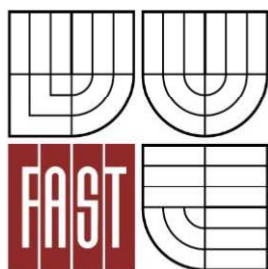




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF BUILDING TESTING

EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA ZESÍLENÍ ŽB PRVKU NA SMYKOVÉ ÚČINKY

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF REINFORCED CONCRETE REINFORCEMENT MEMBER
SUBJECTED TO SHEAR FORCES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. INGRID FOLVARČNÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR ŽÍTT

BRNO 2016



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Ingrid Folvarčná
Název	Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na smykové účinky
Vedoucí diplomové práce	Ing. Petr Žítt
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2015
Datum odevzdání diplomové práce	15. 1. 2016

V Brně dne 31. 3. 2015

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

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

Podklady a literatura

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

Zásady pro vypracování

Návrh zkušebních prvků s ohledem na charakteristické porušení smykovými účinky, velikostí zatěžovacích sil. Teoretický statický výpočet navržených prvků, předběžná analýza chování v MKP softwaru Atena 2D, 3D. Výroba prvků včetně doprovodných zkušebních těles. Provedení experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocení. Zpřesnění numerických analýz a statických výpočtů na základě provedených experimentálních zkoušek. Porovnání všech získaných výsledků.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....

Ing. Petr Žítt
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Návrh a výroba zkušebních prvků pro experimentální laboratorní zkoušení na smykové účinky. Provedení zkoušek mechanických vlastností zkušebních prvků. Experimentální analýza zkušebních prvků v laboratoři, tvorba matematického modelu softwarem ATENA, statický výpočet. Vyhodnocení experimentální analýzy a porovnání výsledků statického výpočtu. Závěrečné celkové zhodnocení.

Klíčová slova

Beton, zesilování konstrukcí, externí zesílení, matematický model, statický výpočet, zatěžovací zkouška, smykové porušení

Abstract

Design and manufacture of test elements for experimental laboratory testing of shear damage. Testing of selected mechanical characteristics of test elements. Experimental analysis of test elements in the lab, creating a mathematical model in ATENA software, static analysis. Evaluation of experimental analysis and comparison with the values of static analysis. Final overall evaluation.

Keywords

Concrete, structures strengthening, external reinforcement, mathematical model, static analysis, load test, shear damage

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Ingrid Folvarčná *Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na smykové účinky*. Brno, 2015. 66 s., 71 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15.1.2016

.....
podpis autora

Bc. Ingrid Folvarčná

Poděkování:

Největší poděkování patří Ing. Petru Žíttovi za jeho ochotu, cenné rady, čas a trpělivost během celého zpracovávání této diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala Ing. Jaromíru Láníkovi a spolužákům ze studijní skupiny za pomoc při betonáži a laboratorním zkoušení prvků.

Diplomová práce byla vytvořena v rámci řešení projektu č. LO1408 "AdMaS UP - Pokročilé stavební materiály, konstrukce a technologie" podporovaného Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy v rámci účelové podpory programu „Národní program udržitelnosti I“.

OBSAH

1 ÚVOD.....	10
2 CÍLE.....	11
3 ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ.....	12
3.1 POUŽITÍ PRO PŘÍPADY ZESÍLOVÁNÍ.....	15
3.2 EXTERNÍ ZESÍLENÍ OCELOVÝMI PRVKY	16
3.3 EXTERNÍ ZESÍLENÍ NEKOVOVÝMI PRVKY	17
3.3.1 Zesilování pomocí uhlíkových lamel	18
3.3.2 Dobetonování části prvku	19
4 NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	20
4.1 OBECNÉ ZÁSADY PRO NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU	21
4.1.1 Cement.....	21
4.1.2 Kamenivo	22
4.1.3 Záměsová voda	22
4.1.4 Přísady.....	22
4.1.5 Příměsi.....	23
4.2 NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	23
5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES.....	25
5.1 VÝROBA	25
5.1.1 Příprava betonáže	25
5.1.2 Betonáž	25
5.1.3 Ošetřování betonu	27
5.2 DODATEČNÉ ZESÍLENÍ PRVKU	27
5.2.1 Použité prvky pro zesílení	27
5.2.2 Varianty zesílení	29
5.2.3 Zesílení konstrukce pomocí CFK lamel	30
6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA	31
6.1 LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ.....	31
6.2 DOPROVODNÉ ZKOUŠKY	42
6.2.1 Fyzikálně – mechanické vlastnosti betonu.....	42
6.2.2 Mechanické vlastnosti oceli	46

6.2.3 Vyhodnocení doprovodných zkoušek	47
7 NUMERICKÁ ANALÝZA	49
7.1 MATEMATICKÝ MODEL	49
7.1.1 Řešení modelu.....	49
7.1.2 Grafické zobrazení modelu	51
7.2 ANALYTICKÉ POSOUZENÍ DLE EUROCODE 2	54
7.2.1 Posouzení dle ČSN EN 1992-1: Eurocode 2.....	54
8 VYHODNOCENÍ	55
8.1 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA	55
8.2 NUMERICKÁ ANALÝZA – ATENA 2D	57
8.3 STATICKÝ VÝPOČET.....	58
8.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ.....	59
8.4.1 Varianta 1	59
8.4.2 Varianta 2	60
8.4.3 Varianta 3	61
8.4.4 Varianta 4.....	62
9 ZÁVĚR	63
10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	64
11 SEZNAM PŘÍLOH.....	66

1 ÚVOD

Při změně původního majitele objektu dochází dnes velmi často také ke změně způsobů využití dané konstrukce, s kterou se pojí zvýšení požadované únosnosti dané stavby. Konstrukce, jež jsou vystaveny agresivnějšímu prostředí, mohou být porušeny zmenšujícím se krytím ocelové výztuže a následnou korozí, degradací betonu, aj. Uvedené případy vedou k rekonstrukcím objektů a zvýšením užitého zatížení. Dodatečné zesílení pomocí uhlíkových tkanin či lamel je jednou z možností, jak požadovaného stavu docílit.

Tato diplomová práce je zaměřená na experimentální a numerickou analýzu dodatečně zesíleného železobetonového prvku uhlíkovými lamelami na smykové účinky. Experimentálně bude analýza provedena na trémových nosnících. Zkušební tělesa poslouží k doprovodným zkouškám.

Trémové nosníky i zkušební tělesa budou vybetonována ze stejné záměsi, aby se docílilo požadované pevnosti a kvality všech prvků. Reprezentativní vzorek použité betonářské výztuže pro výrobu armokošů bude také ponechán pro odzkoušení reálných vlastností.

Softwarem ATENA 2D budou vymodelovány zkušební prvky a následně řešeny metodou konečných prvků. Výsledky programu ATENA 2D budou následně porovnány s výsledky experimentální analýzy prováděnou v laboratoři.

2 CÍLE

Cílem diplomové práce je seznámení se s metodami dodatečného zesilování konstrukcí, teoretický návrh vyztužení železobetonového prvku na smykové účinky a jeho následná výroba pro laboratorní zatěžovací zkoušky. Zesílené a nezesílené prvky budou experimentálně a numericky odzkoušeny a výsledky následně porovnány.

- Zjištění fyzikálně mechanických vlastností betonu a betonářské výztuže
- Experimentálně analyzovat zkušební prvky v laboratorních podmínkách
- Vytvoření numerického modelu ve výpočetním softwaru ATENA 2D s laboratorně stanovenými charakteristikami
- Porovnání výsledků experimentální a numerické analýzy a vyhodnocení použitých typů dodatečného zesílení

3 ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ

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

Mezi oblasti požití patří zesilování železobetonových prvků (desek, trámů, sloupů, atd.) a dále mostních konstrukcí, dřevěných stropních a trámových prvků, vyztužování kruhových a oválných železobetonových konstrukcí ovíjením. [3-1]



Obr. 3.1 Externí zesilování překladu [4-1]



Obr. 3.2 Zesilování stropní konstrukce [4-2]

Zesílení lze provádět:

- Dobetonováním části prvku



Obr. 3.3 Dobetonování stropních průvlaků [4-4]

- Externím zesílením ocelovými prvky
 - Mechanicky kotvené zesílení



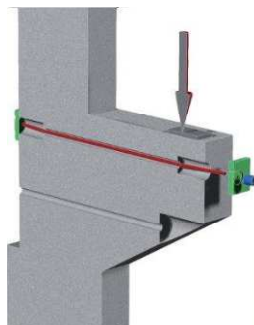
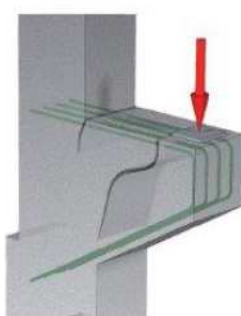
Obr. 3.4, Obr. 3.5 Zesílení železobetonového trámového stropu ocelovými U profily [4-6]

- Externě lepené zesílení



Obr. 3.6 Betonový prvek vyztužen externí lepenou výztuží [4-6]

- Dodatečné zesílení předpětím



Obr. 3.7, 3.8, 3.9 Železobetonová konzola dodatečně zesílena předpětím [4-6]

- Externím zesílením prvky na bázi skleněných a uhlíkových vláken
 - Aplikace helikální výztuže



Obr. 3.10 Sešití stěny RD pomocí aplikace helikální výztuže [4-5]



Obr. 3.11 Detail aplikace helikální výztuže [4-5]

- Aplikace uhlíkových lamel a tkanin na konstrukci



Obr. 3.12 Kombinace aplikace lamel a tkanin na zesílení konstrukce [4-6]

- Aplikace uhlíkových lamel formou předpětí



Obr. 3.13 Předpínání uhlíkové lamely [4-6]

3.1 POUŽITÍ PRO PŘÍPADY ZESÍLOVÁNÍ

Případy zesilování železobetonových a jiných konstrukcí v dnešní době jsou:

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

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

- **Odstranění chyby v projektu nebo výrobní chyby**

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

- **Poškození nosných prvků**

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

- **Změna statického systému**

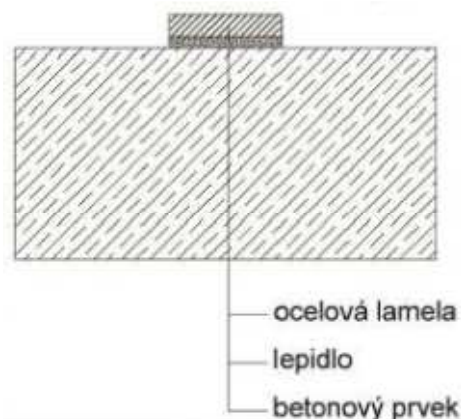
Při změnách stávajících konstrukcí dochází často ke změnám statického systému. Dochází k tomu při snížení počtu podpěr a to při vybourání nosných prvků jako jsou sloupy nebo nosné stěny. [3-1]

3.2 EXTERNÍ ZESÍLENÍ OCELOVÝMI PRVKY

Externí zesílení konstrukce ocelovými prvky je běžné zesilování stávajících konstrukcí s určitými výhodami i nevýhodami. Zesílená konstrukce dále zůstává a je brána jako železobetonová konstrukce. Výhodou ocelových lamel je jejich svařitelnost, možnost mechanického kotvení nebo pevného lepeného spoje. Na trhu se nachází velké množství typů a druhů ocelových prvků, které jsou cenově dostupné. Nevýhodami je náchylnost na korozi externí výztuže, které můžeme předejít antikorozními nátěry nebo jinou ochranou výztuže, dále překonávání dlouhých vzdáleností, kdy musí někdy dojít ke spojování výztuže. Ocelovou výztuží se výrazně zvyšuje objemová hmotnost výsledné konstrukce, kterou je potřeba také zohlednit. [3-1]

Použití externích ocelových prvků

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



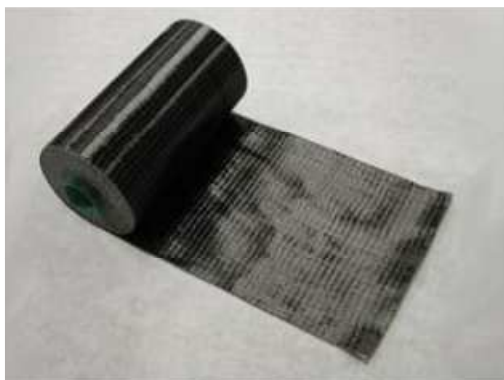
Obr. 3.14 Schéma externího zesílení pomocí ocelových prvků

Poloha externích ocelových prvků

- Ve spodní tažené oblasti prvku
- V horní tlačené oblasti prvku
- V oblasti působení smykových napětí
- Na horním líci prvku v tažené oblasti u spojitých nosníků
- Kombinací více možností

3.3 EXTERNÍ ZESÍLENÍ NEKOVOVÝMI PRVKY

Zesilování konstrukce pomocí nekovových prvků se provádí vlákny z polymerního materiálu, kompozity z vysokopevnostních vláken obalených polymerní matricí. Hlavním nositelem pevnosti těchto materiálu jsou jejich vlákna. Tyto kompozitní materiály se ve stavitelství nejčastěji používají k zesilování betonových, zděných, dřevěných a ocelových konstrukcí. [3-1]



Obr. 3.15 Uhlíková tkanina [4-3]



Obr. 3.16 Uhlíková lamela [4-3]

Mezi hlavní přednosti kompozitních materiálů patří:

- Vysoká pevnost v tahu, antikorozní vlastnosti
- Nízká hmotnost, odolnost proti poškození
- Dobrá únavová odolnost
- Výhodný poměr tuhosti materiálu vzhledem k vlastní hmotnosti

Dodatečné vyztužování stavebních konstrukcí pomocí externí syntetické výztuže je nedílnou součástí moderního stavitelství, především využitelné při provádění rekonstrukcí a zvyšování únosností prvků stavebních konstrukcí. [3-1]

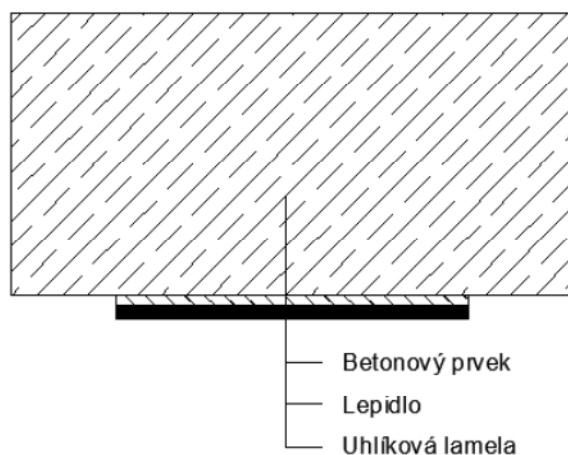
3.3.1 Zesilování pomocí uhlíkových lamel

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

Metoda zesilování pomocí uhlíkových lamel je modernější, ale způsobem provádění velice podobná lepení ocelových lamel. Lamely mají velkou výhodu v jejich mechanických vlastnostech a jednoduchosti provádění. [3-1]

Výhody použití uhlíkových lamel:

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



Obr. 3.17 Schéma externího zesílení pomocí uhlíkové lamely

3.3.2 Dobetonování části prvku

Dřívější, u rekonstrukcí betonových objektů, často používali pro dodatečné zesilování konstrukce metodu dobetonování části prvku k původní konstrukci. Je to složitější metoda a mnohem pracnější na provedení než dnešní metody zesilování. Zde je nutný zásah do konstrukce a nelze vždy spoléhat na spolupůsobení betonu. U konstrukcí navíc dochází ke zvýšení vlastní tíhy. [3-1]

4 NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Návrh geometrických rozměrů zkušebních prvků byl zvolen tak, aby došlo primárně k porušení smykem. Doprovodná tělesa byla zvolena dle normových požadavků. Rozměr těles pro smykové zkoušky se určily na 120 x 240 x 1000 mm s objemem 28,8 litrů. Budou vyrobená celkem 4 tělesa pro zkoušení smykových účinků. Bednění bude použito stávající, které se pouze upraví na požadované délky prvků 1,0 m.

Tab. 4.1 Zkušební prvky a jejich objem

Rozměry zkušebních prvků [mm]	Objem V [m ³]	Počet těles [ks]	Objem V [m ³]
120 x 140 x 1000	0,0288	4	0,1152
Celkový objem zkušebních těles V_{celk} [m ³]			0,1152

Při betonáži zkušebních prvků budou ze stejných záměsí vybetonovány zkušební tělesa pro zjištění reálných mechanických vlastností betonu.

Tab. 4.2 Doprovodná tělesa a jejich objem

Rozměry doprovodných těles [mm]	Objem V [m ³]	Počet těles [ks]	Objem V [m ³]
Krychle 150 x 150 x 150	0,003375	8	0,027
Hranol 100 x 100 x 400	0,004000	5	0,020
Celkový objem doprovodných těles V_{celk} [m ³]			0,047

Výroba armokošů pro zkušební prvky bude probíhat dle návrhu výztuže. Zásady návrhu vychází z normy ČSN EN 1992-1-1. Výsledný návrh bude upraven tak, aby bylo docíleno požadovaného porušení zkušebních prvků smykem.

Výztuž zkušebních prvků sestává z výztuže při dolním okraji Ø 10 mm v počtu 3 prutů. Při horním okraji jsou 2 pruty Ø 6 mm a smyková výztuž v podobě třmínků Ø 6 mm v celkovém počtu 9 kusů.

4.1 OBECNÉ ZÁSADY PRO NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU

Beton je kompozitní látka vznikající ztvrdnutím směsi jeho základních složek, a to cementu jako nejčastějšího používaného typu pojiva, kameniva (písku, štěrku, drtě) jako plniva a vody. Je to druh staviva, které lze definovat jako umělý kámen vzhledově podobný přírodnímu slepenci. Název beton vychází z francouzského béton (hrubá malta) a uvádí se, že byl zaveden francouzským inženýrem B. F. Belidorem již v roce 1753.

Rozdělení betonu podle pevnosti se provádí do pevnostních tříd (např. pro obyčejný a těžký beton označovaných C 25/30 nebo v případě lehkých betonů LC 25/28) podle charakteristické pevnosti v tlaku ($f_{ck,cyl}$) uvedené v MPa a zjištěné na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm (číslo před lomítkem) nebo charakteristické pevnosti v tlaku ($f_{ck,cube}$) uvedené v MPa a zjištěné na krychlích o hraně 150 mm (číslo za lomítkem) ve stáří betonu 28 dnů.

Betony se rozdělují dle:

- Stupně vlivu prostředí
- Objemové hmotnosti
- Pevnosti
- Konzistence (zpracovatelnosti) čerstvého betonu
- Největší použité frakce kameniva
- Způsobu výroby
- Vyztužení
- Účelu (funkce) použití
- Doplnkové funkce v betonové konstrukci [2-1]

4.1.1 Cement

Cement plní v betonu funkci pojiva. Smícháním s vodou vzniká cementový tmel, který postupně tuhne, tvrdne a mění se v cementový kámen. Tento proces může probíhat na vzduchu i pod vodou. Po zatvrdnutí si cement zachovává svoji pevnost a stálost, a to nejen ve vyschlém stavu, ale i při dlouhodobé expozici ve vodě (cement je výrazně hydraulickým pojivem).

Norma ČSN EN 197-1 klasifikuje cement do druhů CEM I, CEM II, CEM III, CEM IV, CEM V a pevnostních tříd 32,5, 42,5 a 52,5 dle pevnosti v tlaku v MPa po 28 dnech zkoušenou na zlomcích trámečků z cementové malty podle ČSN EN 196-1. [2-1]

4.1.2 Kamenivo

Kamenivo plní funkci pevné kostry v betonu, na kterou je obecně kladen požadavek minimální mezerovitosti (zaujímá 75 až 80% objemu betonu), tedy požadavek na optimální zrnitost. Vlastnosti kameniva mají také velký vliv na trvanlivost betonu a ostatní mechanicko-fyzikální vlastnosti betonu. Pro výrobu betonu se používá široká škála petrografických druhů kameniv v různé mineralogické skladbě s různou velikostí zrn. [2-1]

4.1.3 Záměsová voda

Voda v čerstvém betonu plní dvě hlavní funkce: hydratační a reologickou. Hydratační funkci plní voda tím, že se podílí na hydrataci cementu, tj. na chemických a fyzikálních pochodech, při kterých beton tuhne a tvrdne. Minimální množství vody pro hydrataci cementu je asi 23 až 25% hmotnosti cementu. Reologickou funkcí vody se rozumí její podíl na tvorbě tvárného čerstvého betonu, specifikovaného stupně konzistence. Technologicky se voda rozděluje na záměsovou (dávkovanou při výrobě čerstvého betonu) a na ošetřovací (voda dodávána zpravidla ve formě kropení nebo mlžení po zatuhnutí betonu minimálně po určitou dobu požadovaného udržení betonu ve vlhkém stavu).

Vodní součinitel (w/c) vyjadřuje koncentraci cementového tmelu a je určitým ukazatelem pevnosti i pórovitosti ztvrdlého cementového tmelu (cementového kamene). Je definován jako hmotnostní poměr účinného obsahu vody (w) k dávce cementu (c) v čerstvém betonu. Za předpokladu úplného zhutnění cementového tmelu je obecně platné, že se zvyšující se hodnotou (w/c) klesá pevnost ztvrdlého cementového tmelu z důvodu jeho zvyšující se porozity (celkového obsahu pórů). [2-1]

4.1.4 Přísady

Přísady jsou chemické látky používané za účelem modifikace vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Nejčastěji se používají ve stavu kapalném, mohou být ale i práškové.

Rozdělení přísad na základě hlavního nebo převažujícího účinku působení:

- Plastifikační (redukující vodu)
- Superplastifikační (dříve – ztekucující, velmi redukující vodu)
- Pro vzdušňující
- Stabilizační (zadržující vodu)
- Zpomalující tuhnutí
- Urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu
- Těsnící (hydrofobizační – odpuzující vodu) [2-1]

4.1.5 Příměsi

Příměsi jsou pevné jemně práškovité látky používané za účelem ovlivnění některých vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu nebo pro získání betonu speciálních vlastností. Přísady se obvykle dávkuje ve větších množstvích než přísady (více než 2 % hmot. z dávky cementu), proto musí být vždy započítávány do objemové skladby betonu. [2-1]

4.2 NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Návrh čerstvého betonu se provádí dle normy ČSN EN 206-1. Návrh složení betonové směsi je možno provést několika různými výpočtovými metodami, které se snaží postihnout co nejvíce proměnných veličin s cílem dosáhnout požadované pevnosti a případně i jiných vlastností betonu.

Pro náš experiment byla zvolena pevnostní třída betonu C 16/20 a složení betonové směsi jsme obdrželi od betonárny. Byly zhotoveny celkem 4 záměsi, každá o objemu 60 litrů. Betonová směs se skládá ze tří frakcí kameniva 0/4, 8/16 a 11/22. Dále pak z cementu CEM I 42,5R, záměsové vody a plastifikační přísady.

Tab. 4.3 Složení betonové směsi – 60ti litrová záměs

Materiál	Označení	Hmotnost
		m [kg]
Cement	CEM I 42,5 R	13.200
Kamenivo 0/4	Zaječí 0-4	54.030
Kamenivo 8/16	Luleč 8-16	32.172
Kamenivo 11/22	Luleč 11-22	25.494
Záměsová voda	Bez označení	6.560
Plastifikační přísada	Sika ViscoCrete - 1035	0.069

Pro zjištění reálných charakteristik betonu byly v průběhu betonáže vyrobeny zkušební tělesa. Reálné charakteristiky betonu budou použity v numerické analýze a výsledky poté porovnány s výpočtem s charakteristickými hodnotami.

Doprovodná tělesa byla vybetonována ve formě krychlí o vnitřní hraně $a = 150 \text{ mm}$ a kvádrů o vnitřních hranách $a = 150 \text{ mm}$, $b = 150 \text{ mm}$, $c = 400 \text{ mm}$. Ze čtyř záměsí bylo celkem vybetonováno 22 krychlí a 9 hranolů. Doba zrání zkušebních prvků byla stejná jako u doprovodných těles – 28 dnů. Tělesa budou následně zkoušena v laboratoři na stanovení hranolové pevnosti, krychelné pevnosti, modulu pružnosti, lomových charakteristik a u oceli zkouškou tahem.

5 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

5.1 VÝROBA

5.1.1 Příprava betonáže

Pro betonáž zkušební trámců bylo použito bednění již dříve zhotoveno na ústavu SZK z voděodolné překližky o tloušťce stěny 20 mm a spojovacího prvku ve formě samořezných šroubů. Bednění bylo společné pro všechny 4 prvky o vnitřních rozměrech 120 x 240 x 1000 mm.

Pro vyztužení trámců byly vyhotoveny 4 totožné armokoše. Výztuž byla zkrácena na požadovanou délku a spojována ručně vyrobenými třmínky. Třmínky byly na výztuž osazovány pomocí vázacího drátu po daných vzdálenostech. Bednění bylo před usazením armokošů opatřeno nátěrem pro snadnější odbedňování. Krytí výztuže bylo zajištěno plastovými distančníky.



Obr. 5.1 Příprava výztuže



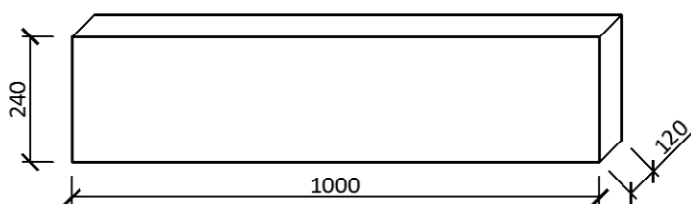
Obr. 5.2 Bednění s armokoši

5.1.2 Betonáž

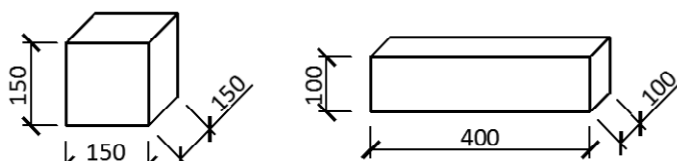
Betonáž zkušební prvků a doprovodných těles byla provedena dne 14.10.2015 v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví. Betonová směs byla míchána v míchacím stroji s nuceným oběhem a velikost jedné záměsi odpovídala maximálnímu objemu míchacího stroje.

Betonáž zkušební prvků a doprovodných těles byla provedena za pomoci vyučujících a spolužáku pro urychlení plnění forem. Jednotlivé složky betonové směsi byly předem odváženy na digitální váze s přesností na desetiny. Byly umíchány celkem 4 záměsi, ze kterých se následně betonovaly i doprovodná tělesa.

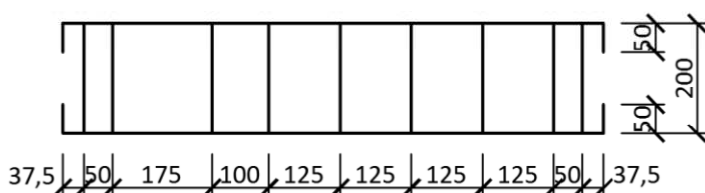
Pomocí ponorného vibrátoru (MEGAVIB+) se betonová směs hutnila v připraveném bednění. Na hutnicím stole se hutnila všechna doprovodná tělesa. Všechny vybetonované prvky byly označeny štítkem s příslušným číslem betonové záměsi.



Obr. 5.3 Průřez zkušebního prvku



Obr. 5.4 Průřezy doprovodných těles



Obr. 5.5 Armokoš



Obr. 5.6 *Hutnění zkušebního prvku*



Obr. 5.7 *Plnění a hutnění doprovodného tělesa*

5.1.3 Ošetřování betonu

Všechna vybetonována tělesa byla po dobu 7 dní od betonáže vlhčena ošetřovací vodou a zakryta igelitovou fólií proti vysychání. Poté byla tělesa odbedněna a ponechána zrání ve stálých teplotních podmínkách po dobu 21 dní. Celkem tělesa zrála 28 dnů.

5.2 DODATEČNÉ ZESÍLENÍ PRVKU

5.2.1 Použité prvky pro zesílení

Lepidlo

Pro spojení externí lepené výztuže s betonovým povrchem byla použita lepicí hmota na epoxidové bázi Sikadur 30. Hmota je dvousložková, složka A i B byly smíchány v poměru 3:1 do hladké směsi. Lepidlo se nanáší na celou plochu povrchů v síle cca 1 mm, které se k sobě lepí. Před nanesením lepidla je potřeba povrchy dobře očistit a odmastit, aby se dosáhlo požadovaných vlastností. Betonový povrch byl vybroušen a následně vysát průmyslovým vysavačem.

Lepidlo Sikadur 30 má vysokou mechanickou pevnost a dlouhou dobu zpracovatelnosti. Lze jej nanášet na matově vlhký podklad i na svislé stěny. Lepidlo rychle tuhne, čímž je zaručen rychlý nástup předepsané pevnosti.



Obr. 5.8 Lepidlo Sikadur 30

Uhlíková lamela

Pro náš experiment byla použita uhlíková lamela CFK (Carbon – Faser – Kunststoff) typ 50. Lamela se vyrábí s rozměry průřezu 50 mm x 1,2 mm v jakékoli délce. Jedno ze zkušebních těles bylo vyztuženo lamelou šířky 50 mm ve směru kolmém k předpokládané smykové trhlině v počtu 3 ks. Další těleso bylo vyztuženo lamelou stejné šíře ve směru svislém v počtu 3 ks. Poslední ze zkušebních těles bylo vyztuženo lamelou šíře 25 mm ve směru svislém v počtu 6 ks tak, aby byla zachována plocha lamely s vyztuženým prvkem o šířce lamely 50 mm.



Obr. 5.9 Uhlíková lamela

Tab. 5.1 Vlastnosti CFK lamely typ 50

Objem. hmotnost	1 600 kg/m ³
Pevnost v tahu	2 400 Mpa
Modul pružnosti	155 GPa
Rozměry	CFK typ 50 = 50 x 1,2 mm
Hmotnost	96g/bm
Stavební výška	velmi malá (2-3 mm)
Koroze	ne
Délka lamel	libovolná
Manipulace	jednoduchá
Zachycení sil	jen v podélném směru
Křížení	jednoduché
Odolnost proti únavě	vynikající
Materiálové náklady	vysoké
Pracnost	nízká
Aplikace	bez pomocných prostředků

5.2.2 Varianty zesílení

Délka uhlíkových lamel byla zvolena na celou výšku zkušebního prvku. Jelikož je výška prvku pouze 240 mm, při kratší délce lamel by nebylo dosaženo dostatečné kotvící délky lamely.

