



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV BETONOVÝCH A ZDĚNÝCH KONSTRUKCÍ

DEPARTMENT OF CONCRETE AND MASONRY STRUCTURES

**EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA
REOLOGICKÝCH PROCESŮ V PRŮBĚHU ZRÁNÍ
BETONU**

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF RHEOLOGICAL PROCESSES DURING
THE CONCRETE MATURATION

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

DOCTORAL THESIS SUMMARY

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ing. Lukáš ZVOLÁNEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Ivailo TERZIJSKI, CSc.

BRNO 2017

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, mikro-beton, vláknobeton, smršťování, smršťovací trhliny, optimalizace, komplexní experiment, kritický stupeň omezení, odolnost betonu, reologický model, model B4.

KEYWORDS

Concrete, micro-concrete, fibre concrete, shrinkage, shrinkage cracking, optimization, complex experiment, critical degree of restraint, concrete resistance, rheological model, model B4.

OBSAH

1	ÚVOD DO ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	4
2	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	5
3	EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM.....	6
3.1	Základní koncepce	6
3.2	Laboratorní práce	7
3.3	Výpočet vynuceného napětí	9
4	ZÍSKANÉ VÝSLEDKY	9
4.1	Mikro-betony	9
4.2	Betony.....	13
5	ODOLNOST BETONU PROTI VZNIKU SMRŠŤOVACÍCH TRHLIN	16
6	UPŘESNĚNÍ REOLOGICKÝCH MODELŮ	18
6.1	Predikce smršťování.....	18
6.2	Predikce dotvarování.....	20
7	ZÁVĚRY Z ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY.....	23
8	LITERATURA	26
9	VÝBĚR VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI.....	29

1 ÚVOD DO ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tato disertační práce je ve své teoretické i experimentální části zaměřena na studium objemových změn konstrukčního betonu zapříčiněných jeho smršťováním a na vyhodnocení odolnosti betonu proti vzniku trhlin právě vlivem smršťování. V reálných konstrukcích je vždy objemovým změnám více či méně bráněno, a to se nutně projeví změnou napjatosti, a případně i vznikem trhlin. Smršťování probíhající za takových podmínek vyvolává vynucená tahová napětí (někdy nazývaná také jako residuální napětí) v betonu. Smršťování je doprovázeno dotvarováním betonu, které významně ovlivňuje úroveň vynucených napětí. Proces smršťování a dotvarování lze souhrnně nazvat jako reologické procesy.

Nejvýznamnější podíl na celkové míře smrštění má u mladého betonu autogenní smrštění. V delším časovém horizontu, též v závislosti na způsobu a míře ochrany betonu proti odpařování vody, převládá obvykle smrštění od vysychání. Překročí-li v určitém místě a čase napětí vyvolané smršťováním aktuální pevnost betonu v tahu, vznikne smršťovací trhlina. Smršťovací trhliny v betonu jsou přes velký pokrok v technologii stále závažným problémem. Trhliny (smršťovací, ale i jiného původu) nejenže degradují estetický vzhled konstrukcí, současně negativně ovlivňují integritu, trvanlivost a použitelnost betonových konstrukcí.

Konstrukce či konstrukční prvky jako jsou betonové kryty vozovek, mostovky a průmyslové podlahy jsou obzvláště náchylné ke vzniku smršťovacích trhlin, jelikož vykazují velké hodnoty vynucených napětí zapříčiněných smršťováním. Navíc, tyto konstrukce jsou často vystaveny agresivnímu prostředí, proto vznik smršťovacích trhlin sníží jejich trvanlivost více, než by tomu bylo u konstrukce bez trhlin.

Na tomto místě je nutno zdůraznit, že v celé práci je uvažováno s napětím v betonu zapříčiněným výhradně jeho smršťováním. Změny napětí vlivem externího zatížení nebo vlivem teplotních změn nejsou součástí této disertační práce. Je také nutné poznamenat, že v práci není věnována žádná pozornost mikrotrhlinám, které běžně existují v cementové pastě i na rozhraní mezi cementovou maltou a kameniva v důsledku zrání betonu. Při vhodném složení betonu a jeho ošetřování totiž nedojde k propojení těchto mikrotrhlin, a tedy nebude narušena integrita betonu a ten bude mít dostatečnou trvanlivost [1].

První část vlastní práce je zaměřena na studium smršťování a odpovídajících vynucených napětí u mikro-betonů (též nazývané jako cementová malta). Mikro-beton obsahuje výrazně vyšší podíl cementového tmelu než beton a výrazně menší maximální zrno kameniva. Při testování mikro-betonů byla navržena a odladěna unikátní metodika tzv. *komplexní experiment*.

Druhá část práce popisuje numerickou a experimentální analýzu reologických procesů u plnohodnotných betonů s běžným zrnem kameniva. Získané poznatky na úrovni mikro-betonů byly aplikovány při zkoumání betonů s reálným zrnem kameniva. Byla zde využita a dále rozšířena metodika komplexního experimentu navržená při zkoumání mikro-betonů. Současně s betony byl také testován vliv vláken na odolnost betonu proti vzniku smršťovacích trhlin.

V třetí části práce je provedeno finální porovnání testovaných betonů pomocí autorem definovaného tzv. „kritického stupně omezení“ (*critical degree of restraint*) – ψ_{cr} .

Čtvrtá a poslední odborná část disertační práce obsahuje porovnání naměřených hodnot smršťování a dotvarování vyvinutých speciálních betonů s reologickým modelem podle Eurokódu 2 a modelem B4. Byla navržena úprava modelu B4 tak, aby přesněji vystihoval skutečné chování zkoumaných betonů.

2 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

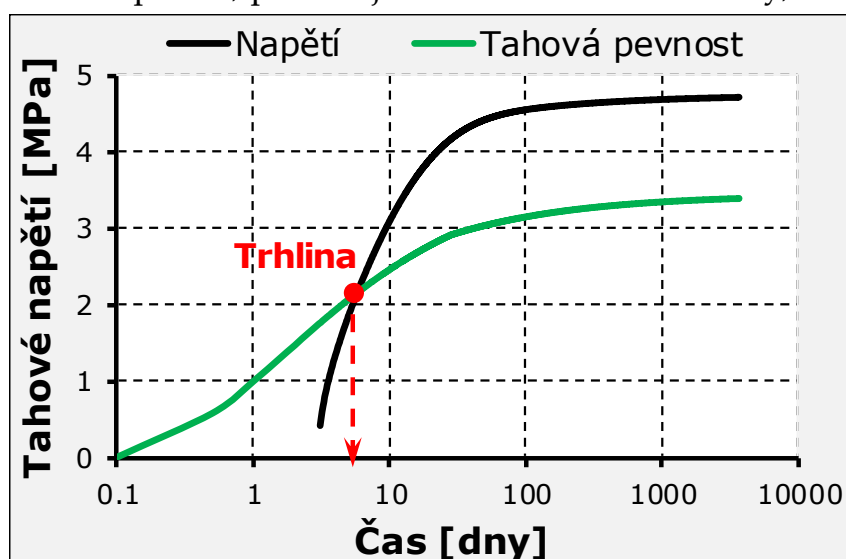
Hlavním cílem disertační práce bylo vytvoření nástroje (metodiky), kterým lze komplexně a zejména experimentálně analyzovat odolnost betonu proti praskání v důsledku vázaného smršťování. Tato metodika je aplikovatelná k objektivnímu porovnávání různých betonů z hlediska jejich resistance proti vzniku smršťovacích trhlin. V průběhu vývoje nové metodiky jsme na Ústavu betonových a zděných konstrukcí navrhovali a sledovali různé typy receptur betonu. Byl tedy splněn další významný cíl práce, a to vývoj receptury se sníženým smršťováním a sníženým rizikem vzniku smršťovacích trhlin. Posledním cílem práce bylo porovnání získaných výsledků z experimentů s vybranými stávajícími reologickými modely.

Dílčí cíle této disertační práce lze uvést v následujících bodech:

- Měření volného smršťování prakticky ihned po vyrobení zkušební vzorku,
- měření vázaného smršťování a stanovení stupně omezení při smršťování,
- stanovení ekvivalentních hodnot smrštění z hlediska podmínek okolního prostředí, tj. relativní vlhkosti a teploty vzduchu,
- vyhodnocení průběhu vynucených napětí a vývoje tahové pevnosti betonu v závislosti na čase,
- odvození unikátního parametru jednoznačně definujícího hodnotu betonu z hlediska jeho odolnosti proti praskání vlivem smršťování,
- upřesnění vybraných reologických modelů na základě naměřených hodnot smršťování a dotvarování.

3 EXPERIMENTÁLNÍ PROGRAM

Vznik trhlin v betonu či mikro-betonu nezávisí pouze na míře jeho smrštění, ale současně na jeho schopnosti přenést napětí od smršťování a neporušit se. Proto je nezbytné znát úroveň namáhání kompozitu na straně jedné a parametry resistance na straně druhé. Tato úloha se navíc komplikuje tím, že pevnostní a deformační charakteristiky kompozitu závisí na čase, a to v důsledku postupné hydratace cementu v betonu. Je tedy nevyhnutelné provádět a vyhodnocovat všechna měření právě v závislosti na stáří kompozitu. Časový bod, kdy nastane kritická rovnováha mezi namáháním a pevností kompozitu, predikuje vznik smršťovací trhliny, Obr. 3.1.



Obr. 3.1 Porovnání tahové pevnosti s vynuceným napětím

Pro zachycení všech uvedených vlastností zkoumaného kompozitu v závislosti na čase byla vyvinuta metodika tzv. **komplexního experimentu**. Jde v podstatě o kombinaci známých destruktivních a nedestruktivních metod umožňující v čase sledovat aktuální míru smrštění a odpovídající odolnost proti vzniku trhlin v betonu či mikro-betonu.

3.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE

V drtivé většině případů je nositelem objemových změn betonu cementový tmel, sestávající z cementu, vody, přísad a příměsí. Objemové změny se proto mohou ve vlastním tmelu projevit intenzivněji než v betonu, kde je jim bráněno přítomností kostry kameniva. V souladu s touto úvahou byl nejdříve zahájen vývoj experimentálních prací na vzorcích z mikro-betonu. Mikro-beton obsahuje výrazně vyšší podíl cementového tmelu než beton a výrazně menší maximální zrno kameniva. Tím se docílilo zintenzivnění sledovaného projevu (smršťování). Navíc, bylo možné zmenšit rozměry zkušebních vzorků ve srovnání se vzorky pro sledování betonů, jelikož minimální velikost vzorku se odvíjí od maximálního zrna použitého kameniva.

V rámci zkoumání mikro-betonů byly provedeny 3 komplexní experimenty speciálně navržených mikro-betonů. Testování bylo zahájeno na mikro-betonu označeném jako *MC-Ref*, jehož receptura byla považována za referenční. *MC-Ref* kromě superplastifikátoru neobsahoval žádné další příměsi nebo přísady. Následně byl testován mikro-beton označený jako *MC-SRA*. Ten s ohledem na snížení napětí od smršťování obsahoval protismršťovací přísadu. Jako poslední byl testován mikro-beton s obsahem protismršťovací a expanzní přísady, který je v textu označen jako *MC-Opt*. Po zkoumání mikro-betonů bylo zahájeno testování betonů s běžným zrnem kamene. Byly využity následující poznatky z mikro-betonů:

- Metodika komplexního experimentu,
- optimalizace složení mikro-betonu (aplikace protismršťovací a expanzní přísady).

