

# VYHODNOCENÍ MĚŘENÍ SMRŠŤOVÁNÍ A DOTVAROVÁNÍ PATENTOVANÉ SMĚSI UHPC OŠETŘOVANÉ TEPLOTOU

Vladimír Příbramský, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
vladimir.pribramsky@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

V tomto příspěvku je uveden popis a vyhodnocení experimentálního ověření reologických vlastností patentované směsi UHPC ošetřované různými scénáři za zvýšené teploty a ve vodním prostředí. Pro vyhodnocení je uveden možný přístup za použití modifikovaného modelu B4. Model B4 pro predikci efektů smršťování a dotvarování je v současnosti považován za nejpokročilejší materiálový model, který je založen na velmi dobré shodě s velkým množstvím jak experimentálních měření, tak i měření na realizovaných konstrukcích. Z hlediska použití pro predikci chování ultra vysokohodnotného betonu (UHPC) se jeví být model B4 nanejvýš vhodný, neboť popisuje dlouhodobé chování betonu na základě množství použitých příměsí a dále také uvažuje s možností zahřívání čerstvého betonu pro urychlení hydratace v průběhu ošetřování. Současný model B4 má řadu limitujících podmínek, které UHPC svými vlastnostmi často výrazně překračuje. V tomto článku jsou tyto limity modelu B4 identifikovány a je představena adaptace modelu B4 pro použití na směsi UHPC.

## KLÍČOVÁ SLOVA

UHPC • Dotvarování • Smršťování • Model B4 • Ošetřování teplotou

## ABSTRACT

In this paper the description and evaluation of results of experimental verification of rheological properties of patented mixture of UHPC is presented. The specimens were cured with various curing regimes including curing by an increased temperature and in a water saturated environment. For the evaluation of the results an adapted model B4 is used. Model B4 for creep and shrinkage prediction is currently the most advanced rheological material model based on great consistency with large set of experimental results and measurements on real structures and bridges. It seems to be viable for use for prediction of creep and shrinkage of ultra-high-performance concrete (UHPC) as it predicts long-term strains by incorporating effect of volume of additives and admixtures used in the fresh concrete. Model B4 also takes into effect thermal treatment of fresh concrete, which accelerates cement hydration in early age. Current model B4 has several limitations that are often

exceeded by characteristics of UHPC. In this paper, these limits are identified and viable adaptation of model B4 is presented.

## KEYWORDS

UHPC • Creep • Shrinkage • Model B4 • Heat treatment

## 1. REOLOGICKÉ VLASTNOSTI UHPC

V současné době neexistuje ucelený matematický model smršťování a dotvarování UHPC, modely a doporučení uvedené v německé, francouzské či japonské normě pro navrhování betonových konstrukcí využívají upravené modely pro běžný beton. Míru jejich přesnosti ovlivňuje velký vliv nejrůznějších činitelů, které reologické změny v betonu běžných tříd ovlivňují menší měrou, než je tomu u UHPC. Z hlediska smršťování je patrná dominance autogenní složky a rychlost hydratace (a její urychlení například ošetřováním zvýšenou teplotou) má ohromný vliv na nárůst a velikost autogenního smršťování a dotvarování v raných stádiích a eliminaci smršťování od vysychání. Dalším faktorem je ovlivnění míry dotvarování využitím rozptýlené výztuže z vysokopevnostní oceli.

### 1.1. Smršťování UHPC

UHPC je charakterizován velmi nízkým vodním součinitelem za současného použití superplastifikátoru a naprostá většina záměsové vody se ve struktuře udrží a je hydratací vázána v cementovém kameni. Při dostatečném ošetřování povrchu betonového prvku v raném stádiu je významně redukován následný vliv smršťování od vysychání a majoritní efekt má autogenní smršťování. Toto prokazují i zkoušky provedené v Německu (Burkart et al. 2008) při kterých bylo měřeno smršťování UHPC vzorků s průměrnou 28denní pevností 166 MPa. Celkové hodnoty smršťování byly porovnávány na vzorcích různých velikostí průměru 75-150 mm. Tvar prvků by v případě vzorků z běžného betonu měl vliv na rychlost nárůstu poměrného přetvoření zejména od smršťování vysycháním. Pro testované vzorky z UHPC je však rozptyl velmi malý, což potvrzuje majoritní efekt autogenního smršťování a nízký vliv náhradního rozměru prvku, který je poměrem mezi plochou a

\* Školitel: Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D.

obvodem průřezu a u betonu běžných tříd a pevností ovlivňuje významně rychlost nárůstu přetvoření od smršťování.

