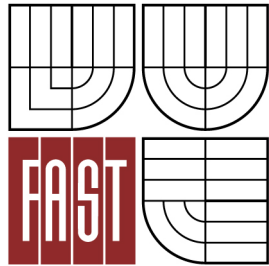




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

INICIACE STABILNÍHO ŠÍŘENÍ TRHLINY U VYBRANÝCH STAVEBNÍCH KOMPOZITŮ

INITIATION OF STABLE CRACK PROPAGATION OF SELECTED BUILDING COMPOSITES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

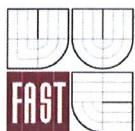
AUTORKA PRÁCE
AUTHOR

ROMANA VIKTÓRIA MAJTÁNOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. ZBYNĚK KERŠNER, CSc.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student Romana Viktória Majtánová

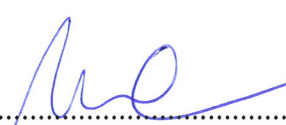
Název Iniciace stabilního šíření trhliny u vybraných stavebních kompozitů

Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

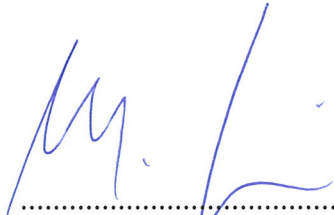
Datum zadání bakalářské práce 29. 11. 2013

Datum odevzdání bakalářské práce 30. 5. 2014

V Brně dne 29. 11. 2013


.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
vedoucí ústavu




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

Podklady a literatura

- KARIHALOO, B. L. Fracture mechanics and structural concrete. New York: Longman Scientific & Technical, 1995.
- KUMAR, S.; BARAI, S. V. Concrete fracture models and applications. Heidelberg: Springer, 2011.
- Další podklady podle pokynů vedoucího práce.


Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

Studium doporučených podkladů a souvisejících materiálů, průzkum webových zdrojů, orientace v zadané problematice lomu vybraných stavebních materiálů, lomové parametry, aplikace modelu iniciace lomu, vyhodnocení vybraných lomových experimentů, diskuse výsledků, závěrečné shrnutí.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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


.....
prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Tato práce se zabývá zkoumáním působení vláken v obyčejném a lehkém betonu. Zkušební tělesa byla vyrobena z betonu s polypropylenovými vlákny Forta FERRO ve třech variantách – o délce 19, 38 a 54 mm – a také z referenčních betonů bez vláken. Práce ukazuje postupné vyhodnocování lomových experimentů na tělesech ze zmíněných materiálů. Jednalo se o zatěžování trámů s centrálním zářezem v konfiguraci tříbodového ohybu. Z naměřených diagramů síla vs. posun uprostřed rozpětí a síla vs. otevření ústí trhliny byly stanoveny hodnoty modulu pružnosti, lomové houževnatosti, její iniciační složky a také úroveň zatížení pro start stabilního šíření trhliny tělesy. Ke stanovení byla použita metoda „dvojí- K “. Informativně je popsáno i vyhodnocení pomocí modelu efektivní délky trhliny.

Klíčová slova

Obyčejný beton, lehký beton, vláknobeton, polypropylenové vlákno, tříbodový ohyb, lomový test, model „dvojí- K “, lomová houževnatost, iniciace stabilního šíření trhliny.

Abstract

The purpose of my bachelor's thesis is study of the effects of fibres in normal-weight concrete and light-weight concrete. Specimens were prepared from concrete with polypropylene fibres FORTA FERRO of three different lengths – 19, 38 and 54 mm – and also reference concrete (without fibres) was prepared. This thesis contains gradual evaluation of fracture tests on specimens from mentioned materials. The used fracture test was a three-point bending fracture test on beams with a central notch. From the measured load-deflection in the middle of span and load-crack mouth opening displacement diagrams were determined values of modulus of elasticity, unstable fracture toughness, initiation part of fracture toughness and also load level for beginning of stable crack propagation composites. For determination was used „double- K “ fracture model. For illustration is described evaluation using the effective crack model.

Keywords

Concrete, light-weight concrete, fibre concrete, polypropylene fibre, three-point bending fracture test, „double- K “ fracture model, fracture toughness, initiation of stable crack propagation.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

MAJTÁNOVÁ, R. V. *Iniciace stabilního šíření trhliny u vybraných stavebních kompozitů*. Brno, 2014. 31 s., 27 s. příl. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne 30. 5. 2014

.....

podpis autorky

Romana Viktória Majtánová

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat panu prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc., za odborné vedení při vzniku této práce, jeho cenné rady, připomínky a trpělivost. Nemalý dík patří rovněž paní Ing. Ivaně Havlíkové za ochotu a pomoc při zpracování dat. Osobní poděkování patří mým rodičům a přátelům za psychickou podporu a trpělivost.

Prezentované výsledky byly získány za podpory projektu GA ČR P104/11/0833, jakož i standardního projektu specifického vysokoškolského výzkumu na VUT v Brně č. FAST-S-12-21/1653.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	LOMOVÉ EXPERIMENTY	9
2.1	Zpracování údajů.....	10
3	APLIKACE LOMOVÉHO MODELU „DVOJÍ-K“	15
3.1	Stanovení lomové houževnatosti K_{lc}^{un}	15
3.2	Stanovení kohezivní složky lomové houževnatosti K_{lc}^c	16
4	VYHODNOCENÍ LOMOVÝCH EXPERIMENTŮ.....	18
4.1	Vyhodnocení pomocí aplikace lomového modelu „dvojí-K“	18
4.2	Vyhodnocení pomocí modelu efektivní délky trhliny	19
5	SHRNUTÍ VÝSLEDKŮ.....	21
	ZÁVĚR	27
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	28
	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	30
	SEZNAM PŘÍLOH.....	32
	PŘÍLOHA 1 – upravené naměřené diagramy.....	32
	PŘÍLOHA 2 – výsledky vyhodnocení modelem „dvojí-K“	32
	PŘÍLOHA 1 – UPRAVENÉ NAMĚŘENÉ DIAGRAMY.....	33
	PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDKY VYHODNOCENÍ MODELEM „DVOJÍ-K“	57

1 ÚVOD

Tato práce se bude zabývat betonovými kompozity z obyčejného a z lehkého betonu, které patří mezi nejpoužívanější stavební materiály. Pro prostý beton je charakteristické jeho kvazikřehké chování [7]. Přidáním vláken do betonové směsi se může zvýšit u betonových kompozitů odolnost proti šíření trhlin. Na kvantifikaci lomové odolnosti se často používají vzorky s centrálním zářezem, na které působí síla v tříbodovém ohybu. Model „dvojí- K “, použitý v této práci, je založen na kombinaci konceptu kohezivních sil působících na lících fiktivní (efektivní) trhliny a kritéria rozvoje trhliny založeného na faktoru intenzity napětí [9, 8]. Díky tomuto modelu lze určit kritické otevření trhliny a lomovou houževnatost, resp. popsat různé úrovně šíření trhliny: iniciační, které odpovídá počátku stabilního šíření trhliny (při dosažení úrovně faktoru intenzity napětí rovné K_{lc}^{ini}), a úroveň nestabilního šíření trhliny (při dosažení lomové houževnatosti K_{lc}^{un}). Pro doplnění je tu použit i model efektivní délky trhliny.

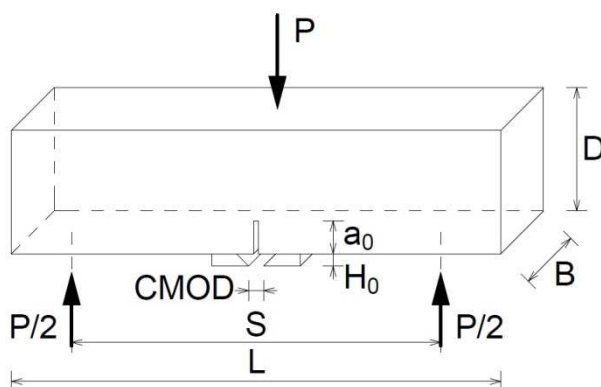
Výsledky zkoušek ve formě diagramů zatížení vs. posun (průhyb či otevření trhliny/zářezu) lze vyhodnotit řadou lomových modelů. V této práci jsou porovnávány výsledky vybraných lomových zkoušek tříbodového ohybu na tělesech z obyčejného a lehkého betonu bez vláken a s polypropylenovými vlákny různých délek pomocí modelu „dvojí- K “, který je zde využit také k predikci úrovně zatížení pro start stabilního šíření iniciační trhliny/zářezu.

2 LOMOVÉ EXPERIMENTY

V rámci přípravy příspěvku [5] byly vyhodnoceny lomové experimenty, jejichž detaily jsou dále uvedeny. Čerstvá betonová směs byla připravena z těžného kameniva i lehkého, pórovitého kameniva frakce 0–4 mm a 4–8 mm, cementu CEM I – 42,5 R, popílku, plastifikátoru, vody a stabilizátoru. Voda a stabilizátor byly dávkovány objemově, zbývající složky dle hmotnosti. Bylo vyrobeno osm směsí, a to s označením *OB_REF*, *OB_FF19*, *OB_FF38*, *OB_FF54*, *LB_REF*, *LB_FF19*, *LB_FF38* a *LB_FF54*. Směs *OB* byla vyrobena z obyčejného betonu, *LB* z lehkého betonu. Směs s označením *REF* byla připravena bez vláken, směs *FF19*, *FF38*, *FF54* s polypropylenovými vlákny FORTA FERRO délky 19, 38, 54 mm.

Zkoušky v třibodovém ohybu byly prováděny na tělesech ve tvaru trámce s centrálním zářezem. Stáří vzorků bylo 28 dní. Celkem bylo odzkoušeno 24 trámců (tři z každého druhu betonu). Nominální rozměry těles byly 100×100×400 mm, rozpětí činilo 300 mm. Počáteční zářezy byly před testy vyřezány pilou s diamantovým kotoučem, hloubka počátečního zářezu byla asi do 1/3 výšky tělesa. Během lomových zkoušek byl vždy zaznamenáván diagram zatížení vs. otevření ústí trhliny (dále často označovaný jako *P-CMOD* diagram). Každý diagram byl pak využit k určení hodnot lomově-mechanických parametrů zmíněných betonů.

Geometrii zkušebního tělesa namáhaného třibodovým ohybem lze vidět na Obr. 2.1, kde D značí výšku, B šířku a L délku tělesa, S pak značí rozpětí mezi podporami; a_0 je hloubka počátečního zářezu.



Obr. 2.1 Geometrie zkoušky třibodovým ohybem trámce se zářezem [5]

2.1 Zpracování údajů

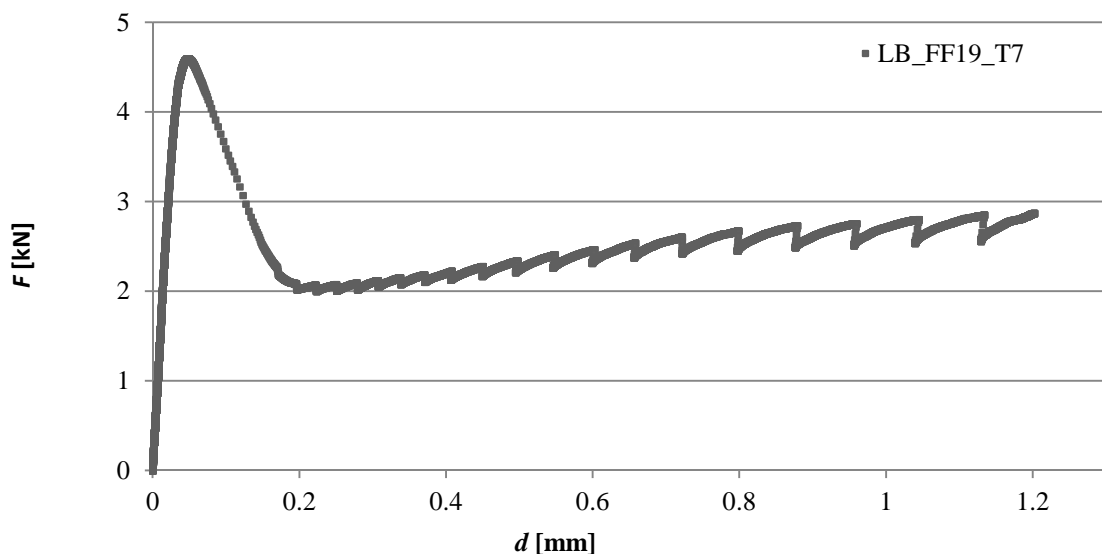
Naměřené hodnoty zatížení a otevření ústí trhliny bylo třeba upravit a až pak bylo možné provést následnou analýzu těchto dat. Na úpravu hodnot se použil program Microsoft Excel, ve kterém se nejdříve připravila šablona, která obsahovala všechny společné úpravy, které se musely vykonat při korekci každého souboru naměřených hodnot, čímž se postup zefektivnil – viz dílčí ukázka tabulek v Obr. 2.2 a postup v následujícím textu a obrázcích.

	B	C	D	E	F	G	H
1	F [kN]	F pomocne [kN]	d,puv [mm]	d/2 [mm]	d [mm]	CMODpuv [mm]	CMOD [mm]
2							
3							
4							
5							
6	-2.0080E-03		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
7	-8.0321E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
8	-4.0161E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
9	-4.0161E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
10	0.0000E+00		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
11	4.0161E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
12	4.0161E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
13	8.0321E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
14	8.0321E-04		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
15	1.2048E-03		0.0000E+00	0.0000E+00		0.0000E+00	
4800	1.9920E+00		2.7143E-02	1.3571E-02		-8.2667E-04	
4801	1.9928E+00	2.0000E-01	2.7143E-02	1.3571E-02	1.3883E-03	-8.2667E-04	
4802	1.9932E+00	4.0000E-01	2.7143E-02	1.3571E-02	2.7767E-03	-8.2667E-04	
4803	1.9940E+00	6.0000E-01	2.7143E-02	1.3571E-02	4.1650E-03	-8.2667E-04	
4804	1.9948E+00	8.0000E-01	2.7143E-02	1.3571E-02	5.5533E-03	-8.2667E-04	
4805	1.9956E+00	1.0000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	6.9416E-03	-8.2667E-04	
4806	1.9968E+00	1.2000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	8.3300E-03	-8.2667E-04	
4807	1.9976E+00	1.4000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	9.7183E-03	-8.2667E-04	
4808	1.9984E+00	1.6000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	1.1107E-02	-8.2667E-04	
4809	1.9992E+00	1.8000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	1.2495E-02	-8.2667E-04	
4810	2.0000E+00	2.0000E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	1.3883E-02	-8.2667E-04	
4811	2.0008E+00	2.0008E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	1.3883E-02	-8.2667E-04	
4812	2.0016E+00	2.0016E+00	2.7143E-02	1.3571E-02	1.3883E-02	-8.2667E-04	
4813	2.0020E+00	2.0020E+00	2.7381E-02	1.3690E-02	1.4002E-02	-8.2667E-04	
4814	2.0028E+00	2.0028E+00	2.7381E-02	1.3690E-02	1.4002E-02	-8.2667E-04	
22109	2.8659E+00	2.8659E+00	2.4029E+00	1.2014E+00	1.2017E+00	1.4806E+00	
22110	2.8671E+00	2.8671E+00	2.4029E+00	1.2014E+00	1.2017E+00	1.4806E+00	
22111	2.8679E+00	2.8679E+00	2.4031E+00	1.2015E+00	1.2019E+00	1.4810E+00	
22112	2.8679E+00	2.8679E+00	2.4033E+00	1.2017E+00	1.2020E+00	1.4810E+00	
22113	2.8679E+00	2.8679E+00	2.4033E+00	1.2017E+00	1.2020E+00	1.4810E+00	
22114	2.8675E+00	2.8675E+00	2.4036E+00	1.2018E+00	1.2021E+00	1.4810E+00	
22115	2.8675E+00	2.8675E+00	2.4038E+00	1.2019E+00	1.2022E+00	1.4814E+00	
22116	2.8679E+00	2.8679E+00	2.4038E+00	1.2019E+00	1.2022E+00	1.4814E+00	
22117	2.8683E+00	2.8683E+00	2.4040E+00	1.2020E+00	1.2023E+00	1.4814E+00	
22118	2.8687E+00	2.8687E+00	2.4043E+00	1.2021E+00	1.2025E+00	1.4814E+00	
22119	2.8687E+00	2.8687E+00	2.4043E+00	1.2021E+00	1.2025E+00	1.4818E+00	
22120	2.8683E+00	2.8683E+00	2.4045E+00	1.2023E+00	1.2026E+00	1.4818E+00	

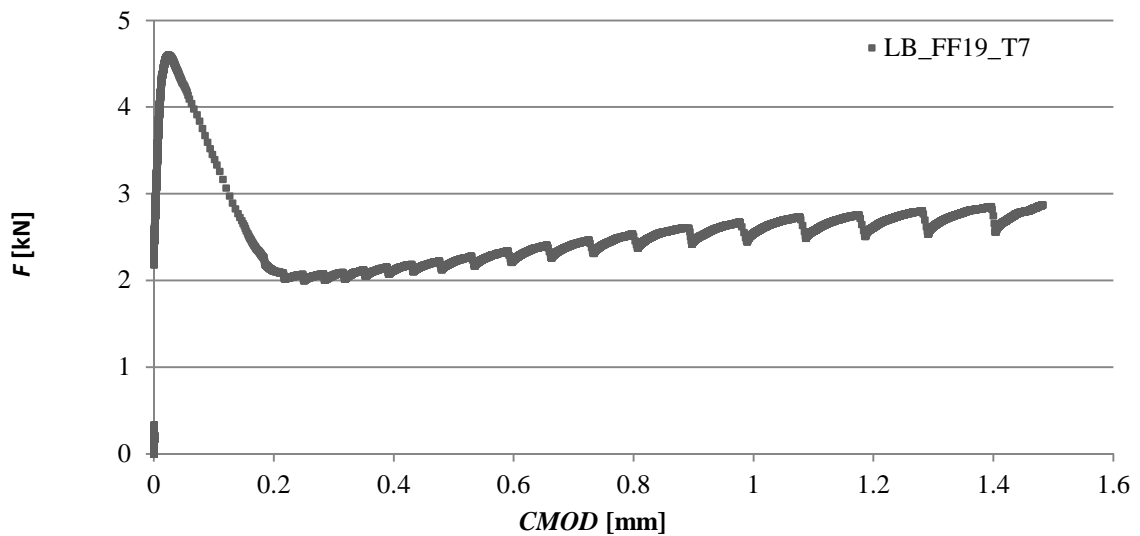
Obr. 2.2 Ukázka rozsahu zpracovávaných naměřených hodnot a počátku korigovaných dat

(sešit Microsoft Excel)

Pro šablonu se použil nový excelovský dokument, kde do prvního listu se vložila tabulková struktura, která odpovídá struktuře ze vstupních dat, kde bylo však nutné změnit pořadí jednotlivých sloupců za účelem zvýšení přehlednosti tabulky. Pořadí sloupců se nastavilo následovně. V prvním sloupci budou umístěny hodnoty času t [s], ve druhém sloupci síla F [kN] a ve třetím posun d [mm]. Protože při měření se posun zaznamenával nad podporou a ne v polovině vzorku, bylo nutné přidat sloupec posunu d [mm], ve kterém byl získaný posun podělen dvěma. Měření posunu se provádí nad podporou kvůli zamezení získání nepřesných hodnot především z důvodu zatlačování podpor do vzorku při zatěžování. Dalším důvodem je snaha o co největší přesnost měření. Jako poslední budou umístěny hodnoty $CMOD$ [mm], viz Obr. 2.2. Na všech buňkách tabulky, kde to bylo nutné, se nastavil formát buňky na matematický formát se čtyřmi desetinnými místy, protože při tak velké množině dat, jakou bude třeba vyhodnocovat, a počtu desetinných míst těchto hodnot je tento formát přehlednější a lépe se v něm orientuje. Po správném seřazení sloupců se sestrojily grafy z veličin F [kN], d [mm] a druhý F [kN], $CMOD$ [mm].



Obr. 2.3 Ukázka diagramu z měření zatížení vs. posun (vybrané zkušební těleso LB_FF19_T7)

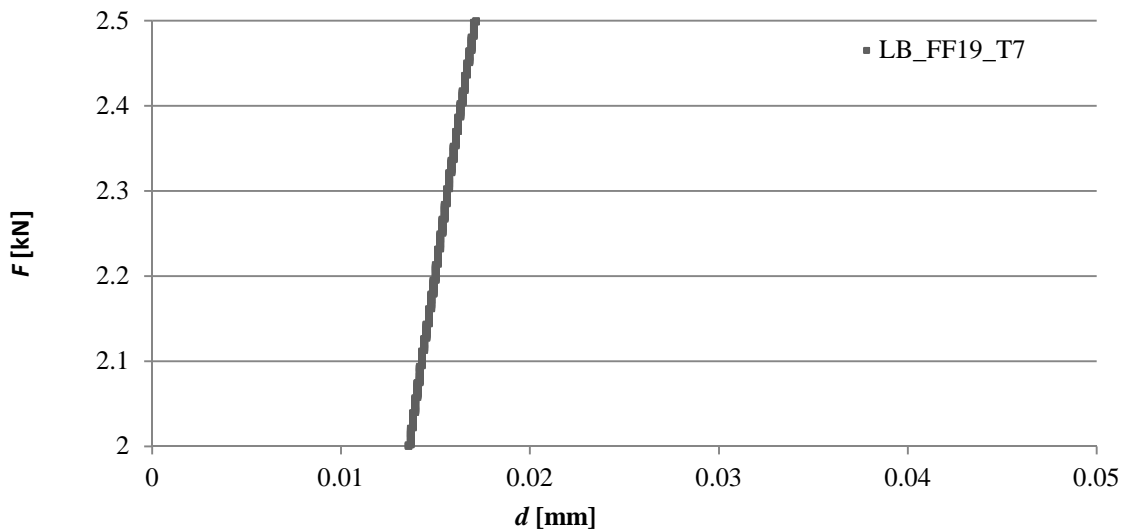


Obr. 2.4 Ukázka diagramu z měření zatížení vs. otevření ústí zářezu (vybrané zkušební těleso LB_FF19_T7)

Následně byla vytvořena kopie tohoto listu z důvodu oddělení výsledků měření vzhledem k závislosti na hodnotě d [mm] – viz Obr. 2.3 nebo $CMOD$ [mm] – viz Obr. 2.4. Tímhle postupem se vytvořila šablona, ze které se vycházelo při zpracování hodnot z konkrétních měření.

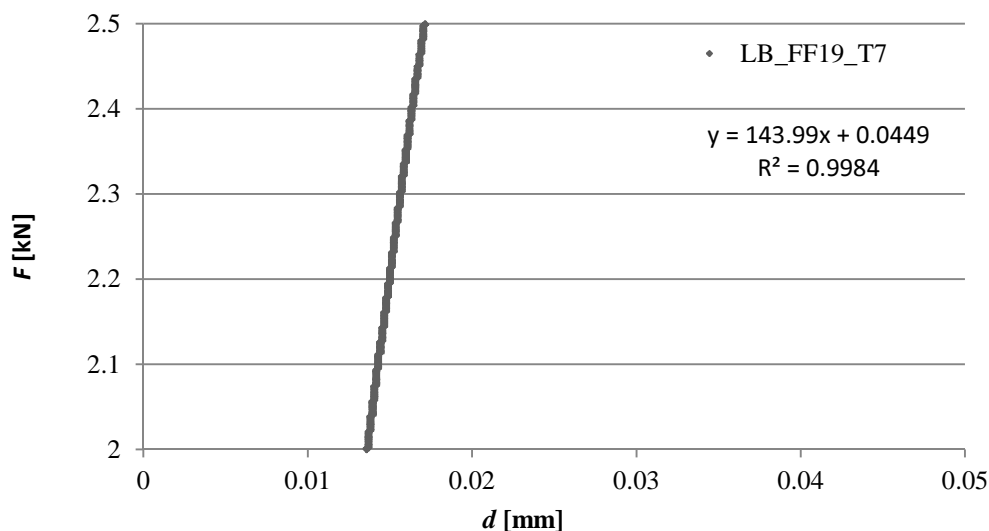
Jednotlivé dokumenty se seskupily do adresářové struktury podle materiálu, kde každý adresář obsahoval soubory k jednotlivým vzorkům.

Při zpracování jednotlivých vzorků se nejdříve vložily naměřené hodnoty do správných sloupců šablony, nastavily se názvy grafů a tak byl připravený dokument k vyhodnocování výsledků. Začalo se analýzou původního grafu, kde se pozornost zaměřila na téměř lineární část grafu nejbližší k počátku – viz Obr. 2.5.



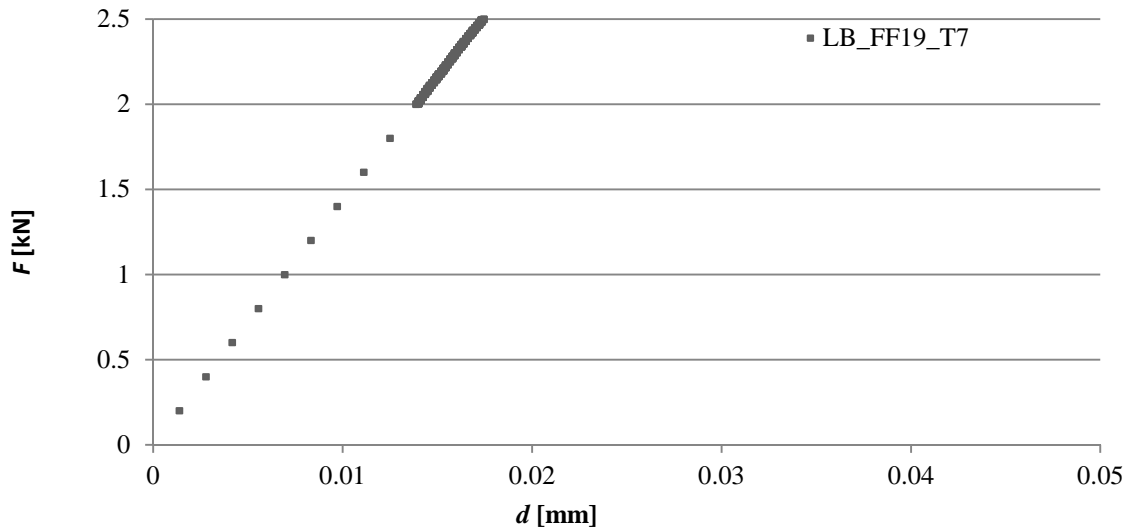
Obr. 2.5 Ukázka postupu výběru téměř lineární části zatěžovacího diagramu

Tohle zpracování se provádělo pomocí změny minima, maxima a měřítka pro jednotlivé osy grafu, čímž se podařilo vizuálně identifikovat lineární část grafu, která jinak nebyla na první pohled zřejmá. Po odfiltrování lineární části se do grafu přidala spojnice trendu se zobrazením hodnoty spolehlivosti R^2 a rovnice regrese (viz Obr. 2.6), která se pak zapsala do předem připravené tabulkové struktury a tím se vypočítala hodnota, o kterou se mají posunout hodnoty d [mm] a $CMOD$ [mm] – v závislosti na tom, který graf se vyhodnocuje.



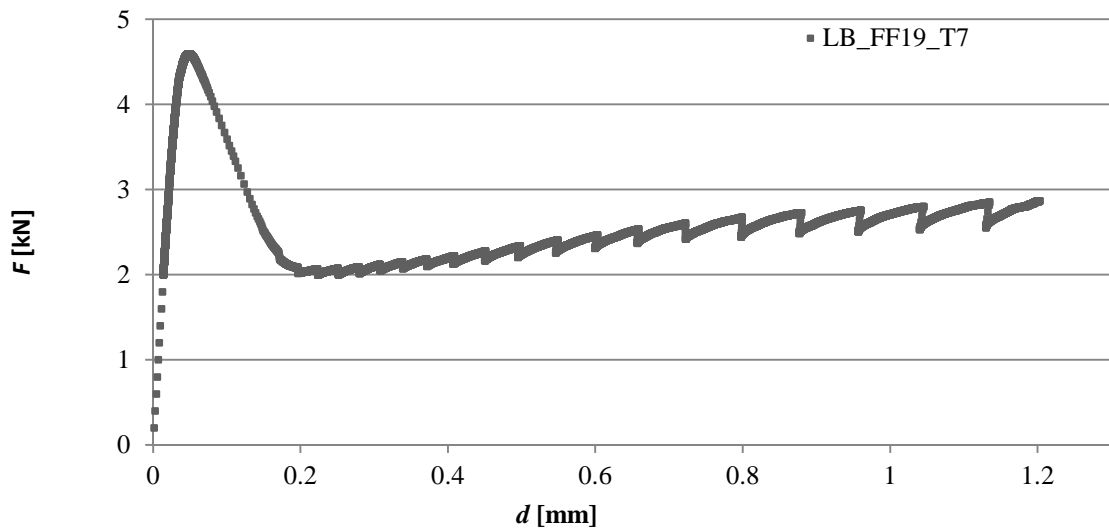
Obr. 2.6 Proložení téměř lineární úvodní části diagramu regresní přímkou

Tímto postupem byl u grafu korigován počátek souřadné soustavy. Je však nutné přidat do tabulky pomocné body, které nahradí hodnoty v počáteční části grafu – viz Obr. 2.7.



Obr. 2.7 Ukázka naladění počátku souřadné soustavy zatěžovacího diagramu

Tyhle úpravy se vykonaly na obou listech s tím rozdílem, že při prvním grafu se nahradily hodnoty ze sloupce d [mm] a v druhém ze sloupce $CMOD$ [mm].



Obr. 2.8 Ukázka konečné podoby grafu pro další vyhodnocení

3 APLIKACE LOMOVÉHO MODELU „DVOJÍ-K“

Metodika stanovení lomových parametrů modelu „dvojí-K“ byla vyvinuta jako alternativa experimentálního přístupu, při kterém se zaznamenává odezva tělesa ve zmíněném P - $CMOD$ diagramu. Autorka práce se podílela na vyhodnocení řady lomových experimentů pomocí zmíněného modelu [3, 4]. V postupu se vyžaduje numerické určení kohezivní složky faktoru intenzity napětí K_{lc}^c , která může být vykládána jako zvýšení odolnosti proti šíření trhliny způsobené přemostováním kameniva v tzv. lomové procesní zóně. Při znalosti hodnoty lomové houževnatosti K_{lc}^{un} lze pak vyčíslit tzv. iniciační složku faktoru intenzity napětí K_{lc}^{ini} [5]. Vztah uvedených parametrů vyjadřuje následující výraz:

$$K_{lc}^{un} = K_{lc}^{ini} + K_{lc}^c. \quad (3.1)$$

3.1 Stanovení lomové houževnatosti K_{lc}^{un}

Lomová houževnatost K_{lc}^{un} je definována jako kritická hodnota faktoru intenzity napětí na kořeni efektivní trhliny odpovídající maximálnímu zatížení P_{max} . Pro určení tohoto parametru lze použít následující výraz známý z teorie lineární elastické lomové mechaniky:

$$K_{lc}^{un} = \frac{M_{max}}{W} \sqrt{a_c} F_1(\alpha_{ck}), \text{ kde } \alpha_{ck} = \frac{a_c}{D}, \quad (3.2)$$

$$M_{max} = \frac{(qL + P_{max})S - \frac{1}{2}qL^2}{4}, \quad (3.3)$$

$$F_1(\alpha_{ck}) = \frac{1,99 - \alpha_{ck}(1 - \alpha_{ck})(2,15 - 3,93\alpha_{ck} + 2,7\alpha_{ck}^2)}{(1 + 2\alpha_{ck})(1 - \alpha_{ck})^{3/2}}, \quad (3.4)$$

kde maximální zatížení P_{max} a kritická délka efektivní trhliny a_c jsou vstupními parametry získanými z naměřených P - $CMOD$ diagramů, D , L , S jsou rozměry tělesa podle Obr. 2.1, q je vlastní tíha tělesa a W je průřezový modul daný vztahem $W = 1/6BD^2$.

K vyřešení rovnice (3.4) je nutné spočítat kritickou délku efektivní trhliny a_c odpovídající maximálnímu zatížení P_{max} , a to např. z následující rovnice:

$$CMOD_c = \frac{P_{max}Sa_c}{WE} V_1(\alpha_c), \text{ kde } \alpha_c = \frac{a_c + H_0}{D + H_0}, \quad (3.5)$$

$$V_1(\alpha_c) = 0,76 - 2,28\alpha_c + 3,87\alpha_c^2 - 2,04\alpha_c^3 + \frac{0,66}{(1-\alpha_c)^2}, \quad (3.6)$$

kde $CMOD_c$ je kritické otevření ústí trhliny při maximálním zatížení P_{max} , E je modul pružnosti a H_0 reprezentuje tloušťku břitu pro opření svorky držáku extenzometru (v našem případě bylo uvažováno $H_0 = 2,25$ mm).

3.2 Stanovení kohezivní složky lomové houževnatosti K_{Ic}^c

Ke stanovení hodnoty K_{Ic}^c je nutno přijmout předpoklad o rozložení kohezivního napětí σ podél fiktivní trhliny. Obecně se v modelech kohezivní trhliny definuje toto napětí v závislosti na rozevření líců trhliny w jako tzv. funkce tahového změkčení $\sigma(w)$.

Z důvodu zjednodušení se v modelu „dvojitá-K“ uvažuje lineární rozložení kohezivního napětí po délce efektivní trhliny, přičemž se současně předpokládá lineární průběh samotného rozevření líců trhliny po její délce. Pro kritickou hodnotu zatížení P_{max} , kdy se šíření trhliny stává nestabilním, tak postačuje stanovit tzv. kritické otevření trhliny $CTOD_c$ ve vrcholu zářezu:

$$CTOD_c = CMOD_c \left(\left(1 - \frac{a_0}{a_c} \right)^2 + \left(1,081 - 1,149 \frac{a_c}{D} \right) \left(\frac{a_0}{a_c} - \left(\frac{a_0}{a_c} \right)^2 \right) \right)^{1/2}. \quad (3.7)$$

Následně lze jednoduše formulovat vlastní lineární funkční předpis pro průběh kohezivního napětí po délce efektivní trhliny např. v podobě

$$\sigma(x) = \sigma(COD) + \frac{x - a_0}{a_c - a_0} (f_t - \sigma(COD)), \quad (3.8)$$

kde

$$0 \leq COD \leq CTOD_c \text{ a } a_0 \leq x \leq a_c. \quad (3.9)$$

Označení $\sigma(COD)$ zde představuje hodnotu kohezivního napětí při rozevření trhliny COD . Tuto hodnotu lze odečíst z funkce tahového změkčení. Pro potřeby tohoto textu byla uvažována lineární funkce tahového změkčení a hodnotu $\sigma(COD)$ lze potom získat pomocí následujícího vztahu:

$$\sigma(COD) = \frac{f_t (w_c - COD(x))}{w_c}, \quad (3.10)$$

kde tahová pevnost f_t a maximální otevření trhliny w_c jsou parametry funkce tahového změkčení. Hodnota w_c odpovídá hodnotě kritického otevření trhliny $CTOD_c$. Hodnota tahové pevnosti je odhadována ze změřené hodnoty tlakové pevnosti f_c dle následujícího vztahu:

$$f_t = 0,55\sqrt{f_c}. \quad (3.11)$$

Hodnotu rozevření trhliny COD v místě x lze určit dle vztahu:

$$COD(x) = CMOD_c \left(\left(1 - \frac{x}{a_c} \right)^2 + \left(1,081 - 1,149 \frac{a_c}{D} \right) \left(\frac{x}{a_c} - \left(\frac{x}{a_c} \right)^2 \right) \right)^{1/2}. \quad (3.12)$$

Jakmile je známo rozložení kohezivního napětí podél efektivní trhliny, lze vyčíslit hodnotu kohezivní složky lomové houževnatosti numerickou integrací:

$$K_{Ic}^c = \int_{a_0/a_c}^1 \frac{2\sqrt{a_c}}{\sqrt{\pi}} \sigma(U) F(U, V) dU, \quad (3.13)$$

kde

$$F(U, V) = \frac{3,52(1-U)}{(1-V)^{3/2}} - \frac{4,35-5,28U}{(1-V)^{1/2}} + \left(\frac{1,30-0,30U^{3/2}}{(1-U^2)^{1/2}} + 0,83-1,76U \right) \cdot [1-(1-U)V]. \quad (3.14)$$

Ve výrazu (3.13), resp. (3.14) jsou použity substituce $U = x/a_c$ a $V = a_c/D$, a označení $\sigma(U)$ představuje funkci rozložení kohezivního napětí definovanou pro proměnnou U podle vztahů (3.8–3.9) a $F(U, V)$ charakterizuje Greenovu funkci. Pro vyčíslení integrálu (3.13) byla v příspěvku [2] použita metoda vícenásobné numerické integrace po částech pomocí Gaussovy kvadratury.

Podle následujícího vztahu lze pak určit hodnotu zatížení P_{ini} , kterou lze definovat jako úroveň zatížení, od které se začíná trhlina stabilně šířit:

$$P_{ini} = \frac{4WK_{Ic}^{ini}}{SF_1(\alpha_0)\sqrt{a_0}}, \quad (3.15)$$

kde

$$F_1(\alpha_0) = \frac{1,99 - \alpha_0(1 - \alpha_0)(2,15 - 3,93\alpha_0 + 2,7\alpha_0^2)}{(1 + 2\alpha_0)(1 - \alpha_0)^{3/2}}. \quad (3.16)$$

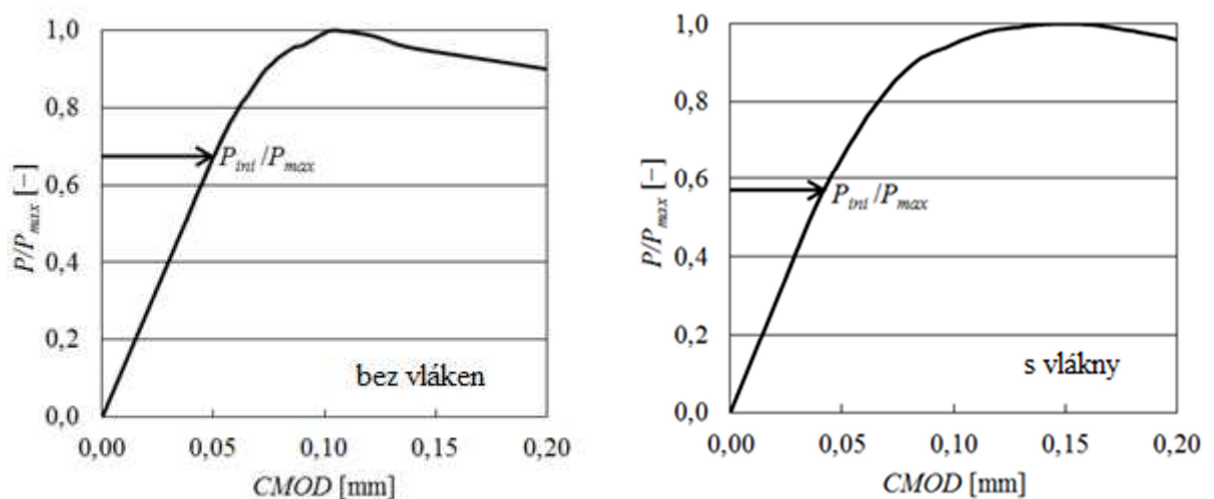
4 VYHODNOCENÍ LOMOVÝCH EXPERIMENTŮ

4.1 Vyhodnocení pomocí aplikace lomového modelu „dvojitá-K“

Jako vstupní data pro vyhodnocení pomocí aplikace lomového modelu „dvojitá-K“ byly použity rozměry vzorků D [mm], B [mm], S [mm], L [mm], a_0 [mm]. Dalším vstupem byla hmotnost vzorku m [mm] a tloušťka břitu držáku svorky extenzometru H_0 [mm]. Mezi poslední vstupní data patří zatížení a otevření ústí trhliny (iniciační a kritické) P_i [mm], $CMOD_i$, P_{max} [mm], $CMOD_c$ [mm] a tlaková pevnost f_c [mm].

Po vyhodnocení výpočtů pomocí uvedeného modelu „dvojitá-K“ se získají výstupní data, mezi která patří lomová houževnatost K_{Ic}^{III} [MPa(m)^{1/2}], kohezivní složka lomové houževnatosti K_{Ic}^c [MPa(m)^{1/2}], iniciační složka faktoru intenzity napětí K_{Ic}^{ini} [MPa(m)^{1/2}] a úroveň zatížení P_{ini} [kN], od kterého se začíná z počátečního zářezu trhlina stabilně šířit.

Z vypočtených hodnot [5] iniciační složky faktoru intenzity napětí K_{Ic}^{ini} byly dle rovnice (3.15) dopočítány hodnoty úrovně zatížení P_{ini} , při které dochází ke startu stabilního šíření trhliny. Na Obr. 4.1 jsou uvedeny P – $CMOD$ diagramy pro vybraná tělesa bez vláken a s vlákny vynesené v relativních hodnotách zatížení, ve kterých je zaznačen i poměr P_{ini}/P_{max} , tj. poměr síly, při které se začne trhlina stabilně šířit, k maximální dosažené síle. Získané poměry byly pro oba druhy betonu, jak s vlákny, tak bez vláken, také statisticky vyhodnoceny, tedy byl spočítán aritmetický průměr \bar{x} , výběrová směrodatná odchylka s a variační koeficient v_x .



Obr. 4.1 P – $CMOD$ diagramy (detail). Pro vybraná tělesa bez vláken(vlevo) a s vlákny(vpravo) [5]

4.2 Vyhodnocení pomocí modelu efektivní délky trhliny

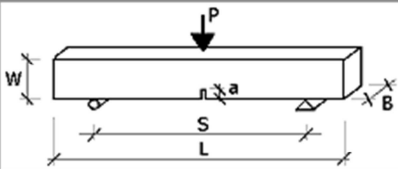
Dalším způsobem, jak vyhodnotit údaje pro tuto práci, bylo využití programu StiCrack, který funguje v internetovém prohlížeči Internet Explorer. Po zadání internetové adresy se objeví tabulka, do které se zadaly základní rozměry jednotlivých těles (obr. 4.2) – jak pro vzorky z obyčejného betonu, tak i pro vzorky z lehkého betonu (u obou betonů opět i pro vzorky s vlákny i bez vláken). Po odeslání dat ke zpracování se objeví vypočítané veličiny a zatěžovací diagramy.

Pro doplnění byl připraven export dat ze všech zpracovaných excelových souborů do formátu pro zpracování aplikací StiCrack. Tenhle program vyžaduje seřazení hodnot do txt souboru, kde se hodnoty oddělily tabulátorem. Tohle oddělení nebylo nutné nějak speciálně nastavovat, protože Microsoft Excel používá tabulátor jako oddělovač při standardním kopírování z tohoto programu. Nejdřív bylo však nutné zkopírovat vybraná data do prázdného dokumentu, kde se hodnoty seřadily, nastavil správný formát buněk a až pak vykopírovaly do textového souboru. Do prvního sloupce se umístily hodnoty času t [s], ve druhém sloupci síla F [kN] a ve třetím posun (průhyb uprostřed rozpětí) d [mm]. Formát hodnot se nastavil tak, aby desetinná čísla byla oddělena tečkou (mezinárodní formát) a ne čárkou (český standard), protože programy používají mezinárodní číselný formát. Takhle připravená data se použila při zpracování ve zmíněném programu StiCrack, který bylo možné najít na internetové adrese <http://ashtray.jz.gts.cz/~smsti/StiCrack.php?type=3PB>.

Po úspěšném vygenerování všech textových dokumentů připravených pro zpracování je nutné nastavit vstupní parametry pro měření – viz Obr. 4.2. Pro každé vyhodnocování se vyplní rozměry jednotlivých vzorků: výška vzorku W [mm], délka vzorku L [mm], šířka vzorku B [mm], vzdálenost podpěr S [mm], která je pro všechny vzorky stejná, a hloubka zářezu a [mm]. Dalšími vstupními parametry, které se musejí zadat, jsou vlastní tíha jednotlivých vzorků [kg] a jako poslední vložíme příslušný textový dokument.

Výsledkem zpracování těchto údajů je tabulka hodnot a příslušné zobrazení v podobě dvou grafů – viz Obr. 4.3. V těchto údajích můžeme najít například hodnoty lomové houževnatosti, lomové práce anebo modulu pružnosti.

V dalších výsledcích tyto hodnoty nebyly použity. Níže uvedené grafy shrnují výsledky získané dříve popsaným modelem „dvojitá K “.



Notes:

Put down

- Load-deflection diagram data files
- or
- Data from Load-deflection diagram

*1 leave blank for autoscale
*2 format conforming to scanf() function from c library. Defaults to %lf%lf%lf (time, load and deflection are in one file) or %lf%*2s%lf (time/load and time/deflections are in separated files)

SPECIMEN SIZE

W = [mm] B = [mm]
L = [mm] S = [mm]
a = [mm]

MATERIAL CHARACTERISTICS

Self-weight [kg, kg/m³]
stren1 R = [MPa]
Young's modulus E = [GPa]

LOAD DEFLECTION DIAGRAM FILES

View*1 d-axis from 0 to [mm]
View*1 P-axis from 0 to [N, kN]
Format of data file*2

kN mm Compute descending branch

C:\Users\Viki\Desktop\Škola\BP\LB\LB_ Prehľadávať...
 Prehľadávať...

LOAD DEFLECTION DIAGRAM DATA

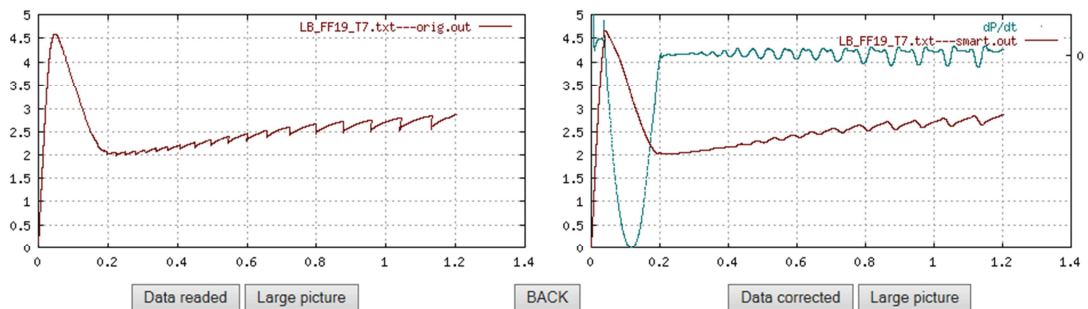
P_i = [kN] P_{max} = [kN]
d_i = [mm] d_{pmax} = [mm]

Obr. 4.2 Zadávací obrazovka programu StiCrack

[Get Latex source](#)

File1	File2	W	B	S	L	a	m	a _e	a _e - a	a/W	a _e /W	E	P _{max, m}	d _{pmax}
		mm	mm	mm	mm	mm	kg	mm	mm	mm	mm	GPa	kN	mm
LB_FF19_T7.txt	-	99	101	300	400	32	7	39,44	7,443	0,3232	0,3984	25,79	4,654	0,04

K _{Ic}	K _{Ic,e}	B	B _e	G _c	G _{c,e}	G _{F1,m}	G _{F,m}	W _{F1,m}	W _{F,m}
MPa.m ^{1/2}	MPa.m ^{1/2}	-	-	J/m ²	J/m ²	J/m ²	J/m ²	N.m	N.m
0,7094	0,8662	-0,118	-0,0287	19,52	29,09	15,7	457,1	0,106	3,09

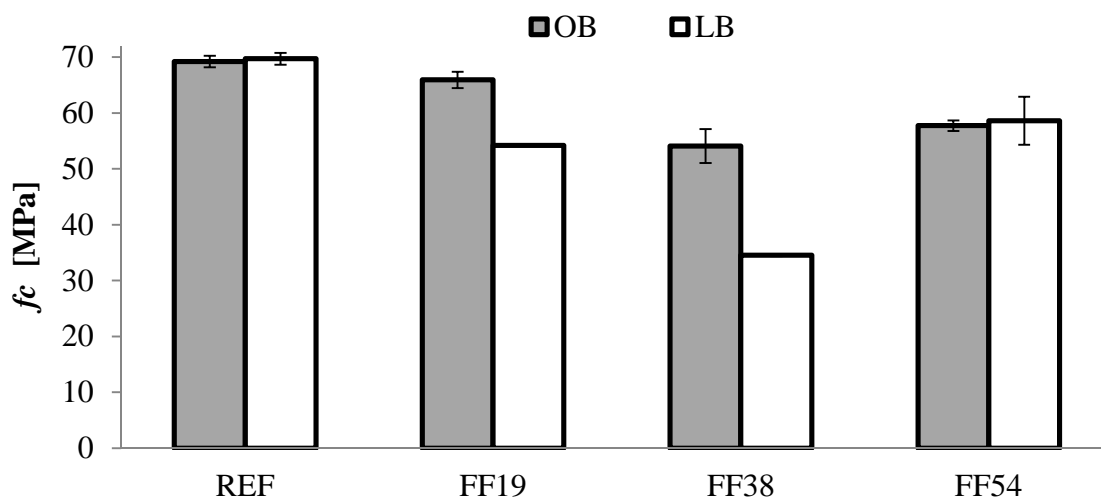


Obr. 4.3 Výsledné informace z programu StiCrack

5 SHRNU TÍ VÝSLEDKŮ

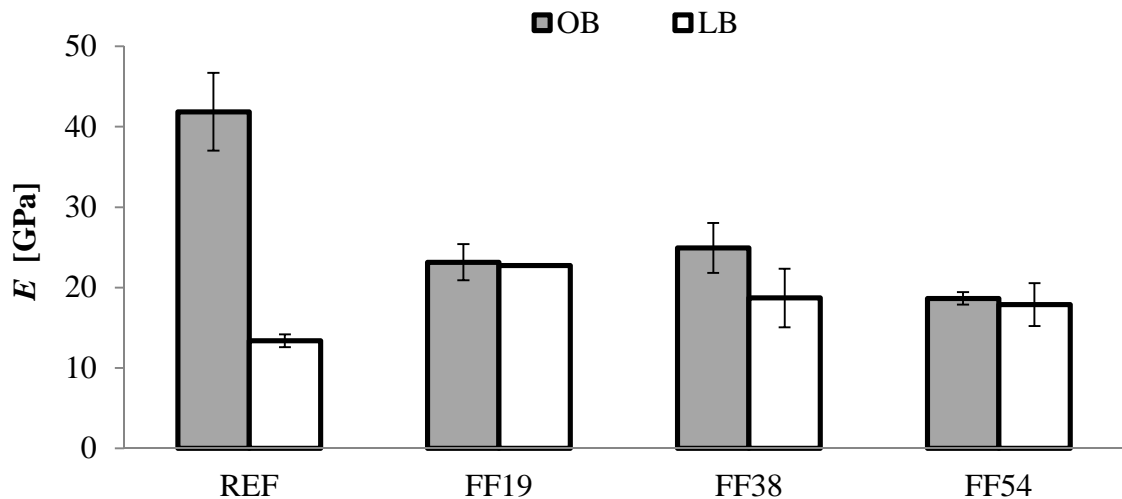
Výsledky vyhodnocení lomových experimentů pomocí modelu „dvojí K “ jsou shrnuty v následujících grafech a porovnány u jednotlivých veličin pro lehký i pro obyčejný beton, pro kompozity s vlákny délky 19, 38 a 54 mm nebo pro referenční betony bez vláken.

U pevnosti v tlaku – viz Obr. 5.1 – je vidět, že nejvyšší hodnoty dosahuje lehký beton referenční (bez vláken) a za ním s velmi malým rozdílem je obyčejný beton referenční. Nejnižších hodnot dosahuje lehký beton s vlákny, kdy přidání vláken vedlo k poklesu hodnot 16 % až 51 %. Přítomnost vláken v obyčejném betonu vede k poklesu hodnot z 5 % na 22 % ve srovnání s referenčním betonem.



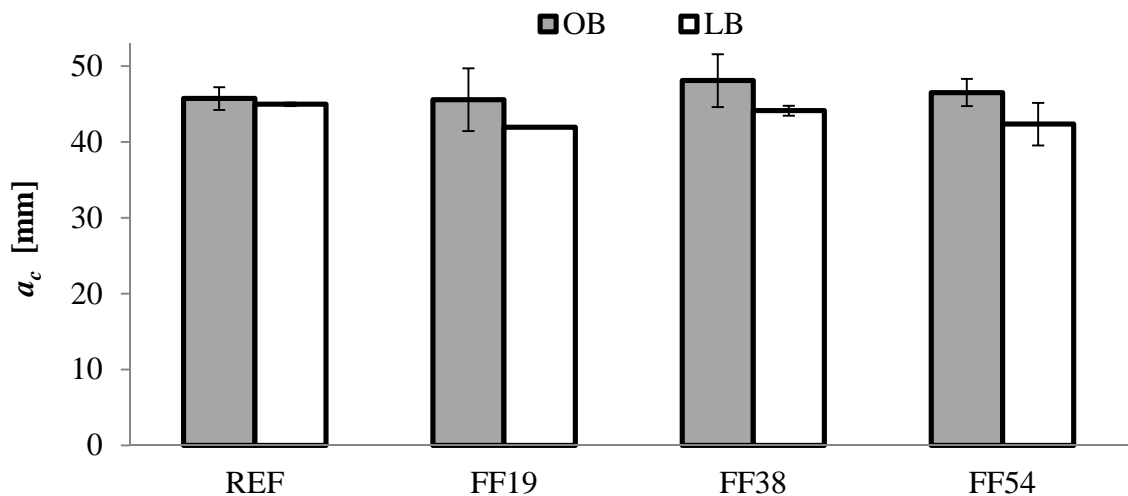
Obr. 5.1 Pevnost v tlaku f_c [MPa]

Hodnoty modulu pružnosti – viz Obr. 5.2 – u obyčejného betonu se značně snižují přidáním vláken – o 41 % až 55 % – a u lehkého betonu hodnoty taktéž poklesly přidáním vláken – o 34 % až 70 % – ve srovnání s referenčním betonem. Nejvyšších hodnot dosahuje referenční obyčejný beton. Pokud by se porovnávaly dosažené hodnoty na vzorcích z betonu s vlákny, nejvyšší hodnoty by dosahoval obyčejný beton s vlákny délky 38 mm viz Obr. 5.2.



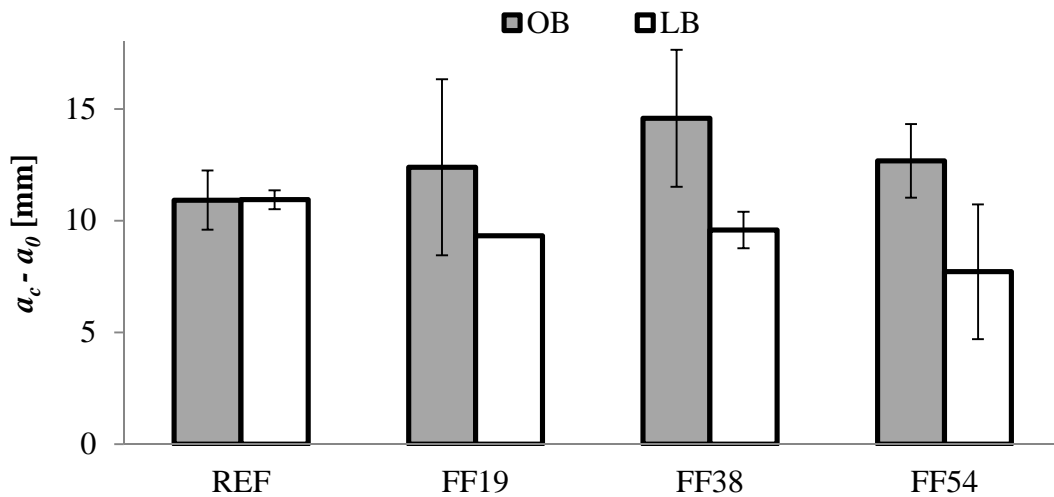
Obr. 5.2 Modul pružnosti E [GPa]

Při porovnání hodnot efektivní délky trhliny a_c je u obyčejného betonu vidět, že hodnoty jsou pro kompozity s vlákny o 14–34 % vyšší ve srovnání s referenčním betonem. U vzorků z lehkého betonu s vlákny byly výsledky sníženy o 13–30 % – viz Obr. 5.3.



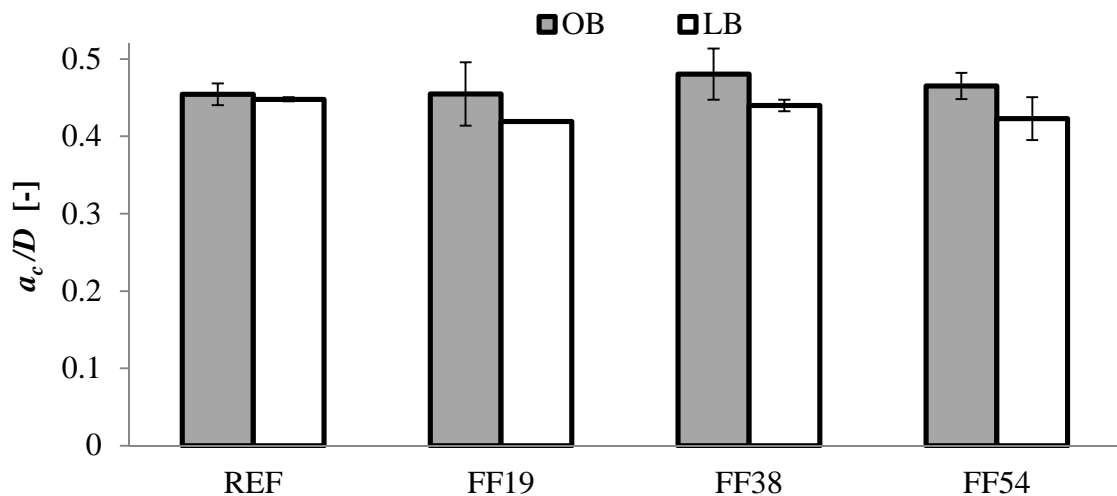
Obr. 5.3 Efektivní délka trhliny a_c [mm]

Hodnoty efektivního prodloužení trhliny vyšly vyšší u vzorků z obyčejného betonu – viz Obr. 5.4. V tomto případě u vzorků z referenčního betonu byly hodnoty nižší než u vzorků s vlákny 38 a 54 mm, zatímco u lehkého betonu tomu bylo naopak. Referenční beton měl vyšší hodnoty této veličiny než beton s vlákny.



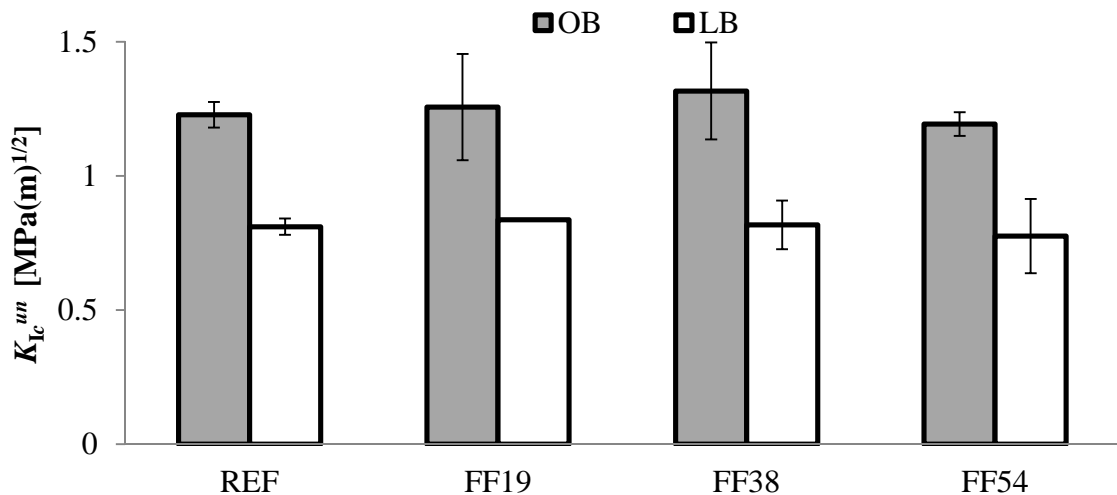
Obr. 5.4 Efektivní prodloužení trhliny $a_c - a_0$ [-]

U poměru hodnot a_c / D vyšly hodnoty u obyčejného betonu a u lehkého betonu obdobně. U obyčejného betonu vyšly oproti lehkému betonu tyto hodnoty mírně vyšší ve vzorcích obsahujících vlákna – viz Obr. 5.5.



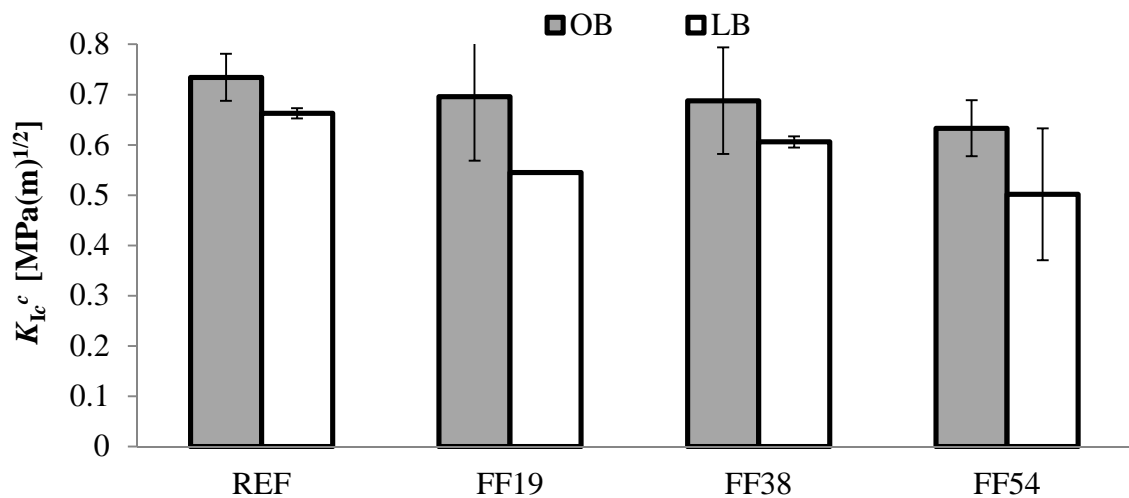
Obr. 5.5 Poměr a_c / D [-]

Lomové houževnatosti K_{Ic}^{un} dosáhly u vzorků z obyčejného betonu vyšších hodnot než u vzorků z lehkého betonu. Přítomnost vláken nemá na výsledné hodnoty významný účinek – viz Obr. 5.6.



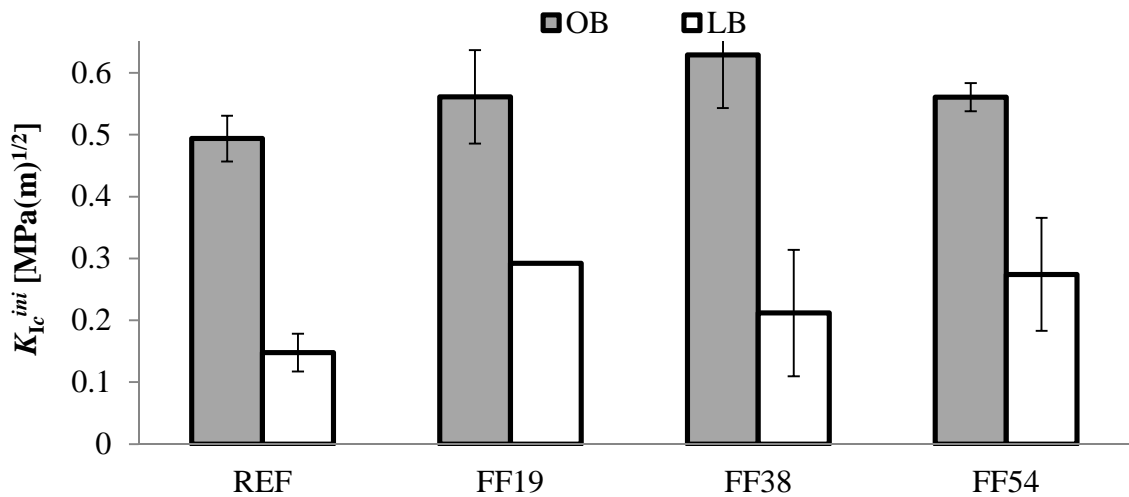
Obr. 5.6 Lomová houževnatost K_{Ic}^{un} [MPa(m)^{1/2}]

Výsledky kohezivní houževnatosti K_{Ic}^c vyšly u všech těles z obyčejného betonu s podobnými hodnotami. Na vzorcích z lehkého betonu byly naměřeny hodnoty nižší – viz Obr. 5.7.



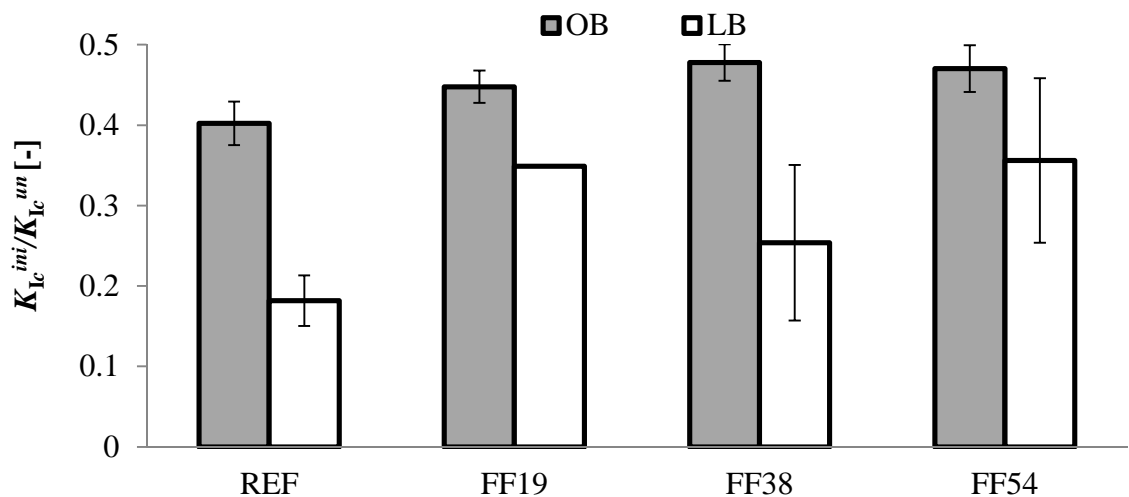
Obr. 5.7 Kohezivní houževnatost K_{Ic}^c [MPa(m)^{1/2}]

Z výsledků iniciační houževnatosti K_{Ic}^{ini} je vidět, že nejvyšších hodnoty dosahuje obyčejný beton. Ve vzorcích, ve kterých byla použita vlákna, je vidět, že hodnoty jsou vyšší než u referenčního betonu. Kompozity vyrobeny z lehkého betonu dosahují ztatečně nižších hodnot než vzorky z obyčejného betonu. V lehkém betonu vlákna obdobně zlepšují vlastnosti – viz Obr. 5.8



Obr. 5.8 Iniciační houževnatost K_{Ic}^{ini} [MPa(m)^{1/2}]

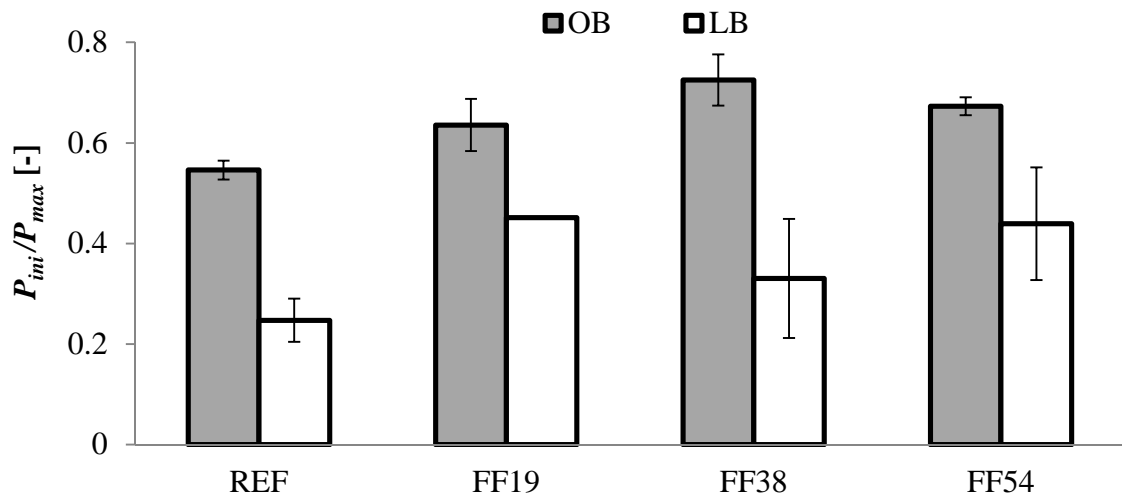
Hodnoty poměru K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} jsou u obyčejného betonu vyšší než u lehkého. Přítomnost vláken u obou případů zvyšuje naměřené hodnoty. Jenom v případě lehkého betonu s vlákny délky 38 mm se výsledky při velké proměnlivosti pohybují i v nižších hodnotách než výsledky u lehkého betonu referenčního, tedy bez vláken, viz Obr. 5.9.



Obr. 5.9 Poměr K_{Ic}^{ini}/K_{Ic}^{un} [-]

Porovnáním hodnot poměru P_{ini}/P_{max} je zřejmé, že vyšší hodnoty byly naměřeny u obyčejného než u lehkého betonu. V nejvyšších hodnotách se pohybují výsledky vzorků

z obyčejného betonu s vlákny délky 38 mm. Vlákná ve všech případech zvyšují hodnoty poměru P_{ini}/P_{max} – viz Obr. 5.10.



Obr. 5.10 Poměr P_{ini}/P_{max} [-]

ZÁVĚR

V této práci byly prezentovány vybrané výsledky lomových zkoušek tříbodového ohybu na tělesech z betonů bez vláken a s polypropylenovými vlákny získané pomocí modelu „dvojitá-K“.

Závěr lze rozdělit do tří částí. První se týká hodnocení obyčejného betonu (OB), druhá souvisí s hodnocením lehkého betonu (LB) a třetí je shrnující – celkové porovnání OB a LB betonů.

Přítomnost polypropylenových vláken v OB vede k poklesu hodnot pevnosti v tlaku o 5 % až 22 % oproti referenčnímu betonu. Také hodnoty modulu pružnosti byly sníženy o 41 % až 55 %. Efektivní prodloužení trhliny pro kompozity s vlákny vyšlo o 14–34 % vyšší ve srovnání s referenčním betonem. Přítomnost vláken nemá významný účinek na hodnoty lomové houževnatosti (kompozit OB_FF38 ukazuje největší relativní nárůst hodnot této veličiny, což bylo asi 7 %). Pokud jde o odolnost proti stabilnímu šíření trhlin, přidání vláken se jeví jako pozitivní. Nejvyšší relativní nárůst této odolnosti, asi 19 %, byl zaznamenán u betonu OB_FF38.

V případě LB přítomnost polypropylenových vláken vede k poklesu hodnot pevnosti v tlaku o 16 až 51 % oproti referenčnímu betonu a ke zvýšení modulu pružnosti 34 až 70 %. Efektivní prodloužení trhlin u kompozitních materiálů s vlákny vyšlo nižší o 13 až 30 %. Obdobně jako u OB neměla přítomnost vláken významný vliv na hodnoty lomové houževnatosti (největší relativní pokles vykázal kompozit LB_FF54 – asi o 4 %) a odolnost proti stabilnímu šíření trhlin se opět ukázala pro kompozity s přídavkem vláken jako pozitivní – nejvyšší relativní nárůst (asi 96 %) byl zaznamenán pro beton LB_FF54.

Pro oba testované betony přidání vláken zvýšilo odolnost proti stabilnímu šíření trhliny. Pro obyčejný beton vyšla hodnota K_{Ic}^{ini} vyšší, obecně ale vlákna výrazně nezvýšila odolnost proti šíření trhlin. Naproti tomu u lehkých betonů vyšla sice hodnota K_{Ic}^{ini} nižší, ale přídavek vláken vhodné délky podstatně zvýšil odpor proti šíření trhlin (až dvakrát).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

Literatura a normy

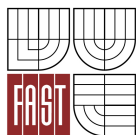
1. ČSN EN 14651+A1: Zkušební metoda betonu s kovovými vlákny – Měření pevnosti v tahu za ohybu (mez úměrnosti, zbytková pevnost)
2. HAVLÍKOVÁ, Ivana, MAJTÁNOVÁ, Romana Viktória, ŠIMONOVÁ, Hana, LÁNÍK, Jaroslav, KERŠNER, Zbyněk, *Comparison of „double-K“ fracture model results of three-point bending tests of concrete with and without polypropylene fibres*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2012. 8 s. ISBN 978-80-7204-823-6.
3. HAVLÍKOVÁ, Ivana, MAJTÁNOVÁ, Romana, ŠIMONOVÁ, Hana, LÁNÍK, Jaromír, KERŠNER, Zbyněk, *Evaluation of three-point bending fracture tests of concrete specimens with polypropylene fibres via „double-K“ model*, ISBN 978-80-214-4739-4, Brno, Česká republika, 2013
4. HAVLÍKOVÁ, Ivana, ŠIMONOVÁ, Hana, KERŠNER, Zbyněk, *Využití lomového modelu „dvojit-K“ k predikci zatížení na počátku stabilního šíření trhliny u tříbodově namáhaných těles z prostého a vláknového betonu*, příspěvek na konferenci *Juniorstav 2013*, ISBN 978-80-214-4670-0, Brno, Česká republika, 2013
5. HAVLÍKOVÁ, Ivana, ŠIMONOVÁ, Hana, PAIL, Tomáš, KERŠNER, Zbyněk, *Softwarová podpora vyhodnocení lomových testů tříbodovým ohybem a klínovým štípáním modelem „dvojit-K“*. Brno: Ústav fyziky materiálů AV ČR, v.v.i., 2012. 8 s. ISBN 978-80-87434-06-2
6. HAVLÍKOVÁ, Ivana, ŠIMONOVÁ, Hana, PAIL, Tomáš, NAVRÁTILOVÁ, Eva, MAJTÁNOVÁ, Romana, KERŠNER, Zbyněk, *Effect of softening function type in the „double-K“ fracture model for the evaluation of fracture tests on concrete specimens with and without polypropylene fibres*, příspěvek na konferenci *Engineering Mechanics 2013*, ISBN 978-80-87012-47-5, Svratka, Česká republika, 2013
7. KARIHALOO, Bhushan, L., *Fracture Mechanics and Structural Concrete*, Longman, 1995. ISBN 0-582-21582-X



8. KERŠNER, Zbyněk, MATESOVÁ, Dita, *Jak funguje model "dvojitá K" u betonových vzorků*, příspěvek na konferenci *Problémy lomové mechaniky*, ISBN 80-214-1906-7, Ústav stavební mechaniky FAST VUT v Brně a Ústav fyziky materiálů AV ČR, Brno, 2001
9. KUMAR, Shailendra, BARAI, Sudhirkumar V. *Concrete Fracture Models and Applications*. Berlin: Springer, 2011. 262 s. ISBN 978-3-642-16764-5

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

SYMBOL	VÝZNAM	JEDNOTKA
a_0	hloubka počátečního zářezu tělesa	mm
a_c	kritická délka efektivní trhliny	mm
d	posun (průhyb) tělesa	mm
f_c	tlaková pevnost	MPa
m	hmotnost tělesa	kg
q	vlastní tíha tělesa	kN/m
t	čas	s
w	otevření trhliny	mm
w_c	kritická hodnota otevření trhliny	mm
x	délková souřadnice	mm
B	šířka tělesa	mm
$CMOD$	otevření ústí trhliny	mm
$CMOD_c$	kritické otevření ústí trhliny	mm
$CMOD_i$	vybrané otevření ústí trhliny v lineární počáteční části diagramu zatížení vs. $CMOD$	mm
COD	otevření trhliny	
$CTOD_c$	kritické otevření ve vrcholu trhliny	mm
D	výška tělesa	mm
E	statický modul pružnosti	GPa
F	síla, zatížení	N
F_1	funkce geometrie	–
H_0	tloušťka břitu držáku svorky extenzometru	mm
K_{Ic}^c	kohezivní složka lomové houževnatosti (složka faktoru intenzity napětí)	MPa(m) ^{1/2}



K_{Ic}^{ini}	iniciační složka faktoru intenzity napětí	$\text{MPa(m)}^{1/2}$
K_{Ic}^{un}	lomová houževnatost	$\text{MPa(m)}^{1/2}$
L	délka tělesa	mm
P	síla, zatížení	N
P_i	vybrané zatížení v lineární počáteční části diagramu zatížení vs. CMOD	N
P_{ini}	úroveň zatížení, od kterého se začíná z počátečního zářezu trhlina stabilně šířit	N
P_{max}	maximální zatížení	N
R^2	index determinace	–
S	rozpětí podpor (vzdálenost podpěr)	mm
V_1	funkce geometrie	
W	výška tělesa; průřezový modul	mm; m^3
α_c, α_{ck}	relativní hloubka efektivní trhliny	–
α_0	relativní hloubka iniciačního zářezu	–
γ_b	objemová hmotnost betonu	kg/m^3
$\sigma, \sigma(w)$	kohezivní napětí	MPa



SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 – upravené naměřené diagramy

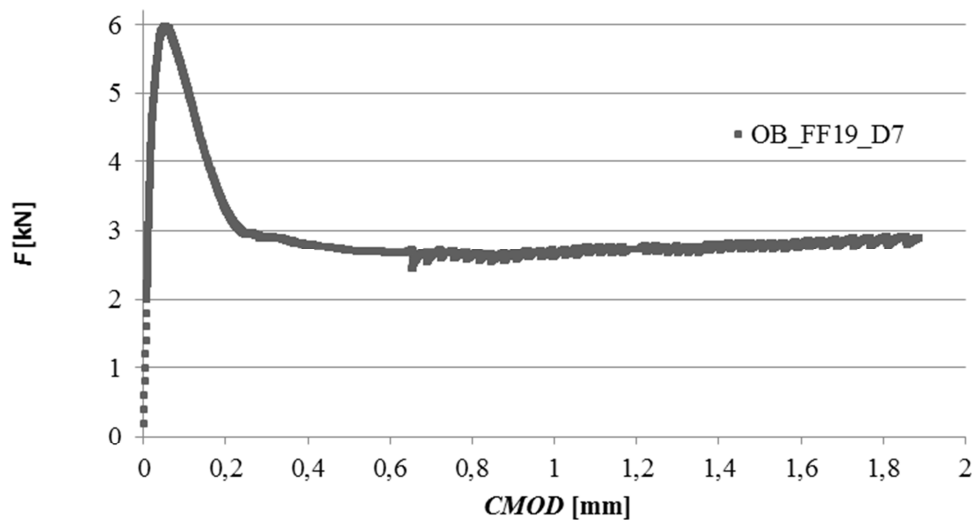
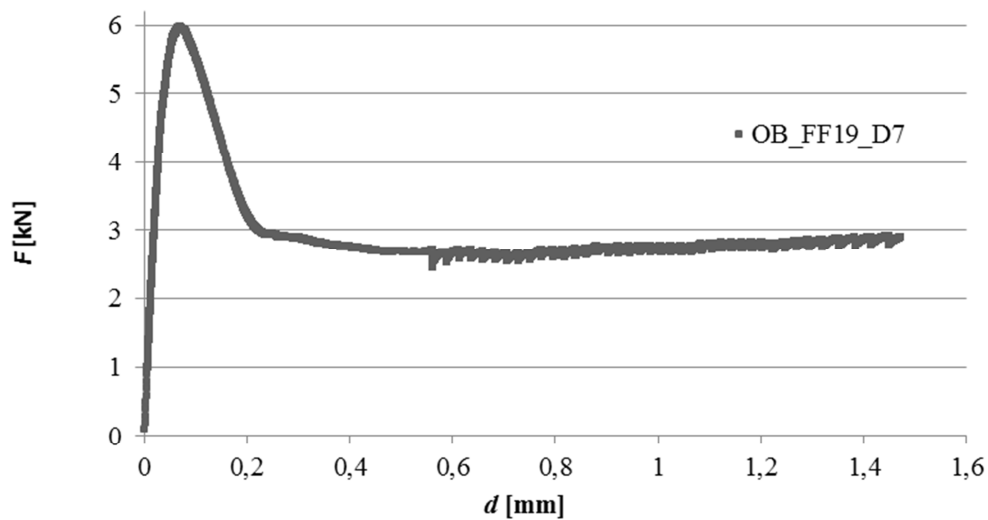
PŘÍLOHA 2 – výsledky vyhodnocení modelem „dvojí- K “

PŘÍLOHA 1 – UPRAVENÉ NAMĚŘENÉ DIAGRAMY

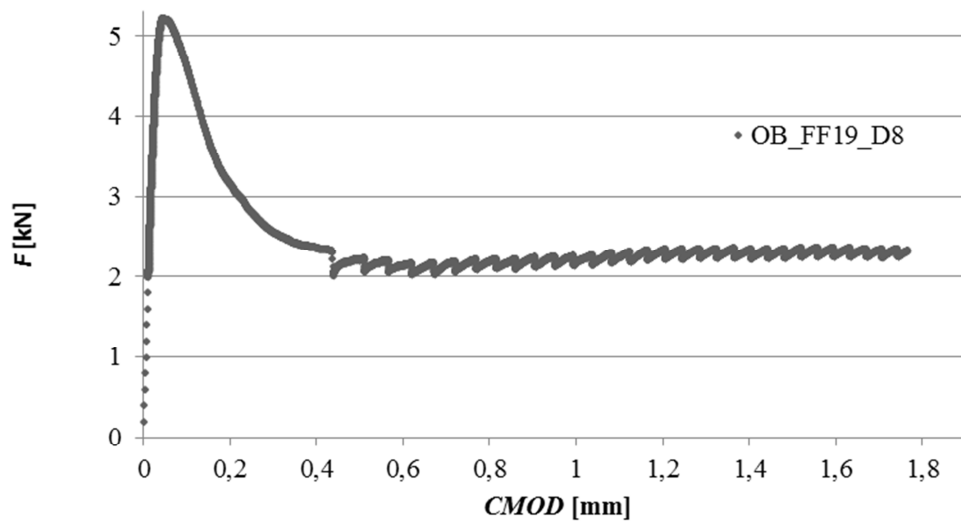
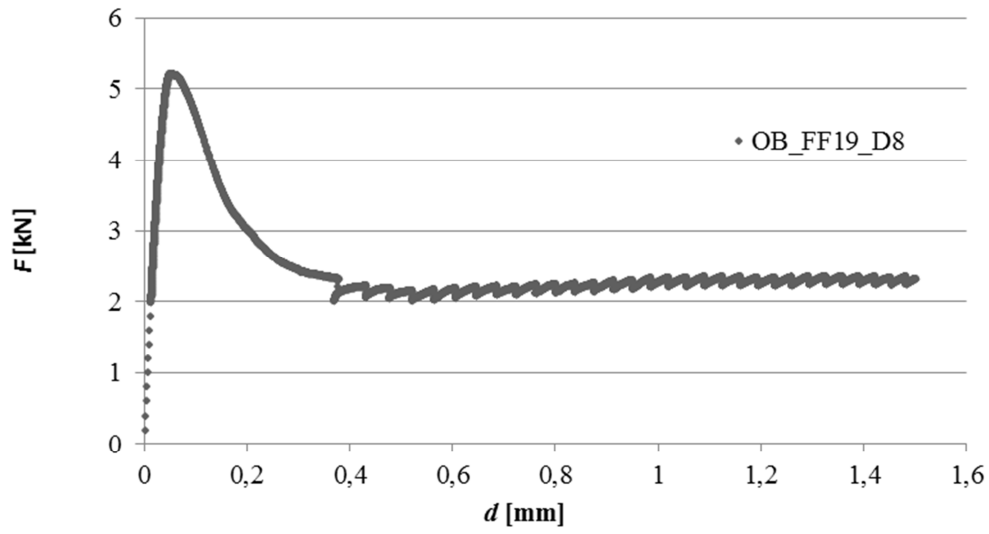
Tato příloha obsahuje upravené naměřené diagramy zatížení vs. posun (průhyb uprostřed rozpětí) a zatížení vs. otevření ústí zářezu pro všechna vyhodnocovaná zkušební tělesa.

Obyčejný beton

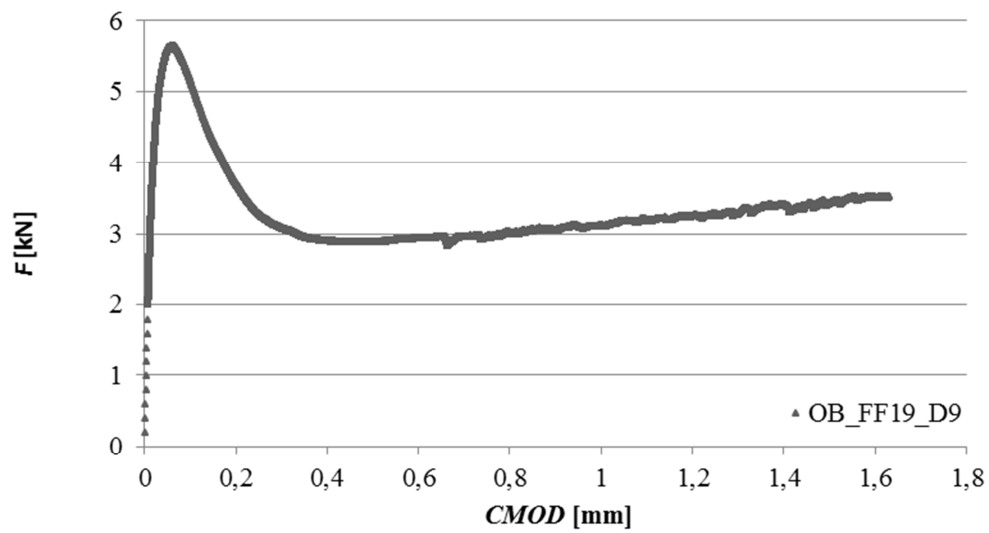
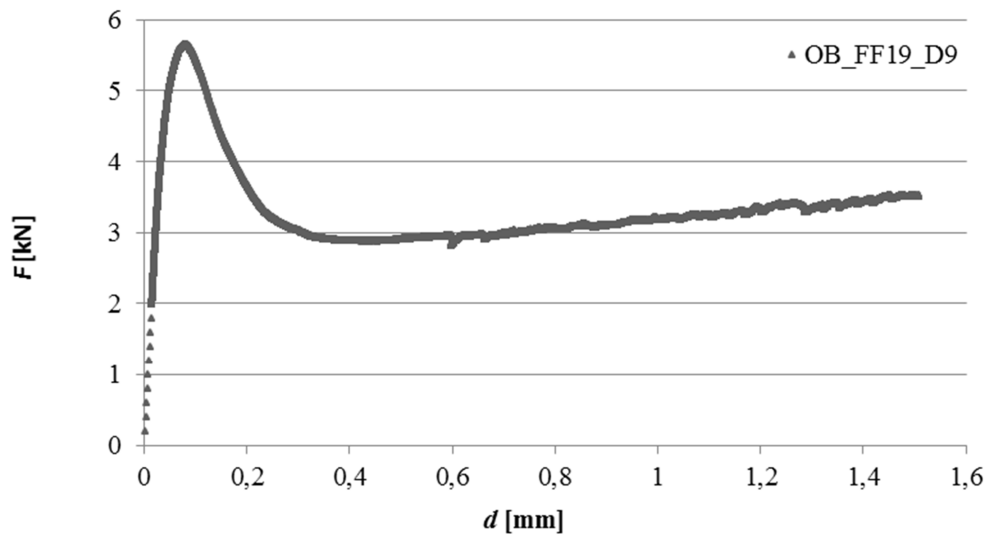
OB FF19 – D7



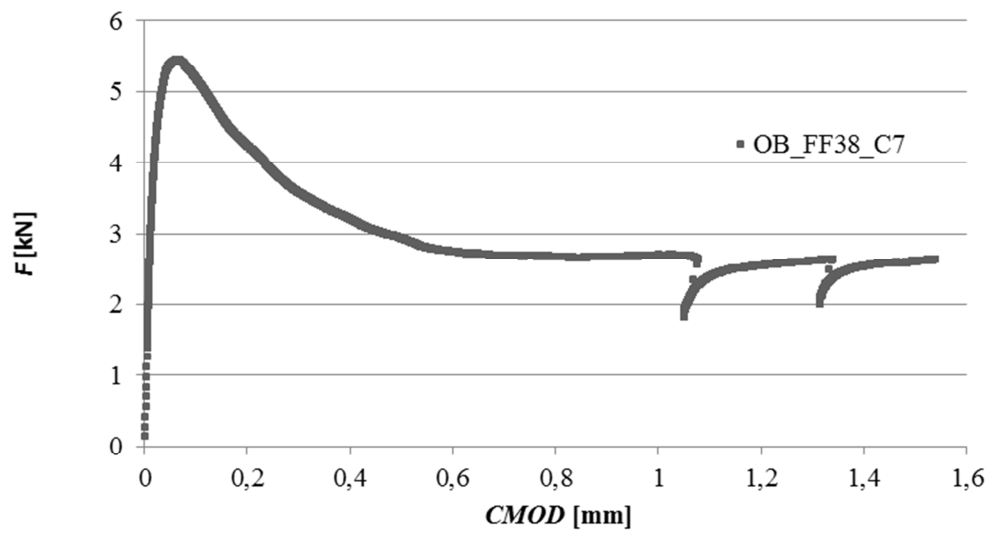
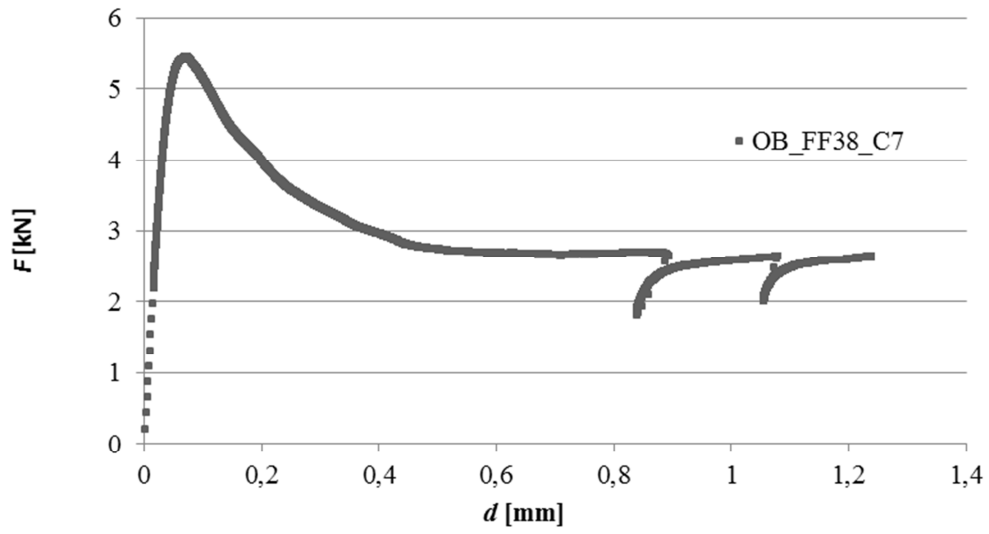
OB FF19 – D8



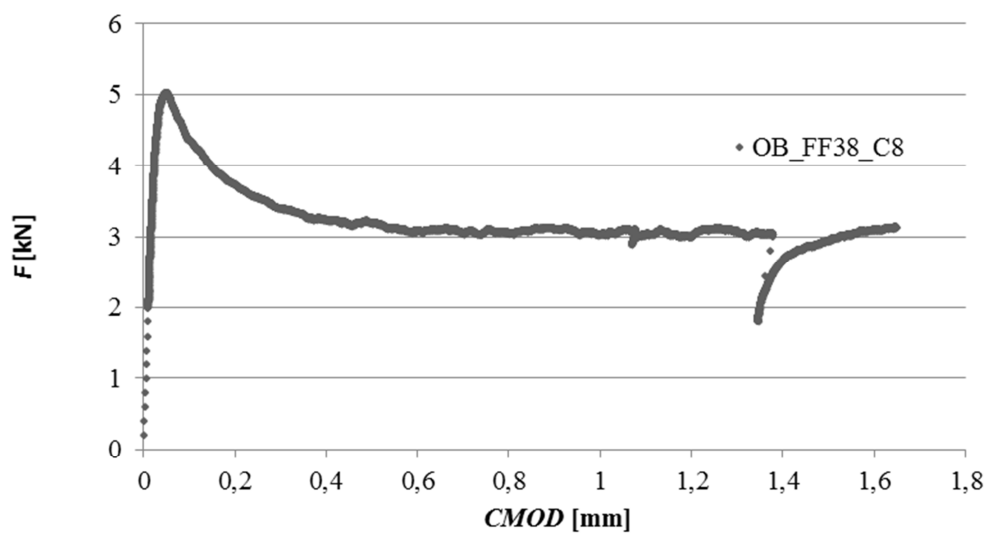
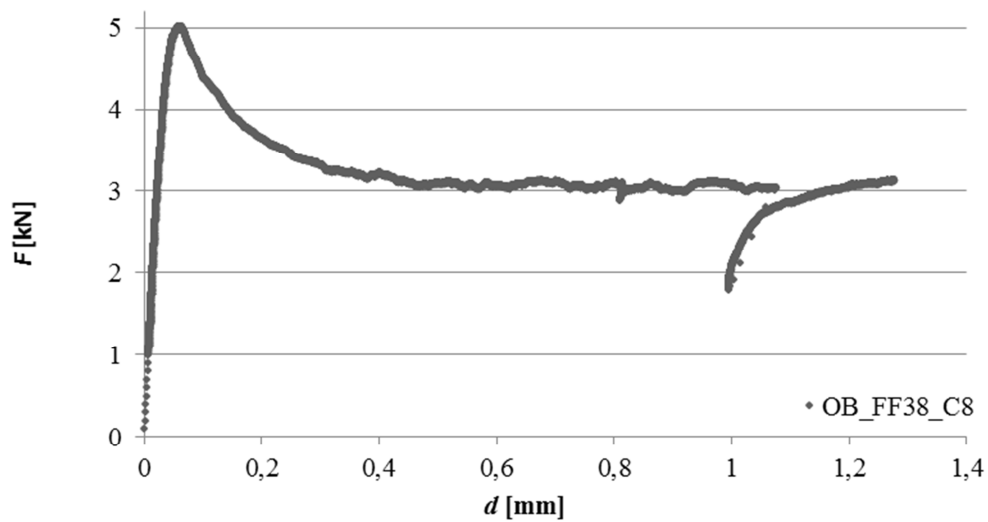
OB FF19 – D9



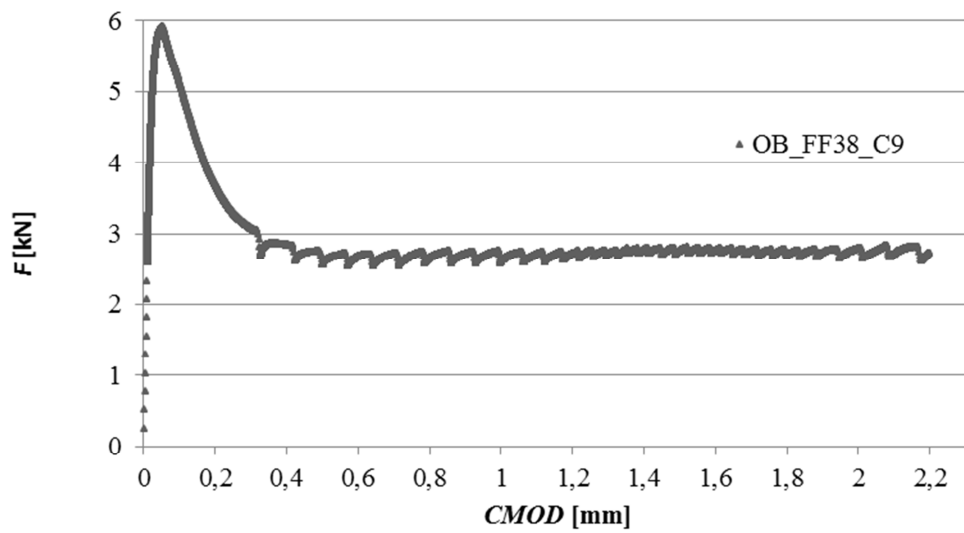
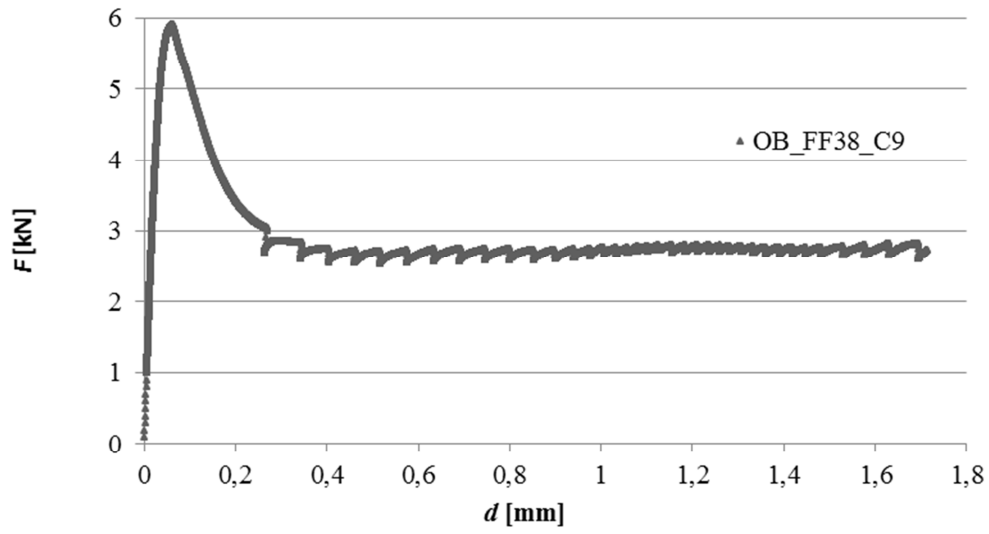
OB FF38 – C7



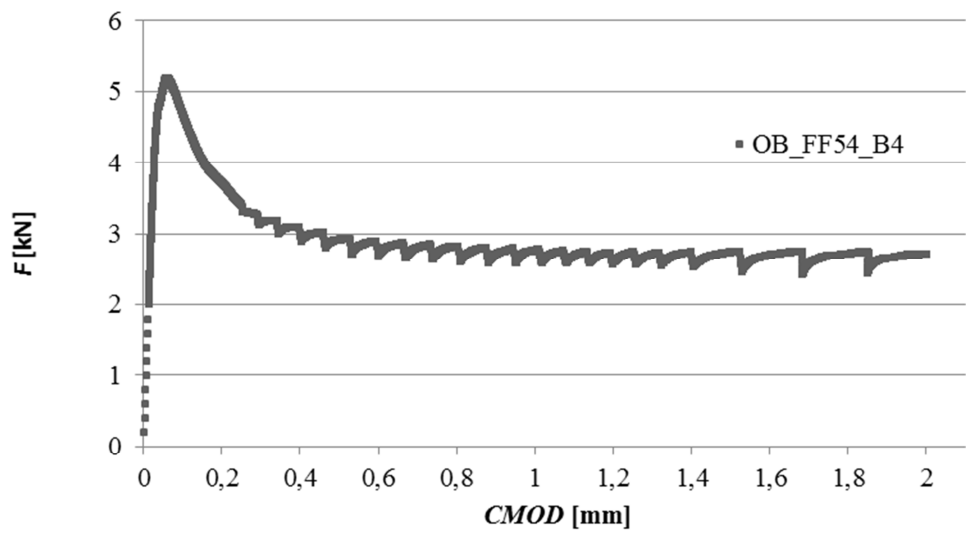
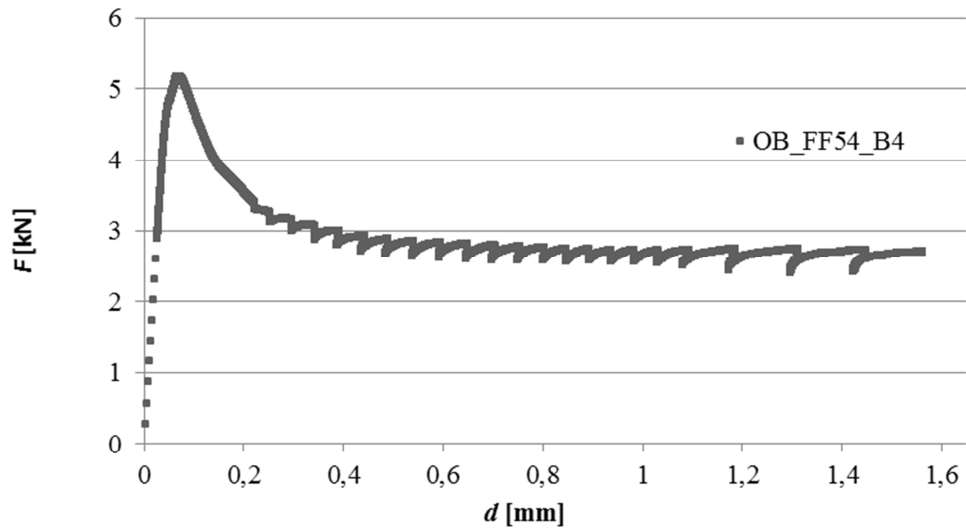
OB FF38 – C8



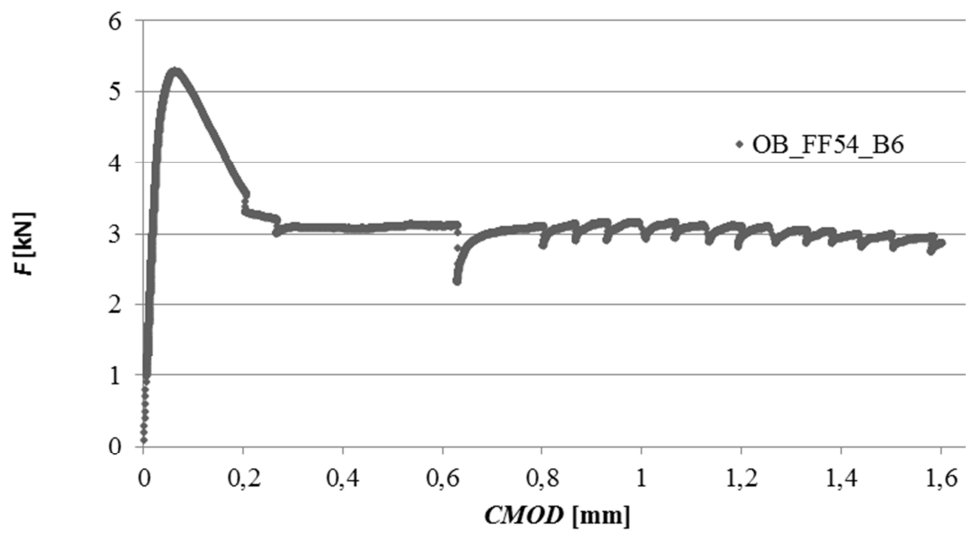
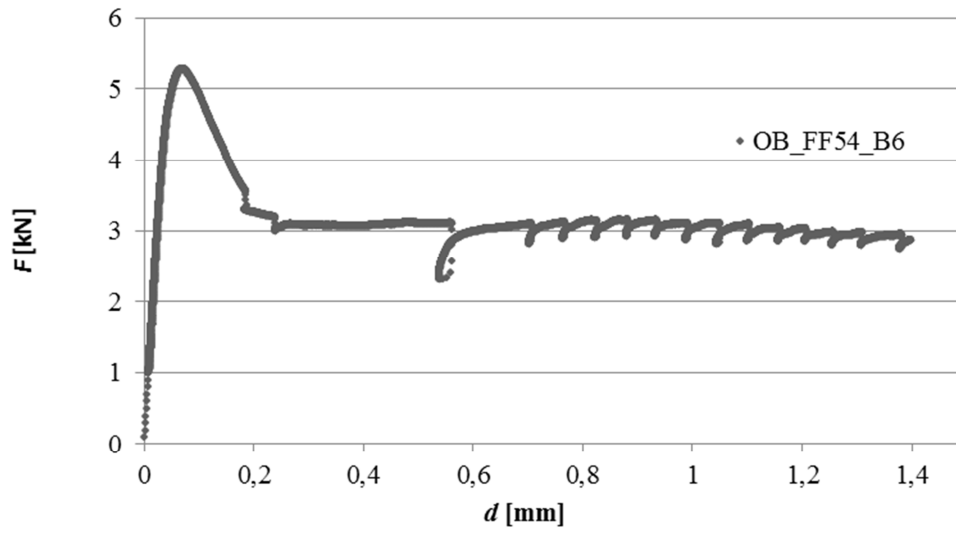
OB FF38 – C9



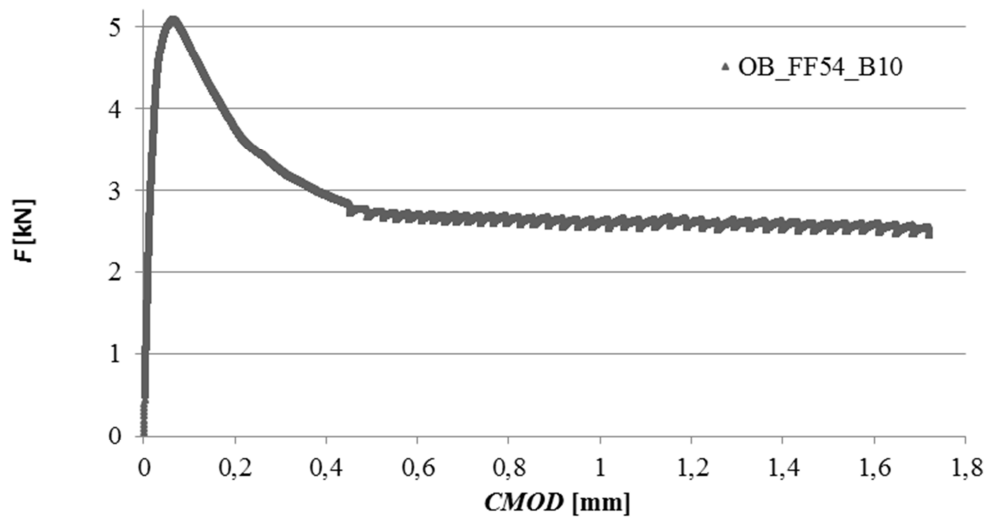
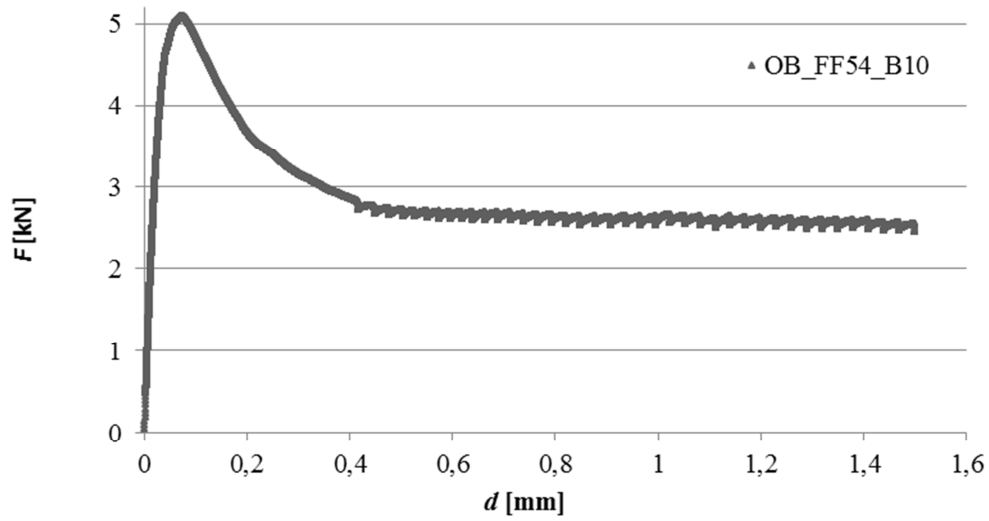
OB FF54 – B4



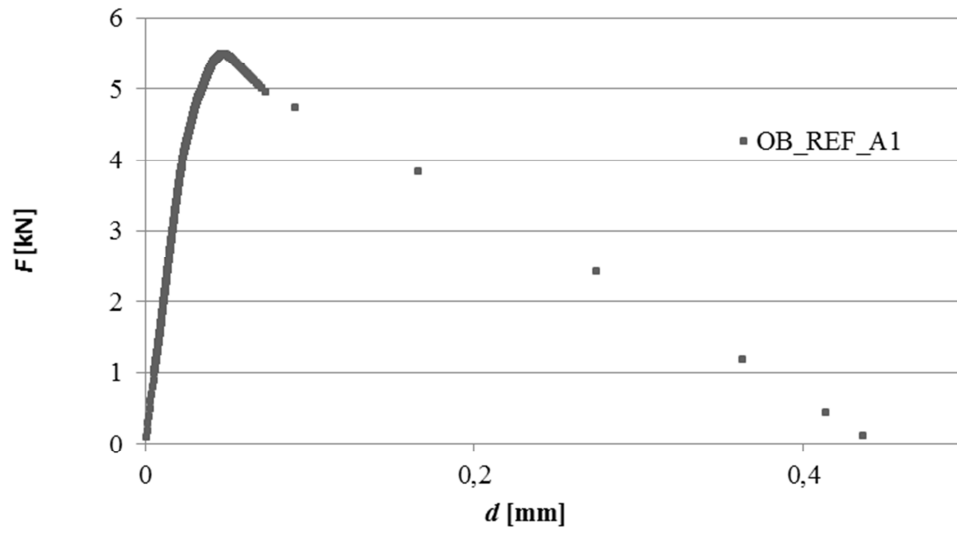
OB FF54 – B6



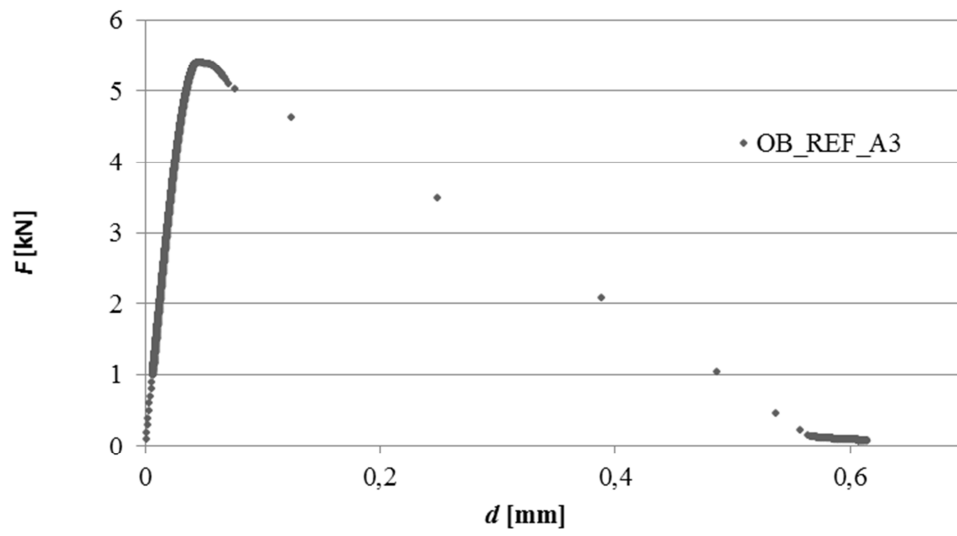
OB FF54 – B10



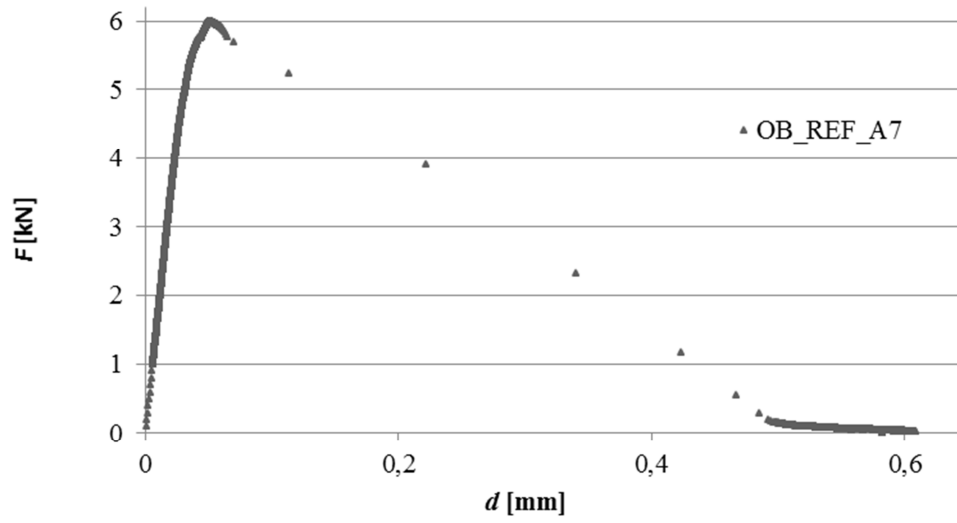
OB REF – A1



OB REF – A3

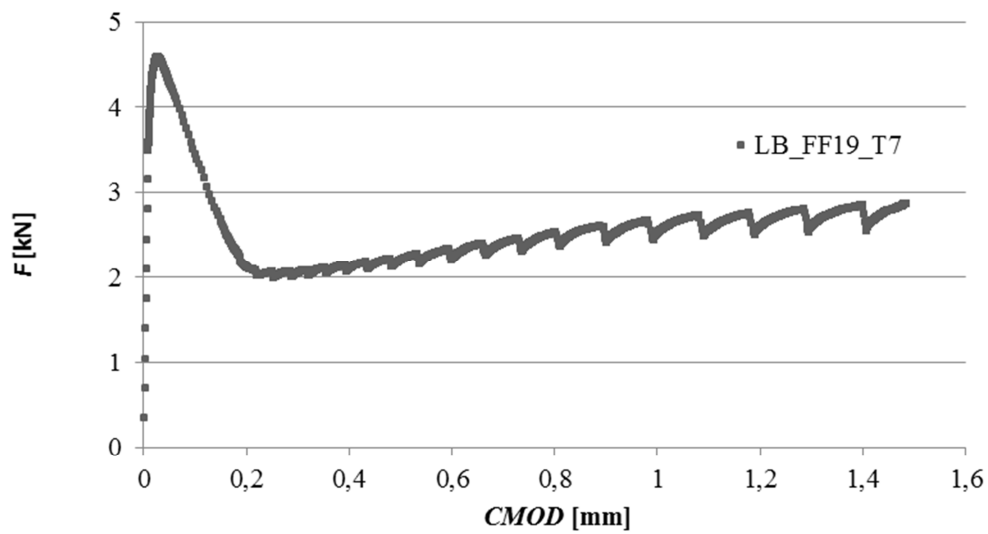
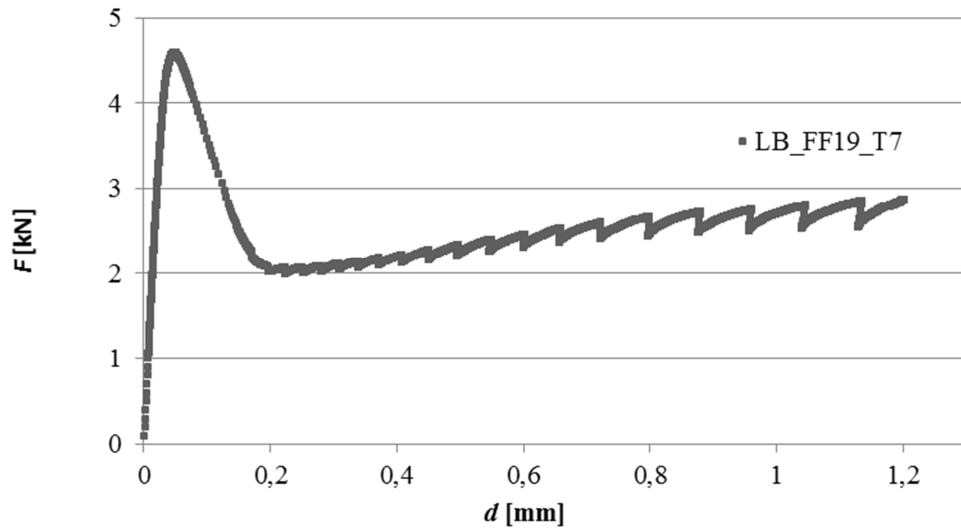


OB REF – A7

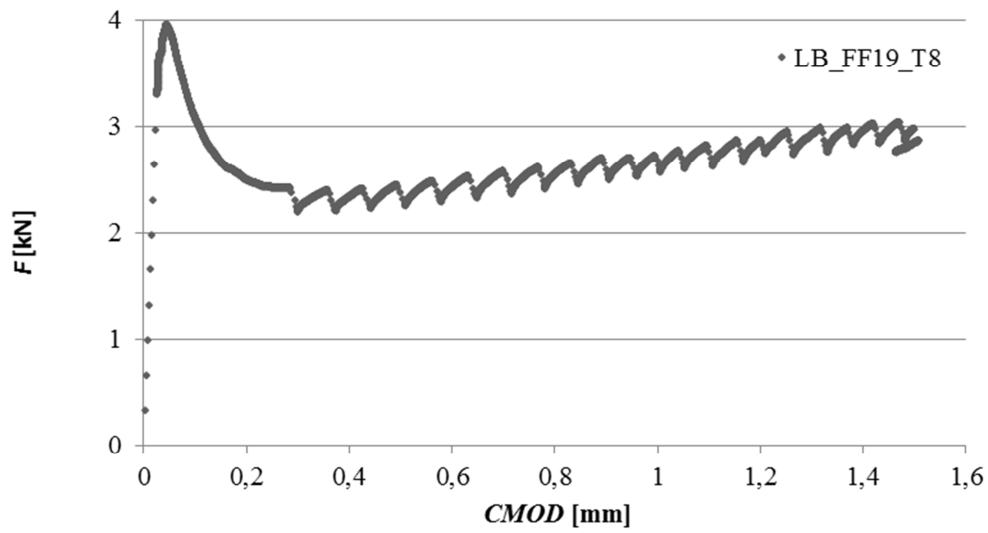
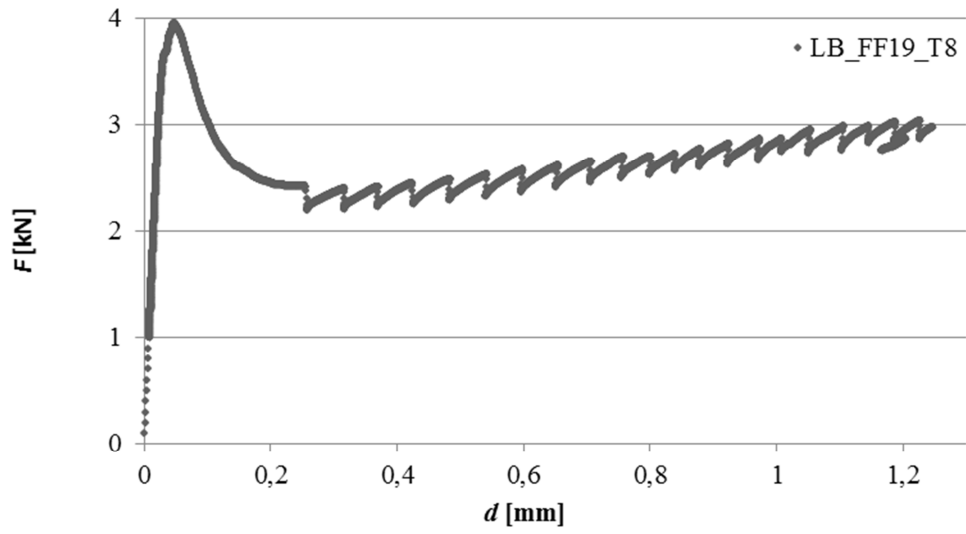


Lehký beton

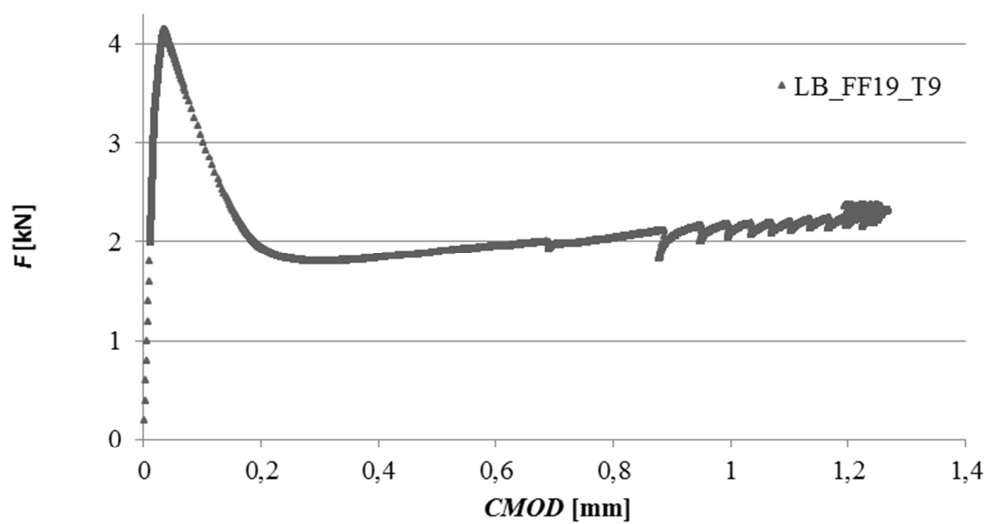
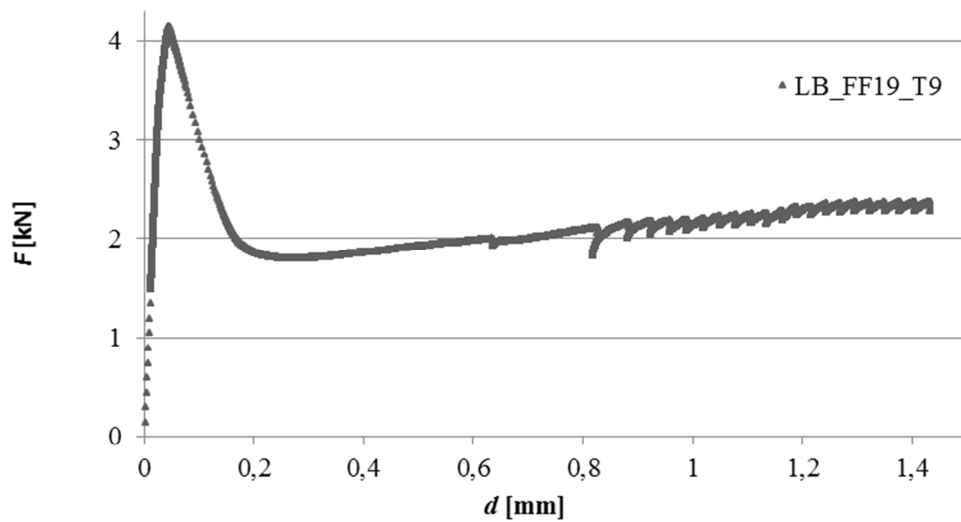
LB FF19 – T7



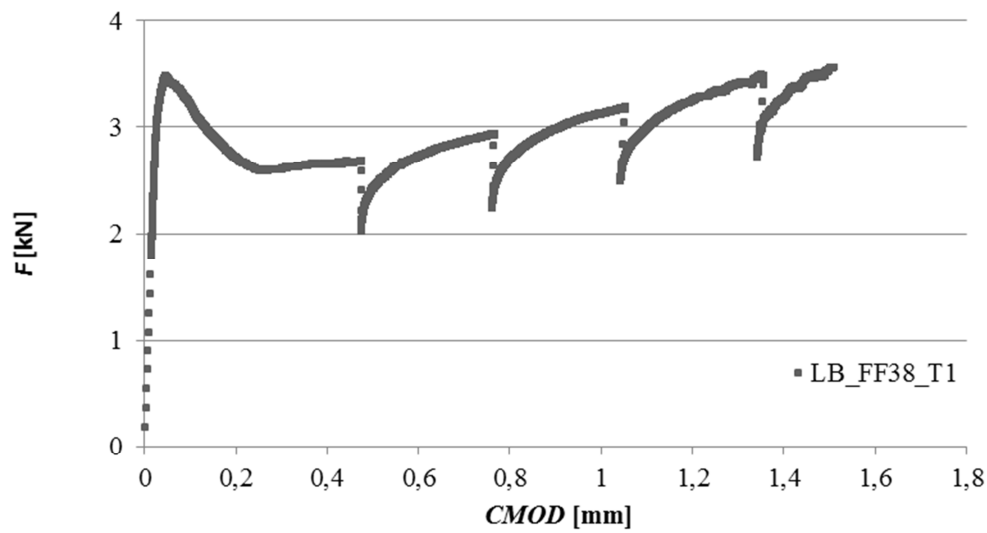
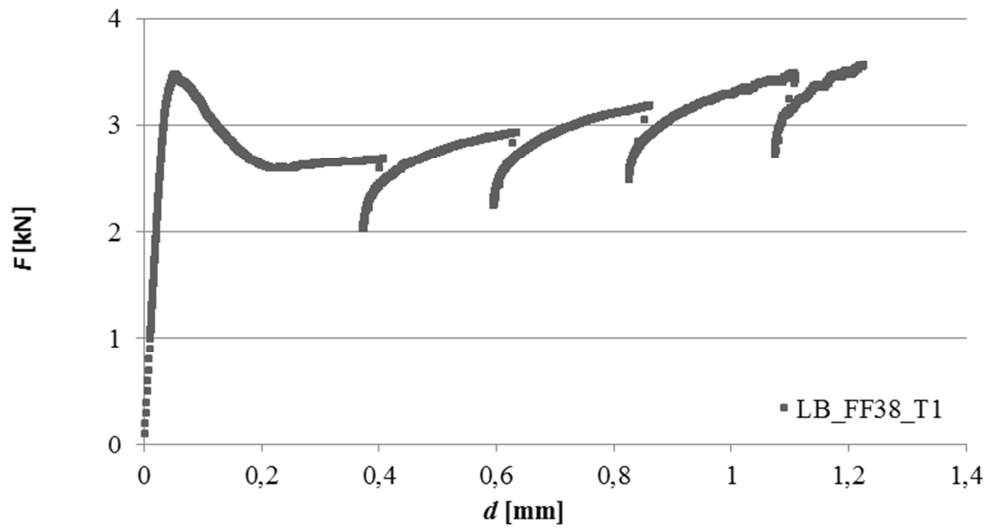
LB FF19 – T8



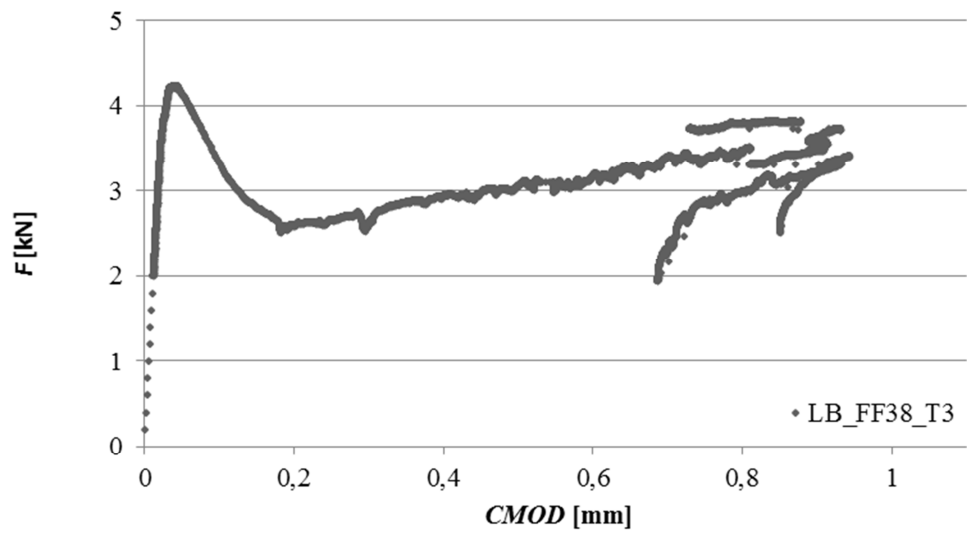
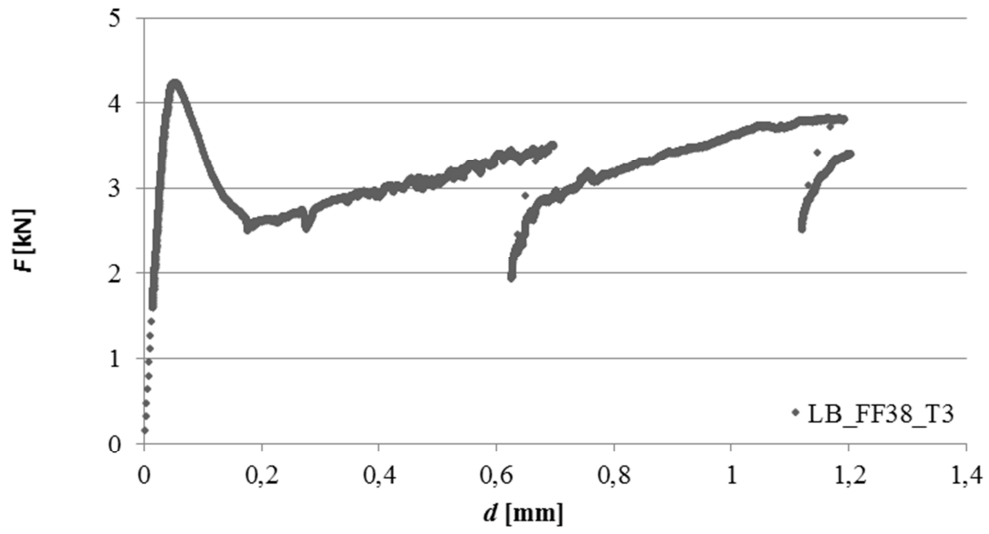
LB FF19 – T9



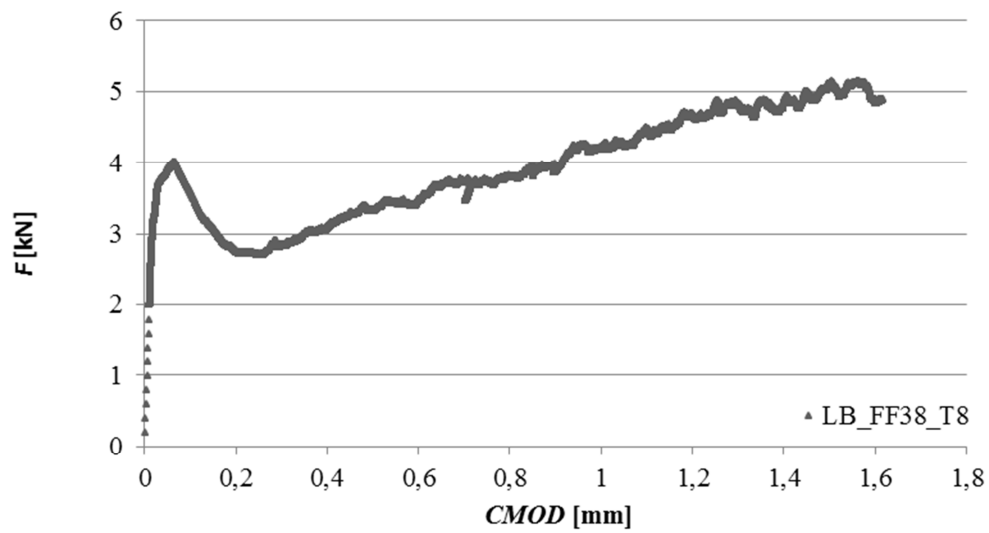
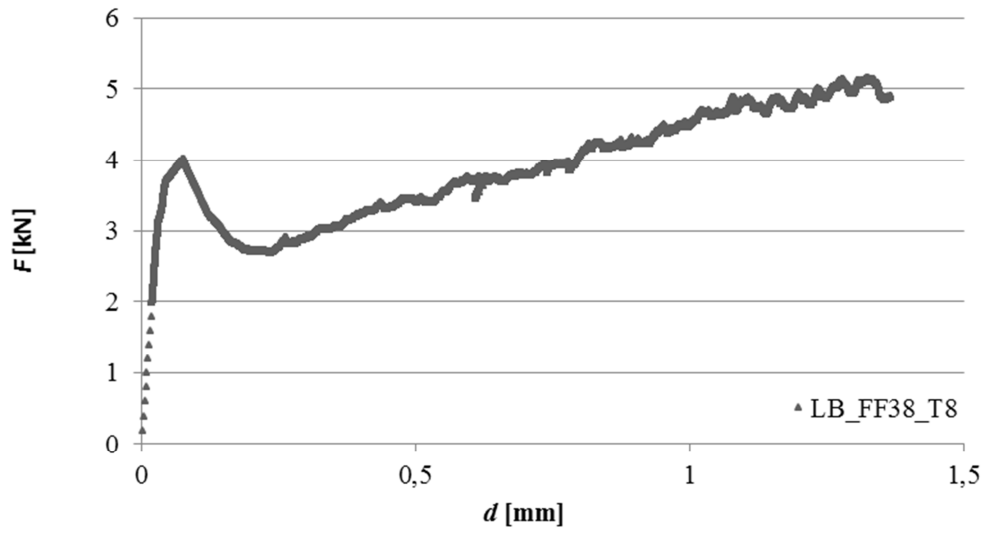
LB FF38 – T1



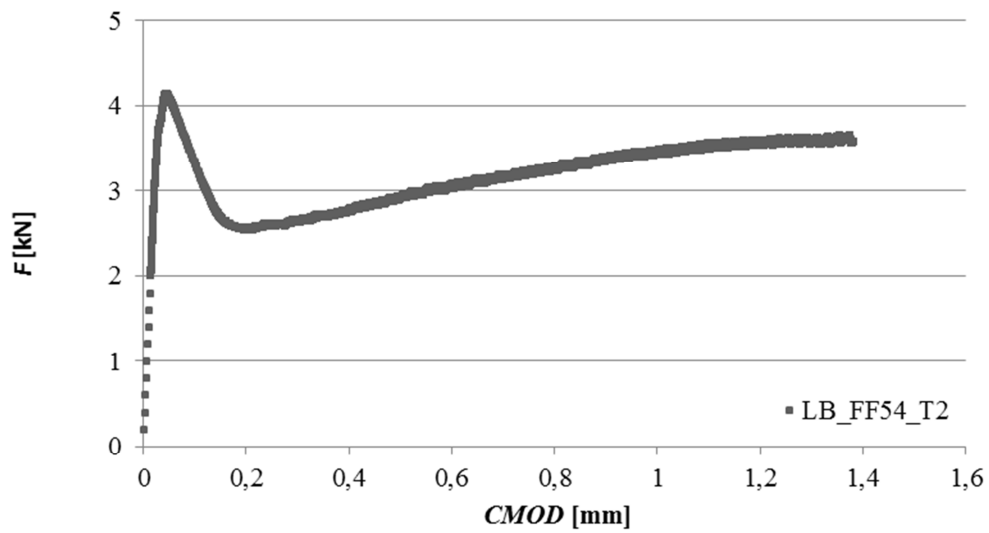
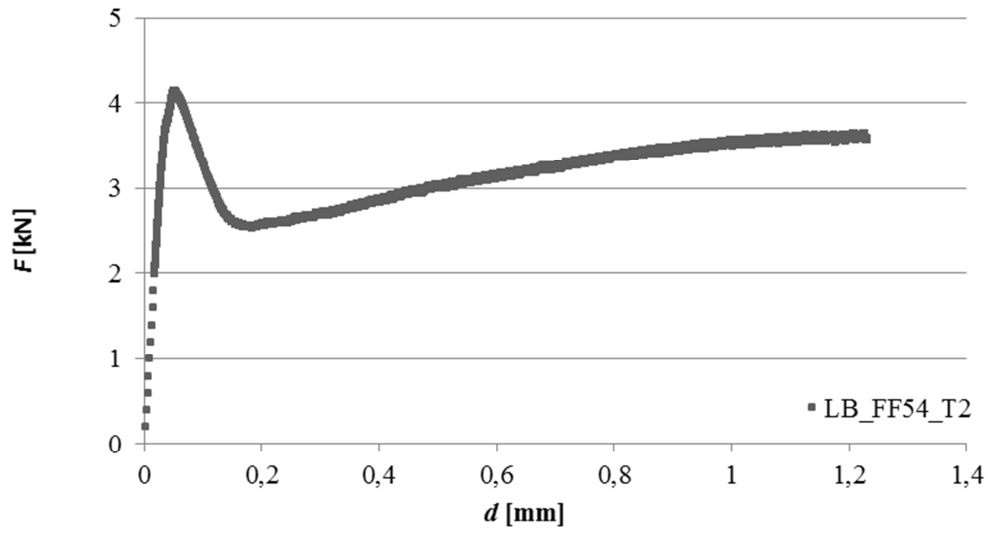
LB FF38 – T3



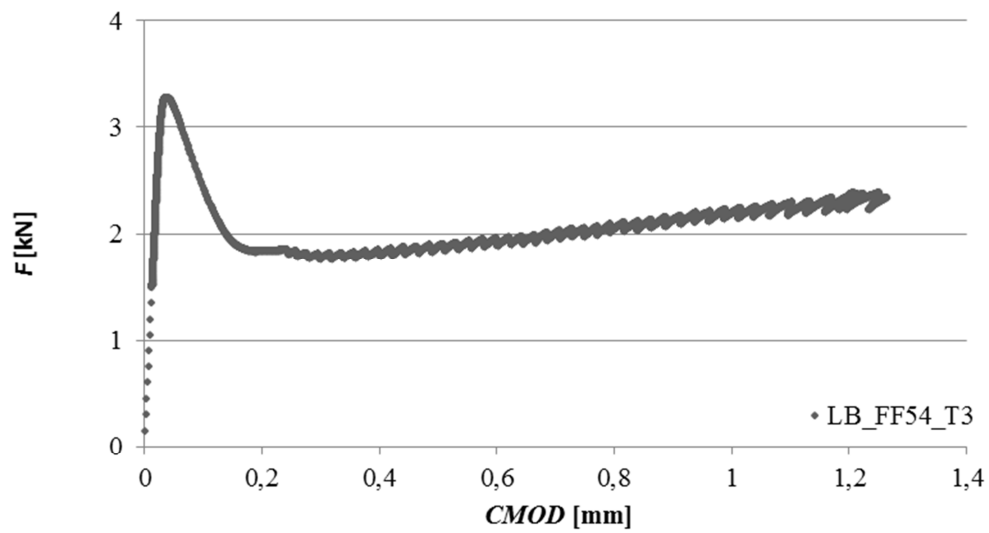
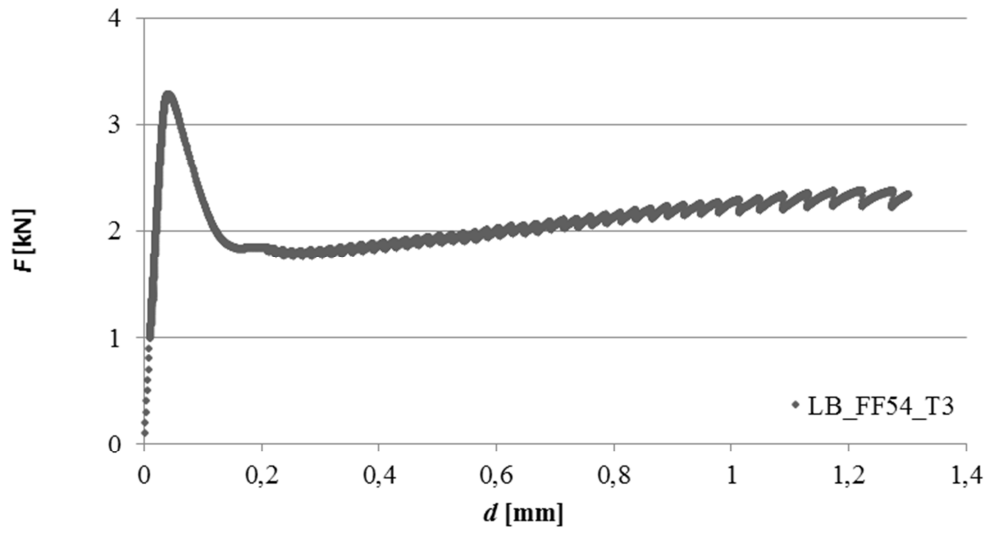
LB FF38 – T8



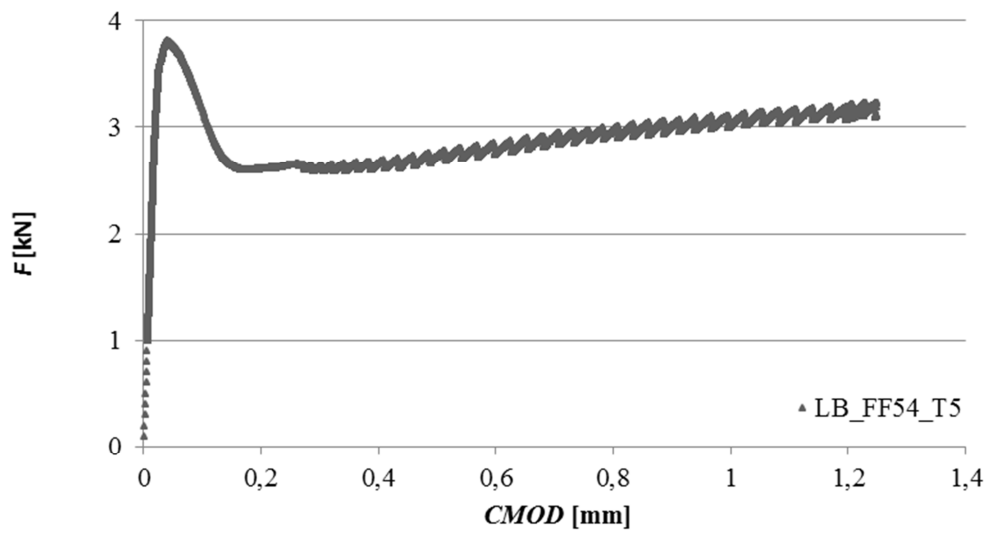
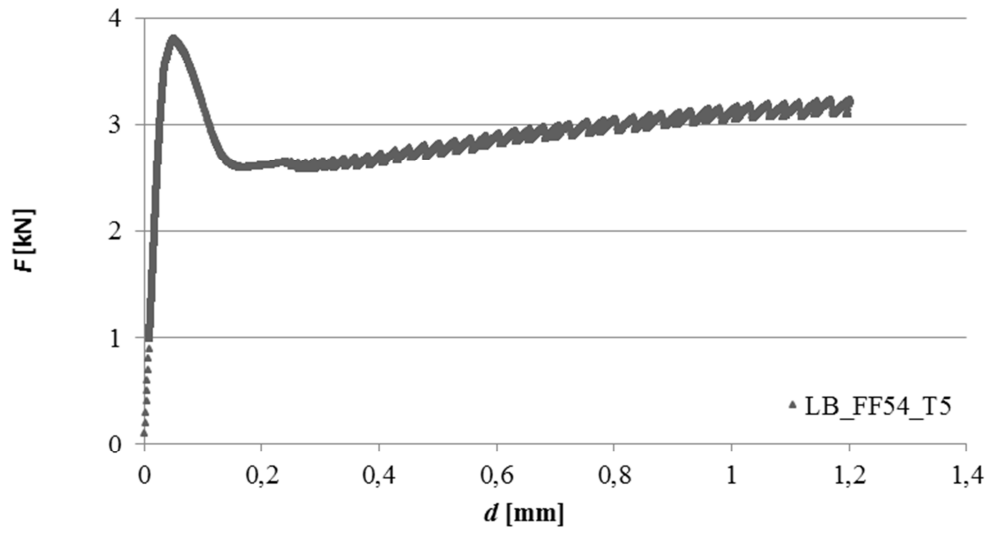
LB FF54 – T2



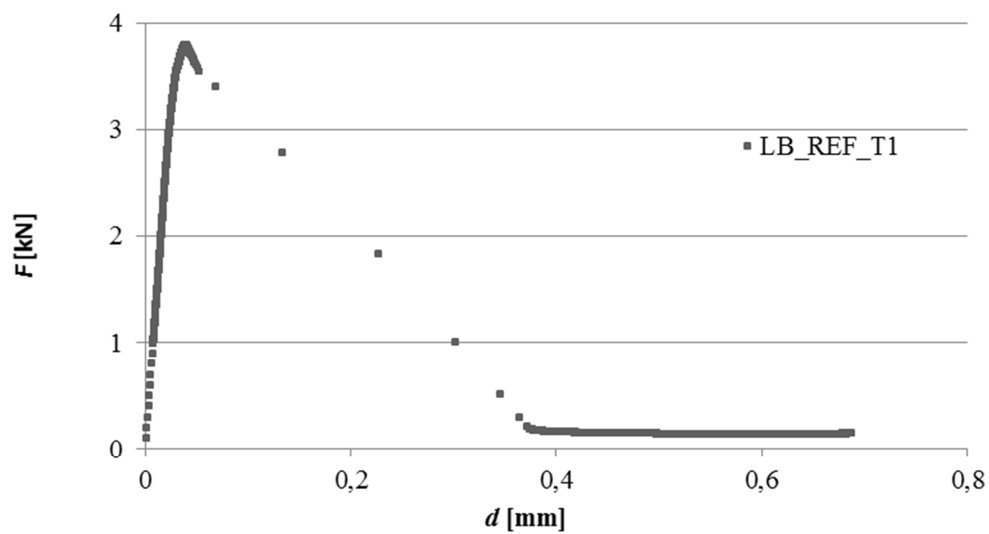
LB FF54 – T3



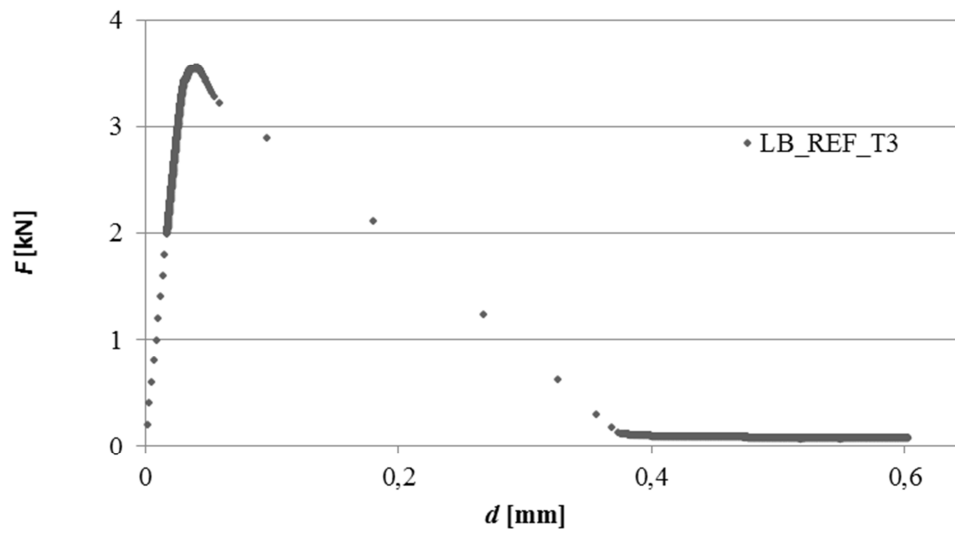
LB FF54 – T5



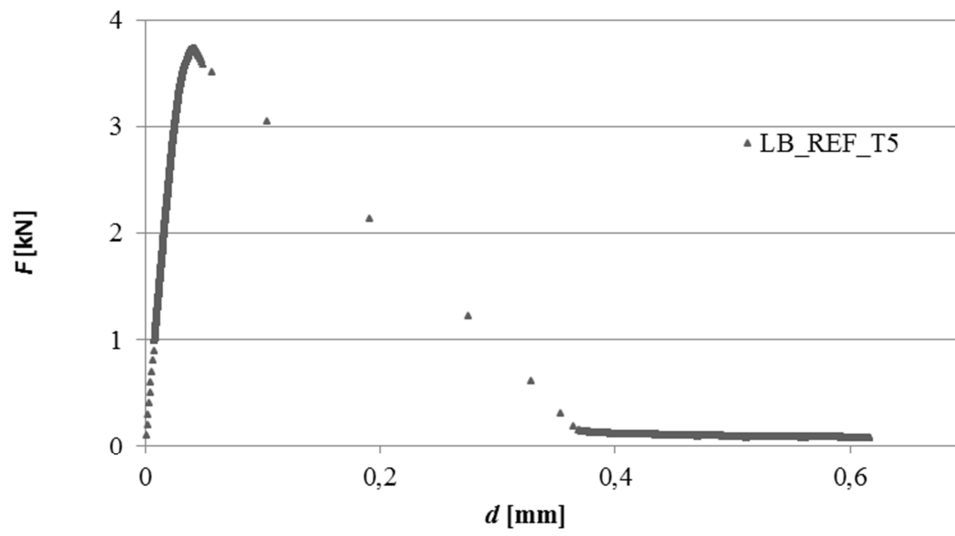
LB REF – T1



LB REF – T3



LB REF – T5



PŘÍLOHA 2 – VÝSLEDKY VYHODNOCENÍ MODELEM „DVOJÍ-K“

	LB REF (3 vzorky)			LB FF19 (1 vzorek)			LB FF38 (2 vzorky)			LB FF54 (3 vzorky)		
	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]
f_c MPa	69.711	1.041	1.5	54.22	-	-	34.530	0.156	0.5	58.618	4.302	7.3
f_t MPa	4.1	0.0	1.0	3.4	-	-	3.9	0.1	2.0	3.6	0.2	4.9
E GPa	13.4	0.8	5.9	22.7	-	-	18.7	3.6	19.5	17.9	2.7	14.9
γ_b kg/m ³	1934.7	14.5	0.7	1906.9	-	-	1874.8	13.7	0.7	1924.3	7.6	0.4
a_c mm	44.95	0.23	0.5	41.94	-	-	44.11	0.66	1.5	42.33	2.81	6.6
a_c/D -	0.448	0.003	0.6	0.419	-	-	0.440	0.007	1.7	0.423	0.028	6.6
K_{Ican} MPa(m) ^{1/2}	0.811	0.031	3.8	0.837	-	-	0.818	0.091	11.1	0.776	0.139	17.9
K_{Icc} MPa(m) ^{1/2}	0.663	0.010	1.5	0.545	-	-	0.606	0.011	1.9	0.502	0.131	26.2
K_{Iini} MPa(m) ^{1/2}	0.148	0.031	20.7	0.292	-	-	0.212	0.102	48.2	0.274	0.091	33.4
$CTOD_c$ mm	0.0228	0.0010	4.4	0.0129	-	-	0.0159	0.0022	13.6	0.0136	0.0035	25.6
P_{ini} kN	0.92	0.19	20.5	1.87	-	-	1.31	0.63	48.5	1.65	0.53	32.2
P_{iniqu} kN	0.89	0.19	21.0	1.84	-	-	1.28	0.63	49.5	1.63	0.53	32.7
P_{ini}/P_{max} -	0.247	0.043	17.3	0.451	-	-	0.331	0.118	35.8	0.439	0.112	25.5
K_{Iini}/K_{Ican} -	0.182	0.032	17.3	0.349	-	-	0.254	0.097	38.1	0.356	0.102	28.7
$ac - a_0$ mm	10.937	0.423	3.9	9.319	-	-	9.577	0.815	8.5	7.714	3.018	39.1

	OB_REF (3 vzorky)			OB_FF19 (3 vzorky)			OB_FF38 (3 vzorky)			OB_FF54 (3 vzorky)		
	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]	x	s	vx [%]
f_c	69.205	1.032	1.5	65.927	1.442	2.2	54.080	3.019	5.6	57.737	0.945	1.6
f_t	4.0	0.0	1.0	3.9	0.1	1.5	3.4	0.1	3.7	3.6	0.0	1.1
E	41.9	4.8	11.5	23.2	2.3	9.8	24.9	3.1	12.4	18.6	0.8	4.2
γ_b	2249.1	17.8	0.8	2231.7	2.4	0.1	2229.0	21.2	0.9	2235.7	14.1	0.6
a_c	45.71	1.49	3.3	45.55	4.13	9.1	48.06	3.48	7.3	46.49	1.79	3.8
a_c/D	0.454	0.014	3.1	0.455	0.041	9.0	0.480	0.033	6.9	0.465	0.017	3.7
$K_{I,can}$	1.228	0.048	3.9	1.257	0.199	15.8	1.317	0.181	13.7	1.194	0.044	3.7
$K_{I,c}$	0.734	0.047	6.4	0.696	0.128	18.3	0.688	0.106	15.4	0.633	0.056	8.8
$K_{I,ini}$	0.494	0.037	7.5	0.561	0.076	13.5	0.629	0.086	13.6	0.561	0.023	4.1
$CTOD_c$	0.0112	0.0018	15.8	0.0231	0.0067	28.9	0.0252	0.0058	23.1	0.0275	0.0023	8.3
P_{ini}	3.08	0.28	9.1	3.58	0.51	14.3	3.98	0.54	13.5	3.49	0.15	4.4
P_{iniq}	3.05	0.28	9.1	3.55	0.51	14.4	3.95	0.54	13.6	3.46	0.15	4.4
P_{ini}/P_{max}	0.546	0.019	3.5	0.636	0.052	8.2	0.725	0.051	7.0	0.673	0.018	2.7
$K_{I,ini}/K_{I,can}$	0.402	0.027	6.7	0.448	0.020	4.5	0.478	0.023	4.8	0.470	0.029	6.2
$a_c - a_0$	10.918	1.325	12.1	12.391	3.940	31.8	14.584	3.071	21.1	12.679	1.650	13.0