V první fázi prací (při zkoumání betonů) byl opět proveden komplexní experiment referenčního betonu (v textu označen jako *C-Ref*). Následně jsme navrhli optimalizovanou recepturu betonu (v textu označená jako *C-Opt*), která vycházela z referenční receptury, přičemž byly využity poznatky při testování mikro-betonů. Tedy, beton *C-Opt* obsahoval jak protismršťovací, tak i expanzní přísadu.

V druhé fázi zkoumání plnohodnotných betonů jsme testovali vláknobeton. Jeho receptura vycházela z receptury optimalizovaného betonu *C-Opt*, a navíc byla doplněna o přídavek vláken. Nejdříve bylo zahájeno testování vlivu různých druhů vláken a jejich množství na základní vlastnosti betonu, zejména na jeho zpracovatelnost. Po nalezení vhodných vláken jsme provedli komplexní experiment vláknobetonu s obsahem polypropylenových vláken (v textu označený jako *C-Fiber*).

3.2 LABORATORNÍ PRÁCE

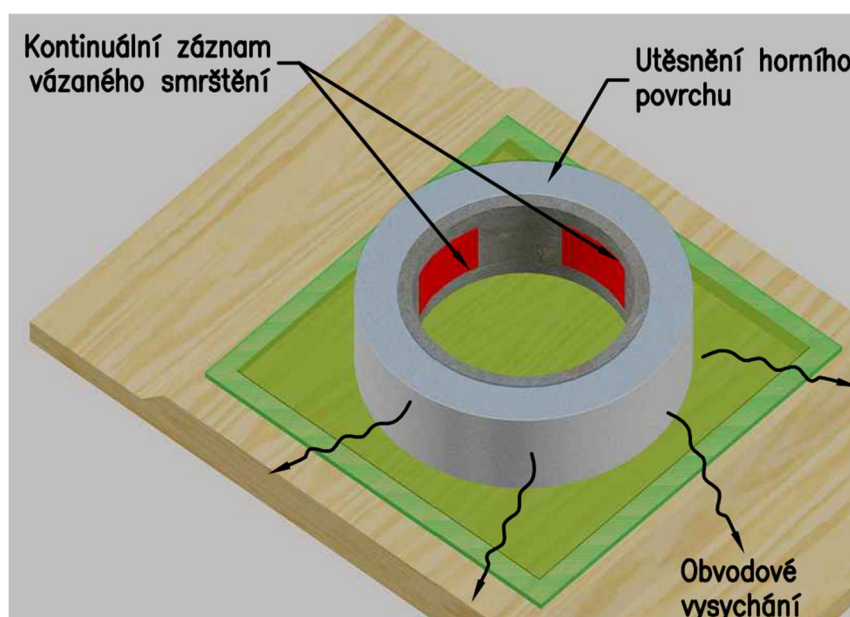
Komplexní experiment zahrnuje následující laboratorní práce:

- Měření volného smršťování,
- měření vázaného smršťování,
- měření pevnosti v tahu,
- měření tlakové pevnosti,
- měření modulu pružnosti.

Volné smršťování bylo měřeno jako délkové změny dvěma zařízeními: pro krátkodobé a dlouhodobé sledování. Pro krátkodobé sledování bylo navrženo a použito zařízení umožňující záznam délkových změn prakticky ihned po vyrobení záměsi.

Průběh smršťování byl současně monitorován na trámcích, které sloužily pro dlouhodobé sledování v horizontu až 2 let.

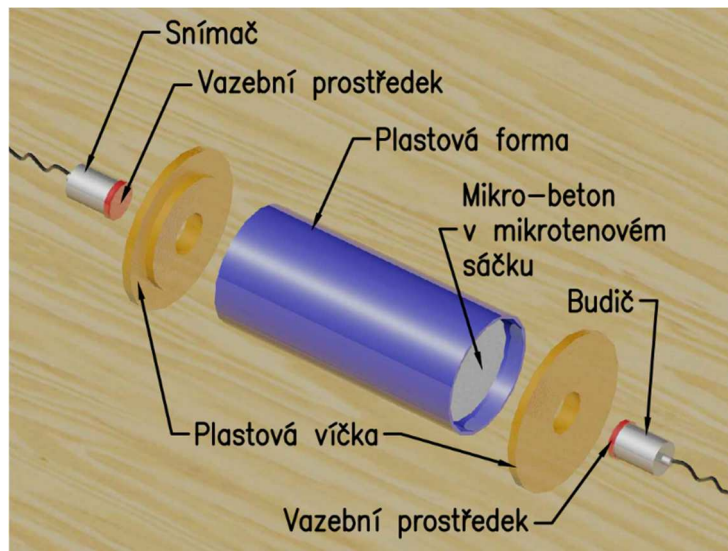
Vázané smršťování bylo sledováno pomocí Ring-testu [11]. Při Ring-testu se čerstvý beton ukládá a hutní do mezikruží tvořeného vnitřním a vnějším prstencem. Vnitřní prstenec je tuhý (ocelový) a brání betonu volně se deformovat při jeho smršťování. Vnější prstenec slouží dočasně pouze jako bednění. Během zrání betonu se kontinuálně zaznamenává deformace (přetvoření) vnitřního prstence od okamžiku betonáže vzorku. Popsaná sestava je dále označována v souladu s originálním názvoslovím jako „Ring“.



Obr. 3.2 Schématické znázornění Ringu a vytvoření podmínek pro smršťování kompozitu

Tahová pevnost betonu byla odvozena z pevnosti v příčném tahu. Byla také experimentálně stanovena pevnost v tahu ohybem, která sloužila k verifikaci hodnot pevností kompozitu v příčném tahu a dále ke zjištění pevnosti v tlaku na zlomcích trámce. Navíc, byla stanovena korelační závislost mezi pevností betonu v tahu a rychlostí šíření UZ vlnění, a tím byl získán podrobný popis vývoje tahové pevnosti v čase. To bylo možné, protože rychlost (čas průchodu) UZ signálu byla v betonu či mikro-betonu zaznamenávána kontinuálně od okamžiku jeho uložení.

Vývoj modulu pružnosti v čase od počátku tuhnutí kompozitu byl stanoven pomocí kombinace destruktivní zkoušky dle ČSN EN 12390-13 [23] a nedestruktivní ultrazvukové impulzní metody. Sestava navrženého a použitého měřicího zařízení pro zjištění rychlosti průchodu UZ impulsu je schematicky znázorněna na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 Měření doby průchodu ultrazvukového signálu skrz vzorek z kompozitu

3.3 VÝPOČET VYNUCENÉHO NAPĚTÍ

Od vázaného smršťování vzniká v kompozitu tahové napětí. Celý proces je navíc ovlivněn dotvarováním, respektive relaxací. Relaxaci jsme při zkoumání mikro-betonů neuvažovali, protože v této fázi výzkumu šlo o komparativní analýzu mikro-betonů za účelem optimalizace složení cementového tmele. Případný vliv dotvarování (relaxace) lze zjednodušeně považovat ve všech zkoušených variantách složení za srovnatelný.

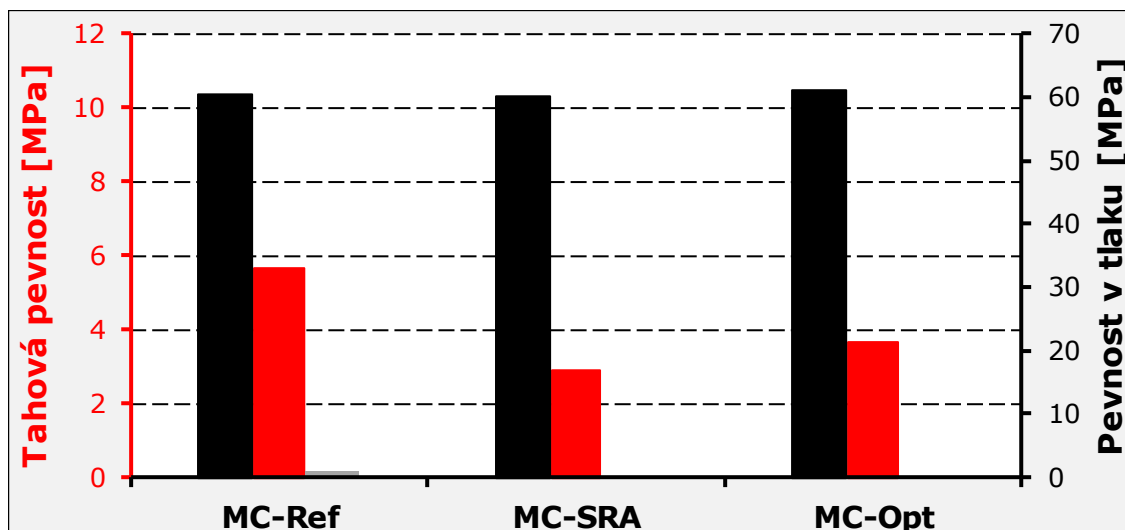
Výpočet napětí v mikro-betonu byl proveden podle Hookova zákona. Je nezbytné poznamenat, že výpočet elastického napětí musí být proveden přírůstkově s ohledem na změny hodnoty modulu pružnosti mikro-betonu v čase.

Při výpočtu napětí u plnohodnotných betonů byl již uvažován vliv dotvarování. S ohledem na charakter namáhání je přesný výpočet napětí v určitém čase a při určitém stupni omezení deformací možný metodou časové diskretizace (TDA). V rámci disertační práce byl také odvozen vývoj koeficientu stárnutí χ , který zohledňuje určitým způsobem historii namáhání při výpočtu napětí metodou efektivního modulu závislého na čase – AEMM [34].

4 ZÍSKANÉ VÝSLEDKY

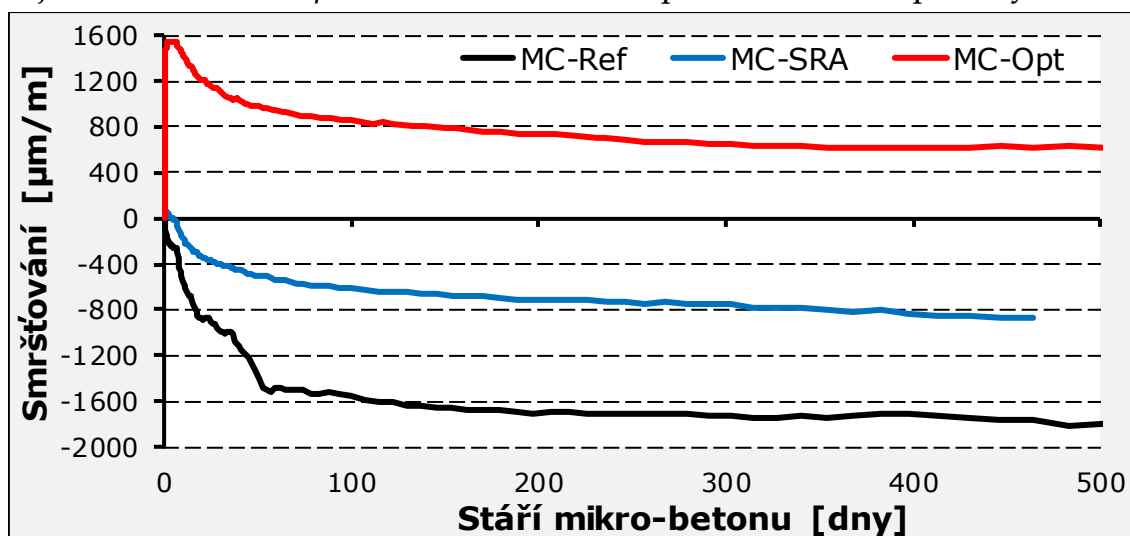
4.1 MIKRO-BETONY

Pokud jde o pevnosti v tlaku, všechny mikro-betony vykazovaly stejné pevnosti. Pevnosti v tahu lze u zkoumaných mikro-betonů také pokládat za srovnatelné s ohledem na rozptyl získaných výsledků. Na Obr. 4.1 jsou vyneseny 28denní pevnosti.