Podobná studie byla provedena i ve Francii na prvcích s 28denní pevností 188 MPa, přičemž pevnost ve 20 hodinách po betonáži byla naměřena 152 MPa (Francisco et al. 2012), avšak zde byly prvky vystaveny prostředí o 50% relativní vlhkosti ve velmi krátkém čase po betonáži. Výsledkem byl patrný vliv smršťování od vysychání, poměrné přetvoření od autogenního smršťování je srovnatelná s výsledky výše uvedené studie.

## 1.2. Dotvarování UHPC

V případě predikce přetvoření od dotvarování se jedná o podobný problém jako v případě predikce smršťování. Ve francouzské studii (Francisco et al. 2012) autoři stejně jako pro model smršťování modifikovali parametry modelu v Eurokódu a aproximovali svůj experiment velmi přesně za použití modifikovaného modelu v Eurokódu (EN 1992-2). Bohužel se jedná o izolovaný experiment a není možné jeho zobecnění při použití dalších aspektů ovlivňujících míru a rychlost nárůstu přetvoření od dotvarování.

Hlavní překážkou při definování univerzálního matematického modelu je současné ovlivnění míry přetvoření od dotvarování více aspekty, než je tomu v případě betonu běžné třídy. Jedná se zejména o použití drátků jako rozptýlené výztuže a nové metody ošetřování betonu zvláště vhodného pro použití na UHPC, tzv. „heat-treatment“. Tyto dva zásadní aspekty a jejich vliv na přetvoření od dotvarování bude detailněji popsán v následujících kapitolách.

## 2. OŠETŘOVÁNÍ UHPC ZVÝŠENOU TEPLOTOU

Stejně jako u dotvarování betonu běžné třídy je u UHPC významný vliv ošetřování betonu v raném stáří. Napařování povrchu betonu či umístění prvků do prostředí s relativní vlhkostí blízké 100 % snižuje až 4x celkovou míru zpožděné deformace od dotvarování ve srovnání s prvky vystavenými okolnímu prostředí již několik hodin po betonáži.

Novinkou a v současné době hojně zkoumanou a používanou metodou ošetřování prvků z UHPC je „heat-treatment“. Prostedí s teplotou mezi 60–90 °C a vysokou relativní vlhkostí je pro prvky z UHPC ideální pro rychlý postup hydratace a s tím spojeným zrychleným nárůstem pevnosti a přetvořením od autogenního smršťování. Ve studii (Graybeal et al. 2006) byl zkoumán vliv ošetřování betonu teplotou v různých stáří a bylo pozorováno, že nezávisle na času aplikace ošetřování teplotou se nárůst přetvoření od dotvarování zastavil po aplikaci ošetřování. Při teplotním ošetřování skokově vzrostla hodnota přetvoření na konečnou hodnotu a tam již dále nenarůstala na rozdíl od neošetřeného vzorku. Ošetřením se dosáhne dlouhodobé stálosti prvků pod provozním zatížením.

## 3. EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ NA PATENTOVANÉ SMĚSI UHPC

Pro detailní analýzu parametrů, které mají vliv na nárůst pevnosti betonu a jeho reologické vlastnosti byl ve spolupráci s Kloknerovým ústavem připraven a proveden experiment na 4 sadách vzorků ze stejné směsi UHPC. Receptura směsi je patentována Kloknerovým ústavem a dosahuje charakteristické 28denní pevnosti 140 MPa. Sady vzorků byly ošetřovány různým způsobem a ve vodním prostředí. Ošetřování bylo zahájeno po odbednění vzorků ve stáří 24 hodin a bylo ukončeno po dalších 24 hodinách. Mechanické vlastnosti byly vyhodnocovány na válcových vzorcích průměru 150 mm (modul pružnosti a tlaková pevnost) a na krychlích o hraně 100 mm (tlaková pevnost). Mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny v době po odbednění (1 den), po ukončení ošetřování (2 dny) a po 7 a 28 dnech od betonáže.

Ošetřování zvýšenou teplotou bylo prováděno ve vodním prostředí v kádích, kde byla udržována teplota pomocí ponorných ohříváčů spínaných automaticky teplotním čidlem umístěným v kádi.