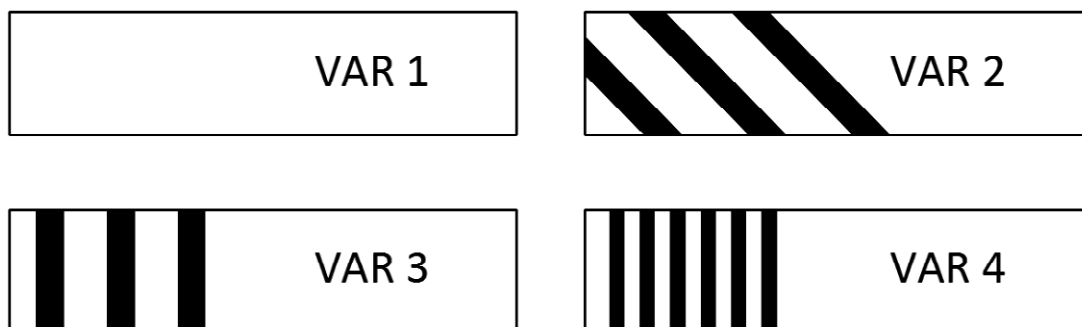
Byly použity tyto varianty zesílení:

Varianta 1 – železobetonový prvek bez externí výztuže

Varianta 2 – železobeton prvek vyztužen externí výztuží v osové vzdálenosti 145 mm v počtu 3 ks přilepených ve směru teoretického šíření hlavních tahových napětí (kolmo na předpokládaný vznik smykové trhliny)

Varianta 3 – železobeton prvek vyztužen externí výztuží v osové vzdálenosti 140 mm v počtu 3 ks přilepených ve svislém směru

Varianta 4 – železobeton prvek vyztužen externí výztuží v osové vzdálenosti 60 mm v počtu 3 ks přilepených ve svislém směru



Obr. 5.9 Varianty zesílení

5.2.3 Zesílení konstrukce pomocí CFK lamel

Postup lepení lamely na betonový prvek:

1. Lamela je zkrácena na požadovanou délku pomocí ruční pily, poté očištěna od nečistot a mastnoty
2. Betonový podklad je zbroušen bruskou na beton, zdrsňen a následně očištěn od prachových částic průmyslovým vysavačem
3. Dvousložkové lepidlo se smíchá dle postupu určeného výrobcem. Nanáší se jak na očištěnou lamelu, tak na zbroušený betonový povrch v tloušťce cca 1 mm. Lepidlo má dobu zpracovatelnosti 30 minut, proto je potřeba mít vše dopředu nachystáno a pracovat svižně
4. Lamela se přilepí prostým přitisknutím k betonovému povrchu a dotlačením tak, aby se zpod lamely vytlačil vzduch a přebývající lepidlo



Obr. 5.10 Nalepená CFK lamela

6 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

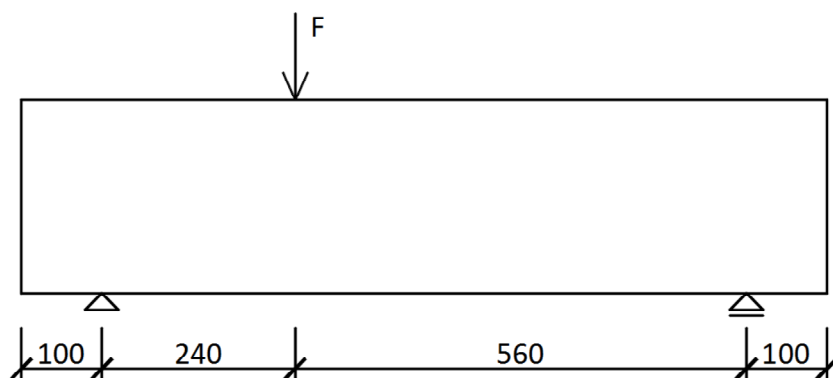
6.1 LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ

Zkušební prvky byly zkoušeny v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví. Uložení nosníků bylo zajištěno pomocí laboratorních podporových stolic. Pro vyrovnání nerovností byly použity podložky pod pevné i posuvné uložení, které umožňují svislý i vodorovný posun. Krajiní podpory byly nainstalovány 100 mm od kraje nosníku.

Prvky byly zatěžovány bodově pomocí hydraulického válce o maximální síle 250 kN.



Obr. 6.1 Uložení zkušebního prvku na laboratorních podporových stolicích

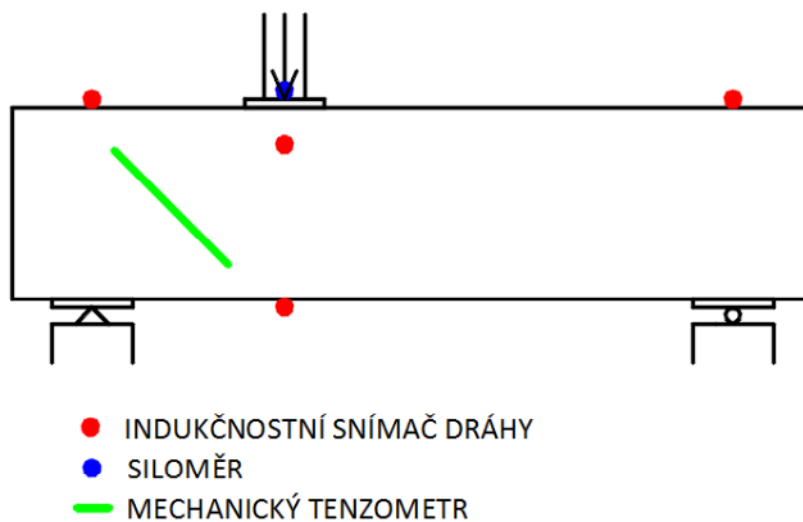


Obr. 6.2 Statické schéma zkušebního prvku

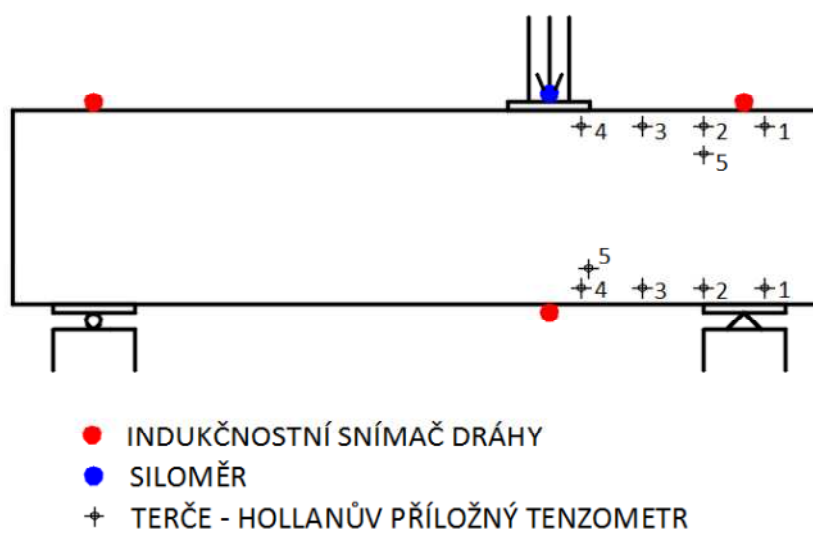
Rozmístění snímačů

Každý zkušební prvek byl osazen několika snímači, pro zaznamenání co nejpřesnějšího chování prvků v průběhu zatěžovací zkoušky. Snímače byly zapojeny do sběrné stanice HBM Spider 8. Tato stanice byla připojena na notebook s příslušným softwarem a data následně vyhodnocena. Data byla snímání s frekvencí 5 Hz.

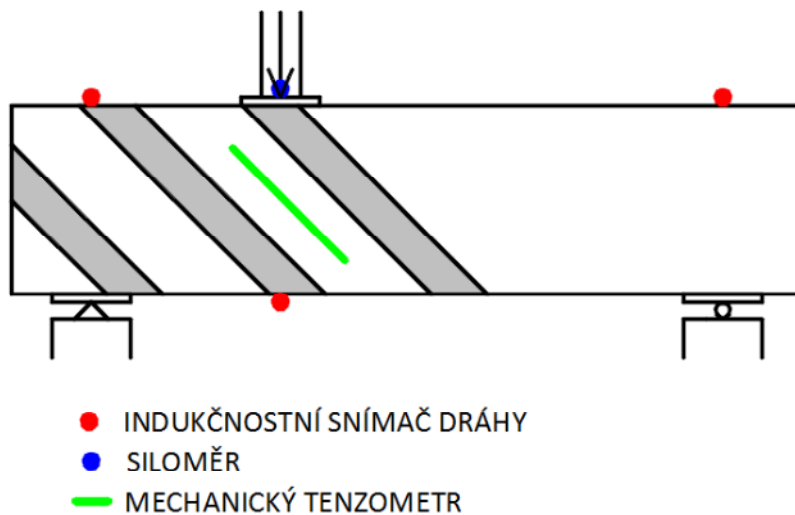
Posuny v podporách byly měřeny indukčnostními snímači dráhy WA 10 mm, které byly připevněny na prvcích, jež nezasahovaly do zkušební konstrukce, aby neovlivňovaly měření posunů. Síla od hydraulického válce byla snímána siloměrem CSP 25t, odporovým tenzometrem HBM 1-LY11 – 10/350 bylo měřeno přetvoření na lamelách. Mechanickým tenzometrem připevněným napevno k prvkům byly měřeny šířky trhlin. Hollanovým příložným tenzometrem byly také měřeny šířky trhlin, ale na protilehlé straně prvku. Umístění všech výše popsaných snímačů nejlépe ilustrují následující obrázky.



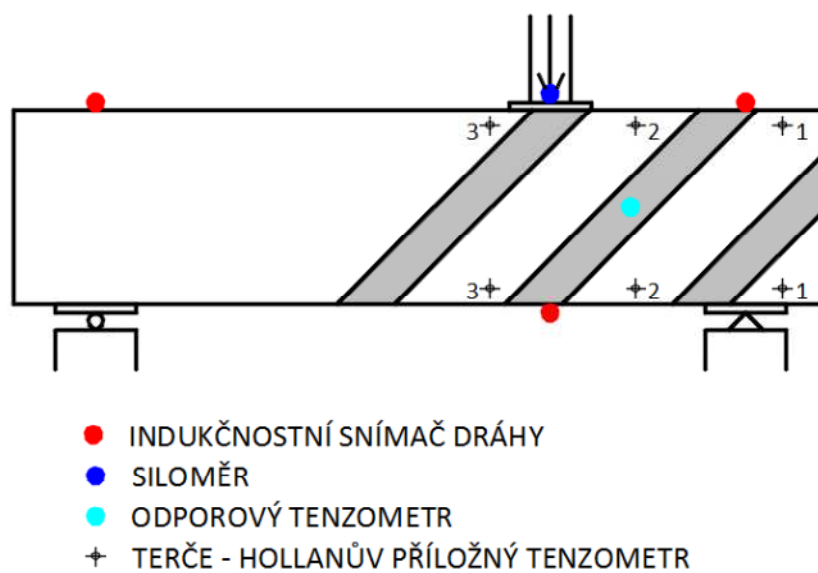
Obr. 6.3 VARIANTA 1 – čelní rozmístění snímačů



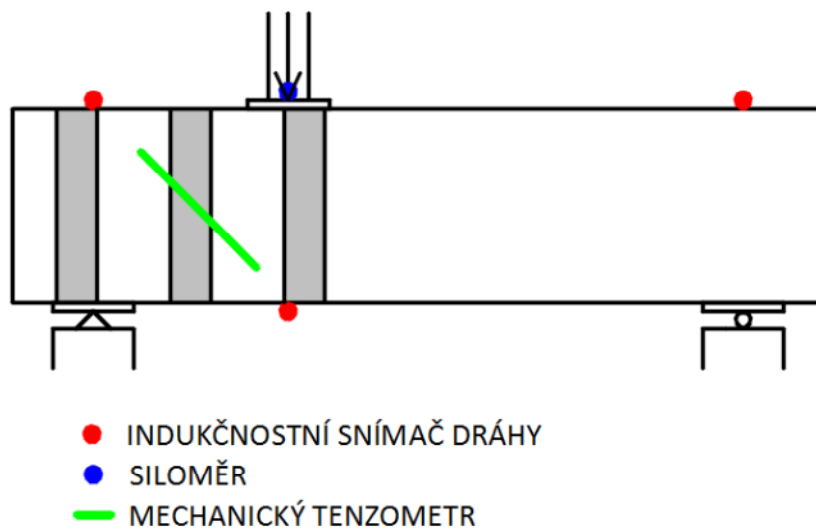
Obr. 6.4 VARIANTA 1 – zadní rozmístění snímačů



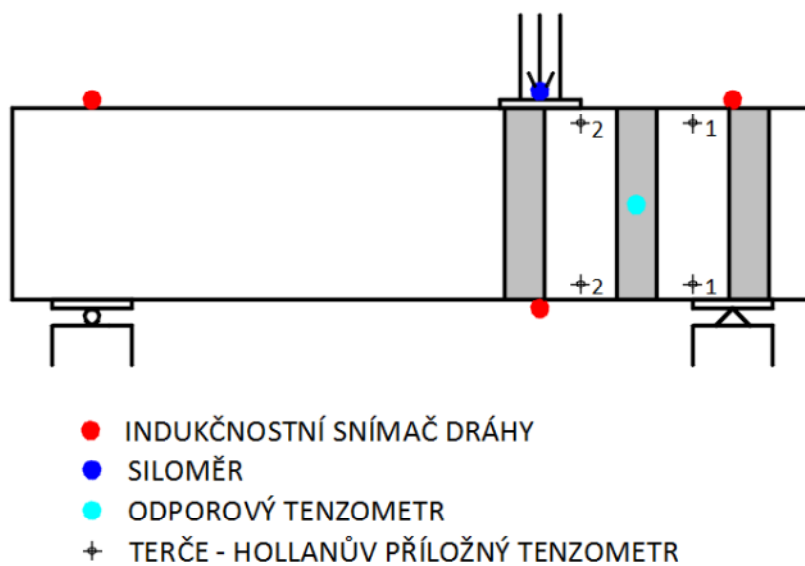
Obr. 6.5 VARIANTA 2 – čelní rozmístění snímačů



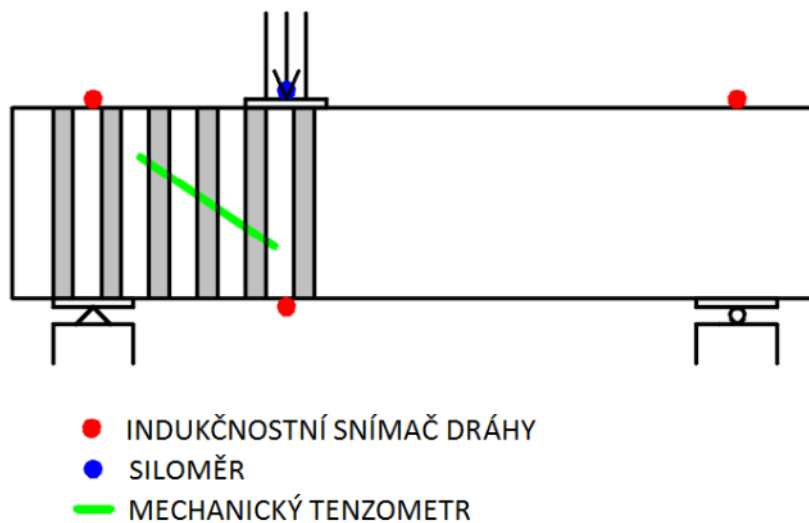
Obr. 6.6 VARIANTA 2 – zadní rozmístění snímačů



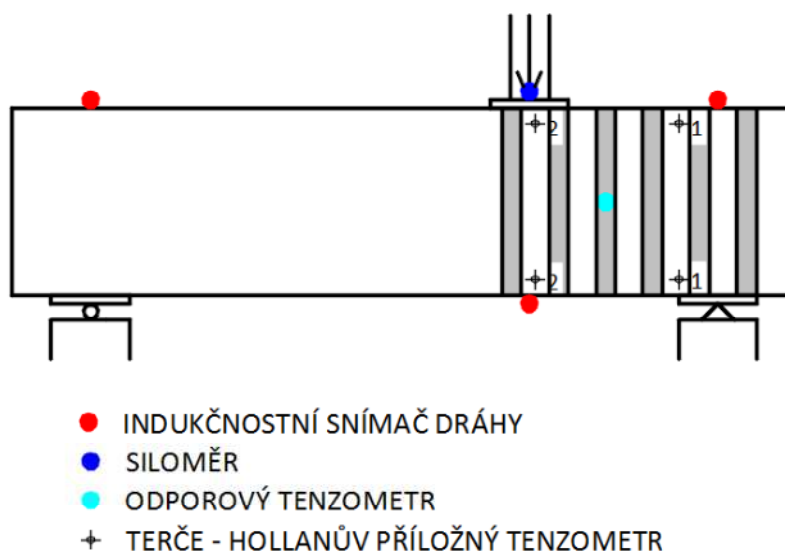
Obr. 6.7 VARIANTA 3 – čelní rozmístění snímačů



Obr. 6.8 VARIANTA 3 – zadní rozmístění snímačů



Obr. 6.9 VARIANTA 4 – čelní rozmístění snímačů



Obr. 6.10 VARIANTA 4 – zadní rozmístění snímačů

Průběh experimentální analýzy

Všechny zkušební prvky byly odzkoušeny po 28 dnech od vybetonování betonu. Před samotným zatěžováním se nejprve nainstalovala všechna měřící zařízení a provedla se vizuální kontrola správného osazení prvku na stolici. Síla byla vnášena 240 mm od krajní podpory, aby bylo zaručeno smykové porušení prvku.

Prvky se postupně zatěžovaly s přestávkami na zaznamenání rozvoje trhlin a fotografické dokumentace. Zatěžování probíhalo až do celkového kolapsu nosníku, který se následně vizuálně zkoumal.



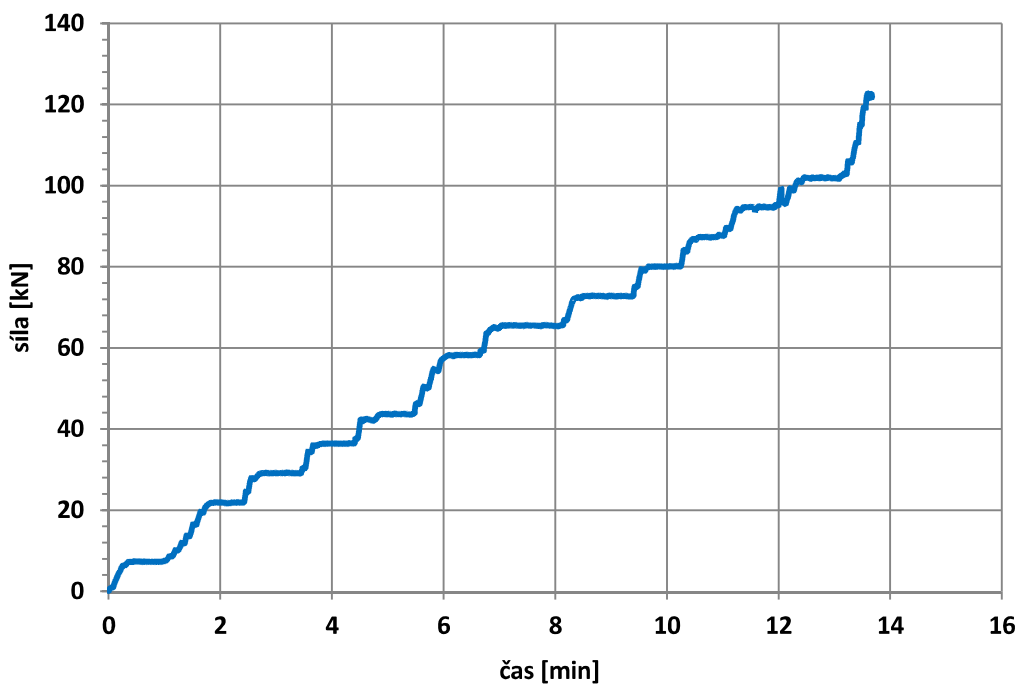
Obr. 6.11 Zkušební prvek s osazenými snímači

Zatěžovací zkouška nezesíleného prvku – VAR 1

Prvek zatěžován hydraulickým válcem přes ocelový prvek a pryžovou podložku. První pozorovatelná smyková trhlinka vznikla při 80 kN. Maximální zatížení na mezi únosnosti prvku 123 kN.



6.12 Experimentální analýza nezesíleného prvku - VAR 1



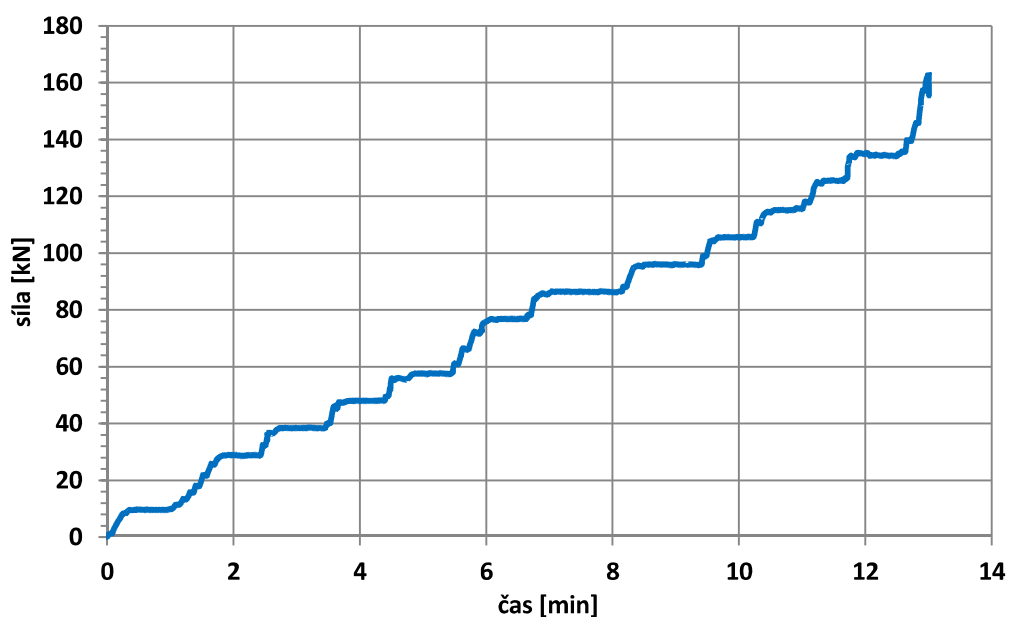
Obr. 6.13 Graf zatěžování nezesíleného prvku – VAR 1

Zatěžovací zkouška zesíleného prvku – VAR 2

Prvek zatěžován hydraulickým válcem přes ocelový prvek a pryžovou podložku. První pozorovatelná smyková trhлина vznikla při 105 kN, při 135 kN došlo k delaminaci střední lamely. Maximální zatížení na mezi únosnosti prvku 164 kN.



Obr. 6.14 Experimentální analýza zesíleného prvku – VAR 2



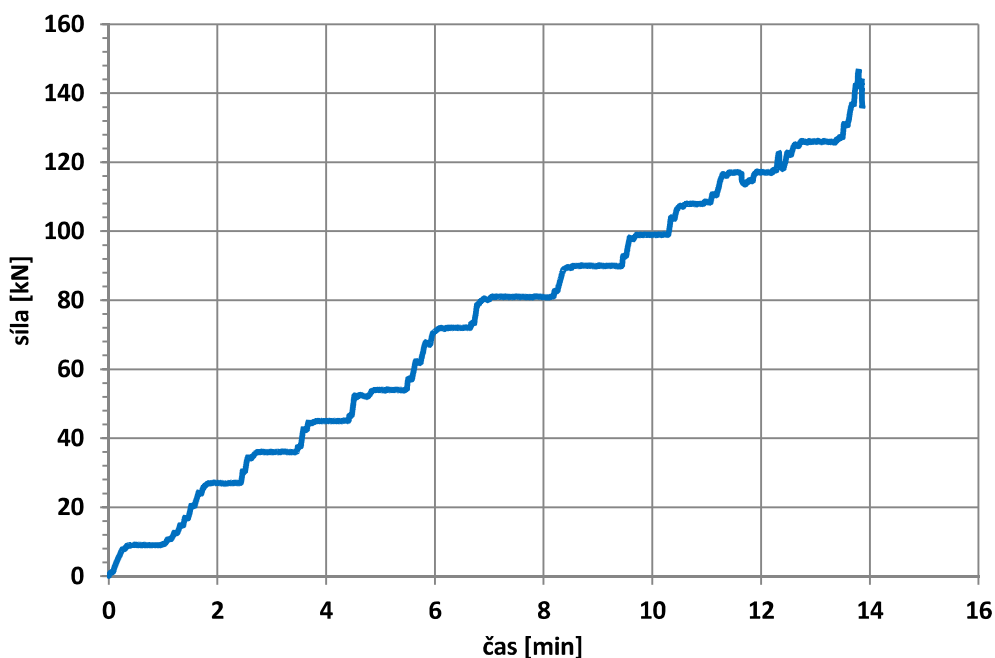
Obr. 6.15 Graf zatěžování zesíleného prvku – VAR 2

Zatěžovací zkouška zesíleného prvku – VAR 3

Prvek zatěžován hydraulickým válcem přes ocelový prvek a pryžovou podložku. První pozorovatelná smyková trhлина vznikla při 100 kN, při 125 kN došlo k delaminaci střední lamely. Maximální zatížení na mezi únosnosti prvku 147 kN.



Obr. 6.16 Experimentální analýza zesíleného prvku – VAR 3



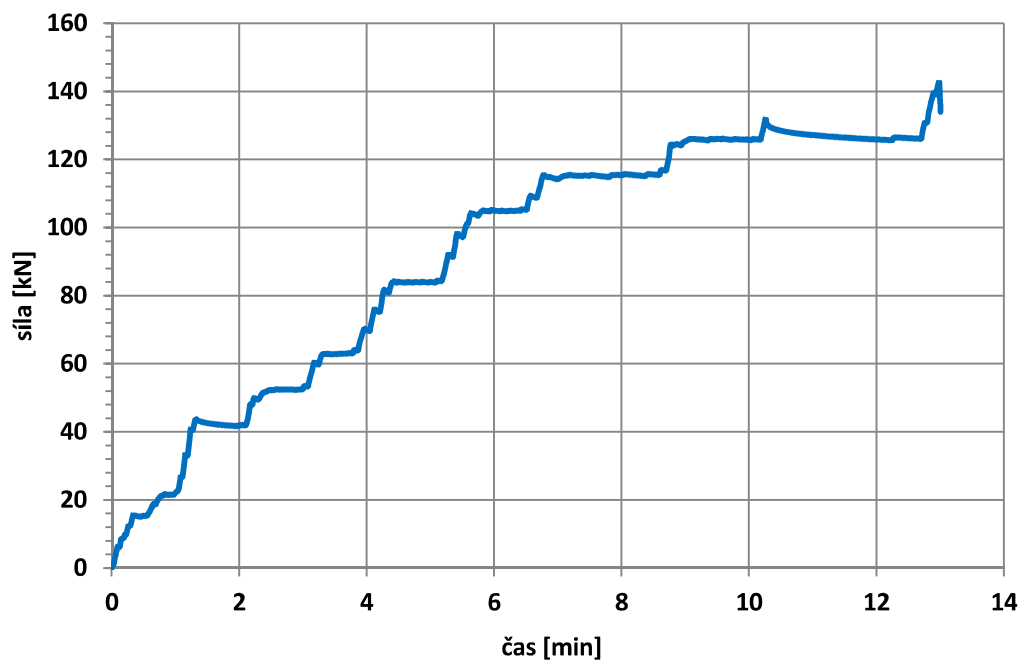
Obr. 6.17 Graf zatěžování zesíleného prvku – VAR 3

Zatěžovací zkouška zesíleného prvku – VAR 4

Prvek zatěžován hydraulickým válcem přes ocelový prvek a pryžovou podložku. První pozorovatelná smyková trhлина vznikla při 110 kN, při 123 kN došlo k delaminaci střední lamely. Maximální zatížení na mezi únosnosti prvku 143 kN.



Obr. 6.18 Experimentální analýza zesíleného prvku – VAR 4



Obr. 6.19 Graf zatěžování zesíleného prvku – VAR 4

6.2 DOPROVODNÉ ZKOUŠKY

Všechna doprovodná tělesa byla po odbednění přeměřena posuvným měřítkem a zvážena na digitální váze. Poté se určily reálné mechanické vlastnosti.

6.2.1 Fyzikálně – mechanické vlastnosti betonu

6.2.1.1 Pevnost betonu v tlaku

Pevnost betonu v tlaku je v praxi nejčastěji ověřovanou charakteristikou, neboť slouží k ověření shody se specifikovanou pevnostní třídou betonu. Zkouší se na zkušebních tělesech ve tvaru krychle, válce, na zlomcích hranolů nebo i na tělesech upravených z vývrtů z konstrukce. Tělesa jsou rovnoměrně zatěžována ve zkušebním lisu.

Výsledek měření je maximální hodnota síly F , dosažena při vyhovujícím způsobu porušení (rozdrcení) zkušebního tělesa. [2-1]

Pevnost betonu v tlaku f_c [MPa] se stanoví ze vztahu

$$f_c = \frac{F}{A_c}$$

Kde F je maximální zatěžovací síla při porušení [N] a A_c průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatěžovací síla [mm²].

Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Krychelná pevnost v betonu v tlaku $f_{c,cube}$ se stanovila na krychlích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm. Hranolová pevnost $f_{c,prism}$ na hranolech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Tělesa byla vkládána do laboratorního lisu EDT 1600 kN mezi tlačné desky a postupně zatěžována tlakem až do úplného porušení tělesa.

Vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku je zobrazeno v příloze P-1.



Obr. 6.20 Stanovení krychelné pevnosti betonu v tlaku

6.2.1.2 Statický modul pružnosti

Stanovuje se při opakovaném plynulém zatěžování zkušebního tělesa dostředným tlakem (přednostně válec, alternativně hranol) z výchozího základního zatěžovacího stavu při vyvozeném napětí 0,5 MPa na horní zatěžovací napětí ve výši odpovídající jedné třetině předem stanovené hodnoty pevnosti betonu v tlaku f_c .

V průběhu změn zatěžovacích stavů se předepsaným způsobem pomocí speciálních přístrojů (deformometrů, tenzometrů) sledují deformace betonu a zaznamenají se v čase jejich ustálení na určených zatěžovacích stavech. [2-1]

Statický modul pružnosti v tlaku E_c [MPa] se vypočítá ze vztahu

$$E_c = \frac{\sigma_a - \sigma_b}{\varepsilon_a - \varepsilon_b}$$

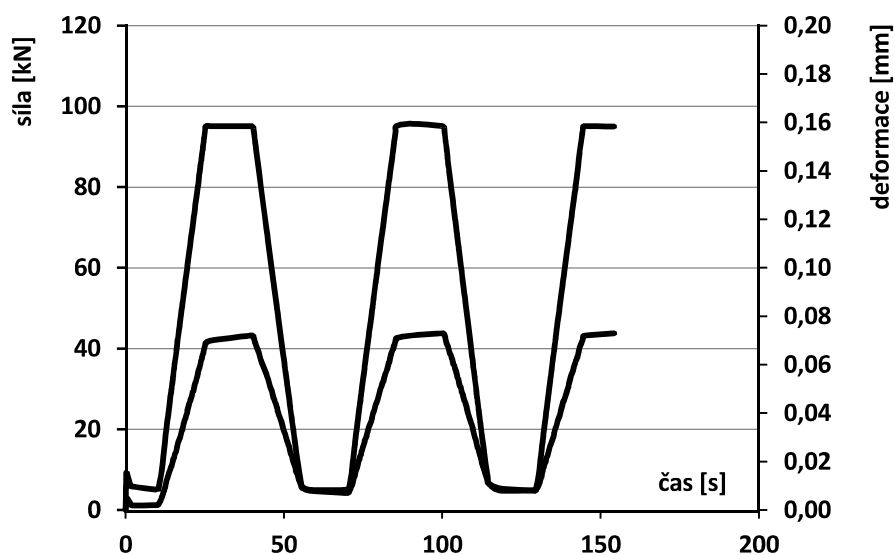
Kde σ_a je horní zatěžovací napětí v MPa ($\sigma_a = 1/3 f_c$), σ_b je základní napětí (0,5 MPa), ε_a je průměrné poměrné přetvoření při horním zatěžovacím napětí [-] a ε_b je průměrné poměrné přetvoření při základním napětí [-].