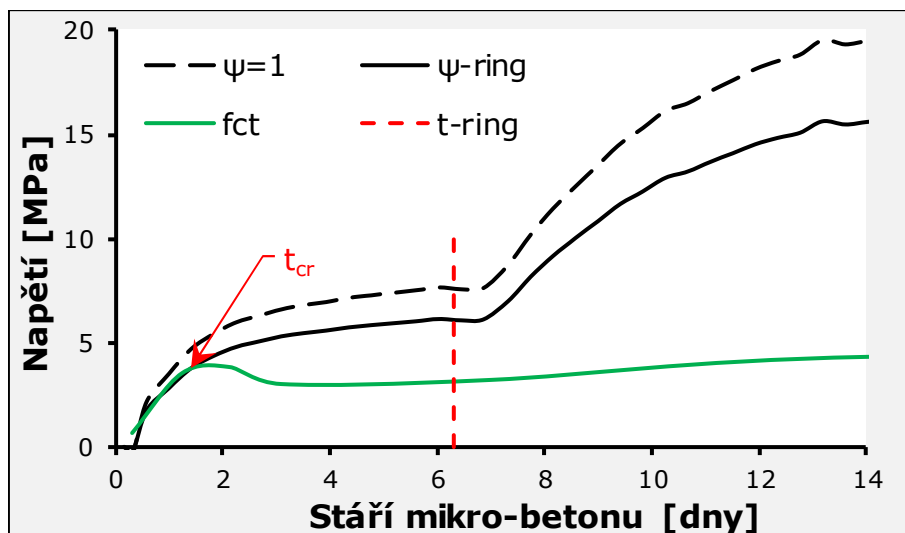
Obr. 4.1 Tahové a tlakové pevnosti zkoumaných mikro-betonů

Významný rozdíl mezi mikro-betony je patrný při srovnání absolutních hodnot celkového smrštění. Naměřené hodnoty jsou na Obr. 4.2. Je zde prokázán příznivý vliv protismršťovací přísady, která snížila hodnoty smrštění u vzorku MC-SRA přibližně o polovinu ve srovnání s referenčním vzorkem MC-Ref. U vzorku MC-Opt je počáteční expanze přisuzována působení expanzní přísady. Tato expanze pravděpodobně nikdy nebude (za daných podmínek) odčerpána smršťováním, protože smršťování je u vzorku MC-Opt redukováno vlivem protismršťovací přísady.



Obr. 4.2 Smršťování zkoumaných mikro-betonů

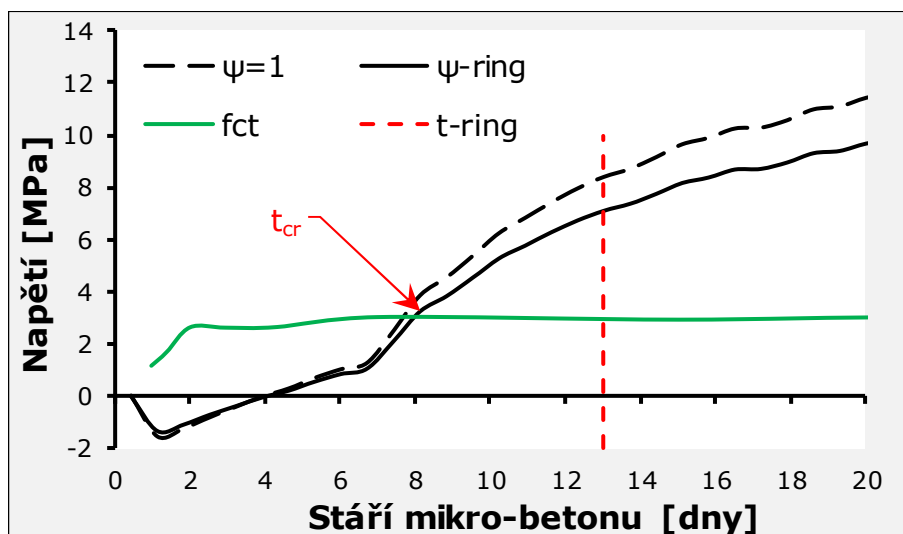
Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku MC-Ref je odvozena z Obr. 4.3. V grafu je zobrazen průběh pevnosti v dostředném tahu f_{ct} . Křivka $\psi=1$ reprezentuje teoretické maximální možné napětí od smršťování, kdyby byl prvek tuze upnutý. Křivka ψ -Ring reprezentuje vynucená napětí od smršťování při stupni omezení odpovídající Ring-testu.



Obr. 4.3 Predikce vzniku smršťovací trhliny mikro-betonu MC-Ref

Ekvivalence tahové pevnosti a vynuceného napětí definuje kritické stáří označené t_{cr} . Pro zkoušený mikro-beton byl vznik trhliny při Ring-testu pozorován na začátku 6. dne, zatímco numerická predikce určila vznik trhliny již ve 2. dni. Tento nesoulad je pravděpodobně zapříčiněn vlivem dotvarování, které nebylo na úrovni mikro-betonů uvažováno z důvodu popsaného již dříve.

Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku MC-SRA je odvozena z Obr. 4.4.

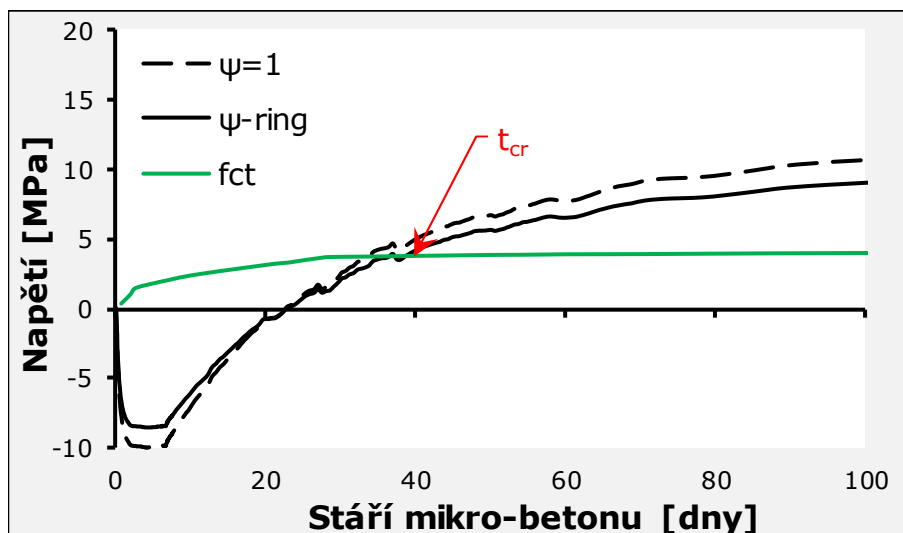


Obr. 4.4 Predikce vzniku smršťovací trhliny mikro-betonu MC-SRA

Pro zkoušený mikro-beton byl vznik trhliny při Ring-testu pozorován ve 13. dni, zatímco numerická predikce určila vznik trhliny již v 8. dni. Tento nesoulad je (stejně jako u vzorku MC-Ref) pravděpodobně zapříčiněn vlivem dotvarování.

Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku MC-Opt je odvozena z Obr. 4.5. Vlivem významné počáteční expanze bylo do mikro-betonu vneseno che-

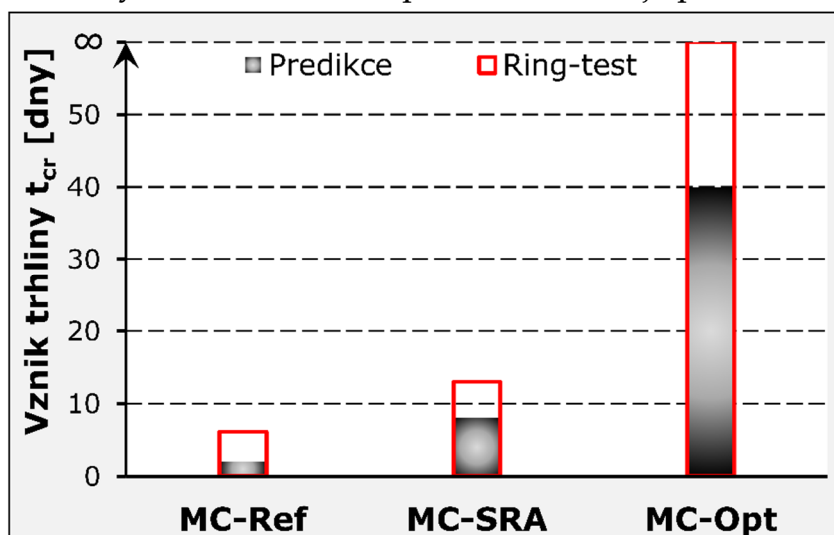
mické předpětí. Ačkoliv byla tato expanze poměrně veliká, neprokázal se její nepříznivý vliv na mikrostrukturu kompozitu, a tedy ani na pevnostní charakteristiky mikro-betonu.



Obr. 4.5 Predikce vzniku smršťovací trhliny mikro-betonu MC-Opt

Předpokládaný vznik trhliny je v časovém bodu 40 dní. To se ale při Ring-testu nepotvrdilo. Důvody jsou v tomto případě dva: Významná počáteční expanze mikro-betonu, kterou není schopen Ring-test zachytit a zanedbání dotvarování.

Srovnání testovaných mikro-betonů pomocí času t_{cr} je provedeno na Obr. 4.6.

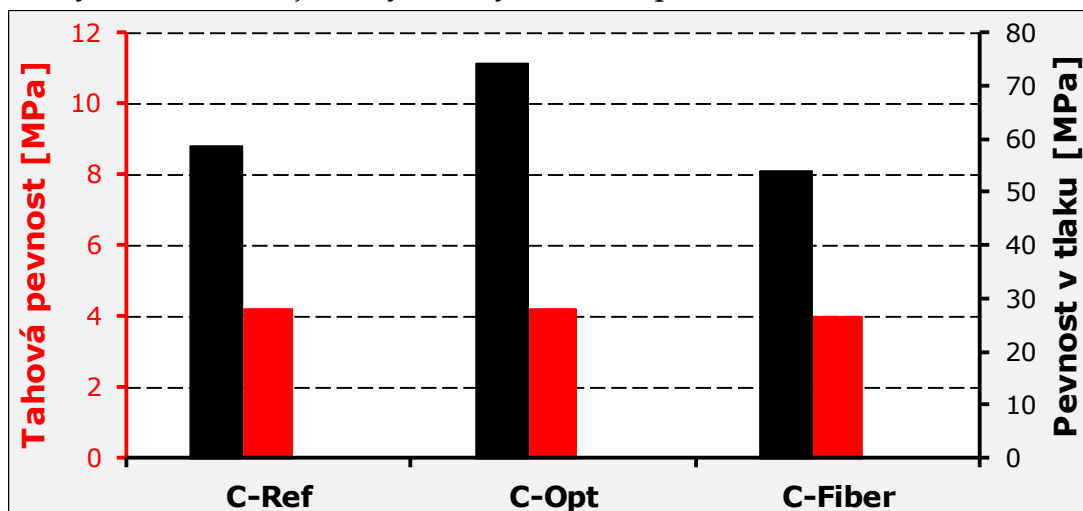


Obr. 4.6 Vznik smršťovací trhliny zkoumaných mikro-betonů

Z porovnání absolutních hodnot smršťování a času t_{cr} byl jasně prokázán příznivý vliv nejen protišmršťovací přísady, ale také expanzní přísady. V následující části práce byly získané poznatky z mikro-betonů ověřeny na plnohodnotných betonech s běžným zrnem kameniva.