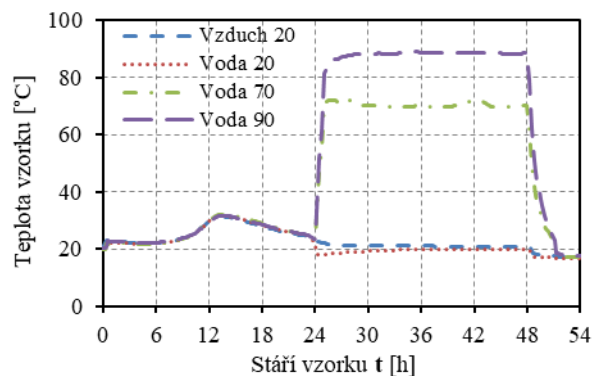


Obr. 1: Sada vzorků v průběhu ošetřování.

Z hlediska způsobu ošetřování byly měřeny 4 sady vzorků:

- Neošetřované vzorky umístěné po odbednění na vzduchu při pokojové teplotě. Tyto vzorky jsou dále uváděny pod označením „Vzduch 20“.
- Vzorky ponořené do vodního prostředí o pokojové teplotě po dobu 24 hodin („Voda 20“).
- Vzorky ponořené do vodního prostředí o teplotě 70 °C po dobu 24 hodin („Voda 70“).
- Vzorky ponořené do vodního prostředí o teplotě 90 °C po dobu 24 hodin („Voda 90“).

Průběh teploty vzorků před a v průběhu ošetřování je patrný na grafu níže. Při ošetřování sady „Voda 70“ byla průměrná teplota 70,6 °C a sady „Voda 90“ 88,0 °C.



Obr. 2: Průběh teploty vzorků při ošetřování.

Pro měření smršťování a dotvarování byly v každé sadě 3 trámký o rozměrech 70x70x300 mm. Trámký byly opatřeny strunovými tenzometry, které umožnily měření hodnot přetvoření již od okamžiku betonáže. V případě ošetřovaných vzorků muselo být měření přerušeno po dobu ošetřování, avšak teplota byla měřena přímo v kádích. Ihned po vyndání byly vzorky napojeny na centrálu pro záznam výsledků.



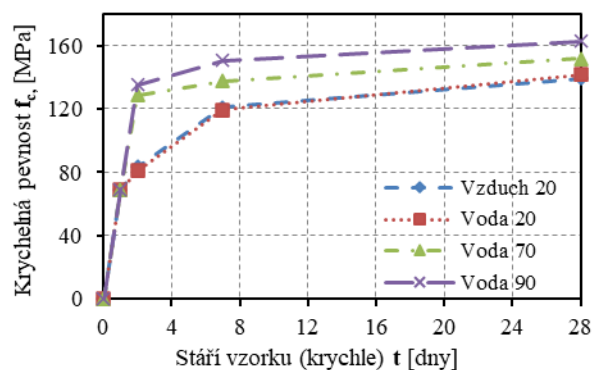
Obr. 3: Měření přetvoření vzorků po ukončení ošetřování.

Smršťování bylo měřeno z každé sady na 1 trámký, dotvarování na 2 trámkách, které byly umístěny dohromady do standů a ihned po vychladnutí po ošetřování byly zatíženy hydraulickým lisem silou 150 kN, což představuje 37 % průměrné tlakové pevnosti neošetřovaného vzorku naměřené v době 2 dnů po betonáži.



Obr. 4: Umístění trámků pro měření dotvarování do standů s pružinami.

Ošetřování zvýšenou teplotou ve vodním prostředí výrazně podporuje hydrataci, což je zřejmé z rychlého nárůstu pevnosti vzorků a také z rychlosti náběhu autogenního smršťování, jak bude ukázáno dále. Průměrná tlaková pevnost měřená na krychlich ošetřovaných 90 °C byla 135,1 MPa. Tato hodnota je velmi blízko průměrné 28denní pevnosti neošetřovaného vzorku, která byla 139,2 MPa. Nárůst pevností jednotlivých sad je zobrazeno na grafu níže. Zároveň je z grafu patrné, že samotné ošetřování bez zvýšené teploty nemá na nárůst pevnosti téměř žádný vliv.



Obr. 5: Závislost dopočteného modulu pružnosti na průměrné pevnosti betonu.