Stanovení statického modulu pružnosti betonu

Modul pružnosti se stanovoval na tělesech ve tvaru hranolu o rozměrech 100 x 100 x 400 mm. Tělesa byla zatěžována ve zkušebním lise FORMTEST s osazeným snímacím rámem o délce základny 200 mm. Rám pro cyklické snímání modulu je tvořen dvěma tenzometry, jež jsou umístěny na protilehlých stranách zkušebního tělesa. Vyhodnocení pevnosti betonu v tlaku je zobrazeno v příloze P-1.



Obr. 6.21 Stanovení statického modulu pružnosti betonu

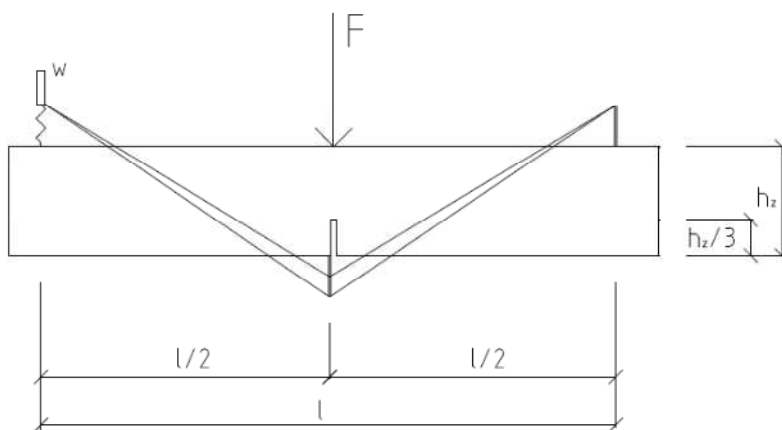


Obr. 6.22 Grafické znázornění průběhu zkoušky

6.2.1.3 Pevnost v tahu za ohybu

K nejčastěji používané zkoušce lomových parametru patří zkouška tříbodovým ohybem hranolu. Lomové parametry betonu se zkouší na zkušebních tělesech s předem vytvořenou počáteční trhlinou (zářezem) o známých rozměrech. Zářez je vytvořen v polovině délky tělesa v tažených vláknech. Zářezy představují koncentrátoři napětí, kde u jejich vrcholu během zatěžování vzniká a šíří se lomová procesní zóna a je následovaná makroskopickou trhlinou. Na upravené zkoušené těleso zářezem směrem dolů se umístí měřící konstrukce s indikátorem průhybu. V průběhu zkoušky se zaznamenává zatěžovací síla F a průhyb uprostřed rozpětí hranolu na celé délce hranolu. [3-4]

V našem případě byla ze zkoušky vyhodnocena lomová energie betonu. Vyhodnocení zkoušky je v příloze P-3.



Obr. 6.23 Schéma zkoušeného tělesa s měřící konstrukcí s indikátorem průhybu [3-4]



Obr. 6.24 Osazené zkoušené těleso

6.2.2 Mechanické vlastnosti oceli

6.2.2.1 Pevnost oceli v tahu

Hlavní předností oceli je její pevnost v tahu, která zajišťuje odolnost proti tahové síle. Pevnost oceli v tahu je ovlivněna několika faktory, jako jsou obsah uhlíku v oceli nebo teplota dané oceli. Obsah uhlíku v oceli mění tvrdost, pevnost, houževnatost a další vlastnosti. Teplota zase výrazně mění pevnost materiálu a to u 500°C může pevnost klesat na polovinu oproti původním hodnotám, čímž ztrácí i mez kluzu. Opakované namáhání oceli také mění její pevnost, která může klesnout až na hodnotu meze únavy. [1-3]

Mez pevnosti f_u [MPa] se určí ze vztahu

$$f_u = \frac{F_{MAX}}{A_s}$$

Kde F_{MAX} je maximální hodnota tahové síly [N] a A_s je plocha zkoušeného prutu [mm²]

Mez kluzu f_y [MPa] se určí ze vztahu

$$f_y = \frac{F_{0,2}}{A_s}$$

Kde $F_{0,2}$ je hodnota tahové síly v úrovni meze kluzu [N] a A_s je plocha zkoušeného prutu [mm²]

Stanovení pevnosti oceli v tahu

Zkušební prvky byly vyztuženy armokošem, jež tvořila výztuž o průměru 6 a 10 mm. Na obou těchto profilech byla zkoušena pevnost oceli v tahu. Nejprve byla změřena počáteční délka l_0 a poté profily uchyceny do lisu s osazenými indukčnostními snímači dráhy a jednotlivě zkoušeny. Indukčnostní snímače byly zapojeny do měřicí centrály HBM Spider8 s frekvencí ukládání dat 5 Hz, ve které byly v intervalech zaznamenávány naměřené hodnoty pro další zpracovávání výsledků. Vyhodnocení dat proběhlo v tabulkovém editoru.

Ze získaných dat byla určena mez kluzu, pevnost v tahu a modul pružnosti oceli. Vyhodnocení je zobrazeno v příloze P-3.



Obr. 6.23 Přetržení betonářské výztuže

6.2.3 Vyhodnocení doprovodných zkoušek

Tab. 6.1 Výsledky doprovodných zkoušek vlastností betonu

Statický modul pružnosti	27,0 GPa
Krychelná pevnost betonu v tlaku	34,9 MPa

6.2.3.1 Zatřídění dle ČSN EN 206:

Tato norma udává kritéria shody pro pevnost betonu v tlaku. Pro jednotlivé výsledky zkoušek zkušebních těles zkoušených ve stáří 28 dnů musí každý jednotlivý výsledek zkoušky f_{ci} vyhovět podmínce:

$$f_{ci(min)} \geq f_{ck} - 4$$

$$30,5 \geq 30 - 4 = 26$$

Posouzení specifické charakteristické pevnosti se posuzuje buďto dle:

Metoda A: Počáteční výroba

Metoda B: Průběžná výroba

Vyhodnocení charakteristické pevnosti v našem experimentu je provedeno dle
Metody A.

$$f_{cm} \geq f_{ck} + 4$$

$$34,9 \geq 30 + 4 = 34$$

→ **Třída betonu C 25/30**

Tab. 6.2 Výsledky doprovodných zkoušek oceli

	Ø 6 mm	Ø 10 mm
Mez kluzu	520 MPa	613 MPa
Mez pevnosti	631 MPa	713 MPa
Modul pružnosti	199 GPa	214 GPa

7 NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerická analýza byla provedena ve výpočetním softwaru ATENA 2D. Matematický model byl vytvořen s reálnými charakteristikami oceli a betonu.

7.1 MATEMATICKÝ MODEL

Model byl vytvořen softwarem ATENA, který umožňuje reálnou simulaci porušení betonových a železobetonových konstrukcí. Autory toho výpočetního programu jsou V. Červenka, R. Pukl a J. Margoldová. Díky nelineární analýze je možné určit průhyb prvku, a také vznik a šířku trhlin. Program disponuje velkým množstvím materiálových modelů a pracuje metodou konečných prvků.

Numerický postup řešení sestává ze tří částí:

- Základní vztahy definující chování materiálu – vztahy mezi napětím a přetvoření
- Postup metodou konečných prvků, diskretizace pole přetvoření – uzlové posuny
- Řešení nelineárního problému pomocí souboru následných lineárních řešení

7.1.1 Řešení modelu

Modely zkušebních prvků byly řešeny pomocí Newton – Rapshon metody. Síť konečných prvků byla vymodelována jako čtyřúhelníková s délkou strany prvku 0,02 m. Tato hodnota byla shledána jako dostačující pro výstižnost výsledků a časovou náročnost výpočtu. Zatížení prvku se simulovalo deformací hodnotou 0,05 mm.

Byly vymodelovány všechny 4 varianty zkušební prvků – 1 železobetonový a 3 železobetonové s externí uhlíkovou výztuží. Betonový nosník byl vymodelován nelineárním betonem SBETA.

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

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	27000	MPa
Pevnost v tlaku	R_{cu}	34,9	MPa
Pevnost v tahu*	R_c	2,3	MPa
Objemová hmotnost	ρ	2,27E-02	MN/m ³
Lomová energie	G_f	3,87E-04	MN/m

Externí výztuž byla vmodelována materiálem 3D bi-lineární ocel Von Mises. Charakteristické vlastnosti byly použity dle skutečných hodnot aplikované lamely. Vrstva lepidla se zanedbala.

Tab. 7.2 Použité reálné vlastnosti CFK lamely

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	155000	MPa
Pevnost v tahu	R_c	3000	MPa
Objemová hmotnost	ρ	1,61E-02	MN/m ³

Ocelová výztuž byla vmodelována materiálem Výztuž. Pracovní diagram oceli byl upraven dle naměřených hodnot.

Tab. 7.3 Použité reálné vlastnosti ocelové výztuže $\varnothing 6 \text{ mm}$

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	199,0	MPa
Mez kluzu	f_y	520,0	MPa
Mez pevnosti	f_u	631,0	MPa
Objemová hmotnost	ρ	7,85E-02	MN/m ³

Tab. 7.4 Použité reálné vlastnosti ocelové výztuže $\varnothing 10 \text{ mm}$

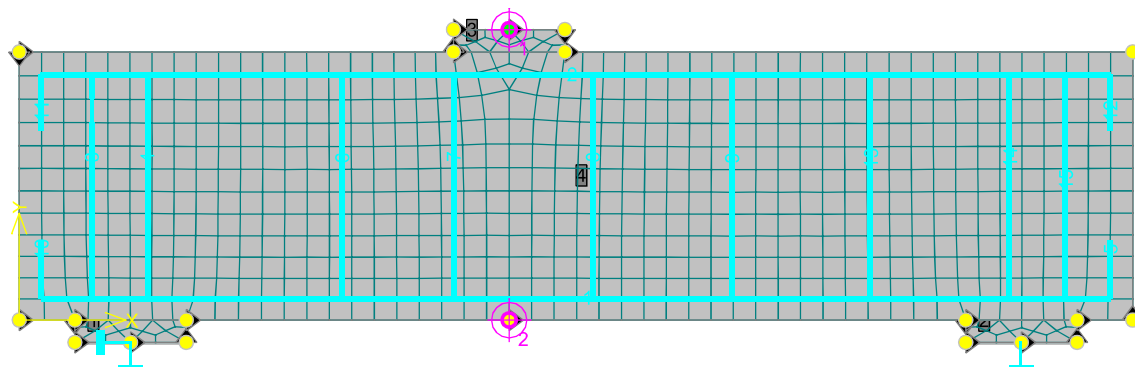
Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	214,0	MPa
Mez kluzu	f_y	613,0	MPa
Mez pevnosti	f_u	713,0	MPa
Objemová hmotnost	ρ	7,85E-02	MN/m ³

Každý zkušební prvek byl podepřen na podložkách, jež byly vymodelovány materiálem 3D bi-lineární ocel Von Mises s nekonečnou tuhostí. Podložky při experimentální analýze sloužily k vyrovnaní nerovností vzniklé při betonáži.

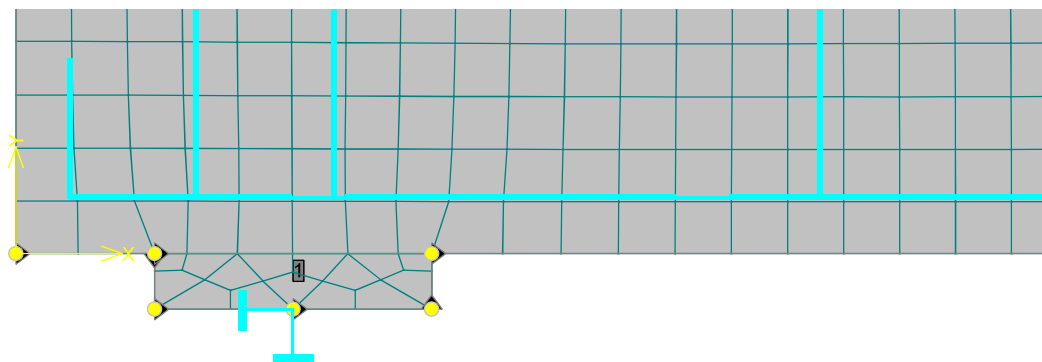
Model byl také doplněn o monitorovací body pro snímání deformací a posunů. Jeden monitor byl definován jako monitor síly, druhý jako monitor svislých deformací.

7.1.2 Grafické zobrazení modelu

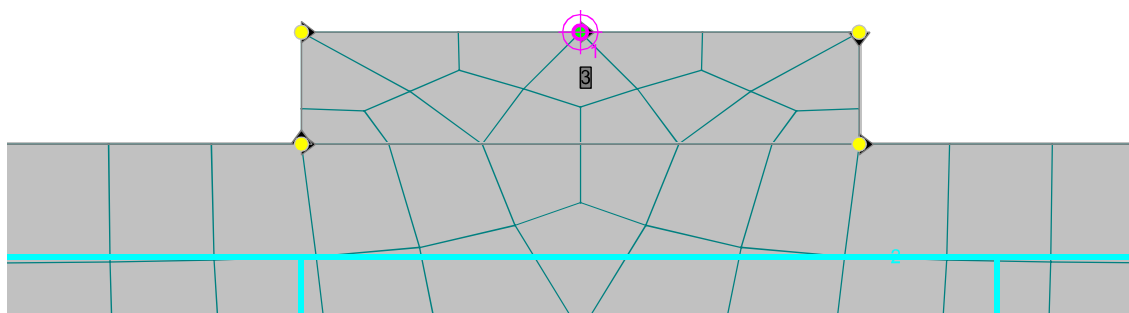
Varianta 1:



Obr. 7.1 Numerický model nezesíleného zkušebního prvku – VARIANTA 1

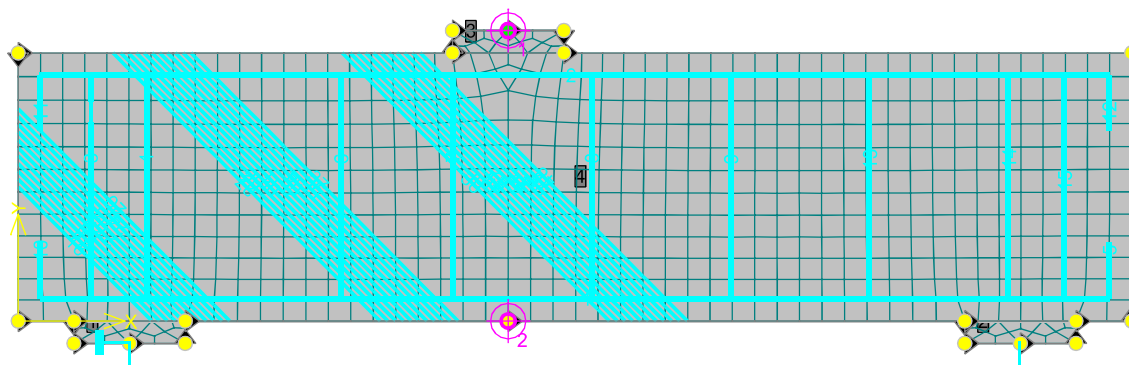


Obr. 7.2 Detail podpory



Obr. 7.3 Detail monitorovacího bodu

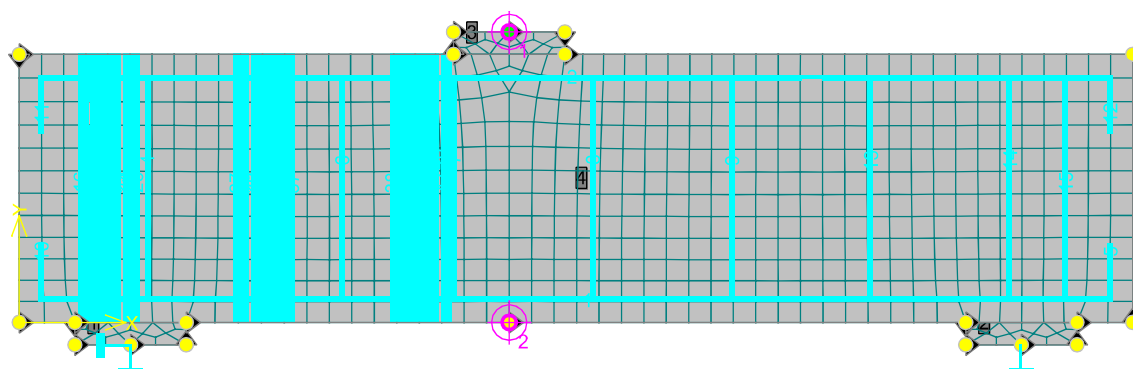
Varianta 2:



Obr. 7.4 Numerický model zesíleného zkušebního prvku – VARIANTA 2

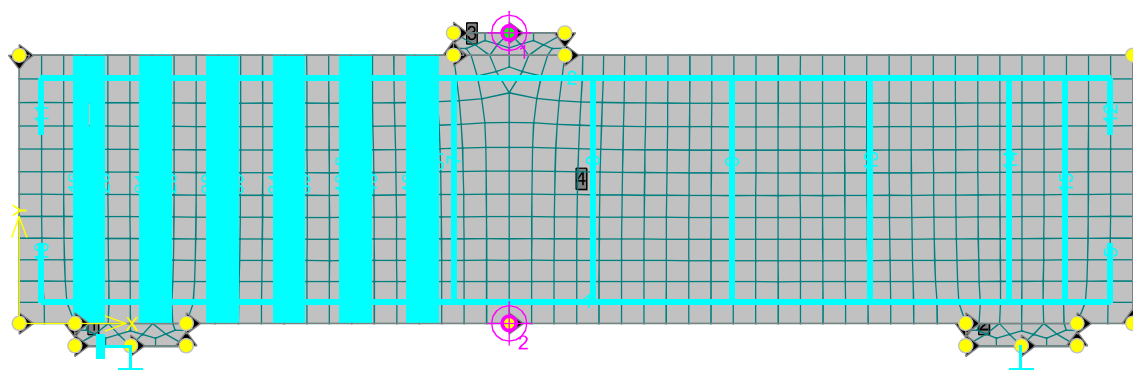
Celková plocha externí výztuže byla rozdělena na několik dílčích částí, díky kterým bylo možno takovéto zesílení ve 2D vymodelovat. Každé dílčí částí přísluší procentuální díl z celkové plochy lamely, čímž se zajistilo vymodelování externí výztuže ve vyráběné ploše. Takovýto postup byl použit u všech variant externího zesílení zkušebních prvků.

Varianta 3:



Obr. 7.5 Numerický model zesíleného zkušebního prvku – VARIANTA 3

Varianta 4:



Obr. 7.6 Numerický model zesíleného zkušebního prvku – VARIANTA 4

Pro numerickou analýzu byly vytvořeny zatěžovací stavy, které byly přidávány do jednotlivých výpočtových kroků. Jelikož nebylo potřeba zvětšovat přírůstek deformace, např. z důvodu slabšího softwarového vybavení, celá analýza probíhala s konstantním přírůstkem deformace 0,05 mm.

Zatěžovací stavy a výpočtové kroky

- ZS 1 Podpory
- ZS 2 Vlastní tíha 1, 2 ... 1 krok
- ZS 3 Deformace 1, 3 ... 40 krok

Výsledky numerické analýzy jsou prezentovány v příloze P-5.

7.2 ANALYTYCKÉ POSOUZENÍ DLE EUROCODE 2

7.2.1 Posouzení dle ČSN EN 1992-1: Eurocode 2

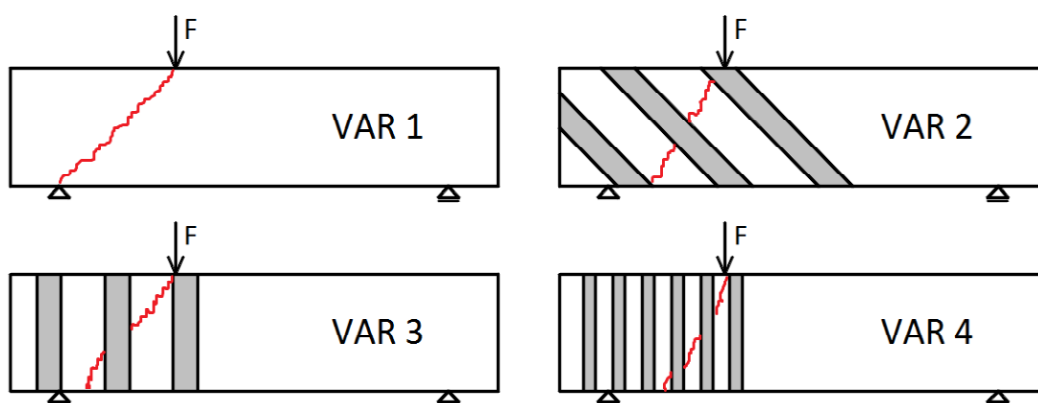
Statický výpočet je proveden pro dvojí charakteristiky betonu. Nejdřív bylo počítáno s normovými hodnotami, poté s reálnými hodnotami, jež byly určeny na základě doprovodných zkoušek. Výpočet obsahuje stanovení únosnosti železobetonového prvku a dále pak únosnosti jednotlivých variant externího zesílení. Je určen také průhyb, na jehož základě byl sestaven idealizovaný průběh chování prvku při zatížení.

Statický výpočet je v příloze P-1.

8 VYHODNOCENÍ

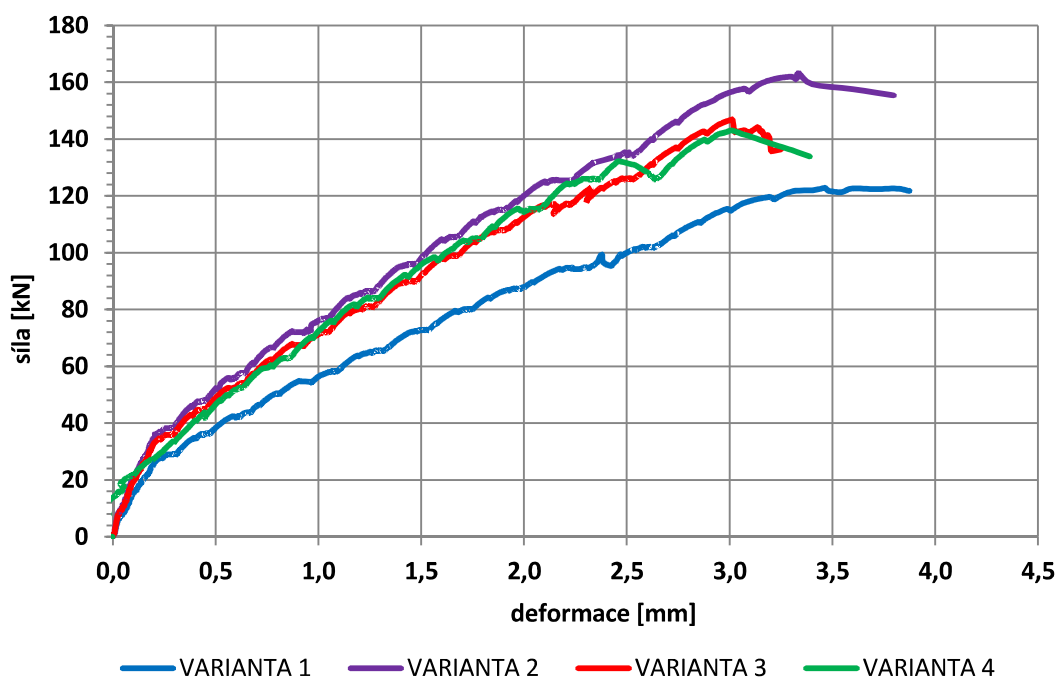
8.1 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

Předpokladem úspěšné experimentální analýzy byl správný návrh výztuže prvků tak, aby primární porušení bylo porušení smykové. Díky několika způsobům rozložení externí výztuže na zkušební prvky byl vznik smykových trhlin při zatěžovacích zkouškách značně ovlivněn. U varianty 1 (nezesílený prvek) došlo k typické smykové trhlině spojující podporu a břemeno. Orientace lamel ve směru hlavních tahových napětí se jeví jako nejlepší. Varianta 2 také vykázala nejvyšší únosnost ze všech typů aplikovaných zesílení. U varianty 3 a 4 byla vzniklá smyková trhlina značně strmá. Trhliny se šířily v pásmech podél jednotlivých lamel. Obě tyto varianty vykázaly přibližně stejné hodnoty únosnosti.



Obr. 8 - 1 Směr smykových trhlin při experimentální analýze prvků

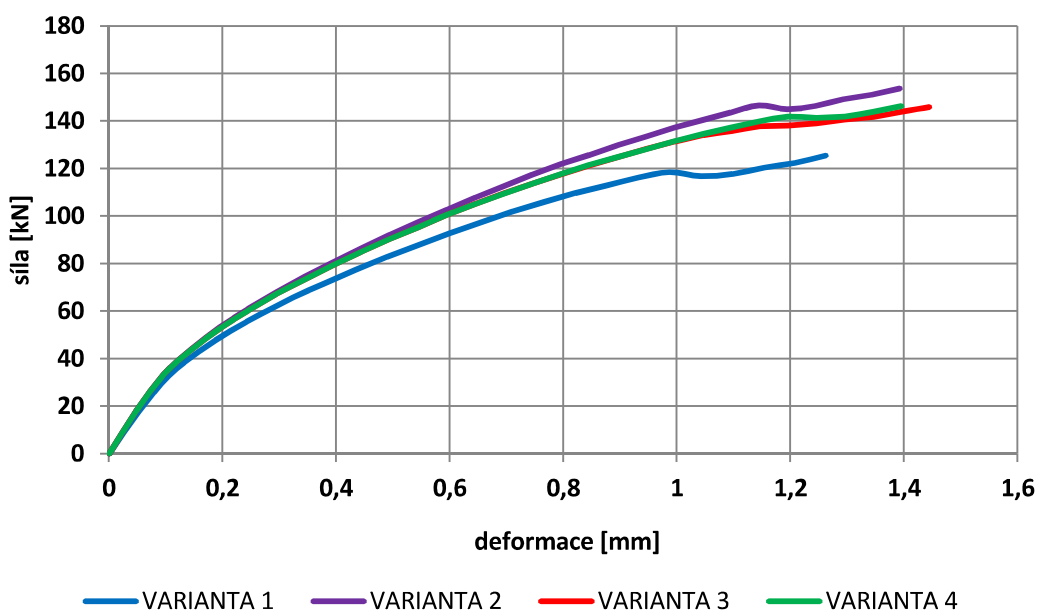
Zkušební prvek bez externího zesílení (varianta 1) přenesl sílu na mezi únosnosti 123 kN. Zkušební prvek s aplikací uhlíkových lamel pod úhlem 45° přenesl maximální sílu 164 kN. Uhlíkové lamely zvýšily únosnost prvku o 25 % (41 kN). Delaminace střední lamely nastala při zatížení 135 kN. Mez únosnosti prvku se zvýšila o 9 % (12 kN). Lamely, jež byly nalepeny ve svislém směru, přenesly maximální sílu 147 kN. Únosnost prvku se zvýšila o 16 % (24 kN). Delaminace první lamely nastala při zatížení 125 kN. Mez únosnosti prvku celkově narostla o 2 % (2 kN). Poslední typ externího zesílení prvku vycházel z předešlé varianty, kdy byla zachována stejná plocha externí výztuže. Výsledky analýzy jsou tedy téměř shodné. Maximální přenesená síla byla 143 kN. Únosnost prvku zvýšena o 14 % (20 kN). Delaminace nastala při zatěžování silou 123 kN. U této varianty nedošlo ke změně meze únosnosti prvku.



Obr. 8 – 2 Průběh experimentální analýzy všech zkušebních prvků

8.2 NUMERICKÁ ANALÝZA – ATENA 2D

Numerickou analýzou bylo porovnáno chování zkušebních prvků s laboratorním zatěžováním. Prvek bez externího zesílení přenesl sílu na mezí únosnosti 117 kN. Lamely aplikované ve směru hlavních tahových napětí přenesly maximální sílu 30 kN. Mez únosnosti se tímto typem aplikace lamel zvýšila o stejnou hodnotu. Lamely aplikovány ve svislém směru přenesly maximální sílu 21 kN. Mez únosnosti se zvýšila o 15 %. Poslední typ zesílení zvýšil mez únosnosti prvku o 18 %.

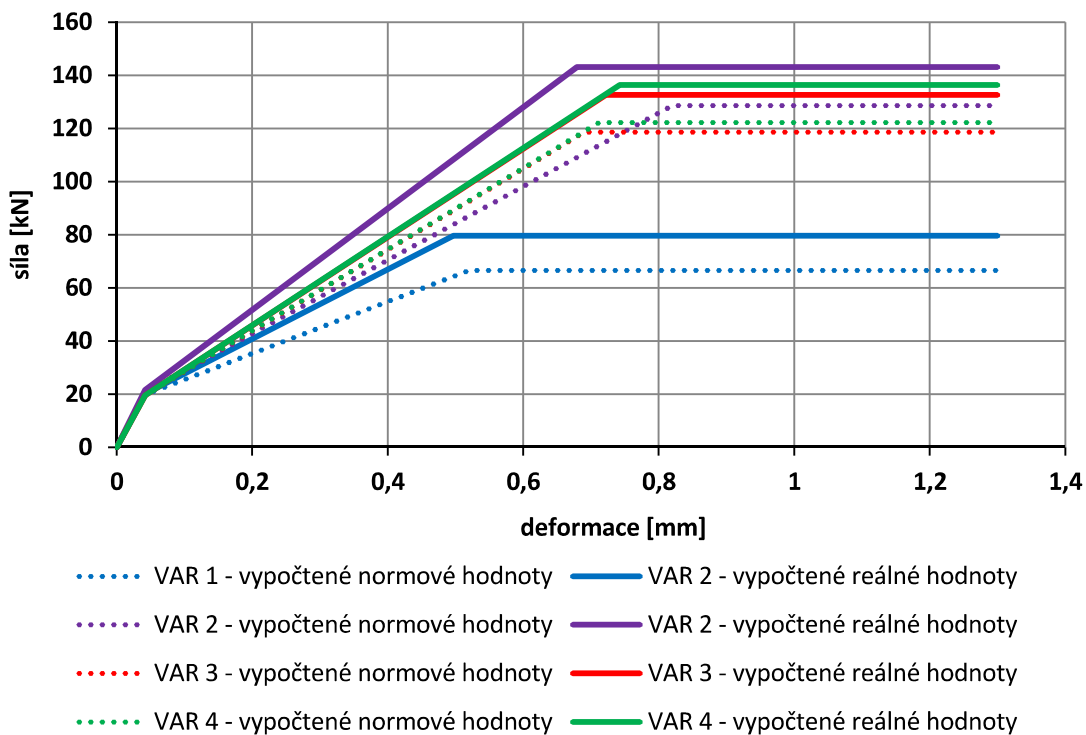


Obr. 8 – 3 Průběh numerické analýzy všech zkušebních prvků

8.3 STATICKÝ VÝPOČET

Statickým výpočtem byly určeny únosnosti pro dvě sady materiálových charakteristik – normových a reálných získaných na zkušebních tělesech v laboratoři.