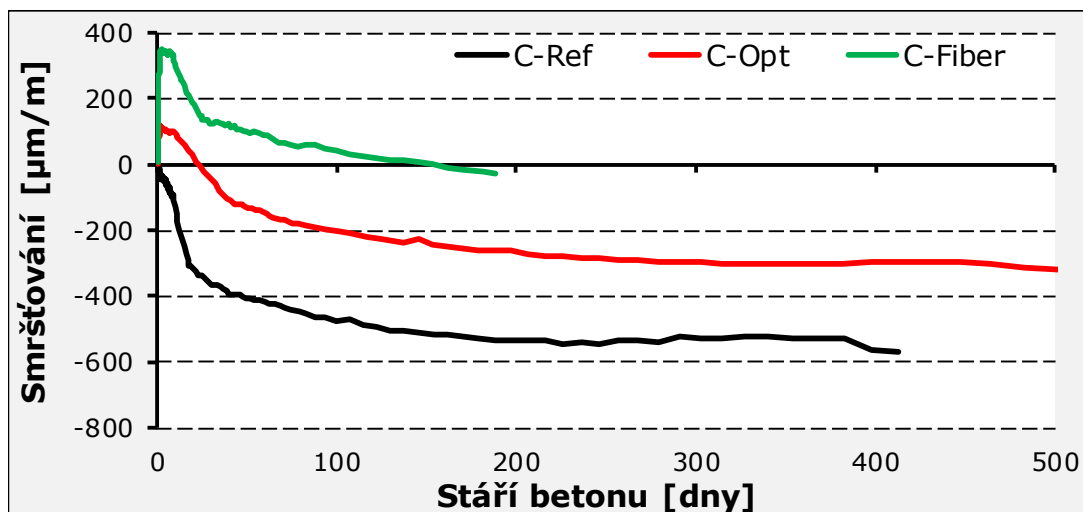
4.2 BETONY

Pokud jde o pevnosti v tlaku i v tahu, všechny testované betony vykazovaly podobné hodnoty. Na Obr. 4.7 jsou vyneseny 28denní pevnosti.



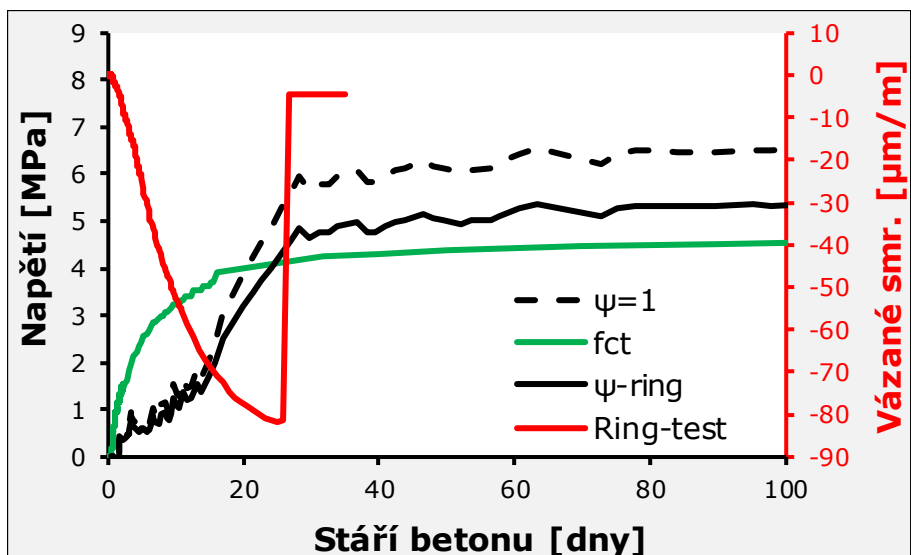
Obr. 4.7 Tahové a tlakové pevnosti zkoumaných betonů

Naměřené hodnoty smršťování jsou na Obr. 4.8. Byl zde prokázán příznivý vliv nejen protismršťovací a expanzní přísady, ale také příznivý vliv polypropylenových vláken.



Obr. 4.8 Smršťování zkoumaných betonů

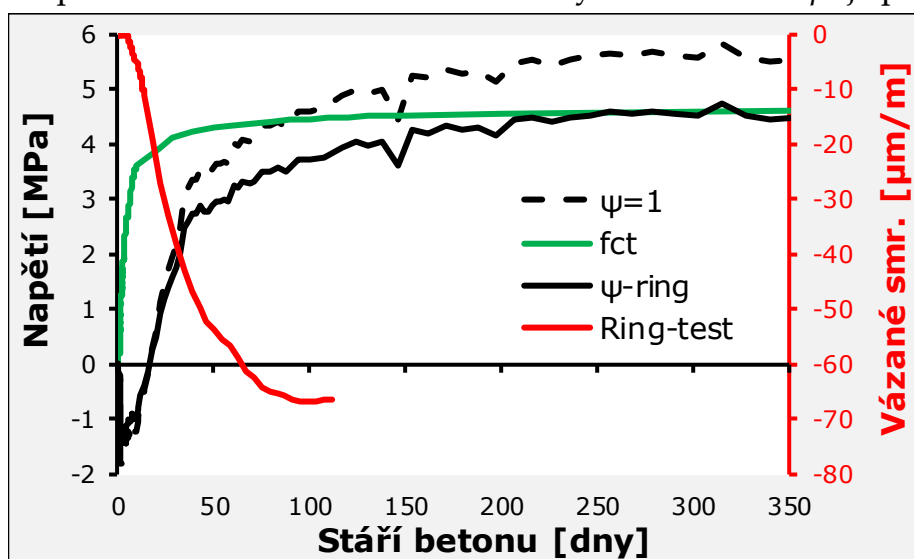
Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku C-Ref je patrná z Obr. 4.9. Křivka Ring-test se zde váže k sekundární ose grafu a označuje průběh vázaného smršťování.



Obr. 4.9 Predikce vzniku smršťovací trhliny betonu C-Ref

Ekvivalence tahové pevnosti a napětí nastala mezi 20. a 25. dnem stáří betonu. Tento odhad velice dobře koresponduje s Ring-testem, kde došlo ke vzniku trhliny ve stáří 26 dní.

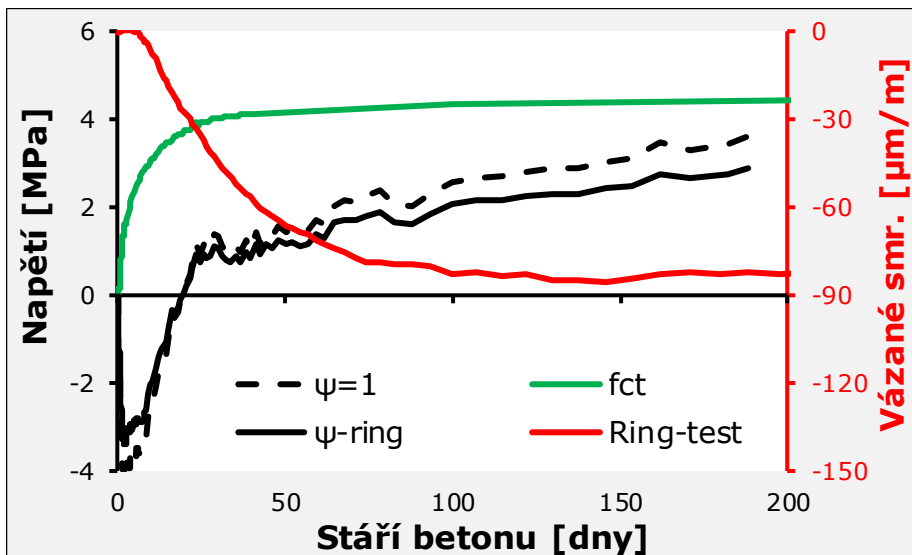
Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku C-Opt je patrná z Obr. 4.10.



Obr. 4.10 Predikce vzniku smršťovací trhliny betonu C-Opt

Ekvivalence tahové pevnosti a napětí (odpovídající stupni omezené při Ring-testu) nastala přibližně ve 300 dnech. Bohužel, Ring-test musel být ukončen již po 110 dnech, tak nebylo v tomto případě možné numerickou predikci ověřit. Nicméně do 110 dní nevznikla při Ring-testu trhlina, což odpovídá predikci vypočteného napětí. Ve stáří 110 dní byla tahová pevnost betonu 4.5 MPa, zatímco vypočtená hodnota napětí byla 3.9 MPa. Ve vzorku byla tedy v tomto okamžiku napěťová rezerva přibližně 0.6 MPa.

Numerická predikce vzniku smršťovací trhliny u vzorku C-Fiber je patrná z Obr. 4.11.



Obr. 4.11 Predikce vzniku smršťovací trhliny betonu C-Fiber

Ekvivalence tahové pevnosti a vynuceného napětí (odpovídající stupni omezení při Ring-testu) během sledovaného období zdaleka nenastala. Tato teoreticky určená skutečnost byla potvrzena fyzicky při Ring-testu, kde skutečně nedošlo ke vzniku smršťovací trhliny. Ve stáří 190 dní byla vypočtena napěťová rezerva přibližně 1.5 MPa.

Co se týče testovaného vláknobetonu, ze získaných výsledků (konkrétně po vyhodnocení vynucených napětí zapříčiněných vázaným smršťováním a vývoje tahové pevnosti) je patrné, že navržený vláknobeton *C-Fiber* má ve srovnání s běžným betonem (námi testovaným označeným *C-Ref*) velmi vysoké parametry z hlediska eliminace tvorby smršťovacích trhlin. Jedná se tedy v tomto smyslu o vysokohodnotný beton. Během sledovaného období byla hodnota vynuceného napětí v betonu 2.9 MPa, zatímco jeho tahová pevnost byla 4.4 MPa.

Dostatečná napěťová rezerva byla získána optimálním návrhem receptury. Tím bylo docíleno těchto změn chování oproti běžnému betonu:

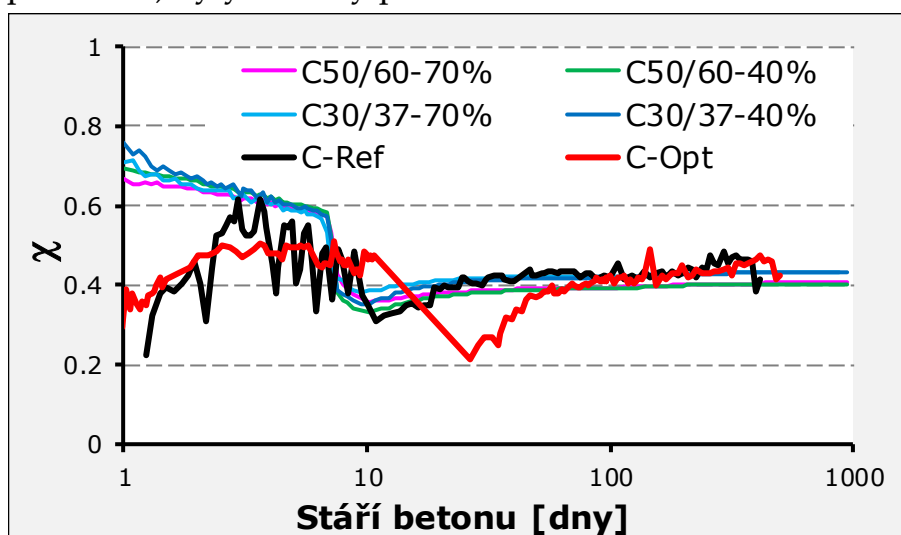
- Snížení smršťování,
- vyvolání „rozumné“ počáteční expanze betonu,
- zvýšení duktility betonu v oblasti tahového namáhání.

Redukce smršťování byla zapříčiněna hned několika vlivy. Nevýznamnějším vlivem je přidání protismršťovací přísady. Dalším významným vlivem byl vhodný návrh množství kameniva a jeho jednotlivých frakcí a přidání polypropylenových vláken. Současně bylo důležité vyvolání „rozumné“ počáteční expanze přidáním expanzní příměsi. Rozumnou hodnotou expanze myslíme to, že při expanzi nebyla poškozena

mikrostruktura betonu, což by znehodnotilo beton snížením jeho pevnostních a deformačních vlastností. Počáteční expanze vnesla do betonu chemické předpětí, které bylo postupně odčerpáváno vlivem sníženého smršťování.

Zvýšení duktility betonu v oblasti tahového namáhání bylo prokázáno při Ring-testech provedených v rámci hledání vhodného druhu vláken a jejich optimální dávky. Zatímco šířka trhliny u běžného betonu ihned po jejím vzniku byla 1.3 mm, u vláknobetonu byla šířka trhliny téměř desetkrát menší, pokud ovšem vůbec trhlina vznikla. U vláknobetonu *C-Fiber* tomu tak nebylo!

Součástí výsledků je také vyhodnocení závislosti koeficientu χ na stáří betonu. Závislost je patrná z Obr. 4.12. Kromě experimentálně testovaných betonů *C-Ref* a *C-Opt* jsou v grafu zachyceny také betony třídy C 30/37 a C 50/60 u nichž vstupní hodnoty pro výpočet χ (tj. vývoj smršťování při relativní vlhkosti vzduchu 40 %, 70 % a modulu pružnosti) byly získány podle Eurokódu 2.



Obr. 4.12 Vývoj koeficientu χ v čase

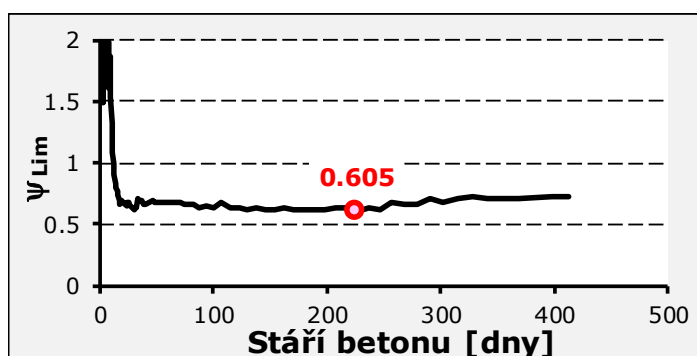
Výsledky ukazují, že relevantní hodnota χ je přibližně stejná pro všechny průběhy smršťování. Pohybuje se v rozmezí 0.4 až 0.45. Pouze v prvních dnech zrání betonu je jeho neustálená hodnota způsobená malými diferencemi mezi reálným a teoretickým elastickým napětím. Proto je χ extrémně citlivý i na malou odchylku mezi výpočtem TDA a zjednodušenou metodou AEMM.

5 ODOLNOST BETONU PROTI VZNIKU SMRŠŤOVACÍCH TRHLIN

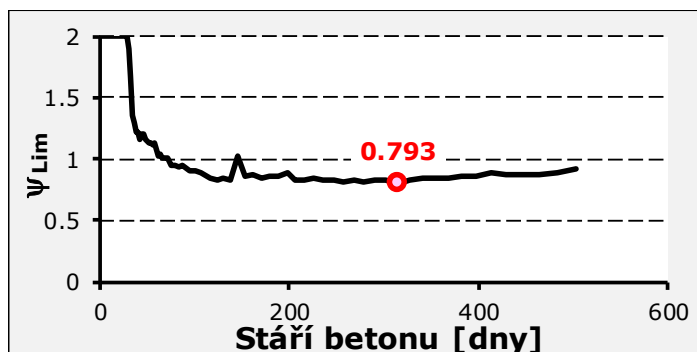
Jedním z cílů disertační práce bylo nalézt způsob, jak určit hodnotu různých betonů z hlediska jejich odolnosti proti vzniku smršťovacích trhlin a následně betony vzájemně porovnat. Jako nejvýstižnější řešení se jevílo porovnávat betony pomocí autorem definovaného tzv. „kritického stupně omezení“ (*critical degree of restraint*) – ψ_{cr} .

Hodnota ψ_{cr} určuje maximální možné omezení deformace betonu při smršťování, při kterém v betonu nevznikne trhлина. Jinými slovy, hodnota vynucených napětí bude po celou dobu životnosti betonového konstrukčního prvku nižší než odpovídající tahová pevnost betonu právě při stupni omezení ψ_{cr} . Teoreticky, pokud ψ_{cr} je větší nebo rovné 1.0, neměla by v betonu nikdy vzniknout smršťovací trhлина, a to ani při dokonalém upnutí prvku. Naopak, čím menší je ψ_{cr} , tím je větší náchylnost betonu ke vzniku smršťovacích trhlin.

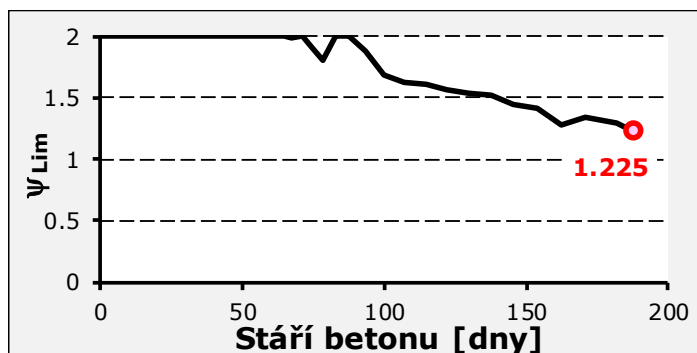
Kritický stupeň omezení deformace byl vyhodnocen pro všechny tři testované betony. Mělo by být poznamenáno, že v následujících grafech nejsou z důvodu přehlednosti vykresleny hodnoty ψ_{Lim} větší než 2, které jsou aktuální pouze u velmi „mladých“ betonů.



Obr. 5.1 Kritický stupeň omezení betonu C-Ref



Obr. 5.2 Kritický stupeň omezení betonu C-Opt



Obr. 5.3 Kritický stupeň omezení betonu C-Fiber

U betonu *C-Ref* nastal kritický stupeň omezení v čase 226 dní od výroby betonu. Jeho hodnota je 0.605. Od tohoto okamžiku hodnota ψ_{Lim} vlivem relaxace nepatrně narůstá. Proto hodnota ψ_{cr} zůstane i v delším časovém horizontu beze změny.

U betonu *C-Opt* nastal kritický stupeň omezení v čase 314 dní od výroby betonu. Jeho hodnota je 0.793. Stejně jako v případě *C-Ref* i u betonu *C-Opt* lze z trendu smršťování předpokládat, že hodnota ψ_{cr} zůstane i v delším časovém horizontu beze změny.

U betonu *C-Fiber* nastal kritický stupeň omezení v čase 188 dní od výroby betonu. Jeho hodnota je 1.225. Nicméně z trendu smršťování lze předpokládat, že se hodnota ψ_{cr} bude ještě významně snižovat.

Ze získaných výsledků lze konstatovat, že nejvyšší hodnotu betonu z hlediska jeho odolnosti proti vzniku smršťovacích trhlin dosahují vzorky vyrobené z betonu *C-Fiber*. Ačkoliv se bude u tohoto betonu ještě ψ_{cr} pravděpodobně snižovat, lze předpokládat, že finální hodnota ψ_{cr} bude vyšší, než u betonu *C-Opt* a *C-Ref*. Toto tvrzení vyplývá ze srovnání hodnot ψ_{Lim} v čase 188 dní, kdy u betonu *C-Ref* a *C-Opt* byly hodnoty ψ_{Lim} 0.62 a 0.84.

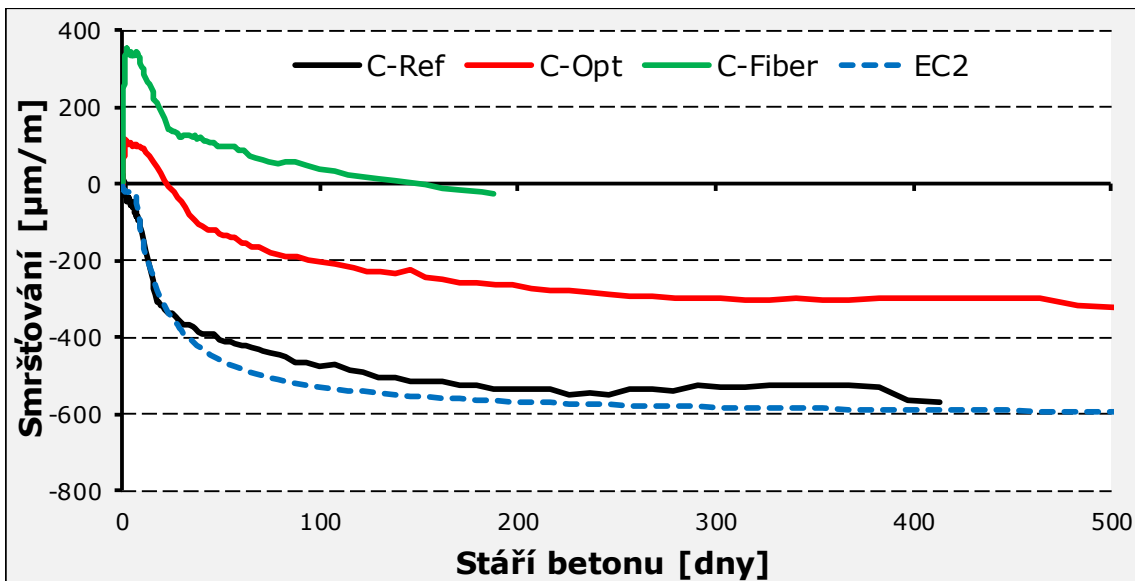
6 UPŘESNĚNÍ REOLOGICKÝCH MODELŮ

V rámci disertační práce bylo provedeno srovnání naměřeného smršťování i dotvarování s vybranými reologickými modely:

- S modelem uvedeným v ČSN EN 1992-1-1 (Eurokódu 2) [14],
- s modelem B4 (navrženým prof. Bažantem) [16].

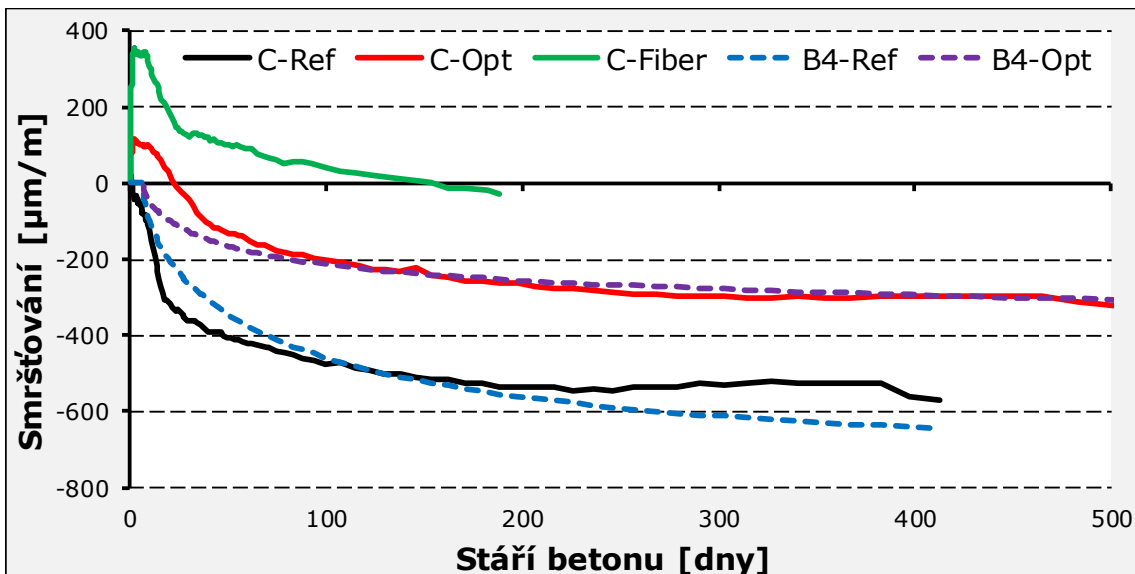
6.1 PREDIKCE SMRŠŤOVÁNÍ

Porovnání naměřených hodnot smršťování s modelem podle Eurokódu 2 je na Obr. 6.1. Eurokód predikuje pro všechny tři testované typy betonů jednotný průběh smrštění v čase. To je dáno tím, že se speciální beton *C-Opt* odlišuje od betonu *C-Ref* pouze přidáním protismršťovací a expanzní přísady. A beton *C-Fiber* se od betonu *C-Ref* liší přidáním nejen protismršťovací a expanzní přísady, ale také přidáním polypropylenových vláken. Přidání vláken a přísad má zásadní vliv na vývoj smršťování. Nicméně tyto aktivní složky nejsou Eurokódem žádným způsobem zohledněny. Norma tedy vystihuje velmi dobře pouze chování betonu *C-Ref*, jehož kompozice neobsahuje žádné speciální složky. Proto je Eurokód vhodný pouze pro běžné betony, ale naopak pro predikci smršťování v případě speciálních betonů jeho využití nedoporučujeme.



Obr. 6.1 Smršťování zkoumaných betonů podle Eurokódu 2 a naměřené hodnoty

Porovnání naměřených hodnot smršťování s predikcí podle modelu B4 je na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 Smršťování zkoumaných betonů podle modelu B4 a naměřené hodnoty

„Základní“ vstupní hodnoty jsou relevantní zejména pro běžné betony. V našem případě běžnému betonu odpovídá beton C-Ref. To dokazují data na Obr. 6.2, kde se predikce označená jako B4-Ref poměrně dobře shoduje s naměřenými hodnotami u betonu C-Ref. Pro ostatní testované betony je nutné upravit vstupní data pro model B4. Ten umožňuje aktualizaci predikce smršťování pomocí tzv. opravných součinitelů (*scaling factors*), které závisí na množství a typu přísad. Literatura [16] poskytuje doporučené hodnoty opravných součinitelů pro různé druhy přísad a jejich množství. Nicméně nepostihuje vliv protismršťovací a expanzní přísady ani vliv vláken. Proto jsme museli provést detailní testování účinku opravných součinitelů na průběh smršťování. Výsledkem testování je velmi dobrá shoda predikce (označená B4-Opt)

s naměřenými hodnotami u betonu *C-Opt*, viz Obr. 6.2. Hledání opravných součinitelů pro predikci smršťování betonu s vlákny *C-Fiber* bylo odloženo. Do současné doby máme velmi krátkou dobu měření a stanovovat hodnoty součinitelů na základě krátkodobého sledování nepovažujeme za správné.

Pro predikci *B4-Opt* jsme našli tyto opravné součinitele vystihující chování testovaného betonu, o které může být model B4 [16] nově doplněn:

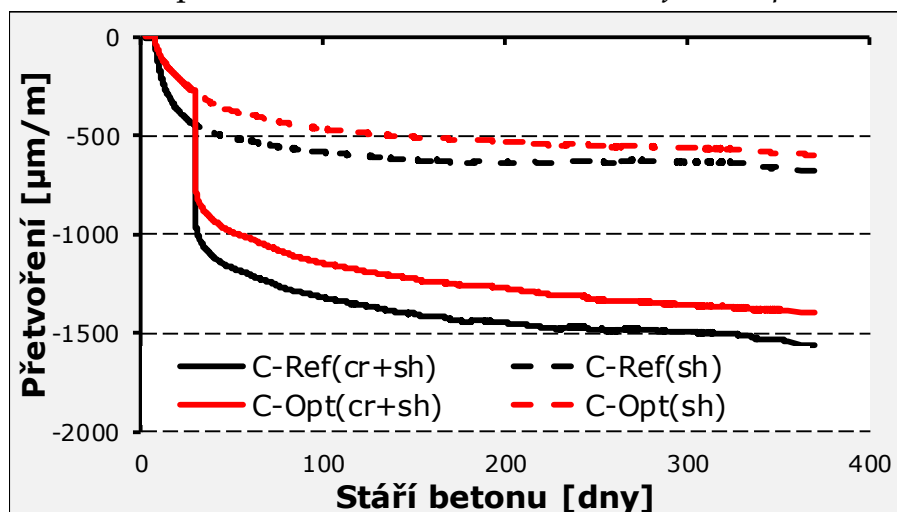
- $\times \tau_{cem} \rightarrow 4.0,$
- $\times \epsilon_{au,cem} \rightarrow 5.0,$
- $\times r_{\epsilon w} \rightarrow 0.2,$
- $\times r_{\alpha} \rightarrow 0.5.$

Je nutné poznamenat, že model B4 je schopný zachytit také nabývání betonu. Nicméně nebylo možné nalézt takovou kombinaci opravných součinitelů zachycující námi naměřenou expanzi u betonu *C-Opt*, která by během prvních 20 dní zrání zcela vymizela.

6.2 PREDIKCE DOTVAROVÁNÍ

V rámci výzkumu bylo experimentálně měřeno dotvarování u vzorků z referenčního betonu (*C-Ref*) a optimalizovaného betonu bez vláken (*C-Opt*).

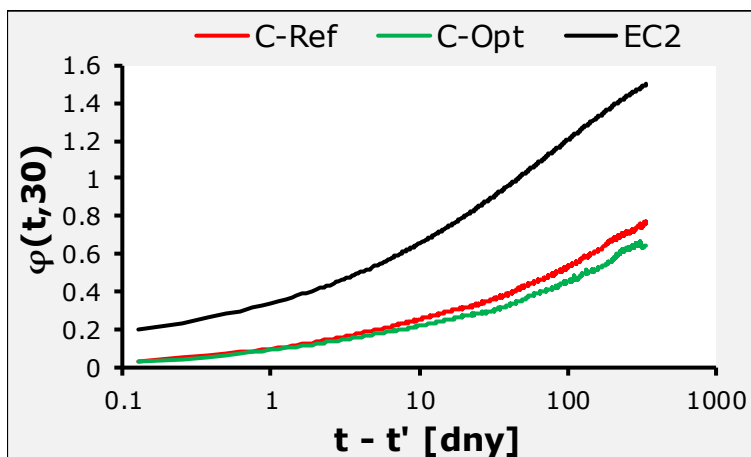
Naměřené hodnoty přetvoření zatížených a nezatížených vzorků jsou patrné z Obr. 6.3. Plná čára reprezentuje vzorky umístěné do lisu ve stáří betonu 30 dní. Čárkovaně je zobrazen průběh smršťování vzorků *C-Ref* a *C-Opt*.



Obr. 6.3 Sledování dotvarování betonů *C-Ref* a *C-Opt*

Závislost součinitele dotvarování na době trvání zatížení ($t-t'$) je patrná z Obr. 6.4. Zde je zobrazen naměřený vývoj součinitele a jeho predikce podle Eurokódu 2. Hod-

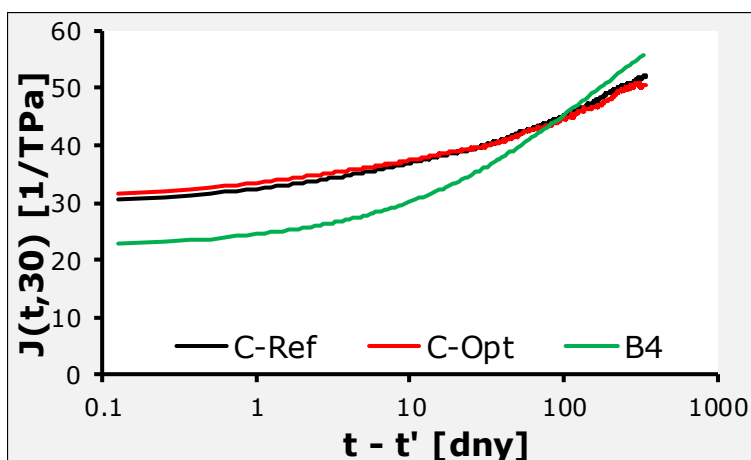
nota naměřeného součinitele dotvarování vychází z poměru mezi poměrným přetvořením od dotvarování a okamžitým pružným poměrným přetvořením, které je vyvozené zatížením vzorku.



Obr. 6.4 Součinitel dotvarování C-Ref a C-Opt (naměřený a vypočtený)

Eurokód predikuje pro oba testované typy betonů jednotný průběh dotvarování v čase. To odpovídá skutečnosti, jelikož oba testované betony vykazují téměř totožný vývoj dotvarování. Nicméně z Obr. 6.4 je zřejmé, že dotvarování podle Eurokódu 2 je významně vyšší než skutečné dotvarování zkoumaných kompozitních materiálů. Navíc, odchylka predikce od skutečného chování narůstá s přibývajícím dobou trvání zatížení. Model dotvarování uvedený v Eurokódu 2 je „uzavřený“. To znamená, že neposkytuje postup pro aktualizaci na základě naměřených hodnot, stejně jako u modelu pro predikci smršťování.