#### 4. MODEL B4

Nejmodernější a nejrozšířenější model pro popis reologického chování betonu je model B4, který vznikl v roce 2014 (Bažant et al. 2014). Model byl vyvinut rozšířením původního modelu B3 za účelem co možná nejpřesnějšího popisu dlouhodobých reologických změn u konstrukcí velkého významu, jako jsou například mosty velkých rozpětí (zavěšené, letmo betonované či sprážené), vysoké budovy, obaly reaktorů jaderných elektráren, přehrad, chladicí věže nebo velké skořepinové konstrukce. Pro takové konstrukce je nezbytný co možná nejpřesnější popis dlouhodobých vlastností betonu, aby byla možnost navrhnout konstrukce na základě reálného chování, pro zaručení použitelnosti těchto konstrukcí po celou dobu jejich dlouhé životnosti.

Model B4 je formulován na základě velkého množství měření a zkoušek, a to jak provedených v nedávné době, tak i publikovaných dříve. Model popisuje dotvarování a smršťování daleko komplexněji a se zahrnutím více vlivů; například uvažuje s vlivem složení betonové směsi, včetně uvažování efektů příměsí, a třídí betonové prvky do typů podle tvaru. Pro aplikaci na konstrukce z UHPC je nanejvýš výhodný i parametr zohledňující teplotu při hydrataci. Výhodou modelu je jeho neustálý vývoj na základě nových měření a zkoušek a relativně snadná možnost jeho adaptace pro popis chování betonu ze zkoušek provedených z konkrétního betonu (nebo parametrické studie), pro konkrétní projekt.

##### 4.1. Adaptace modelu B4

Jelikož model B4 vznikl pro popis chování betonu běžných tříd a složení, obsahuje definice modelu jistá omezení a definuje obor platnosti modelu. Z hlediska použití pro predikci chování

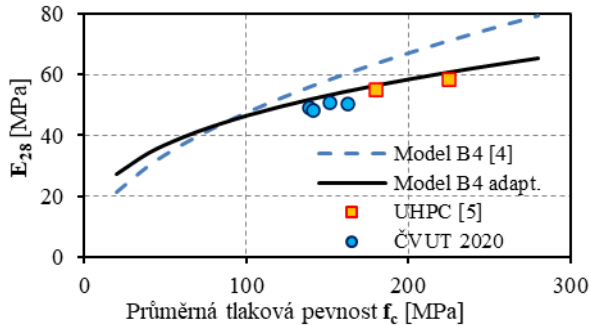
UHPC jsou důležité následující omezení (Bažant et al. 2014). Uvedeny jsou i použité modifikace pro použití s UHPC.

#### 4.1.1. Pevnost betonu

Omezení pevností betonu má vliv zejména na výpočet 28denního modulu pružnosti, pro UHPC, které pro níže uvedené směsi dosahuje pevností 140-220 MPa, model B4 nadhodnocuje velikost modulu pružnosti o cca 20 %.

$$15 \text{ MPa} \leq f_c \leq 70 \text{ MPa} \quad (1)$$

Modul pružnosti vysokopevnostního betonu je v modelu B4 určován z průměrné 28denní pevnosti betonu. Pro pevnost betonu nad 70MPa, je hodnota modulu pružnosti modelem B4 nadhodnocována, vhodnější se jeví přístup k určení modulu pružnosti UHPC uvedeným ve Fib Model kódu 2010 (MC10). V Model kódu je uvažován komplexnější přístup k určování modulu pružnosti včetně zohlednění různých typů plniva. Při porovnání byly použity limitní hodnoty z experimentů (Graybeal et al. 2006) a vlastní experimentálně získané hodnoty a obě sady vykazují dobrou shodu.



Obr. 6: Závislost dopočteného modulu pružnosti na průměrné pevnosti betonu

#### 4.1.2. Teplota při ošetřování

Jak již bylo uvedeno, ošetřování betonu zvýšenou teplotou má dominantní vliv na celkovou míru přetvoření od smršťování a dotvarování. Ošetřování teplotou až 90 °C významně překračuje uvedený obor platnosti modelu B4.

$$20 \text{ °C} \leq T_{cur} \leq 30 \text{ °C} \quad (2)$$

Z experimentů je patrný výrazně podhodnocení účinku teploty nad 50 °C, upravený výpočet parametru  $\beta_{Th}$  je patrný níže a obsahuje další exponenciální složku, která zajišťuje výrazná nárůst parametru při ošetřování teplotami až do 90°C.

$$\beta_{Th,opr} = \beta_{Th} + \exp\left(\frac{3 \cdot U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur} + 231}\right)\right) \quad (3)$$

Další účinek teplotního ošetřování je na parametr  $\beta_{Ts}$ , který popisuje vliv teploty na difúzi vlhkosti. Jelikož zrání betonu je významně akcelerováno, je nutné rozdělit složku vysychání betonu při ošetřování a vysychání po ukončení ošetřování.

