (2.6.8b)$$

- Moment únosnosti M_R průřezu bez zesílení:

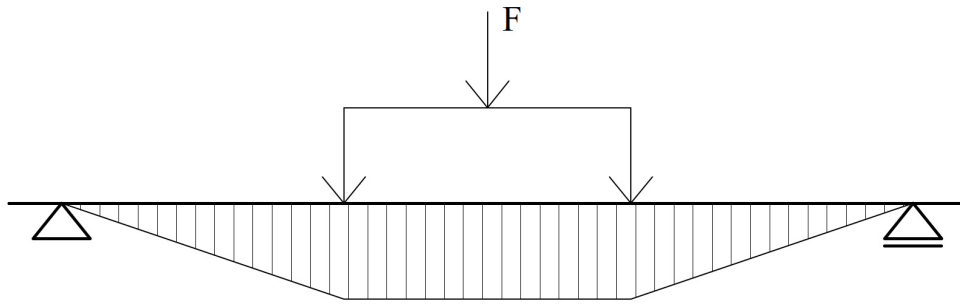
$$M_R = A_s \cdot f_{tm} \cdot z \quad (2.6.9a)$$

$$M_R = 56,5 \cdot 575 \cdot 10^{-6} \cdot 130,58 = 4,24 \text{ kNm} \quad (2.6.9b)$$

- Stanovení síly F_{4bod} při porušení čtyřbodovým ohybem (Obr. 2.20 a 2.21):



Obr. 2.20: Kritická síla při čtyřbodovém ohybu



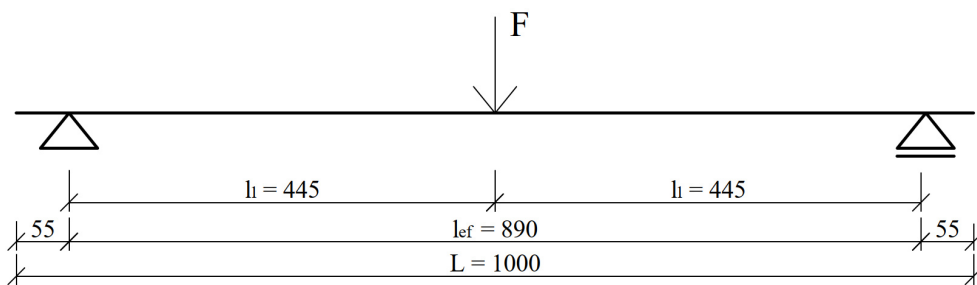
Obr. 2.21: Moment působící na trámku při čtyřbodovém ohybu

$$F_{4bod} = \frac{2 \cdot M_R}{l_1} \quad (2.6.10a)$$

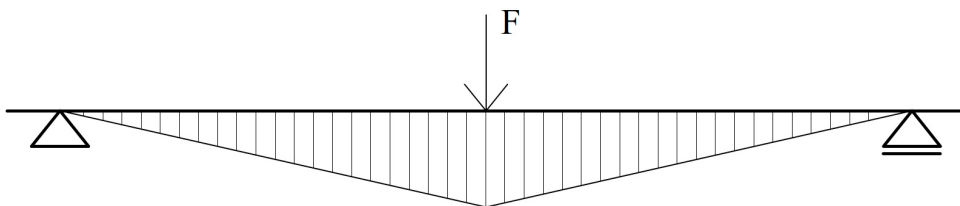
$$F_{4bod} = \frac{2 \cdot 4,24}{0,295} = 28,75 \text{ kN} \quad (2.6.10b)$$

Síla, při které by se měl porušit trámek bez zesílení v čtyřbodovém ohybu, je $F_{4bod} = 28,75 \text{ kN}$.

- Stanovení síly F_{3bod} při porušení třibodovým ohybem (Obr. 2.22 a 2.23):



Obr. 2.22: Kritická síla při třibodovém ohybu



Obr. 2.23: Moment působící na trámku při třibodovém ohybu

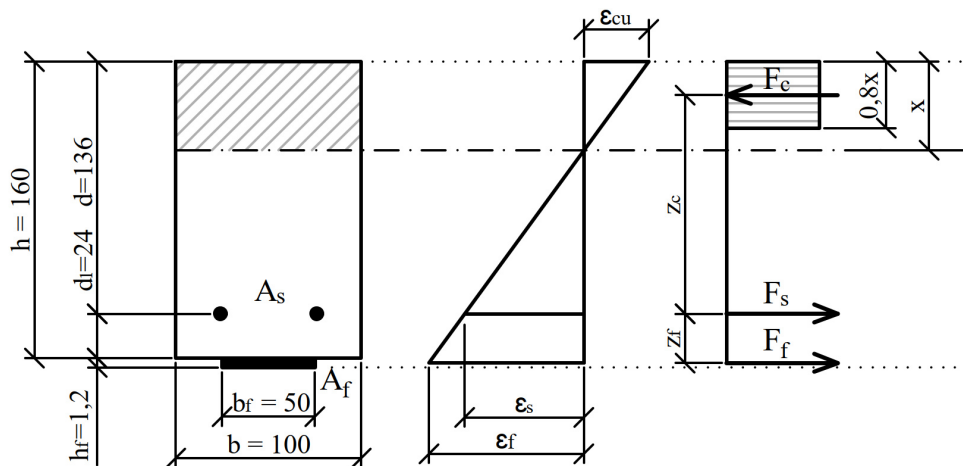
$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot M_R}{l_{ef}} \quad (2.6.11a)$$

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot 4,24}{0,890} = 19,06 \text{ kN} \quad (2.6.11b)$$

Síla, při které by se měl porušit trámek bez zesílení v třibodovém ohybu, je $F_{3bod} = 19,06 \text{ kN}$.

2.6.2.2 Trámek se zesílením

Rovnováha sil se uvažuje podle Obr. 2.24, kde se podle vztahu (2.6.12) stanoví síla v tlačném betonu F_c , podle (2.6.13) se stanoví síla ve spodní výztuži F_s , podle (2.6.14) se stanoví síla v lameli F_f .



Obr. 2.24: Rovnováha sil v železobetonovém průřezu se zesílením

- Vztahy pro stanovení sil v průřezu:

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} \quad (2.6.12)$$

$$F_s = A_s \cdot f_{ym} \quad (2.6.13)$$

$$F_f = A_f \cdot \sigma_f \quad (2.6.14a)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.6.14b)$$

- Vztah pro stanovení hodnoty přetvoření lamely:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_f}{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x} \quad (2.6.15a)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x}{x} \quad (2.6.15b)$$

- Stanovení výšky tlačené oblasti x z podmínky rovnováhy sil:

$$F_c = F_s + F_f \quad (2.6.16a)$$

$$0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} = A_s \cdot f_{ym} + A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.6.16b)$$

$$0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} = A_s \cdot f_{ym} + A_f \cdot \varepsilon_{cu} \cdot \frac{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x}{x} \cdot E_f \quad (2.6.16c)$$

$$0,8 \cdot x \cdot 100 \cdot 30 = 56,5 \cdot 575 + 60 \cdot 0,0035 \cdot \frac{\left(160 + \frac{1,2}{2}\right) - x}{x} \cdot 170000 \quad (2.6.16d)$$

$$x = 48,2 \text{ mm} \quad (2.6.16e)$$

- Stanovení hodnoty přetvoření lamely:

$$\varepsilon_f = 0,0035 \cdot \frac{\left(160 + \frac{1,2}{2}\right) - 48,2}{48,2} = 0,0082 \quad (2.6.17a)$$

- Stanovení napětí v lamele:

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.6.18a)$$

$$\sigma_f = 0,0082 \cdot 170000 = 1394 \text{ MPa} \quad (2.6.18b)$$

- Ověření přetvoření výztuže (přetvoření výztuže ε_s musí být větší než přetvoření výztuže na mezi kluzu ε_{sy} , aby byl ověřen předpoklad, že napětí ve výztuži se rovná mezi kluzu výztuže):

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \quad (2.6.19a)$$

$$\frac{0,0035}{48,2} = \frac{\varepsilon_s}{136 - 48,2} \quad (2.6.19b)$$

$$\varepsilon_s = 0,0064 \quad (2.6.19c)$$

$$\varepsilon_s = 0,0064 > \varepsilon_{sy} = 0,00286 \text{ (stanoveno v (2.6.4))} \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.6.19d)$$

- Stanovení sil v průřezu:

$$F_c = 0,8 \cdot 48,2 \cdot 100 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 115,7 \text{ kN} \quad (2.6.20)$$

$$F_f = 60 \cdot 0,0082 \cdot 170000 \cdot 10^{-3} = 83,2 \text{ kN} \quad (2.6.21)$$

- Ramena z_c a z_f vnitřních sil:

$$z_c = d - 0,4 \cdot x \quad (2.6.22a)$$

$$z_c = 136 - 0,4 \cdot 48,2 = 116,7 \text{ mm} \quad (2.6.22b)$$

$$z_f = d_1 + \frac{h_f}{2} \quad (2.6.22c)$$

$$z_f = 24 + \frac{1,2}{2} = 24,6 \text{ mm} \quad (2.6.22d)$$

- Moment únosnosti M_R průřezu se zesílením:

$$M_R = F_c \cdot z_c + F_f \cdot z_f \quad (2.6.23a)$$

$$M_R = 115,7 \cdot 0,1167 + 83,2 \cdot 0,0246 = 15,55 \text{ kNm} \quad (2.6.23b)$$

- Stanovení síly F_{Abod} při porušení čtyřbodovým ohybem:

$$F_{Abod} = \frac{2 \cdot M_R}{l_1} \quad (2.6.24a)$$

$$F_{Abod} = \frac{2 \cdot 15,55}{0,295} = 105,42 \text{ kN} \quad (2.6.24b)$$

Síla, při které by se měl porušit zesílený trámek v čtyřbodovém ohybu, je $F_{Abod} = 105,42 \text{ kN}$.

- Stanovení síly F_{3bod} při porušení třibodovým ohybem:

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot M_R}{l_{ef}} \quad (2.6.25a)$$

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot 15,55}{0,890} = 69,89 \text{ kN} \quad (2.6.25b)$$

Síla, při které by se měl porušit zesílený trápek v třibodovém ohybu, je $F_{3bod} = 69,89 \text{ kN}$.

2.6.3 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku – software „STRECO“

V této části je stanovena únosnost průřezu jak bez zesílení, tak se zesílením, a to pomocí softwaru „STRECO“, který byl vytvořen a popsán v práci [31]. V této verzi softwaru, která byla poskytnuta jeho autorem právě pro účely této práce, se veškeré bezpečnostní součinitele uvažují rovny 1. Hodnoty stanovené pomocí softwaru podle fib Bulletin 14 [2] jsou porovnány s hodnotami stanovenými pomocí ručního výpočtu v kapitole 2.6.

Po zadání všech potřebných údajů o průřezu je stanovena únosnost průřezu bez zesílení. Tyto hodnoty jsou zvýrazněné na Obr. 2.25.

ZADÁNÍ VSTUPNÍCH HODNOT + VÝPOČET PRŮŘEZU BEZ KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE

VSTUPNÍ PARAMETRY:

Rozměry:
 Šířka průřezu: $b = 100 \text{ mm}$
 Výška průřezu: $h = 160 \text{ mm}$

Beton:
 Charakteristická pevnost betonu v tlaku: $f_{ck} = 30 \text{ MPa}$

Prostředí:
 Umístění prvku: Interiér

Betonářská výztuž:
 Charakteristická mez kluzu betonářské výztuže: $f_{yk} = 575 \text{ MPa}$
 Modul pružnosti oceli v tahu: $E_s = 200000 \text{ MPa}$
 Vzdálenost dolní výztuže od dolních vláken: $d_1 = 24 \text{ mm}$
 Vzdálenost horní výztuže od horních vláken: $d_2 = 0 \text{ mm}$
 Plocha dolní tažené výztuže: $A_{s1} = 56,5 \text{ mm}^2$
 Plocha horní tažené výztuže: $A_{s2} = 0 \text{ mm}^2$

Stávající zatížení:
 Moment od stálého charakteristického zatížení: $M_{E,q,0} = 0,00001 \text{ kNm}$
 Moment od proměnného charakteristického zatížení: $M_{E,q,0} = 0,00001 \text{ kNm}$

Předpokládané zatížení po přitížení (budoucí zatížení):
 Moment od stálého charakteristického zatížení: $M_{E,q,1} = 5 \text{ kNm}$
 Moment od proměnného charakteristického zatížení: $M_{E,q,1} = 5 \text{ kNm}$

Kompozitní výztuž (vnější FRP lamela):
 Charakteristická pevnost v tahu (viz 1): $f_{fk} = 3100 \text{ MPa}$
 Charakteristické maximální přetvoření (viz 1): $\epsilon_{fk} = 0,018$
 Modul pružnosti v tahu (viz 1): $E_f = 170000 \text{ MPa}$
 Šířka lamely: $b_f = 50 \text{ mm}$
 Tloušťka lamely: $t_f = 1,2 \text{ mm}$
 Počet vrstev lamel: $n_f = 1 \text{ ks}$
 Typ kompozitní výztuže: CFRP - Unilokov

ÚNOSNOST BEZ KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE:

Plocha průřezu: $A_c = 16\,000,00 \text{ mm}^2$
 Výška tlačené oblasti (FIB): $x_c = 13,54 \text{ mm}$
 Moment únosnosti bez FRP výztuže (FIB): $M_{Rd,0} = 4,24 \text{ kNm}$
 Výška tlačené oblasti (ACI): $c_0 = 12,96 \text{ mm}$
 Moment únosnosti bez FRP výztuže (ACI): $\Phi M_{Rd,0} = 3,82 \text{ kNm}$

POSOUZENÍ BEZ KOMPOZITNÍ VÝZTUŽE (FIB):

Ohybová únosnost: $M_{Ed,0} = 0,00 \text{ kNm} \leq 4,24 \text{ kNm}$ OK
 Stávající zatížení: $M_{Ed,0} = 0,00 \text{ kNm} \leq 4,24 \text{ kNm}$ OK
 Budoucí zatížení: $M_{Ed,0} = 10,00 \text{ kNm} > 4,24 \text{ kNm}$ NOK

NOK - Posuzovaný průřez nevyhovuje - je nutné zesílení průřezu

VOYPOČÍTEJ

Obr. 2.25: Únosnost průřezu bez zesílení

Hodnoty stanovené pomocí softwaru (Obr. 2.25) a ručního výpočtu (viz vztahy (2.6.3), (2.6.9)) jsou zcela stejné, tj $x = 13,54 \text{ mm}$, $M_R = 4,24 \text{ kNm}$. Síla, při které by mělo nastat porušení v čtyřbodovém ohybu podle vztahu (2.6.10a), je stejná jako síla stanovená ručním výpočtem, tedy $F_{4bod} = 28,75 \text{ kN}$. Síla, při které by mělo nastat porušení v třibodovém ohybu podle vztahu (2.6.11a), je stejná jako vychází ručním výpočtem, tedy $F_{3bod} = 19,06 \text{ kN}$. Lze tedy konstatovat, že ruční stanovení síly při porušení je správné.

Hodnoty stanovené pomocí softwaru (Obr. 2.26) a ručního výpočtu (viz vztahy (2.6.16), (2.6.23)) zesíleného průřezu se liší minimálně. Podle softwaru je výška tlačené oblasti $x = 48,12$ mm, moment únosnosti $M_R = 15,48$ kNm. Síla, při které by mělo nastat porušení v čtyřbodovém ohybu podle vztahu (2.6.10a)), je $F_{4bod} = 104,95$ kN. Síla, při které by mělo nastat porušení v třibodovém ohybu podle vztahu (2.6.11a), je $F_{3bod} = 69,57$ kN. Odchylinky jsou způsobeny nepřesností zaokrouhlení, ale hodnoty lze považovat za shodné. Lze tedy konstatovat, že ruční stanovení síly při porušení je správné.

STRECO
Kalkulačka Prohlížeč 21:27:58 čtvrtek 28. prosince 2023

VÝPOČET MSÚ A MSP PODLE FIB BULLETIN 14 - PRŮŘEZ ZESÍLENÝ FRP

MSÚ - OHYBOVÁ ÚNOSNOST PROSTĚHO NOSNÍKU:

Plocha kompozitní výtuzže: $A_f = 60,00$ mm²
 Modul pružnosti betonu: $E_c = 30\,588,56$ MPa
 Moment od stálého zatížení: $M_0 = 0,00$ kNm
 Moment na mezi vzniku trhliny: $M_{cr} = 1,30$ kNm
 Přetvoření betonu při působení momentu ϵ_{co} : $\epsilon_{co} = 0,000000$ -
 Přetvoření spodních vláken průřezu při instalaci FRP ϵ_o : $\epsilon_o = 0,000000$ -
Výška tlačené oblasti: $x = 48,12$ mm
 Přetvoření krajních vláken betonu: $\epsilon_c = -0,003500$ -
 Přetvoření tažené betonářské výtuzže: $\epsilon_{S1} = 0,006392$ -
 Přetvoření tlačené betonářské výtuzže: $\epsilon_{S2} = 0,000000$ -
 Přetvoření FRP výtuzže: $\epsilon_f = 0,008137$ -
 Napětí v tažené betonářské výtuzži: $\sigma_{S1} = 575,00$ MPa
 Napětí v tlačené betonářské výtuzži: $\sigma_{S2} = 0,00$ MPa
 Efektivní napětí v FRP: $\sigma_f = 1\,383,36$ MPa
 Součinitel pro beton - účinná výška tlačené oblasti: $\psi = 0,80$ -
 Poměrná výška tlačené oblasti: $\xi = 0,35$ -
 Limitní podmínka pro poměrnou výšku tlačené oblast $\xi = 0,45$ -
Moment únosnosti průřezu: $M_{Rd} = 15,48$ kNm

MSP - PRŮŘEZOVÉ CHARAKTERISTIKY:

Výška tlačené oblasti průřezu (bez trhlín): $x_1 = 81,26$ mm
 Moment setrvačnosti průřezu (bez trhlín): $I_1 = 35\,265\,687,17$ mm⁴

MSP - OMEZENÍ NAPĚTÍ:

Napětí v betonu: $\sigma_{c,msp} = 23,04$ MPa
 Napětí v tažené betonářské výtuzži: $\sigma_{s,msp} = 101,48$ MPa
 Napětí v FRP výtuzži: $\sigma_{f,msp} = 124,08$ MPa

POSOUZENÍ S KOMPOZITNÍ VÝTUŽÍ:

MSÚ:

	$M_{Ed,i}$	$M_{Rd,i}$	
Ohybová únosnost:	0,00 kNm	15,48 kNm	OK
Stávající zatížení:	10,00 kNm	15,48 kNm	OK
Budoucí zatížení:	10,00 kNm	15,48 kNm	OK

MSP:

	$\sigma_{i,msp}$	$\sigma_{i,max}$	
Napětí v materiálu:	23,04 MPa	18,00 MPa	NOK
Beton:	101,48 MPa	480,00 MPa	OK
Betonářská výtuzž (tažená):	124,08 MPa	2\,480,00 MPa	OK
FRP výtuzž:	124,08 MPa	2\,480,00 MPa	OK

NOK - Posuzovaný průřez nesplňuje podmínku pro zesílení

VZORCE

Autor: Bc. Stanislav Voráček
Verze: 1.2. (27.12.2023)

Obr. 2.26: Únosnost průřezu se zesílením

V Tab. 2.3 lze vidět porovnání hodnot, získaných pomocí ručního výpočtu a softwaru „STRECO“.

Hodnota	M_R [kNm]	M_R [kNm]	F_{3bod} [kN]	F_{3bod} [kN]	F_{4bod} [kN]	F_{4bod} [kN]
Ruční výpočet	4,24	15,55	19,06	69,89	28,75	105,42
„STRECO“	4,24	15,48	19,06	69,57	28,75	105,95

Tab. 2.3: Porovnání výsledků ručního výpočtu a softwaru „STRECO“

2.6.4 Ověření smykové únosnosti

Smyková únosnost se stanoví pouze pro železobetonový prvek bez lamely (vliv zesílení je zanedbán). Působící posouvající síla V_{Ed} se uvažuje pro odhadovanou maximální působící sílu, tedy pro prvek se zesílením (Tab. 2.3). $V_{Ed} = F_{4bod}/2 = 105,95/2 = 52,98$ kN. Materiálové parametry a předpoklady výpočtu jsou uvažovány podle kapitol 2.4 a 2.6.1. Sklon smykové trhliny je uvažován tak, že $\cot \theta = 1,5$.

- Únosnost tlačené diagonály:

$$V_{Rd} = \nu \cdot f_{cm} \cdot b \cdot z \cdot \frac{\cot \theta}{1 + \cot^2 \theta} \quad (2.6.26a)$$

$$\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{f_{cm}}{250}\right) \quad (2.6.26b)$$

$$\nu = 0,6 \cdot \left(1 - \frac{30}{250}\right) = 0,528 \quad (2.6.26c)$$

$$V_{Rd} = 0,528 \cdot 30 \cdot 100 \cdot 130,58 \cdot \frac{1,5}{1 + 1,5^2} = 95,46 \text{ kN} \quad (2.6.26d)$$

Únosnost tlačené diagonály $V_{Rd} = 95,45 \text{ kN}$ je větší než působící posouvající síla $V_{Ed} = 52,98 \text{ kN}$. Nemělo by tedy dojít k poškození prvku rozdrčením betonu v tlačené diagonále.

- Požadovaná rozteč třmínků:

$$s_{req} = \frac{A_{sw} \cdot f_{ym}}{V_{Ed}} \cdot z \cdot \cot \theta \quad (2.6.27a)$$

$$A_{sw} = n \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varnothing_t^2}{4}\right) \quad (2.6.27b)$$

$$A_{sw} = 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 6^2}{4}\right) = 56,5 \text{ mm}^2 \quad (2.6.27c)$$

$$s_{req} = \frac{56,5 \cdot 575}{52,98} \cdot 130,58 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 120,1 \text{ mm} \quad (2.6.27d)$$

Požadovaná rozteč třmínků se rovná 120,1 mm, což je více než navržená rozteč 90 mm. Navržená rozteč tedy splňuje podmínku na požadovanou rozteč.

Tímto ověřením lze konstatovat, že smyková únosnost by měla být dostatečná pro všechny zkoušené trámký.

2.7 Výroba vzorků

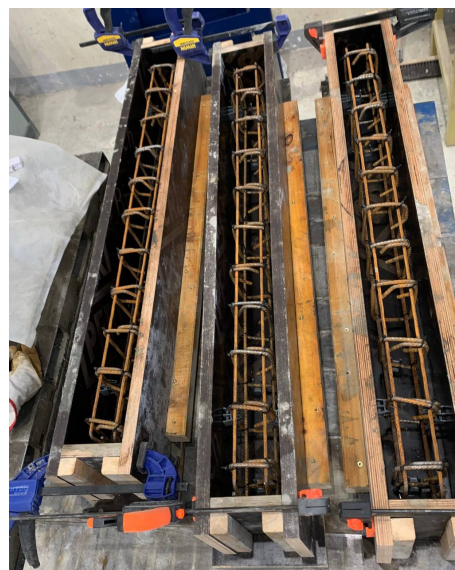
Celkem je vyrobeno 36 trámek a 36 krychlí. Ze 36 trámek 18 obsahuje termočlánky pro zkoušení za vysokých teplot, což ale není předmětem této diplomové práce. V rámci této diplomové práce je zkoušeno 9 trámek a 15 krychlí za běžných teplot.

Výroba vzorků probíhala 11 dní vždy s intervalem 3–4 dní pro vytvrzení. Během jednoho dne, vzhledem k počtu bednicích forem, byly vyrobeny 3 trámký a 3 krychle.

Výroba vždy začíná přípravou potřebných materiálů, výztuže a bednicích forem. Následně probíhá vyvázání armokošů (Obr. 2.27). Na armokoše jsou osazeny distančníky pro zajištění krytí. Následně se armokoše umístí do předem připravených bednicích forem (Obr. 2.28).



Obr. 2.27: Hotové armokoše



Obr. 2.28: Umístěné armokoše ve formě

Dalším krokem je výroba betonové směsi podle receptury zmíněné v kapitole 2.4.1. Po přípravě a navážení všech nutných složek (Obr. 2.29) budoucí betonové směsi jsou smíchány suché komponenty jako cement, kamenivo a písek (Obr. 2.30).



Obr. 2.29: Navážené suché složky



Obr. 2.30: Sloučení jednotlivých suchých složek

Postupně se během míchání přidává voda (Obr. 2.31) a po kontinuálním míchání je směs připravena k ukládce (Obr. 2.32).



Obr. 2.31: Míchání směsi po přidání vody



Obr. 2.32: Hotová směs

Jakmile je směs připravena, následuje ukládka betonu do forem s osazenými armokoši. Následně jsou vyrobeny krychle pro zkoušky tlakové pevnosti (Obr. 2.33). Finálním krokem je přikrytí čerstvě vybetonovaných vzorků fólií, aby se zabránilo nežádoucímu odpařování vody (Obr. 2.34).

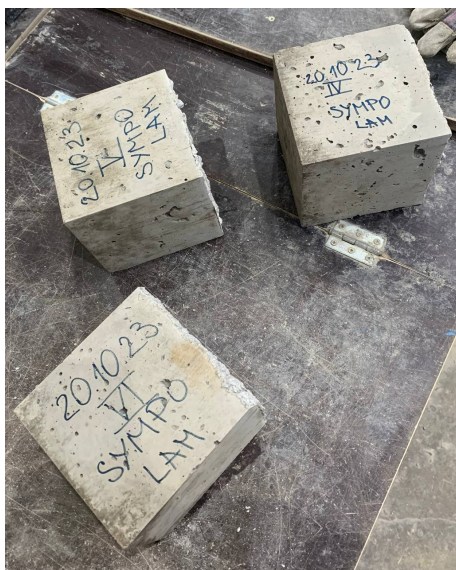


Obr. 2.33: Čerstvé vzorky



Obr. 2.34: Čerstvé vzorky přikryté fólií

Po 3 dnech beton vykazuje dostatečnou tlakovou pevnost, a tak je možné vyjmout vzorky z forem (Obr. 2.35 a 2.36).



Obr. 2.35: Vytvrzené krychle



Obr. 2.36: Vytvrzené trámky

2.8 Lepení lamel

Na trámky, které jsou na Obr. 2.37, se ve staří 28 dní nalepí lamela podle postupu popsaného v kapitole 1.2.3. Prvním krokem je měření vlhkosti, z Obr. 2.38 je patrné, že vlhkost vzorku je 1,6 % hm., což je méně než maximální přípustná hodnota. Je tedy možné přistoupit k lepení lamel.



Obr. 2.37: Trámky před nalepením



Obr. 2.38: Měření vlhkosti

Povrch trámku je zdrsněn ocelovým kartáčem a zbaven prachových částic (Obr. 2.39). Poté je lamela očištěna (Obr. 2.40) od zbytkového prachu a odmaštěna.

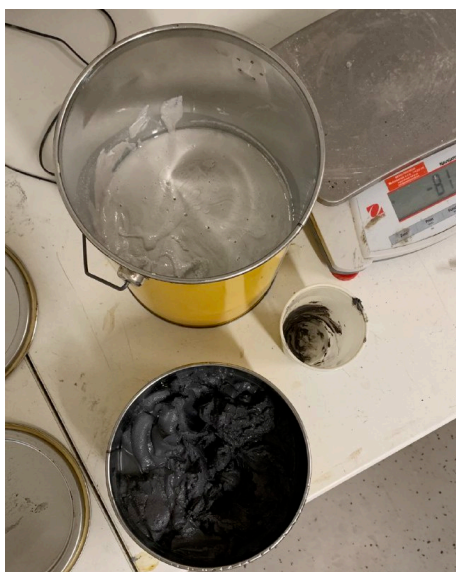


Obr. 2.39: Příprava povrchu trámku



Obr. 2.40: Čistění lamely

Namíchá se dvousložkové lepidlo v poměru: 3 × složka A (pryskyřice – bílá barva) a 1 × složka B (tužidlo – černá barva).



Obr. 2.41: Složky lepidla



Obr. 2.42: Míchání lepidla

Nanesení lepidla v tloušťce 1 mm na trámek lze vidět na Obr. 2.43. Lepidlo je naneseno také na lamelu. Při aplikaci na lamelu je nutné nanášet lepidlo „do stříšky“ s tloušťkou v krajích 1 mm a uprostřed 2 mm.

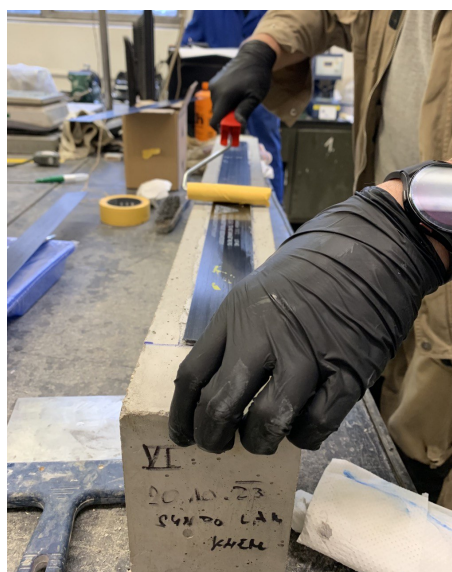


Obr. 2.43: Nanesené lepidlo na trámku a lamele

Po nanesení lepidla je lamela umístěna na trámek, jak je zachyceno na Obr. 2.44. Následně je lamela přitlačena rovnoměrně pomocí válečku, jak je znázorněno na Obr. 2.45.



Obr. 2.44: Lepení lamely



Obr. 2.45: Přitlačení lamely válečkem

Obdobný postup je opakován pro všechny ostatní trámky.



Obr. 2.46: Nalepené lamely na trámky



Obr. 2.47: Nalepené lamely na trámky s termočlánky

2.9 Zkoušky únosnosti v ohybu

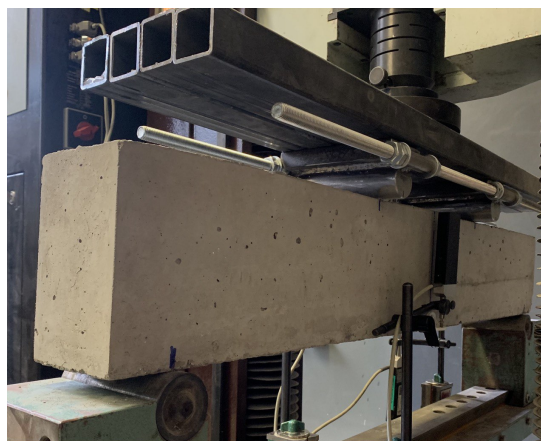
V rámci experimentální analýzy byla provedena ohybová zkouška 9 trámků. Přesné rozměry a podrobné údaje o každém trámku jsou uvedeny v příloze B. Jako první byly zkoušeny 3 trámky bez zesílení pro následné porovnání se zesílenými trámky. Zkoušení probíhalo v elektromechanickém lisu (kapitola 2.3.2), zatěžování bylo řízená přírůstkem deformace (0,2 mm/min). Zkoušení se provádělo do dosažení únosnosti (porušení) trámku.

2.9.1 Trámky bez zesílení

Nejdříve se zkušební těleso musí připravit. V rámci přípravy se trámek v místech podpor a působícího zatížení zabrousí (Obr. 2.48). Zabroušení se provádí z důvodu zajištění dosednutí zatěžovacích válečků na horní betonovanou plochu (trámky nejsou zkoušeny kolmo na směr hutnění). Následně se po přeměření a vážení trámek osadí do lisu (Obr. 2.49).



Obr. 2.48: Zabroušení povrchu trámku



Obr. 2.49: Trámek bez zesílení osazený v lisu

Trámek osazený v lisu se opatří třemi inkrementálními snímači dráhy. Snímače dráhy jsou umístěny ve spodní části trámku tak, aby měřily deformace uprostřed rozpětí z obou stran a z jedné strany pod působící silou (Obr. 2.50).

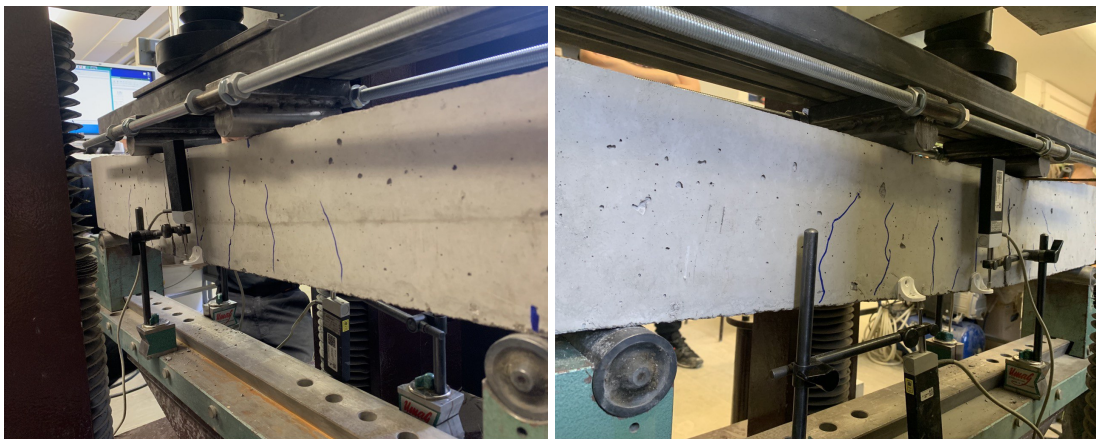


(a) Snímače, pohled zprava

(b) Snímač, pohled zleva

Obr. 2.50: Inkrementální snímače dráhy na trámku

Po zapnutí lisu je trámek zatěžován konstantním přírůstkem deformace. Při zatížení trámku na 10–15 kN se začaly objevovat první ohybové trhliny (Obr. 2.51), které se následně rozvíjely (Obr. 2.52) do porušení zkušebního tělesa. Šířka trhliny před porušením činila 0,7 cm, po porušení činila víc jak 1 cm.



(a) První ohybové trhliny, pohled zprava

(b) První ohybové trhliny, pohled zleva

Obr. 2.51: První ohybové trhliny

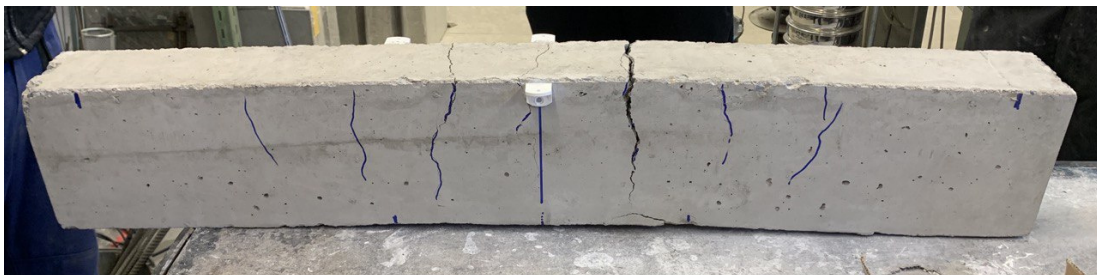


(a) Trhlina před porušením

(b) Trhlina po porušení

Obr. 2.52: Rozvoj trhlin

V místě hlavní ohybové trhliny (Obr. 2.53) došlo k porušení zkušebního tělesa přetržením výztuže (Obr. 2.54 a 2.55). Obdobným způsobem byly zkoušeny všechny trámky bez zesílení. V příloze B jsou popsány jednotlivé hodnoty pro každý trámek. Maximální síla, kterou dosáhlo zkušební těleso bez zesílení – trámek T3, měla hodnotu 34 kN. Průhyb při této síle se rovnal 10,22 mm. Průhyb byl stanoven jako průměr ze dvou hodnot od dvou snímačů uprostřed rozpětí.



Obr. 2.53: Trámek po porušení

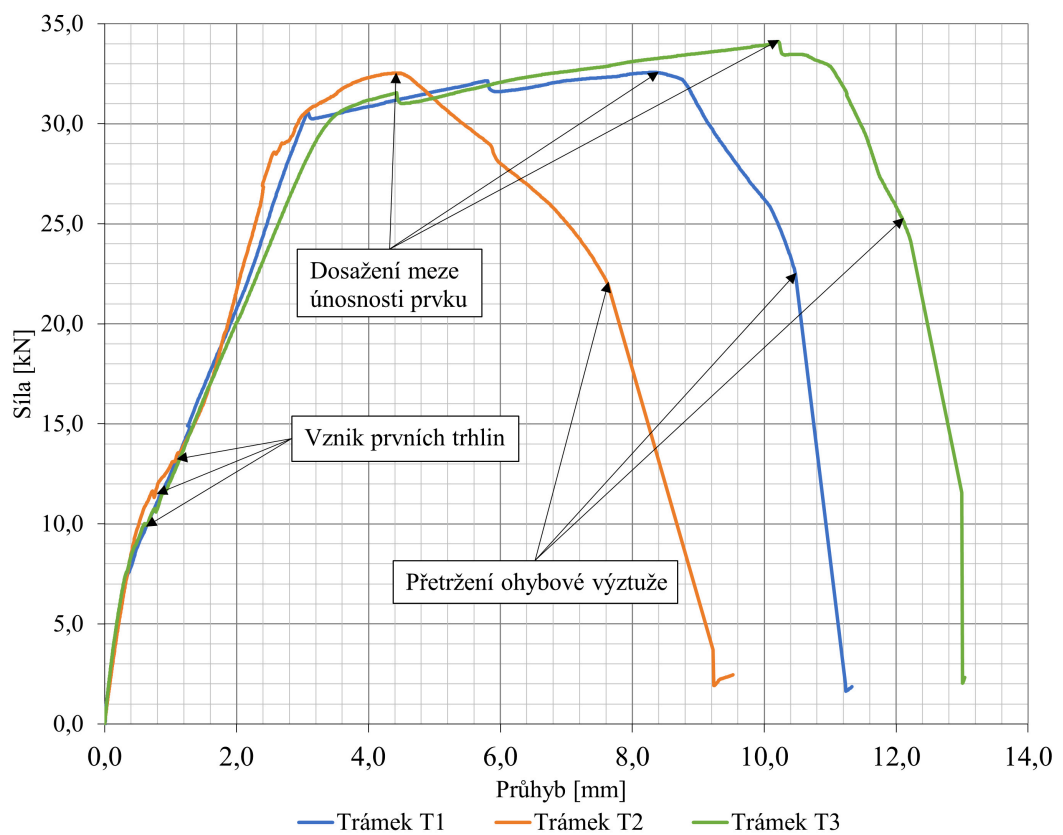


Obr. 2.54: Obnažení výztuže



Obr. 2.55: Přetržená výztuž

Průběh působícího zatížení v závislosti na průměrných hodnotách deformace v polovině rozpětí trámku je patrný z grafu na Obr. 2.56.



Obr. 2.56: Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámky bez zesílení

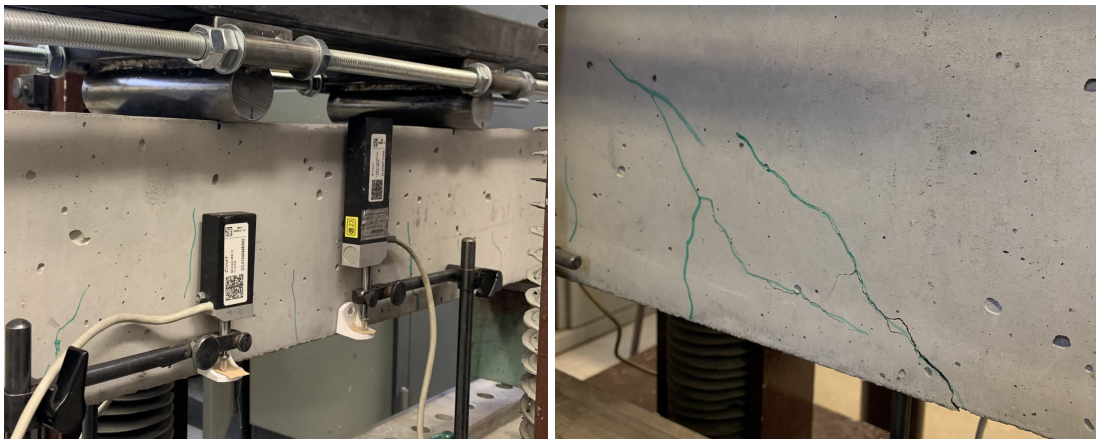
2.9.2 Trámky zesílené v ohybu

Obdobným způsobem jako trámky bez zesílení (kapitola 2.9.1) byly zkoušeny i trámky zesílené v ohybu.



Obr. 2.57: Trámek zesílený lamelou osazený v lisu pro zkoušení na čtyřbodový ohyb

První ohybové trhliny se na rozdíl od vzorků bez zesílení začaly objevovat při 27 kN (Obr. 2.58a). Větší vliv na chování trámku zesíleného v ohybu měly ale smykové trhliny (Obr. 2.58b).

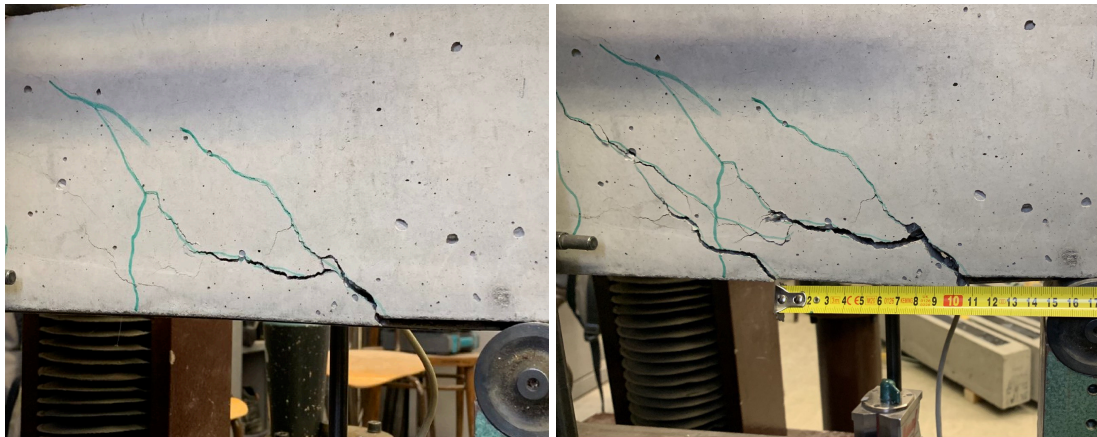


(a) Ohybové trhliny

(b) Smykové trhliny

Obr. 2.58: První trhliny

Z Obr. 2.59a je patrné, jak trhlinka, která vznikla vedle podpory, při rozvoji pod úhlem cca 45°, byla zachycena třmínkem a nepokračovala ve svém směru. Následně měla tato trhlinka tendenci se rozvíjet ve spodní části trámku pod menším úhlem. Postupně vznikla dále od podpory další smyková trhlinka, která již nebyla zachycena třmínkem (Obr. 2.59b).

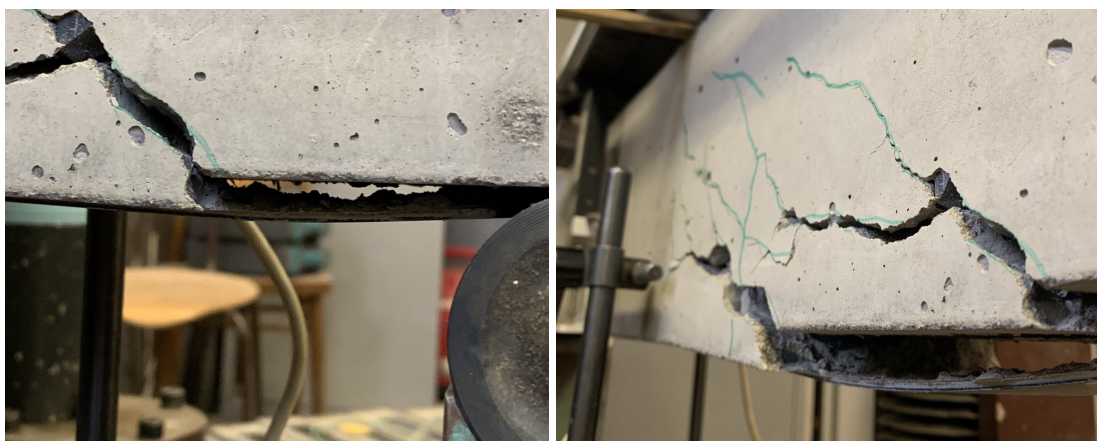


(a) Trhlina, zachycená třmínkem

(b) Trhlina, nezachycená třmínkem

Obr. 2.59: Smykové trhliny – rozvoj

Lze předpokládat, že kvůli smykovému porušení trámku v blízkosti podpory došlo k částečnému odchlípnutí lamely (Obr. 2.60a). Z tohoto důvodu bylo působící zatížení přenášeno pouze tuhostí železobetonového průřezu, a proto brzy nastalo porušení v nejslabším místě (Obr. 2.60b). Obdobně byl zkoušen i trámek zesílený v ohybu T5.



(a) Odchlípnutí lamely vedle podpory

(b) Odchlípnutí lamely a porušení trámku

Obr. 2.60: Odchlípnutí lamely

Při zkoušení trámků zesílených v ohybu T4 a T5 na čtyřbodový ohyb vykázaly tyto trámky dobré vlastnosti v ohybu, a proto nedošlo k porušení v místě hlavní ohybové trhliny, jako tomu bylo u trámků bez zesílení (kapitola 2.9.1). U trámků zesílených v ohybu docházelo k porušení v místě smykových trhlín (Obr. 2.61), což způsobilo odchlípnutí lamely včetně krycí vrstvy betonu (Obr. 2.62). Únosnosti bylo dosaženo porušením smykem za ohybu při přetržení ohybové výztuže (Obr. 2.63). Maximální síla při čtyřbodovém ohybu, kterou dosáhlo zkušební těleso zesílené v ohybu (trámek T5), byla 49,14 kN. Průhyb pro tento trámek při maximální síle činil 3,1 mm. V příloze B jsou popsány jednotlivé hodnoty pro všechny trámky.



Obr. 2.61: Trámek zesílený v ohybu po porušení



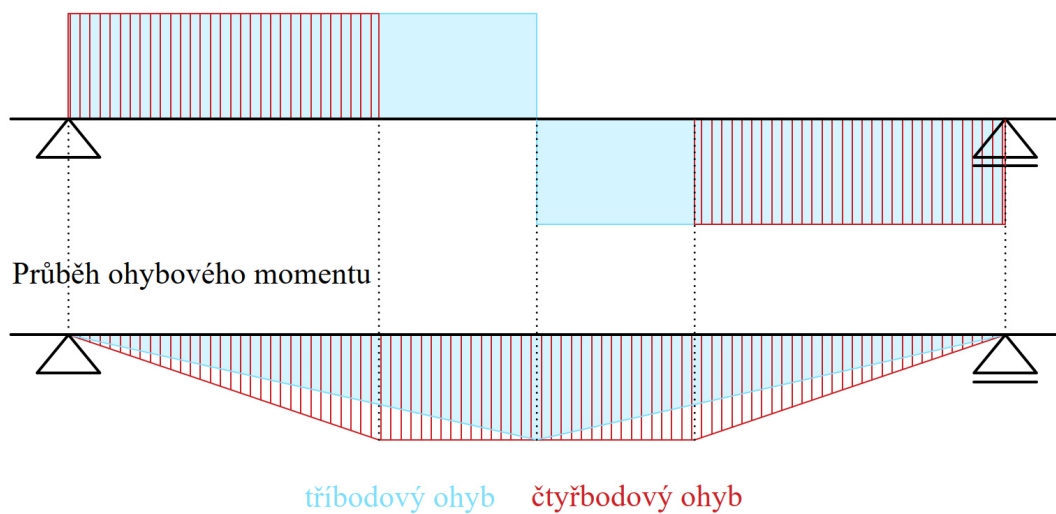
Obr. 2.62: Odchlípnutí lamely s krycí vrstvou betonu



Obr. 2.63: Přetržená ohybová výztuž v místě smykové trhliny

Vzhledem k odlišnému průběhu posouvající síly při tříbodovém a čtyřbodovém ohybu (Obr. 2.64) byl pro porovnání způsobů porušení zkoušen trámek zesílený v ohybu T6 na tříbodový ohyb (Obr. 2.65).

Průběh posouvající síly

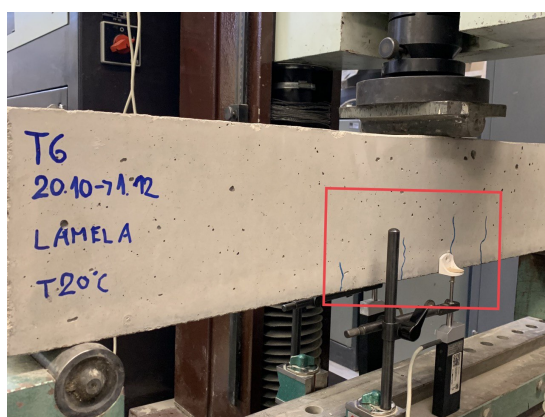


Obr. 2.64: Průběhy vnitřních sil při třibodovém a čtyřbodovém ohybu



Obr. 2.65: Trámek zesílený v ohybu osazený v lisu pro zkoušení na třibodový ohyb

Jako první se objevily ohybové trhliny (Obr. 2.66). Následně se projevil i smykové trhliny (Obr. 2.67).

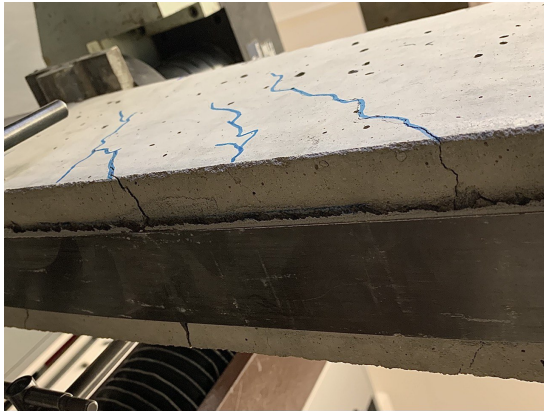


Obr. 2.66: Ohybové trhliny – třibodový ohyb

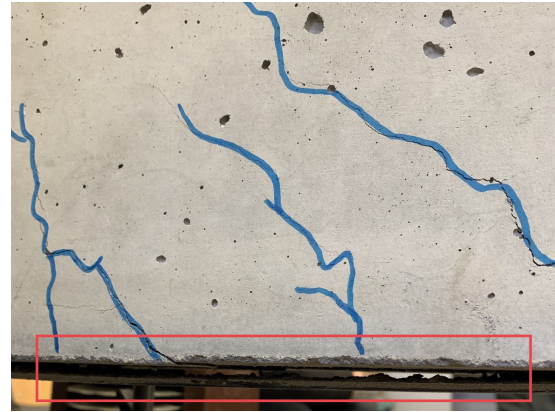


Obr. 2.67: Smykové trhliny – třibodový ohyb

Rozvoj smykových trhlin (Obr. 2.68) způsobil porušení vzorku, což bylo jednou z příčin odchlípnutí lamely (Obr. 2.69). Síla, při které došlo k odchlípnutí lamely, se rovnala 46,2 kN. Průhyb při této síle se rovnal 3,49 mm. Po odchlípnutí lamely se působící zatížení přenášelo pouze tuhostí železobetonového průřezu.



Obr. 2.68: Rozvoj smykových trhlin – tříbodový ohyb



Obr. 2.69: Odchlípnutí lamely – tříbodový ohyb

Největší trhlina byla zaznamenána přibližně uprostřed rozpětí (Obr. 2.70).



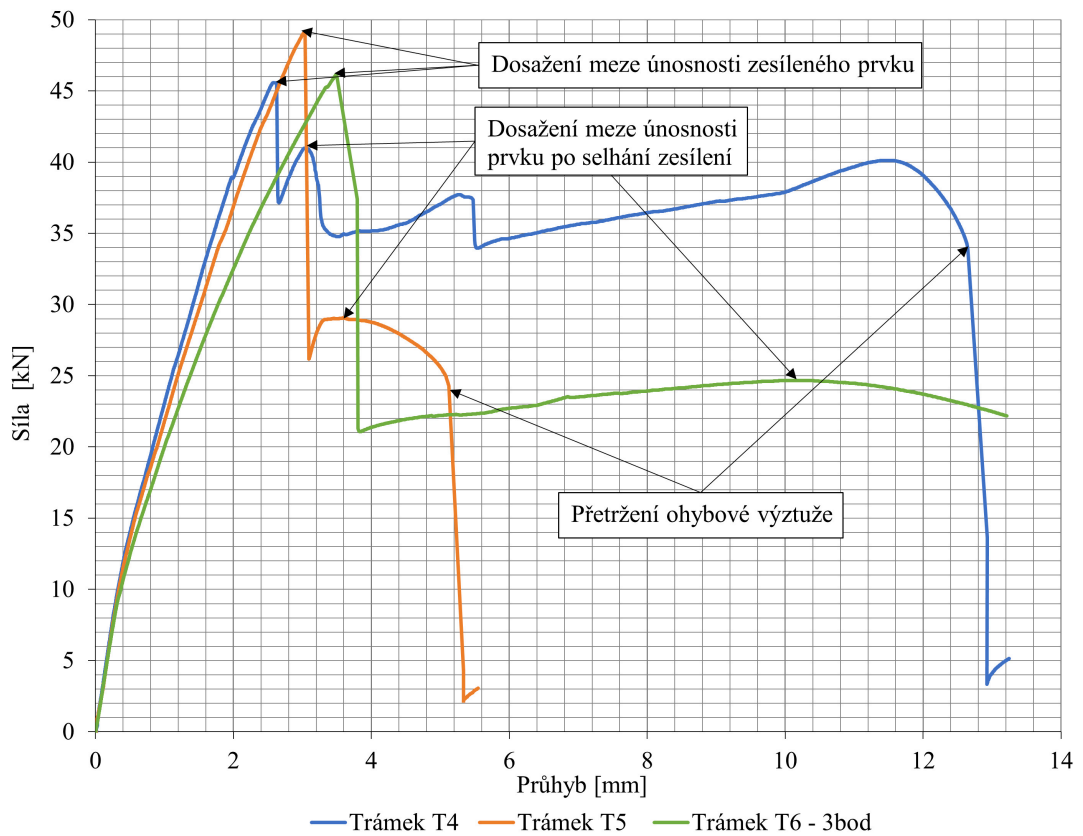
Obr. 2.70: Trápek se zesílením na ohyb po porušení – tříbodový ohyb

Zkouška byla ukončena dříve, než nastalo přetržení výztuže. V nejvýznamnější trhlině (Obr. 2.71) došlo k protažení výztužných prutů (Obr. 2.72), nedošlo však k jejich přetržení.



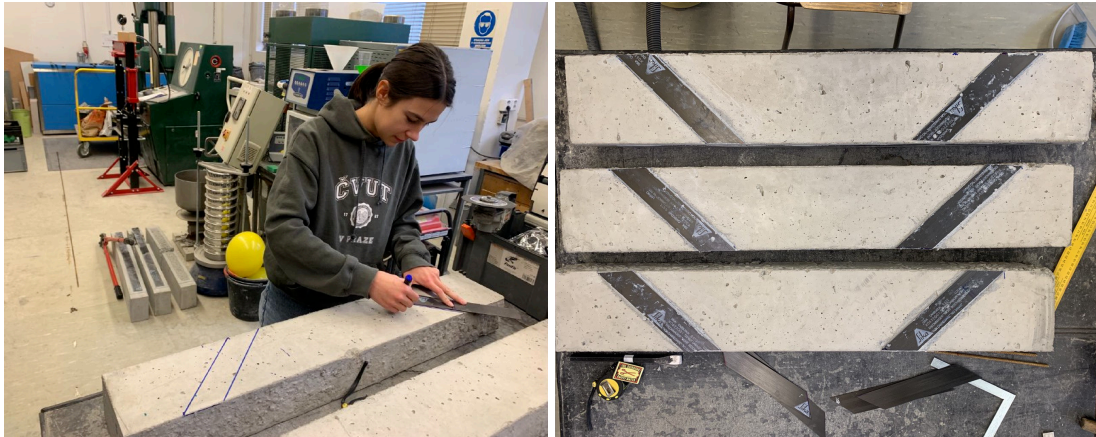
Obr. 2.71: Významná trhlina – třibodový ohyb **Obr. 2.72:** Protážené výztuže – třibodový ohyb

Průběh působícího zatížení v závislosti na průměrných hodnotách průhybu v polovině rozpětí trámku je patrný z grafu na Obr. 2.73. Graf znázorňuje průběhy pro tři trámky se zesílením v ohybu.



Obr. 2.73: Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámky zesílené v ohybu

Jelikož cílem experimentálního programu bylo analyzovat chování zesílených prvků v ohybu, byl dosažený způsob porušení vyhodnocen jako nevhodný a bylo rozhodnuto, že další vzorky budou zesíleny také na smyk (Obr. 2.74). Zesílení (lepení lamel) bylo provedeno obdobným způsobem, jak je popsáno v kapitole 2.8.



(a) Proces lepení „smykových“ lamel

(b) Nalepené „smykové“ lamely

Obr. 2.74: Zesílení trámů ve smyku

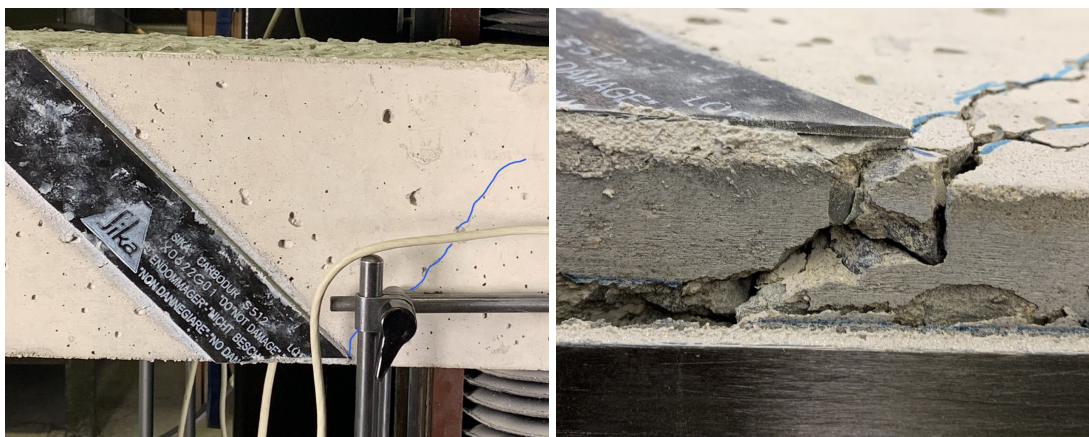
2.9.3 Trámky zesílené v ohybu a smyku

První trámek T10 (Obr. 2.75) zesílený v ohybu a smyku byl zkoušen na třibodový ohyb obdobným způsobem, jako byl zkoušen trámek T6 v kapitole 2.9.2.



Obr. 2.75: Trámek zesílený lamelou v ohybu a smyku osazený v lisu pro zkoušení na třibodový ohyb

První trhлина (Obr. 2.76a), která se objevila na trámku, byla nejvýznamnější pro porušení. Lze předpokládat, že kvůli rozvoji této trhliny (Obr. 2.76b) nastalo odchlípnutí ohybové lamely (Obr. 2.77).

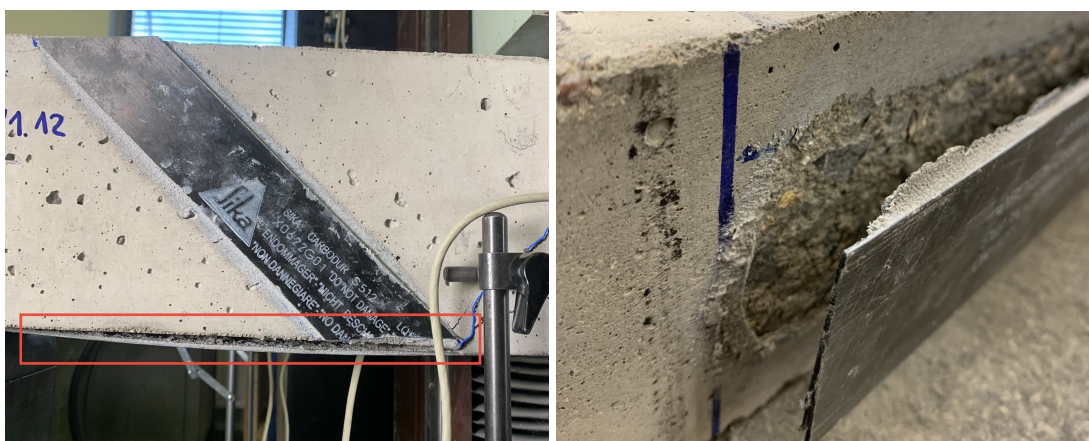


(a) Vznik první trhliny

(b) Rozvinutá první trhlina (pohled zespodu)

Obr. 2.76: První (nejvýznamnější) trhlina na trámku zesíleném v ohybu a smyku při zkoušení na tříbodový ohyb

Na rozdíl od trámek zkoušených na čtyřbodový ohyb, u kterých docházelo k odchlípnutí nejdříve v místě vedle podpory (Obr. 2.60a), u trámku zkoušeného na tříbodový ohyb nejdříve došlo k odchlípnutí ohybové lamely v místě kotvení smykové lamely (Obr. 2.77a).

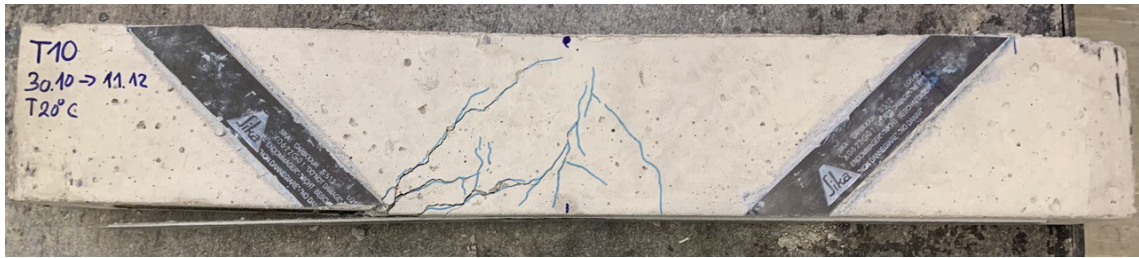


(a) Začátek odchlípnutí

(b) Odchlípnutí na konci zkoušky

Obr. 2.77: Odchlípnutí lamely na trámku zesíleném v ohybu a smyku při zkoušení na tříbodový ohyb

Po odchlípnutí lamely se působící zatížení přenášelo pouze tuhostí železobetonového průřezu. Porušení smykem nastalo kvůli nevhodnému způsobu zesílení trámku pro zkoušení na tříbodový ohyb. Maximální síla, kterou bylo zatíženo zkušební těleso, byla 36,2 kN. Průhyb při této síle se rovnal 7,4 mm. Průběh působícího zatížení v závislosti na průhybu je patrný z grafu na Obr. 2.85.



Obr. 2.78: Tráemek zesílený v ohybu a smyku po porušení – třibodový ohyb

Trámky T11 (Obr. 2.79a) a T12 (Obr. 2.79b) byly zkoušeny na čtyřbodový ohyb obdobným způsobem jako trámky bez zesílení (kap.2.9.1) a trámky zesílené v ohybu (kap. 2.9.2).

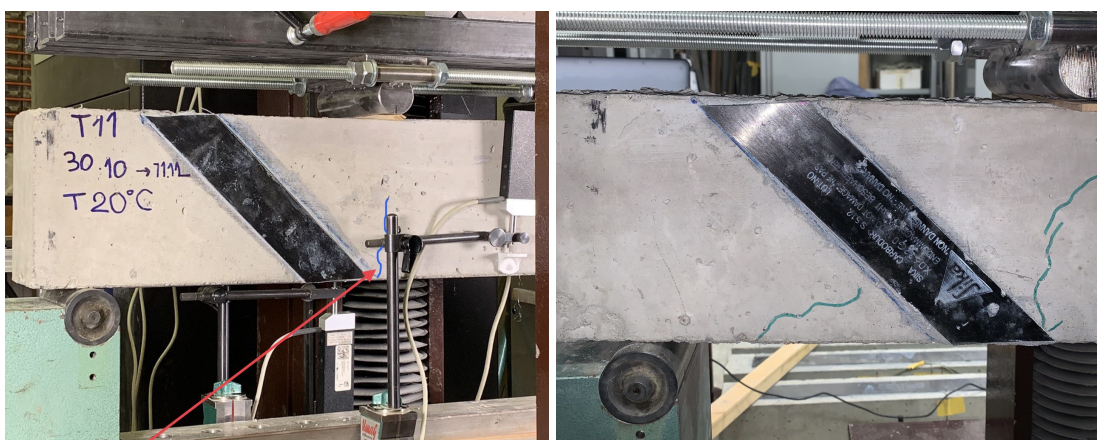


(a) Tráemek T11

(b) Tráemek T12

Obr. 2.79: Trámky zesílené lamelou v ohybu a smyku osazené v lisu pro zkoušení na čtyřbodový ohyb

První trhliny se začaly (Obr. 2.80a) objevovat při působícím zatížení 45 kN a průhybu 2 mm, následně vznikaly smykové trhliny. Na Obr. 2.80b je vidět, jak byla vzniklá smyková trhlina zachycená lamelou na smyk a neměla tendenci pokračovat dál, jako tomu bylo u trámků bez zesílení lamelou na smyk (Obr. 2.59).

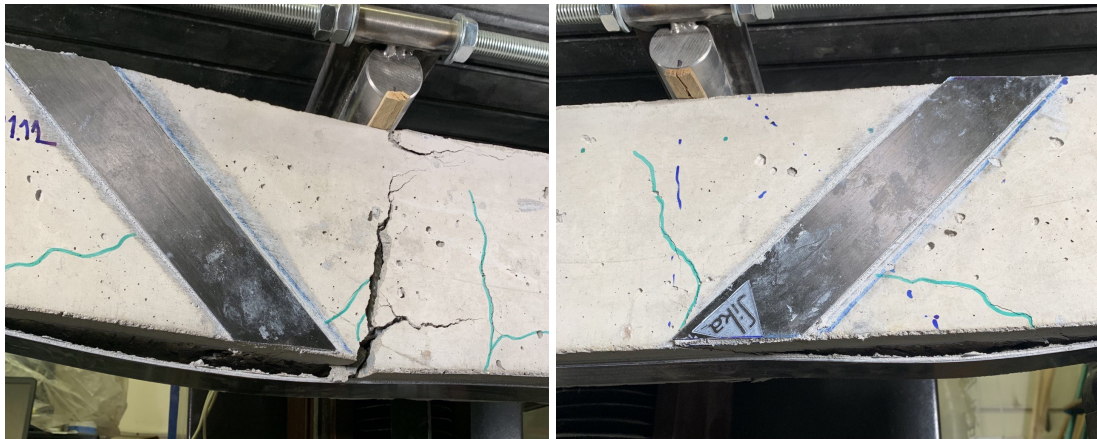


(a) První ohybová trhlina

(b) Smykové trhliny

Obr. 2.80: První trhliny trámků zesílených lamelou v ohybu a smyku – zkoušení na čtyřbodový ohyb

U trámek zesílených v ohybu a smyku došlo k odchlípnutí lamely, ale ne v místě podpory jako tomu bylo u trámek bez zesílení ve smyku (Obr. 2.60). Odchlípnutí ohybové lamely v tomto případě bylo z obou stran trámku (Obr. 2.81). Dá se předpokládat, že odchlípnutí ohybové lamely bylo způsobeno rozevřením trhlin v blízkosti smykové lamely.

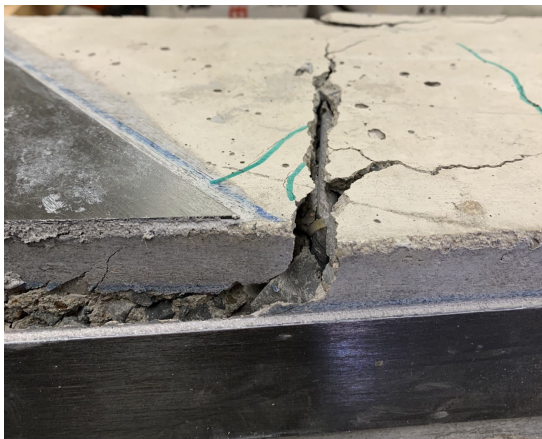


(a) Odchlípnutí lamely vlevo

(b) Odchlípnutí lamely vpravo

Obr. 2.81: Odchlípnutí lamely z obou stran trámku

Trhлина vlevo pro trámek T11 byla nejvýznamnější (Obr. 2.82), následně v ní došlo k přetržení výztuže (Obr. 2.83). Maximální síla, kterou byl zatížen trámek, byla 52,9 kN. Průhyb při této síle činil 2,2 mm.



Obr. 2.82: Významná trhлина – čtyřbodový ohyb



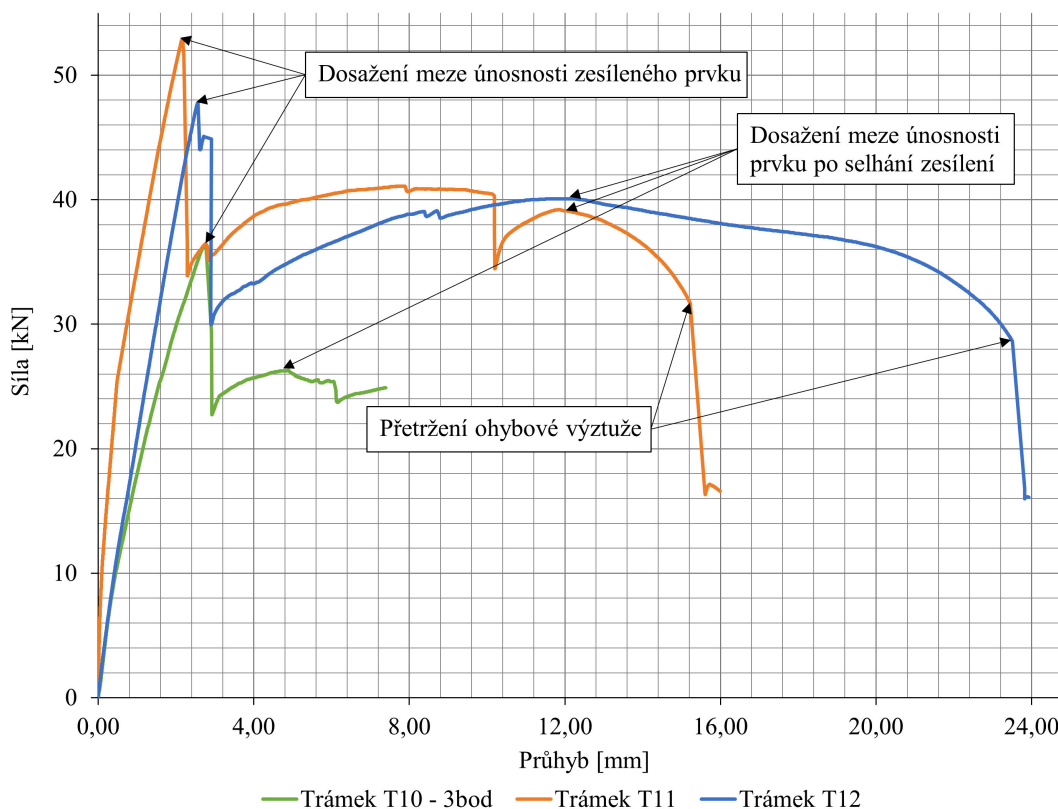
Obr. 2.83: Přetržení výztuže – čtyřbodový ohyb

Lze předpokládat, že trámek se porušil (Obr. 2.84) kombinací smyku a ohybu.



Obr. 2.84: Trámek zesílený na ohyb a smyk po porušení

Průběh působícího zatížení v závislosti na průměrných hodnotách průhybu v polovině rozpětí trámku, je patrný z grafu na Obr. 2.85. Graf znázorňuje průběhy pro tři trámký zesílené v ohybu a smyku.

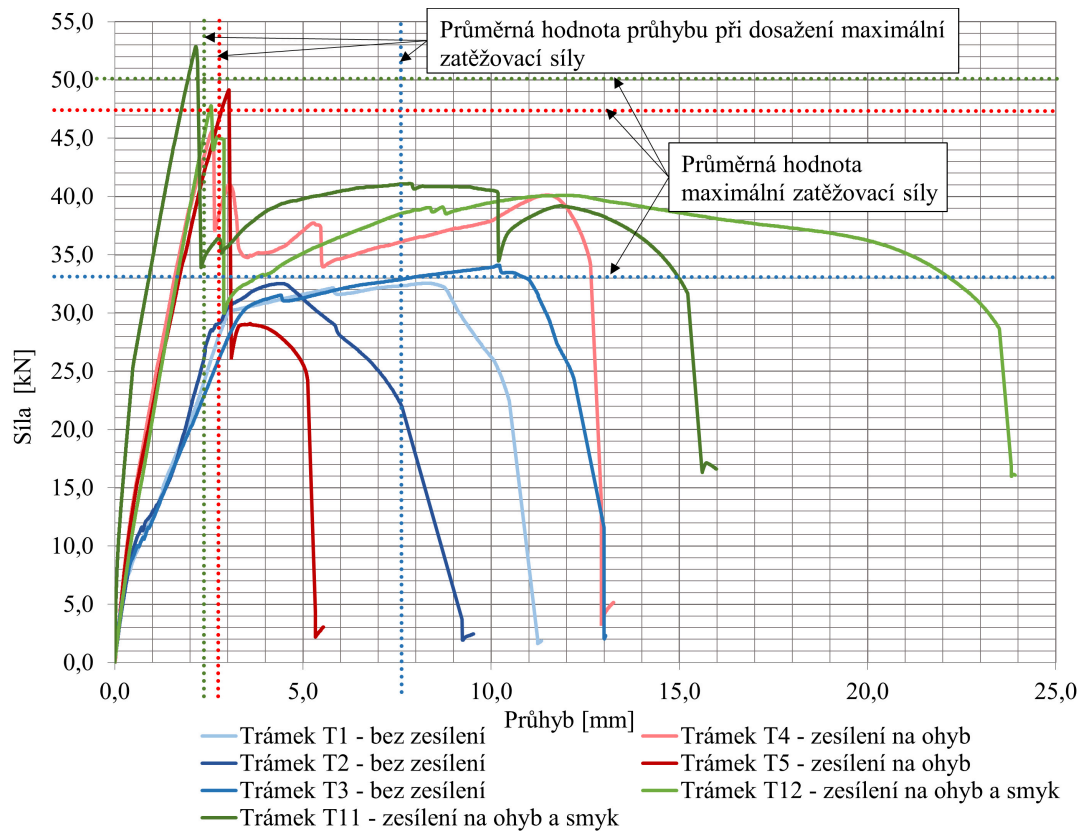


Obr. 2.85: Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámký zesílené v ohybu a smyku

2.9.4 Zhodnocení experimentů

Cílem experimentálního programu bylo analyzovat chování prvků zesílených v ohybu. Trámký bez zesílení byly vždy porušeny vhodným způsobem, tzn. v ohybu. U zesílených trámků byla prokázána vysoká tuhost v ohybu, násobě vyšší než ve smyku. U zesílených trámků ale k požadovanému způsobu porušení nedocházelo. V místě největšího smykového napětí vždy nastávalo odchlípnutí ohybové lamely, což znamenalo dřívější selhání zkušebního tělesa ve smyku než v ohybu.

Na grafu na Obr. 2.86 je vidět porovnání průběhů zatěžování trámků při zkoušení na čtyřbodový ohyb.



Obr. 2.86: Porovnání průběhů trámků zkoušených na čtyřbodový ohyb

Z grafu na Obr. 2.86 je patrné, že zesílené trámky (T4, T5, T11, T12) přenesly větší zatěžovací sílu a vykazovaly menší průhyby než trámky bez zesílení (T1, T2, T3).

Průměrná hodnota maximální zatěžovací síly nezesílených trámků (T1, T2, T3) zkoušených na čtyřbodový ohyb činí 33,1 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly je 7,68 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro nezesílené trámky T1, T2 a T3 je $M_R = 4,88$ kNm (2.9.1).

$$M_R = \frac{F_{Abod}}{2} \cdot l_1 \quad (2.9.1a)$$

$$M_R = \frac{33,1}{2} \cdot 0,295 = 4,88 \text{ kNm} \quad (2.9.1b)$$

U trámů zesílených v ohybu (T4, T5) zkoušených na čtyřbodový ohyb je průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 47,4 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly je 2,8 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro trámky zesílené v ohybu T4 a T5 je $M_R = 6,99$ kNm (2.9.2).

$$M_R = \frac{F_{Abod}}{2} \cdot l_1 \quad (2.9.2a)$$

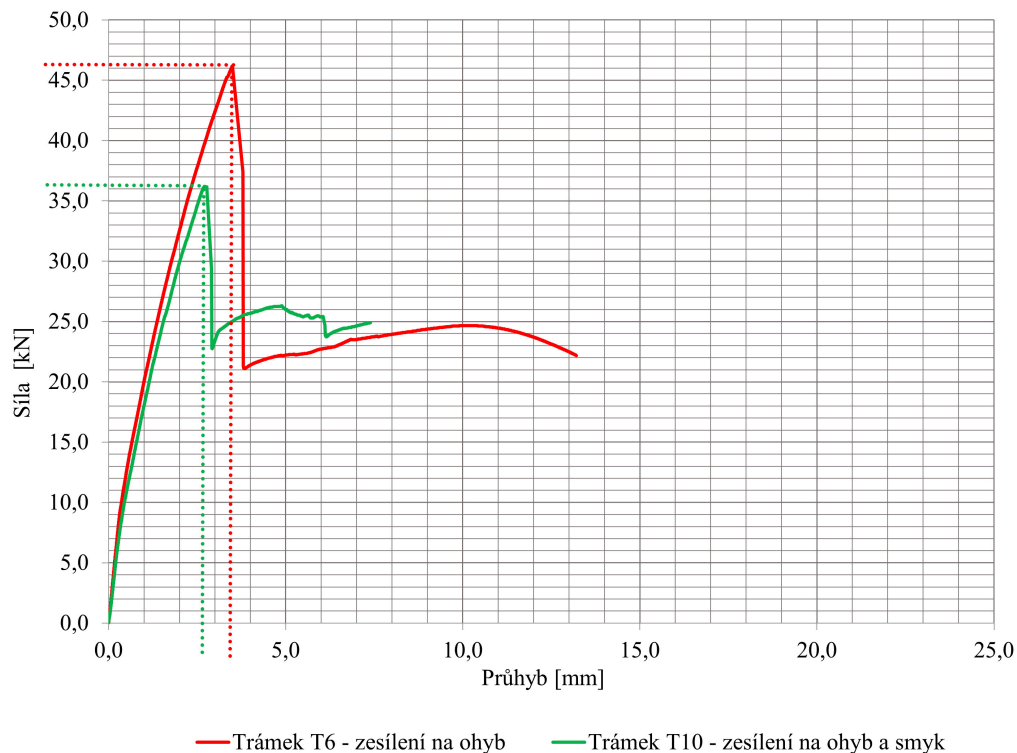
$$M_R = \frac{47,4}{2} \cdot 0,295 = 6,99 \text{ kNm} \quad (2.9.2b)$$

U trámek se zesílením v ohybu a smyku (T11, T12) zkoušených na čtyřbodový ohyb činí průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 50,3 kN. Průměrná hodnota průhybu při dosažení maximální zatěžovací síly je 2,4 mm. Ohybový moment odpovídající průměrné hodnotě maximální zatěžovací síly pro trávky zesílené v ohybu a smyku T11 a T12 je $M_R = 7,42 \text{ kNm}$ (2.9.3).

$$M_R = \frac{F_{4bod}}{2} \cdot l_1 \quad (2.9.3a)$$

$$M_R = \frac{50,3}{2} \cdot 0,295 = 7,42 \text{ kNm} \quad (2.9.3b)$$

Na grafu na Obr. 2.87 lze vidět porovnání průběhů zatěžování trámek zkoušených na třibodový ohyb.



Obr. 2.87: Porovnání průběhů trámek zkoušených na třibodový ohyb

Pro trávky zesílené v ohybu T6 zkoušený na třibodový ohyb je maximální zatěžovací síla 46,18 kN. Hodnota průhybu při dosažení této síly je 3,49 mm. Ohybový moment odpovídající maximální zatěžovací síle pro trávky zesílené v ohybu T6 je $M_R = 10,27 \text{ kNm}$ (2.9.4).

$$M_R = \frac{F_{3bod}}{2} \cdot \frac{l_{ef}}{2} \quad (2.9.4a)$$

$$M_R = \frac{46,18}{2} \cdot \frac{0,890}{2} = 10,27 \text{ kNm} \quad (2.9.4b)$$

Pro trávky zesílené v ohybu a smyku T10 zkoušený na třibodový ohyb je maximální zatěžovací síla 36,18 kN. Hodnota průhybu při dosažení této síly je 2,78 mm. Ohybový moment odpovídající maximální zatěžovací síle pro trávky zesílené v ohybu a smyku T10 je $M_R = 8,05 \text{ kNm}$ (2.9.5).

$$M_R = \frac{F_{3bod}}{2} \cdot \frac{l_{ef}}{2} \quad (2.9.5a)$$

$$M_R = \frac{36,18}{2} \cdot \frac{0,890}{2} = 8,05 \text{ kNm} \quad (2.9.5b)$$

Trámek zesílený v ohybu (T6) vykázal lepší charakteristiky, než vykázal trámek zesílený v ohybu a smyku (T10). Dá se předpokládat, že tento jev byl způsoben horší kvalitou výroby zkušební tělesa. Po rozříznutí trámku bylo zjištěno, že krycí vrstva nosné výztuže tohoto trámku byla větší než u ostatních trámků. Tím pádem měl průřez menší rameno vnitřních síl, tedy měl menší i moment únosnosti. Porovnání pouze dvou vzorků mezi sebou v tomto případě není dostatečné pro analýzu chování prvků.

2.10 Návrh budoucího experimentu

Pro následnou analýzu chování prvků zesílených v ohybu je vhodné pro další experimenty upravit zkušební tělesa tak, aby byly vlastnosti lamely lépe využity. Je potřeba, aby zkušební těleso nebylo náchylné ke smykovému porušení, čehož lze docílit nižší výškou vzorku nebo menší roztečí smykové výztuže.

Jelikož jsou již zkušební trámky pro další sérii experimentů vyrobeny, bude využita možnost zkoušet je v poloze „naležato“, tzn. otočit průřez o 90°. Další důležitou úpravou navrženou pro další experimenty je zvětšení délky kotvení. To bude realizováno tak, že lamela bude nalepena na celou délku trámku a podepření bude upraveno tak, aby nedocházelo ke kontaktu podpory a lamely.

Také je možné zvážit použití dalších zesilujících prvků pro řádné zakotvení lamely, jak je znázorněno např. na Obr. 1.3.

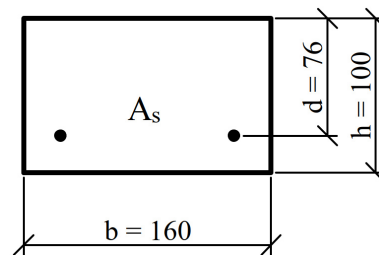
V dalších kapitolách jsou stanoveny síly pro upravené zkušební trámky bez zesílení a se zesílením. Vlastní provedení a vyhodnocení těchto upravených experimentů již není součástí této diplomové práce a bude předmětem dalšího výzkumu v rámci řešeného grantového projektu.

2.10.1 Předpoklady výpočtu

Pro ruční výpočet kritické síly budoucího experimentu se uvažují následující předpoklady:

- Materiálové parametry se uvažují stejné, jako se předpokládaly u původního návrhu experimentu podle kapitoly 2.4:
 - střední hodnota hodnota pevnosti betonu v tlaku $f_{cm} = 30 \text{ MPa}$ (kap. 2.4.1)
 - střední hodnota meze kluzu výztuže $f_{ym} = 575 \text{ MPa}$ (kap. 2.4.2)
 - střední hodnota modulu pružnosti lamely v tahu $E_f = 170\,000 \text{ N/mm}^2$ (kap. 2.4.3)
- Rozměry se uvažují tak, jako se předpokládaly u původního návrhu experimentu podle kapitoly 2.2, pouze výška a šířka se prohodí:
 - šířka $b = 160 \text{ mm}$
 - výška $h = 100 \text{ mm}$

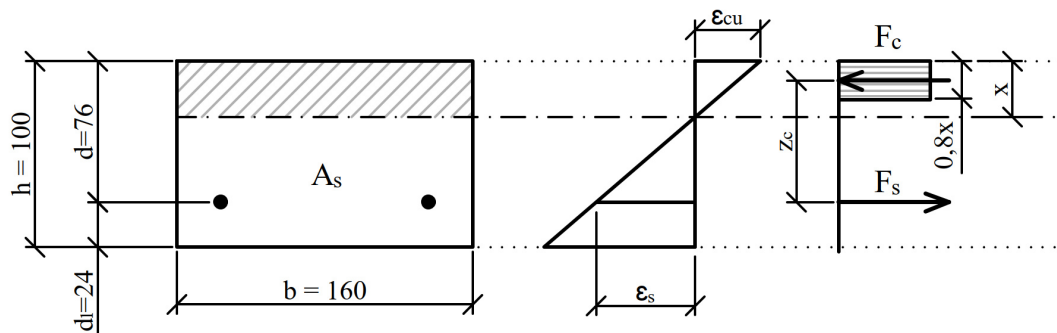
- délka $L = 1000 \text{ mm}$
- Vyztužení se uvažuje stejné jako u původního návrhu experimentu podle kapitoly 2.2:
 - průměr podélné výztuže $\varnothing_s = 6 \text{ mm}$
 - průměr třmínek $\varnothing_t = 6 \text{ mm}$
 - krytí výztuže (třmíneků) $c = 15 \text{ mm}$
- Výztuž, která se uvažuje ve výpočtu, je znázorněná na Obr. 2.88 (vliv horní výztuže je zanedbán)
- Zatěžovací schéma se uvažuje stejné jako u původního návrhu experimentu – jednak pro čtyřbodový ohyb (Obr. 2.3), jednak pro třibodový ohyb (Obr. 2.4).



Obr. 2.88: Analyzovaný průřez budoucího experimentu

2.10.2 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku bez zesílení

Rovnováha sil se uvažuje podle Obr. 2.89.



Obr. 2.89: Rovnováha sil v železobetonovém průřezu bez zesílení

- Skutečná plocha výztuže A_s :

$$A_s = n \cdot \left(\frac{\pi \cdot \varnothing_s^2}{4} \right) \quad (2.10.1a)$$

$$A_s = 2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot 6^2}{4} \right) = 56,5 \text{ mm}^2 \quad (2.10.1b)$$

- Účinná výška průřezu d :

$$d = h - c - \varnothing_t - \frac{\varnothing_s}{2} \quad (2.10.2a)$$

$$d = 100 - 15 - 6 - \frac{6}{2} = 76 \text{ mm} \quad (2.10.2b)$$

- Výška tlačené oblasti x :

$$x = \frac{A_s \cdot f_{ym}}{0,8 \cdot b \cdot f_{cm}} \quad (2.10.3a)$$

$$x = \frac{56,5 \cdot 575}{0,8 \cdot 160 \cdot 30} = 8,46 \text{ mm} \quad (2.10.3b)$$

- Přetvoření výztuže na mezi kluzu:

$$\varepsilon_{sy} = \frac{f_{ym}}{E_s} \quad (2.10.4a)$$

$$\varepsilon_{sy} = \frac{575}{200000} = 0,00286 \quad (2.10.4b)$$

- Ověření přetvoření výztuže (přetvoření výztuže ε_s musí být větší než přetvoření výztuže na mezi kluzu ε_{sy} , aby byl ověřen předpoklad, že napětí ve výztuži se rovná mezi kluzu výztuže):

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_{cu}}{x} \cdot (d - x) \quad (2.10.5a)$$

$$\varepsilon_s = \frac{0,0035}{8,46} \cdot (100 - 8,46) = 0,038 \quad (2.10.5b)$$

$$\varepsilon_s = 0,038 > \varepsilon_{sy} = 0,00286 \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.10.5c)$$

- Poměrná výška tlačené oblasti:

$$\xi = \frac{x}{d} \quad (2.10.6a)$$

$$\xi = \frac{8,46}{76} = 0,111 \quad (2.10.6b)$$

- Ověření poměrné výšky tlačené oblasti (poměrná výška tlačené oblasti ξ musí být menší než hodnota poměrné výšky tlačené oblasti ξ_{bal} , aby nedošlo k porušení drčením betonu dříve, než se výztuž dostane na mez kluzu):

$$\xi_{bal} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{cu} + \varepsilon_{sy}} \quad (2.10.7a)$$

$$\xi_{bal} = \frac{0,0035}{0,0035 + 0,00286} = 0,551 \quad (2.10.7b)$$

$$\xi = 0,111 < \xi_{bal} = 0,551 \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.10.7c)$$

- Rameno vnitřních sil z :

$$z = d - 0,4 \cdot x \quad (2.10.8a)$$

$$z = 76 - 0,4 \cdot 8,46 = 72,62 \text{ mm} \quad (2.10.8b)$$

- Moment únosnosti M_R průřezu bez zesílení:

$$M_R = A_s \cdot f_{tm} \cdot z \quad (2.10.9a)$$

$$M_R = 56,5 \cdot 575 \cdot 10^{-6} \cdot 72,62 = 2,36 \text{ kNm} \quad (2.10.9b)$$

- Stanovení síly F_{Abod} při porušení čtyřbodovým ohybem (Obr. 2.20):

$$F_{Abod} = \frac{2 \cdot M_R}{l_1} \quad (2.10.10a)$$

$$F_{Abod} = \frac{2 \cdot 2,36}{0,295} = 16 \text{ kN} \quad (2.10.10b)$$

Síla, při které by se měl porušit trámeček bez zesílení v čtyřbodovém ohybu, je $F_{Abod} = 16 \text{ kN}$.

- Stanovení síly F_{3bod} při porušení třibodovým ohybem (Obr. 2.22):

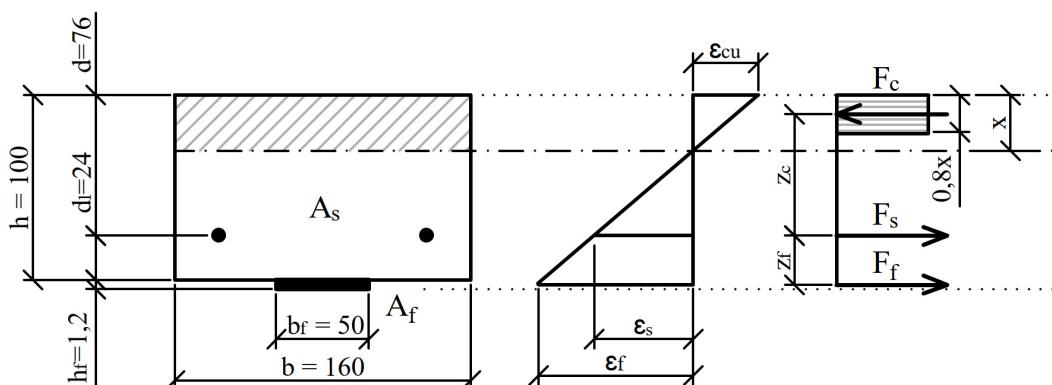
$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot M_R}{l_{ef}} \quad (2.10.11a)$$

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot 2,36}{0,890} = 10,6 \text{ kN} \quad (2.10.11b)$$

Síla, při které by se měl porušit trámeček bez zesílení v třibodovém ohybu, je $F_{3bod} = 10,6 \text{ kN}$.

2.10.3 Stanovení předpokládané síly při porušení trámku se zesílením v ohybu

Rovnováha sil se uvažuje podle Obr. 2.90, kde se podle vztahu (2.10.12) stanoví síla v tlaceném betonu F_c , podle (2.10.13) se stanoví síla ve spodní výztuži F_s , podle (2.10.14) se stanoví síla v lamelě F_f .



Obr. 2.90: Rovnováha sil v železobetonovém průřezu se zesílením

- Vztahy pro stanovení sil v průřezu:

$$F_c = 0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} \quad (2.10.12)$$

$$F_s = A_s \cdot f_{ym} \quad (2.10.13)$$

$$F_f = A_f \cdot \sigma_f \quad (2.10.14a)$$

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.10.14b)$$

- Vztah pro stanovení hodnoty přetvoření lamely:

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_f}{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x} \quad (2.10.15a)$$

$$\varepsilon_f = \varepsilon_{cu} \cdot \frac{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x}{x} \quad (2.10.15b)$$

- Stanovení výšky tlačené oblasti x z podmínky rovnováhy sil:

$$F_c = F_s + F_f \quad (2.10.16a)$$

$$0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} = A_s \cdot f_{ym} + A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.10.16b)$$

$$0,8 \cdot x \cdot b \cdot f_{cm} = A_s \cdot f_{ym} + A_f \cdot \varepsilon_{cu} \cdot \frac{\left(h + \frac{h_f}{2}\right) - x}{x} \cdot E_f \quad (2.10.16c)$$

$$0,8 \cdot x \cdot 160 \cdot 30 = 56,5 \cdot 575 + 60 \cdot 0,0035 \cdot \frac{\left(100 + \frac{1,2}{2}\right) - x}{x} \cdot 170000 \quad (2.10.16d)$$

$$x = 30,17 \text{ mm} \quad (2.10.16e)$$

- Stanovení hodnoty přetvoření lamely:

$$\varepsilon_f = 0,0035 \cdot \frac{\left(100 + \frac{1,2}{2}\right) - 30,17}{30,17} = 0,0082 \quad (2.10.17a)$$

- Stanovení napětí v lamelě:

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (2.10.18a)$$

$$\sigma_f = 0,0082 \cdot 170000 = 1394 \text{ MPa} \quad (2.10.18b)$$

- Ověření přetvoření výztuže (přetvoření výztuže ε_s musí být větší než přetvoření výztuže na mezi kluzu ε_{sy} , aby byl ověřen předpoklad, že napětí ve výztuži se rovná mezi kluzu výztuže):

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{x} = \frac{\varepsilon_s}{d - x} \quad (2.10.19a)$$

$$\frac{0,0035}{30,17} = \frac{\varepsilon_s}{100 - 30,17} \quad (2.10.19b)$$

$$\varepsilon_s = 0,0081 \quad (2.10.19c)$$

$$\varepsilon_s = 0,0081 > \varepsilon_{sy} = 0,00286 \text{ (stanoveno v 2.6.4)} \rightarrow \text{Vyhovuje} \quad (2.10.19d)$$

- Ramena z_c a z_f vnitřních sil:

$$z_c = d - 0,4 \cdot x \quad (2.10.20a)$$

$$z_c = 76 - 0,4 \cdot 30,17 = 63,9 \text{ mm} \quad (2.10.20b)$$

$$z_f = d_1 + \frac{h_f}{2} \quad (2.10.20c)$$

$$z_f = 24 + \frac{1,2}{2} = 24,6 \text{ mm} \quad (2.10.20d)$$

- Stanovení sil v průřezu:

$$F_c = 0,8 \cdot 30,17 \cdot 160 \cdot 30 \cdot 10^{-3} = 115,8 \text{ kN} \quad (2.10.21)$$

$$F_f = 60 \cdot 0,0082 \cdot 170000 \cdot 10^{-3} = 83,2 \text{ kN} \quad (2.10.22)$$

- Moment únosnosti M_R průřezu se zesílením:

$$M_R = F_c \cdot z_c + F_f \cdot z_f \quad (2.10.23a)$$

$$M_R = 115,8 \cdot 0,0639 + 83,2 \cdot 0,0246 = 9,45 \text{ kNm} \quad (2.10.23b)$$

- Stanovení síly F_{4bod} při porušení čtyřbodovým ohybem:

$$F_{4bod} = \frac{2 \cdot M_R}{l_1} \quad (2.10.24a)$$

$$F_{4bod} = \frac{2 \cdot 9,45}{0,295} = 64,1 \text{ kN} \quad (2.10.24b)$$

Síla, při které by se měl porušit zesílený trápek v čtyřbodovém ohybu, je $F_{4bod} = 64,1 \text{ kN}$.

- Stanovení síly F_{3bod} při porušení třibodovým ohybem:

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot M_R}{l_{ef}} \quad (2.10.25a)$$

$$F_{3bod} = \frac{4 \cdot 9,45}{0,890} = 42,5 \text{ kN} \quad (2.10.25b)$$

Síla, při které by se měl porušit zesílený trápek v třibodovém ohybu, je $F_{3bod} = 42,5 \text{ kN}$.

Kapitola 3

Numerická analýza

3.1 Úvod k numerické části

V této části práce je vytvořen a popsán výpočetní nástroj pro numerickou analýzu zesílených prvků. Výpočetní nástroj je verifikován a validován porovnáním výsledků numerických výpočtů s daty změřenými a popsanými v rámci experimentální části práce. Výpočetní nástroj bude následně sloužit pro další vědecké a výzkumné účely v rámci řešeného grantového projektu – např. pro návrh dalších experimentů, předběžnou analýzu velko- rozměrových zkoušek, rozšíření funkcionality výpočetního nástroje pro analýzu prvků vystavených vysokým teplotám apod.

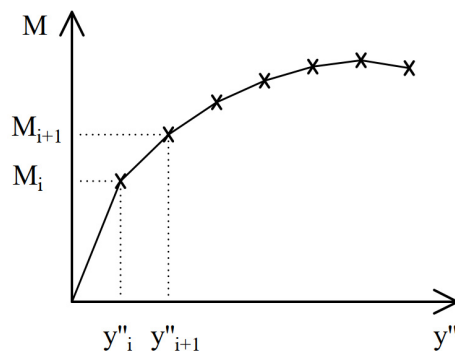
Výpočetní nástroj je založen na numerické analýze průřezu s využitím metody moment–křivost. Výpočetní algoritmus je implementován do podoby výpočetního nástroje v jazyce Python [19].

3.2 Popis výpočetního algoritmu

3.2.1 Stanovení křivky moment–křivost

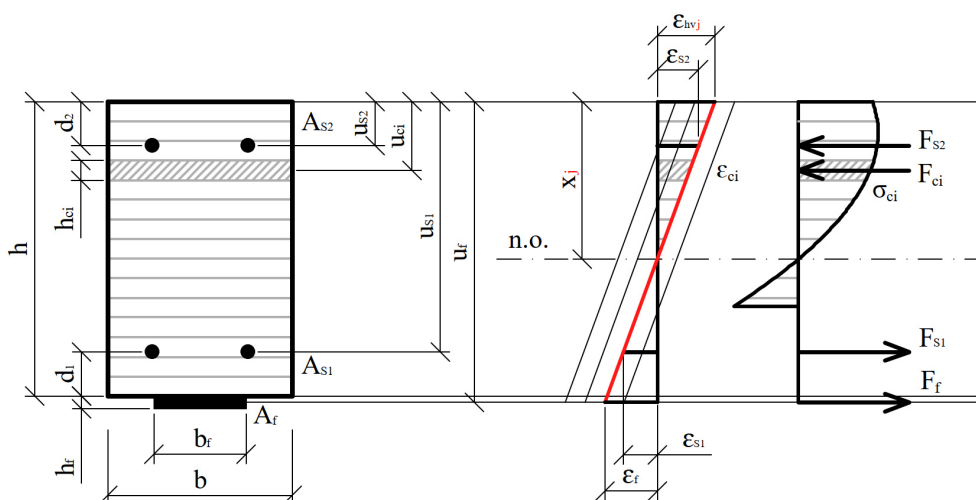
Prvním krokem numerické analýzy prvku je analýza průřezu s využitím metody moment–křivost. Metoda je založená na stanovení tzv. *pracovního diagramu průřezu* (křivka závislosti moment–křivost), který popisuje chování průřezu při namáhání ohybem. Metodu lze využít i pro analýzu prvků zatížených kombinací normálové síly a ohybového momentu (viz např. [28, 29]), v této práci budou ale analyzovány čistě ohýbané prvky.

Křivka moment–křivost pro analyzovaný průřez je sestrojena numericky pomocí jednotlivých bodů, viz Obr. 3.1. Body jsou stanoveny tak, že se pro příslušnou hodnotu křivosti stanoví odpovídající moment vnitřních sil na analyzovaném průřezu.



Obr. 3.1: Princip sestavení křivky moment–křivost

Výpočet momentu vnitřních sil pro zadanou hodnotu křivosti probíhá iteračně. Princip výpočtu je znázorněn na Obr. 3.2.



Obr. 3.2: Analýza průřezu

Princip výpočtu (viz Obr. 3.2) lze popsat v následujících bodech výpočetního algoritmu (podrobný popis metody lze nalézt např. v publikacích [15, 26, 28, 29]):

1. Betonový průřez se rozdělí na proužky o výšce h_{ci} .
2. Pro zadanou hodnotu křivosti y'' (křivost udává sklon úsečky přetvoření, $y'' = \epsilon_{hv}/x$) se postupně zvětšuje přetvoření horních vláken ϵ_{hv} .
3. Pro každou hodnotu ϵ_{hv} se stanoví přetvoření v těžišti spodní výztuže ϵ_{s1} , přetvoření v těžišti horní výztuže ϵ_{s2} , přetvoření v těžišti lamely ϵ_f a přetvoření v každém proužku betonu ϵ_{ci} .
4. Pro příslušná přetvoření se stanoví napětí v jednotlivých materiálech na základě pracovních diagramů uvedených v kapitole 3.2.2, tedy $\sigma_{s1} = \sigma_s(\epsilon_{s1})$, $\sigma_{s2} = \sigma_s(\epsilon_{s2})$, $\sigma_f = \sigma_f(\epsilon_f)$, $\sigma_{ci} = \sigma_c(\epsilon_{ci})$.
5. Provede se integrace napětí přes plochy jednotlivých materiálů a stanoví se síly v jednotlivých materiálech, tedy $F_{s1} = \sigma_{s1} \cdot A_{s1}$, $F_{s2} = \sigma_{s2} \cdot A_{s2}$, $F_f = \sigma_f \cdot h_f \cdot b_f = \sigma_f \cdot A_f$, $F_{ci} = \sigma_{ci} \cdot h_{ci} \cdot b$.

6. Celý proces se opakuje, dokud neplatí podmínka $F_{s1} + F_{s2} + F_f + \sum_i F_{ci} = 0$, tedy dokud není nalezena rovnovážná poloha. Rovnovážná poloha je nalezena numericky, pro předepsanou hodnotu přesnosti – v numerickém výpočtu není suma vnitřních sil nikdy rovna přesně nule, ale je nastaven určitý limit přesnosti, např. v tomto případě 1 N, který musí být dosažen.
7. Po dosažení rovnovážného stavu se stanoví moment vnitřních sil. Moment vnitřních sil může být stanoven k libovolnému bodu. V této práci je moment vnitřních sil stanoven k horním vláknům průřezu. Jelikož se v této práci uvažuje znaménková konvence, pro kterou je tlak uvažován se znaménkem + a tah se znaménkem –, stanoví se moment vnitřních sil jako $M_R = -(F_{s1} \cdot u_{s1} + F_{s2} \cdot u_{s2} + F_f \cdot u_f + \sum_i (F_{ci} \cdot u_{ci}))$.

3.2.2 Materiálové vlastnosti

V bodě 4 výpočetního algoritmu popsaného v kapitole 3.2.1 se pro příslušná přetvoření stanoví napětí v jednotlivých materiálech. K tomu jsou využity pracovní diagramy materiálů popsané níže. V celé numerické části, tedy i v definici pracovních diagramů, je uvažována znaménková konvence: tlak +, tah –.

3.2.2.1 Pracovní diagram betonu

Pro pracovní diagram betonu v tlaku je použit model popsaný v normě ČSN EN 1992-1-1 [8], čl. 3.1.5. Pro pracovní diagram betonu v tahu je uvažován lineární vztah až do porušení, sestupná větev není uvažována (viz např. [4]).

Pracovní diagram betonu je popsán následujícími vztahy:

$$\sigma_c(\varepsilon_c) = \begin{cases} 0 & \text{pro } \varepsilon_c < \varepsilon_{ctu}, \\ \varepsilon_c \cdot E_c & \text{pro } \varepsilon_{ctu} \leq \varepsilon_c < 0, \\ f_{cm} \cdot \frac{k \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}} - \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}\right)^2}{1 - (k-2) \cdot \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} & \text{pro } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu1}, \\ 0 & \text{pro } \varepsilon_c > \varepsilon_{cu1}, \end{cases} \quad (3.2.1)$$

kde [8, Tab. 3.1]:

$$\varepsilon_{ctu} = -\frac{f_{ctm}}{E_c}, \quad (3.2.2)$$

$$E_{cm}(\text{GPa}) = 22 \cdot \left(\frac{f_{cm}(\text{MPa})}{10}\right)^{0,3}, \quad (3.2.3)$$

$$E_c = 1,05 \cdot E_{cm}, \quad (3.2.4)$$

$$\varepsilon_{c1}(\%) = 0,7 \times (f_{cm}(\text{MPa}))^{0,31} < 2,8, \quad (3.2.5)$$

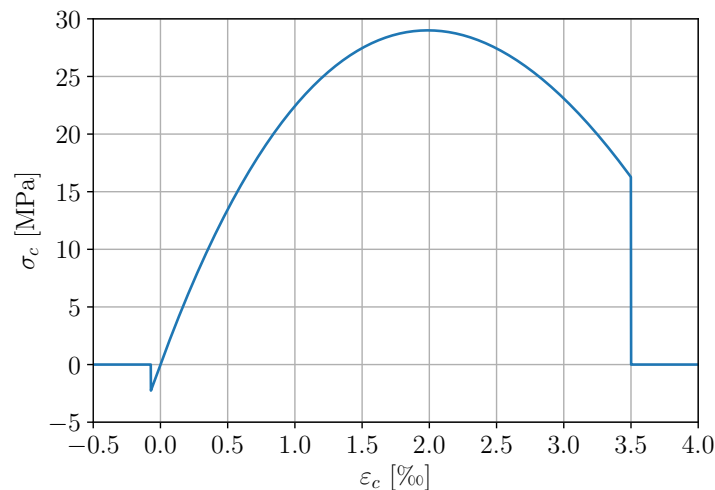
$$f_{ck}(\text{MPa}) = f_{cm}(\text{MPa}) - 8, \quad (3.2.6)$$

$$\varepsilon_{cu1}(\text{‰}) = \begin{cases} 3,5 & \text{pro } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa,} \\ 2,8 + 27 \cdot \left(\frac{98 - f_{cm}(\text{MPa})}{100} \right)^4 & \text{pro } f_{ck} > 50 \text{ MPa,} \end{cases} \quad (3.2.7)$$

$$f_{ctm}(\text{MPa}) = \begin{cases} 0,3 \cdot (f_{ck}(\text{MPa}))^{2/3} & \text{pro } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa,} \\ 2,12 \cdot \ln \left(1 + \frac{f_{cm}(\text{MPa})}{10} \right) & \text{pro } f_{ck} > 50 \text{ MPa,} \end{cases} \quad (3.2.8)$$

$$k = 1,05 \cdot E_{cm} \cdot \frac{\varepsilon_{c1}}{f_{cm}}. \quad (3.2.9)$$

Pro numerickou analýzu prvků popsaných v experimentální části práce se uvažuje $f_{cm} = 29$ MPa, viz kapitola 2.5.1. Výsledný pracovní diagram betonu uvažovaný v numerickém modelu je znázorněn na Obr. 3.3



Obr. 3.3: Pracovní diagram betonu uvažovaný v numerickém modelu

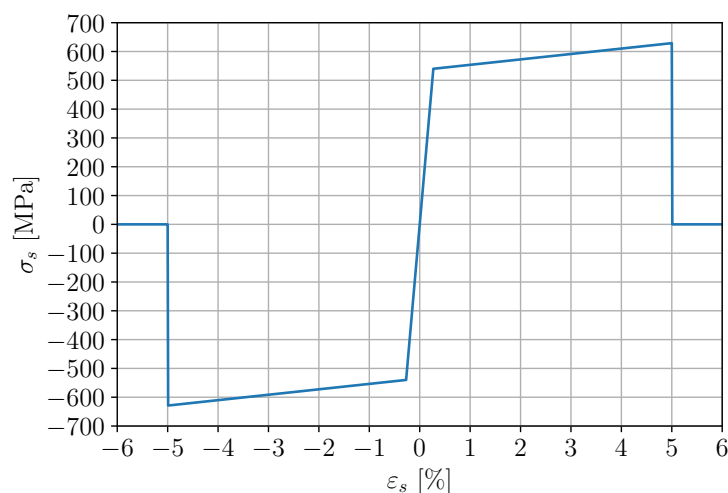
3.2.2.2 Pracovní diagram výztuže

Pracovní diagram výztuže je uvažovaný tak, aby co nejlépe vystihoval skutečný pracovní diagram změřený a popsáný v kapitole 2.5.2. Je uvažován bilineární pracovní diagram výztuže s rostoucí větví, který je popsáný následujícími vztahy:

$$\sigma_s(\varepsilon_s) = \begin{cases} \varepsilon_s \cdot E_s & \text{pro } |\varepsilon_s| < \frac{f_{ym}}{E_s}, \\ \text{sgn}(\varepsilon_s) \cdot \left(f_{ym} + \frac{f_{tm} - f_{ym}}{\varepsilon_{su} - \frac{f_{ym}}{E_s}} \left(|\varepsilon_s| - \frac{f_{ym}}{E_s} \right) \right) & \text{pro } \frac{f_{ym}}{E_s} \leq |\varepsilon_s| \leq \varepsilon_{su}, \\ 0 & \text{pro } |\varepsilon_s| > \varepsilon_{su}. \end{cases}$$

(3.2.10)

Pro numerickou analýzu prvků popsaných v experimentální části práce se uvažuje $f_{ym} = 540$ MPa, $f_{tm} = 629$ MPa a $\varepsilon_{su} = 5$ %, viz kapitola 2.5.2. Výsledný pracovní diagram výztuže uvažovaný v numerickém modelu je znázorněn na Obr. 3.4



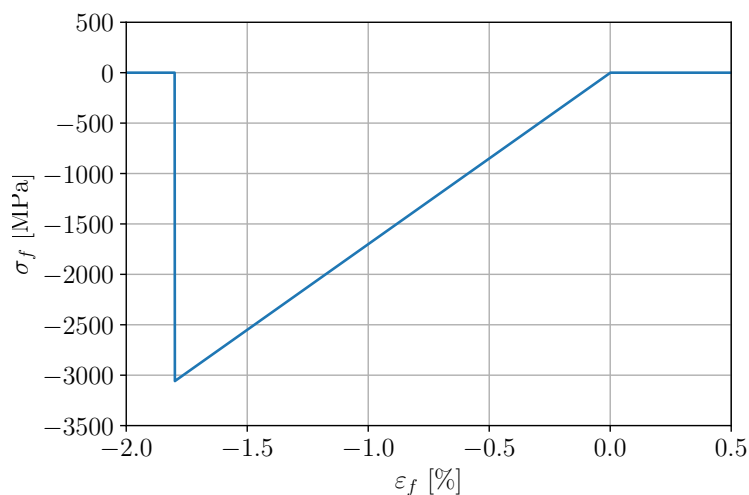
Obr. 3.4: Pracovní diagram výztuže uvažovaný v numerickém modelu

3.2.2.3 Pracovní diagram lamely

Pracovní diagram lamely je uvažovaný jako lineární (pružný) až do porušení – do dosažení mezního přetvoření. Je uvažována pouze tahová oblast pracovního diagramu, chování lamely v tlaku je odlišné a pro tuto práci není nutné chování v tlaku definovat. Pracovní diagram lamely lze tedy popsat vztahem:

$$\sigma_f(\varepsilon_f) = \begin{cases} 0 & \text{pro } \varepsilon_f < -\varepsilon_{fu}, \\ \varepsilon_f \cdot E_f & \text{pro } -\varepsilon_{fu} \leq \varepsilon_f \leq 0, \\ 0 & \text{pro } \varepsilon_f > 0. \end{cases} \quad (3.2.11)$$

Pro numerickou analýzu prvků popsaných v experimentální části práce se uvažují mechanické parametry uvedené výrobcem [23] a popsané v kap. 2.4.3, tedy $\varepsilon_{fu} = 1,8$ % a $E_f = 170\,000$ MPa. Výsledný pracovní diagram lamely uvažovaný v numerickém modelu je znázorněn na Obr. 3.5

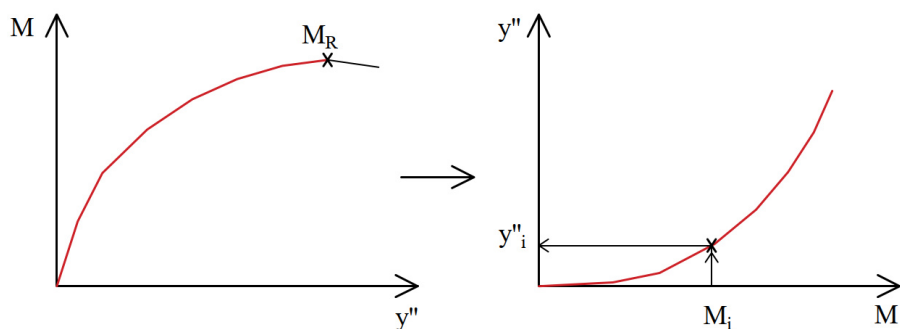


Obr. 3.5: Pracovní diagram lamely uvažovaný v numerickém modelu

3.2.3 Výpočet průhybu

V experimentální části práce jsou zaznamenány pro zkušební trámky závislosti působící síly na průhybu trámku. Aby bylo možné porovnat výsledky stanovené pomocí numerického modelu s experimentálně změřenými daty, je potřeba rozšířit model o výpočet průhybu analyzovaného prvku. Výpočet průhybu uprostřed rozpětí analyzovaného prvku se stanoví pomocí numerické integrace křivosti přes polovinu rozpětí prvku. Tato metoda je podrobně popsána např. v publikaci [18, kap. 5.13] a aplikována např. v pracích [10, 15, 16].

Prvním krokem je z pracovního diagramu průřezu (tedy z křivky závislosti moment–křivost) vytvořit inverzní funkci, tedy závislost křivost–moment, pomocí které je možné pro zadanou hodnotu momentu nalézt odpovídající křivost. Z pracovního diagramu průřezu se využije pouze jeho rostoucí část, tedy do dosažení momentu únosnosti. Tento krok je graficky ilustrován na Obr. 3.6.



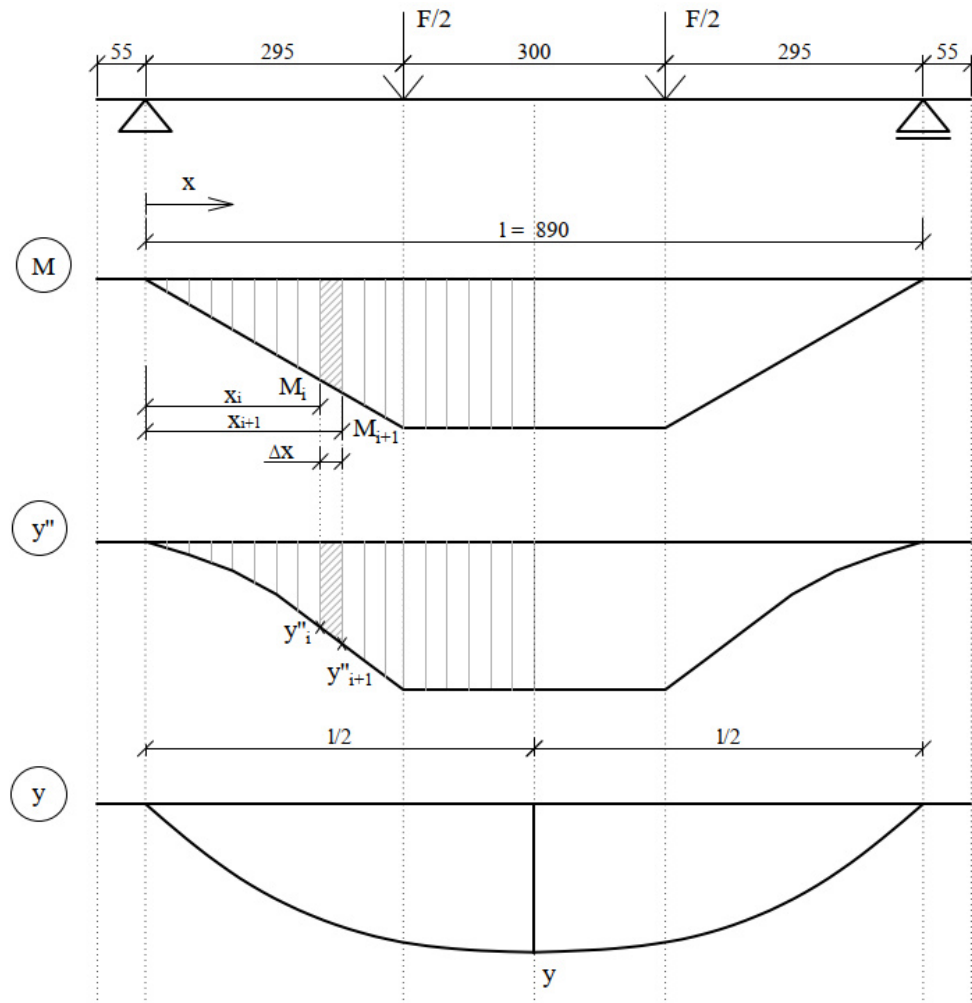
Obr. 3.6: Princip stanovení křivosti v závislosti na působícím momentu

Dalším krokem je pro zadané rozměry prvku, podepření a působící sílu stanovit průběh ohybového momentu po délce prvku. Na základě průběhu ohybového momentu lze z grafu závislosti křivost–moment stanovit také průběh křivosti po délce prvku. Pro účely numerické integrace se polovina rozpětí nosníku rozdělí na jednotlivé úseky – proužky. Hodnoty křivosti na prvku se stanoví pro jednotlivé body na rozhraní jednotlivých proužků, viz Obr. 3.7 a 3.8. Průhyb uprostřed rozpětí prvku se stanoví ze vztahu (3.2.12) [18, (5-42)].

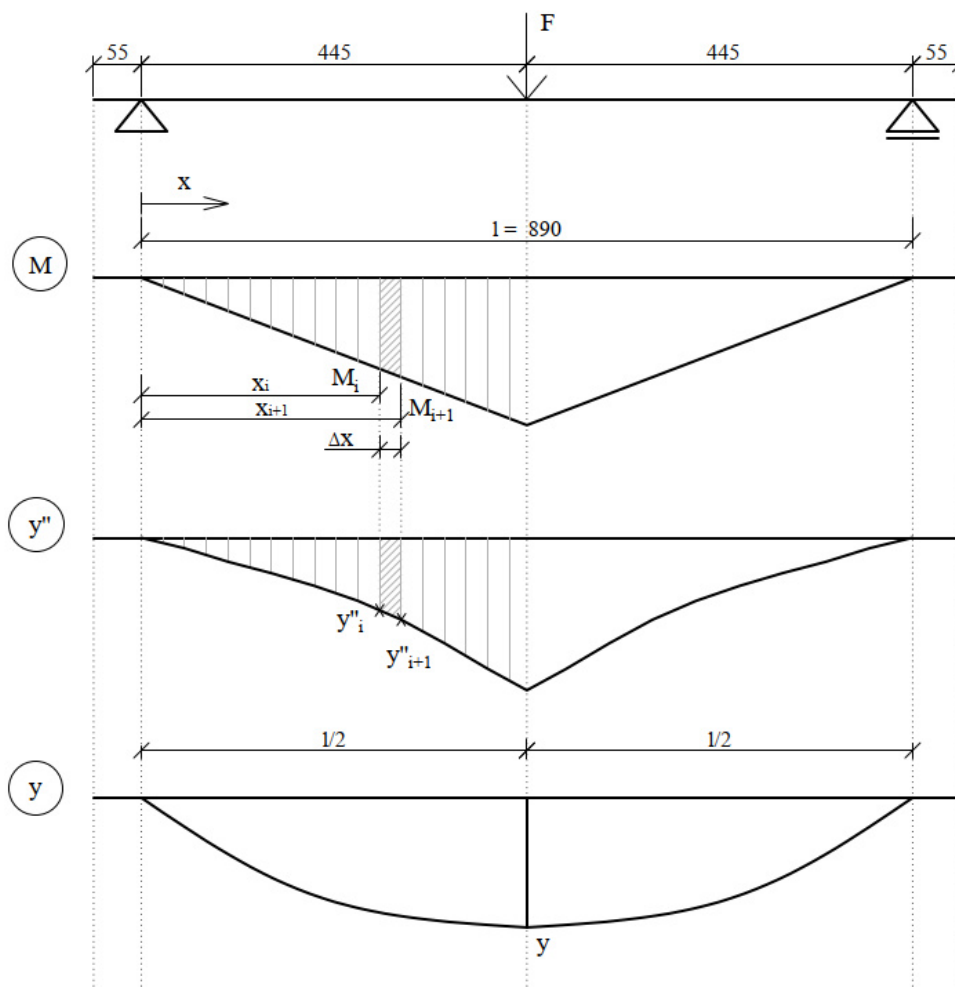
$$y = \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y''_i \cdot x_i + y''_{i+1} \cdot x_{i+1}}{2} \cdot (x_{i+1} + x_i) \right), \quad (3.2.12)$$

kde i je číslo bodu na rozhraní proužků, na které je rozdělena polovina rozpětí analyzovaného prvku, a n je celkový počet proužků (viz Obr. 3.7 a 3.8).

Tímto postupem lze stanovit závislost průhybu nosníku na působící síle (resp. momentu). Celý postup se opakuje pro rostoucí hodnotu působící síly (momentu) až do dosažení meze únosnosti prvku (moment M_R na Obr. 3.6).



Obr. 3.7: Princip výpočtu průhybu uprostřed trámků – čtyřbodový ohyb (podle [18, Obr. 5-32])



Obr. 3.8: Princip výpočtu průhybu uprostřed trámku – třibodový ohyb (podle [18, Obr. 5-32])

3.3 Výsledky a diskuze

3.3.1 Křivky moment–křivost

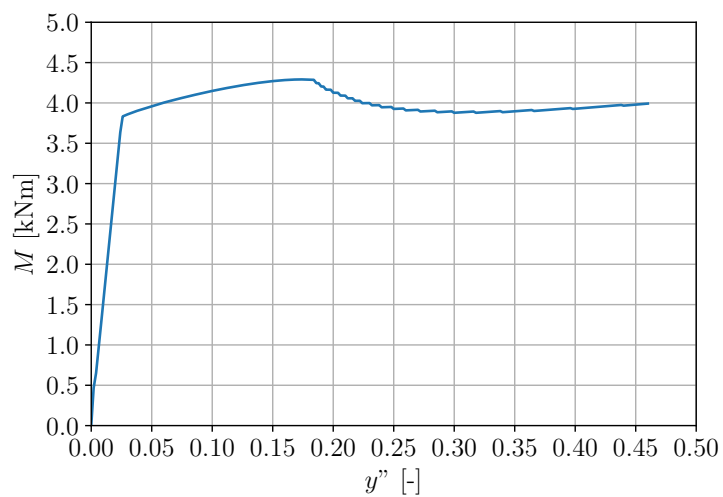
Výpočetním postupem popsaným v kapitole 3.2.1 a s využitím materiálových parametrů popsaných v kapitole 3.2.2 jsou stanoveny pracovní diagramy průřezů pro nezesílený i zesílený prvek.

Výsledné pracovní diagramy jsou uvedeny na Obr. 3.9 a 3.10.

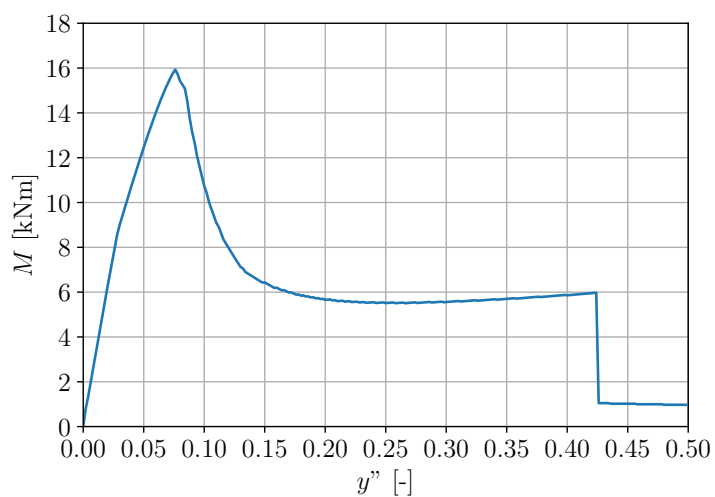
Moment únosnosti pro nezesílený prvek je $M_R = 4,29$ kN.

Moment únosnosti pro zesílený prvek je $M_R = 15,93$ kN.

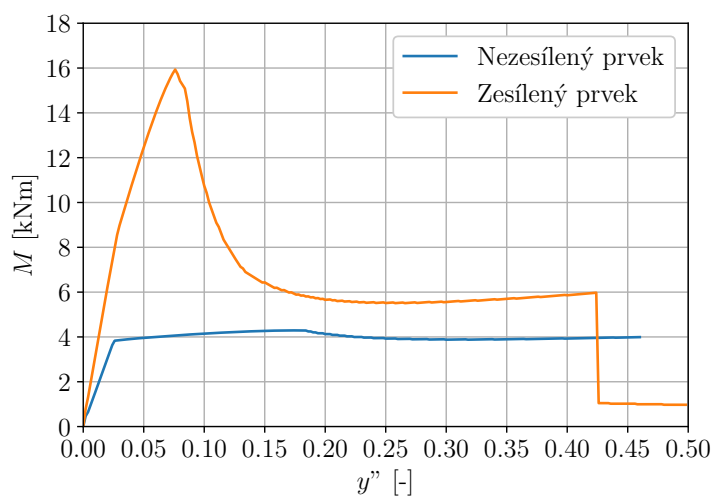
Na Obr. 3.11 je vidět odlišnost v chování nezesíleného a zesíleného prvku.



Obr. 3.9: Pracovní diagram průřezu pro nezesílený prvek



Obr. 3.10: Pracovní diagram průřezu pro zesílený prvek



Obr. 3.11: Porovnání pracovních diagramů průřezu pro nezesílený a zesílený prvek

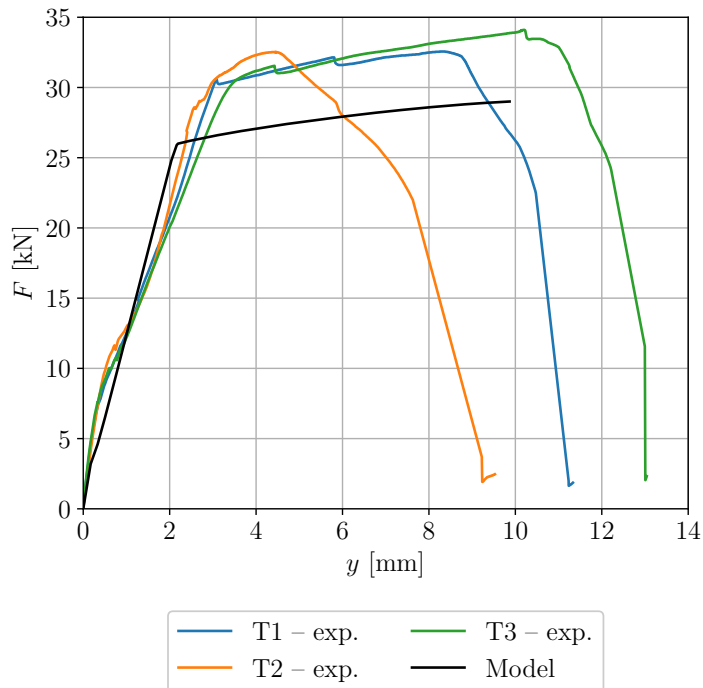
3.3.2 Křivky síla–průhyb

Výpočetním postupem popsaným v kapitole 3.2.3 jsou stanoveny závislosti síla–průhyb pro analyzované prvky.

Na Obr. 3.12 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro trávky T1, T2 a T3.

Podle numerického modelu je síla, při které by se měl porušit nezesílený prvek v čtyřbodovém ohybu, stanovena jako $F_{4bod} = 29,09$ kN.

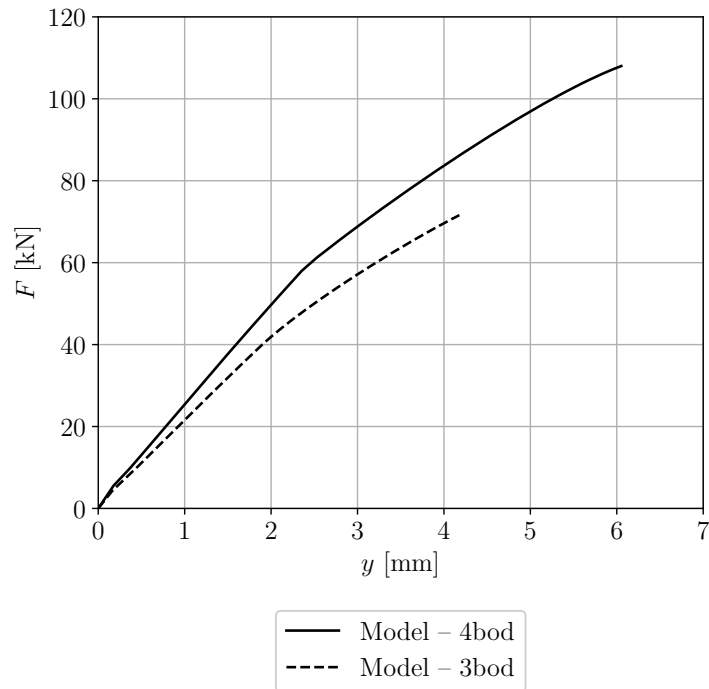
V rámci experimentální části byla určena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly nezesílených trávků T1, T2 a T3 $F_{4bod} = 33,1$ kN (viz kapitola 2.9.4).



Obr. 3.12: Graf závislosti síla–průhyb pro nezesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trávky T1, T2 a T3.

Na Obr. 3.13 jsou vykresleny numerickým modelem stanovené grafy závislosti síla–průhyb pro zesílený prvek, a to jednak pro čtyřbodový ohyb, jednak pro třibodový ohyb.

Síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v čtyřbodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{4bod} = 108,03$ kN. Síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v třibodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{3bod} = 71,61$ kN.

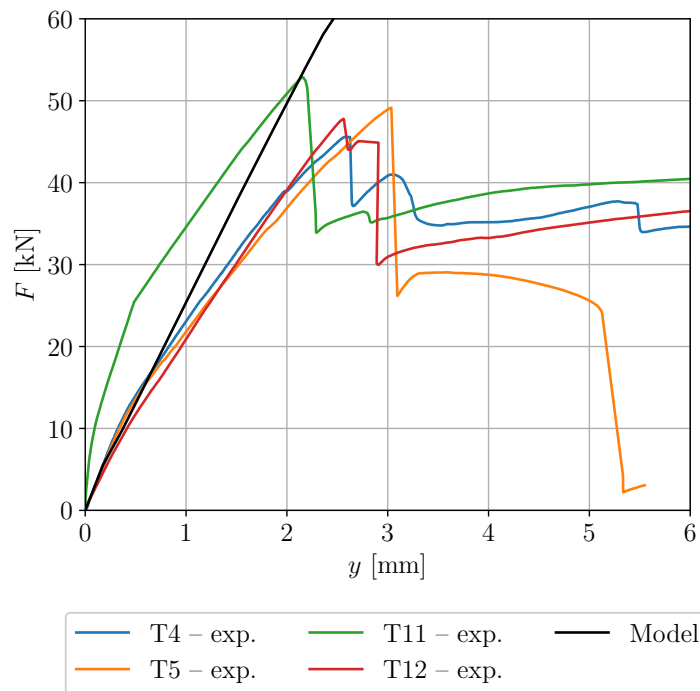
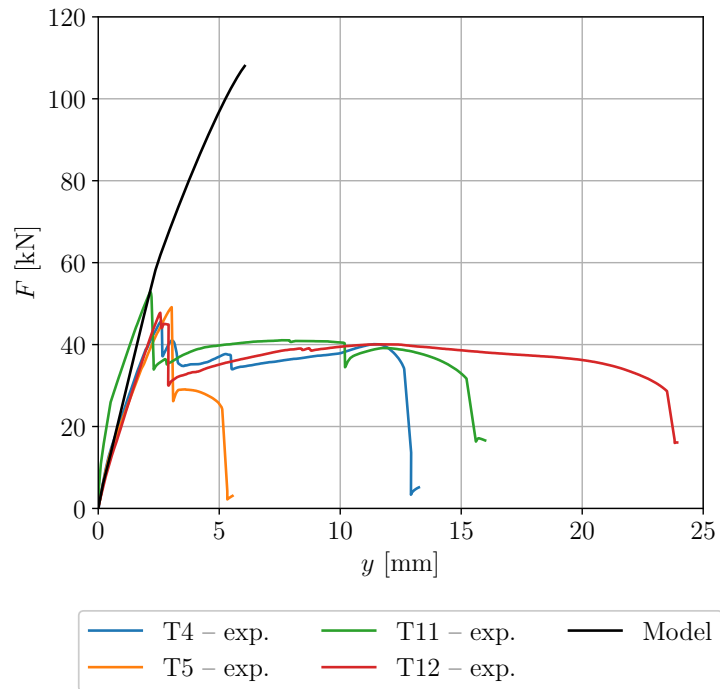


Obr. 3.13: Grafy závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky stanovené pomocí numerického modelu pro čtyřbodový ohyb a pro třibodový ohyb.

Na Obr. 3.14 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb pro čtyřbodový ohyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro zesílené trávky T4, T5, T11 a T12.

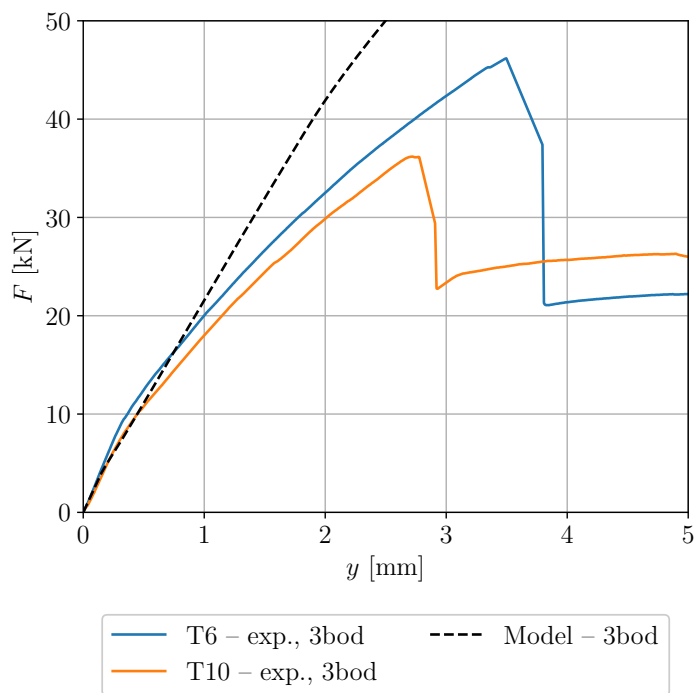
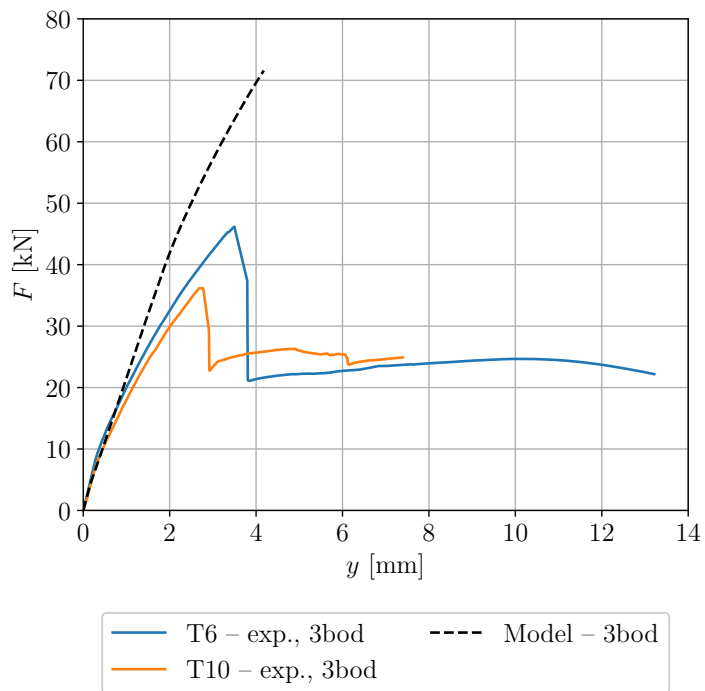
Jak je uvedeno výše, síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v čtyřbodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{4bod} = 108,03$ kN.

V rámci experimentální části byla určena u trávky zesílených v ohybu (T4, T5) zkoušených na čtyřbodový ohyb průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 47,4 kN. U trávky zesílených v ohybu a smyku (T11, T12) zkoušených na čtyřbodový ohyb byla stanovena průměrná hodnota maximální zatěžovací síly 50,3 kN.



Obr. 3.14: Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámký T4, T5, T11 a T12. Nahoře: celý graf, dole: detail.

Na Obr. 3.15 je vykreslen numerickým modelem stanovený graf závislosti síla–průhyb pro tříbodový ohyb, který je porovnán s experimentálně změřenými daty pro zesílené trámký T6 a T10.



Obr. 3.15: Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené třibodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trávky T6 a T10. Nahoře: celý graf, dole: detail.

Jak je uvedeno výše, síla, při které by se měl porušit zesílený prvek v třibodovém ohybu, je podle numerického modelu $F_{3bod} = 71,61$ kN.

V rámci experimentální části byla určena u trámku zesíleného v ohybu T6 zkoušeného na třibodový ohyb maximální zatěžovací síla 46,18 kN. U trámku zesíleného v ohybu a smyku T10 zkoušeného na třibodový ohyb byla změřena maximální zatěžovací síla 36,18 kN.

3.3.3 Diskuze

Shrnutí porovnání výsledků numerické analýzy s ručním výpočtem, výsledky programu „STRECO“ a experimentálními daty je uvedeno v Tab. 3.1. Dle porovnání výsledků stanovení únosnosti nezesíleného prvku lze říct, že se nejvíce přiblížil skutečnosti (experimentu) numerický model. Odlišnosti v maximální momentové únosnosti průřezu mohou být způsobeny zejména mírně odlišnými materiálovými charakteristikami výztuže (mez kluzu a mez pevnosti). Vyšší únosnost dosaženou v experimentu oproti výpočtu lze vysvětlit příspěvkem smykové tuhosti, která nebyla v numerických výpočtech (ruční výpočet, „STRECO“, Numerický model) uvažována.

Po zkouškách trámků zesílených v ohybu, které vykazovaly smykové porušení, bylo rozhodnuto aplikovat dodatečné zesílení ve smyku. Zesílení ve smyku pomocí externě aplikovaných uhlíkových lamel zvýšilo maximální únosnost trámku, avšak stále nebyly dosaženy únosnosti získané pomocí numerických metod. Tuto skutečnost lze vysvětlit tím, že v numerickém modelu je uvažována dokonalá soudržnost lamely a trámku a také dokonalé zakotvení lamely zesilující v ohybu. V experimentech došlo k vytržení lamely v kotevních oblastech smykovým porušením betonu ve vrstvě přilehlé ke kontaktu s lepidlem. Smykové napětí v místě tohoto spoje bylo větší než smyková únosnost betonu.

		Průřez nezesílený		Průřez zesílený v ohybu / v ohybu a smyku	
		M_R [kNm]	F_{max} [kN]	M_R [kNm]	F_{max} [kN]
Ruční výpočet	3bod	4,24	19,06	15,55	69,89
	4bod		28,75		105,42
„STRECO“	3bod	4,24	19,06	15,48	69,57
	4bod		28,75		105,95
Experiment	3bod	-	-	10,27/8,05	46,18/36,18
	4bod	4,88	33,1	6,99/7,42	47,4/50,3
Numerický model	3bod	4,29	19,29	15,93	71,61
	4bod		29,09		108,3

Tab. 3.1: Porovnání výsledků

Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat vliv zesílení uhlíkovými lamelami na chování železobetonových prvků, navrhnout metodiku experimentální a numerické analýzy zesílených prvků v místních podmínkách a porovnat experimentální výsledky s numerickými výsledky.

Z hlediska experimentální analýzy lze konstatovat, že navržený experiment a dostupné technické vybavení lze úspěšně využít k experimentálnímu ověřování chování zesílených prvků. Nedílnou a rozsáhlou součástí této práce byla výroba zkušebních těles, ověřování fyzikálních a mechanických vlastností použitých materiálů a návrh a následná optimalizace zkušebního postupu. Na základě výsledků dosažených v diplomové práci byly navrženy úpravy experimentu, které budou využity v dalších fázích řešeného grantového projektu.

V rámci numerické analýzy byl vyvinut numerický model moment–křivost, který lze využít pro simulaci chování zesílených i nezesílených prvků. Výpočetní algoritmus byl implementován do podoby výpočetního nástroje v jazyce Python a dále porovnán s výsledky ručního výpočtu a výsledky dosaženými programem „STRECO“. Tento model bude dále rozvíjen a využíván v dalších fázích výzkumu, například pro návrh dalších experimentů, předběžnou analýzu velkorozměrových zkoušek, rozšíření funkcionality výpočetního nástroje pro analýzu prvků vystavených vysokým teplotám apod.

Reference

- [1] Canadian Standards Association. *CSA S806–12. Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers*. 2012.
- [2] fib Bulletin No. 14. *Technical report: Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. The International Federation for Structural Concrete*. 2001.
- [3] fib Bulletin No. 40. *Technical report: FRP reinforcement in RC structures. The International Federation for Structural Concrete*. 2007.
- [4] DIANA FEA BV. *DIANA-10.1 User's Manual - Material Library*. 2017. URL: https://manuals.dianafea.com/d101/matlib/node195.html?fbclid=iar1z89kmru_bwyiygqskn2ndiilzj7zpxgaqds1h4uywab-qbfadnrabayam.
- [5] National Research Council. *CNR-DT 203/2006 440. Guide for the design and construction of concrete structures reinforced with fiber-reinforced polymer bars*. 2007.
- [6] ČSN EN 1990 Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí. *ed. 2. Praha: Český normalizační institut*. 2011.
- [7] ČSN EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. *ed. 2. Praha: Český normalizační institut*. 2011.
- [8] ČSN EN 206+A2. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. 2021.
- [9] Karel Daďourek. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. isbn: 978-80-7372-279-1.
- [10] F. Elgabbas et al. “Different CFRP strengthening techniques for prestressed hollow core concrete slabs: Experimental study and analytical investigation”. *Composite Structures* 92.2 (2010), s. 401–411. issn: 0263-8223. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.08.015>.
- [11] European Commission: DG Enterprise a Joint Research Centre Industry. “Dissemination of information for training” workshop. 2008. URL: <https://www.is-argebau.de/dokumente/42310386.pdf>.
- [12] *Grantová přihláška*. Systém uhlíkových lamel nové generace se zvýšenou požární odolností pro zesilování stávajících konstrukcí. TAČR projekt č. FW06010142. 2022.
- [13] Roman Chylík. *Schéma výztužení*. 2023.
- [14] American Concrete Institute. *ACI 440.2R–17. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures*. 2017.

- [15] Ahmed Ismail, Mohamed Attar a Hossam El-Karmoty. “Theoretical Analysis of Beams Combining Ultra High Strength Concrete and Normal Strength Concrete”. *International Design Journal* 8 (dub. 2018), s. 439–453. DOI: 10.21608/idj.2018.86145.
- [16] Needa Lingga et al. “Concrete Beams with Fully Corroded Steel Repaired with CFRP Laminates”. *ACI Symposium Publication* 333 (2019), s. 1–10. DOI: 10.14359/51720274.
- [17] Lenka Malínková. “Zesilování železobetonových konstrukcí kompozitními materiály”. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, 2023. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/110332>.
- [18] Denis Mitchell Michael P. Collins. *Prestressed concrete structures*. Department of civil engineering university of Toronto, 1997. isbn: 0-9681958-0-6.
- [19] Mark Pilgrim a Simon Willison. *Dive Into Python 3*. Sv. 2. Springer, 2009.
- [20] Praha: ÚNMZ. *ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. 2020.
- [21] Praha: ÚNMZ. *ČSN EN ISO 6892-1: Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2021.
- [22] Sika CZ s.r.o. *Metodická příručka zesilování konstrukcí - Sika CarboDur systém*. 2008. URL: <https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/0/mp-cz-sika%20carbodur.pdf>.
- [23] Sika CZ s.r.o. *Produktový list Sika CarboDur S*. 2018. URL: https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/0/sika_carbodur_s.pdf.
- [24] Sika CZ s.r.o. *Produktový list Sikadur-30*. 2023. URL: https://cze.sika.com/dam/dms/cz01/4/sikadur_30.pdf.
- [25] Stado special construction s.r.o. *online*. 2014-2021. URL: <http://www.stado.cz/statika-carbo-system>.
- [26] Homam Spartali et al. “Moment-curvature model for flexural assessment of textile-reinforced concrete beams”. Čvn. 2021. DOI: 10.5281/zenodo.5028860.
- [27] Simpson Strong-Tie. *online*. URL: <https://strongtie.co.nz/products/frp-carbon-fibre-reinforcing-systems>.
- [28] J. Sura, R. Štefan a J. Procházka. “Analýza štíhlých železobetonových sloupů metodou založenou na jmenovité křivosti”. *Stavební obzor* 10 (2012), s. 294–298.
- [29] R. Štefan et al. “Numerical investigation of slender reinforced concrete and steel-concrete composite columns at normal and high temperatures using sectional analysis and moment-curvature approach”. *Engineering Structures* 190 (2019), s. 285–305. DOI: 10.1016/j.engstruct.2019.03.071.
- [30] Sika UK. *online*. URL: <https://gbr.sika.com/en/construction/concretere/repair/structuralrepair/carbonfibrereinforcedpolymercfrpcomposites/cfrp-plates/sika-carbodur-s.html>.
- [31] Stanislav Voráček. “Výpočetní aplikace pro posouzení železobetonových prvků zesílených kompozitními materiály”. Diplomová práce. ČVUT v Praze, 2023. URL: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/110720>.
- [32] SIA Zurich. *Swiss structural codes. Concrete Structures*. 2003.

Seznam obrázků

1.1	Lamely v rolích [30]	3
1.2	Lamely nařezané na kusy [30]	3
1.3	Znázornění zesílených prvků [27]	3
1.4	Znázornění synergického efektu [9]	4
1.5	Schéma výroby [25]	5
1.6	Proces lepení lamely [30]	6
1.7	Pracovní diagram oceli (steel) a vláknového kompozitu (FRP) [2]	7
2.1	Výztuž trámku [13]	9
2.2	Výkaz výztuže [13]	9
2.3	Schéma zatížení – čtyřbodový ohyb	10
2.4	Schéma zatížení – třibodový ohyb	10
2.5	3D model trámku s vyznačenými místy měření průhybů při čtyřbodovém ohybu[13]	10
2.6	Zkušební stroje	11
2.7	Krychle před porušením	14
2.8	Porušená krychle	14
2.9	Histogram	15
2.10	Znázornění změřených pevností betonu v tlaku a jejich porovnání se střední hodnotou včetně směrodatné odchylky	15
2.11	Výztuž, upnutá mezi čelisti	16
2.12	Vyznačená část	16
2.13	Protažení ve vyznačené části	16
2.14	Přetržená výztuž	16
2.15	Pracovní diagram betonářské výztuže	17
2.16	Lamela při zkoušení	18
2.17	Delaminovaná lamela	18
2.18	Analyzovaný průřez	19
2.19	Rovnováha sil v železobetonovém průřezu bez zesílení	20
2.20	Kritická síla při čtyřbodovém ohybu	21
2.21	Moment působící na trámku při čtyřbodovém ohybu	22
2.22	Kritická síla při třibodovém ohybu	22
2.23	Moment působící na trámku při třibodovém ohybu	22
2.24	Rovnováha sil v železobetonovém průřezu se zesílením	23
2.25	Únosnost průřezu bez zesílení	25
2.26	Únosnost průřezu se zesílením	26
2.27	Hotové armokoše	28
2.28	Umístěné armokoše ve formě	28
2.29	Navážené suché složky	28
2.30	Sloučení jednotlivých suchých složek	28

2.31	Míchání směsi po přidání vody	29
2.32	Hotová směs	29
2.33	Čerstvé vzorky	29
2.34	Čerstvé vzorky přikryté fólií	29
2.35	Vytvrzené krychle	30
2.36	Vytvrzené trámký	30
2.37	Trámký před nalepením	30
2.38	Měření vlhkosti	30
2.39	Příprava povrchu trámký	31
2.40	Čistění lamely	31
2.41	Složky lepidla	31
2.42	Míchání lepidla	31
2.43	Nanesené lepidlo na trámký a lamely	32
2.44	Lepení lamely	32
2.45	Přítlačení lamely válečkem	32
2.46	Nalepené lamely na trámký	33
2.47	Nalepené lamely na trámký s termočlánky	33
2.48	Zabroušení povrchu trámký	33
2.49	Trámký bez zesílení osazený v lisu	33
2.50	Inkrementální snímače dráhy na trámký	34
2.51	První ohybové trhliny	34
2.52	Rozvoj trhlín	35
2.53	Trámký po porušení	35
2.54	Obnažení výztuže	36
2.55	Přetržená výztuž	36
2.56	Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámký bez zesílení	36
2.57	Trámký zesílený lamelou osazený v lisu pro zkoušení na čtyřbodový ohyb	37
2.58	První trhliny	37
2.59	Smykové trhliny – rozvoj	38
2.60	Odchlípnutí lamely	38
2.61	Trámký zesílený v ohybu po porušení	39
2.62	Odchlípnutí lamely s krycí vrstvou betonu	39
2.63	Přetržená ohybová výztuž v místě smykové trhliny	39
2.64	Průběhy vnitřních síl při třibodovém a čtyřbodovém ohybu	40
2.65	Trámký zesílený v ohybu osazený v lisu pro zkoušení na třibodový ohyb	40
2.66	Ohybové trhliny – třibodový ohyb	40
2.67	Smykové trhliny – třibodový ohyb	40
2.68	Rozvoj smykových trhlín – třibodový ohyb	41
2.69	Odchlípnutí lamely – třibodový ohyb	41
2.70	Trámký se zesílením na ohyb po porušení – třibodový ohyb	41
2.71	Významná trhlina – třibodový ohyb	42
2.72	Protážené výztuže – třibodový ohyb	42
2.73	Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámký zesílené v ohybu	42
2.74	Zesílení trámký ve smyku	43
2.75	Trámký zesílený lamelou v ohybu a smyku osazený v lisu pro zkoušení na třibodový ohyb	43
2.76	První (nejvýznamnější) trhlina na trámký zesíleném v ohybu a smyku při zkoušení na třibodový ohyb	44

2.77	Odchlípnutí lamely na trámku zesíleném v ohybu a smyku při zkoušení na tříbodový ohyb	44
2.78	Trámek zesílený v ohyb a smyku po porušení – tříbodový ohyb	45
2.79	Trámky zesílené lamelou v ohybu a smyku osazené v lisu pro zkoušení na čtyřbodový ohyb	45
2.80	První trhliny trámků zesílených lamelou v ohybu a smyku – zkoušení na čtyřbodový ohyb	45
2.81	Odchlípnutí lamely z obou stran trámku	46
2.82	Významná trhlina – čtyřbodový ohyb	46
2.83	Přetržení výztuže – čtyřbodový ohyb	46
2.84	Trámek zesílený na ohyb a smyk po porušení	47
2.85	Průběh působícího zatížení v závislosti na deformaci – trámky zesílené v ohybu a smyku	47
2.86	Porovnání průběhů trámků zkoušených na čtyřbodový ohyb	48
2.87	Porovnání průběhů trámků zkoušených na tříbodový ohyb	49
2.88	Analyzovaný průřez budoucího experimentu	51
2.89	Rovnováha sil v železobetonovém průřezu bez zesílení	51
2.90	Rovnováha sil v železobetonovém průřezu se zesílením	53
3.1	Princip sestrojení křivky moment–křivost	57
3.2	Analýza průřezu	57
3.3	Pracovní diagram betonu uvažovaný v numerickém modelu	59
3.4	Pracovní diagram výztuže uvažovaný v numerickém modelu	60
3.5	Pracovní diagram lamely uvažovaný v numerickém modelu	61
3.6	Princip stanovení křivosti v závislosti na působícím momentu	61
3.7	Princip výpočtu průhybu uprostřed trámku – čtyřbodový ohyb (podle [18, Obr. 5-32])	62
3.8	Princip výpočtu průhybu uprostřed trámku – tříbodový ohyb (podle [18, Obr. 5-32])	63
3.9	Pracovní diagram průřezu pro nezesílený prvek	64
3.10	Pracovní diagram průřezu pro zesílený prvek	64
3.11	Porovnání pracovních diagramů průřezu pro nezesílený a zesílený prvek	64
3.12	Graf závislosti síla–průhyb pro nezesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T1, T2 a T3.	65
3.13	Grafy závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky stanovené pomocí numerického modelu pro čtyřbodový ohyb a pro tříbodový ohyb.	66
3.14	Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené čtyřbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T4, T5, T11 a T12. Nahoře: celý graf, dole: detail.	67
3.15	Graf závislosti síla–průhyb pro zesílené prvky vystavené tříbodovému ohybu, porovnání výsledků numerického modelu s experimentálně změřenými daty pro trámky T6 a T10. Nahoře: celý graf, dole: detail.	68

Příloha A

Výsledky zkoušek materiálových parametrů

A.1 Zkouška pevnosti betonu v tlaku

Výsledky laboratorních zkoušek

Číslo vzorku	Rozměry tělesa			Hmot. tělesa g	Objem. hmot. kg/m ³	Datum		Stáří vzorku dny	Tlak	
	Šířka	Výška	Délka			výroby	zkoušky		síla	pevnost
	mm	mm	mm			d.m.r.	d.m.r.		kN	MPa
K1	147,0	149,4	149,3	7625,0	2325,5	03.10.23	11.11.23	38	625,9	28,5
K2	148,5	152,0	148,5	7725,0	2304,6	03.10.23	11.11.23	38	614,8	27,2
K3	144,9	148,8	149,3	7395,0	2297,2	03.10.23	11.11.23	38	667,9	31,0
K4	150,9	149,2	149,5	7580,0	2252,5	20.10.23	01.12.23	42	741,82	32,9
K5	155,7	148,2	149,7	7880,0	2282,4	20.10.23	01.12.23	42	737,38	32,0
K6	148,2	149,7	149,3	7635,0	2305,2	20.10.23	01.12.23	42	734,04	33,1
K7	150,4	148,6	149,8	7765,0	2317,9	24.10.23	01.12.23	38	748,67	33,5
K8	148,6	149,5	149,6	7655,0	2301,9	24.10.23	01.12.23	38	630,13	28,4
K9	149,2	152,3	149,1	7780,0	2297,2	24.10.23	01.12.23	38	710,70	31,3
K10	149,4	147,3	149,5	7605,0	2312,0	30.10.23	14.12.23	45	610,68	27,7
K11	149,2	152,7	149,0	7715,0	2272,0	30.10.23	14.12.23	45	501,77	22,0
K12	149,0	152,5	149,0	7740,0	2287,0	30.10.23	14.12.23	45	543,82	23,9
K13	149,0	151,2	149,1	7735,0	2303,0	31.10.23	14.12.23	46	717,93	31,9
K14	149,4	154,7	149,2	7855,0	2278,0	31.10.23	14.12.23	46	567,16	24,5
K15	149,2	145,9	149,1	7485,0	2305,0	31.10.23	14.12.23	46	620,32	28,5

Směrodatná odchylka S	3,583
Průměrná hodnota f_{cm}	29,090
Variační koeficient V	0,123
Součinitel k_n	1,840
Charakteristická hodnota f_{ck}	22,498

A.2 Zkouška tahem betonářské výztuže

Výsledky laboratorních zkoušek

Číslo vzorku	Rozměry tělesa			zkoušky d.m.r.	Tah		
	plocha	l	l _{ef}		max relativní protažení	síla	pevnost
	mm	mm	mm		%	kN	MPa
1	28.3	500.0	260.0	01/11/23	9.83	17.9	633.8
2	28.3	500.0	260.0	02/11/23	9.71	17.7	626.7
3	28.3	500.0	260.0	02/11/23	7.78	17.7	626.7

Směrodatná odchylka S 4.084

Průměrná hodnota $f_{m(n)}$ 629.075






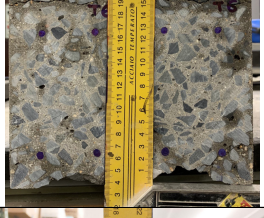



Variační koeficient V 0.006

Součinitel k_n 2.630

Charakteristická hodnota f_{ik} 618.334

Příloha B

Popis zkušebních trámek

vzorek	datum betonáže dd.mm.rrrr	datum zkoušky dd.mm.rrrr	hmotnost vzorku [kg]	rozměry vzorku [mmxmm]	max. síla [kN]	průhyb při max. síle [mm]	řez	poznámka
T1	3.10.2023	11.11.2023	38.06	100.3x158.9	32.56	8.37		- trápek bez zesílení - zkouška na 4-bod
T2	3.10.2023	11.11.2023	39.74	102.8x161.7	32.52	4.44		- trápek bez zesílení - zkouška na 4-bod
T3	3.10.2023	11.11.2023	38.84	100.9x158.8	34.1	10.22		- trápek bez zesílení - zkouška na 4-bod
T4	20.10.2023	01.12.2023	39.7	100.3x163.5	45.58	2.63		- trápek se zesílením v ohybu - zkouška na 4-bod - hodně trhlin - nízká kvalita výroby
T5	20.10.2023	01.12.2023	38.91	101.2x159.8	49.14	3.04		- trápek se zesílením v ohybu - zkouška na 4-bod - minimální množství trhlin
T6	20.10.2023	01.12.2023	40.85	103.9x165.9	46.18	3.49		- trápek se zesílením v ohybu - zkouška na 3-bod - minimální množství trhlin
T10	30.10.2023	11.12.2023	40.7	103.7x166.2	36.18	2.78		- trápek se zesílením v ohybu a smyku - zkouška na 3-bod - nízká kvalita výroby
T11	30.10.2023	11.12.2023	40.4	103.9x166.9	52.86	2.2		- trápek se zesílením v ohybu a smyku - zkouška na 4-bod - odchlípnutí ohybové lamely z obou stran
T12	30.10.2023	11.12.2023	40.33	103.4x171.6	47.78	2.56		- trápek se zesílením v ohybu a smyku - zkouška na 4-bod - odchlípnutí ohybové lamely z jedné strany