Závislost funkce poddajnosti na době trvání zatížení ($t-t'$) je patrná z Obr. 6.5. Zde je zobrazen naměřený vývoj funkce poddajnosti a její predikce podle modelu B4. Hodnota naměřeného vývoje funkce poddajnosti byla stanovena z naměřených hodnot celkového přetvoření od zatížení a hodnoty napětí aplikovaného v okamžiku zatížení (t').



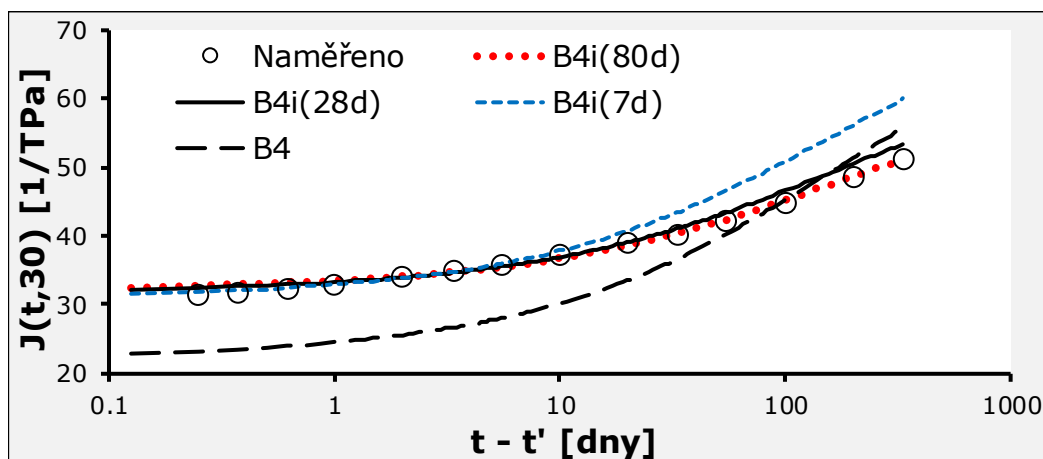
Obr. 6.5 Funkce poddajnosti C-Ref a C-Opt (naměřená a vypočtená)

Model B4, rovněž jako Eurokód, predikuje pro oba testované typy betonů jednotný průběh dotvarování v čase. To odpovídá skutečnosti, jelikož oba testované betonu vykazují téměř totožný vývoj funkce poddajnosti. Nicméně z Obr. 6.5 je zřejmé, že dotvarování podle B4 je významně nižší než skutečné dotvarování během prvních dní od zatížení vzorků. Na rozdíl od Eurokódu se ale hodnota predikce postupně přibližuje ke skutečnému chování s přibývajícím dobou působení zatížení. A od okamžiku 100 dní již model B4 nepatrně nadhodnocuje míru skutečného dotvarování.

Model B4 umožňuje aktualizaci dotvarování dvěma způsoby:

- Pomocí extrapolace naměřených hodnot $J(t, t')$,
- pomocí opravných součinitelů (*scaling factors*).

Porovnání skutečného vývoje funkce poddajnosti s upraveným modelem B4 je na Obr. 6.6. Zde jsou zobrazeny naměřené hodnoty, hodnoty vypočtené podle modelu B4 „neaktualizovaného“, a hodnoty podle aktualizovaného modelu: $B4i(80d)$, $B4i(28d)$, $B4i(7d)$.

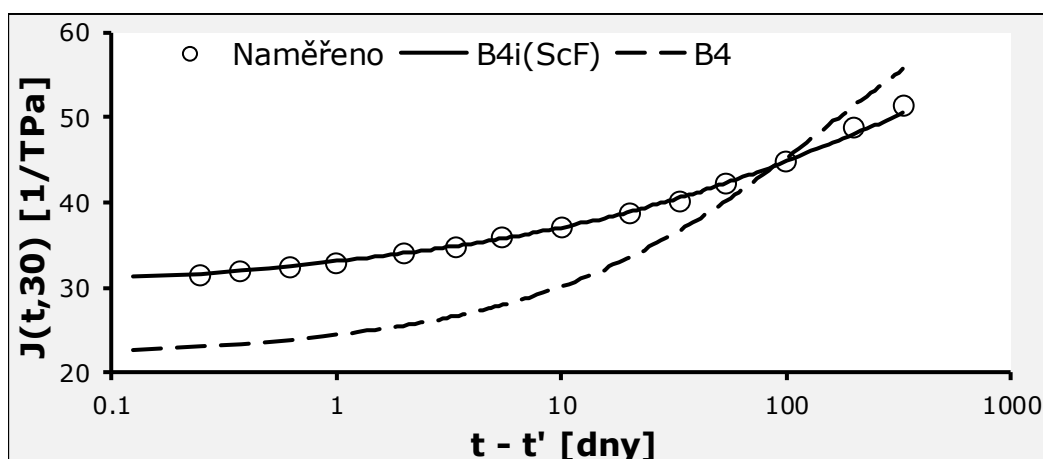


Obr. 6.6 Aktualizace modelu B4 pro predikci dotvarování na základě naměřených hodnot

Je patrné, že pomocí aktualizace byl predikční model výrazně zpřesněn. Z Obr. 6.6 vyplývá, že je dostačující sledovat beton 28 dní k relativně přesnému vystihnutí dotvarování podle modelu B4.

Zpřesnění predikce dotvarování model B4 umožňuje také pomocí opravných součinitelů. Literatura [16] poskytuje sadu opravných součinitelů na základě množství a druhu použitých přísad do betonu. Nicméně, v poskytnutých datech absentuje vliv protismršťovací a expanzní přísady, které jsme použili pro výrobu námi sledovaných betonů. Z naměřených hodnot (Obr. 6.5) je ale patrné, že vliv těchto přísad lze zanedbat. I přes to je nutné do modelu B4 zavést opravné součinitele, aby predikce přesněji vystihovala skutečné chování. Provedli jsme tedy detailní testování účinku opravných součinitelů na průběh dotvarování. Výsledkem testování je velmi dobrá

shoda predikce, označená v obrázku $B4i(ScF)$, s naměřenými hodnotami, viz Obr. 6.7.



Obr. 6.7 Aktualizace modelu B4 pro predikci dotvarování pomocí opravných součinitelů (scaling factors)

Pro predikci dotvarování jsme našli tyto opravné součinitele vystihující chování testovaného betonu (oprava koeficientu τ_{cem} byla převzata z predikce smršťování), o které může být doplněn model B4 [16].

- $\times \tau_{cem} \rightarrow 4.0$,
- $\times p_2 \rightarrow 1.8$,
- $\times p_3 \rightarrow 5.2$,
- $\times p_4 \rightarrow 0.58$,
- $\times p_5 \rightarrow 0.25$.

Množství naměřených dat není statisticky natolik významné, aby umožnilo jednoznačně hodnotit míru přesnosti predikce dotvarování jak podle Eurokódu 2, tak i podle modelu B4. Nicméně z naměřených hodnot vyplývá, že dotvarování obou testovaných betonů je poměrně jednotné. Proto můžeme i při aktuálním množství dat konstatovat, že přidání protismršťovací a expanzní přísady nemá zásadní vliv na vývoj dotvarování.

7 ZÁVĚRY Z ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Disertační práce je zaměřena na popis chování kompozitů z hlediska jejich odolnosti proti vzniku smršťovacích trhlin. Laboratorní a experimentální práce byly nejdříve zahájeny na mikro-betonech s ohledem na možnost zvýšení počtu měření a zvýraznění projevů zájmové oblasti, tj. smršťování. Následně byly získané poznatky na úrovni mikro-betonů aplikovány a dále rozšířeny při zkoumání betonů s maximálním zrnem kameniva 22 mm a také při zkoumání vláknobetonů. Veškeré získané poznatky a výsledky mohou být v zásadě rozděleny do dvou odlišných skupin.

První skupina výsledků zahrnuje vlastní vývoj a ověření použitelnosti unikátní metodiky umožňující v čase sledovat nejen proces smršťování, ale také simultánně vyhodnocovat vývoj vynucených napětí i proces vývoje odporu betonu vůči jeho porušení trhlinami od smršťování. Nová metodika je v textu nazvaná jako **Komplexní experiment**. Jedná se v podstatě o vhodné skloubení destruktivních a nedestruktivních metod zkoušení betonu, jejichž výsledky jsou vzájemně propojeny a dále interpretovány pomocí korelační a TDA analýzy. Postup umožňuje predikovat kdy a zda vůbec se smršťovací trhliny ve zkoumaném betonu či prvku z něj vyrobeného objeví. Podrobněji lze hlavní získané poznatky první skupiny výsledků shrnout do následujících bodů:

- Při výpočtu vynucených napětí musí být zohledněna historie namáhání (průběh smršťování) s ohledem na dotvarování (resp. relaxaci) betonu. Přesný výpočet byl proveden pomocí metody časové diskretizace – TDA. Vypočtené hodnoty napětí pomocí TDA byly mj. využity k odvození součinitele χ uplatňujícího se při výpočtu napětí zjednodušenou metodou efektivního modulu závislého na čase – AEMM. Získané výsledky ukazují, že hodnota χ nabývá hodnot v rozmezí 0.4 až 0.45 pro jakýkoliv vývoj smršťování. Dotvarování betonu při smršťování lze tedy zohlednit metodou AEMM, a to bez významné odchylky od přesného řešení.
- Dotvarování betonu v tahu lze uvažovat podle stávajících reologických modelů určených primárně pro výpočet dotvarování tlačných prvků. Toto tvrzení bylo nepřímo ověřeno pomocí měření při Ring-testu. V této práci bylo dotvarování zohledněno podle modelu uvedeného v ČSN EN 1992-1-1 (Eurokódu 2).
- Betony lze mezi sebou porovnávat z hlediska jejich odolnosti proti vzniku smršťovacích trhlin pomocí autorem odvozeného parametru tzv. „**Kritického stupně omezení**“. Kritický stupeň omezení definuje hodnotu betonu právě z hlediska jeho odolnosti proti vzniku smršťovacích trhlin.
- Pro predikci smršťování speciálních betonů je autorem doporučen model B4, jelikož umožňuje zohlednit vliv přísad nebo příměsí pomocí opravných součinitelů (*scaling factors*). Nicméně model B4 v současné době neposkytuje součinitele vyjadřující dopad použití prostismršťovacích a expanzních přísad. Proto byly na základě laboratorního měření identifikovány a vyčísleny nové

součinitele, pomocí kterých již model B4 velmi dobře vystihuje skutečný vývoj smršťování betonu s obsahem protismršťovací a expanzní přísady.

- Bylo ověřeno, že protismršťovací a expanzní přísada zásadně neovlivňují do-
tvarování betonu.

Druhá, neméně významná skupina výsledků zahrnuje obecné poznatky o smršťování betonů. Byl prokázán příznivý vliv protismršťovací a expanzní přísady a také příznivý vliv polypropylenových vláken. Byla nalezena optimalizovaná receptura betonu, která je ve srovnání s běžným betonem až dvakrát odolnější proti vzniku smršťovacích trhlin.

Jedním ze stěžejních výstupů této práce je postup pro vyčíslení kritického stupně omezení deformace při smršťování betonu. Pokud je tento stupeň omezení větší než stupeň omezení deformace prvku v konstrukci, neměly by v betonu v dané konstrukci vzniknout smršťovací trhliny. Vyčíslení stupně omezení deformace při smršťování u různých reálných konstrukcích (např. vlivem vnějších vazeb) již není součástí této práce. Má-li být vyvinutá metodika plně využitelná při navrhování reálných konstrukcí, je nezbytné související znalosti ještě doplnit.

8 LITERATURA

- [1] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: ČKAIT, 2009, 344 s. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [2] HOLT, Erika E. *Early age autogenous shrinkage of concrete*. Espoo: Technical Research Centre of Finland, 2001. ISBN 951-38-5870-7.
- [3] NAVRÁTIL, Jaroslav. *Předpjaté betonové konstrukce*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-561-7.
- [4] MOON, J-H., F. RAJABIPOUR, B. PEASE and J. WEISS. Quantifying the influence of Specimen Geometry on the Results of the Restrained Ring Test. *Journal of ASTM International*. **3**(8), 2006. DOI: 10.1520/JAI100436. www.astm.org
- [5] COPE, J. L., CANNON, R. W., ABDUN-NUR, E. A., et al. Effect of Restraint, Volume Change, and Reinforcement on Cracking of Mass Concrete. *ACI Materials Journal*. 2002.
- [6] ALTOUBAT, S. A., LANGE, D. A. Creep, shrinkage, and cracking of restrained concrete at early age. *ACI Materials Journal*. **98**(4), pp. 323-331, Springer Netherlands, 2001.
- [7] KOVLER, K. Testing system for determining the mechanical behavior of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage. *Materials and structures*. 1994. DOI: 10.1007/bf02473424.
- [8] KUCHARCZYKOVÁ, B., a kol. *Standardní operační postup pro stanovení smršťování a nabývání betonu*. Standardní operační postup 01/09. Ústav stavebního zkušebnictví, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, 2010.
- [9] WEISS, W. J., YANG, W. and S. P. SHAH. Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *ASCE Journal of Engineering Mechanics*. **124**(7) pp. 765-774, 1998. ISSN: 0733-9399.
- [10] HOSSAIN, A. B. and J. WEISS. The role of specimen geometry and boundary conditions on stress development and cracking in the restrained Ring test. *Cement and Concrete Research*. **36**(1), pp. 189-199, Hong Kong: Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.043.

- [11] ASTM Standard C1581. *Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage*. ASTM International. 2004. DOI: 10.1520/C1581_C1591M-09A. www.astm.org.
- [12] MOON, J. H. and J. WEISS. Estimating residual stress in the restrained Ring test under circumferential drying. *Cement and Concrete Composites*. **28**(5), pp. 486-496, Kidlington: Elsevier, 2006.
- [13] AASHTO T 334-08. *Standard Method of Test for Estimating the Cracking Tendency of Concrete*. American Association of State and Highway Transportation Officials, 2008.
- [14] ČSN EN 1992-1-1. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha: Český normalizační institut. 2006. 210 s.
- [15] ČSN EN 1992-2. *Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – Navrhování a konstrukční zásady*. Praha: Český normalizační institut. 2007.
- [16] BAŽANT, Z. P., HUBLER, M. H. and R. WENDNER. Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability. TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis. *Materials and Structures*. **48**(4), pp. 753-770, 2015. DOI: 10.1617/s11527-014-0485-2.
- [17] KOVLER, K. A New Look at the Problem of Drying Creep of Concrete under Tension. *Journal of Materials in Civil Engineering*. **11**(1), pp. 84-87, 1999.
- [18] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. Praha. Český normalizační institut. 2009.
- [19] ČSN EN 12350-5. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 5: Zkouška rozlitím*. Praha. Český normalizační institut. 2009.
- [20] ČSN EN 12390-5. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut. 2009. 10 s.
- [21] ČSN EN 12390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut. 2010. 11 s.
- [22] ČSN 73 1371. *Nedestruktivní zkoušení betonu – Ultrazvuková impulzová metoda zkoušení betonu*. Praha: Český normalizační institut. 2011.

- [23] ČSN EN 12390-13. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 13: Stanovení modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut.
- [24] ČSN ISO 6784. *Beton – Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku*. Praha: Český normalizační institut. 1993.
- [25] KOCÁB, D., MISÁK, P., CIKRLE, P., KOMÁRKOVÁ, T., MORAVCOVÁ, B.: Statický modul pružnosti betonu v tlaku dle ČSN ISO 6784 a ČSN EN 12390-13, *Beton TKS 3/2014*, s. 74-79, ISSN: 12133116.
- [26] Fédération internationale du béton. Task Group 8.2. *Constitutive modelling of high strength/high performance concrete: state-of-art report*. Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib), 2008. FIB bulletin, 42. ISBN 978-2-88394-082-6.
- [27] GRIBNIAK, V., KAKLAUSKAS, G., BACINSKAS, D.: Shrinkage in Reinforced Concrete Structures: A Computational Aspect. *Journal of civil engineering and management*. **14**(1), pp. 49-60, 2008.
- [28] BAŽANT, Z. P., BAWEJA, S. Creep and shrinkage prediction model for analysis and design of concrete structures – model B3. *Materials and Structures*, 1995, **28**(180), 357-365.
- [29] HOSSAIN, A. B. and J. WEISS. Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete Ring specimens. *Cement and Concrete Composites*. **26**(1), pp. 189-199, Hong Kong: Elsevier, 2006. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.06.043
- [30] NAVRÁTIL, J. Structural analysis of bridges, legitimate conservatism and obsolete theories. *Concrete Engineering International*. **8**(1), pp. 17-19, 2004.
- [31] KRATOCHVÍL M., TERZIJSKI I., KADLEC J., ZVOLÁNEK L.: *Autogenní smršťování a jeho měření od okamžiku uložení betonu*, *Beton TKS 3/2014*, s. 64-67, ISSN: 12133116.
- [32] ACKER, P., BAŽANT, Z. P., CHERN, J. C., HUET, C., WITTMANN, F. H. Measurement of time-dependent strains of concrete (prepared by subcommittee 4 of RILEM Committee TC 107-CSP). *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*. **31**(212), pp. 507-512, 1998.

- [33] BAŽANT, Z. P., Yu, Q., Li, G., KLEIN, G. J., & KRÍSTEK, V. (2010). Excessive deflections of record-span prestressed box girder. *Concrete International*. **32**(6), pp. 44-52, 2010.
- [34] ZDENĚK P. BAŽANT. Prediction of Concrete Creep Effects Using Age-Adjusted Effective Modulus Method. *ACI Journal Proceedings*. **69**(4), pp. 212-219, 1972. DOI: 10.14359/11265. ISSN 0002-8061.
- [35] Thienel. K.-Ch., Kustermann A., *Sonderbetone Faserbeton*. Institut für Werkstoffe des Bauwesens, München, 2010.

9 VÝBĚR VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOSTI

- [1] ZVOLÁNEK, L., TERZIJSKI, I. Methods Considering the Concrete Creep due to Shrinkage, příspěvek na konferenci *Solid State Phenomena*, ISSN 1662-9795, Trans Tech Publications, Switzerland, 2017.
- [2] ZVOLÁNEK, L., TERZIJSKI, I. Relaxation of Structural Concrete due to its Shrinkage in Terms of Age-adjusted Effective Modulus Method, příspěvek na konferenci *International Conference on Material Science and Engineering Technology*, ISSN 1662-9779, Trans Tech Publications, Switzerland, 2017.
- [3] ZVOLÁNEK, L., TERZIJSKI, I., KADLEC, J. Vliv dotvarování mladého betonu na velikost vynucených napětí, článek v *Beton TKS*, ISSN 1213-3116, BETON TKS, s.r.o., Praha, 2016.
- [4] ZVOLÁNEK, L., KRATOCHVÍL, M., TERZIJSKI, I., KADLEC, J. Experimental Evaluation of Residual Stresses in the Concrete, příspěvek na konferenci *Advanced Engineering Technology II*, ISSN 1660-9336, ISBN 978-3-03835-680-6, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.
- [5] ZVOLÁNEK, L., TERZIJSKI, I. Concrete Resistance to Cracking due to Shrinkage, příspěvek na konferenci *Solid State Phenomena*, ISSN 1662-9779, Trans Tech Publications, Switzerland, 2016.
- [6] ZVOLÁNEK, L.; TERZIJSKI, I.; KRATOCHVÍL, M.; KADLEC, J., Experimental Investigation of Residual Stress in the Concrete Caused by Volume Changes with Consideration of Environment Effect, příspěvek na konferenci *Solid State Phenomena*, ISSN 1662-9779, Trans Tech Publications, Switzerland, 2015.
- [7] ZVOLÁNEK, L.; NAVRÁTIL, J. The Analysis of Joint Design of Composite Concrete Sections According to EN 1992-1-1, příspěvek na konferenci *Young Scientist 2014*, ISBN 978-80-553-1668-0, Technical University of Košice, Faculty of Civil Engineering, Herľany, 2014.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje |

📍 Stanoviště 78, Zastávka 664 84, Česká republika

☎ +420 721318955

✉ lukas.zvolanek@gmail.com

🌐 <http://www.fce.vutbr.cz/BZK/zvolanek.l/>

🎂 nar. 11. 5. 1988 v Ivančicích

ING. LUKÁŠ ZVOLÁNEK

Dosažené vzdělání | 2011–2013 **Magisterské studium** – s vyznamenáním
VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, Veveří 331/95
Obor konstrukce a dopravní stavby
Diplomová práce: Most přes Lochkovské údolí.
Vedoucí: prof. Ing. Jiří Stráský, DSc.
1. místo v soutěži ČKAIT
2. místo v soutěži o nejlepší diplomovou práci (TOP EXPO)

2007–2011 **Bakalářské studium** – s vyznamenáním
VUT v Brně, Fakulta stavební, Brno, Veveří 331/95
obor konstrukce a dopravní stavby
Bakalářská práce: Návrh železobetonového mostu.
Vedoucí: Ing. Miloš Zich, Ph.D.

Jazykové znalosti | English – upper intermediate
Deutsch – Beginner

Praxe | **2009+**
SHP, s.r.o. – Statik

2011–2015
Pheif Engineering, Inc. – Konstruktor
Ann Battelle Bool, Inc. – Kreslič

2007–2009
Interplan-CZ, s.r.o. – Kreslič, konstruktor

ABSTRACT

This doctoral thesis deals with the volume changes of structural concrete caused by its shrinkage. Great importance is given to the evaluation of concrete resistance against shrinkage cracking, too. A lot of physical and numerical experiments were carried out before results and conclusion of observed phenomena was publicized. The amount of physical tests and utilization rate of the experiments can be enlarged and intensified due to the usage of materials made of micro-concrete. Consequently, the design of concrete mixtures with the ordinary size of aggregate particle reflected the large knowledge obtained by micro-concrete. In this work, the effect of different fibres and its different amount was also researched. Finally, the optimized fibre concrete mixture was designed. During the testing, the unique method referred to as "Complex experiment" was developed. Obtained data from the Complex experiment allows predicting when the shrinkage cracks may occur. The final comparison between all tested materials made of concrete was performed by means of unique parameter referred to as "Critical degree of restraint". It was proofed that the resistance of optimized fibre concrete against to shrinkage cracking is twice of ordinary concrete. Moreover, the shrinkage cracks did not occur in the developed fibre concrete during the observed period. Based on the obtained results the new scaling factors for the rheological model B4 were derived. Due to the new scaling factors, the model B4 describes the real behavior of special composite materials very well.