#### 4.1.1. Vodní součinitel

Omezení velikosti vodního součinitele je zásadní materiálová charakteristika, která se používá jak pro určení celkového přetvoření od smršťování i dotvarování. Velmi malé množství záměsové vody v UHPC odpovídá hodnotě vodního součinitele

nižší, než je spodní limit modelu B4, rovněž je potřeba upravit poměr plniva a cementu.

$$0,22 \leq w/c \leq 0,8 \quad \text{a} \quad 1,0 \leq a/c \leq 13,2 \quad (4)$$

Vodní součinitel  $w/c$  má významný efekt na výpočet poměrného přetvoření zejména od autogenního smršťování a od dotvarování. UHPC je však velmi specifický materiál s vodním součinitelem 0,15-0,2. Konzistence UHPC je následně upravena použitím superplastifikátorů. Použití takto nízkého vodního součinitele však vede na řádovou neshodu predikovaných výsledků s experimenty. Je to způsobeno tím, že hydratace při extrémním nedostatku záměsové vody ponechá část cementu nehydratovaného. Tento cement působí jako jemnozrné plnivo. Způsob ošetřování zvýšenou teplotou má za následek urychlené zrání v prostředí vysoce nasycené vodou, což zajišťuje horká pára. Z experimentu je patrný transport vodních par z okolního prostředí do struktury betonu, kde napomáhá hydrataci cementu. Tento efekt je možné v modelu B4 zohlednit redukováním ve výpočtu použitým vodním součinitelem o efekt ošetřování vyjádřeného parametrem  $\beta_{Th}$ .

$$w/c = w/c_{min} - \frac{1}{250} \sqrt{\beta_{Th}} \quad (5)$$

Tuto tezi potvrzují i tlakové zkoušky na vzorcích ze shodné receptury. V úpravě parametru  $a/c$  (poměr plniva a cementu) je potřeba zahrnout podíl cementu, který se nezúčastní hydratace.

$$a/c = \frac{a+c - \frac{w}{w/c}}{\frac{w}{w/c}} \quad (6)$$

Jako složka plniva  $a$  je uvažována hmotnost všech složek betonové směsi s výjimkou vody, hydratujícího cementu a superplastifikátoru, přičemž vyšší množství plniva omezuje projevy autogenního smršťování a dotvarování.

## 4.2. Úprava výpočtu přetvoření od vysychání

Z provedených experimentů je jednoduchý závěr, a tím je, že u UHPC se projevuje velmi nízká míra přetvoření od vysychání. V modelu B4 závisí konečná hodnota smršťování od vysychání kromě složení betonu hlavně na rozdílu 100 % a RH (relativní vlhkosti) okolí, a to za použití součinitele vlivu vlhkosti:

$$r_h = 1 - h^3 \quad \text{pro} \quad h \leq 0,98 \quad (7)$$

Při relativní vlhkosti větší než 98 % dochází dále dle modelu k bobtnání. U UHPC dochází zejména při ošetřování k téměř plné hydrataci záměsové vody, a i vody použité při ošetřování a ve struktuře UHPC tedy zbývá velmi málo vody, která by mohla uniknout vysycháním a zejména s rychlou hydratací je spojen i rapidní pokles relativní vlhkosti uvnitř mladého UHPC, a to až na teoretickou úroveň nižší, než je vlhkost okolního prostředí. Navrhovaná úprava modelu spočívá v definici  $h_c$ , což reprezentuje relativní vlhkost ve struktuře betonu jako funkci  $w/c$ . Pozměněný vztah (8) je uveden níže.

$$r_h = 1 - (h + (1 - h_c))^3 \quad \text{a zároveň} \quad r_h \geq 0 \quad (8)$$

V této oblasti a zejména pro UHPC není k dispozici dostatečné množství dat, většina studií konstatuje, že ke smršťování vysycháním v případě UHPC nedochází. Z použitých zdrojů jsou patrné mírné projevy smršťování vysycháním pouze ve francouzské studii (Francisco et al. 2012). Na základě této studie a studie z USA (Graybeal et al. 2006) byla odhadnuta závislost

parametru  $h_c$  na  $w/c$ . Pro beton běžné třídy zůstává model B4 po modifikaci konzistentní.