Výsledky obou sad výpočtů jsou znázorněny na následujícím grafu.



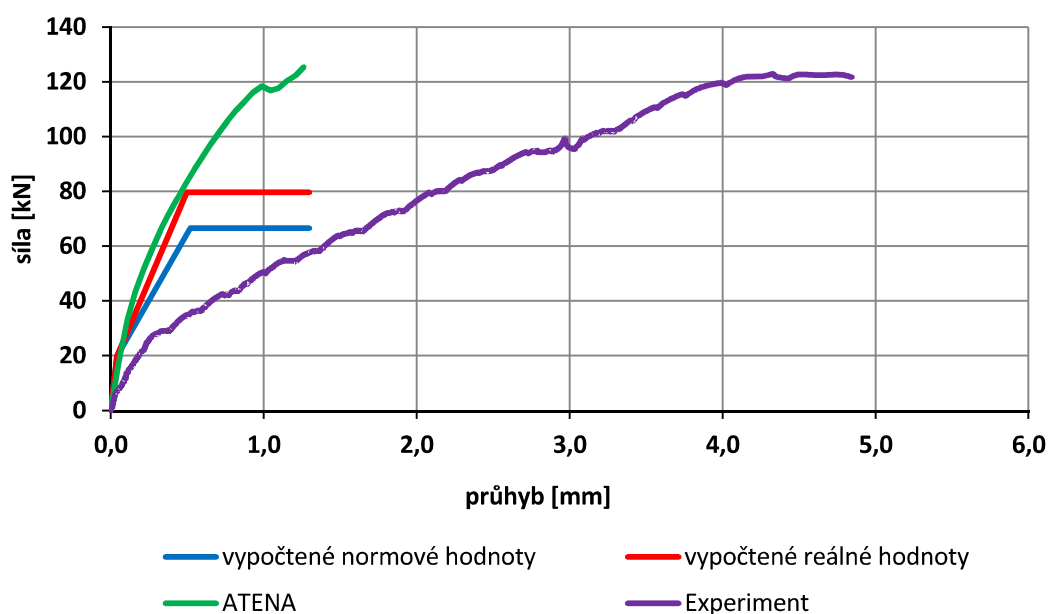
Obr. 8 – 4 Únosnost zkušebních prvků stanovena statickým výpočtem
v závislosti na svislé deformaci

8.4 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

8.4.1 Varianta 1

Tab. 8 – 1 Porovnání výsledků – VARIANTA 1

	Experiment	ATENA	Výpočet - normové hodnoty	Výpočet - reálné hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin	-	32,880	19,900	20,100
Průhyb na mezi vzniku trhlin	-	0,026	0,042	0,042
Síla na mezi únosnosti	122,845	116,800	66,570	79,610
Průhyb na mezi únosnosti	4,328	0,948	0,520	0,497
Porovnání únosnosti	100%	95%	54%	65%

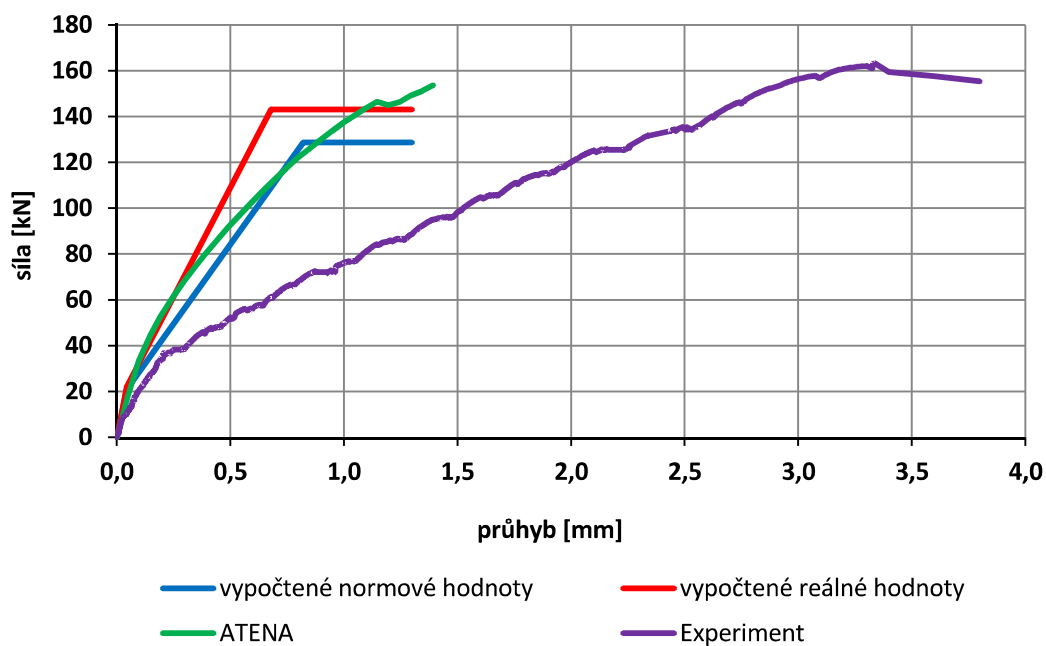


Obr. 8 – 5 Únosnosti VARIANTY 1 v závislosti na deformaci

8.4.2 Varianta 2

Tab. 8 – 2 Porovnání výsledků – VARIANTA 2

	Experiment	ATENA	Výpočet - normové hodnoty	Výpočet - reálné hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin	-	33,290	20,890	21,700
Průhyb na mezi vzniku trhlin	-	0,026	0,042	0,042
Síla na mezi únosnosti	163,504	146,600	128,680	143,040
Průhyb na mezi únosnosti	3,335	1,145	0,820	0,679
Porovnání únosnosti	100%	90%	79%	87%

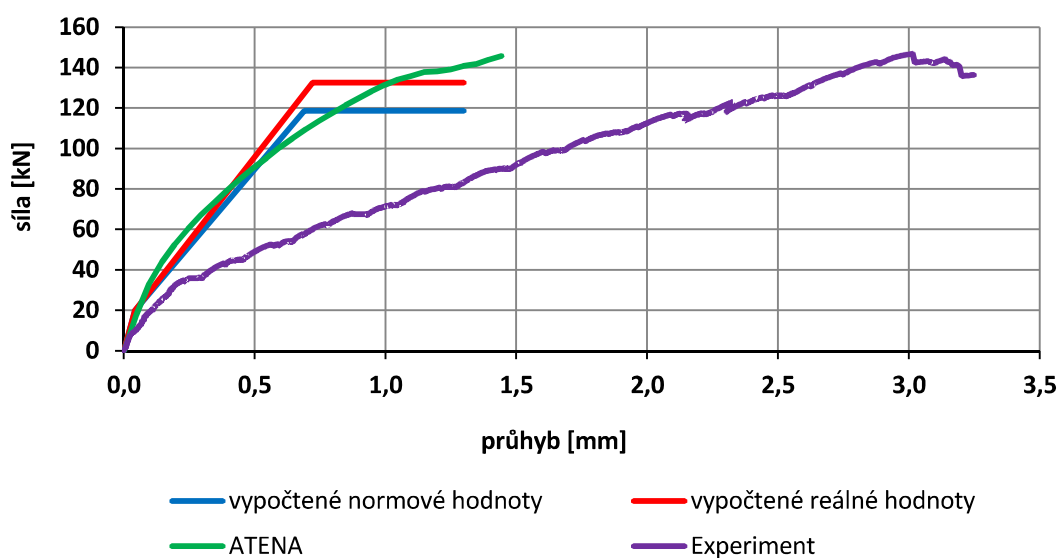


Obr. 8 – 6 Únosnosti VARIANTY 2 v závislosti na deformaci

8.4.3 Varianta 3

Tab. 8 – 3 Porovnání výsledků – VARIANTA 3

	Experiment	ATENA	Výpočet - normové hodnoty	Výpočet - reálné hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin	-	33,180	19,700	19,670
Průhyb na mezi vzniku trhlin	-	0,024	0,042	0,042
Síla na mezi únosnosti	146,990	137,800	118,660	132,620
Průhyb na mezi únosnosti	3,015	1,146	0,690	0,722
Porovnání únosnosti	100%	94%	81%	90%

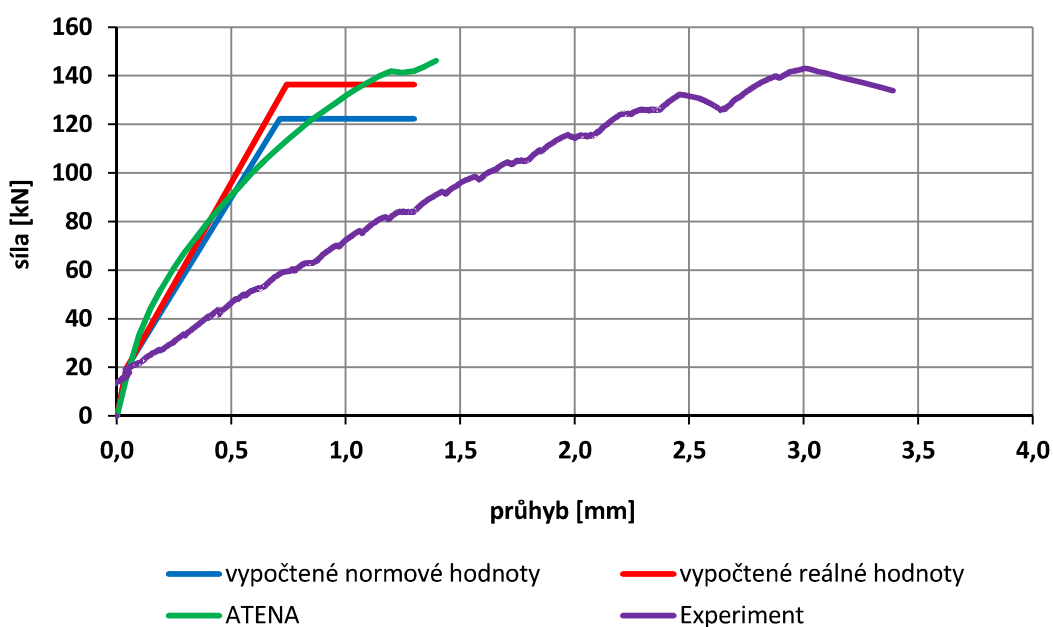


Obr. 8 – 7 Únosnosti VARIANTY 3 v závislosti na deformaci

8.4.4 Varianta 4

Tab. 8 – 4 Porovnání výsledků – VARIANTA 4

	Experiment	ATENA	Výpočet - normové hodnoty	Výpočet - reálné hodnoty
Síla na mezi vzniku trhlin	-	33,17	19,700	19,670
Průhyb na mezi vzniku trhlin	-	0,0263	0,042	0,042
Síla na mezi únosnosti	143,112	141,9	122,260	136,370
Průhyb na mezi únosnosti	3,007	1,196	0,712	0,742
Porovnání únosnosti	100%	99%	85%	95%



Obr. 8 – 8 Únosnosti VARIANTY 4 v závislosti na deformaci

9 ZÁVĚR

Ačkoli uhlíkové lamely nepatří k nejlevnějším materiálům, v určitých případech mají své opodstatnění. Uhlíkové lamely nekorodují, proto je možné lamely aplikovat všude tam, kde by hrozila koroze ocelové výztuže (čistírny odpadních vod, chemický průmysl, atd.). Jako nejvhodnější se jeví lamely lepené pod úhlem 45° ve směru hlavních tahových napětí. Při návrhu je potřeba znát tahovou pevnost betonu, na který se zesílení bude aplikovat, jelikož beton je vždy nejslabším článkem celého systému. Čím menší krytí betonářské výztuže, tím spíše dojde k delaminaci betonové krycí vrstvy od betonářské výztuže, a to v případech, kdy jsou lamely aplikovány do tahových oblastí konstrukce. Nutné je také věnovat čas přípravě betonového podkladu, aby byla zaručena co nejlepší spojitost aplikovaného vyztužení se zesilovaným povrchem.

Návrhové únosnosti lamel statickým výpočtem vycházejí větší, než jsou lamely ve skutečnosti schopny přenést. Je to dáno obtížnou specifikací momentu, kdy dojde k delaminaci prvních lamel. Na tento fakt je potřeba klást při celkovém návrhu externího vyztužení zřetel.

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

NORMY

- [1-1] ČSN EN 1992-1: Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [1-2] ČSN 731201-86 Navrhování betonových konstrukcí
- [1-3] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [1-4] EN 11992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [1-5] ACI 440.2R Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures
- [1-6] ČSN EN 10002-1 Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty
- [1-7] ČSN EN 206 Beton – specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

SKRIPTA A OPORY

- [2-1] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Druhé přepracované a doplněné vydání. Bratislava: Jaga Group, s. r. o., 2007. ISBN 978-80-8076-057-1
- [2-2] Schmid, P., kol, *Základy zkušebnictví*, FAST VUT v Brně, 2000
- [2-3] Manuál programu pro nelineární výpočty železobetonových konstrukcí - ATENA 2D, ATENA 3D, 1.-4. část, Červenka Consulting

BAKALÁŘSKÉ, DIPLOMOVÉ A DISERTAČNÍ PRÁCE

- [3-1] VEPŘEK K. *Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na ohyb*. Brno, 2015, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [3-2] VEPŘEK K. *Experimentální ověření kotevních oblastí zesílení ŽB prvků ocelovými lamelami*. Brno, 2013, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [3-3] DIBELKA V. *Dodatečné zesilování smykem namáhaných betonových konstrukcí*. Brno, 2009, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.
- [3-4] PTÁČKOVÁ K. *Experimentální a numerická analýza zesílení železobetonového vetknutého prvku*. Brno, 2012, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví.

INTERNETOVÉ ZDROJE

- [4-1] EFISAN Conrect [online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z:
<http://www.efisan.cz/sluzby/conrect-sluzby/sanace-betonovych-konstrukci/zesilovani-konstrukci-uhlikovymi-lamelami-a-tkaninami/>
- [4-2] MINOVA Bohemia [online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z:
<http://www.minova.cz/index.php?page=materialy/stavebnictvi/materialy-pro-sanace.phtml>
- [4-3] ČASOPIS Stavebnictví [online]. [cit. 2015-11-09]. Dostupné z:
http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_A1126_I21
- [4-4] H-S Pozemní stavitelství s.r.o. [online]. [cit. 2016-01-07]. Dostupné z:
<http://www.hsps.cz/fotoalbum/sanace/zvyseni-unosnosti-zb-konstrukci/zesileni-zb-tramoveho-stropu---strikani-betonu-2.jpg.html>
- [4-5] Stavoreko [online]. [cit. 2016-01-07]. Dostupné z:
<http://www.stavoreko.cz/reference/203-sanace-sesiti-sten-rd-praha-kyje>
- [4-6] Ústav stavebního zkušebnictví [online]. [cit. 2016-01-11]. Dostupné z:
<http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/CI57/Zesilov%C3%A1n%C3%AD%20konstruk%C3%AD,%20kompozitn%C3%AD%20materi%C3%A1ly.pdf>

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Statický výpočet
Příloha č. 2	Výkresová dokumentace
Příloha č. 3	Vyhodnocení doprovodných zkoušek mechanických vlastností
Příloha č. 4	Vyhodnocení experimentální analýzy
Příloha č. 5	Vyhodnocení numerické analýzy
Příloha č. 6	Fotodokumentace

Příloha č. 1

Statický výpočet

Nezesílený trám – VARIANTA 1

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30	Ocel B500
f_{ck} 25 MPa	F_{yk} 500 MPa
h 0,24 m	A_{st} $2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
b_w 0,12 m	E_s 200 GPa

Smyková únosnost železobetonového prvku se smykovou výztuží je dána:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s})$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta$$

Kde α_{cw} je součinitel, kterým se zohledňuje stav napětí v tlačném pásu ($\alpha_{cw} = 1,0$)
 v_1 redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem
 A_{sw} průřezová plocha smykové výztuže=plocha všech větví jednoho třmínku
 $2 \text{ } \emptyset 6 \rightarrow A_{sw} = 2 \times 0,28 \times 10^{-4} = 0,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
 f_{cd} návrhová pevnost betonu
 b_w nejmenší šířka průřezu v tažené oblasti
 f_{ywd} návrhová mez kluzu smykové výztuže
 θ úhel mezi betonovými tlakovými diagonálami a osou nosníku
 $(45^\circ \geq \theta \geq 21,8^\circ)$
 s osová vzdálenost třmínků
 z rameno vnitřních sil

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{25}{250} \right] = 0,54$$

$$f_{ywd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1,15} = 434,8 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,5} = 16,7 \text{ MPa}$$

Výpočet ramena vnitřních sil

$$d_1 = c + \emptyset_{st} + \emptyset_{sl}/2 = 20 + 6 + 10/2 = 31 \text{ mm} = 0,031 \text{ m}$$

$$d = h - d_1 = 0,24 - 0,031 = 0,209 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,209 = 0,188 \text{ m}$$

Kde d je účinná výška
 d_1 poloha těžiště výztuže

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1,0 \cdot 0,12 \cdot 0,188 \cdot 0,54 \cdot 16,7 \cdot 10^3}{\cot 21,8 + \tan 21,8} = 70,15 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,175} \cdot 0,188 \cdot 434,8 \cdot 10^3 \cdot \cot 21,8 = 66,57 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s}) = \min(70,15; 66,57) = 66,57 \text{ kN}$$

Posouzení konstrukčních zásad

Osová vzdálenost třmínků

$$s_{max} = 0,175 \text{ m} \leq 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 0,209 = 0,157 \text{ m} \rightarrow \text{nevyhovuje}$$

$$s_{min} = 0,05 \text{ m} \leq 0,157 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Osová vzdálenost větví třmínků

$$s_t = b - 2 \cdot c - \phi_{st} = 0,12 - 2 \cdot 0,02 - 0,006 = 0,074 \text{ m}$$

$$s_t = 0,074 \text{ m} \leq 0,75 \cdot d = 0,75 \cdot 0,209 = 0,157 \text{ m}$$

$$s_t \leq 0,600 \text{ m} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Stupeň vyztužení

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{b \cdot s} = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,12 \cdot 0,175} = 0,0027$$

$$\rho_w \geq \rho_{w,min} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} = \frac{0,08 \cdot \sqrt{25}}{500} = 0,0008 \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Smyková únosnost získaná experimentem je 122,845 kN. Vypočtená únosnost dosahuje 54% naměřené hodnoty.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 200 / 27 = 7,41$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} = 28800 + 7,41 \cdot 235,6 = 30545,8 \text{ mm}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d = 28800 \cdot 240/2 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot 209$$

$$S_i = 3,82 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,82 \cdot 10^6}{30545,8} = 125,06 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

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

$$I_i = 1/12 \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 125,06\right)^2 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 125,06)^2$$

$$I_i = 1,5128 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5128 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5128 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,12505) = 3,422 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 19,9 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{19,9 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5128 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

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

$$x_i = -\frac{7,41 \cdot 235,6}{120} + \sqrt{\left(\frac{7,41 \cdot 235,6}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,41 \cdot 235,6 \cdot 209}{120}}$$

$$x_i = 64,78 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 64,78^3 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 64,78)^2 = 4,72 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 4,72 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{66,57 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 4,72 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,52 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,520 \text{ mm}}$$

Zesílený trám – VARIANTA 2

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30		Ocel B500		FRP lamely	
f_{ck}	25 MPa	F_{yk}	500 MPa	E_{fu}	155 GPa
h	0,24 m	A_{st}	$2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f	0,0012 m
b_w	0,12 m	E_s	200 GPa	w_f	0,050 m
				s_f	0,145 m
				ε_{fu}	0,017
				α	45°
				θ	45°

Výpočet zesílení uhlíkovými lamelami je analogický výpočtu klasických ocelových třmínků. Stanovení poměrného přetvoření, při kterém dochází ke ztrátě únosnosti aplikovaného zesílení je rozhodující. Síla, která je přenášena zesílením je dána vztahem:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fde} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

Kde ε_{fde} je efektivní poměrné přetvoření FRP výztuže
 E_{fu} modul pružnosti FRP prvku ve směru orientace vláken
 ρ_f stupeň vyztužení FRP výztuží
 θ úhel šikmé smykové trhliny měřený od směru hlavní tahové výztuže
 α úhel sevřený lamelami se směrem normálových sil

Limitní hodnota poměrného přetvoření ε_{fde} je dle EC2 rovna 0,006. Přesněji je možno tuto hodnotu určit dle vztahu:

$$\varepsilon_{fde} = \frac{\varepsilon_{fke}}{\gamma_f}$$

Kde ε_{fke} je charakteristické poměrné přetvoření FRP výztuže
 γ_f součinitel spolehlivosti materiálu pro FRP prvky (viz. tab. 7.4)

Tab 7.4 Hodnoty součinitele spolehlivosti γ_f materiálu pro FRP

TYP FRP	TYP APLIKACE A	TYP APLIKACE B
CFRP	1,20	1,35
AFRP	1,25	1,45
GFRP	1,30	1,50

TYP APLIKACE A

- Aplikace prefabrikovaných FRP systémů při normální kontrole kvality
- Aplikace přímo na konstrukci na stavbě, jestliže jsou dodrženy všechny nutné podmínky vysoké kontroly kvality v případech podmínek aplikace i podmínek provádění

TYP APLIKACE B

- Aplikace přímo na konstrukci na stavbě při normální kontrole kvality
- Aplikace ostatních systémů při obtížných podmínkách provádění

Při našem experimentu byla FRP výztuž aplikovaná v laboratorních podmínkách, kde byla zajištěna vysoká kontrola kvality. Součinitel spolehlivosti γ_f pro námi zvolenou výztuž odpovídá hodnotě 1,20. Pro účely porovnání s provedeným experimentem je γ_f rovna 1,00.

$$\varepsilon_{fke} = k \cdot \varepsilon_{fe}$$

Kde k je redukční součinitel, jehož hodnota je rovna 0,8
 ε_{fe} střední efektivní poměrné přetvoření FRP výztuže

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3}; 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \right]$$

Kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku ve stáří 28 dní
 ε_{fu} mezní poměrné přetvoření FRP výztuže

Stupeň vyztužení ρ_f FRP lepené výztuže v pruzích je dán vztahem:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f}$$

Kde t_f je tloušťka FRP prvku
 w_f šíře zesilovacího prvku
 s_f vzdálenost jednotlivých větví smykové výztuže

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot \sin 45}{120 \cdot 145} = 4,88 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 4,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,80 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 4,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 6,32 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(2,80 \cdot 10^{-3}; 6,32 \cdot 10^{-3}) = 2,80 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášená FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,80 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 4,88 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 1) \cdot 0,707$$

$$V_{Rdf} = 62,11 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 40,659 kN. Vypočtená únosnost je o 35% větší únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 251,8 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 200 / 27 = 7,41$$

$$\alpha_e = E_e / E_c = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8 = 31991,1 \text{ mm}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot d' + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot d''$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot 215,77 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot 28,24$$

$$S_i = 3,97 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,97 \cdot 10^6}{31991,1} = 124,1 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot (d' - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot (d'' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,1\right)^2 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,1)^2 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot (215,77 - 124,1)^2 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot (28,24 - 124,1)^2$$

$$I_i = 1,6 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,6 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,1241) = 3,59 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 20,89 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{20,89 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,25 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$x_i = -\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8}{120} + \sqrt{\left(\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8}{120}\right)^2 +$$

$$+ 2 \cdot \frac{7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot 215,77 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot 28,24}{120}}$$

$$x_i = 71,15 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot (d' - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot (d'' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 31,35^3 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 71,15)^2 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot (215,77 - 71,15)^2 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot (28,24 - 71,15)^2 = 5,0 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 5,0 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{128,68 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 5,0 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 8,2 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_g + w_f = 1,8 \cdot 10^{-6} + 5,2 \cdot 10^{-4} = 5,2 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,82 \text{ mm}}$$

Zesílený trám – VARIANTA 3

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30		Ocel B500		FRP lamely	
f_{ck}	25 MPa	F_{yk}	500 MPa	E_{fu}	155 GPa
h	0,24 m	A_{st}	$2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f	0,0012 m
b_w	0,12 m	E_s	200 GPa	w_f	0,050 m
				s_f	0,140 m
				ε_{fu}	0,017
				α	90°
				θ	45°

Výpočet mezní posouvající síly vychází z principu výpočtu jako u varianty 2. Liší se pouze úhlem sevřeným lamelami se směrem normálových sil α a vzdálenosti jednotlivých větví smykové výztuže s_f .

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot \sin 90}{120 \cdot 140} = 7,14 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,27 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 5,64 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(5,64 \cdot 10^{-3}; 2,27 \cdot 10^{-3}) = 2,27 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášena FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,27 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 0) \cdot 1$$

$$V_{Rdf} = 52,09 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 24,145 kN. Vypočtená únosnost je o 54% větší než únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 576,0 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 200 / 27 = 7,41$$

$$\alpha_e = E_e / E_c = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$\begin{aligned} A_i &= A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576 \\ &= 33852,0 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120$$

$$S_i = 4,22 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{4,22 \cdot 10^6}{33852,0} = 124,7 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,7\right)^2 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,7)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 124,7)^2$$

$$I_i = 1,5 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,1247) = 3,38 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 19,7 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{19,7 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,21 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,21 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlínami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$\begin{aligned} x_i &= \\ &= -\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120}{120}} \end{aligned}$$

$$x_i = 78,17 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 78,17^3 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 78,17)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 78,17)^2 \\ = 5,5 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3} \\ w_F = \frac{118,66 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 6,9 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,69 \text{ mm}}$$

Zesílený trám – VARIANTA 4

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30		Ocel B500		FRP lamely	
f_{ck}	25 MPa	F_{yk}	500 MPa	E_{fu}	155 GPa
h	0,24 m	A_{st}	$2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f	0,0012 m
b_w	0,12 m	E_s	200 GPa	w_f	0,025 m
				s_f	0,060 m
				ε_{fu}	0,017
				α	90°
				θ	45°

Výpočet mezní posouvající síly je u této varianty totožný jako u varianty 3. Liší se pouze šířkou zesilovacího prvku w_f a vzdálenosti jednotlivých větví smykové výztuže s_f .

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 25 \cdot \sin 90}{120 \cdot 60} = 8,33 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,08 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{33^{2/3}}{155 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 5,39 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(2,08 \cdot 10^{-3}; 5,39 \cdot 10^{-3}) = 2,08 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášena FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,08 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 0) \cdot 1$$

$$V_{Rdf} = 55,69 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 20,267 kN. Vypočtená únosnost je o 64% větší než únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 576,0 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 200 / 27 = 7,41$$

$$\alpha_e = E_e / E_c = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$\begin{aligned} A_i &= A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576 \\ &= 33852,0 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120$$

$$S_i = 4,22 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{4,22 \cdot 10^6}{33852,0} = 124,7 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,7\right)^2 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,7)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 124,7)^2$$

$$I_i = 1,5 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,1247) = 3,38 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 19,7 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{19,7 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlínami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$\begin{aligned} x_i &= \\ &= -\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{7,41 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,41 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120}{120}} \end{aligned}$$

$$x_i = 78,17 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 78,17^3 + 7,41 \cdot 235,6 \cdot (209 - 78,17)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 78,17)^2 \\ = 5,5 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 5,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3} \\ w_F = \frac{122,26 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 5,5 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 7,12 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 7,12 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,712 \text{ mm}}$$

Nezesílený trám – VARIANTA 1

Materiálové charakteristiky – reálné parametry

Beton C 25/30

Ocel B500

f_{ck} 34,9 MPa

F_{yk} 520 MPa

h 0,24 m

A_{st} $2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

b_w 0,12 m

E_s 214 GPa

Smyková únosnost železobetonového prvku se smykovou výztuží je dána:

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s})$$

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta$$

Kde α_{cw} je součinitel, kterým se zohledňuje stav napětí v tlačném pásu ($\alpha_{cw}=1,0$)

v_1 redukční součinitel pevnosti betonu při porušení smykem

A_{sw} průřezová plocha smykové výztuže=plocha všech větví jednoho třmínku
 $2 \text{ } \varnothing 6 \rightarrow A_{sw} = 2 \times 0,28 \times 10^{-4} = 0,57 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

f_{cd} návrhová pevnost betonu

b_w nejmenší šířka průřezu v tažené oblasti

f_{ywd} návrhová mez kluzu smykové výztuže

θ úhel mezi betonovými tlakovými diagonálami a osou nosníku
($45^\circ \geq \theta \geq 21,8^\circ$)

s osová vzdálenost třmínků

z rameno vnitřních sil

$$v_1 = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] = 0,6 \cdot \left[1 - \frac{34,9}{250} \right] = 0,52$$

$$f_{ywd} = f_{yk} = 520 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = f_{ck} = 34,9 \text{ MPa}$$

Výpočet ramena vnitřních sil

$$d_1 = c + \varnothing_{st} + \varnothing_{sl}/2 = 20 + 6 + 10/2 = 31 \text{ mm} = 0,031 \text{ m}$$

$$d = h - d_1 = 0,24 - 0,031 = 0,209 \text{ m}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 0,209 = 0,188 \text{ m}$$

Kde d je účinná výška
 d_1 poloha těžiště výztuže

$$V_{Rd,max} = \frac{\alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} = \frac{1,0 \cdot 0,12 \cdot 0,188 \cdot 0,52 \cdot 34,9 \cdot 10^3}{\cot 21,8 + \tan 21,8} = 141,17 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{ywd} \cdot \cot\theta = \frac{0,57 \cdot 10^{-4}}{0,175} \cdot 0,188 \cdot 520 \cdot 10^3 \cdot \cot 21,8 = 79,61 \text{ kN}$$

$$V_{Rd} = \min(V_{Rd,max}; V_{Rd,s}) = \min(141,17; 79,61) = 79,61 \text{ kN}$$

Smyková únosnost získaná experimentem je 122,845 kN. Vypočtená únosnost dosahuje 65 % naměřené hodnoty.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 214 / 27 = 7,93$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} = 28800 + 7,93 \cdot 235,6 = 30668,3 \text{ mm}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot h/2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d = 28800 \cdot 240/2 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot 209$$

$$S_i = 3,85 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = S_i / A_i = 3,85 \times 10^6 / 30668,3 = 125,54 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

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

$$I_i = 1/12 \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 125,54\right)^2 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 125,54)^2$$

$$I_i = 1,5214 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5214 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5214 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,12554) = 3,455 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 20,1 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{20,1 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5214 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,23 \cdot 10^{-5} \text{ m} = 0,042 \text{ mm}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlínami

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

$$x_i = -\frac{7,93 \cdot 235,6}{120} + \sqrt{\left(\frac{7,93 \cdot 235,6}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,93 \cdot 235,6 \cdot 209}{120}}$$

$$x_i = 66,59 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 66,59^3 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 66,59)^2 = 4,97 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 4,97 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlínami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

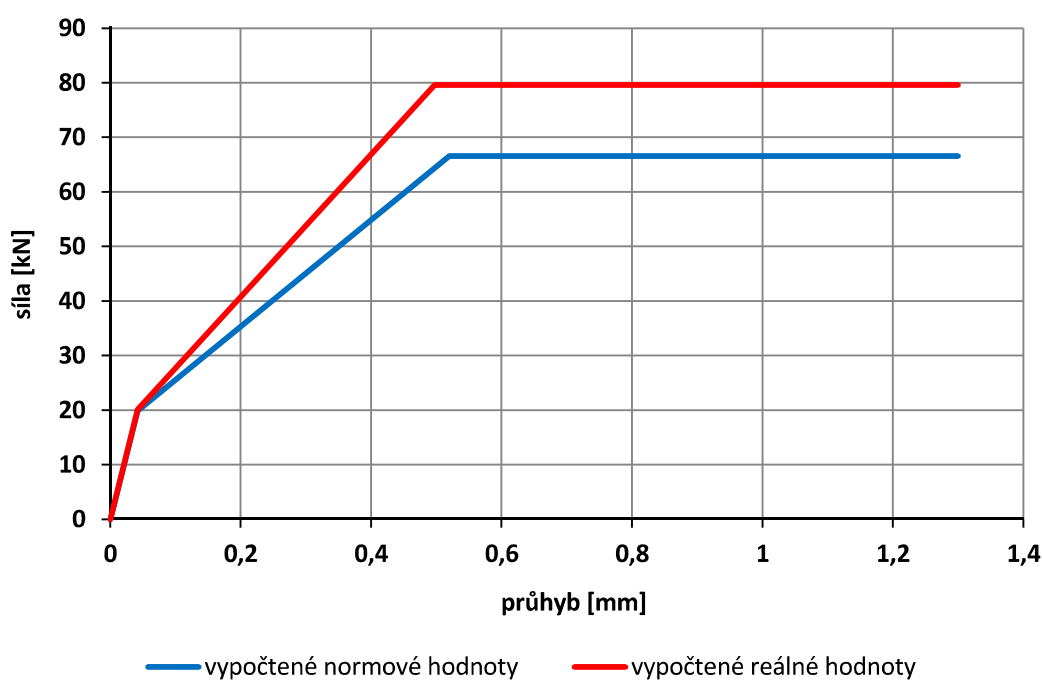
Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{79,61 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 4,97 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,97 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,497 \text{ mm}}$$



Obr. P1 – 1 Únosnost VARIANTY 1 v závislosti na průhybu

Zesílený trám – VARIANTA 2

Materiálové charakteristiky – reálné parametry

Beton C 25/30		Ocel B500		FRP lamely	
f_{ck}	34,9 MPa	F_{yk}	520 MPa	E_{fu}	155 GPa
h	0,24 m	A_{st}	$2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f	0,0012 m
b_w	0,12 m	E_s	199 GPa	w_f	0,050 m
				s_f	0,145 m
				ε_{fu}	0,017
				α	45°
				θ	45°

Výpočet zesílení uhlíkovými lamelami je analogický výpočtu klasických ocelových třmínků. Stanovení poměrného přetvoření, při kterém dochází ke ztrátě únosnosti aplikovaného zesílení je rozhodující. Síla, která je přenášena zesílením je dána vztahem:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \varepsilon_{fde} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

Kde ε_{fde} je efektivní poměrné přetvoření FRP výztuže
 E_{fu} modul pružnosti FRP prvku ve směru orientace vláken
 ρ_f stupeň vyztužení FRP výztuží
 θ úhel šikmé smykové trhliny měřený od směru hlavní tahové výztuže
 α úhel sevřený lamelami se směrem normálových sil

Limitní hodnota poměrného přetvoření ε_{fde} je dle EC2 rovna 0,006. Přesněji je možno tuto hodnotu určit dle vztahu:

$$\varepsilon_{fde} = \frac{\varepsilon_{fke}}{\gamma_f}$$

Kde ε_{fke} je charakteristické poměrné přetvoření FRP výztuže
 γ_f součinitel spolehlivosti materiálu pro FRP prvky (viz. tab. 7.4)

Tab 7.4 Hodnoty součinitele spolehlivosti γ_f materiálu pro FRP

TYP FRP	TYP APLIKACE A	TYP APLIKACE B
CFRP	1,20	1,35
AFRP	1,25	1,45
GFRP	1,30	1,50

TYP APLIKACE A

- Aplikace prefabrikovaných FRP systémů při normální kontrole kvality
- Aplikace přímo na konstrukci na stavbě, jestliže jsou dodrženy všechny nutné podmínky vysoké kontroly kvality v případech podmínek aplikace i podmínek provádění

TYP APLIKACE B

- Aplikace přímo na konstrukci na stavbě při normální kontrole kvality
- Aplikace ostatních systémů při obtížných podmínkách provádění

Při našem experimentu byla FRP výztuž aplikovaná v laboratorních podmínkách, kde byla zajištěna vysoká kontrola kvality. Součinitel spolehlivosti γ_f pro námi zvolenou výztuž odpovídá hodnotě 1,20. Pro účely porovnání s provedeným experimentem je γ_f rovna 1,00.

$$\varepsilon_{fke} = k \cdot \varepsilon_{fe}$$

Kde k je redukční součinitel, jehož hodnota je rovna 0,8
 ε_{fe} střední efektivní poměrné přetvoření FRP výztuže

$$\varepsilon_{fe} = \min \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3}; 0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,30} \cdot \varepsilon_{fu} \right]$$

Kde f_{cm} je průměrná hodnota pevnosti betonu v tlaku ve stáří 28 dní
 ε_{fu} mezní poměrné přetvoření FRP výztuže

Stupeň vyztužení ρ_f FRP lepené výztuže v pruzích je dán vztahem:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f}$$

Kde t_f je tloušťka FRP prvku
 w_f šíře zesilovacího prvku
 s_f vzdálenost jednotlivých větví smykové výztuže

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot \sin 45}{120 \cdot 145} = 4,88 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 4,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,86 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 4,88 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 6,39 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(2,86 \cdot 10^{-3}; 6,39 \cdot 10^{-3}) = 2,86 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášená FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot\theta + \cot\alpha) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,86 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 4,88 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 1) \cdot 0,707$$

$$V_{Rdf} = 63,43 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 40,659 kN. Vypočtená únosnost je o 36% větší únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 251,8 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 214 / 27 = 7,93$$

$$\alpha_e = \frac{E_e}{E_c} = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8 \\ = 32113,64 \text{ mm}^2$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot d' + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot d''$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot 215,77 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot 28,24$$

$$S_i = 4,01 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{4,01 \cdot 10^6}{32113,64} = 124,87 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot (d' - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot (d'' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,87\right)^2 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,87)^2 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot (215,77 - 124,87)^2 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot (28,24 - 124,87)^2$$

$$I_i = 1,65 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,65 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,65 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,12487) = 3,73 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 21,7 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{21,7 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,65 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,25 \cdot (0,8 + 0,55)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$x_i = -\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8}{120} + \sqrt{\left(\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 251,8}{120}\right)^2}$$

$$+ 2 \cdot \frac{7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot 215,77 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot 28,24}{120}$$

$$x_i = 72,58 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e1} \cdot (d' - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_{e2} \cdot (d'' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 72,58^3 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 72,58)^2 + 5,74 \cdot 116,3 \cdot (215,77 - 72,58)^2 + 5,74 \cdot 135,5 \cdot (28,24 - 72,58)^2 = 6,53 \cdot 10^7 \text{ mm}^4 = 6,53 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

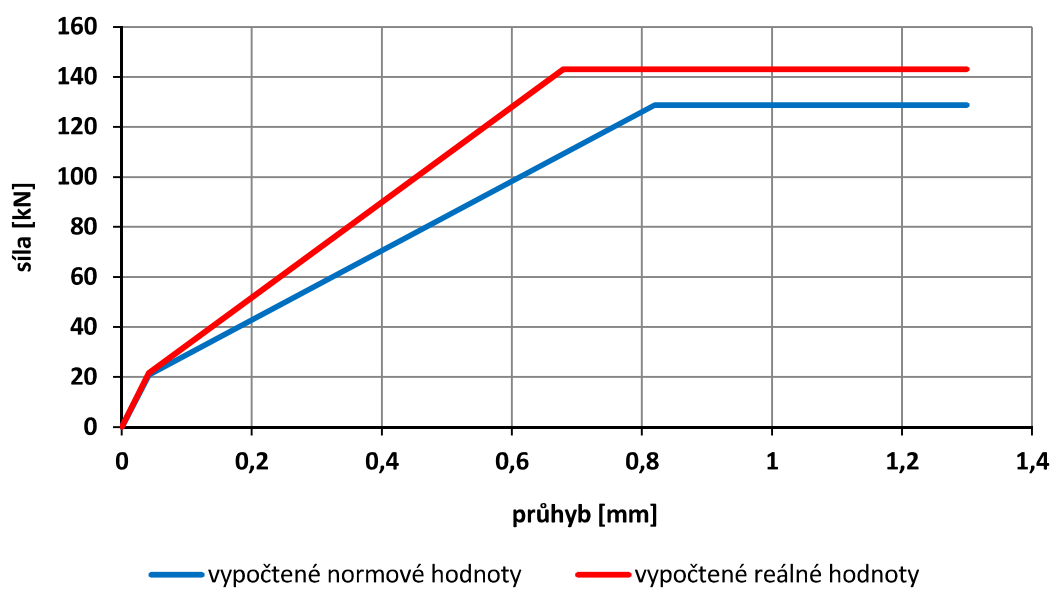
Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{143,04 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 6,53 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 6,79 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 6,79 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,679 \text{ mm}}$$



Obr. P1 – 2 Únosnost VARIANTY 2 závislosti na průhybu

Zesílený trám – VARIANTA 3

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30	Ocel B500	FRP lamely
f_{ck} 34,9 MPa	F_{yk} 520 MPa	E_{fu} 155 GPa
h 0,24 m	A_{st} $2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f 0,0012 m
b_w 0,12 m	E_s 199 GPa	w_f 0,050 m
		s_f 0,140 m
		ε_{fu} 0,017
		α 90°
		θ 45°

Výpočet mezní posouvající síly vychází z principu výpočtu jako u varianty 2. Liší se pouze úhlem sevřeným lamelami se směrem normálových sil α a vzdálenosti jednotlivých větví smykové výztuže s_f .

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 50 \cdot \sin 90}{120 \cdot 140} = 7,14 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,31 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 7,14 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 5,70 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(2,31 \cdot 10^{-3}; 5,70 \cdot 10^{-3}) = 2,31 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášena FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,31 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 7,14 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 0) \cdot 1$$

$$V_{Rdf} = 53,01 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 24,145 kN. Vypočtená únosnost je o 54% větší únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 576,0 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 214 / 27 = 7,93$$

$$\alpha_e = E_e / E_c = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$\begin{aligned} A_i &= A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576 \\ &= 33974,55 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120$$

$$S_i = 4,24 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{4,24 \cdot 10^6}{33974,55} = 124,8 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,8\right)^2 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,8)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 124,8)^2$$

$$I_i = 1,5 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,1248) = 3,38 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 19,67 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{19,67 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$\begin{aligned} x_i &= -\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120}{120}} \end{aligned}$$

$$x_i = 79,27 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 79,27^3 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 79,27)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 79,27)^2$$

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

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

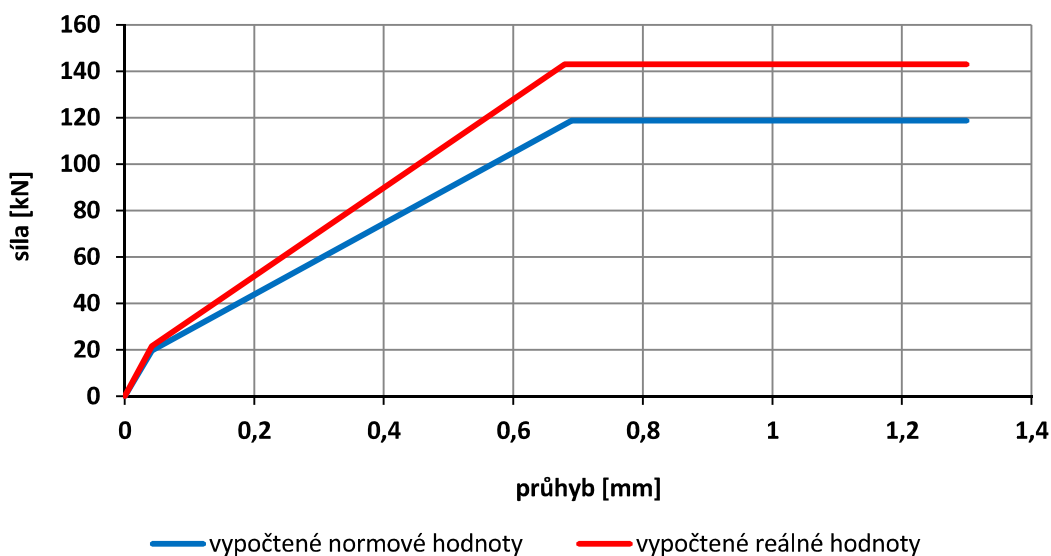
Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{132,62 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 7,22 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 7,22 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,722 \text{ mm}}$$



Obr. P1 – 3 Únosnost VARIANTY 3 v závislosti na průhybu

Zesílený trám – VARIANTA 4

Materiálové charakteristiky – normové parametry

Beton C 25/30		Ocel B500		FRP lamely	
f_{ck}	34,9 MPa	F_{yk}	520 MPa	E_{fu}	155 GPa
h	0,24 m	A_{st}	$2,356 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	t_f	0,0012 m
b_w	0,12 m	E_s	199 GPa	w_f	0,025 m
				s_f	0,060 m
				ε_{fu}	0,017
				α	90°
				θ	45°

Výpočet mezní posouvající síly je u této varianty totožný jako u varianty 3. Liší se pouze šířkou zesilovacího prvku w_f a vzdálenosti jednotlivých větví smykové výztuže s_f .

$$\rho_f = \frac{2 \cdot t_f \cdot w_f \cdot \sin \alpha}{b_w \cdot s_f} = \frac{2 \cdot 1,2 \cdot 25 \cdot \sin 90}{120 \cdot 60} = 8,33 \cdot 10^{-3}$$

Hodnota středního efektivního poměrného přetvoření ε_{fe} je minimem z hodnot:

$$\varepsilon_{fe,1} = \left[0,65 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right] = \left[0,65 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,56} \cdot 10^{-3} \right]$$

$$\varepsilon_{fe,1} = 2,12 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe,2} = \left[0,17 \cdot \left(\frac{f_{cm}^{2/3}}{E_{fu} \cdot \rho_f} \right)^{0,3} \cdot \varepsilon_{fu} \right] = \left[0,17 \cdot \left(\frac{34,9^{2/3}}{155 \cdot 8,33 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,3} \cdot 0,017 \right]$$

$$\varepsilon_{fe,2} = 5,45 \cdot 10^{-3}$$

$$\varepsilon_{fe} = \min(\varepsilon_{fe,1}; \varepsilon_{fe,2}) = \min(2,12 \cdot 10^{-3}; 5,45 \cdot 10^{-3}) = 2,12 \cdot 10^{-3} \leq 0,006$$

Síla, která je přenášena FRP zesílením:

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{k \cdot \varepsilon_{fe}}{\gamma_f} \cdot E_{fu} \cdot \rho_f \cdot b_w \cdot d \cdot (\cot \theta + \cot \alpha) \cdot \sin \alpha$$

$$V_{Rdf} = 0,9 \cdot \frac{0,8 \cdot 2,12 \cdot 10^{-3}}{1,0} \cdot 155 \cdot 10^{-3} \cdot 8,33 \cdot 10^{-3} \cdot 120 \cdot 240 \cdot (1 + 0) \cdot 1$$

$$V_{Rdf} = 56,76 \text{ kN}$$

FRP výztuž přenesla v experimentu sílu 20,267 kN. Vypočtená únosnost je o 64% větší únosnost získaná experimentem.

Výpočet průhybu

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu

Plocha betonu

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

Plocha betonářské výztuže

$$A_{st} = 235,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^2$$

Plocha zesílení

$$A_e = 576,0 \text{ mm}^2$$

Poměr modulů pružnosti

$$\alpha_s = E_s / E_c = 214 / 27 = 7,93$$

$$\alpha_e = E_e / E_c = 155 / 27 = 5,74$$

Plocha ideálního průřezu

$$\begin{aligned} A_i &= A_c + \alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e = 28800 + 7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576 \\ &= 33974,55 \text{ mm}^2 \end{aligned}$$

Statický moment ideálního průřezu

$$S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d$$

$$S_i = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120$$

$$S_i = 4,24 \times 10^6 \text{ mm}^3$$

Výška tlačené části průřezu

$$x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{4,24 \cdot 10^6}{33974,55} = 124,8 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,8\right)^2 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 124,8)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 124,8)^2$$

$$I_i = 1,5 \times 10^8 \text{ mm}^4 = 1,5 \times 10^{-4} \text{ m}^4$$

Moment na mezi vzniku trhlin

$$M_{cr} = f_{ctm} \cdot I_i / (h - x_i) = 2600 \cdot 1,5 \times 10^{-4} / (0,24 - 0,1248) = 3,38 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = 19,67 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu pro plně působící průřez

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{19,67 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 4,2 \cdot 10^{-5} \text{ m} = \mathbf{0,042 \text{ mm}}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_i = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st} + \alpha_e \cdot A_e}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_e \cdot A_e \cdot d_e}{b}}$$

$$\begin{aligned} x_i &= -\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120} \\ &+ \sqrt{\left(\frac{7,93 \cdot 235,6 + 5,74 \cdot 576}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,93 \cdot 235,6 \cdot 209 + 5,74 \cdot 576 \cdot 120}{120}} \end{aligned}$$

$$x_i = 79,27 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti průřezu

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_e \cdot A_e \cdot (d' - x_i)^2$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 79,27^3 + 7,93 \cdot 235,6 \cdot (209 - 79,27)^2 + 5,74 \cdot 576 \cdot (120 - 79,27)^2$$

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

Výpočet průhybu pro průřez oslabený trhlinami

Průhyb od vlastní tíhy - zanedbatelný

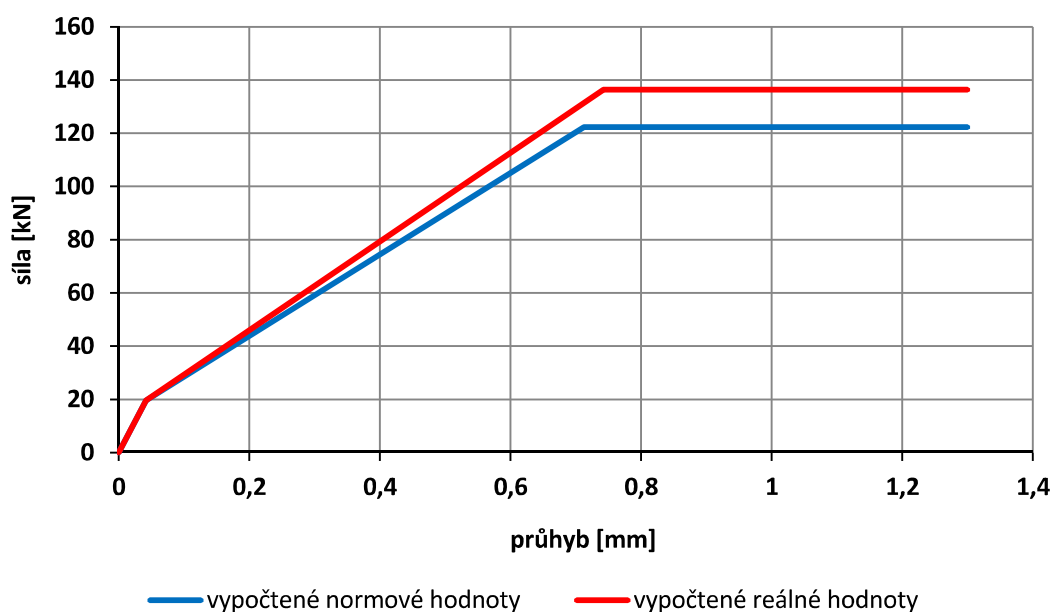
Průhyb od osamělého břemene

$$w_F = \frac{F_{cr} \cdot a \cdot b}{27 \cdot E \cdot I \cdot l} \sqrt{3 \cdot a \cdot (l + b)^3}$$

$$w_F = \frac{136,37 \cdot 10^3 \cdot 0,24 \cdot 0,56}{27 \cdot 27 \cdot 10^9 \cdot 5,7 \cdot 10^{-5} \cdot 0,8} \sqrt{3 \cdot 0,24 \cdot (0,8 + 0,56)^3} = 7,42 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

Celkový průhyb

$$w = w_F = 7,42 \cdot 10^{-4} \text{ m} = \mathbf{0,742 \text{ mm}}$$



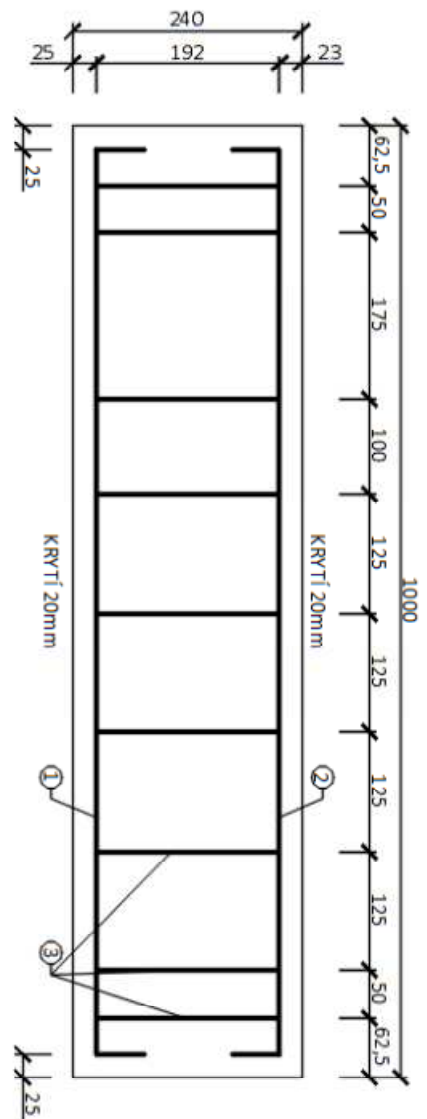
Obr. P1 – 4 Únosnost VARIANTY 4 v závislosti na průhyb

Příloha č. 2

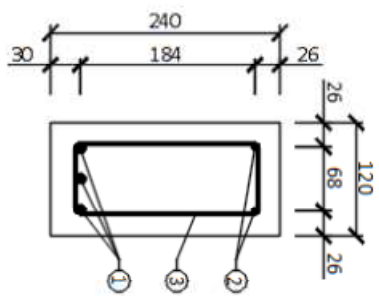
Výkresová dokumentace

VÝKRES BETONÁŘSKÉ VÝZTUŽE

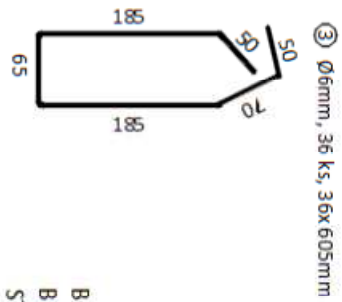
PODÉLNÝ ŘEZ



PŘÍČNÝ ŘEZ

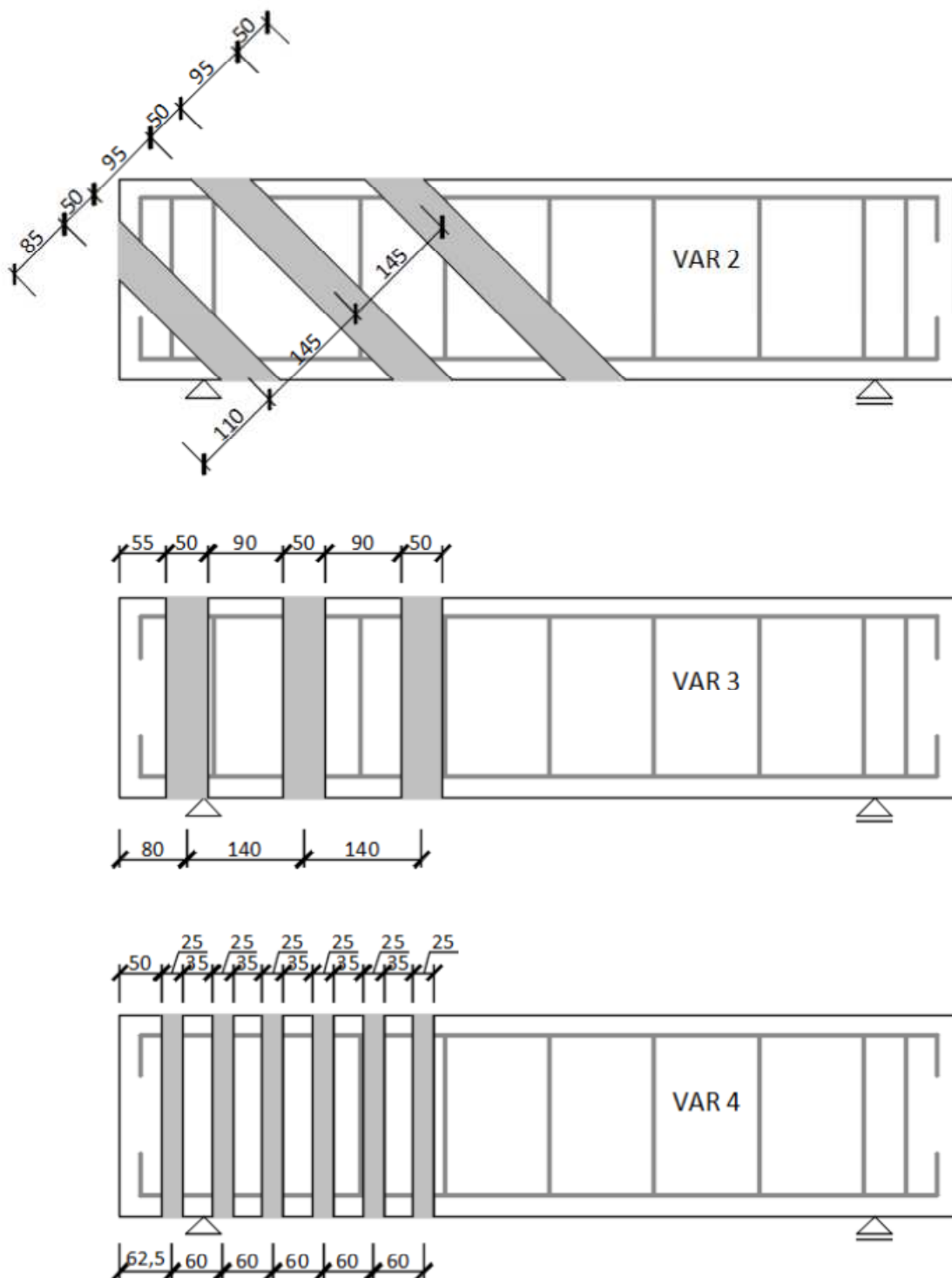


TŘMÍNEK



BETON C 25 / 30
BETONÁŘSKÁ VÝZTUŽ B500B
STUPEŇ VLIVU PROSTŘEDÍ XO

ZESÍLENÍ PRVKŮ



Příloha č. 3

Vyhodnocení doprovodných zkoušek mechanických vlastností

Tab. P3 - 1. Výsledky měření a stanovení krychelné pevnosti na krychlích o rozměrech 150 x 150 x 150 mm

Vzorek	Výroba dne	Zkoušeno dne	Rozměry			Hmotnost
			a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]
1.4	14.10.2015	11.11.2015	149,84	150,33	150,20	7,750
1.5	14.10.2015	11.11.2015	149,56	150,32	150,47	7,733
2.4	14.10.2015	11.11.2015	149,85	149,86	149,79	7,516
4.4	14.10.2015	11.11.2015	149,72	150,32	150,28	7,742

Vzorek	Objemová hmotnost		Síla	Krychelná pevnost	
	ρ [kg · m ⁻³]		F [kN]	$f_{c,cube}$ [MPa]	
1.4	2290	2280	822,1	36,5	34,9
1.5	2290		843,4	37,5	
2.4	2230		685,9	30,5	
4.4	2290		785,5	34,9	

Tab. P3 - 2 Výsledky měření a stanovení hranolové pevnosti na hranolech o rozměrech 100 x 100 x 400 mm

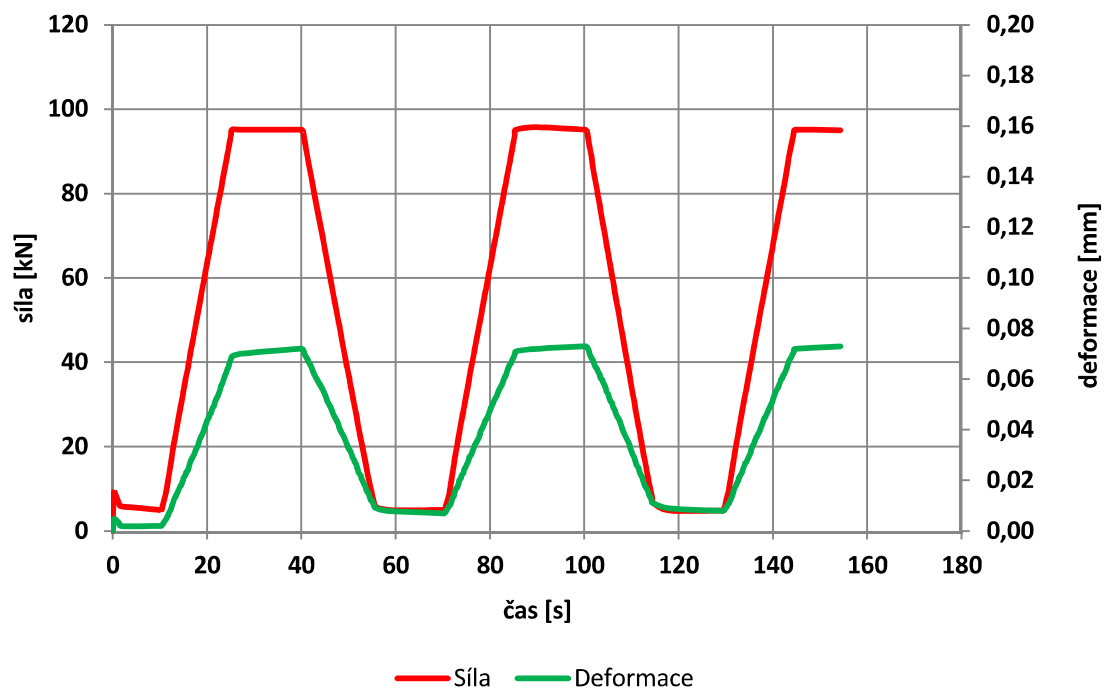
Vzorek	Výroba dne	Zkoušeno dne	Rozměry			Hmotnost
			a [mm]	b [mm]	c [mm]	m [kg]
1.1	14.10.2015	11.11.2015	100,53	99,72	400,12	9,022
1.4	14.10.2015	11.11.2015	99,65	101,02	400,06	9,071

Vzorek	Objem. hmotnost		Síla	Hranolová pevnost	
	ρ [kg · m ⁻³]		F [kN]	$f_{c,prism}$ [MPa]	
1.1	2250	2250	313,0	31,2	30,2
1.4	2250		293,0	29,1	

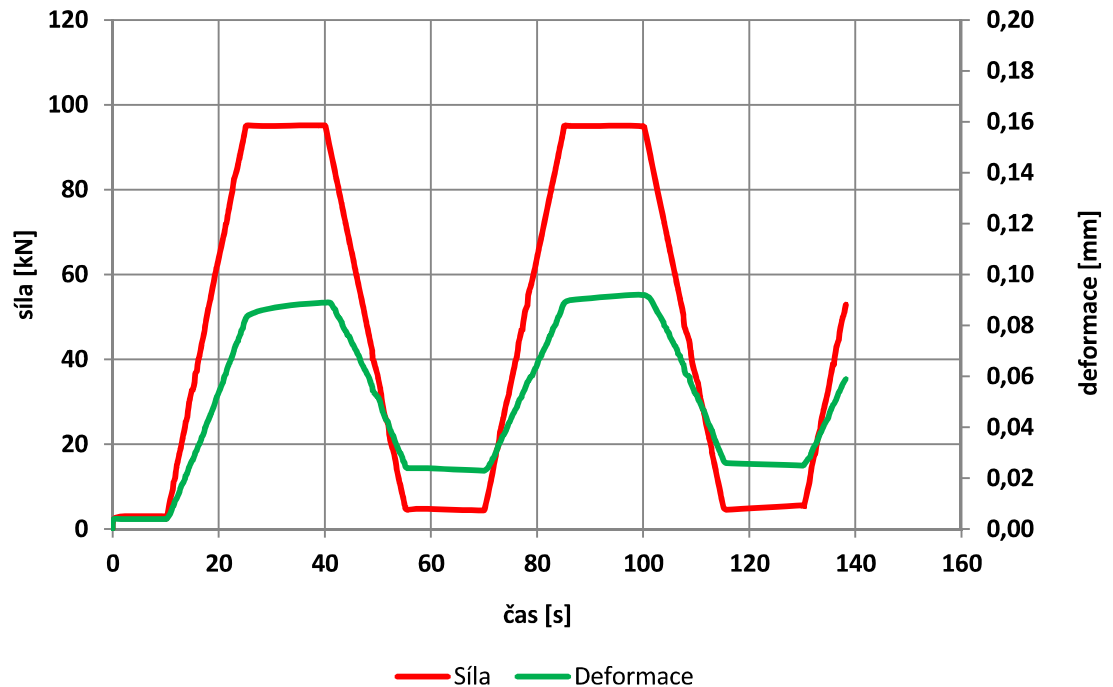
Tab. P3 - 3 Stanovení statického modulu pružnosti na hranolech
o rozměrech 100 x 100 x 400 mm

Vzorek	Plocha průřezu [m ²]	Základní zatížení [kN]	Dolní napětí [MPa]	Horní zatížení [kN]	Horní napětí [MPa]	Rozdíl napětí [MPa]
1.3	0,010210	5,0	0,490	95,0	9,305	8,815
2.1	0,009961	5,0	0,502	95,0	9,537	9,035
3.2	0,009866	5,0	0,507	95,0	9,629	9,122
4.1	0,009786	5,0	0,511	95,0	9,708	9,197

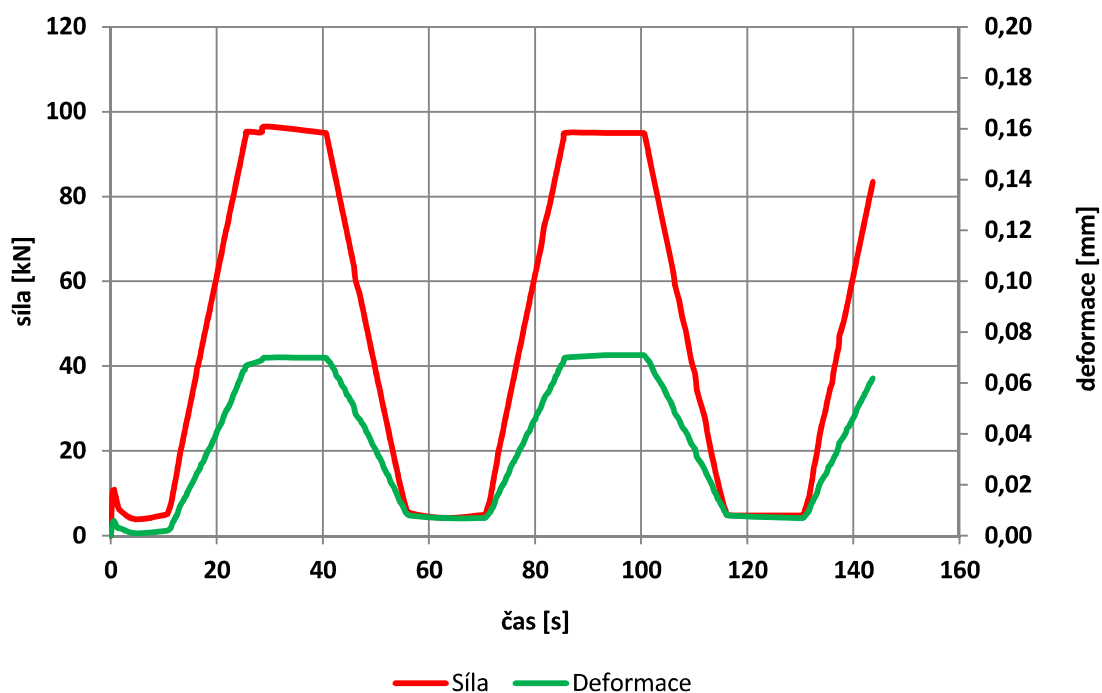
Vzorek	Modul pružnosti E _b [GPa]	
1.3	27,1	27,0
2.1	26,6	
3.2	28,1	
4.1	26,3	



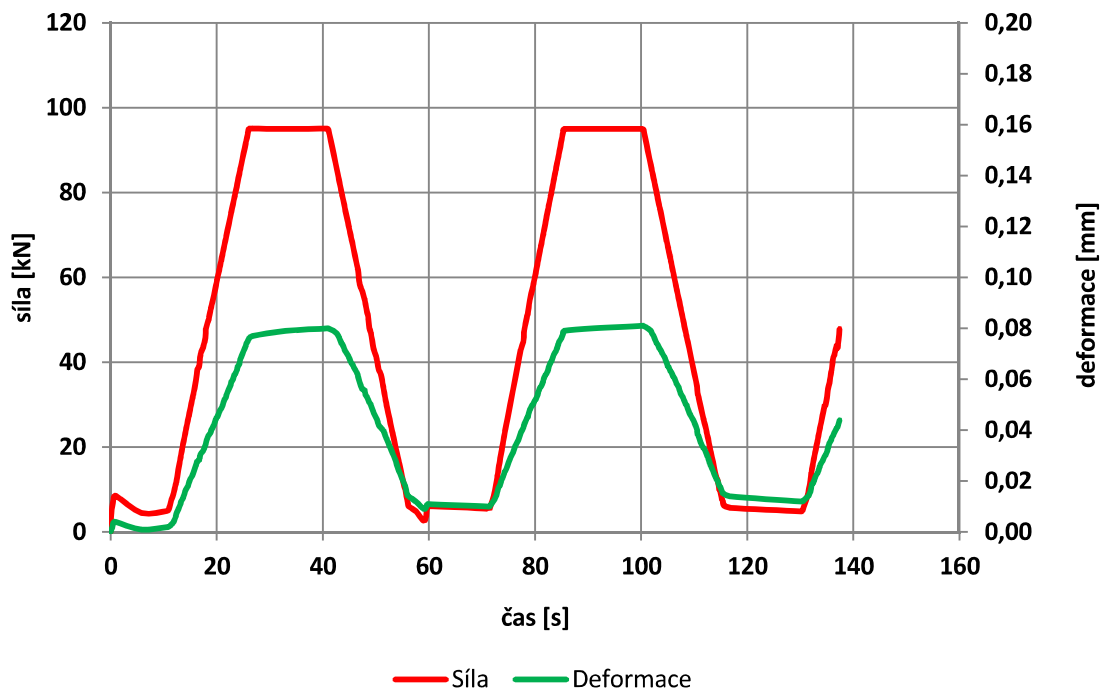
Obr. P3 - 1 Zkouška modulu pružnosti betonu – hranol 1.6



Obr. P3 - 2 Zkouška modulu pružnosti betonu – hranol 2.1



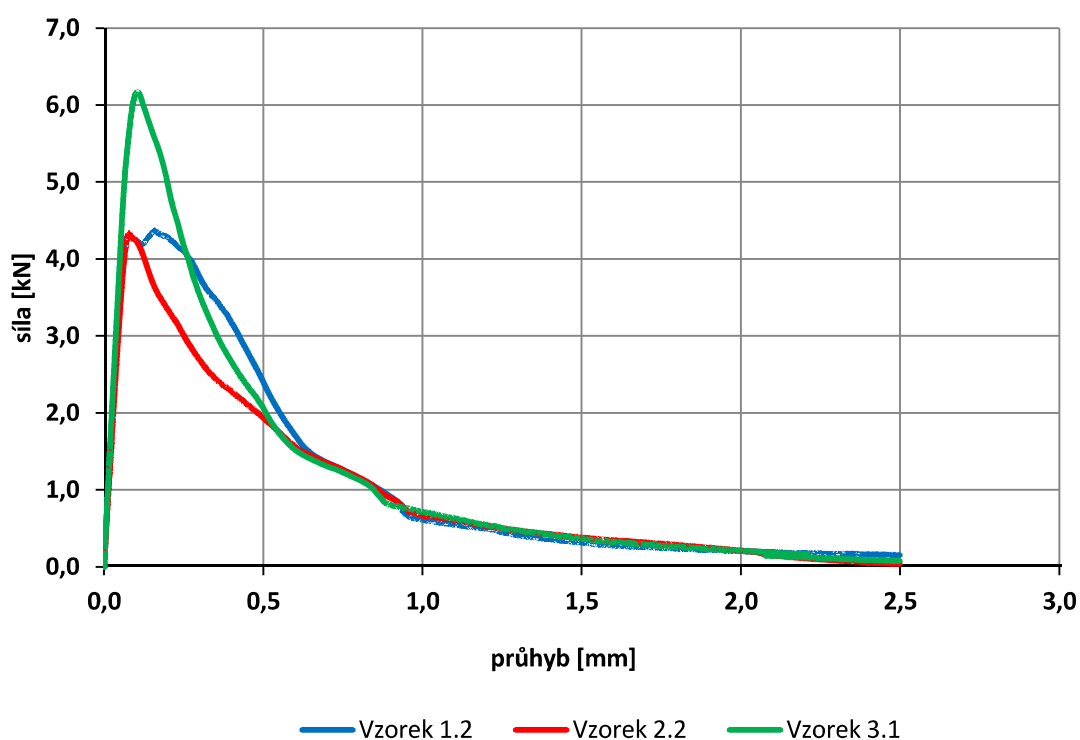
Obr. P3 - 3 Zkouška modulu pružnosti betonu – hranol 3.2



Obr. P3 - 4 Zkouška modulu pružnosti betonu – hranol 4.1

Tab. P3 – 4 Stanovení lomové energie betonu

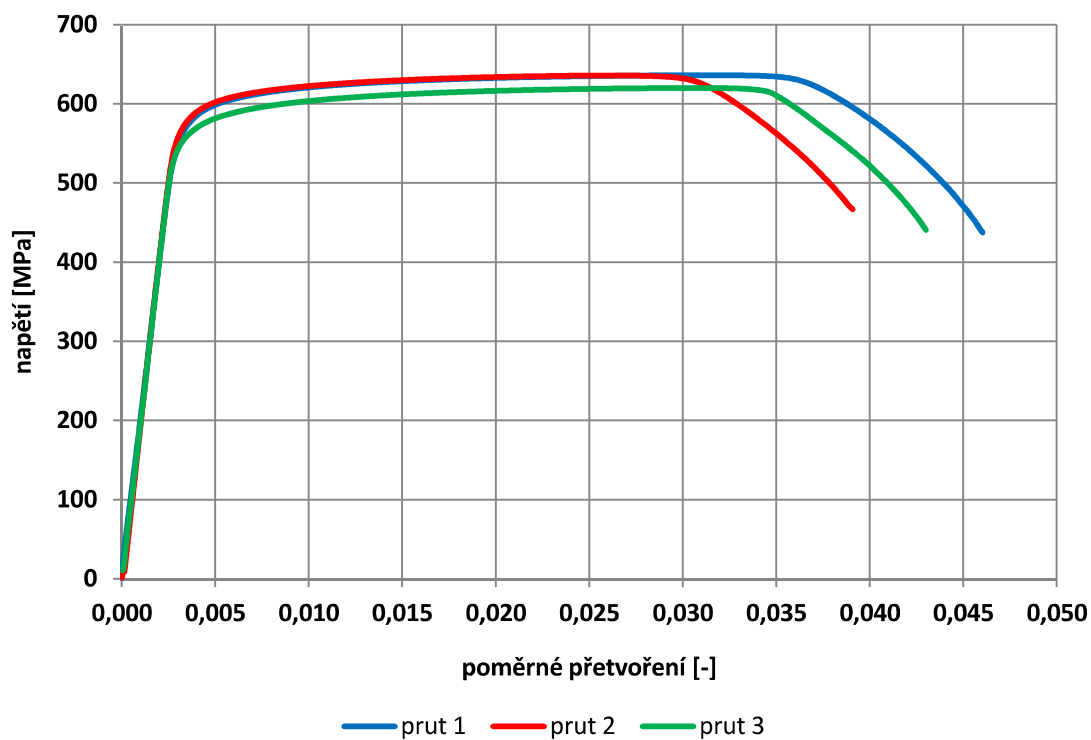
Vzorek	Výroba dne	Zkoušeno dne	Výška zářezu	Šířka zářezu	Integrál křivky	Lomová energie	
			h [mm]	b [mm]	A [N/m]	G_f [MN/m]	
1.2	14.10.2015	11.11.2015	32,75	100,08	2,67	3,97E-04	3,87E-04
2.2	14.10.2015	11.11.2015	33,30	99,625	2,47	3,72E-04	
3.1	14.10.2015	11.11.2015	32,12	100,57	2,86	3,90E-04	



Obr. P3 – 5 Zkouška lomových parametrů betonu

Tab. P3 – 5 Výsledky měření a zkoušek ocelových prutů Ø 6 mm

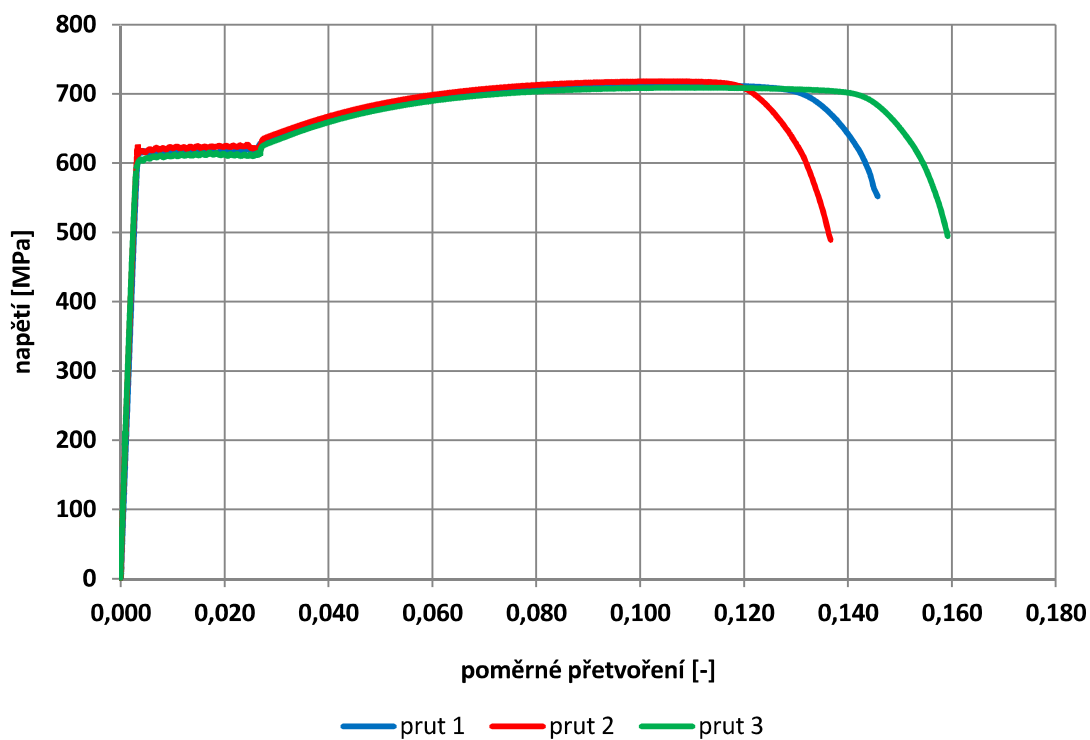
Vzorek	Plocha	Základna	Mez kluzu		Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	A_s [mm ²]	I_0 [mm]	f_y [MPa]		f_u [MPa]		E [GPa]	
Prut 1	29,2	224,0	516,6	520	636,2	631	202,1	199
Prut 2	28,9	229,0	529,2		635,8		197,6	
Prut 3	28,9	226,0	514,4		620,0		198,0	



Obr. P3 – 6 Tahová zkouška oceli Ø 6 mm

Tab. P3 – 6 Výsledky měření a zkoušek ocelových prutů Ø 10 mm

Vzorek	Plocha	Základna	Mez kluzu		Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	A_s [mm ²]	I_0 [mm]	f_y [MPa]		f_u [MPa]		E [GPa]	
Prut 1	78,2	228,0	613,1	613	712,8	713	194,5	214
Prut 2	78,3	228,0	618,1		718,2		221,6	
Prut 3	78,3	228,0	608,3		709,0		228,1	

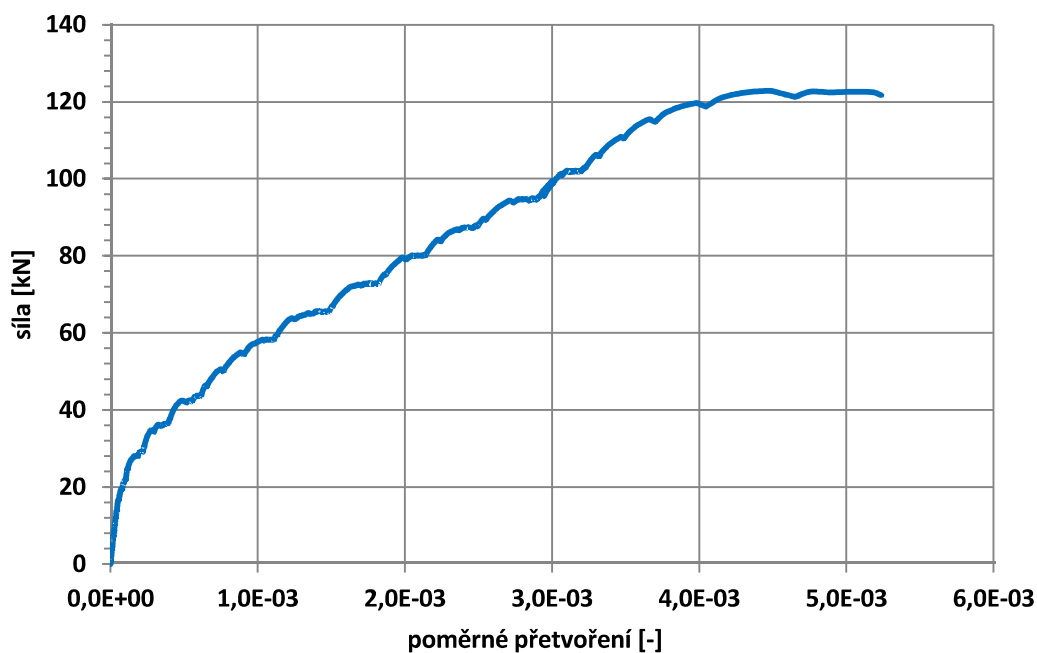


Obr. P3 – 7 Tahová zkouška oceli Ø 10 mm

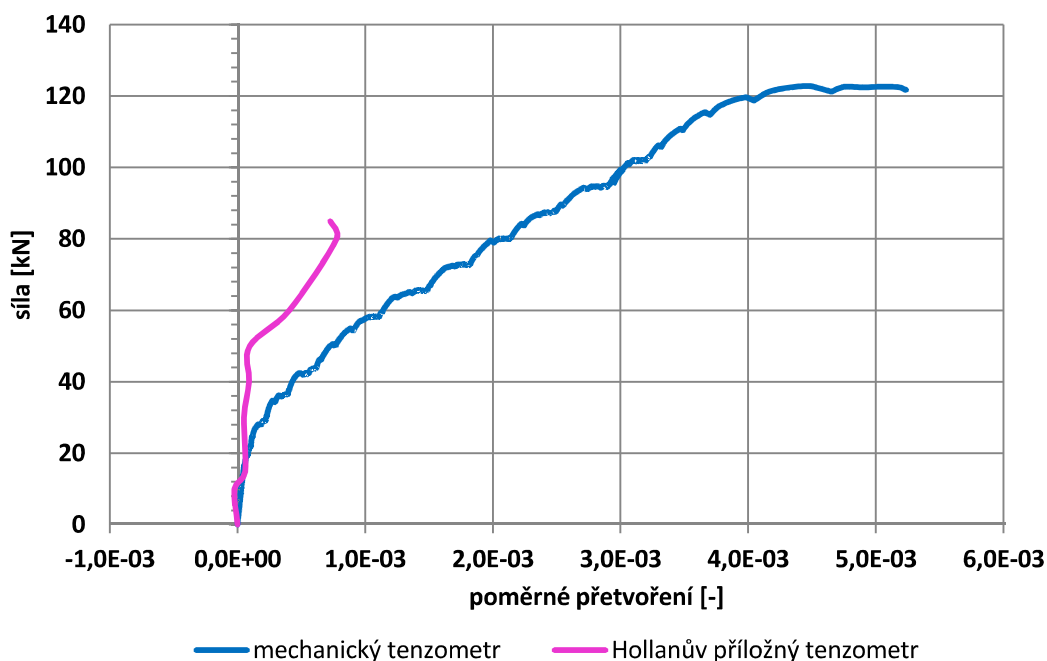
Příloha č. 4

Vyhodnocení experimentální analýzy

Grafy zatěžovací zkoušky- VARIANTA 1

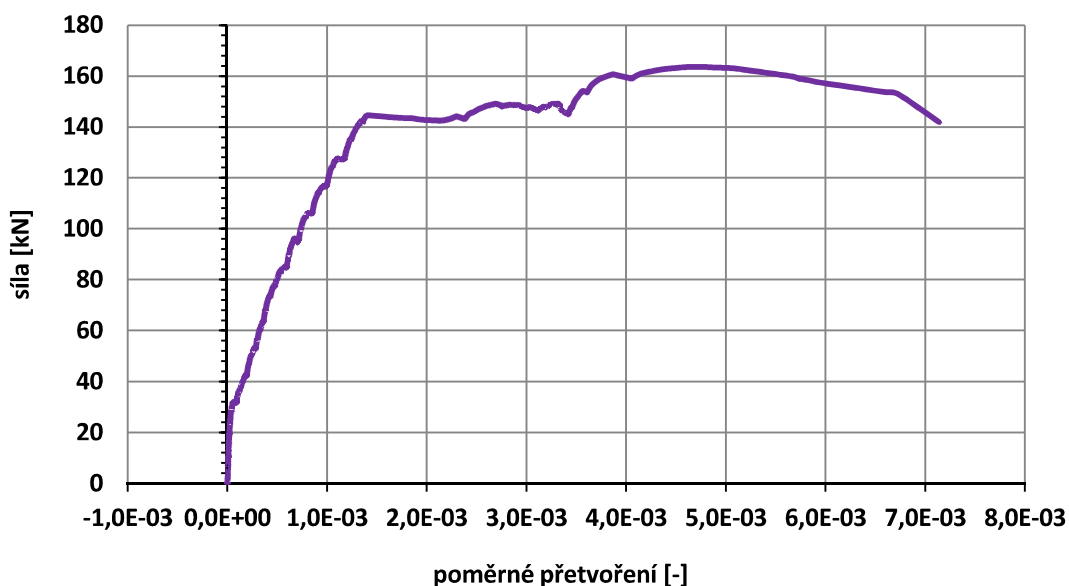


Obr. P4 – 1 Graf závislosti síly na poměrném přetvoření betonového prvku

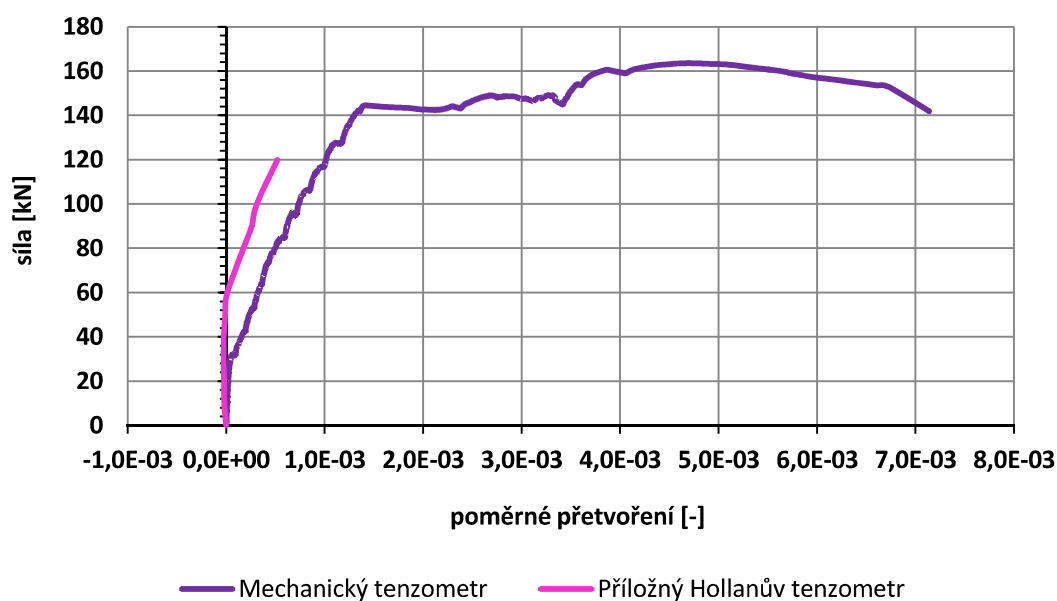


Obr. P4 – 2 Srovnání naměřených hodnot mechanický tenzometrem a Hollanovým příložným tenzometrem

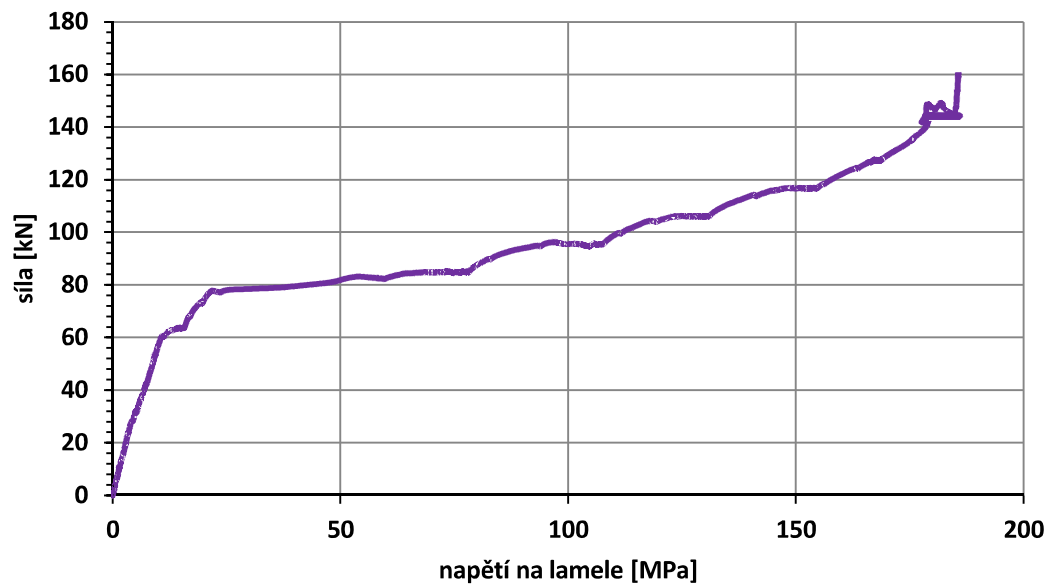
Grafy zatěžovací zkoušky- VARIANTA 2



Obr. P4 – 3 Graf závislosti síly na poměrném přetvoření betonového prvku

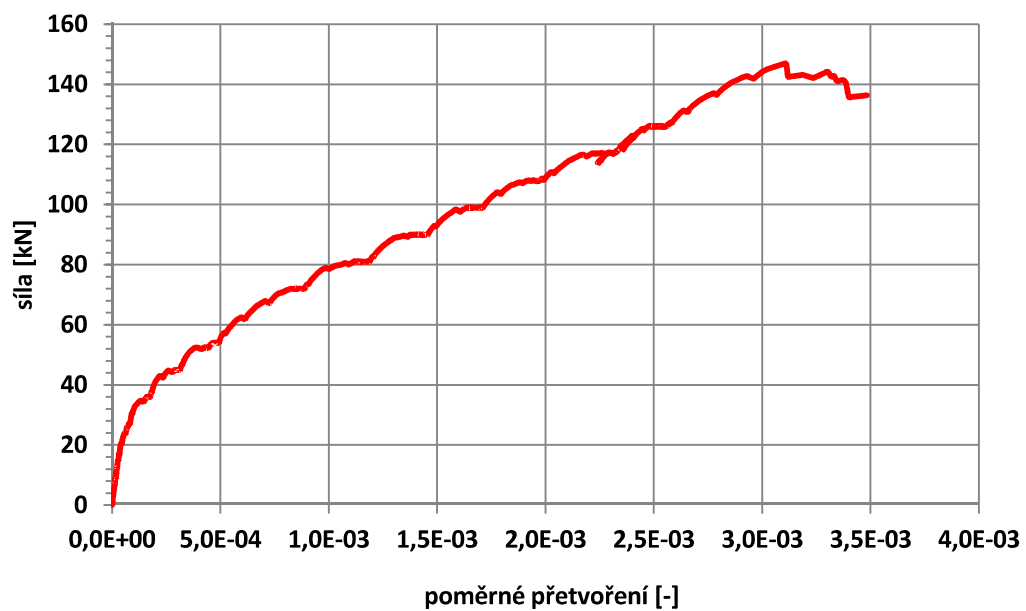


Obr. P4 – 4 Srovnání naměřených hodnot mechanický tenzometrem a Hollanovým příložným tenzometrem

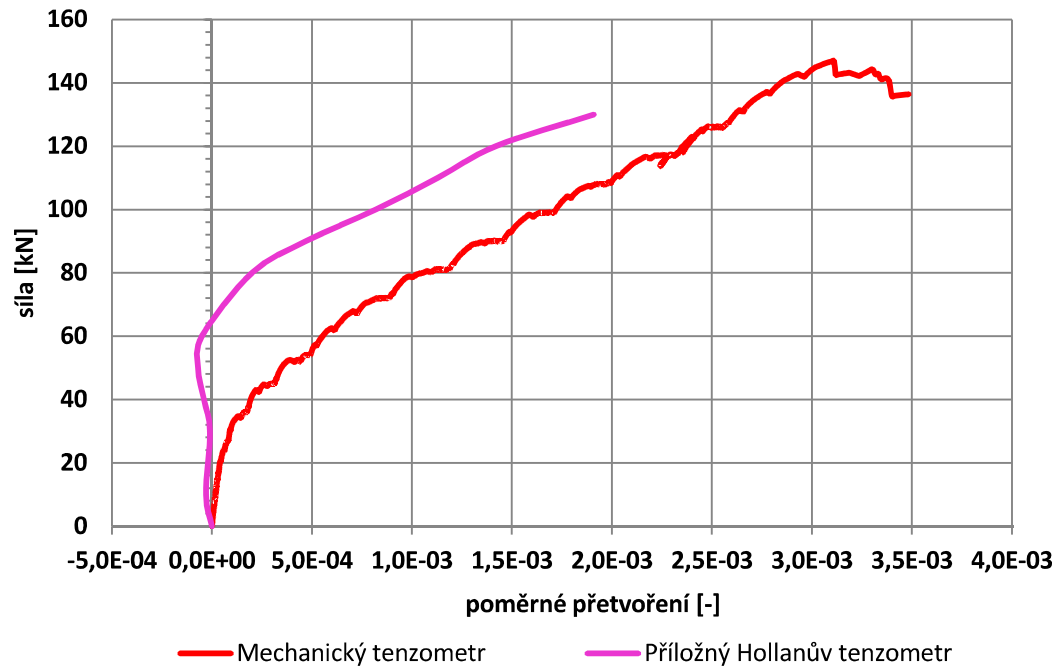


Obr. P4 – 5 Graf závislosti síly na napětí na lamele

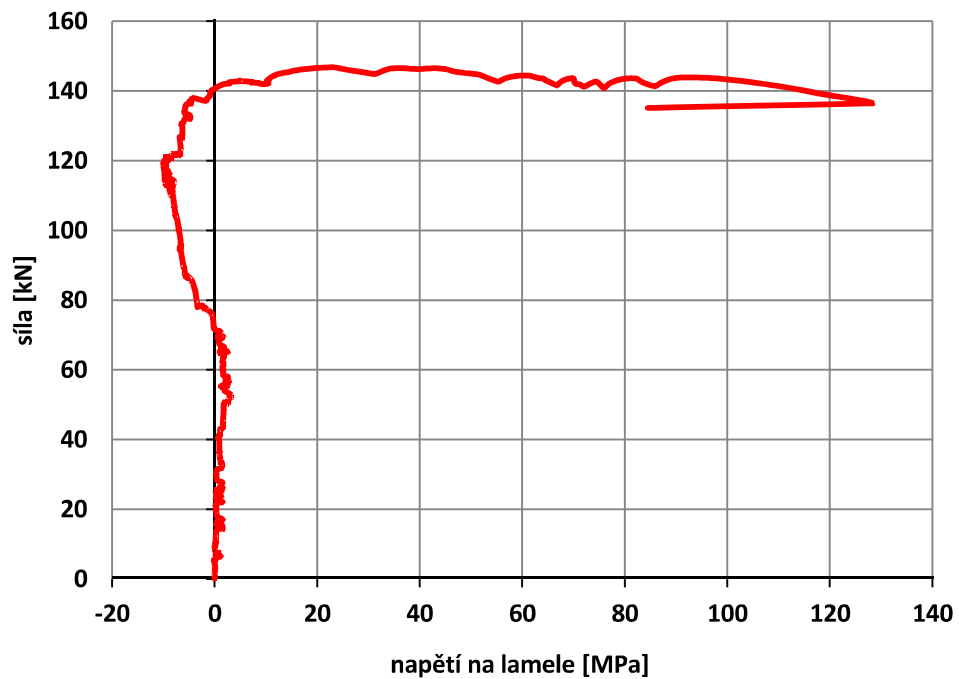
Grafy zatěžovací zkoušky- VARIANTA 3



Obr. P4 – 6 Graf závislosti síly na poměrném přetvoření betonového prvku

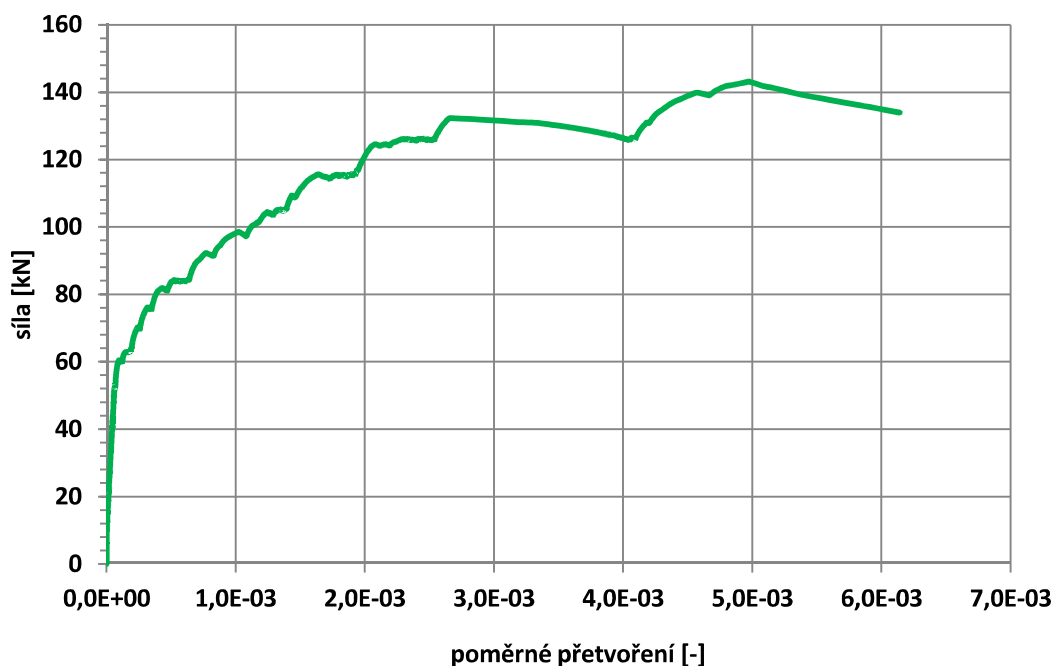


Obr. P4 – 7 Srovnání naměřených hodnot mechanický tenzometrem a Hollanovým příložným tenzometrem

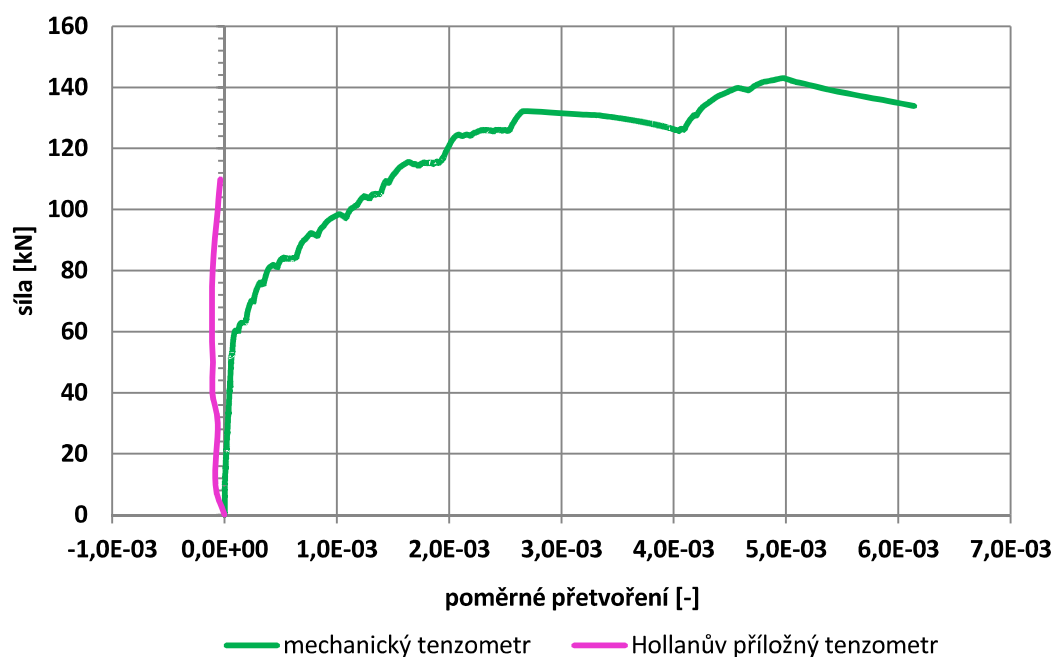


Obr. P4 – 8 Graf závislosti síly na napětí na lamele

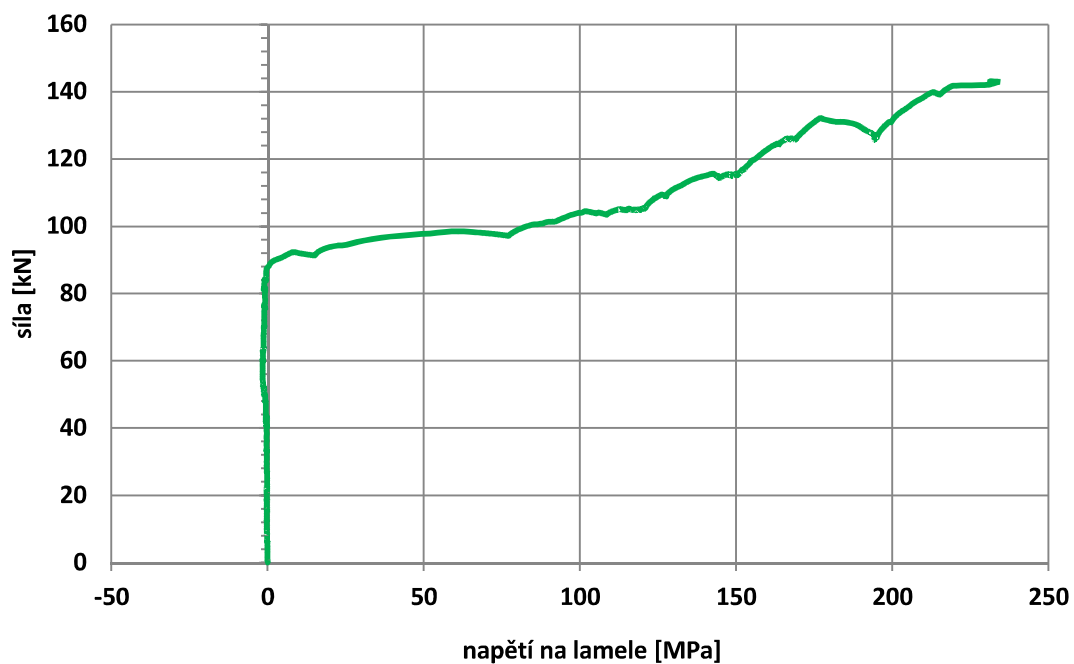
Grafy zatěžovací zkoušky- VARIANTA 4



Obr. P4 – 9 Graf závislosti síly na poměrném přetvoření betonového prvku



Obr. P4 – 10 Srovnání naměřených hodnot mechanický tenzometrem a Hollanovým příložným tenzometrem



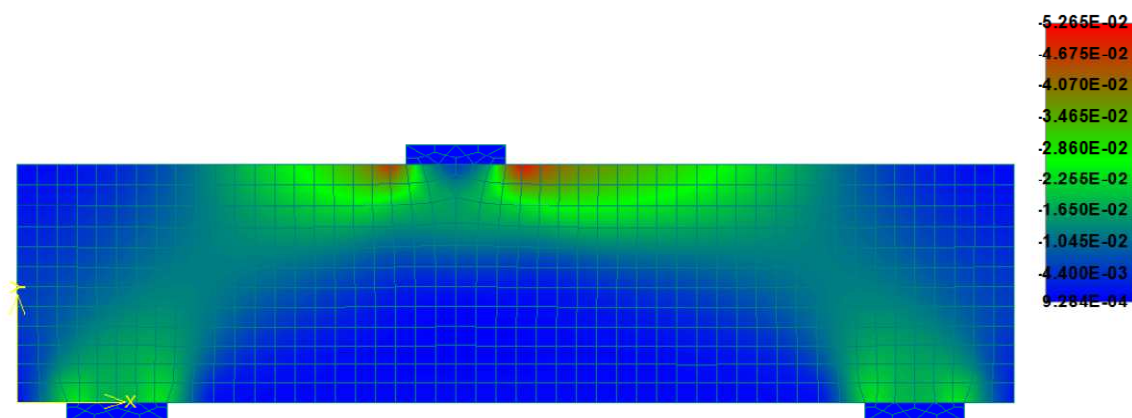
Obr. P4 – 11 Graf závislosti síly na napětí na lamele

Příloha č. 5

Vyhodnocení numerické analýzy

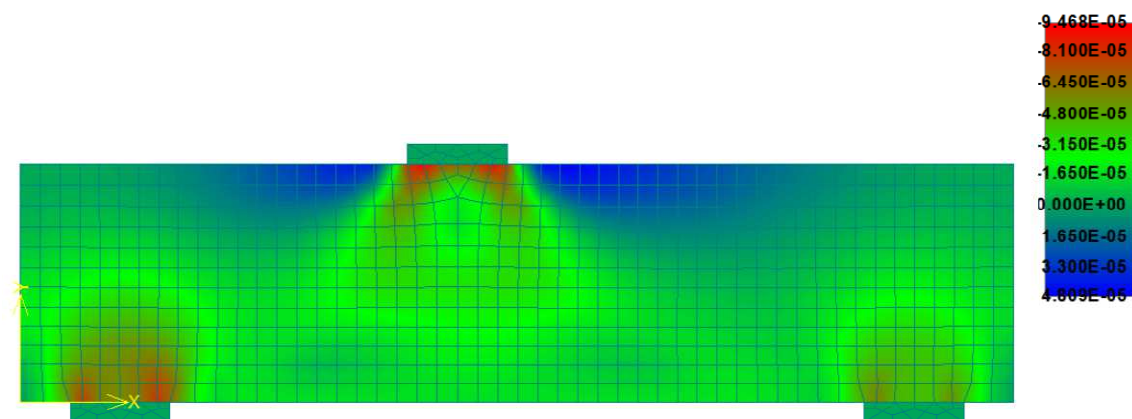
VARIANTA 1

Výpočtový krok 1



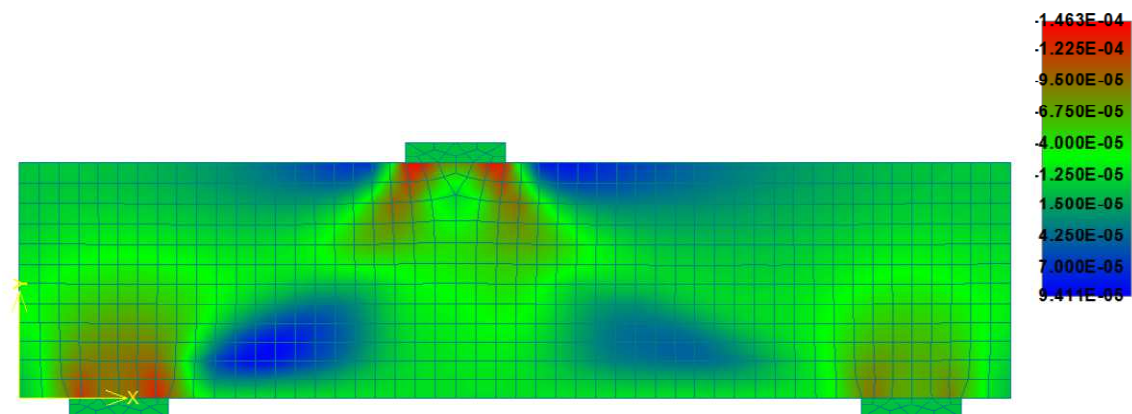
Obr. P5 – 1 Napětí v betonu ve směru osy y – vlastní tíha

Výpočtový krok 5, $F = 51,70$ kN



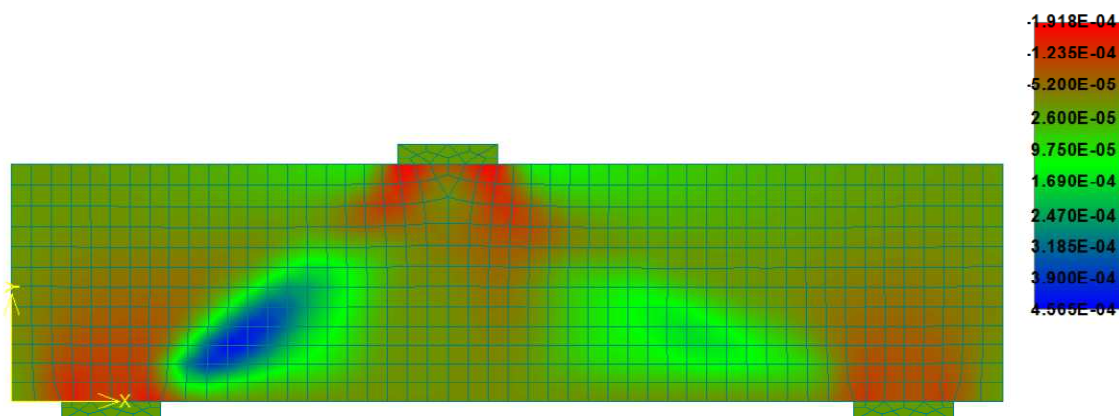
Obr. P5 – 2 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 10, $F = 82,90$ kN



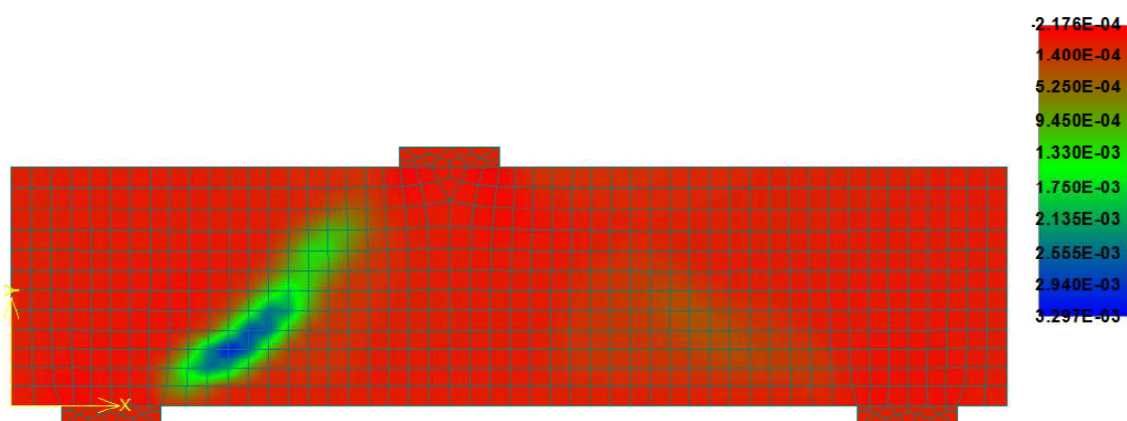
Obr. P5 – 3 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 15, $F = 105,90 \text{ kN}$



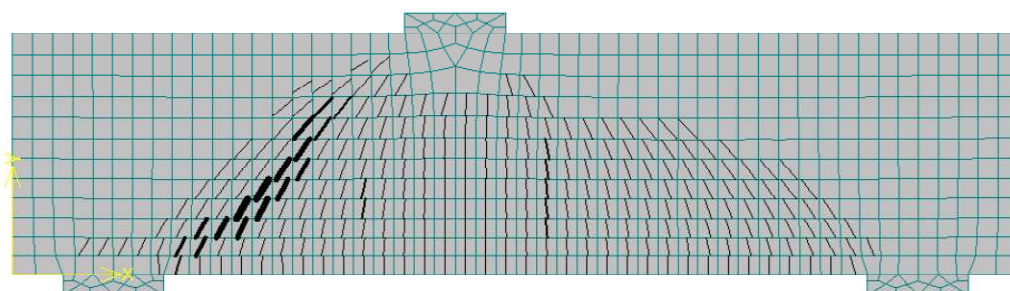
Obr. P5 – 4 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 20, $F = 116,80 \text{ kN}$

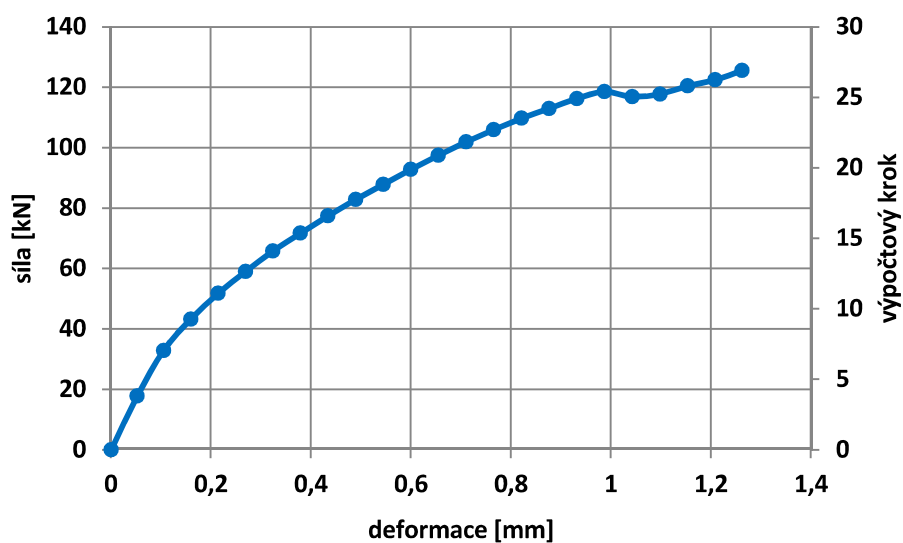


Obr. P5 – 5 Normálová složka deformace ve směru osy y - mez únosnosti prvku

Výpočtový krok 20



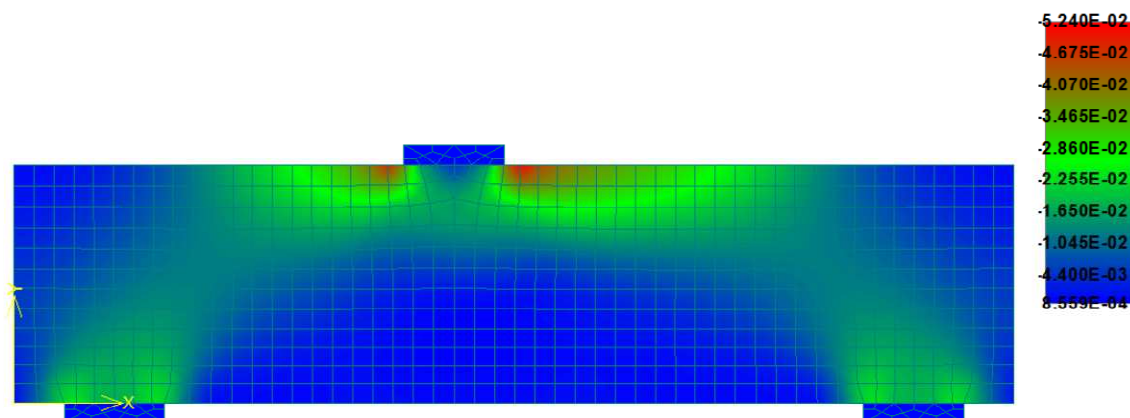
Obr. P5 – 6 Trhliny na mezi únosnosti prvku



Obr. P5 – 7 Křivka zatěžování, ATENA, VARIANTA 1

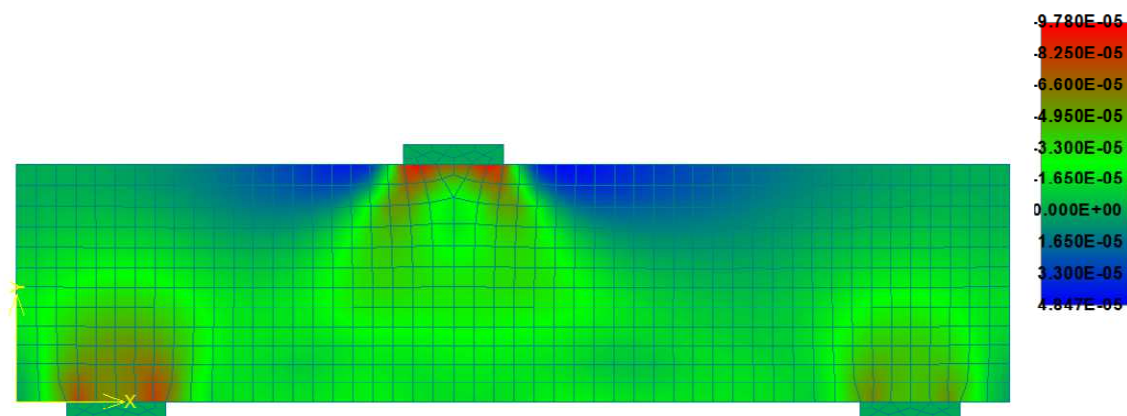
VARIANTA 2

Výpočtový krok 1



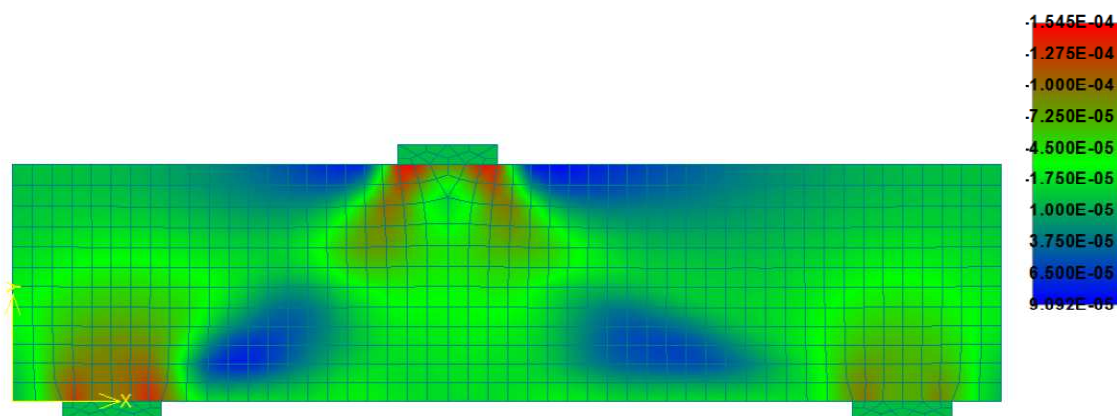
Obr. P5 – 8 Napětí v betonu ve směru osy y – vlastní tíha

Výpočtový krok 5, $F = 53,14 \text{ kN}$



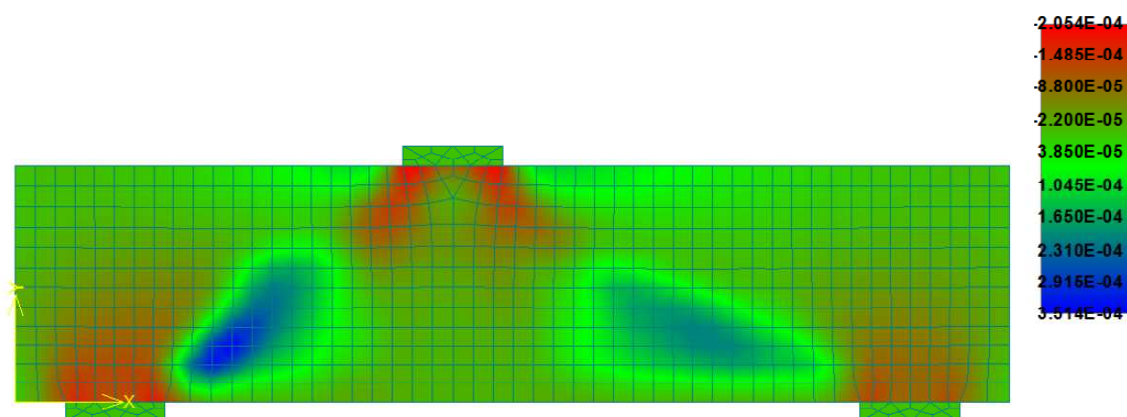
Obr. P5 – 9 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 10, $F = 86,51 \text{ kN}$



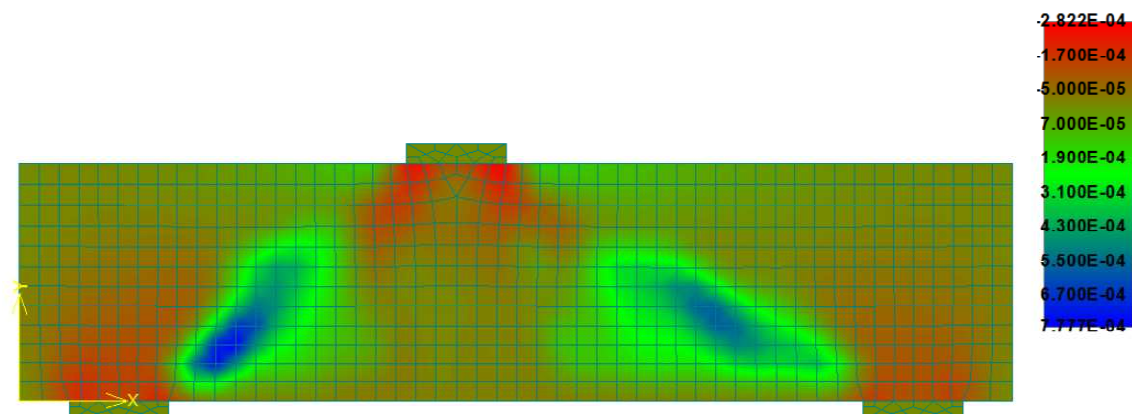
Obr. P5 – 10 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 15, $F = 112,60 \text{ kN}$



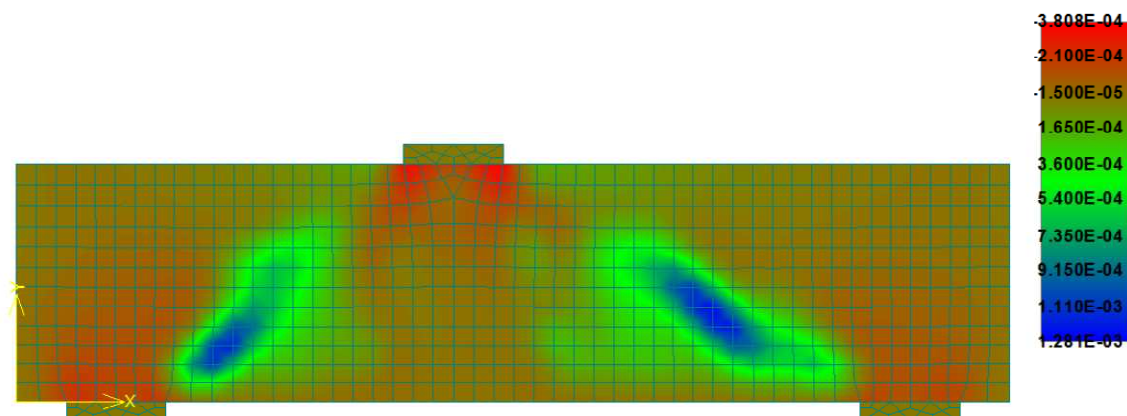
Obr. P5 – 11 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 20, $F = 133,50 \text{ kN}$



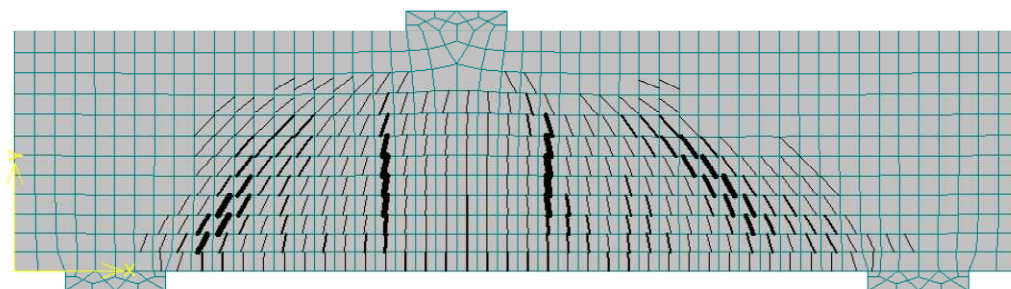
Obr. P5 – 12 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 24, $F = 146,60 \text{ kN}$

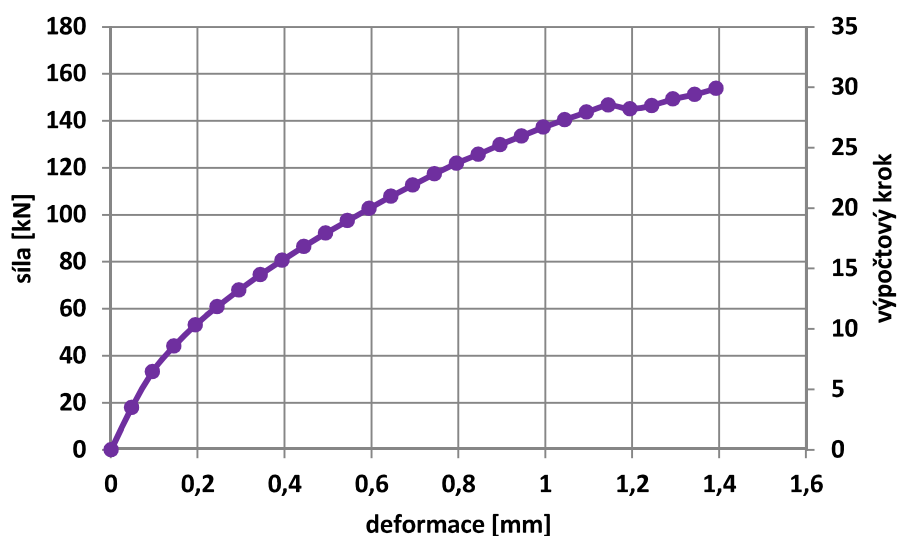


Obr. P5 – 13 Normálová složka deformace ve směru osy y- mez únosnosti prvku

Výpočtový krok 24



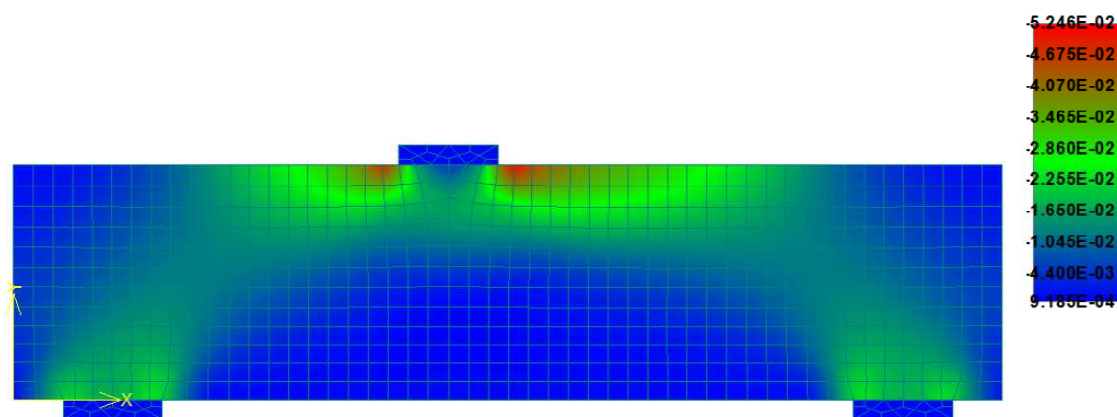
Obr. P5 – 14 Trhliny na mezi únosnosti prvku



Obr. P5 – 15 Křivka zatěžování, ATENA, VARIANTA 2

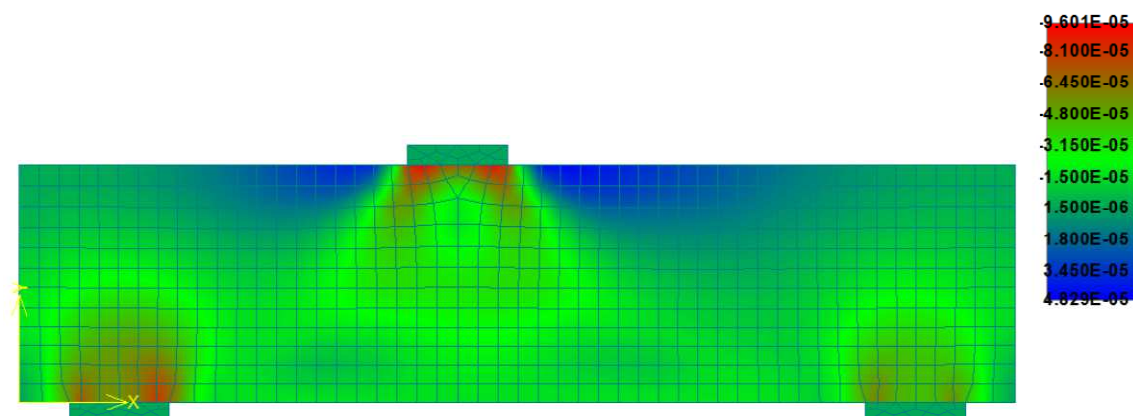
VARIANTA 3

Výpočtový krok 1



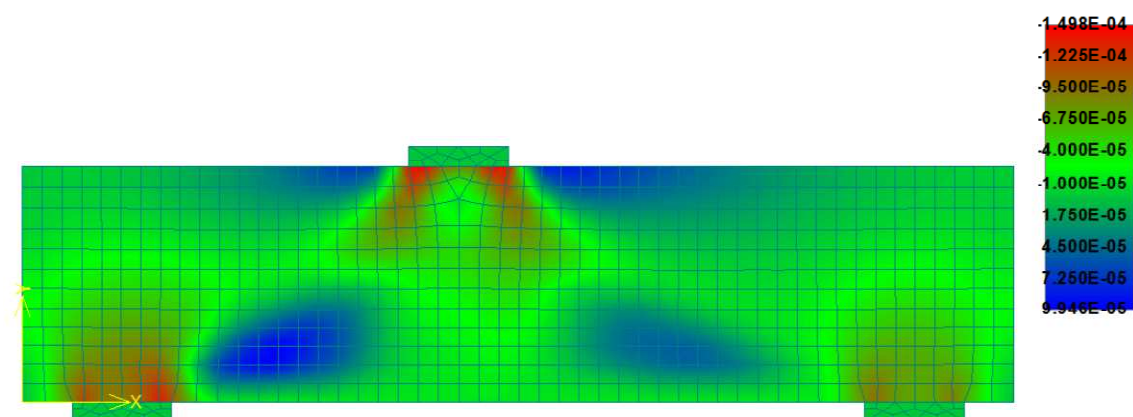
Obr. P5 – 16 Napětí v betonu ve směru osy y – vlastní tíha

Výpočtový krok 5, $F = 52,63 \text{ kN}$



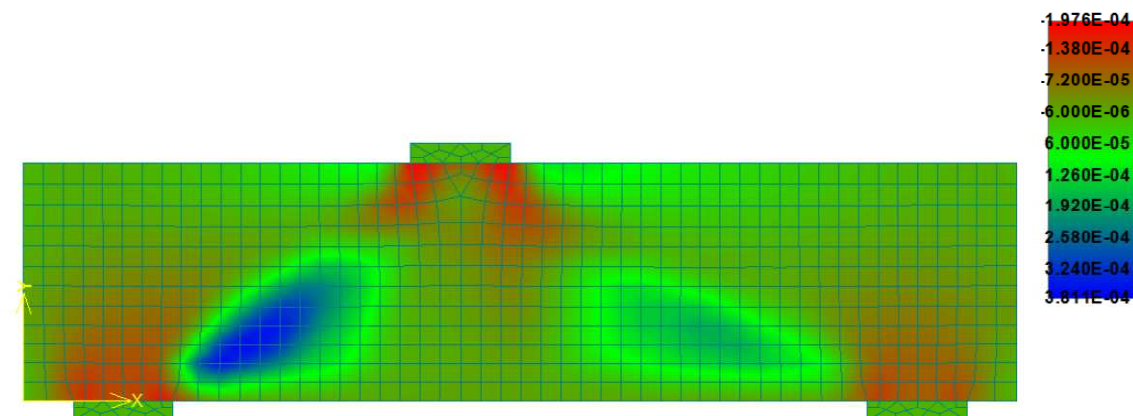
Obr. P5 – 17 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 10, $F = 85,03 \text{ kN}$



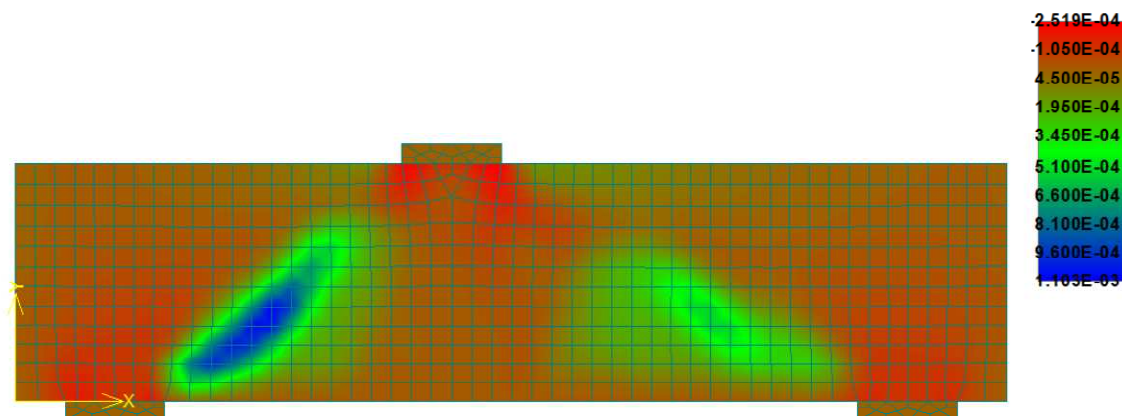
Obr. P5 – 18 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 15, $F = 109,60 \text{ kN}$



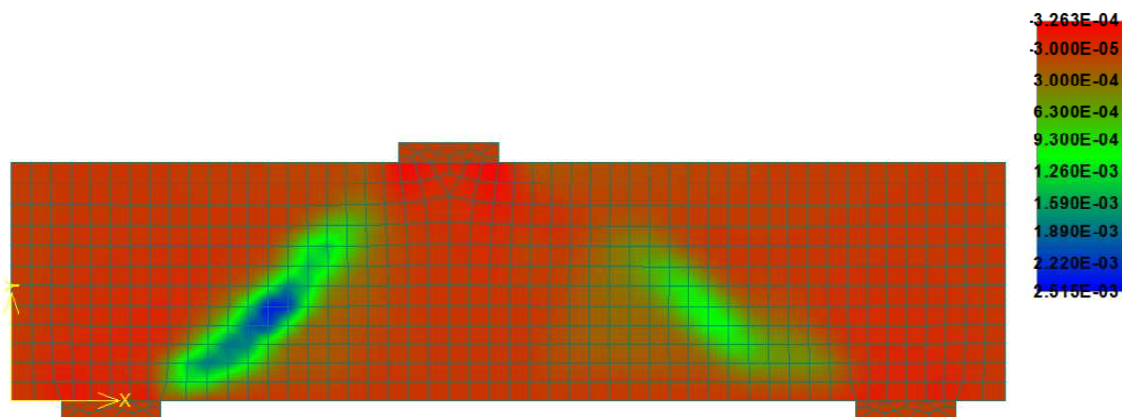
Obr. P5 – 19 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 20, $F = 128,30 \text{ kN}$



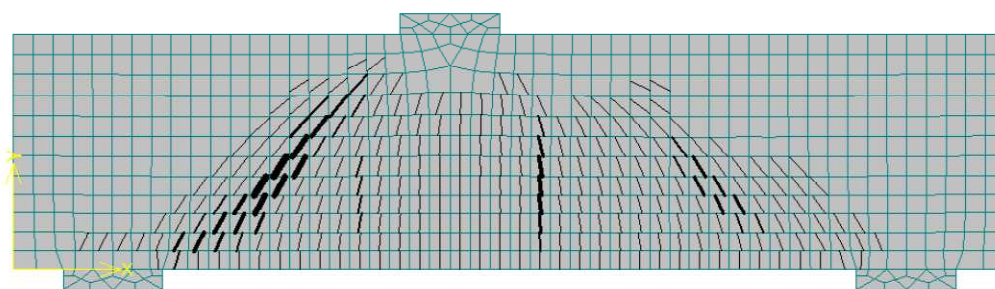
Obr. P5 – 20 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 24, $F = 137,8 \text{ kN}$

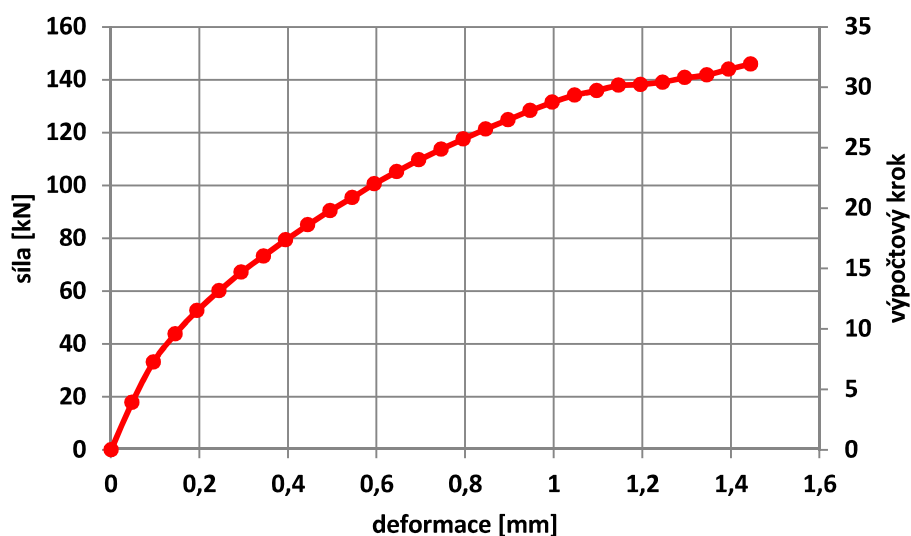


Obr. P5 – 21 Normálová složka deformace ve směru osy y - mez únosnosti prvku

Výpočtový krok 24



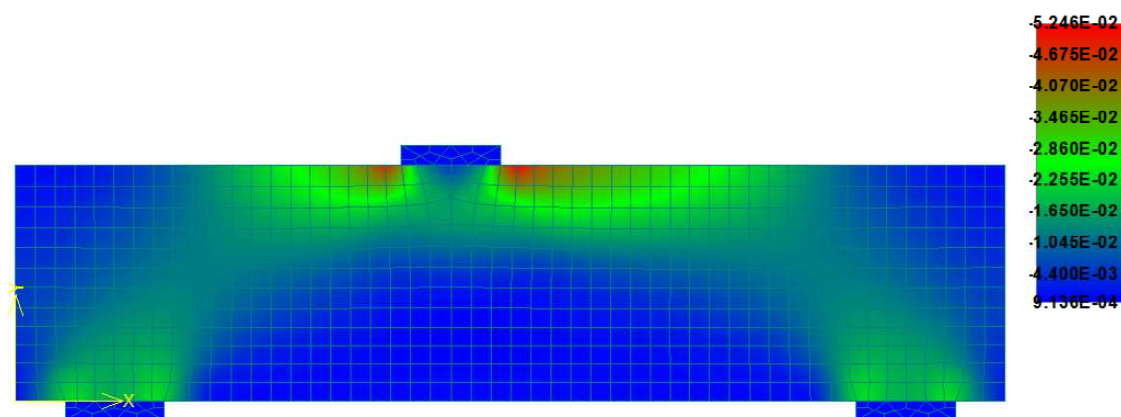
Obr. P5 – 22 Trhliny na mezi únosnosti prvku



Obr. P5 – 23 Křivka zatěžování, ATENA, VARIANTA 3

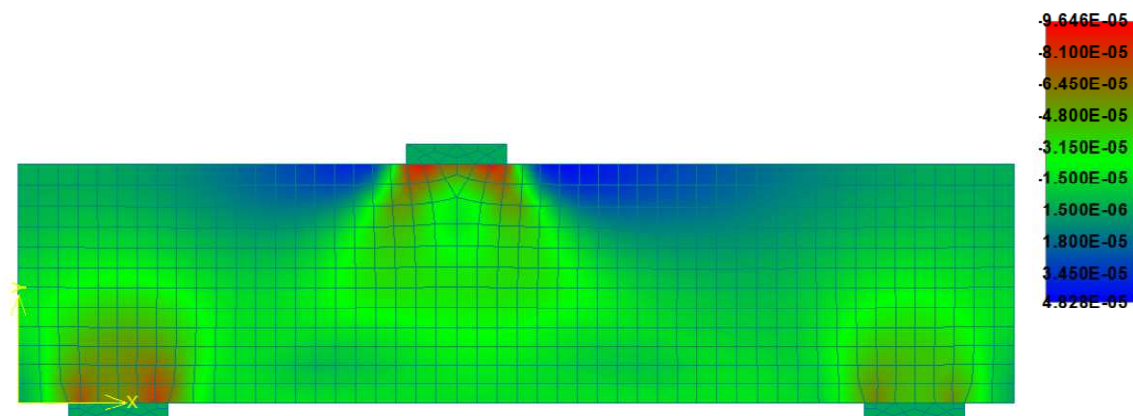
VARIANTA 4

Výpočtový krok 1



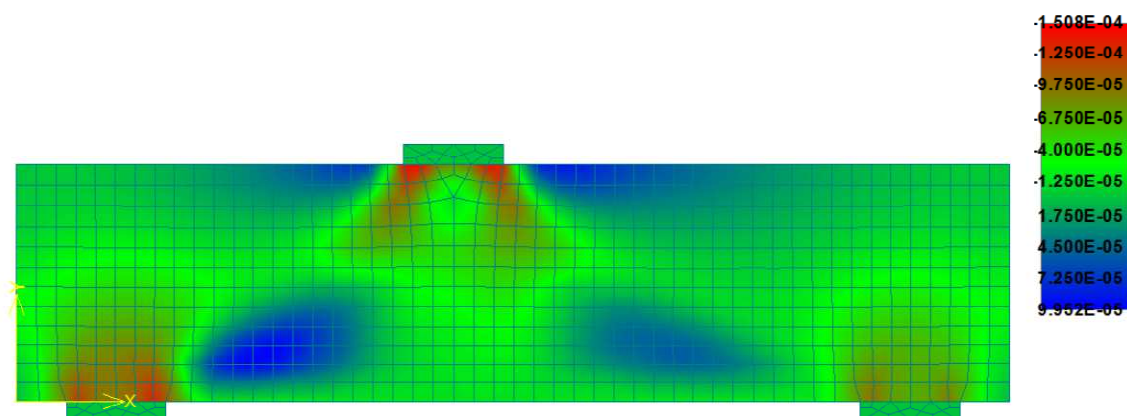
Obr. P5 – 24 Napětí v betonu ve směru osy y – vlastní tíha

Výpočtový krok 5, $F = 52,62 \text{ kN}$



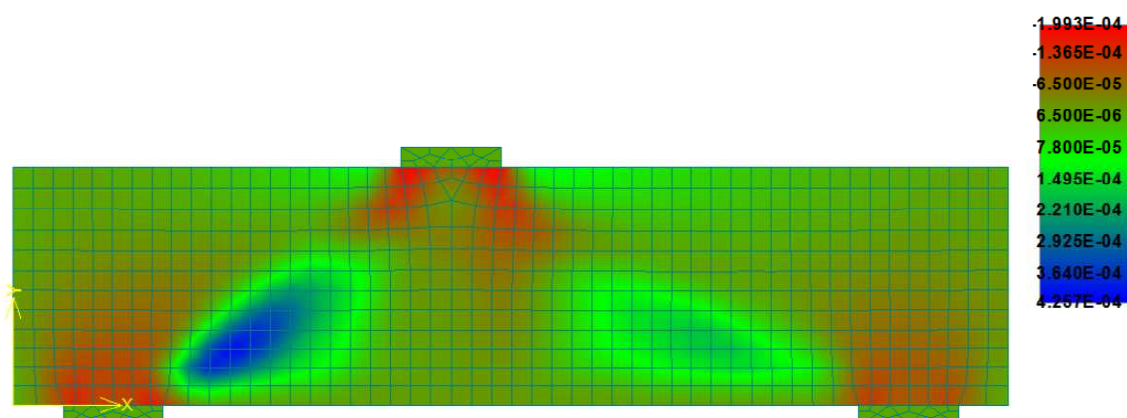
Obr. P5 – 25 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 10, $F = 85,02 \text{ kN}$



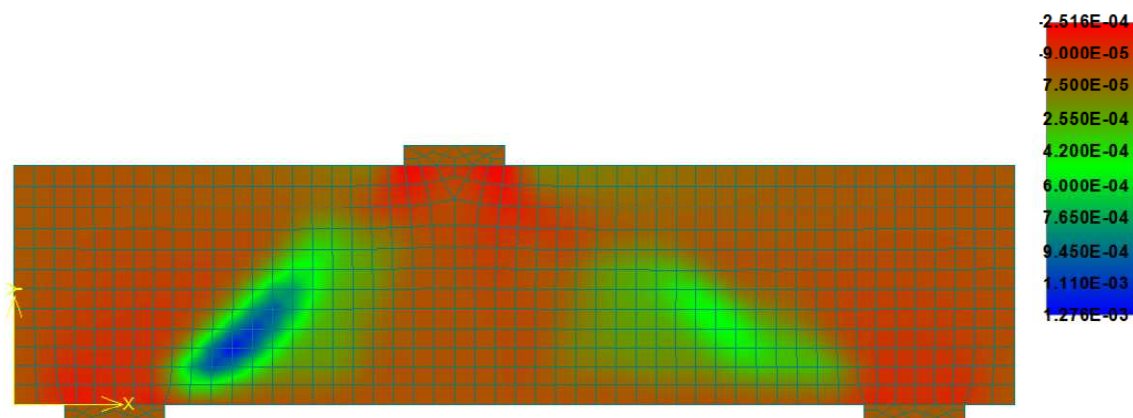
Obr. P5 – 26 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 15, $F = 109,50 \text{ kN}$



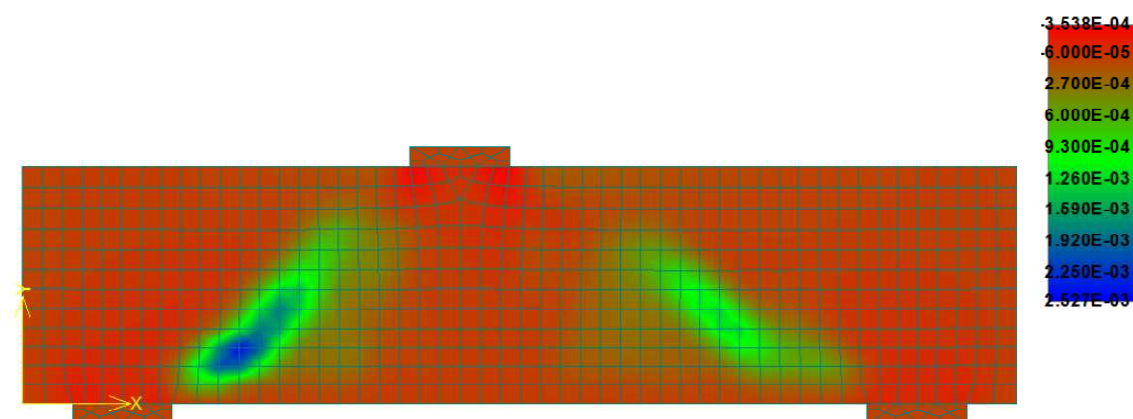
Obr. P5 – 27 Normálová složka deformace ve směru osy y

Výpočtový krok 20, $F = 128,20 \text{ kN}$

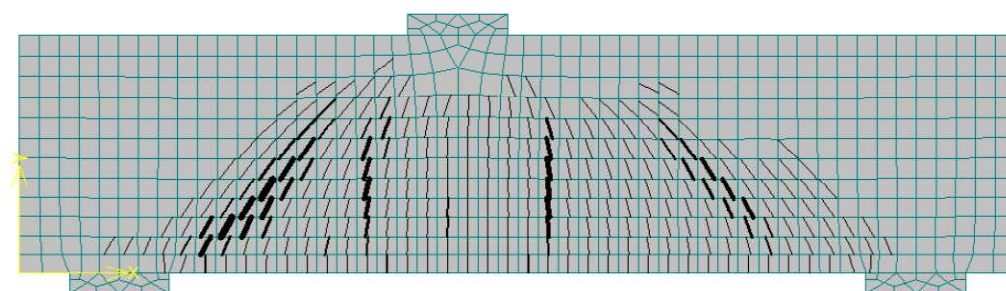


Obr. P5 – 28 Normálová složka deformace ve směru osy y

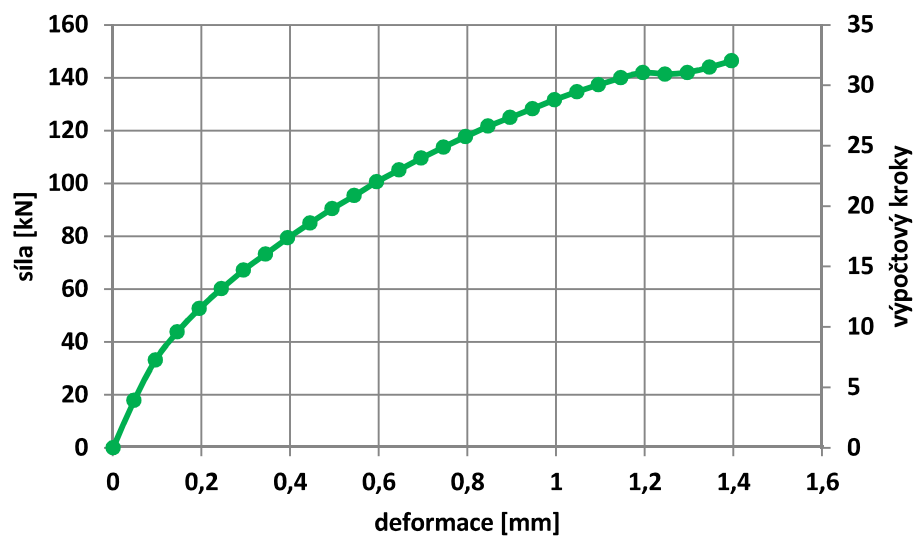
Výpočtový krok 25, $F = 141,90 \text{ kN}$



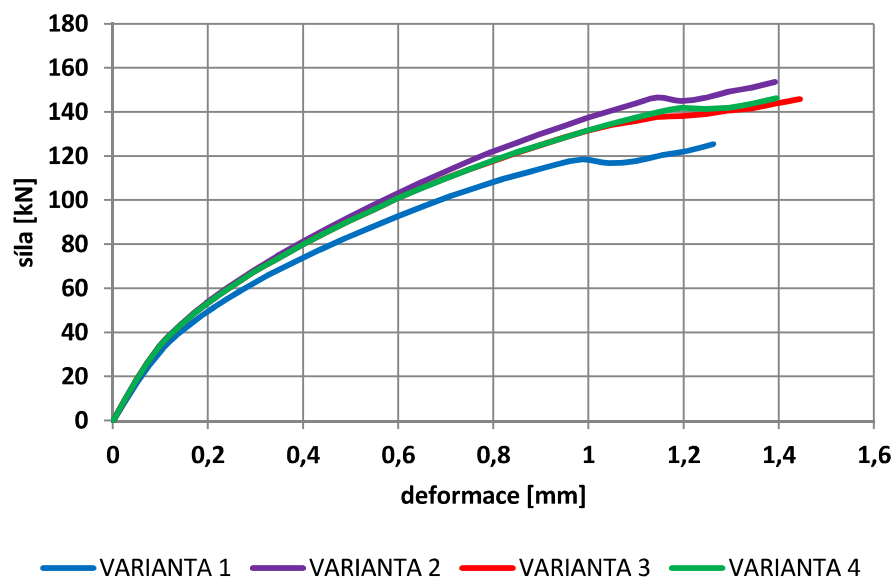
Obr. P5 – 29 Normálová složka deformace ve směru osy y - mez únosnosti prvku



Obr. P5 – 30 Trhliny na mezi únosnosti prvku



Obr. P5 – 31 Křivka zatěžování, ATENA, VARIANTA 4



Obr. P5 – 32 Křivky zatěžování všech zkušebních prvků, ATENA

Příloha č. 6

Fotodokumentace



Obr. P6 – 1 Příprava betonářské výztuže



Obr. P6 – 2 Vyvázaný armokoš



Obr. P6 – 3 Bednění s uloženými armokoši



Obr. P6 – 4 Míchačka s nuceným oběhem



Obr. P6 - 5 Zkouška sednutí Abramsova kužele



Obr. P6 – 6 Vybetonované zkušební prvky



Obr. P6 – 7 Zkušební hranoly



Obr. P6 – 8 Zkušební krychle



Obr. P6 – 9 Odbedněné zkušební prvky



Obr. P6 – 10 Příprava zatěžovací zkoušky



Obr. P6 – 11 VAR 1 – prvek za hranici meze únosnosti Obr. P6 – 12 Delaminace lamel



Obr. 6 – 12 VAR 2 – prvek za hranici meze únosnosti



Obr. P6 – 13 VAR 3 – delaminace lamel a porušení prvku