## 5. KALIBRACE MODELU B4

Pro predikci přetvoření od smršťování model B4 nabízí několik sad součinitelů příměsí, v případě UHPC se jedná o sadu součinitelů buď při použití superplastifikátoru nebo křemičitého úletu, ale ne obou složek najednou. UHPC svou recepturou odpovídá oběma podmínkám, přičemž součinitele samotné se výrazně odlišují. Součinitele pro smršťování jsou uvedeny v tabulce 1. Jelikož ani jedna z těchto sad empirických součinitelů neodpovídá naměřeným hodnotám, je nutné jejich hodnoty stanovit z naměřených hodnot.

Tabulka 1: Vliv příměsí na smršťování (Bažant et al. 2014)

Třída použité příměsí (% z c)	$\times p_2$	$\times p_3$	$\times p_4$	$\times p_5$
Superpl. ( $\geq 0\%$ )	0,72	2,19	1,72	0,48
Kř. úlet ( $\geq 0\%$ )	1,12	3,11	0,51	0,61
<b>Použito pro vyhodnocení</b>	<b>2,25</b>	<b>2,30</b>	<b>2,40</b>	<b>0,48</b>

Různá směsí UHPC vykazují velmi rozdílné rychlosti náběhu autogenního smršťování při ošetřování zvýšenou teplotou. Například v dostupné studii (Flietstra et al. 2012) je náběh pozvolný, ale v jiné studii (Graybeal et al. 2006) a vlastním měření je nárůst přetvoření významný již v průběhu ošetřování. Z tohoto důvodu je obtížné najít univerzální popis chování UHPC různých receptur jedním modelem smršťování. Pro kalibraci naměřených výsledků byla rychlost nárůstu přetvoření od smršťování řízena parametrem  $r_t$ , který má na rychlost náběhu přetvoření přímý vliv. V původním modelu B4 má hodnotu -4,5. Pro vyhodnocení naměřených hodnot byla použita hodnota -1,2.

Pro predikci přetvoření od dotvarování model uvažuje i s kombinovaným účinkem superplastifikátorů a křemičitého úletu (součinitele uvedeny v tab. 2), avšak reálně použité množství křemičitého úletu téměř 4x překračuje hodnotu poslední hraniční hodnoty při použití superplastifikátoru zároveň s křemičitým úletem. I v případě dotvarování není pro predikci možné použít žádnou z uvedených sad součinitelů.

Tabulka 2: Vliv příměsí na dotvarování (Bažant et al. 2014)

Třída použité příměsí (% z c)	$\times \tau_{cen.}$	$\times \epsilon_{au}$	$\times r_{ew}$	$\times r_\alpha$
Superpl. ( $\leq 5\%$ ), Kř. úlet ( $\leq 8\%$ )	6,00	2,80	0,29	0,21
Superpl. ( $\leq 5\%$ ), Kř. úlet ( $\geq 8\%$ )	3,00	0,96	0,26	0,71
Superpl. ( $\geq 5\%$ ), Kř. úlet ( $\leq 8\%$ )	8,00	1,95	0,00	1,00
Kř. úlet ( $\leq 8\%$ )	1,90	0,47	0,00	1,20
Kř. úlet ( $> 8\%$ , $\leq 18\%$ )	2,60	0,82	0,00	1,20
Kř. úlet ( $> 18\%$ )	1,00	1,50	5,00	1,00
<b>Použito pro vyhodnocení</b>	<b>6,00</b>	<b>2,28</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>

Nespojitý charakter součinitelů příměsí při použití superplastifikátorů a velkého množství křemičitého úletu je

problematické pro plošné použití modelu bez nutnosti jeho kalibrace pro použitou recepturu právě za pomoci těchto součinitelů.

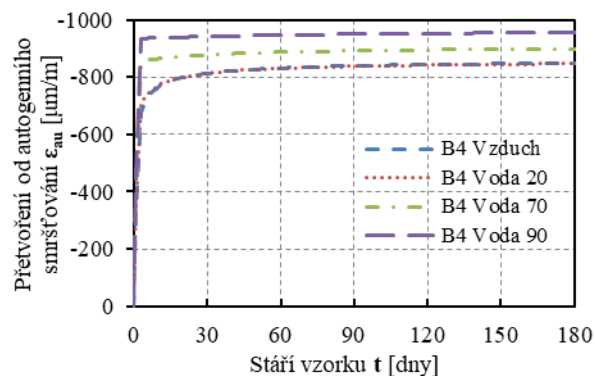
Tento nedostatek by bylo možné odstranit parametrickou experimentální studií vlivu příměsí a jejich kombinací na chování UHPC. Pro naměřené hodnoty byly určeny sady součinitelů tak, aby výsledky modelu B4 odpovídaly naměřeným hodnotám.

## 6. VÝSLEDKY

Po aplikování výše uvedených modifikací modelu B4 je patrná velmi dobrá shoda experimentů s predikcí adaptovaného modelu.

### 6.1. Autogenní smršťování

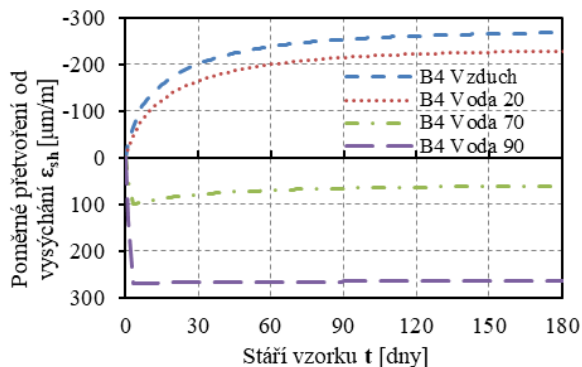
Průběh přetvoření od autogenního smršťování v čase odpovídá průběhu nárůstu pevností betonu při různých scénářích ošetřování. Nejvyšší hodnoty autogenního smršťování dosahují vzorky ošetřované 90°C. Hodnota dosažená po ukončení ošetřování je dále téměř konstantní.



Obr. 7: Nárůsty přetvoření od autogenního smršťování UHPC predikované modifikovaným modelem B4

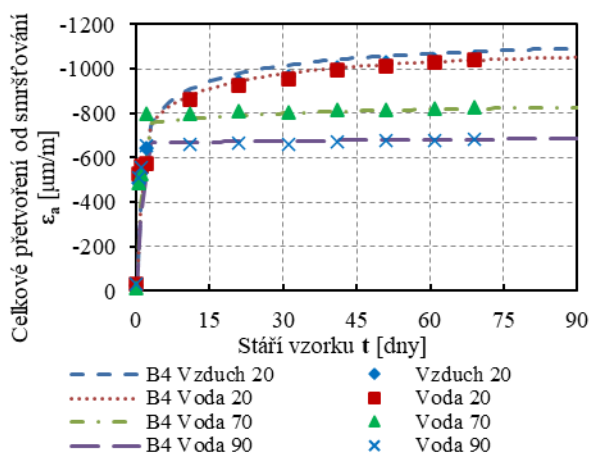
### 6.2. Smršťování vysycháním a celkové smršťování

Smršťování vysycháním dosahuje očekávaných výrazně nižších hodnot než autogenní smršťování, velmi výrazně se v případě smršťování vysycháním projevuje účinek ošetřování. Při ošetřování zvýšenou teplotou je významně urychleno zrání betonu a beton po tuto dobu je stále ve vodním prostředí. Dochází tedy k jeho bobtnání, které je ukončeno v době ukončení ošetřování. V tuto chvíli je však vzorek UHPC zralý a k difúzi vodních par nadále dochází jen ve velmi omezeném množství a vzorek zůstává dlouhodobě nabobtnán, neboť voda, která se dostala do struktury betonu v době ošetřování, je již uzamčena ve struktuře betonu.



Obr. 8: Nárůsty přetvoření od smršťování vysýcháním UHPC predikované modifikovaným modelem B4

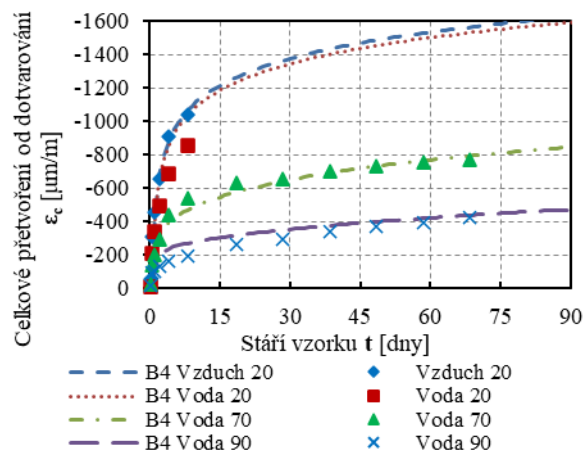
Výše popsaný princip smršťování vysýcháním je potvrzen naměřenými daty, kdy měřená hodnota celkového přetvoření od smršťování je nižší pro vzorky ošetřované vyšší teplotou ve vodním prostředí. Tyto vzorky navíc vykazují jen malý nárůst přetvoření v měsících následujících po ošetřování, což dokazuje velmi nízkou úroveň difúze vodních par po ukončení ošetřování.



Obr. 9: Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4

### 6.3. Dotvarování

V případě predikce přetvoření od dotvarování bylo dosaženo shody s experimenty při odhadnutí sady součinitelů příměsí odpovídající přibližné extrapolaci dostupných sad součinitelů vlivu množství příměsí, kterými byl model kalibrován.



Obr. 10: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků a porovnání s modifikovaným modelem B4

Záhy po začátku měření vzorků na dotvarování došlo k selhání několika tenzometrů zabudovaných ve vzorcích „Vzduch 20“ a „Voda 20“. Validní data bylo možné získat pro tyto vzorky jen prvních 8-10 dnů po vnesení zatížení. Tato část experimentu je v současné době opakována, aby byla získána data popisující dlouhodobý průběh dotvarování.

Adaptovaný a kalibrováný model B4 vykazuje velmi dobrou shodu s naměřenými hodnotami a také s měřeními z USA (Graybeal et al. 2006) a to z hlediska jak konečné hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování, tak rychlosti jejich nárůstu.

## 7. ZÁVĚR

V tomto článku bylo představeno a vyhodnoceno chování UHPC z hlediska smršťování a dotvarování. Byl zdokumentován efekt ošetřování UHPC raného stáří zvýšenou teplotou ve vodním prostředí a byla ověřena vhodnost modelu B4 pro předpověď smršťování a dotvarování UHPC. Hlavní výhodou modelu B4 je uvažování vlivu příměsí a zvýšené teploty při ošetřování betonu. V článku byly nejvýznamnější limity modelu B4 identifikovány a byla představena adaptace modelu B4 pro použití na směsi UHPC, která vykazuje velmi dobrou shodu s naměřenými hodnotami a s měřeními publikovanými ve světě.

Z hlediska dalšího výzkumu pro získání obecného modelu smršťování a dotvarování UHPC se jeví jako nejvýznamnější vliv příměsí a korelace mezi množstvím použitého superplastifikátoru a křemičitého úletu. Překážkou při tvorbě obecného modelu je nedostupnost konkrétních receptur směsí UHPC, jelikož ty jsou často chráněny obchodním tajemstvím a nebývají ve zdrojích uváděny.

## PODĚKOVÁNÍ

Teoretické podklady pro prezentované výsledky byly získány za finanční podpory z prostředků studentské grantové soutěže v rámci projektu SGS20/042/OHK1/1T/11 „Analýza dlouhodobého chování mostních konstrukcí s prvky z UHPC“. Experimenty byly připraveny a provedeny Kloknerovým ústavem v Praze.

## Reference

- Burkart, I., Mueller, H. S. (2008), Creep and shrinkage characteristics of ultra high strength concrete (UHPC), *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*
- Francisco, P., Benboudjema, F., Rougeau, P., Torrenti, J. M. (2012), Creep and shrinkage prediction for a heat-treated Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete, *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*, 3/2012
- Flietstra, J. C., Ahlborn, T. M., Harris, D. K., Silva, H. M. (2012), Creep Behavior of UHPC under Compressive Loading with Varying Curing Regimes, *Proceedings of 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials*
- Bazant, Z. P., RILEM Technical Committee TC-242-MDC (2014), Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability, *Materials and Structures*,
- Graybeal, B. A. (2006), Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete, *Final report*; Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration