



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

Fenomén reologie UHPC

Phenomenon of Rheology of UHPC

DISERTAČNÍ PRÁCE

Ing. Vladimír PŘÍBRAMSKÝ

Doktorský studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Školitel: Doc. Ing. Lukáš Vráblík, Ph.D., FEng

Praha, 2022

PROHLÁŠENÍ

Jméno doktoranda: Vladimír Příbramský

Název disertační práce: Fenomén reologie UHPC

Prohlašuji, že jsem uvedenou disertační práci vypracoval/a samostatně pod vedením školitele Doc. Ing. Lukáše Vráblíka, Ph.D, FEng.

Použitou literaturu a další materiály uvádím v seznamu použité literatury.

Disertační práce vznikla v souvislosti s řešením projektu:

GS21/043/OHK1/1T/11 (Analýza chování mostních konstrukcí s prvky z UHPC)

V Praze dne 22.2.2022

.....
podpis

Poděkování

Děkuji svému školiteli, panu **Doc. Ing. Lukáši Vráblíkovi, Ph.D., FEng.**, za cenné rady a za odborné vedení disertační práce, jeho pomoc se získáním prostředků pro experimentální ověření dlouhodobého chování UHPC a za jeho podporu a motivaci při psaní práce.

Děkuji **Ing. Davidu Čítkovi, Ph.D.** z Kloknerova ústavu ČVUT v Praze za odborné konzultace, přípravu a provedení experimentálního měření smršťování a dotvarování. Děkuji také za jeho souhlas a možnost použít v této práci experimentálně data měřená Kloknerovým ústavem v roce 2010 pro ověření materiálového modelu uvedeného v této práci.

Také bych chtěl poděkovat svým rodičům za podporu v průběhu mého studia a mé snoubence, Kláře Adámkové, za pomoc s gramatikou a stylistikou a zejména za toleranci a pochopení v průběhu závěrečné fáze psaní práce.

V Praze dne 22. 02. 2022

Ing. Vladimír Příbramský

Obsah

1	ÚVOD, ČLENĚNÍ A CÍLE PRÁCE	1
2	KOMPOZITNÍ A HYBRIDNÍ KONSTRUKCE	4
2.1	Vylehčení konstrukce použitím HPC prvků	10
3	REOLOGICKÉ VLASTNOSTI BETONU	16
3.1	Vliv smršťování a dotvarování na hybridní mosty	19
3.2	Reologické vlastnosti UHPC	22
3.2.1	Smršťování UHPC	22
3.2.2	Redukce přetvoření smršťováním použitím polymerních příměsí ..	25
3.2.3	Dotvarování UHPC	27
3.2.4	Vliv rozptýlené výztuže	29
4	OŠETŘOVÁNÍ UHPC	31
4.1	Způsoby ošetřování	32
4.2	Podpora hydratace ošetřováním vodou	34
4.3	Vnitřní ošetřování super-absorpčními polymery	35
4.4	Ošetřování povrchu betonu penetrací nanosilikou	37
4.5	Ošetřování zvýšenou teplotou	38
4.5.1	Okamžité účinky ošetřování zvýšenou teplotou	39
4.5.2	Relaxace předpínací výztuže při ošetřování	41
4.5.3	Dlouhodobé účinky ošetřování zvýšenou teplotou	44
4.5.4	Ettringit a jeho druhotná krystalizace – D.E.F.	47
5	EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ DLOUHODOBÝCH VLASTNOSTÍ UHPC OŠETŘOVANÉHO ZVÝŠENOU TEPLOTOU	49
5.1	Popis experimentu	50
5.2	Materiálové charakteristiky patentované směsi UHPC ošetřovaného různými způsoby	54
5.3	Hydratační teplo a krátkodobé smršťování	58
5.4	Dlouhodobé charakteristiky patentované směsi UHPC	60
6	ADAPTACE MODELU B4 PRO POUŽITÍ NA UHPC A OŠETŘOVÁNÍ ZVÝŠENOU TEPLOTOU	64
6.1	Limitace modelu B4	64
6.1.1	Průměrná hodnota modulu pružnosti jako funkce pevnosti	66

6.1.2	Nárůst modulu pružnosti krátce po betonáži	68
6.2	Úprava množství jednotlivých složek směsi	70
6.3	Úprava součinitele vlivu teploty na hydrataci	72
6.4	Úprava vlhkosti betonu	76
6.4.1	Vnitřní relativní vlhkost UHPC a jeho samovysychání	77
6.4.2	Samovysychání UHPC v raném stáří	80
6.4.3	Modifikace modelu B4 a zahrnutí efektu samovysychání	86
6.5	Úprava modelu B4 přidáním součinitele typu ošetřování	88
6.6	Bobtnání UHPC při ošetřování	93
6.7	Empirické součinitele příměsí	99
6.7.1	Posouzení původních sad součinitelů	99
6.7.2	Součinitele příměsí zjištěné genetickým algoritmem	104
6.8	Porovnání modelu B4 s vlastním experimentem	108
6.9	Porovnání modelu B4 s dostupnými studiemi	110
6.10	Diskuse k modelu B4	113
7	POUŽITÍ OŠETŘOVÁNÍ ZVÝŠENOU TEPLOTOU PŘI PREFABRIKACI	117
7.1	Možnosti ošetřování při prefabrikaci	117
7.2	Prefabrikace stěny hybridního mostu s UHPC stojinou	119
7.3	Tahové napětí v důsledku částečného omezení volného smršťování	125
7.4	Studie chování konkrétního stěnového prvku z UHPC	129
8	ZÁVĚR	141
	LITERATURA	144
	PŘÍLOHA 1 – MANUÁL K PROGRAMU „B4 FOR UHPC“	151
	PŘÍLOHA 2 – CELKOVÝ MODIFIKOVANÝ MODEL B4	158
	PŘÍLOHA 3 – PROTOKOL MĚŘENÍ KÚ 2021	168
	PŘÍLOHA 4 – NÁVRH A POSOUZENÍ PŘEDPÍNACÍHO RÁMU	189
	PŘÍLOHA 5 – VÝPOČET ZTRÁT METODOU ČASOVÉ DISKRETIZACE	196

Abstrakt

V této práci je představeno použití inovativního materiálu, UHPC (Ultra vysokohodnotný beton) v konstrukcích mostů a zejména jeho použití ve formě prefabrikovaných předem předpjatých stěnových dílců pro hybridní mosty velkého rozpětí. Cílem této práce je definovat materiálový model pro predikci reologických změn v UHPC, který bude vycházet z modelu B4. Model B4 pro predikci efektů smršťování a dotvarování je v současnosti považován za nejpokročilejší materiálový model betonu a je založen na chemických a termodynamických procesech betonu, a tudíž je možné ho extrapolovat pro použití s UHPC. Pro extrapolaci modelu B4 jsou kromě dostupných publikovaných dat použita i data z vlastního experimentu měření dlouhodobého chování UHPC prvků ošetřovaných různými způsoby a za zvýšené teploty. Na základě představeného materiálového modelu je popsán vhodný proces výroby prefabrikovaných stěnových prvků. Optimalizovaný proces výroby uvažuje s možnými způsoby ošetřování pro zajištění rychlého betonážního cyklu a zároveň zajištění vysoké kvality prefabrikovaných prvků.

Klíčová slova

UHPC, hybridní mosty, smršťování, dotvarování, model B4

Abstract

In this thesis is presented application of an innovative material UHPC (Ultra High Performance Concrete) in bridges and especially its application in form of precast pretensioned wall elements for long-span hybrid bridges. The main goal of this thesis is to define reliable material model for prediction of rheological processes in UHPC. The proposed material model is based on well-known model B4. Model B4 for prediction of creep and shrinkage is currently one of the most advanced material models for concrete. Model B4 is based on chemical and thermodynamic processes in the concrete matrix, and this makes it a suitable choice for extrapolation to be applicable for elements from UHPC. The approach presented in this thesis is based on available published experimental results and on own experimental measurement, where different curing process was applied on the specimens. Possible application to the process of manufacturing of precast wall elements from UHPC are discussed based on the presented material model. The optimized manufacturing processes consider possible curing at the early age to ensure fast manufacturing cycle while keeping the exceptional quality of the produced elements.

Keywords

UHPC, hybrid bridges, creep and shrinkage, Model B4

Seznam symbolů

Symboly veličin betonu a předpětí

Symbol	Jednotka	Popis
E_p	[GPa]	modul pružnosti předpínacích lan
σ_p	[MPa]	napětí v předpínací výztuži
f_{pk}	[MPa]	charakteristická pevnost lan předpínací výztuže
$f_{p,0,1,k}$	[MPa]	smluvní mez kluzu předpínací výztuže
$\sigma_{p,max}$	[MPa]	maximální napětí v předpínací výztuži před zakotvením
μ	[-]	poměr napětí ve výztuži a charakteristické pevnosti
σ_{p0}	[MPa]	napětí v předpínací výztuži po zakotvení
f_c	[MPa]	charakteristická (28denní) pevnost betonu
$E_{cm}(t)$	[GPa]	modul pružnosti betonu v čase t
E_{28}	[GPa]	28denní modul pružnosti betonu
$\beta_{cc}(t)$	[-]	součinitel zohledňující nárůstu pevnosti betonu v čase
s	[-]	součinitel cementu pro určení rychlosti náběhu pevnosti
a	[kg/m ³]	množství kameniva ve směsi betonu
w	[kg/m ³]	množství záměsové vody ve směsi betonu
c	[kg/m ³]	množství cementu ve směsi betonu
c_{min}	[kg/m ³]	minimální množství cementu dle rovnic hydratace
SF	[-]	poměr množství mikrosiliky a cementu
$\Delta\sigma_{Pr}(t)$	[MPa]	ztráta předpětí relaxací při referenční teplotě
T_{cur}	[K]	teplota při ošetřování betonu
$\times_{RT}(t)$	[-]	násobitel ztrát relaxací při ošetřování za zvýšené teploty
$\Delta\sigma_{Pr,cur}$	[MPa]	dodatečná ztráta předpětí při ošetřování zv. teplotou

$\Delta\sigma_{Pr,sum}(t)$	[MPa]	ztráta předpětí relaxací včetně účinků zv. Teploty
a_p	[mm]	délka pokluzu lan v kuželíku při zakotvení
$\Delta\sigma_P$	[MPa]	ztráta předpětí pokluzem
$\Delta\sigma_{psd}$	[MPa]	ztráta pružným přetvořením předpínací soustavy
$\Delta\sigma_{pe}$	[MPa]	ztráta pružným přetvořením prvku
ε_{sh}	[-]	přetvoření prvku od smršťování
$\Delta\sigma_{PS}$	[MPa]	ztráta předpětí v důsledku smršťování
ε_{cc}	[-]	přetvoření prvku od dotvarování
$\Delta\sigma_{PC}$	[MPa]	ztráta předpětí v důsledku dotvarování

Veličiny původního a extrapolovaného modelu B4^[12]

Symbol	Jedn.	Popis
β_{Th}	[-]	součinitel rychlosti zrání betonu při ošetřování teplotou
$\beta_{Th,opr}$	[-]	součinitel β_{Th} extrapolovaný pro použití na UHPC
RH	[%]	relativní vlhkost prostředí
h	[-]	relativní vlhkost prostředí vyjádřená jako $RH/100$
$r_h(t)$	[-]	součinitel smršťování vysycháním při známé RH
$r_{h,365}$	[-]	součinitel smršťování vč. samovysychání v čase 1 rok
RH_{cur}	[%]	relativní vlhkost prostředí při ošetřování
$RH_{in}(t)$	[%]	relativní vlhkost struktury betonu snižená samovysycháním
RH_{eff}	[%]	výpočtová relativní vlhkost prostředí včetně samovysychání
β_{RH}	[-]	součinitel rychlosti zrání při ošetřování ve vodě nebo v páře
t_0	[den]	délka ošetřování betonu
$t_{0,Th,RH}$	[den]	délka ošetřování betonu včetně účinků ošetřování

τ_{sh}	[den]	poločas autogenního smršťování
$S_{cur}(t_0)$	[-]	část smršťování vysycháním, která proběhne při ošetřování
$\varepsilon_{sh}(t)$	[-]	smršťování vysycháním bez vlivu ošetřování
$\varepsilon'_{sh}(t)$	[-]	smršťování vysycháním redukované ošetřováním
$\varepsilon_{sh,cur}$	[-]	smršťování vysycháním (případně bobtnání) při ošetřování
$\varepsilon_{sh}(t)$	[-]	celkové smršťování vysycháním $\varepsilon'_{sh}(t) + \varepsilon_{sh,cur}$

Empirické součinitele modelu B4

Symbol	Jedn.	Popis
$\times p_2$	[-]	empirický násobitel příměsí pro výpočet dotvarování
$\times p_3$	[-]	empirický násobitel příměsí pro výpočet dotvarování
$\times p_4$	[-]	empirický násobitel příměsí pro výpočet dotvarování
$\times p_5$	[-]	empirický násobitel příměsí pro výpočet dotvarování
$\times \tau_{cem}$	[-]	násobitel typu cementu pro výpočet smršťování
$\times \varepsilon_{au}$	[-]	násobitel konečné hodnoty autogenního smršťování
$\times r_{ew}$	[-]	násobitel konečné hodnoty autogenního smršťování
$\times r_{\alpha}$	[-]	násobitel rychlosti nárůstu autogenního smršťování
$r_{\varepsilon a}$	[-]	empirický součinitel pro výpočet autogenního smršťování
$r_{\varepsilon w}$	[-]	empirický součinitel pro výpočet autogenního smršťování
$\varepsilon_{au,cem}$	[-]	míra autogenního smršťování dle typu cementu
$\varepsilon_{au\infty}$	[-]	empirický součinitel míry autogenního smršťování

1 Úvod, členění a cíle práce

UHPC patří k významným prvkům při vývoji a výzkumu nových moderních betonových konstrukcí. Vynikající mechanické vlastnosti tohoto materiálu ho předurčují k použití ve výrobě účinných a štíhlých stavebních prvků s vysokou únosností. UHPC je velmi kompaktní materiál, který má vynikající vlastnosti díky své nízké nasákavosti a odolnosti vůči nepříznivým vlivům prostředí, např. agresivním chemickým rozmrazovacím látkám. Jeho varianta UHPFRC (UHPC vyztuženého vláknou) dosahuje kromě vynikající pevnosti v tlaku (běžně od 140MPa, ale i 250 MPa) i nezanedbatelnou pevnost v tahu a v tahu za ohybu (25 MPa a více). Jelikož je UHPC materiál s výbornými vlastnostmi, které zajišťují stálost konstrukčních prvků z něj vyrobených, je možné očekávat vysokou možnou životnost, a to až 200 let. Pro konstrukce projektované na takto dlouhou dobu je nezbytné zaměřit se na dlouhodobé vlastnosti UHPC ovlivňující jeho přetvoření od dotvarování a smršťování a omezení negativních projevů těchto reologických změn v UHPC. Pro použití při navrhování konstrukcí je nezbytné použít přesný materiálový model, aby byla zajištěna spolehlivost konstrukčních prvků z UHPC a jejich efektivní využití. S jistotou se dá říct, že tyto konstrukce mohou konkurovat ocelovým konstrukcím velkých rozpětí. Velkou výhodou konstrukcí s prvky z UHPC je bezúdržbovost, oproti ocelovým konstrukcím, které je nutné pečlivě chránit před korozi.

Tato práce se zaměřuje na dílčí konstrukční část hybridního mostu komorového průřezu se stojinami z prefabrikovaných UHPC dílců zejména z hlediska účinků a predikce smršťování a dotvarování. Hlavní cíl práce je studium činitelů, které ovlivňují míru smršťování a dotvarování prvků z UHPC. Cíle této disertační práce jsou následující:

1. Rešerše použití a rozvoje hybridních mostů – od spřažených mostů až po mosty typu „*butterfly webs*“.
2. Rešerše dlouhodobých charakteristik UHPC se zaměřením na vlivy, které je ovlivňují (ošetřování, příměsi).
3. Provedení a vyhodnocení experimentálního měření smršťování a dotvarování vzorků z UHPC.

4. Zhodnocení charakteristik materiálového modelu B4 pro predikci smršťování a dotvarování a extrapolace modelu B4 pro UHPC.
5. Pro UHPC stěny hybridního mostu zhodnotit možnosti optimalizace výrobního procesu.
6. Shrnutí řešené problematiky a diskuse možných využití.

Z hlediska mostního stavitelství je patrný postupný nárůst použití UHPC v nových konstrukcích, ale i jeho aplikace pro sanace a rekonstrukce stávajících betonových mostů. Pro UHPC s tlakovou pevností 150–200 MPa je charakteristická možnost výroby velmi subtilních prvků, jejichž tuhost je však omezená, a proto je často kombinováno použití UHPC spřaženého s betonem běžné třídy a případně lanového konstrukčního systému mostu. Nové mosty, které využívají UHPC jako konstrukčního materiálu, jsou často prefabrikované, aby byla zajištěna jakost dílců z UHPC. Tyto mosty jsou pro krátké rozpětí buď prefabrikovány po polích, nebo je použitý konstrukční systém prefabrikovaných nosníků spřažených na stavbě s betonovou deskou mostovky. Prefabrikované dílce jsou často doplněny o podélné předpětí. Pro aplikace na mostech delších a extrémních rozpětí je nejčastěji používáno UHPC ve formě segmentů, které jsou doplněny podélným předpětím, případně je konstrukční systém zavěšený nebo visutý.

Na letmo betonovaných mostech extrémního rozpětí je pro vylehčení možné optimalizovat tloušťku stěn, případně stěnu komorového průřezu úplně nahradit ocelovými prvky anebo prefabrikovanými stěnami z UHPC. Takové mosty můžeme označit jako mosty hybridní, protože kombinují výhody různých technologií. Hlavní výhodou těchto mostů je, že si uchovávají velkou část své ohybové tuhosti díky spřaženým deskám a zároveň je redukována vlastní tíha nosné konstrukce, což má příznivý dopad na napjatost konstrukčních částí, a vede tedy k nižšímu množství spotřebovaného materiálu, nižší ceně a uhlíkové náročnosti mostního díla. Hybridním mostům velkého rozpětí a jejich nejčastějším konstrukčním systémům se věnuje detailněji kapitola 2.

Jelikož je s UHPC spojená vysoká životnost konstrukce, je nutné porozumět dlouhodobému chování a reologickým procesům v betonu a UHPC, které mohou omezit jeho použitelnost. Mezi tyto procesy patří smršťování a dotvarování betonu,

Kapitola 1

Úvod, členění a cíle práce



kteřé ovlivňují dlouhodobé deformace konstrukce a dále i ztráty předpětí. Z dlouhodobého hlediska se UHPC chová podobně jako beton běžné třídy, ale jsou zde odlišnosti, na které se zaměřuje kapitola 3. Velmi důležitým krokem zajištění dlouhodobé stálosti betonových prvků a zejména prvků z UHPC je správná volba ošetřování UHPC, například za použití vysoké teploty v prostředí nasyceném párou. Vhodně zvolený způsob ošetřování může vést k násobně lepším okamžitým i dlouhodobým vlastnostem prvků z UHPC. Detailně se na typické i inovativní způsoby ošetřování zaměříme v kapitole 4.

Pro predikci dlouhodobého chování konstrukcí z betonu a z UHPC je nutné použít materiálový model, který popisuje s dostatečnou přesností reologické vlastnosti směsi betonu nebo UHPC. V této práci se zaměříme zejména na model B4 pro predikci smršťování a dotvarování. Tento model je současně nejkomplexnější z hlediska parametrů, které ovlivňují velmi důležité účinky ošetřování. Pro UHPC však i model B4 vyžaduje kalibraci pro konkrétní směs. V rámci této práce bylo provedeno dlouhodobé experimentální měření smršťování a dotvarování na vzorcích z UHPC ošetřovaných různým způsobem. Popis experimentu je uveden v kapitole 5 a naměřené hodnoty jsou dále použity pro porozumění procesům v UHPC, a tedy pro kalibraci modelu B4 tak, aby bylo možné pro danou směs bezpečně predikovat dlouhodobé chování. Rozšíření modelu B4 a jeho kalibrace pro směs UHPC je popsána v kapitole 6.

Predikované hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování pro experimentálně měřenou směs UHPC jsou dále použity pro návrh UHPC stěnového panelu komorového hybridního mostu popsaného v kapitole 7. Tato kapitola se dále zaměřuje na možnosti prefabrikace UHPC a způsoby, jak je možné dále zlepšit jakost prvků prefabrikovaných a předepnutých v co nejkratším čase.

2 Kompozitní a hybridní konstrukce

Pod pojmem kompozitní konstrukce si představíme konstrukce, které jsou spojeny ze 2 a více různých materiálů, nebo částí ze stejného materiálu odlišných vlastností. Základní ideou kompozitních konstrukcí je příznivé spolupůsobení spojených materiálů, které přináší vyšší efektivitu konstrukce, než kdyby byla zhotovena jen z jednoho z použitých materiálů, a to jak s ohledem na vyšší tuhost konstrukce, tak i s ohledem na pořizovací náklady.

V pozemním stavitelství se nejčastěji využívají kompozitní konstrukce využívající beton, ocel, dřevo a případně další materiály: spřažené ocelobetonové konstrukce, případně spřažené dřevo-betonové konstrukce pro konstrukce stropů, ocelobetonové sloupy a dále je možné zesilování konstrukcí materiály na bázi skelných (GFRP) nebo uhlíkových (CFRP) vláken. V mostním stavitelství se v zásadě využívají dva typy kompozitních konstrukcí: spřažené betonové mosty a ocelobetonové mosty (trámové, zavěšené nebo obloukové).

U ocelobetonových trámových mostů tvoří hlavní nosnou konstrukci ocelové nosníky, na které je in-situ dobetonována betonová deska mostovky. Spřažení je dosaženo spřahovacími prvky navařenými na horní pásnice ocelových profilů, u mostů se používají téměř výhradně smykové trny. Maximální délka pole ocelobetonových mostů záleží na použitém ocelovém profilu, tedy zda jsou použity nosníky tvaru I, nebo komorový průřez.

Základní výhodou spřažených mostů je, že velká část betonáže/montáže se přesune do výroby prefabrikovaných dílců a mostárny, takže je možné dosáhnout vysoké jakosti provedení. Spřažené mosty lze také s úspěchem navrhovat přes překážky, kde je požadavek na minimální zásah do prostoru pod mostem, protože předem připravená konstrukce je navržena tak, aby dokázala přenést jak svou vlastní tíhu, tak i tíhu spřažené desky, a tím odpadá nutnost budování skruže nebo provizorního podepření.

U mostů delších rozpětí polí než 50 m, které se navrhují jako spojitě nosníky, vznikají v oblasti nad podporou značné záporné momenty. Tyto momenty by bylo velmi obtížné přenést průřezem oslabeným o tuhost horní betonové desky a významně

zesilovat ocelovou konstrukci tak, aby vyhověla návrhovým situacím, není hospodárné. Další vývoj v oblasti spřažených mostů se tedy zabýval především zefektivněním návrhu spojitých mostů o více polích.

Abychom zvýšili tuhost v okolí pilířů, je možné dobetonovat do komorového nosníku spodní desku, která bude od záporného ohybového momentu tlačena. Působení takového průřezu je podobné, jako je tomu u horní desky namáhané kladným momentem v poli. Tento inovativní koncept byl představen na přelomu 70. a 80. let a takto navržená mostní konstrukce se nazývá *“double-composite bridge”*, tedy dvojitě spřažený most, a je jakýmsi mezistupněm mezi ocelobetonovým spřaženým mostem a betonovým mostem s ocelovými stěnami (Kurrer, 2008)^[1]. Jedním z nejdelších dvojitě spřažených mostů na světě je pětipolový *Caroni River Bridge* ve Venezuele, který má rozpětí hlavního pole 213,8 m a celkovou délkou 478,8 m (Kurrer, 2008)^[1]. Mosty takových rozpětí již ale nelze realizovat bez předpětí volnými kabely, které by redukovaly vliv ohybových momentů od vlastní tíhy.

Zmíněnou možností, jak výrazně omezit oslabení nadpodporových průřezů trhlinami a dosáhnout efektivnějšího využití konstrukčních materiálů, je použití podélného předpětí, kdy aktivně změním průběhy vnitřních sil na konstrukci a případně i jejich rozdělení mezi samotný ocelový průřez a spřažený průřez. Podélné předpětí se dá do průřezu vnést v zásadě dvěma způsoby:

- betonáž spřahující desky na ocelový nosník, který byl před betonáží zatížen uměle vnesenými ohybovými momenty
- napnutí předpínacích vložek (standardně kabely z lan ze 7 drátů vysoké pevnosti), u ocelobetonových konstrukcí mluvíme o předpětí volnými kabely bez soudržnosti

První varianta je velmi efektivní metoda předpínání především konstrukcí malého a středního rozpětí. Její princip spočívá v tom, že se po deformaci ocelového prvku vybetonuje betonová část průřezu a poté je deformace uvolněna. Typickým příkladem je výstavba dlouhé estakády. V takovém případě vždy betonujeme nejprve spřahující desku uprostřed pole a až následně desku nad pilířem. Pokud před betonáží desky nad pilířem nadzvedneme danou podporu a po zatvrdnutí betonu ji opět spustíme do původní polohy, dosáhneme tlakové rezervy v nadpodporovém průřezu. Dalším

Kapitola 2

Kompozitní a hybridní konstrukce

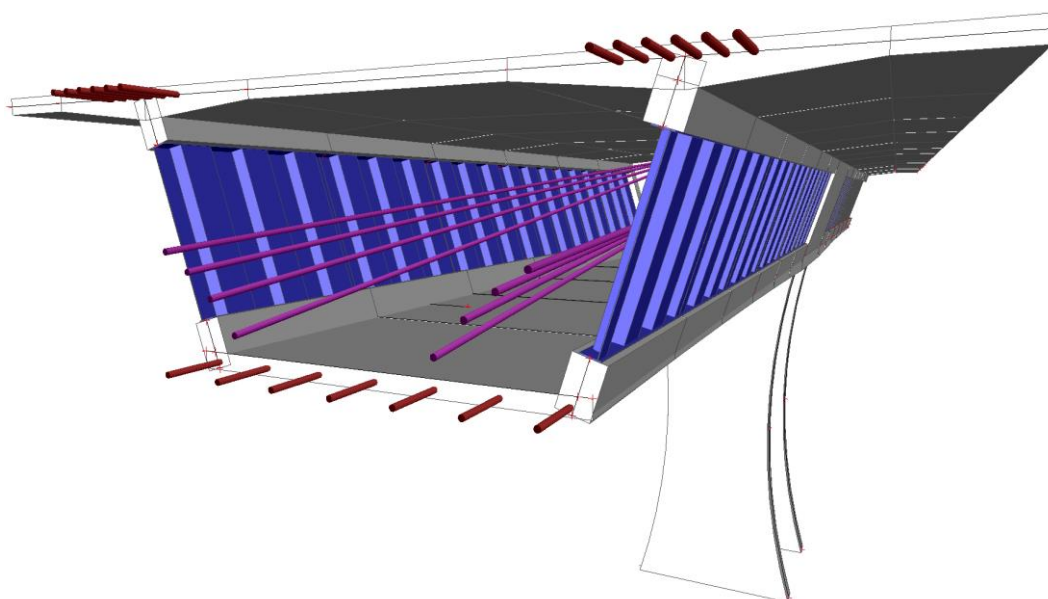


příkladem jsou nosníky SNOP (spřažený nosník ohybem předpjatý), což jsou vlastně prefabrikované nosníky s obetonovanou spodní pásnicí, které se před betonáží dolní pásnice zatíží svislým zatížením a po betonáží opět odtíží, čímž se vnese do betonové dolní pásnice tlakové napětí. Podobným systémem jsou nosníky Preflex, které byly vyvinuty a používaly se zejména v Británii v 70. a 80. letech 20. století (Kurrer, 2008)^[1].

U mostů s dlouhými poli by bylo neefektivní snažit se dosáhnout vnesení tlakových napětí do betonu dočasnými změnami výšky podepření, protože u dlouhého mostu by takto vyvozený předpínací efekt nebyl významný a jeho realizace by byla komplikovaná. U mostů o rozpětí od zhruba 70 m, u kterých používáme komorový spřažený průřez, se uplatní předpětí volnými zvedanými kabely, které jsou umístěny uvnitř komory. Předpětí zvedanými kabely má na konstrukci dvojitý účinek. První je vnesení tlakové normálové síly, jejíž hodnota závisí na předpínací síle v daném průřezu. Důsledkem necentrického vedení kabelů u konstrukcí se zvedanými kabely je druhý účinek od předpětí – vnesení ohybového momentu, který je vyvoláván příčnými silami, které působí v místech úhlových změn vedení kabelů. Dráhu kabelu navrhujeme tak, aby ohybové momenty od předpětí působily proti ohybovému momentu způsobeného vlastní tíhou konstrukce. Hodnoty příčných sil jsou úměrné předpínací síle a úhlu změny směru kabelu v deviátorech. Přenos horizontálních sil je zajištěn aktivními kotvami v nadopěrových příčnicích a přenos vertikálních sil je zajištěn v místech změny geometrie kabelu deviátory.

V optimalizaci konstrukce spřaženého mostu s podélným předpětím však lze jít ještě dále a zaměřit se na optimalizaci stěn komorového průřezu. Ve světě již bylo realizováno mnoho mostů s různými typy stěn na bázi ocelových konstrukčních systémů. Jednou z možných variant je stěna komorového průřezu realizovaná trapézovým plechem (He, 2012)^[2]. Rozvoj této technologie proběhl především ve Francii a následně v Japonsku koncem osmdesátých let minulého století. V roce 1982 se poprvé použil kompozitní systém mostu s využitím stojiny z trapézového plechu pro komorový průřez. První experimentální most, kde byla použita komora se stěnami z trapézového plechu, byl postaven ve Francii v roce 1986 (Kurrer, 2008)^[1]. Technologie, se kterou přišli Francouzi, se stala velkou inspirací pro japonské stavitele v devadesátých letech minulého století. Vývoj navrhování stále postupoval a byly specifikovány konstrukční vlastnosti komorových mostů se stěnou z trapézového

plechu s horizontálním zakřivením. Výstavba tohoto druhu mostů se rozšířila do celého světa. Mosty využívající trapézový plech vznikly ve Švédsku, na Taiwanu, v USA, v Koreji a v neposlední řadě též v sousedním Německu. V Americe mají tyto mosty stále širší uplatnění a dále se vyvíjí jejich navrhování. Mosty se stěnami z trapézového plechu mohou být doplněny podélným předpětím (Obr. 2.1), které je buď umístěné do betonové spodní a horní desky nebo jsou volné kabely umístěné uvnitř komorového průřezu a úhlové změny vedení kabelu je realizováno přes deviátory.

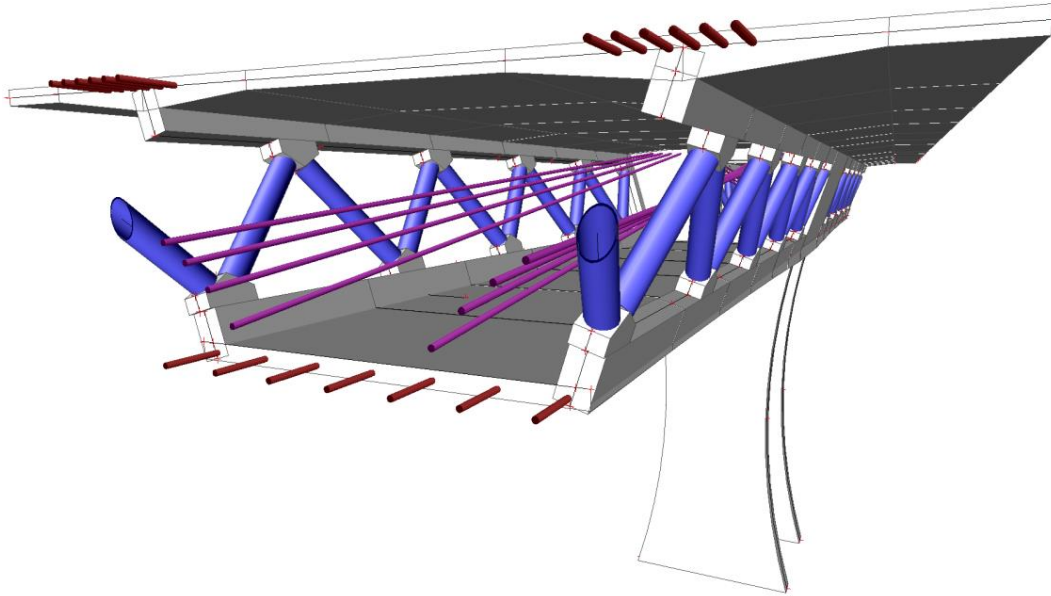


Obr. 2.1 – Koncept mostu se stěnou z trapézového plechu

Trapézový plech působí mezi deskami jako membrána a přenáší smyková napětí. Ohybová tuhost a prostorová stabilita stěn je zajištěna profilováním trapézového nebo vlnitého plechu, který využívá takzvaného „harmonického efektu“, tedy že odolávají smykovým silám, aniž by byly ovlivněny normálovou silou vznikající od předpětí horní a dolní desky komory, což umožňuje efektivnější využití předpínacích kabelů.

Další možností nahrazení monolitických stěn je použití ocelových příhradových prvků (Kanamoto, 2015)^[3]. Tyto hybridní předepnuté mosty jsou často voleny především v Japonsku. Nahrazení stěny ocelovou příhradou (nejčastěji bez svislic, tedy tzv. Warrenovým nosníkem) redukuje vlastní tíhu konstrukce a poskytuje transparentní chování konstrukčních prvků, a tedy možnost lepší kontroly konstrukce. Předepnutá horní a dolní mostovka je opatřena betonovým žebrem, které zajišťuje její potřebnou tuhost a umožňuje realizaci detailu spřažení diagonál s monolitickými

deskami. V místě napojení ocelových prvků na betonové žebro vzniká komplikovaný detail s velkým množstvím výztuže.



Obr. 2.2 – Koncept mostu se stěnou z ocelové příhradové konstrukce

Způsob provedení mostní konstrukce vychází ekonomicky velmi výhodně, přičemž konstrukce je až o 25 % lehčí a je možné dosáhnout větších rozpětí a konstrukce lépe odolává seismicitě. Nemałym benefitem kromě rychlosti výstavby (výroba ocelových plechů či ocelové příhradoviny je snadnější a probíhá mimo staveniště na rozdíl od klasické betonáže stěn na místě) je též menší environmentální dopad na okolí redukcí emisí oxidu uhličitého oproti výstavbě klasických betonových nebo ocelových mostů. Tyto hybridní konstrukce mají předepnutou horní desku mostovky a v komoře bývají zpravidla osazeny volné kabely předpětí.

V použití ocelových příhradových prvků drží světové prvenství ve své délce japonské dálniční mosty Sarutagawa a Tomoegawa. Ocelová příhrada je navržena jako element, ve kterém začnou působit normálové síly a ohybové momenty (spřažení prvků s deskami je tuhé a diagonály působí jako vetknuté) až poté, co je segment celkově pevně spojen. Aby bylo možné zefektivnit využití materiálu, jsou tlakové diagonály, ve kterých působí velká normálová síla, vyplněny stejným betonem, který je použit pro betonáž horní a dolní desky mostovky.

Zajímavým příkladem hybridního mostu s příhradovými stěnami je Bras De La Plaine Bridge. U tohoto mostu by se na první pohled zdálo, že se jedná obloukový

Kapitola 2

Kompozitní a hybridní konstrukce



most, při bližším prozkoumání lze pozorovat, že spodní deska je uprostřed rozpětí přerušena (Obr. 2.3). Horní mostovka spojená kompozitní příhradovou konstrukcí se spodní deskou působí jako dvě konzoly. Horní deska z předpjatého betonu má konstantní tloušťku, spodní deska se postupně směrem ke středu mostu ztenčuje, čímž je zaručeno její účinnější působení. Ocelové diagonály působící v tahu jsou předepruty kabely tak, aby neustále zůstávaly v tlaku, čímž je možné docílit relativně subtilního spřažení.



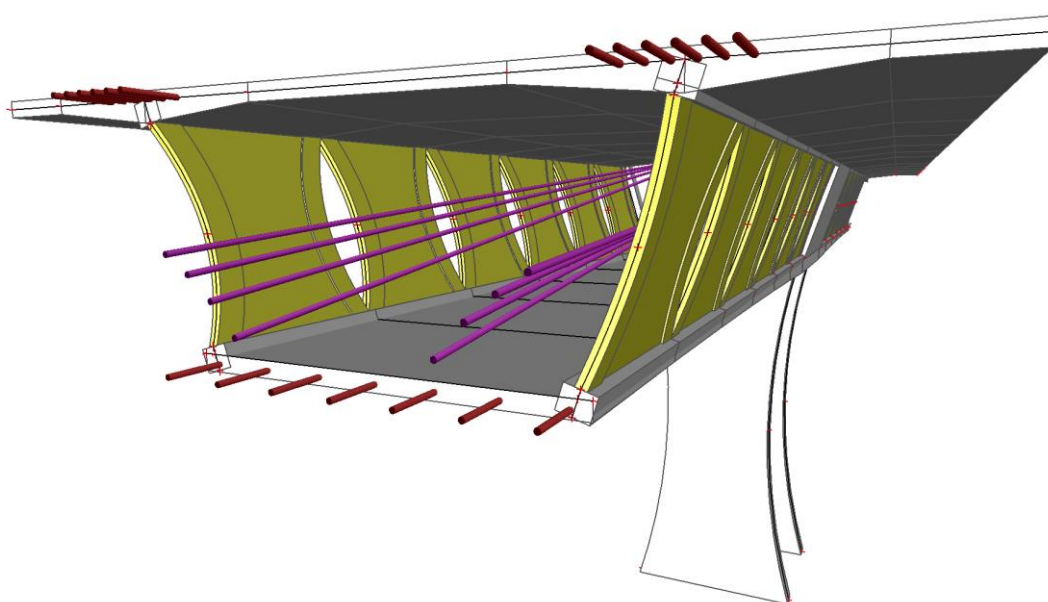
Obr. 2.3 – Bras De La Plaine Bridge^[4]

Díky malým poměrům mezi rozměry jednotlivých konstrukčních dílů a pravidelností prvků ocelové příhradoviny působí konstrukce vyrovnaně a štíhle. Celkové rozpětí konstrukce je 280 m.

2.1 Vylehčení konstrukce použitím HPC prvků

V současnosti je v případě letmo betonovaných mostů možné vidět trend snižování tloušťek stěn, a to až na hodnoty v rozmezí 200–300 mm v případě použití standardního betonu vyšších pevností 50–70 MPa. Rozhodující je přenos smyku dvojicí tlačené a tažené diagonály. Limitujícím faktorem je také možnost použití předpjatých kabelů spojitosti, kdy musí být splněny konstrukční zásady pro jejich umístění do stěn, zejména tloušťka jejich krytí. Pro použití ještě tenčích prvků z HPC a UHPC však již není možné použít vnitřní kabely – nevejdou se do stěn a je nutné uvažovat pro kabely spojitosti s volnými kabely, případně využít konstrukční systém mostu typu „*extradosed*“.

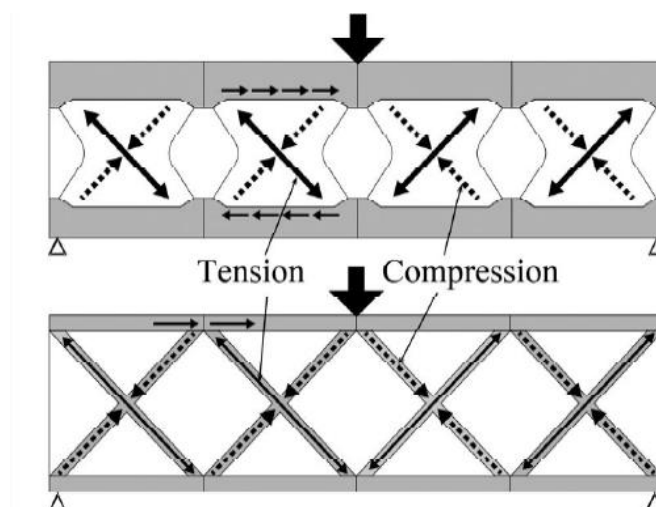
Při použití stěnových prvků z UHPC by bylo velmi obtížné docílit spojitého chování stěn a prefabrikované panely spolu přímo nespolutřísobí. Jednotlivé stěnové dílce jsou nespojitě a jednotlivé prvky mají diferencované chování a této charakteristice odpovídá i tvar panelu s typickým vykrojením (Obr. 2.4). Tlakové a tahové diagonály průběhů hlavních napětí v prefabrikovaném panelu působí analogicky s případem použití ocelového příhradového konstrukčního systému stojin komorového průřezu. Ve směru tažené diagonály je pro zajištění bezporuchového chování betonového prvku vneseno předpětí.



Obr. 2.4 – Koncept mostu se stěnami z UHPC prefabrikátů

V posledních několika letech došlo v Japonsku k rozvoji a realizaci použití vysokohodnotného betonu v inovativním konstrukčním systému mostů s použitím prefabrikovaných stojin, které jsou označeny jako „*butterfly webs*“ neboli stojiny typu motýlích křídel (Kasuga, 2010)^[5].

Koncept mostů se stojinami typu „motýlích křídel“ kombinuje výhody mostů s ocelovými stěnami spojené s vysokou mírou odolnosti vůči vnějšímu prostředí, a tedy nízkým nákladům na údržbu díky absenci nutnosti chránit konstrukční prvky před korozi. Výhoda společná s konstrukčním systémem se stojinami z trapézového plechu je relativně jednoduché provádění detailů spřažení vzhledem k velké délce styčné spáry. Montáž dílů trapézového plechu však obnáší další práci s díly na staveništi (například sváření dílů v podélném směru), která v případě UHPC stojin odpadá. Systém, který nevyžaduje další práce na prvcích při zabudování, je systém příhradových stojin, u těch jsou však komplikovanější detaily připojení ke spřaženým deskám. Z hlediska statického chování jsou mosty „*butterfly webs*“ transparentnímu příhradovému působení velmi blízko. Prefabrikované panely, jejichž tvar připomíná motýlí křídla, jsou umístěny po délce mostu jednotlivě a vzájemně nespolutpůsobí. Jejich tvar respektuje směry průběhů hlavních napětí, tedy tažené a tlačené diagonály, které jsou vyvolány přenosem smykových sil mezi spodní a horní deskou. Z hlediska statického působení se most chová podobně jako příhradový nosník, působení panelů je pak analogické s diagonálami dvojitě Warrenova příhradového systému.



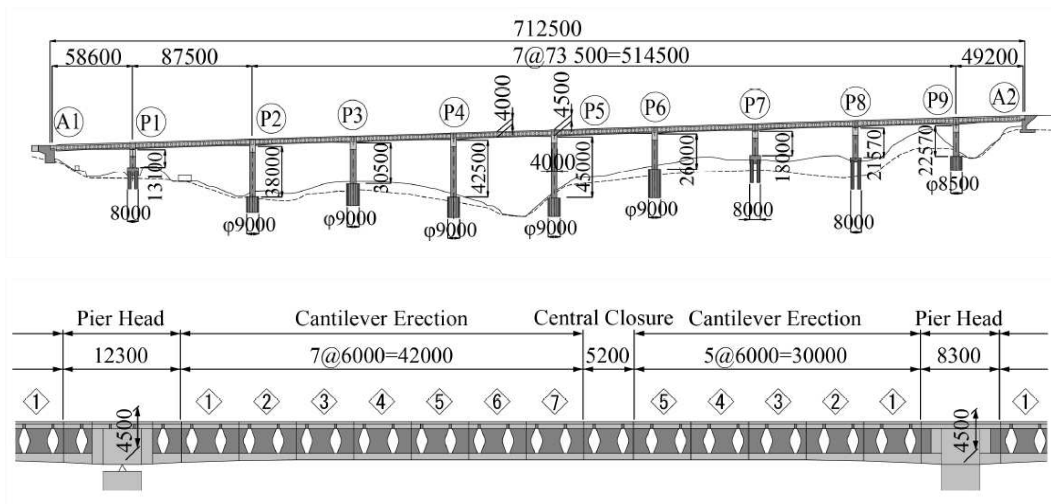
Obr. 2.5 – Analogie chování mostu s „*butterfly webs*“ konstrukčním systémem a příhradovým dvojitě Warrenovým příhradovým nosníkem (Kasuga, 2010)^[5].

Kapitola 2

Kompozitní a hybridní konstrukce



Prvním mostem zkonstruovaným touto technologií je Takubogawa Bridge v Japonsku. Jedná se o spojitý most o deseti polích s celkovou délkou 721,5 m a délkou nejdelšího pole 87,5 m. Výstavba mostu probíhala analogií letmé betonáže. Dispoziční schémata tohoto mostu a dispoziční schéma použitého HPC panelu je znázorněno na Obr. 2.6 a Obr. 2.8.



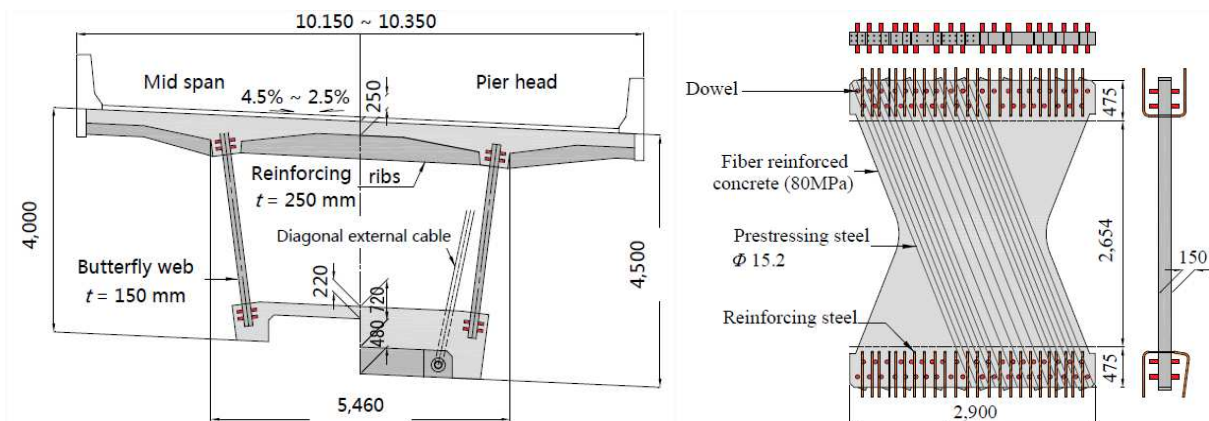
Obr. 2.6 – Podélný řez mostu Takubogawa Bridge s butterfly webs stojinami (Kasuga, 2010)^[5].

Délka panelů je na mostě 2,9 m a panely jsou od sebe osově vzdáleny 3,0 m, panely se tedy nedotýkají a odpadá tedy nutnost řešit jejich konstrukční napojení a přenos sil zprostředkovávají horní a spodní spřažené desky. Výška mostu se pohybuje v rozmezí od 4,0 m do 4,5 m, malý rozdíl výšky nad pilířem a v poli je dán konstantním tvarem panelu a náběh je tedy realizován jen v rámci zvětšení tloušťky spodní desky. Oproti klasickým letmo betonovaným mostům, jejichž výška uprostřed pole tvoří zhruba polovinu výšky nad pilíři, je v případě „butterfly web“ mostu jen malý rozdíl mezi výškou průřezu v poli a nad podporou. Tato charakteristika má za následek vyšší hodnotu ohybového momentu od zatížení v poli a poměrně nižší hodnotu ohybového momentu nad podporou ve srovnání s klasickou letmo betonovanou konstrukcí. Konstantní výška stojin, a tedy i jejich tuhosti, po délce mostu má příznivý vliv na postupný roznos smykových sil a omezení koncentrace extrémních napětí ve stěnách v blízkosti podpor.



Obr. 2.7 – Pohled do komory mostu Takubogawa při výstavbě (Kasuga, 2010)^[5].

Na mostě Takubogawa bylo pro stěny průřezu použito HPC betonu s charakteristickou pevností 80 MPa, tloušťka stěn je 150 mm. Kromě rozptýlené výztuže z drátků o vysoké pevnosti byly prvky předepnuty předem předpjatými lany ve směru hlavních tahových napětí, betonářská výztuž je v prvku použita pouze pro účely zajištění sprážení s horní a spodní monolitickou deskou mostovky. Betonářská výztuž je dále doplněna ocelovými trny. Schéma vyztužení je patrné na Obr. 2.8 b).



Obr. 2.8 – a) Příčný řez mostu Takubogawa Bridge; b) schéma předpětí a spráhovacích přípravků prefabrikovaného UHPC panelu (Kasuga, 2010)^[5].

Použití lehkých UHPC stojin má podobně jako v případě stěn z ocelového trapézového plechu anebo příhradových stojin vliv na redukci vlastní tíhy hlavní nosné konstrukce a to o 10–15 % pokud je navržený most srovnán s konvenčním monolitickým letmo betonovaným mostem stejného rozpětí. Porovnání modelů viz

Kapitola 2

Kompozitní a hybridní konstrukce



tabulka. Redukce tíhy hlavní nosné konstrukce má vliv i na sekundární úspory na množství lan podélného předpětí a redukcí dimenze pilířů a základových konstrukcí.

Side view & Section		Weight (superstructure)	Prestressing steel	Block length																																												
Box Girder (concrete web) 		153000kN (1.00)	287t (1.00)	3.0~4.0m 8blocks																																												
Butterfly Web 		138800kN (0.91)	233t (0.81)	6.0m 5blocks																																												
	<table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th colspan="2">CON(Cast-in-situ)</th> <th colspan="2">CON(Precast panel)</th> <th colspan="2">Reinforcing steel</th> <th colspan="2">Prestressing steel</th> <th colspan="2">Total</th> </tr> <tr> <th></th> <th>volume</th> <th>CO2</th> <th>volume</th> <th>CO2</th> <th>quantity</th> <th>CO2</th> <th>quantity</th> <th>CO2</th> <th>CO2</th> <th>ratio</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Box Girder</td> <td>6022m3</td> <td>1770.5t</td> <td></td> <td>0.0t</td> <td>1247.8t</td> <td>957.1t</td> <td>287.3t</td> <td>379.8t</td> <td>3107.4t</td> <td>1.00</td> </tr> <tr> <td>Butterfly Web</td> <td>5021m3</td> <td>1476.2t</td> <td>532m3</td> <td>234.1</td> <td>1177.5t</td> <td>903.2t</td> <td>232.8t</td> <td>307.8t</td> <td>2921.2t</td> <td>-186.1t</td> </tr> </tbody> </table>		CON(Cast-in-situ)		CON(Precast panel)		Reinforcing steel		Prestressing steel		Total			volume	CO2	volume	CO2	quantity	CO2	quantity	CO2	CO2	ratio	Box Girder	6022m3	1770.5t		0.0t	1247.8t	957.1t	287.3t	379.8t	3107.4t	1.00	Butterfly Web	5021m3	1476.2t	532m3	234.1	1177.5t	903.2t	232.8t	307.8t	2921.2t	-186.1t			
	CON(Cast-in-situ)		CON(Precast panel)		Reinforcing steel		Prestressing steel		Total																																							
	volume	CO2	volume	CO2	quantity	CO2	quantity	CO2	CO2	ratio																																						
Box Girder	6022m3	1770.5t		0.0t	1247.8t	957.1t	287.3t	379.8t	3107.4t	1.00																																						
Butterfly Web	5021m3	1476.2t	532m3	234.1	1177.5t	903.2t	232.8t	307.8t	2921.2t	-186.1t																																						

Obr. 2.9 – Porovnání letmo betonovaného mostu zhotoveného klasicky s mostem s vylehčenými UHPC stěnami (Kata, 2013)^[6].

Redukce vlastní tíhy vahadel má při výstavbě další pozitivní efekt, a tím je možnost betonovat po delších betonážních záběrech. Je uváděno, že betonážní záběry mohou být díky nižší váze až o 50 % delší (Kasuga, 2010)^[5]. Užití delších betonážních záběrů vede k omezení jejich celkového počtu, a tedy i k významnému zkrácení doby výstavby. Dalším efektem a výhodou použití prefabrikovaných panelů je absence nutnosti jakékoliv práce na stěnách na staveništi.

Mosty extrémního rozpětí nad 400 m jsou téměř výhradně konstruovány z oceli, protože při použití monolitického betonu neúměrně stoupá zatížení mostu vlastní tíhou a dimenze hlavních nosných prvků (závěsů nebo visutého lana) by byly limitujícím prvkem proveditelnosti takovéto konstrukce. Výzva je limitovat hmotnost mostní konstrukce z betonu, UHPC jako extrémně únosný materiál je v tomto směru perspektivní a teoreticky je možné navrhovat 3x lehčí konstrukci mostovky než za použití betonu standardní třídy.

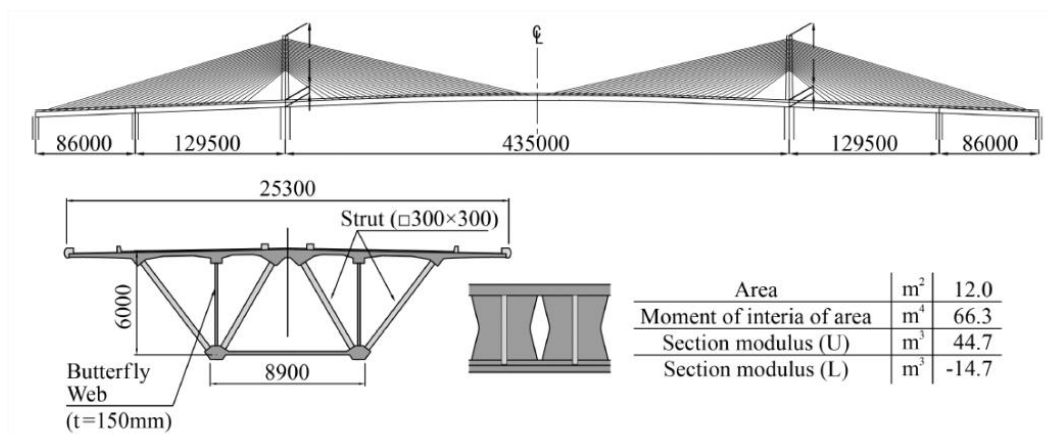
V posledních dvou letech byla zkoumána realizovatelnost mostu extrémního rozpětí, jehož hlavní nosná konstrukce by byla tvořena komorovým průřezem s UHPC stěnami typu *butterfly webs* (Kasuga, 2015)^[7]. Na základě materiálových testů HPC panelů s vysokopevnostními vlákny o pevnosti 2000 MPa a na základě

Kapitola 2

Kompozitní a hybridní konstrukce



experimentálního ověření dynamických vlastností trémového mostu se stojinami *butterfly webs* byly navrženy dvě varianty mostů s délkou hlavního pole 435 m. První variantou byl most typu extradosed a druhou byl zavěšený most. Obě varianty jsou navrženy s velmi tenkou deskou mostovky, která je pro zajištění tuhosti podporována kromě HPC stěn i vzpěrami, které zároveň zajišťují torzní tuhost mostovky. Podélné dispoziční schéma mostu je patrné na Obr. 2.10.



Obr. 2.10 – Schéma dispozice extradosed mostu s rozpětím hlavního pole 435 m s použitím *butterfly web* HPC panelů (Kasuga, 2015)^[7].

3 Reologické vlastnosti betonu

Reologickými procesy v betonu označujeme dlouhodobé změny přetvoření betonového prvku nebo konstrukce – smršťování a dotvarování. Obě tyto složky způsobují nárůst přetvoření betonu v čase, v běžných podmínkách při působení v tlaku vedou ke zmenšování betonového prvku. Správné určení těchto přetvoření a jejich nárůstu v čase je velmi důležité pro určení napjatosti na konstrukci v průběhu jejího užívání, a to především pro spřažené konstrukce, kde je beton spojen s ocelí, která musí odolávat napětí vyvozené právě tímto přetvořením.

Smršťování betonu je proces ovlivněný transportem vody v betonu a z něj a závisí tedy především na okolní vlhkosti, na rozměrech prvku a na složení betonu. Celkové poměrné smršťování se skládá ze dvou částí. Z poměrného smršťování vysycháním a z poměrného autogenního smršťování. Autogenní smršťování je proces ovlivněný vázáním zbývající záměsové vody v betonu a tento proces začíná ihned po betonáži prvku. Velikost autogenního smršťování v čase závisí především na třídě betonu (jeho receptuře) a na době, která od betonáže uplynula. Smršťování vysycháním je způsobeno únikem volné vody v betonu do okolního prostředí a je ovlivněno opět třídou betonu, vlhkostí okolního prostředí a tvarem betonového prvku, konkrétně jeho obvodem, který je vysychání vystaven. V prostředí s vysokou vlhkostí se beton nesmršťuje, proto, aby se zabránilo vzniku tzv. “smršťovacích trhlin” v betonu, je nutné mladý beton ošetřovat vodou (propařováním, kropením nebo jeho skladováním v prostorech s vysokou vlhkostí vzduchu) a zabránit jejímu úniku například přikrytím prvků z mladého betonu ochrannou fólií.

K dotvarování dochází při zatížení betonového prvku a je projevem viskoelastického chování betonu. Velikost dotvarování závisí hlavně na velikosti působícího zatížení, na čase, kdy bylo zatížení do konstrukce vneseno, na rozměrech betonového prvku, na třídě betonu a na okolní vlhkosti. Míru dotvarování betonového prvku popisujeme součinitelem dotvarování, který udává celkovou hodnotu přetvoření dotvarováním v daném čase jako násobek elastické deformace (popsanou Hookovým zákonem).

Pro určení hodnot přetvoření od smršťování a dotvarování se můžeme v dnešní době setkat nejčastěji s následujícími přístupy:

- model dle normy ČSN EN 1992-1^[9] nebo ČSN EN 1992-2^[10]
- model dle Fib Model kódu 2010 (MC10)^[11]
- model B4 (Bažant, 2015)^[12] a starší modely B3 a B3 II (Bažant, 2000)^[13]
- modely dle amerických norem ACI^[8]
- model GL2000 (Gardner-Lockman)^[8]

Modely reologického chování betonu podle Eurokódu^{[9], [10]} kombinují teorii stárnutí s teorií zpožděné pružnosti, což vyřešilo problém s nevyhovujícím modelováním chování odtíženého prvku. Modely dále částečně postihují materiálové vlastnosti betonu, kdy součinitel dotvarování a přetvoření od smršťování závisí na 28denní pevnosti betonu v tlaku a také na typu použitého cementu. Model smršťování navíc zohledňuje poměr průřezové plochy a obvodu prvku. Ve vztazích pro výpočet dotvarování a smršťování se objevují na základě materiálových vlastností četné konstanty, které lze (a je to doporučeno, protože norma odhaduje odchylku od skutečného chování až $\pm 30\%$) po provedených zkouškách na testovacích vzorcích aktualizovat a docílit tím lepší shody modelu s realitou.

Nejmodernější a nejrozšířenější model pro popis reologického chování betonu je model B4 (Bažant, 2015)^[12]. Model B4 je formulován na základě velkého množství měření a zkoušek, a to jak provedených v nedávné době, tak i publikovaných dříve. Model B4 popisuje dotvarování a smrštění daleko komplexněji a se zahrnutím více vlivů, než modely dle Eurokódu – například uvažuje s vlivem složení betonové směsi a třídí betonové prvky do typů podle tvaru. 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, pro konkrétní projekt.

Model byl vyvinut revizí modelu B3 II (Bažant, 2000)^[13] za účelem co možná nejpřesnějšího popisu dlouhodobých reologických změn u konstrukcí velkého významu, jako jsou například mosty velkých rozpětí (zavěšené, letmo betonované či spřažené), vysoké budovy, obaly reaktorů jaderných elektráren, přehrad, chladicí věže nebo velké skořepinové konstrukce (Bažant, 2015)^[12]. Pro takové konstrukce je nezbytný co možná nejpřesnější popis dlouhodobých vlastností betonu, aby byla

Kapitola 3

Reologické vlastnosti betonu



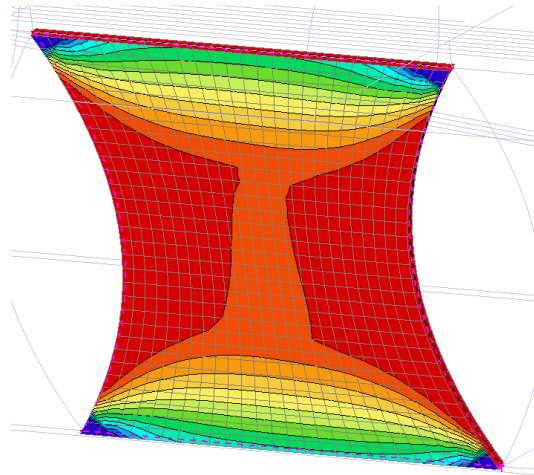
možnost navrhnout konstrukce na základě reálného chování, pro zaručení použitelnosti těchto konstrukcí po celou dobu jejich dlouhé životnosti.

3.1 Vliv smršťování a dotvarování na hybridní mosty

Hybridní konstrukce se stěnami z trapézového plechu nebo s příhradovou konstrukcí nevykazují v tak výrazné míře úbytek tlakové rezervy od smršťování a dotvarování betonu horní a spodní desky. Stěna komory z trapézového plechu má oproti klasické stěně ocelobetonového komorového průřezu výrazně menší tloušťku (řádově 20 %), a navíc díky „harmonikovému efektu“ má řádově nižší tuhost v podélném směru mostu. Dostatečná tuhost stěny proti boulení je pak v příčném směru dosažena profilováním plechu. Díky nízké tuhosti stěn v podélném směru je zřejmé, že tyto stěny brání podélné deformaci od reologických změn v betonu jen minimální měrou, a tedy napětí ve stěnách v důsledku smršťování a dotvarování je omezené. Hybridní mosty se stěnami z příhradových nosníků fungují z hlediska přenosu deformací od reologických změn v betonu podobným způsobem jako mostech se stěnami z trapézového plechu. Diagonály příhradové konstrukce přenášejí účinky reologických změn svým ohybem, avšak opět díky nízké tuhosti v podélném směru, jsou tyto účinky nízké.

Vzhledem k tomu, že UHPC panely jsou předem předpjaté, je důležité uvažovat účinek reologických změn samotného panelu, neboť dotvarování od předpětí bude způsobovat postupné zkracování tahové diagonály, a tedy i smykovou deformaci celého mostu. Stejně tak tlačená diagonála bude dotvarovávat po zabudování do konstrukce a tato změna může mít viditelný vliv na globální deformaci celé nosné konstrukce vzhledem k tomu, že je očekávána vysoká míra tlakového přetvoření UHPC vzhledem k jeho vysoké tlakové pevnosti. Globální deformace mostu bude zejména ovlivněna dotvarováním tlakových diagonál, což se projeví jako zvýšená smyková deformace mostu a nárůstu svislého průhybu v poli. Dotvarování samotného UHPC stěnového prvku se věnuje detailněji kapitola 7.4.

V případě spřažení beton-UHPC, kdy se jednotlivé složky spřaženého průřezu smršťují a dotvarují, hovoříme o diferenčním smršťování, respektive dotvarování. Vzhledem k nespojitosti stěn při použití UHPC panelů je zřejmé, že v případě průběhu napětí od diferenčního smršťování a dotvarování bude účinek na UHPC prvcích lokalizován v místě spřažení horní (spodní) desky s UHPC panelem (Obr. 3.1).



Obr. 3.1 – Účinek diferenčního smršťování a dotvarování UHPC stěn a horní a spodní desky na napjatost (hlavní tlaková napětí; nulové hodnoty vykresleny červeně) v UHPC panelu

Z hlediska napjatosti v horní a spodní desce mostovky je chování panelu podobné jako v případě hybridních ocelobetonových mostů. Celková (okamžitá) tuhost panelů se sice blíží spíše chování klasického ocelobetonového spřaženého mostu (při uvažování panelů tl. 100 mm oproti tloušťce ocelové stojiny 25 mm), avšak zpožděná vlastní deformace panelů činí tyto prvky v čase poddajnějšími (smršťují a dotvarují se spolu se spřaženými deskami), což způsobuje nižší úbytek tlakové rezervy v horní a spodní desce mostovky. Jinými slovy, účinek diferenčního smršťování a dotvarování UHPC prvků a spřažených desek dosahuje násobně nižších hodnot, než je celkový účinek smršťování a dotvarování v případě ocelobetonového mostu.

Míra a nárůst přetvoření od smršťování a dotvarování UHPC je velkou měrou závislá na množství použité rozptýlené výztuže (drátků) a na způsobu ošetřování betonu, což zahrnuje i případné ošetřování za zvýšené teploty, tzv. *heat treatment*, který má dominantní vliv na vývoj hydratace při ošetřování a s tím spojeným nárůstem autogenním smršťováním a dotvarováním. Pokud je do prvku z UHPC vneseno zatížení až po aplikaci ošetřování za zvýšené teploty, je většina budoucích reologických změn eliminována a je dosaženo vyšší rozměrové stálosti prvku v průběhu užívání. Toto je velmi důležité z důvodu, že UHPC má řádově vyšší pevnost než beton běžné třídy. U mostu v předložené studii je poměr charakteristických pevností 5. UHPC má tlakovou pevnost 150 MPa a beton C30/37 použitý pro horní a spodní desku mostovky má tlakovou pevnost 30 MPa. Předpokládáme-li efektivní návrh všech konstrukčních prvků, pak i napjatost zejména v tlačené diagonále UHPC

Kapitola 3

Reologické vlastnosti betonu



panelu bude několikrát vyšší než v deskách z betonu C30/37. Součinitel dotvarování UHPC je sice nižší než u betonu běžné třídy, ale přesto by diferenční dotvarování mohlo způsobit vyčerpání tlakové rezervy v UHPC panelech. Násobně vyšší hodnoty napětí ve stěnách by také způsobily výrazné přetvoření tlakových diagonál, což by vedlo na nadměrný průhyb mostní konstrukce.

3.2 Reologické vlastnosti UHPC

V současné době neexistuje ucelený matematický model smršťování a dotvarování. Modely (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 smršťování a dotvarování v raných stádiích. Způsobům ošetřování a jeho účinkům se věnuje kapitola 4. Dalším faktorem je ovlivnění míry dotvarování využitím rozptýlené výztuže z vysokopevnostní oceli, který popíšeme detailněji v kapitole 3.2.4.

3.2.1 Smršťování UHPC

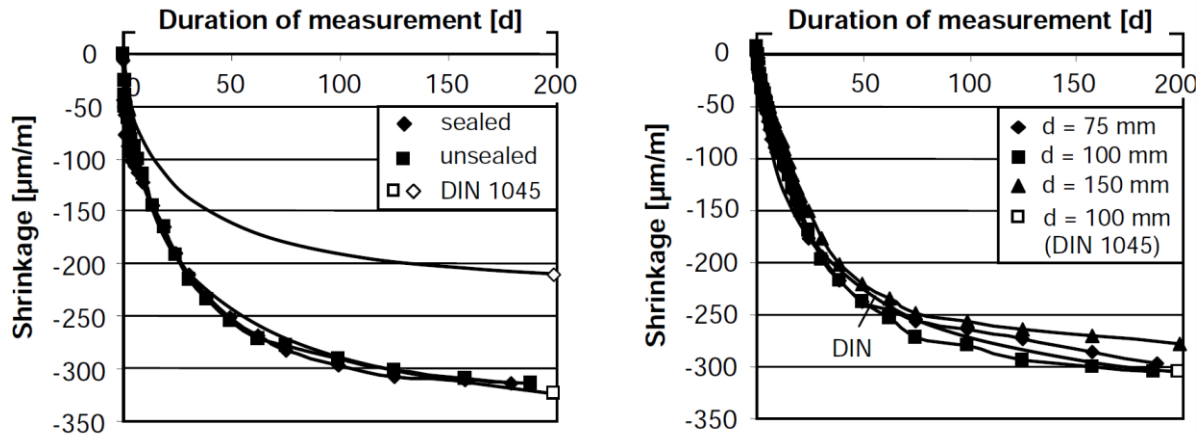
UHPC obsahuje jen velmi malé množství vody a naprostá většina záměsové vody se ve struktuře udrží a je hydratací vázána v cementovém kameni. Při dostatečném ošetřování povrchu betonového prvku v raném stádiu je téměř úplně eliminován následný vliv smršťování od vysychání a majoritní efekt má autogenní smršťování. Toto prokazují i zkoušky provedené v Německu (Burkart, 2008)^[14], při kterých bylo měřeno smršťování UHPC vzorků s průměrnou 28denní pevností 166 MPa. Na Obr. 3.2 vlevo je porovnání celkového poměrného přetvoření od smršťování vzorku zabaleného do vodonepropustné fólie a vzorku vystaveného okolí (relativní vlhkost 65 % při průměrné teplotě 20 °C). Vzorky byly před začátkem měření ošetřovány ve 100% relativní vlhkosti. V porovnání s normovým přístupem pro betony běžné třídy dle DIN modifikovaným pro predikci smršťování UHPC jsou s naměřenými hodnotami značné rozdíly – autogenní smršťování je výrazně podhodnoceno (v grafu symbol \diamond) a zároveň smršťování vysycháním nadhodnoceno. Paradoxně, součet obou složek vykazuje dobrou shodu s naměřenými hodnotami (symbol \square). Celkové hodnoty smršťování byly dále 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

Kapitola 3

Reologické vlastnosti betonu



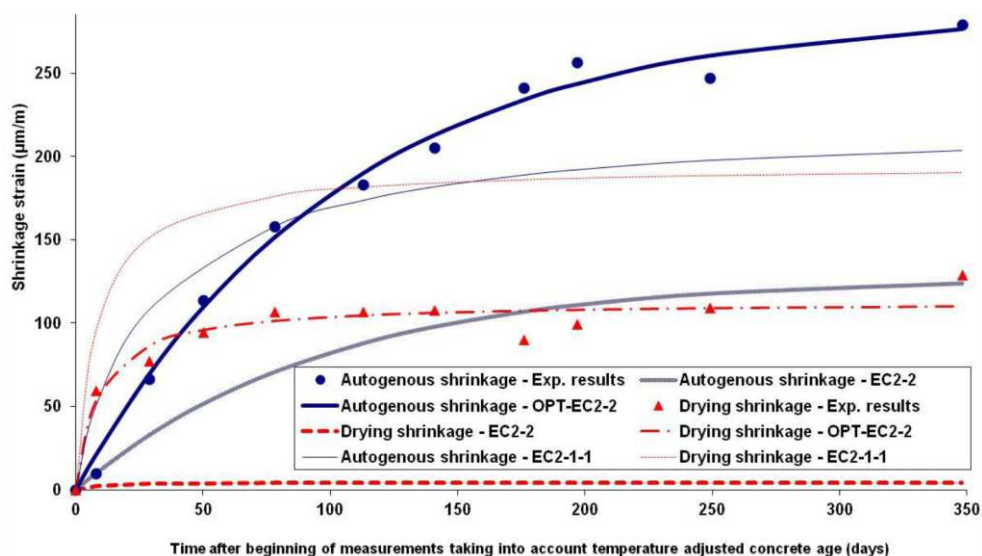
z UHPC je však rozptyl velmi malý, což potvrzuje majoritní efekt autogenního smršťování.



Obr. 3.2 – Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků; vlevo: vliv smršťování od vysychání; vpravo: vliv velikosti vzorku (Burkart, 2008)^[14].

I z provedeného experimentu je patrné, že celková míra poměrného přetvoření od smršťování UHPC se významně neliší od hodnot predikovaných pro beton běžné třídy, což je vhodné z hlediska spřahování těchto dvou materiálů a omezení napjatosti v důsledku diferenčního smršťování. Další studie (Graybeal, 2006)^[15] a i vlastní experiment na patentované směsi (Příloha 3 – Protokol měření KÚ 2021) však vykazuje více než dvojnásobnou míru autogenního smršťování (až 790 $\mu\text{m/m}$ viz Graybeal (2006)^[15] a až 850 $\mu\text{m/m}$ pro vlastní experimentální měření). Většina autogenního smršťování se však realizuje v prvních 5 dnech po betonáži a z hlediska diferenčního smršťování tak nezpůsobuje žádnou překážku.

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, 2012)^[16], avšak zde byly prvky vystaveny prostředí o 50% relativní vlhkosti ve velmi krátkém čase po betonáži. Výsledkem je patrný vliv smršťování od vysychání, poměrné přetvoření od autogenního smršťování je srovnatelná s výsledky uvedenými výše na Obr. 3.2. Na grafu naměřených hodnot smršťování Obr. 3.3 je patrný výrazný nesoulad s doporučením v Eurokódu.



Obr. 3.3 – Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků (Francisco, 2012)^[16].

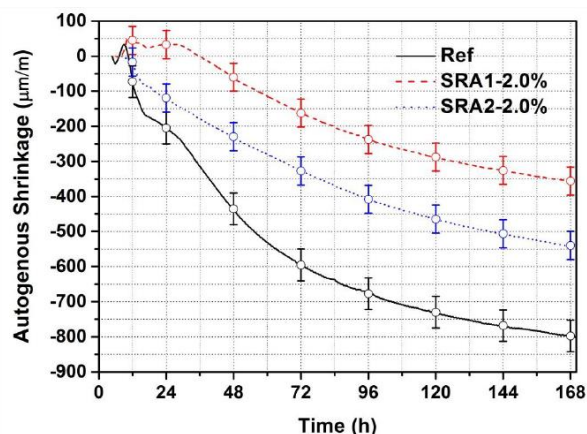
Na základě naměřených hodnot Francisco (2012)^[16] modifikoval materiálové parametry pro dosažení shody matematického modelu s experimentem. Takto přizpůsobený model však nelze používat plošně a autoři doporučují výzkum vlastností konkrétní receptury UHPC před jejím použitím v konstrukcích.

3.2.2 Redukce přetvoření smršťováním použitím polymerních příměsí

Pro UHPC je charakteristický nízký vodní součinitel a relativně vysoká míra autogenního smršťování, které může být pro UHPC nebezpečné, zejména pokud betonovaný prvek má tenké a masivní části, kdy může docházet k smršťovacím trhlinám v raném stádiu UHPC prvku. Pro předem předpjaté prvky je vysoká míra smršťování významná složka ztrát předpětí.

Pro omezení projevů autogenního smršťování je možné použít polymerní příměsi, které redukují nárůst i konečnou hodnotu autogenního smršťování. Tyto příměsi se typicky dávkuje v množství do 2 % množství cementu a označují je zkratkou „SRA“ (z anglického „*Shrinkage reducing admixture*“). Mechanismus fungování polymerních příměsí není zcela objasněn (Zuo, 2017)^[17], ale předpokládá se, že jejich fungování v cementových kompozitech významně snižuje povrchové napětí vody obsažené v pórech a zároveň způsobují bobtnání v prvních hodinách po betonáži. Této problematice se detailně zabývají studie (Zuo, 2017)^[17] a (Androuët, 2021)^[18], které zkoumají vliv různých organických polymerů na míru autogenního smršťování.

V první zmíněné studii (Zuo, 2017)^[17] jsou porovnávány příměsi na bázi polyetheru (na Obr. 3.4 označen jako „SRA1“) a nově vyvinuté příměsi na bázi syntetizovaného monomeru polyetheru s kyselinou akrylovou (označeno jako „SRA 2“).



Obr. 3.4: Efekt příměsí na bázi polyetheru a polymeru redukující smršťování a porovnání s vzorky bez příměsí. (Zuo, 2017)^[17].

Účinek obou příměsí je patrný ihned po betonáži – v čase 24 hodin vykazuje vzorek s využitím SRA2 nulovou míru přetvoření smršťováním, kdy směs bez příměsí vykazuje přetvoření přes 200 µm/m. Z nárůstu přetvoření je patrný velký vliv příměsí

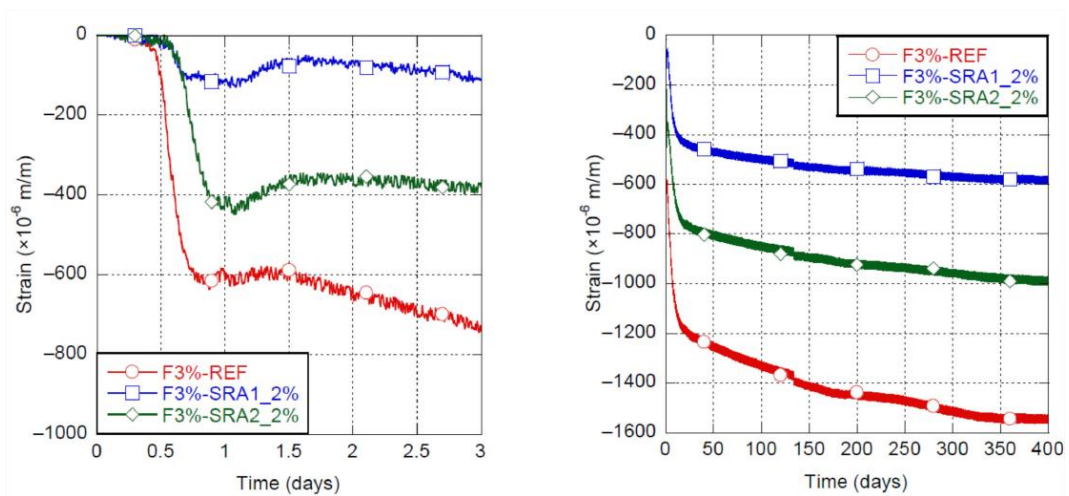
Kapitola 3

Reologické vlastnosti betonu



v prvních 72 hodinách, dále již nárůst přetvoření pokračuje pro všechny 3 směsi stejným tempem.

Podobných hodnot snížení přetvoření autogenním smršťováním bylo dosaženo i při použití polymerních příměsí na bázi práškového a kapalného polyolu (Androuět, 2021)^[18]. Rozdíl mezi použitím polyolu v práškové formě (na Obr. 3.5 označeného jako „SRA2“) a polyolu v tekuté formě (označeného „SRA1“) je i to, že práškový byl vmíchán do sypkého premixu směsi UHPC a tekutý polyol byl přidán spolu s vodou a superplastifikátorem.



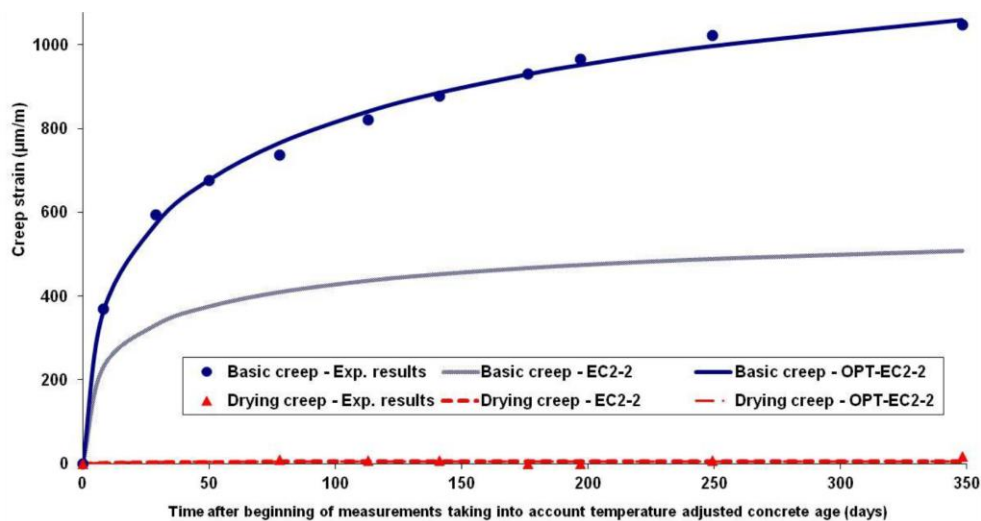
Obr. 3.5: Efekt příměsí na bázi polyolu (varianta tekuté a práškové příměsí) redukující smršťování a porovnání s vzorky bez příměsí. (Androuět, 2021)^[18].

Zajímavý je u této příměsí na bázi polyolu právě účinek rozdílného způsobu vmíchání do směsi, kdy účinek stejného množství polymeru dodaného současně s vodou a superplastifikátorem má významně vyšší účinek v prvních 24 hodinách po betonáži. Stejně jako u polymerních příměsí z předchozí studie (Zuo, 2017)^[17] je účinek nejvíce patrný v prvních 72 hodinách. Použití tekutého polyolu SRA1 redukovalo přetvoření od smršťování o 81 % v čase 1 den po betonáži a o 63 % v čase 400 dní po betonáži.

3.2.3 Dotvarování UHPC

V případě predikce přetvoření od dotvarování se jedná o podobný problém jako v případě predikce smršťování. Ve francouzské studii Francisco (2012)^[16] autoři stejně jako pro model smršťování modifikovali parametry modelu v Eurokódu a opět aproximovali svůj experiment velmi přesně (Obr. 3.6). Bohužel se jedná o izolovaný experiment a není možné jeho zobecnění při použití dalších aspektů ovlivňujících míru a rychlost nárůstu přetvoření od dotvarování.

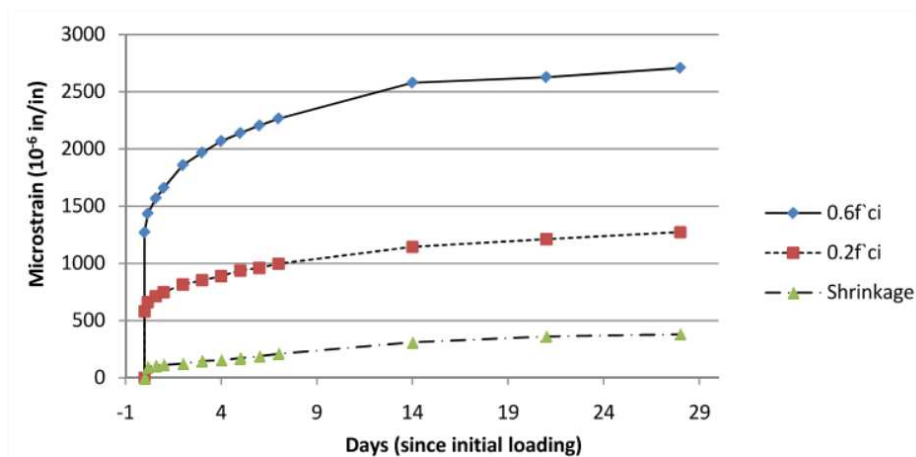
Hlavní nesnáze při definování univerzálního matematického modelu je současné ovlivnění míry přetvoření od dotvarování více aspekty, než je tomu v případě betonu běžné třídy. Jedná se zejména o použití drátků jako rozptýlené výztuže a nové metody ošetřování betonu zvláště vhodného pro použití na UHPC,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



Obr. 3.6 – Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků (Francisco, 2012)^[16].

Zajímavé chování se projevuje při vyšších úrovních působícího zatížení, kde na rozdíl od dotvarování betonu běžné třídy není patrná nelineární složka dotvarování. Některá měření uvádějí srovnatelnou, či nižší hodnotu součinitele dotvarování prvku zatíženého násobně vyšším napětím. Dle výzkumu provedenému na MIT (Flietstra, 2012)^[19] byl na válcových vzorcích naměřen součinitel dotvarování ve stáří 28 dnů o třetinu nižší při aplikovanému napětí na úrovni 60 % průměrné pevnosti oproti napětí na úrovni 20 % průměrné pevnosti. Toto měření je dokumentováno na Obr. 3.7, při působení trojnásobného zatížení je naměřené přetvoření od dotvarování přibližně

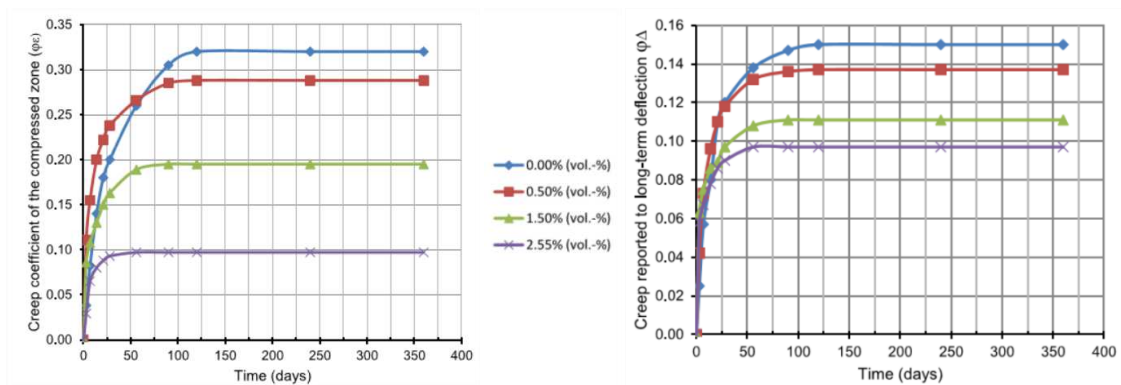
dvojnásobné. Ošetřování UHPC za zvýšené teploty se detailně věnují následující kapitoly.



Obr. 3.7 – Nárůst přetvoření od dotvarování při různých úrovních působícího zatížení (Flietstra, 2012)^[19].

3.2.4 Vliv rozptýlené výztuže

Rumunská studie se zabývala vlivem množství drátků na dotvarování nosníků I průřezu z UHPC (Bărbos, 2016)^[20]. Charakteristická pevnost použité směsi je 150 MPa a byly použity 4 různé receptury s rozdílným množstvím drátků od 0 % (nevztužený nosník) po 2,55 %. Pro urychlení experimentu dlouhodobého chování byly vzorky 1 den po betonáži umístěny do prostředí s 90% relativní vlhkostí při teplotě 90 °C po dobu 5 dní. Jak již bylo popsáno výše, teplotní ošetřování tvrdnoucího UHPC vede na významné zrychlení reologických procesů v betonu a jak je patrné na grafech na Obr. 3.8, prvky dosáhly maximálního přetvoření od dotvarování v časech od 60 do 120 dnů, přičemž je možné pozorovat závislost mezi množstvím drátků a časem dosažení maximálního přetvoření (čas se s množstvím drátků snižuje).



Obr. 3.8 – Nárůst přetvoření od dotvarování prvků vyztuženého různým množstvím drátků. (Bărbos, 2016)^[20].

Zásadní vliv má rozptýlená výztuž na absolutní hodnotu přetvoření od dotvarování, prvek vyztužený 2,55 % drátků vykazuje zhruba třetinový součinitel dotvarování v tlačené oblasti oproti nevztuženému prvku. Toto je přímým důsledkem zvýšení tuhosti ideálního průřezu betonového prvku ocelovými drátky, jejichž vliv na přetvoření roste nepřímě úměrně s rostoucím součinitelem dotvarování.

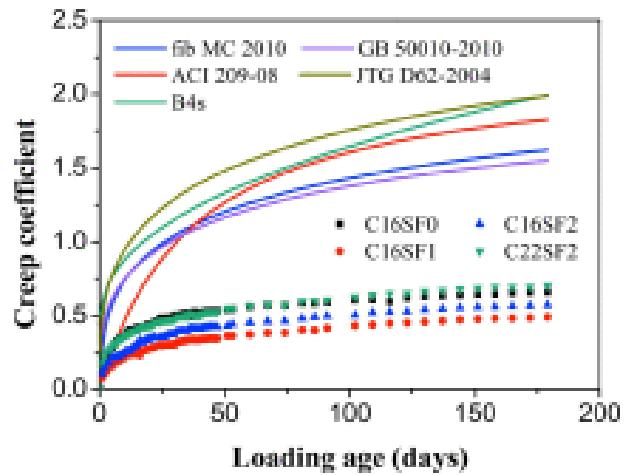
V nedávné studii (Yi, 2018)^[21] byl pozorován ještě výraznější rozdíl na směsích s vodním součinitelem 0,16 ve 3 variantách vyztužení drátky: bez vyztužení, s 1 % a 2 % drátků. Publikované výsledky ukazují, že při rostoucím vyztužením drátky nad optimální mez již nedochází k redukci účinků dotvarování, ale k jeho mírnému nárůstu, jak je patrné na Obr. 3.9 níže. Při vyztužení 1–1,5 % drátků uvádí studie (Yi, 2018)^[21]

Kapitola 3

Reologické vlastnosti betonu



přibližně třetinovou redukcí hodnoty přetvoření od dotvarování, podobně jako (Bärbos, 2016)^[20].



Obr. 3.9 – Nárůst přetvoření od dotvarování prvků vyztuženého různým množstvím drátků a porovnání s predikovanými hodnotami (Yi, 2018)^[21].

Yi (2018)^[21] dále uvádí srovnání s modely pro predikci dotvarování dle jednotlivých dostupných materiálových modelů včetně modelu B4, ale je pozorováno významné nadhodnocení absolutní hodnoty přetvoření od dotvarování všemi dostupnými materiálovými modely. Tento závěr bude zohledněn dále při navržených úpravách modelu B4 v kapitole 6, aby bylo možné tento modifikovaný model použít pro predikci smršťování a dotvarování UHPC.

4 Ošetřování UHPC

Ošetřování betonových prvků se provádí různými způsoby a jeho cílem je zlepšení mechanických vlastností betonu, nebo případně zamezení účinků vnějšího prostředí v době, kdy je beton ještě mladý a mohlo by dojít k jeho znehodnocení a rozvoji smršťovacích trhlin. V případě UHPC ošetřování zvyšuje kvalitativní charakteristiku vzorků, zvyšují se jak krátkodobé charakteristiky (tlaková i tahová pevnost), ale i dlouhodobé vlastnosti (snížení projevů smršťování a dotvarování). Možné způsoby ošetřování, včetně inovativních způsobů, jako je použití nanomateriálů, budou popsány dále v této kapitole.

Dalším požadavkem na ošetřování je nutnost zajištění ošetřování celého povrchu betonového prvku rovnoměrným způsobem, aby byly eliminovány lokální změny barevnosti v místech, kam se například při ošetřování vodou nemůže voda dostat nebo kde se vody naopak zdržuje nadbytek po kondenzaci z vodních par. Příklad následků nevyhovujícího ošetřování betonového nosníku je zobrazen na Obr. 4.1. Na nosníku jsou viditelně patrná místa, kudy stékala voda po svislém povrchu a kde se soustřeďovala při dolním okraji. Pro UHPC, jako vysoce kvalitní materiál, je homogenita a barevnost povrchu jedním ze znaků prémiové jakosti a profesionality dodavatele. Pohledovost betonových povrchů při prefabrikaci je parametrem, jehož nesplnění může stejně jako nevyhovující mechanické vlastnosti vést k reklamaci díla a dalším nákladům.



Obr. 4.1: Efekt nerovnoměrného ošetřování (Obrázek převzat z online článku)^[22].

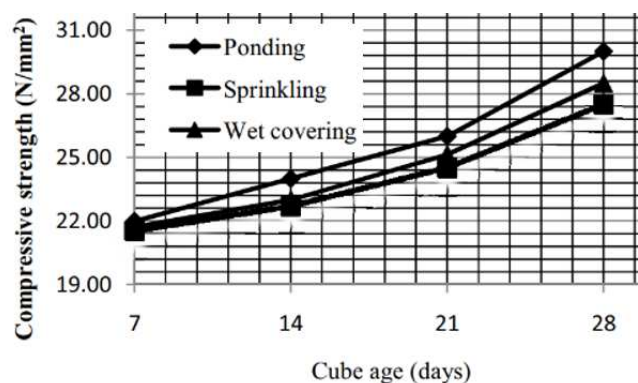
4.1 Způsoby ošetřování

Standardní metody ošetřování ve výrobě betonových prefabrikovaných a předem předpjatých prvků můžeme rozdělit na pasivní, tedy zamezení odparu volné vody z povrchu betonu (překrytí prvků PE fólií), a aktivní. Aktivní způsoby ošetřování jsou následující:

- **překrytí** propustnou tkaninou, která je periodicky zvlhčována,
- **zkrápění** prvků vodou v kontrolovaném prostředí (stanu),
- **propařování** prvků v utěsněném prostředí (stan nebo propařovací komora),
- **ponoření** prvků do vodního prostředí.

Pro předem předpjaté prvky je nejčastější metodou buď zakrytí (pro dlouhé prvky) anebo propařování ve speciálních stanech, či izolovaných komorách (velmi časté pro drobné prvky – betonové potrubí, předpjaté železniční pražce), jak popisuje Awasthi (2017)^[23].

Efekt různých způsobů ošetřování na nárůst pevnosti a omezení smršťování na ošetřovaném betonu běžných tříd je publikován v několika studiích, jak bylo uvedeno v předchozí kapitole a jak vyplývá z vlastních měření a porovnání vzorků ošetřovaných ve vodním prostředí a na vzduchu. Například James (2011)^[24] konstatuje, že nárůst pevnosti je nejvyšší při ponoření prvků do vody, a to přibližně 8–10 % ve srovnání s prvky zakrytými vlhčenou tkaninou. Efekt zkrápění vodou je ještě o 3–5 % nižší než efekt zakrytí vlhčenou tkaninou, jak je patrné z Obr. 4.2 níže i pro beton běžné třídy s pevností mezi 25 MPa a 30 MPa.



Obr. 4.2: Efekt ošetřování různými metodami na pevnost betonu (James, 2011)^[24].

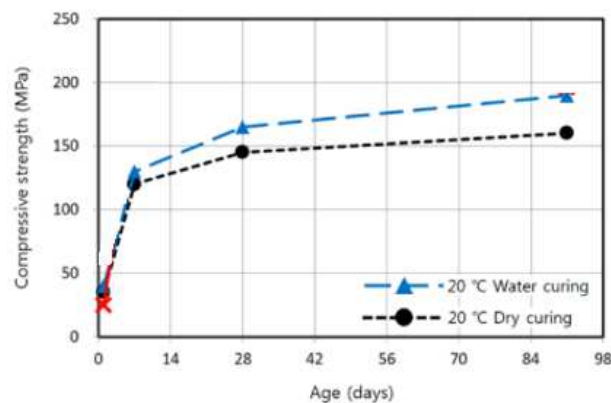
Kromě ošetřování betonu vodou, jak bylo popsáno výše, jsou i alternativní metody, které umožňují dosáhnout srovnatelných i lepších mechanických vlastností betonu, jak bylo uvedeno na Obr. 4.2. Mezi tyto metody se řadí:

- alternativou ošetřování vodou je tzv. **vnitřní ošetřování**, kdy je do směsi betonu přidána nasákavá složka (celulóza, hydrogel), která je při přidání do betonu nasáklá vodou, která se uvolňuje po betonáži postupně a udržuje vyšší vnitřní vlhkost betonu, a tedy i podporuje následnou hydrataci (Liu, 2021 a Justs, 2015)^{[25],[26]}
- ošetřování betonu (zejména UHPC) za **zvýšené teploty**. Zvýšená teplota exponenciálně zvyšuje postup hydratace a je časté, že po 24 hodinách ošetřování dosahuje pevnost srovnatelných vlastností, jako by měl neošetřovaný beton až po 28 dnech. (Francisco, 2012, Graybeal, 2006, Heinz, 2004 a Flietstra 2012)^{[16],[15],[27],[19]}
- Ošetřování penetrací s **nanosilikou** je inovativní metoda pro podpoření tvorby C-S-H gelu v povrchových vrstvách betonového prvku. Tento proces způsobuje vyšší hutnost betonu, omezuje vysychání a zároveň zvyšuje mechanické vlastnosti betonu. (Santos, 2014 a Loe, 2014)^{[28],[29]}

Výše uvedené metody vyžadují jistě pozornost a mohou mít významný vliv na okamžité i dlouhodobé vlastnosti UHPC a budou popsány v následujících podkapitolách. Důležitým účinkem některých způsobů ošetřování je kromě zlepšení okamžitých mechanických vlastností betonu i redukce projevů smršťování a dotvarování.

4.2 Podpora hydratace ošetřováním vodou

Různé studie (Koh, 2007 a Park, 2015)^{[30],[31]} se zabývají vlivem vlhkosti v průběhu ošetřování na míru celkové hydratace a na nárůst tlakové pevnosti betonu. Účinek je závislý na celkové době ošetřování a na teplotě vody. Teplota vody při ošetřování je rozvedena v kapitole 4.5, nejdříve se podívejme na účinky ošetřováním vodou nebo v prostředí nasyceném párou při teplotách blízkých 20 °C.



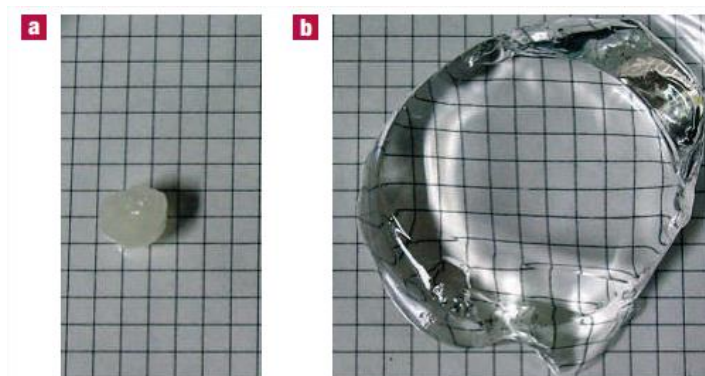
Obr. 4.3: Nárůst pevnosti UHPC pro různé způsoby ošetřování. (Koh, 2007)^[30].

Ošetřování vodou při běžné pokojové teplotě se věnoval v novější studii i (Graybeal, 2013)^[32]. Ve studii se uvádí, že přestože použití propařování za zvýšené teploty má výraznější vliv na UHPC než ošetřování vodou za běžných teplot, tak instalace technologie k propařování může být významným ekonomickým nákladem, a tedy je potřeba věnovat se právě ošetřování za podmínek, které jsou realisticky dostupné při výrobě a ukládání UHPC jak v řízených podmínkách výrobní haly (pro prefabrikované prvky), tak pro UHPC ukládaný na staveništi.

Ve další studii (Ay, 2004)^[33] porovnával vzorky ošetřované vodou po dobu 5 dní, vzorky dlouhodobě ponořené do vody a vzorky neošetřované. Pozorována byla zvýšená tlaková pevnost vzorků ošetřovaných po dobu 5 dní ve srovnání s neošetřovanými přibližně o 7 % (158,8 MPa oproti 149,9 MPa). Oproti tomu konstatuje, že dlouhodobé ponoření do vody může tlakovou pevnost snižovat v důsledku vnitřního tlaku v betonu. Pevnost vzorků ošetřovaných až do času jedné hodiny před testem byla 140,1 MPa, tedy o 8 % méně než neošetřované vzorky.

4.3 Vnitřní ošetřování super-absorpčními polymery

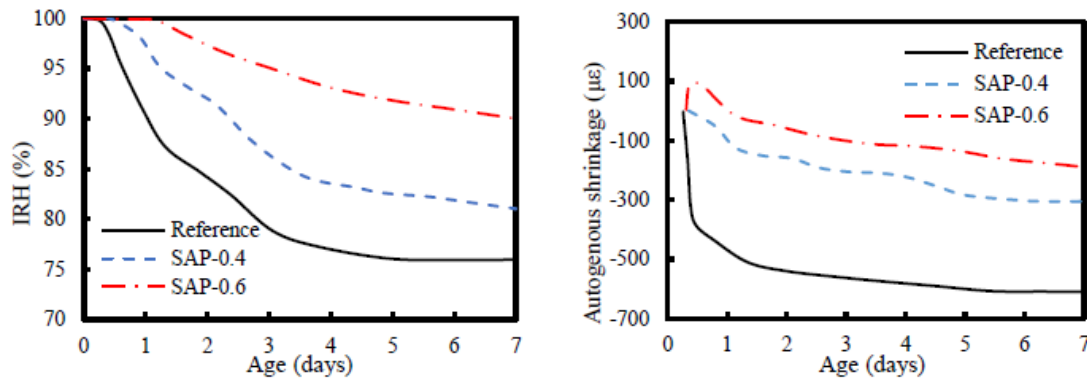
Jako vnitřní ošetřování nazýváme způsob transportu vody do betonu pro podporu hydratace způsobem zamícháním nasáklé absorpční příměsi do směsi betonu. Tyto příměsi zajistí postupné uvolňování vody v průběhu zrání betonu a zároveň se nepodílí na konzistenci a zpracovatelnosti betonu. Beton si tedy může udržet nízký vodní součinitel, který je charakteristický pro směsi UHPC. Do směsi UHPC se mohou jako příměsi pro vnitřní ošetřování použít například vlákna z celulózy, jemnozrné plnivo z porézního materiálu nebo super-absorpční polymery (Du, 2021)^[34]. Super-absorpční polymery (SAP) vážou vodu osmotickým tlakem díky své provázané molekulární struktuře. SAP mohou ve formě gelu obsáhnout více jak stonásobek své vlastní váhy, jak popisuje (Ono, 2007)^[35].



Obr. 4.4: Super-absorpční polymer před a po nabobtnání do gelu. (Ono, 2007)^[35].

Použití super-absorpčních polymerů výrazně omezuje samovysychání, které je přímým důsledkem hydratace. Samovysychání má za následek pokles vnitřní relativní vlhkosti v betonu, která následně redukuje míru pokračující hydratace. Vnitřní ošetřování uvolňuje postupně vodu, a tím kompenzuje účinek samovysychání na snížení vnitřní relativní vlhkosti.

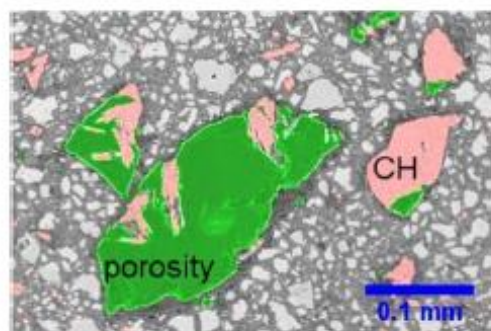
Při použití i malého množství těchto příměsí v řádu 0,4–0,6 % hmotnosti cementu je patrný významný pokles autogenního smršťování. Pro beton zkoušený ve studii (Liu, 2021)^[25] byla zvýšena vnitřní relativní vlhkost v betonu v čase 7 dní po betonáži z původních 76 % v případě vzorku bez použití absorpčních polymerů až k 90 % při použití 0,6 % absorpčních polymerů ve směsi, jak je patrné vlevo na Obr. 4.5.



Obr. 4.5: Experimentálně zjištěná vnitřní relativní vlhkost a míra autogenního smršťování pro různé dávky absorpčního polymeru. (Liu, 2021)^[25].

Snížená míra samovysychání měla za důsledek i výraznou redukci přetvoření od autogenního smršťování v čase 7 dní po betonáži, a to z původních 610 μm/m až na 198 μm/m, tedy o 70 %. Použití nižšího množství absorpčního polymeru (0,4 %) redukovala přetvoření od autogenního smršťování méně, a to o 50 %.

Nevýhodou v použití SAP je zejména při vyšší dávce 0,6 % redukce tlakové pevnosti UHPC o přibližně 8 % ze 121 MPa na 111 MPa, jak uvádí Liu (2021)^[25] pro UHPC v čase 91 dnů po betonáži. Tato redukce byla pozorována i v další studii (Justs, 2015)^[26] a vysvětlení je zvýšené množství pórů, které se vytvoří jako následek desorpce kapalné vody z polymerů do struktury betonu. Některé z těchto pórů se částečně zaplní produkty hydratace, jak je patrné na Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Mikroskopický detail pórů v UHPC způsobenými odčerpáním vody vázaně na SAP. Nové póry jsou na obrázku zeleně, část pórů zarostlé produkty hydratace je na obrázku růžově. (Justs, 2015)^[26].

4.4 Ošetřování povrchu betonu penetrací nanosilikou

Ošetřování roztokem s koloidní nanosilikou je možné pro zlepšení vlastností betonu, přičemž nanočástice pronikají hluboko do struktury betonu a reagují s vodou obsaženou v pórech (Kawashima, 2013)^[36]. Vzhledem k velmi malé velikosti částic (5–20 nm) vytvoří i v pórech hydrogel, který má dva důležité účinky: hydrogel zabraňuje transportu vodních par v betonu, a tedy redukuje následné smršťování vysycháním (Loe, 2014)^[29] a dále nanosilika působí jako jádra pro růst cementového kamene (C-S-H gelu) v pórech, jelikož díky malé velikosti částic nabízí velký reaktivní povrch pro rychlý nástup hydratace. Tímto účinkem je beton hutnější a dle studie (Kawashima, 2013)^[36] dosahuje vyšších pevností. Beton je také méně nasákavý, jeho povrch má vyšší odolnost proti obrusu a dochází k lepší soudržnosti s výztužnými vlákny, jsou-li ve směsi použita.

Dostupné studie dokumentují zejména účinek na betonu běžných tříd, kde je účinek spíše dlouhodobý. Dle studie (Loe, 2014)^[29] je použitím penetrace na bázi koloidní mikrosiliky dosažena redukce úniku vodních par z betonu až 69 % (měřena do doby 56 dnů od betonáže).

Tento způsob ošetřování dosahuje nejlepších výsledků při použití na betonových prvcích z betonu běžné třídy. Směs UHPC často obsahuje mikrosiliku, která ve směsi zajišťuje podobné chování jako ošetřování nanosilikou, a tedy účinek ošetřování na UHPC může mít omezený vliv, protože vlastnosti, které ošetřování zlepšuje, již má UHPC na špičkové úrovni.

4.5 Ošetřování zvýšenou teplotou

Novinkou a v současné době hojně zkoumanou a používanou metodou ošetřování prvků z UHPC je tzv. „*heat-treatment*“, neboli ošetřování betonu zvýšenou teplotou. 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 (65 % vlhkosti) několik hodin po betonáži (Graybeal, 2006)^[15]. Prostředí 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 přetvoření od autogenního smršťování a od dotvarování.

Je tedy zřejmé, že aplikace ošetřování zvýšenou teplotou bude mít skvělý vliv na chování UHPC prvků, které tomuto typu ošetřování budou vystaveny nezatížené. Ošetřením se dosáhne dlouhodobé stálosti prvků pod provozním zatížením. UHPC má sice součinitel dotvarování řádově srovnatelný s betonem běžné třídy, ale zároveň uvažujeme v těchto prvcích s řádově vyšším namáháním. Absolutní hodnota přetvoření by bez aplikace ošetřování teplotou byla násobná oproti betonu běžné třídy, což by v případě spřažených konstrukcí vedlo ke zvýšenému účinku diferenčního dotvarování. Pro produkci předem předpjatých prvků je nezanedbatelný vliv možnosti odbednění a vnesení předpětí i 24 hodin po betonáži, což přináší efektivní využití zdrojů při produkci předem předpjatých prvků.

4.5.1 Okamžité účinky ošetřování zvýšenou teplotou

Ošetřování UHPC za zvýšené teploty vede k výraznému zlepšení mechanických vlastností, a to jak v čase hned po ukončení ošetřování, tak i následujících letech. Ošetřování zlepšuje všechny mechanické vlastnosti UHPC – tlakovou a tahovou pevnost často o více jak 50 % a déle v menší míře i modul pružnosti.

Velké množství studií se zabývá vlivem ošetřování za zvýšené teploty na tlakovou pevnost UHPC. Z nejvýznamnějších studií jsou například (Graybeal, 2006)^[15], kde byl zkoumán efekt účinků teploty až do 90 °C a (Heinz, 2004)^[27], kde byla teplota ošetřování zvýšena až na 180 °C. Studie (Graybeal, 2006)^[15] se soustředila na výzkum podmínek ošetřování v parní komoře a teplota 90 °C je uváděna jako dosažitelná pro ošetřování prefabrikovaných prvků ve speciálních izolovaných komorách.

Rozsáhlá studie (Graybeal, 2006)^[15] ukazuje, že ošetřování za teploty 90 °C po dobu 48 hodin vede na velké sadě vzorků k nárůstu 28denní tlakové pevnosti o přibližně 50 % (z původních 126 MPa na 193 MPa). Významný nárůst je pozorován i u tahové pevnosti (měřeno na válcích se zářezem), a to přibližně o 80 % (z původních 6,1 MPa na 11,1 MPa). Studie dokumentuje další nárůst tahové pevnosti UHPC v prvních 3 měsících po betonáži. Tahová pevnost měřená v čase 3 měsíců po betonáži dosahuje o 20 % vyšších hodnot ve srovnání s 28denní tahovou pevností.

Podmínky ošetřování při 140–180 °C (Heinz, 2004)^[27] jsou již natolik extrémní, že je nereálné jich dosáhnout v ošetřovacím stanu nebo komoře a tyto teploty byly pro účely ošetřování UHPC vzorků dosaženy v autoklávu, kde byly vzorky umístěny po dobu 8 hodin. Dosažená 28denní pevnost vzorků ošetřovaných při 180 °C byla až o 55 % vyšší než pro neošetřované vzorky, kdy dosažená tlaková pevnost byla 280 MPa (neošetřované vzorky měly průměrnou pevnost 178 MPa). Ve studii bylo zkoušeno ošetřování teplotou od 65 °C a je konstatováno, že vyšší teplota při ošetřování přímo způsobuje vyšší pevnost. Při ošetřování po dobu 8 hodin při 90 °C 16 hodin po betonáži byla dosažena 1denní tlaková pevnost UHPC mírně nad 200 MPa.

Tato studie se také zabývala fenoménem zpožděné krystalizace ettringitu, který je pro beton běžné třídy spojen s ošetřováním za teploty vyšší než 70 °C. Zpožděná krystalizace ettringitu může vést k náhlé a devastující degradaci betonových prvků.

Toto téma a bezpečnost použití vysokých teplot na UHPC je detailně vysvětleno v kapitole 4.5.4.

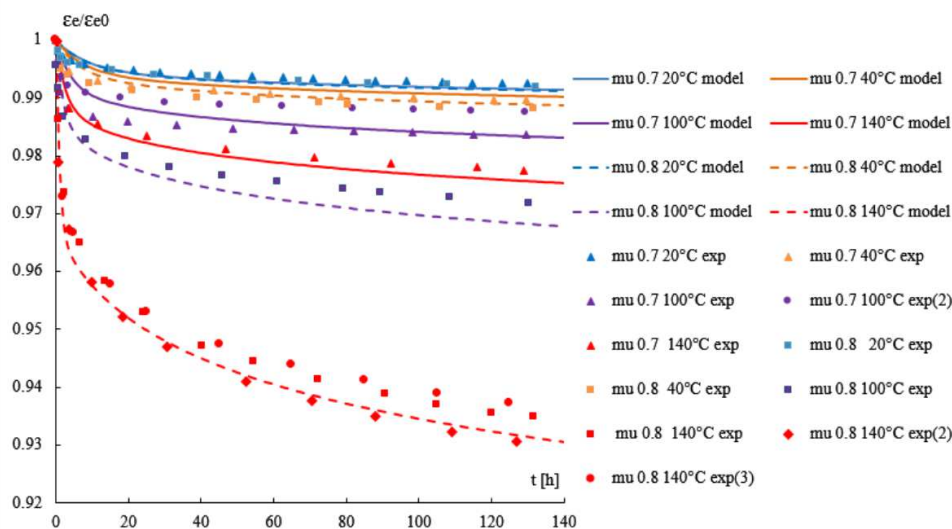
Pevnost UHPC se jak v případě neošetřovaných, tak v případě prvků ošetřovaných za zvýšené teploty dále vyvíjí a z dlouhodobého hlediska může růst o desítky procent v několika letech po betonáži, jak bylo publikováno ve studii (Schachinger, 2008)^[37]. Pro UHPC s 28denní tlakovou pevností 155–171 MPa byla tlaková pevnost v čase 3,5 let po betonáži až o 40 % vyšší, tedy až 225 MPa. Stejný nárůst byl pozorován i pro vzorky UHPC ošetřované po dobu 5 dní při teplotě 65 °C, kde bylo dosaženo až 300 MPa tlakové pevnosti v čase 8 let po betonáži. Pro vzorky stáří nad 5 let, které nebyly vyztuženy drátky, byl pozorován vysoký rozptyl měřených hodnot a explozivní charakter porušení, což bylo přisouzeno velmi křehkému porušení vzorků, které nebyly vyztuženy drátky.

4.5.2 Relaxace předpínací výztuže při ošetřování

Pro předem předpjaté konstrukce, které jsou v době ošetřování umístěny buď na předpínací dráze s napnutými lany, nebo jsou již v průběhu ošetřování předepnuty, je nutné uvážit teplotu ošetřování a její účinek na zvýšenou míru relaxace předpínací výztuže. Pro základní funkci relaxace výztuže můžeme použít empirický vztah z ČSN EN 1992-1-1, který je pro lana s nízkou relaxací definován níže (4.1).

$$\Delta\sigma_{Pr}(t) = -\sigma_{P0} \cdot 0,66 \cdot 2,5 \cdot e^{9,1 \cdot \mu} \cdot \left(\frac{t}{1000}\right)^{0,75 \cdot (1-\mu)} \cdot 10^{-5} \quad (4.1)$$

Dle vztahu (4.1) je patrné, že kromě času od vnesení napětí do lan, je významným faktorem parametr μ , který vyjadřuje poměr mezi působícím napětím a pevností lan. Platnost vztahu (4.1) je pro referenční teplotu 20 °C, avšak je možné ho použít i pro běžné teploty 10–30 °C. Z dostupných studií je patrné násobné zvýšení hodnoty ztráty relaxací předpínací výztuže pro působící teploty zejména nad 100 °C (Chhun, 2018)^[38]. V této studii byl zkoumán vliv teploty na vzorcích lan umístěných do hydraulických lisů a protažených na úroveň napětí $\mu = 0,7$ a $\mu = 0,8$. Vzorky byly umístěné v lisech po dobu několika dnů a zvýšená teplota byla aplikována přiloženým topným kabelem. Úroveň vneseného napětí mezi 70–80 % charakteristické pevnosti lan odpovídá běžně dosahované napjatosti lan při předpínání. Proto se data z této studie dají použít pro predikci ztráty relaxací i pro přepínané a ošetřované prvky z UHPC. Naměřené hodnoty jednotlivých sad vzorků jsou patrné na Obr. 4.7 níže.



Obr. 4.7: relaxace předpínací výztuže v závislosti na teplotě (Chhun, 2018)^[38].

Vzhledem k významné míře ztráty relaxace při ošetřování zvýšenou teplotou je patrné, že použití jiných lan než s nízkou relaxací, je nevhodné pro UHPC prvky ošetřované zvýšenou teplotou, neboť samotná hodnota ztráty předpětí relaxací v průběhu ošetřování by dosahovala 7–10 % (lana třídy s normální relaxací dosahují více jak 3x vyšší ztráty předpětí relaxací, než lana s nízkou relaxací).

Pro případ ošetřování zvýšenou teplotou po omezenou dobu definujeme násobitel účinku teploty \times_{R_T} , který použijeme pro superpozici relaxace při běžné teplotě a hodnoty zvýšené relaxace při ošetřování. Z naměřených hodnot na Obr. 4.7 můžeme pro dobu ošetřování určit empirickou závislost (4.2) a (4.3) pro sady, do kterých bylo vneseno napětí odpovídající $\mu = 0,7$ a $\mu = 0,8$. Pro zjednodušení a nedostatku dalších dat pro mezilehlé hodnoty μ , je možné mezilehlé hodnoty \times_{R_T} určit lineární interpolací.

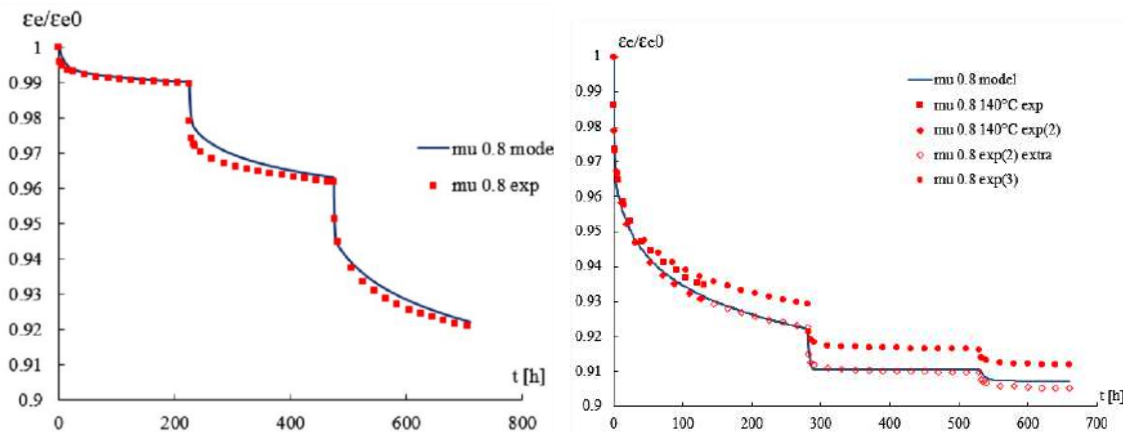
$$\times_{R_T} (24h) = 0,44 + 0,0275 \cdot T_{cure} \quad \text{pro } \frac{\sigma_p}{f_{pk}} = 0,7 \quad (4.2)$$

$$\times_{R_T} (24h) = 0,72 \cdot e^{0,0185 \cdot T_{cure}} \quad \text{pro } \frac{\sigma_p}{f_{pk}} = 0,8 \quad (4.3)$$

Hodnotu relaxace při ošetřování můžeme tedy určit upraveným vztahem (4.1), kdy použijeme jako dobu trvání zatížení, dobu ošetřování t_{cure} . Pro zahrnutí účinků zvýšené teploty použijeme opravný součinitel \times_{R_T} :

$$\Delta\sigma_{Pr,cure} = \times_{R_T} \cdot \Delta\sigma_{Pr}(t_{cure}) \quad (4.4)$$

Kromě celkové hodnoty relaxace vzorků zatížených při konstantní teplotě se zabývá studie (Chun, 2018)^[38] i superpozicí účinků relaxace při změně teploty vzorku v průběhu zatížení Obr. 4.8. Na obrázku Obr. 4.8 vlevo je uveden pokles napětí při postupném ohřívání, kdy vzorek lana relaxoval při 20 °C po dobu 200 hodin, pak byla teplota zvýšena na 100 °C a po dalších přibližně 200 hodinách na 140 °C. Na Obr. 4.8 vpravo je pak uveden opačný postup, kdy vzorek byl nejdříve udržován při teplotě 140 °C a následně skokově ochlazován. Jak je patrné, v době 700 hodin po zatížení je ztráta relaxací pro oba případy mezi 8–9 %. Přestože měření bylo ukončeno, je z tangenty průběhu ztráty relaxací v případě vzorku ohřívávaného patrné, že pokles napětí dále pokračuje a po dalších 200 hodinách by došlo ke srovnání konečných hodnot relaxace na hodnotu 9 % pro oba scénáře.



Obr. 4.8: relaxace předpínací výztuže v závislosti na změnách teploty v průběhu času a graficky zobrazený princip superpozice ztráty relaxací. (Chhun, 2018)^[38].

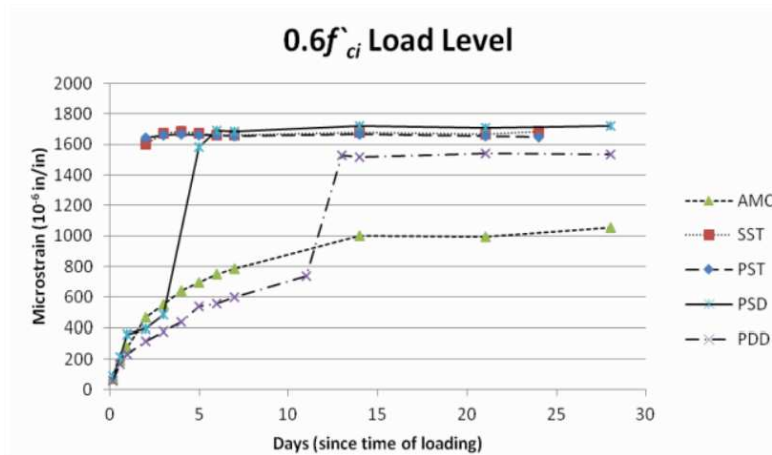
Při uvážení principu superpozice, kdy ztráty předpětí, které se odehrají při zvýšené teplotě, mají nevratný charakter, můžeme sečíst účinek relaxace při referenční teplotě 20 °C a účinek relaxace předpínací výztuže při ošetřování zvýšenou teplotou, jak je uvedeno ve vztahu (4.5).

$$\Delta\sigma_{Pr,sum}(t) = \Delta\sigma_{Pr}(t) + \times_{RT} \cdot \Delta\sigma_{Pr}(t_{cure}) \quad \text{pro } t > t_{cure} \quad (4.5)$$

Následující kapitoly 5 a 6 se zabývají reologickými vlastnostmi UHPC. Relaxace předpínacích lan má na tyto vlastnosti pouze sekundární vliv, jelikož nejvyšší část dotvarování UHPC nastává v přímém důsledku vnesení předpětí do konstrukce, a tedy zahrnutí hodnoty předpínací síly redukované mimo jiné i o ztrátu způsobenou relaxací předpínací výztuže v čase před vnesením předpětí a v průběhu ošetřování bude mít i přímý důsledek na redukcí celkového přetvoření od dotvarování. Téma relaxace je dále použito v kapitole 7, kde pro určení chování předem předpjatého UHPC prvku jsou vyčísleny ztráty předpětí prvku ošetřovaného za zvýšené teploty.

4.5.3 Dlouhodobé účinky ošetřování zvýšenou teplotou

V již zmíněné studii provedené na MIT (Flietstra, 2012)^[19] byl zkoumán vliv ošetřování betonu teplotou v různých stádiích na válcových vzorcích pod konstantním tlakovým napětím na úrovni 20 % a 60 % průměrné tlakové pevnosti (Obr. 4.9).



Obr. 4.9: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků pro různé teplotní ošetřování v raném stádiu v porovnání se vzorkem bez aplikace zvýšené teploty (AMC) (Flietstra, 2012)^[19].

Bylo pozorováno, že nezávisle na času aplikace ošetřování teplotou (4 dny při 90 °C) 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 (v grafu „AMC“), ve kterém zpožděná deformace nabíhá dále mimo meze časové osy. Důležité na nárůstu přetvoření na Obr. 4.9 je také to, že všechny vzorky byly ošetřovány až po vnesení zatížení a při porovnání konečného přetvoření vzorků ošetřovaných ihned po zatížení (sada „SST“ a „PST“) a vzorků se zpožděným ošetřováním (sada „PSD“) není vlastně žádný měřitelný rozdíl hodnot. Sada „PDD“, která vykazuje nižší konečnou hodnotu přetvoření po ošetřování než sady „SST“ a „PST“, protože tato sada byla omezenou měrou ošetřována při 50 °C před aplikací zatížení.

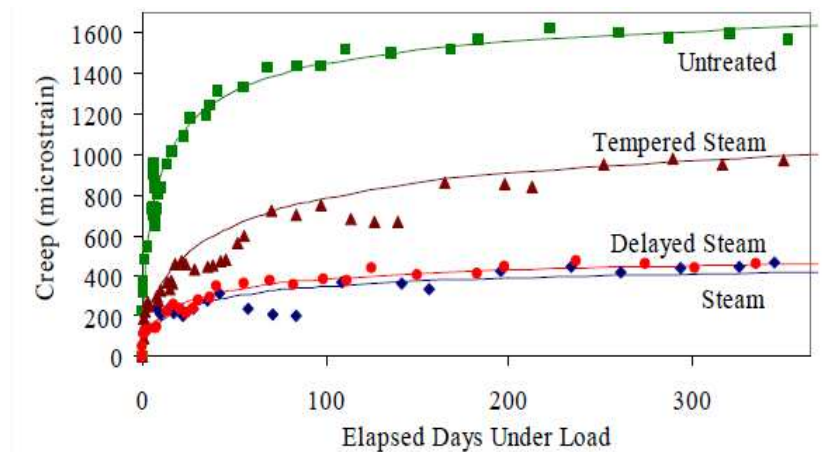
Je tedy zřejmé, že ošetřování zvýšenou teplotou v době až po aplikaci zatížení nevede k redukci konečné hodnoty přetvoření, ale pouze urychlí nárůst přetvoření v průběhu ošetřování. Pro aplikaci předpětí nemá velký význam ošetřovat prvky, do kterých již předpětí bylo vneseno. Tento účinek ošetřování může být zajímavý pro

uzamčení přetvoření od tahového dotvarování (Yanni, 2009)^[39] a tato problematika je detailněji popsána dále v této práci (kapitola 7).

Na druhou stranu ošetřování zvýšenou teplotou před vnesením zatížení má významný vliv i na konečnou hodnotu přetvoření od dotvarování, neboť zrání betonu je ošetřováním výrazně urychleno. Této problematice se věnovala významná a rozsáhlá studie (Graybeal, 2006)^[15], která se zaměřila jak na krátkodobé, tak i na dlouhodobé chování UHPC. Smršťování a dotvarování bylo měřeno na vzorcích ošetřovaných 4 různými scénáři:

- Vzorky ošetřované při 90 °C ihned po odbednění.
- Vzorky ošetřované při 90 °C v čase 15 dnů po odbednění.
- Vzorky ošetřované při 60 °C ihned po odbednění.
- Vzorky neošetřované a umístěné v laboratorních podmínkách při 22 °C.

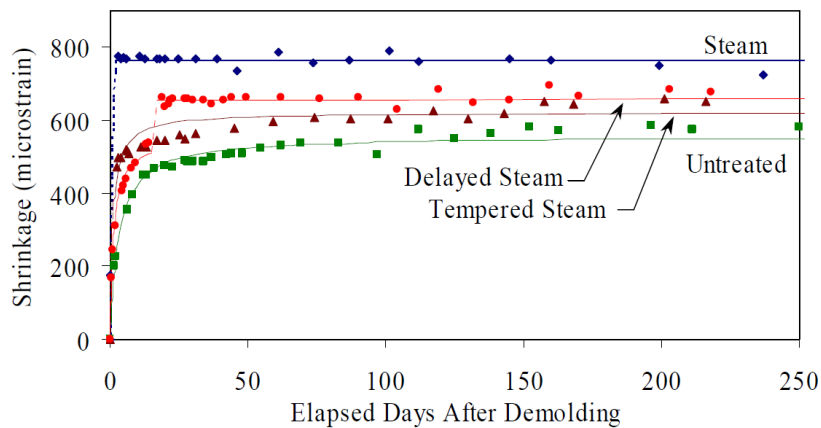
Délka ošetřování byla shodná pro všechny ošetřované vzorky (48 hodin) a prvky byly ošetřované v parní komoře při relativní vlhkosti vyšší než 95 %. Ošetřované vzorky při 90 °C vykazují až o 75 % nižší přetvoření od dotvarování a vzorky ošetřované při 60 °C o 40 %, jak je patrné z porovnání na Obr. 4.10. Dále je zřejmé, že vzorky ošetřované a následně zatížené se zpožděním 15 dnů vykazují shodné chování se vzorky ošetřované stejným způsobem, ale bez prodlevy.



Obr. 4.10: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků s různou teplotou při ošetřování (Graybeal, 2006)^[15].

Dále byla v rámci studie měřena závislost typu ošetřování na nárůstu smršťování, kdy bylo měřena celková hodnota smršťování (nebyla oddělena složka autogenního smršťování a smršťování vysycháním). Pro ošetřované vzorky při 90 °C bylo

v průběhu ošetřování dosaženo konečné hodnoty přetvoření od smršťování a tyto vzorky byly již dále stálé, jak je patrné na konstantním průběhu přetvoření v čase na Obr. 4.11. Prvky ošetřované s 15denní prodlevou dosáhly konečné hodnoty přetvoření od smršťování o 10 % nižší než prvky ošetřované ihned po odbednění. Tento účinek je možné přisoudit vyšší míře autogenního smršťování, neboť vzorky ošetřované ihned po odbednění dosahovaly i poměrně vyšších tlakových pevností.



Obr. 4.11: Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků s různou teplotou při ošetřování (Graybeal, 2006)^[15].

4.5.4 Ettringit a jeho druhotná krystalizace – D.E.F.

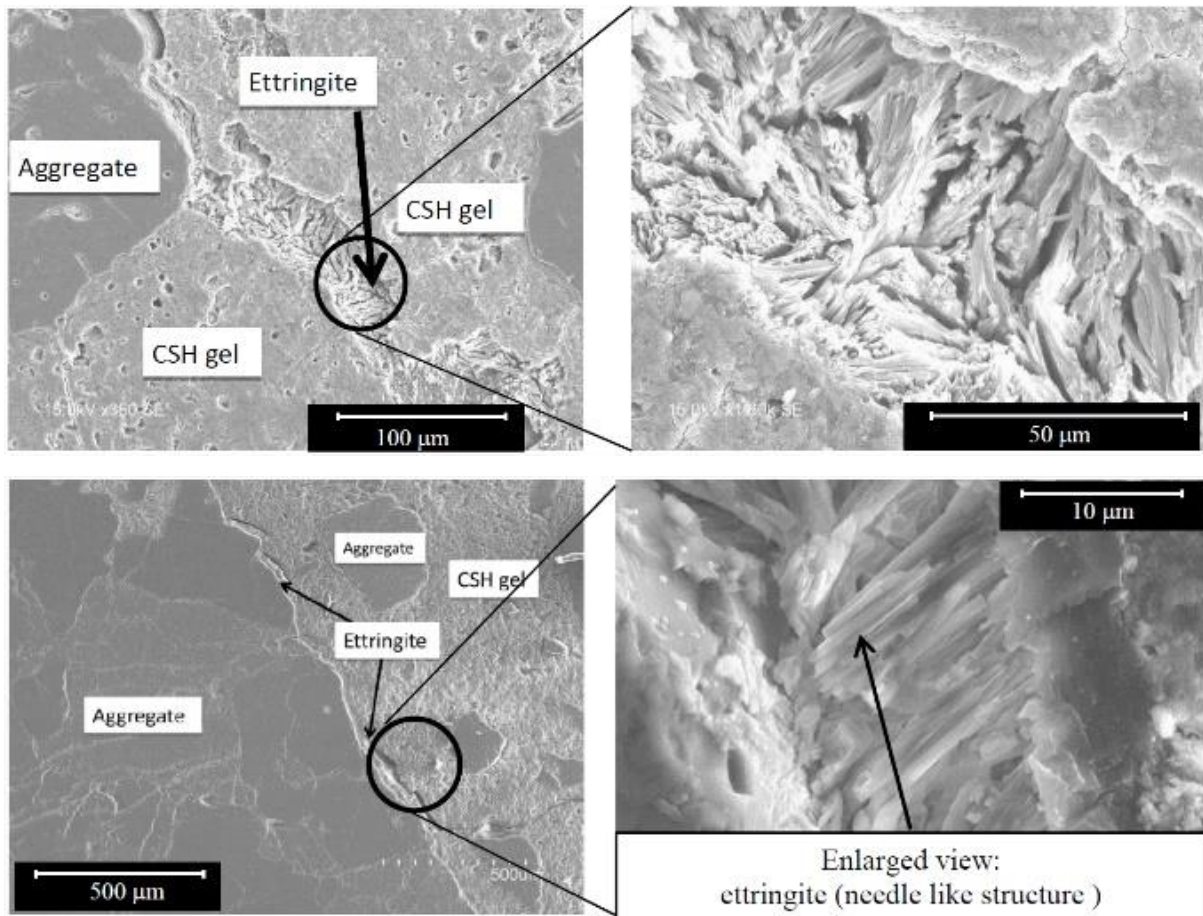
Ošetřování zvýšenou teplotou betonů běžné třídy je pečlivě kontrolováno a maximální dovolená teplota ošetřování standardně nepřesahuje teplotu 60 °C. Důvodem je často diskutovaný problém vznikajících druhotných formací ettringitu. Ettringit je minerál vznikající hydratací v časně fázi po betonáži, který je však citlivý na teploty vyšší než 70 °C. I při krátkodobém překročení této teploty (několik hodin) v raném stáří se ettringit rozloží na dílčí minerály a tyto zůstanou ve struktuře betonu. Při následném (zpožděném) vniku vody do struktury betonu dochází k druhotné krystalizaci ettringitu (DEF – „*delayed ettringite formation*“) za vzniku krystalické fáze ettringitu s větším objemem než původní ettringit. Tato vlastnost byla důsledkem hojně publikovaných poruch zejména železničních předem předpjatých pražců z betonu standardních pevností do 50 MPa.

Nedávná studie (Awasthi, 2017)^[23] detailně popsala princip těchto objemových změn na železničních pražcích v Indii, kde po 6–9 letech po betonáži došlo k masivní degradaci velkého množství pražců, a to i těch, které nebyly zatížené dopravou. Hlavním důvodem degradace byl zjištěn DEF.



Obr. 4.12: Pražce porušené formacemi ettringitu, (Awasthi, 2017)^[23].

Mikroskopické krystaly ettringitu byly zjištěny na výbrusech vzorků z porušených pražců, kde je patrně viditelná separace tmelu a kameniva, který je vyplněn krystaly ettringitu.



Obr. 4.13: Formace ettringitu (Awasthi, 2017)^[23].

Jelikož ošetřování zvýšenou teplotou je významným prostředkem urychlení zrání UHPC a tento způsob ošetřování je hojně využíván, bylo zkoumáno, zda DEF působí i na ošetřované vzorky z UHPC (Heinz, 2004)^[27]. Bylo zjištěno, že k rozložení prvotního ettringitu dochází stejně jako v případě betonu běžné třídy, avšak vzhledem k přebytku cementu ve směsi UHPC k následné krystalizaci ettringitu již nedochází. Důvodem je, že voda, která je pro pozvolnou krystalizaci nezbytná a která se do struktury UHPC dostane buď mikrotrhlinami nebo difúzí je vázána rychleji reagujícími minerály, než je krystalická fáze ettringitu. V UHPC ettringit zůstává amorfní i při ošetřování extrémními teplotami až 180 °C dosažené v autoklávu. V praktické prefabrikaci je teplota nad 100 °C jen těžko dosažitelná standardními technologiemi (propařování za atmosférického tlaku či umístění vzorků do vodního prostředí) a dá se tedy vyvodit, že problém porušení prvků druhotnou krystalizací ettringitu prefabrikované prvky z UHPC nezasahuje.

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



5 Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou

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. Pro následné vyhodnocení smršťování a dotvarování je důležitým vstupem receptura směsi UHPC.

Tabulka 5.1: Receptura směsi UHPC použitá v experimentu

materiál	množství [kg/m ³]
cement I	700
jemné kamenivo	1230
mikrosilika	100
struska	80
superplastifikátor	40
voda	160–170
drátky	150

Znalost přesné receptury včetně množství použitých příměsí (mikrosilika a další hydraulicky aktivní složky a množství použitého superplastifikátoru) je zásadní pro použití modelu B4 na následné vyhodnocení dlouhodobých účinků smršťování a dotvarování.

Kapitola 5

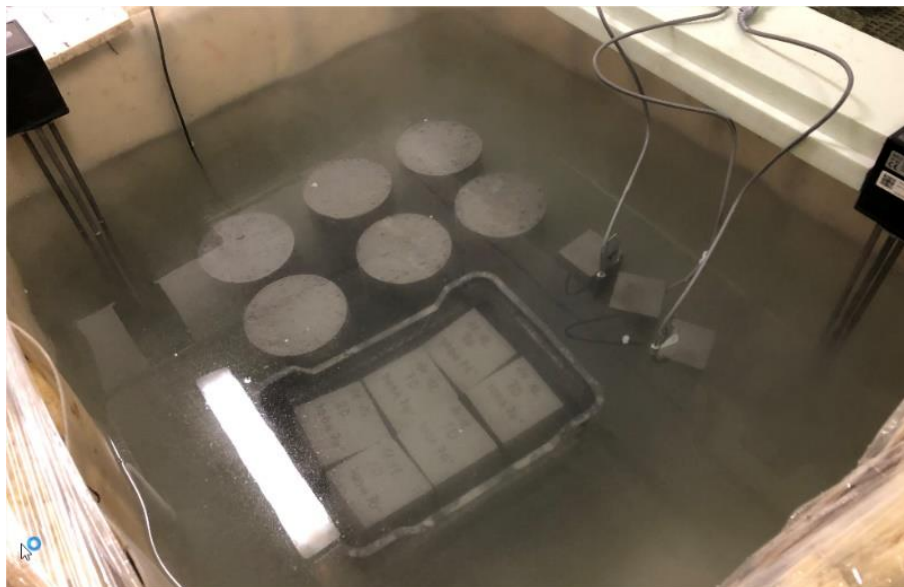
Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



5.1 Popis experimentu

Sady vzorků byly ošetřovány ve vodním prostředí za různých teplot a v rámci experimentu byla pro porovnání měřena i sada vzorků neošetřovaných. Ošetřování bylo zahájeno po odbednění vzorků ve stáří 24 hodin a bylo ukončeno po dalších 24 hodinách. Ošetřování zvýšenou teplotou bylo prováděno ve vodním prostředí v kádích, kde byla udržována teplota pomocí ponorných ohřivačů spínaných automaticky teplotním čidlem umístěným v kádi (Obr. 5.1).

Odbedněné vzorky byly do kádí umístěny v době, kdy byla voda zahřátá na teplotu blízkou teplotě ošetřování. Tento teplotní šok však neměl na vzorcích žádný negativní dopad na mechanické vlastnosti. Vzorky pro vyhodnocení okamžitých mechanických vlastností v jednotlivých časových intervalech (tlaková pevnost na krychlích a na válcích, modul pružnosti a pevnost v tahu za ohybu) byly ošetřovány identickým způsobem s dalšími vzorky pro vyhodnocení dlouhodobých vlastností UHPC (trámky se zabudovanými strunovými tenzometry pro měření přetvoření od smršťování a dotvarování včetně teplotního čidla). Hodnoty přetvoření a teploty byly měřeny v intervalu 10 minut s výjimkou doby ošetřování vzorků zvýšenou teplotou v kádích.



Obr. 5.1: Sada vzorků v průběhu ošetřování.

Kapitola 5

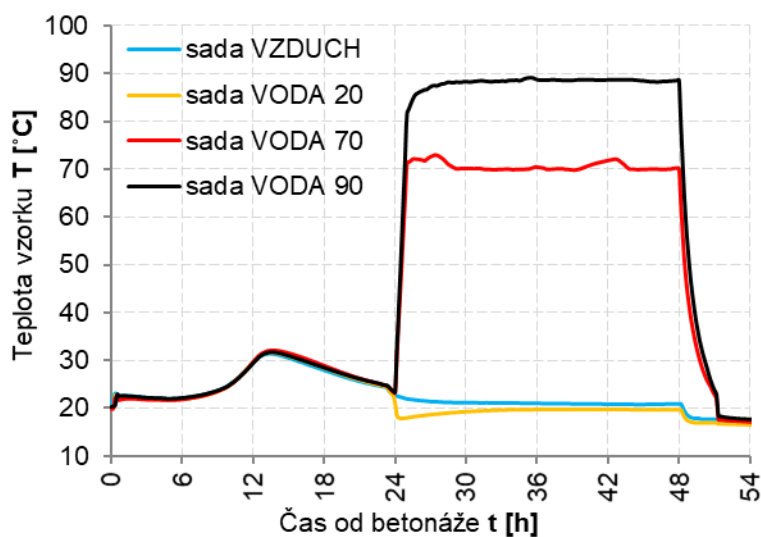
Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



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 na Obr. 5.2. Pro vzorky ošetřované zvýšenou teplotou je uvedena průměrná zaznamenaná teplota vody v kádích, ostatní hodnoty jsou měřeny teplotními čidly v trámcích. Při ošetřování sady vzorků označenými „Voda 70“ byla průměrná teplota vody 70,6 °C a v případě sady „Voda 90“ 88,0 °C.



Obr. 5.2: Průběh teploty vzorků při ošetřování.

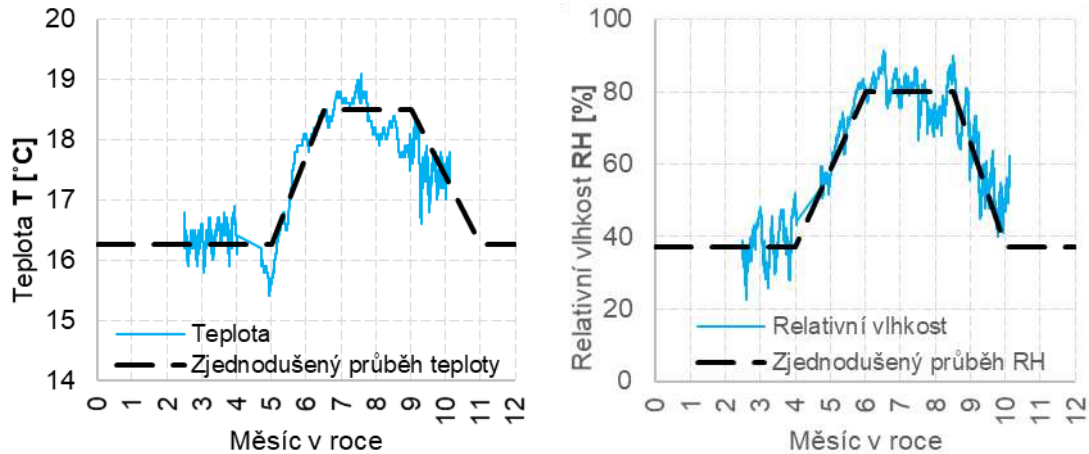
Po skončení ošetřování byly vzorky umístěny do suterénního prostoru s velmi nízkou fluktuací teploty s průměrnou hodnotou 16,2 °C v průběhu prvních přibližně 70 dnů měření. Mezi 70. a 90. dnem se teplota zvýšila postupně na průměrných 18,5 °C, jak je patrné na Obr. 5.3. Měření teploty bylo použito na korekci měřených hodnot absolutního přetvoření vzorků od zatížení a od smršťování. Současně s teplotou byla měřena i relativní vlhkost vzduchu v okolí prvků, která byla na velmi

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



nízké úrovni 37 %, což je průměr za prvních 50 dní. Mezi 40. a 80. dnem průběhu dlouhodobého měření vzrostla postupně v letních měsících relativní vlhkost až na průměrných 80 %.



Obr. 5.3: Průběh teploty okolí v průběhu experimentu. Počátek měření je teploty a vlhkosti je počátkem měření smršťování a dotvarování.

Změna relativní vlhkosti ovlivňuje zejména hodnoty smršťování vysycháním, ale v případě UHPC a dobu cca 50 dní po betonáži lze očekávat, že naprostá většina celkového smršťování od vysychání již proběhla, jak bude patrné z výsledků zobrazených dále a potvrzeno dalšími zdroji uvedenými v předchozí kapitole.



Obr. 5.4: Měření přetvoření od smršťování a dotvarování na vzorcích po ošetřování teplotou.

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC
ošetřovaného zvýšenou teplotou



Pro měření smršťování a dotvarování byly v každé sadě 3 trámky o rozměrech 70 x 70 x 300 mm. Trámky byly opatřeny strunovými tenzometry, které umožnily měření hodnot přetvoření již od okamžiku betonáže.

Smršťování bylo měřeno z každé sady na 1 trámku, dotvarování na 2 trámčích, které byly umístěny dohromady do standů a ihned po vychladnutí po ošetřování byly zatíženy hydraulickým lisem silou 150 kN (vnesené tlakové napětí 31 MPa), což představuje 37 % průměrné tlakové pevnosti neošetřovaného vzorku naměřené v době 2 dnů po betonáži, tedy ve stejném čase, kdy byly vzorky zatíženy. Hodnota 150 kN byla určena tak, aby nebylo překročeno 40 % tlakové pevnosti žádného ze vzorků a nedocházelo tak k nelineárnímu dotvarování zejména neošetřovaných vzorků. 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.

Kapitola 5

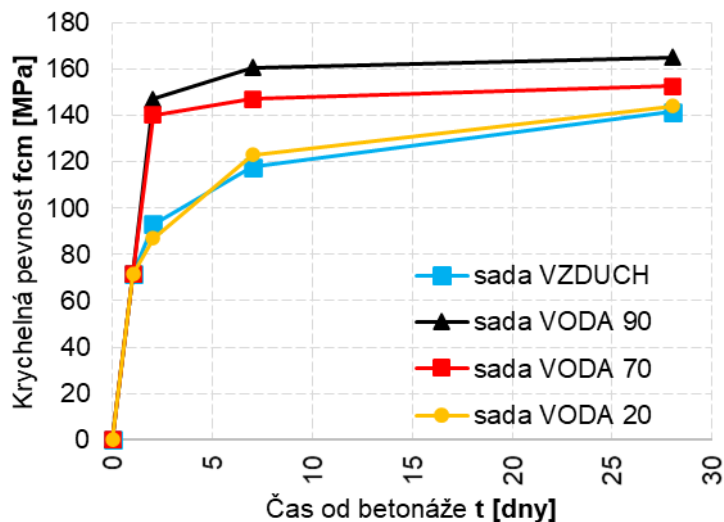
Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



5.2 Materiálové charakteristiky patentované směsi UHPC ošetřovaného různými způsoby

Průměrná 2denní tlaková pevnost měřená na krychlích 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 v čase je zobrazeno na grafu níže (Obr. 5.5). Zároveň je z grafu jen málo patrné, že samotné ošetřování ve vodním prostředí bez zvýšené teploty má také mírný vliv na nárůst pevnosti v čase po ukončení ošetřování, ale i následně v časech 7 a 28 dnů. Tento vliv je patrný při srovnání hodnot v tabulce (Tabulka 5.2). Tuto skutečnost popisuje i Graybeal (2013)^[32] a této problematice se věnují další kapitoly popisu adaptovaného modelu B4.

Veškerá naměřená data z experimentu a zejména jednotlivých vzorků pro zjištění mechanických vlastností jsou uvedeny ve zprávě Kloknerova ústavu (2021), která je uvedena v plném znění jako „Příloha 3 – Protokol měření KÚ 2021“ této práce.



Obr. 5.5: Nárůst pevnosti vzorků v čase od betonáže

Průměrné tlakové pevnosti měřené v jednotlivých časech na krychlích hrany 100 mm a na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm jsou uvedeny v tabulce níže. Tyto mechanické vlastnosti byly vyhodnoceny v době 1 den (po odbednění), 2 dny (po ukončení ošetřování) a pak také po 7 a 28 dnech od betonáže a každá hodnota je průměrem měření na 3 vzorcích. Dále byly pro kalibraci modelu měřeny moduly

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



pružnosti na válcích průměru 150 mm a výšky 300 mm. Pro doplnění výsledků byly měřeny i hodnoty průměrné tahové pevnosti za ohybu na trámčích 40 x 40 x 160 mm.

Tabulka 5.2: Tlaková pevnost měřená na krychlích

stáří vzorku	Tlaková pevnost na krychlích [MPa]					
	Vzduch	Voda 20	Vzduch*	Voda 20*	Voda 70	Voda 90
1 den	71,4	-	62,5	-	-	-
2 dny	93,0	86,9	83,4	84,6	140,1	140,3
7 dní	117,9	123,1	109,0	113,9	147,2	160,7
28 dní	141,5	144,0	132,0	137,9	152,5	165,2

Hodnoty označené v tabulce (Tabulka 5.2) jako „Vzduch*“ a „Voda 20*“ byly měřeny ve druhém běhu experimentu s časovou prodlevou, jelikož experiment byl po předběžném vyhodnocení doplněn o dlouhodobé měření na dalších vzorcích. Hodnoty pevností ze sady vzorků označené „Vzduch*“ a „Voda 20*“ byly o 6 %, respektive 4 %, nižší než pro původní vzorky, přestože byla použita stejná receptura i stejný technologický postup přípravy vzorků ze suché směsi. Nižší hodnoty pevnosti mohou být způsobeny nejistotou předepsaného množství použité záměsové vody (dle receptury 160–170 kg/m³) nebo dále stářím či způsobem uskladnění suché směsi, jak uvádí Graybeal (2013). V takovém případě lze pokles hodnot tlakové pevnosti jen těžko předvídat.

Bohužel několik vzorků bylo dle protokolu o měření (Příloha 3 – Protokol měření KÚ 2021) porušeno nevhodným způsobem, porušení bylo kombinací tlaku a tahu způsobené excentrickým zatěžováním. Tato skutečnost byla zjištěna namátkovou kontrolou porušených vzorků a bylo zjištěno, že 3 ze 3 vzorků „Voda 90“ ve stáří 2 dny byly porušeny tímto nevhodným způsobem, proto je hodnota pevnosti o 10 % nižší, než by bylo při způsobu ošetřování očekáváno a jak je patrné například z měření statických modulů pružnosti (Tabulka 5.4) „Voda 90“ ve stáří 2 dny a 7 dní, kde v obou časech byla naměřena téměř stejná hodnota statického modulu pružnosti.

Na měřených pevnostech na válcích (Tabulka 5.3) je patrné, že jsou přibližně o 1–2 % nižší než pevnosti stanovené na krychlích. Riedel (2017)^[41] měřením potvrzuje, že pevnost UHPFRC měřených na válcích průměru 150 mm je přibližně 0,98x pevnost měřených na krychlích hrany 100 mm.

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



Tabulka 5.3: Tlaková pevnost měřená na válcích

stáří vzorku	Tlaková pevnost na válcích [MPa]			
	Vzduch	Voda 20	Voda 70	Voda 90
1 den	68,8	-	-	-
2 dny	83,3	81,1	128,7	135,1
7 dní	120,9	119,2	137,7	150,6
28 dní	139,2	141,6	151,6	162,8
$f_{cm,28,cyl} / f_{cm28,cube}$	98,3 %	98,3 %	99,4 %	98,5 %

Hodnoty pevnosti ošetřovaných vzorků získané na válcích mají v 1, 2 i v 7 dnech o cca 10 % nižší hodnotu než pevnosti měřené na krychlích, což může být způsobeno tím, že pevnost byla zjišťována zároveň s měřením modulu pružnosti, a tedy je zde patrné, že i délka testu má vliv na hodnoty raných pevností. Je-li zatížení aplikováno stejným tempem, i naměřené pevnosti UHPC budou stejné (Sudarshan, 2017)^[42].

Z naměřených modulů pružnosti je patrný jen velmi mírný nárůst hodnoty pro vzorky ošetřované za zvýšené teploty při porovnání s neošetřovanými vzorky (nárůst 28denního modulu pružnosti je jen 2,5 %). Důsledek tohoto chování bude diskutován dále v kapitole 7.

Tabulka 5.4: Modul pružnosti

stáří vzorku	Statické moduly pružnosti [GPa]			
	Vzduch	Voda 20	Voda 70	Voda 90
1 den	39,3			
2 dny	42,9	42,7	48,3	49,0
7 dní	46,4	49,2	48,2	48,0
28 dní	49,3	48,4	50,7	50,6

Pro doplnění hodnot byly měřeny i hodnoty tahových pevností za ohybu (Tabulka 5.5). Na výsledných hodnotách je patrný vysoký rozptyl naměřených hodnot a s tím spojený relativně nízký účinek ošetřování. Toto pozorování může být ovlivněno třetím měřeným vzorkem ošetřovaným na vzduchu, který měl náhodně výrazně vyšší naměřenou pevnost v tahu za ohybu, než další 2 vzorky. Tahové pevnosti za ohybu byly měřeny pouze jako doplňková veličina a pro kalibraci modelu B4 nejsou dále využity.

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC
ošetřovaného zvýšenou teplotou



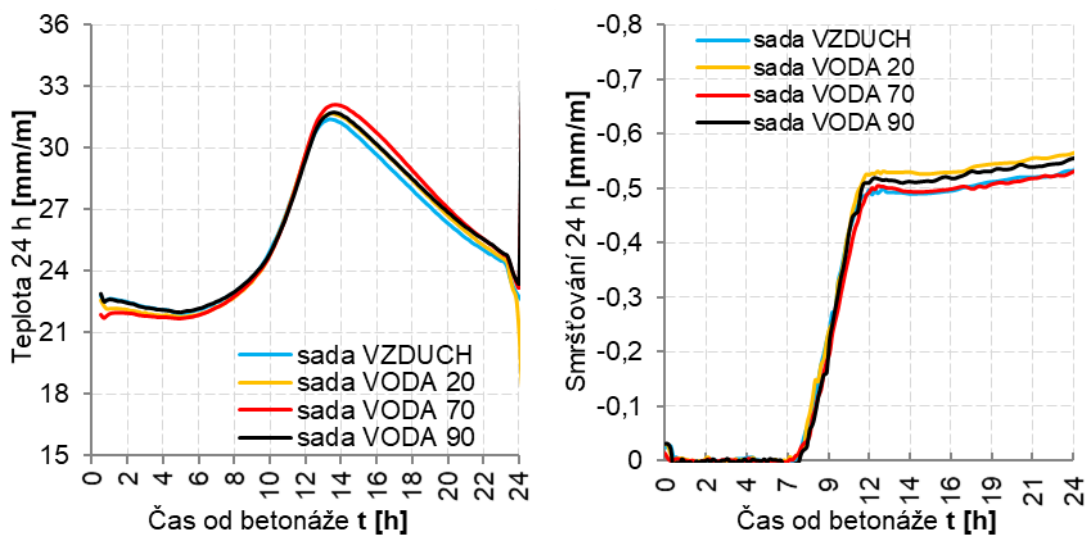
Tabulka 5.5: Tahová pevnost za ohybu ve 28 dnech

stáří vzorku	Tahová pevnost za ohybu [MPa]			
	Vzduch	Voda 20	Voda 70	Voda 90
vzorek 1	20,2	20,8	27,6	26,8
vzorek 2	20,5	23,7	25,6	23,4
vzorek 3	28,2	23,6	29,0	24,5
Průměr	23,0	22,7	27,4	24,9

S tahovou pevností se pojí i téma tahového dotvarování, což je zajímavá možnost redukce celkového přetvoření UHPC prvků za použití časného vnesení tahového napětí (Yanni, 2009)^[39], které je možné díky vysoké hodnotě tahového napětí zejména v případě UHPC. Tento účinek je možné za podmínky přísné technologické kázně použít při procesu prefabrikace, jak bude diskutováno v kapitole 7.

5.3 Hydratační teplo a krátkodobé smršťování

Od času betonáže probíhalo měření teploty a přetvoření od autogenního smršťování v intervalu 10 minut a výsledky jsou pro prvních 24 hodin zobrazeny na Obr. 5.6 níže. Toto měření nám umožní poznat průběh hydratace a z průběhu teploty, respektive z průběhu kumulativního tepla uvolněného hydratací, je možné odvodit i okamžitou hodnotu pevnosti betonu. Pevnost betonu v čase je přímo závislá na celkovém teple uvolněného hydratací.



Obr. 5.6: Průběh teploty a přetvoření od autogenního smršťování UHPC

Vzorky byly umístěné v místnosti o teplotě 19 °C a na vývoji teploty je patrné, že ihned po uložení směsi do forem započala exotermická reakce cementu, která se udržela na nízké intenzitě prvních 8 hodin, po kterých nastal významný nárůst intenzity hydratace, jehož vrchol byl dosažen pro všechny vzorky shodně po 12 hodinách od betonáže. Mezi stářím betonu 8–12 hodin proběhla nejvýznamnější část autogenního smršťování, a to více jak 500 $\mu\text{m/m}$, což je více než polovina konečného přetvoření od autogenního smršťování, které je pro neošetřované vzorky dosaženo pro zhruba 50 dnů po betonáži.

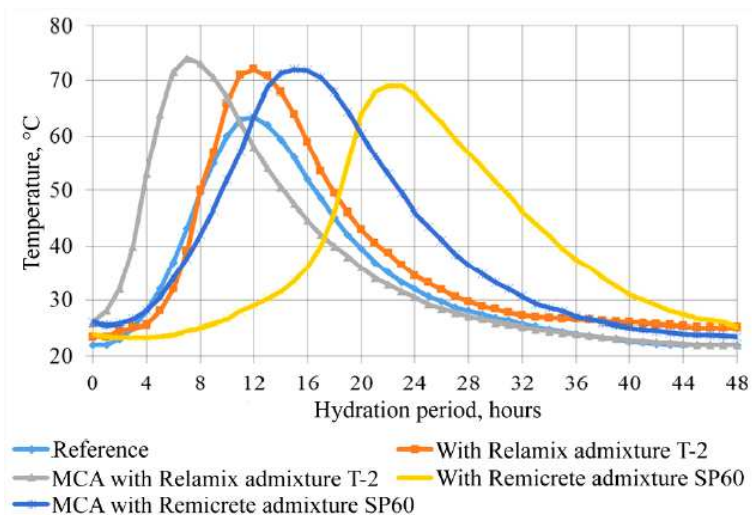
Z hlediska této práce je zásadní efekt pro náběh a konečnou hodnotu smršťování a dotvarování efekt ošetřování UHPC ve vodním prostředí a za zvýšené teploty, jak bude pro účely adaptace modelu B4 detailně uvedeno v kapitole 6. Jak uvádí (Androuët, 2021)^[18], nejvyšší efekt ošetřování ve vodním prostředí nebo v prostředí parní komory je v čase co nejdříve po betonáži. V praxi nejzazší doba počátku

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



ošetřování je ve chvíli, kdy je intenzita hydratace nejvyšší, tedy i teplota vzorku zahřátého hydratačním teplem bude nejvyšší. Pro použitou směs tento okamžik nastal přibližně po 12 hodinách po betonáži a tento okamžik lze bezpečně poznat při měření teploty vzorku, neboť jeho teplota začne postupně klesat.



Obr. 5.7: Průběh teploty způsobené exotermické reakce cementu (Ibragimov, 2016)^[44].

Různé směsi UHPC mohou vykazovat rozdílný čas nástupu hydratace standardně v rozmezí 8–16 hodin (Kang, 2017, Androuët, 2021 a parametrická studie Ibragimov, 2016)^{[43].[18].[44]}, ale i 24 hodin a více (Graybeal, 2006)^[15]. Rozdílem mohou být použité příměsi, jako obsah mikrosiliky nebo superplastifikátoru. Pro úpravu rychlosti náběhu hydratace je možné použít retardanty hydratace – například prodloužení času počátku hydratace je spojena s použitím významného množství superplastifikátorů (Šiler, 2014)^[45].

Znalost konkrétní receptury a vlastností dané směsi UHPC je velmi důležité pro případné zkrácení doby výrobního cyklu prefabrikovaných prvků z UHPC, jelikož s možnostmi ošetřování zvýšenou teplotou je teoreticky možné zkrátit betonážní cyklus až na 24 hodin, a tedy vnášet předpětí do prefabrikovaných prvků již necelý den po betonáži, a to pouze za předpokladu, že vrchol exotermické reakce proběhl v očekávatelnou dobu a tato doba není pozdější než 12 hodin po betonáži. Při tomto stáří vzorku by již mělo být možné ho odbednit a přemístit ho do ošetřovací komory nebo stanu. Tématu zvýšení efektivity prefabrikace za pomoci ošetřování UHPC se věnuje kapitola 7.

Kapitola 5

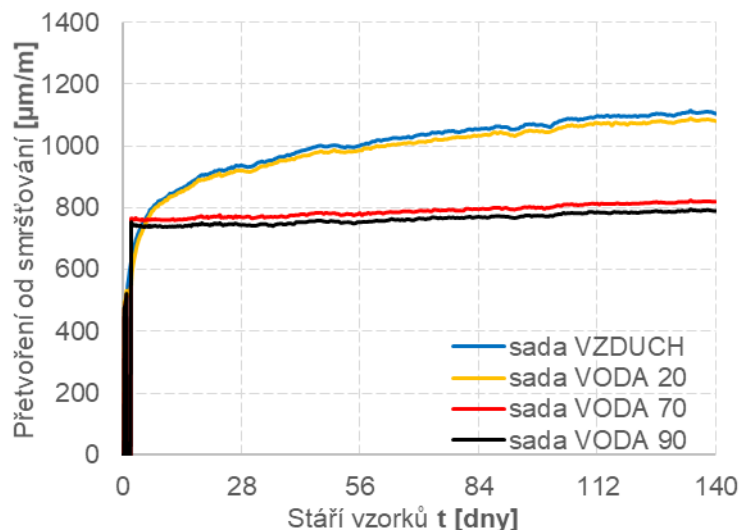
Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



5.4 Dlouhodobé charakteristiky patentované směsi UHPC

Při ošetřování zvýšenou teplotou je významně urychleno zrání betonu a v provedeném experimentu byl beton po tuto dobu stále ve vodním prostředí. Došlo tedy k jeho bobtnání, které bylo 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 z části nevratně uzamčena ve struktuře betonu. Tento vliv synergicky zvyšuje pevnost UHPC.

Tento princip smršťování vysycháním a bobtnáním při ošetřování je potvrzen naměřenými daty, kdy měřená hodnota celkového přetvoření od smršťování je nižší pro vzorky ošetřované vyšší teplotou ve vodním prostředí, jak je patrné na Obr. 5.8 níže. Tyto vzorky navíc vykazují jen malý nárůst přetvoření v měsících následujících po ošetřování, což dokazuje velmi nízkou úroveň difúze vodních par po ukončení ošetřování a to přesto, že vzorky byly umístěné do prostředí s velmi nízkou relativní vlhkostí ($35 \pm 5 \%$).



Obr. 5.8: Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků

Hodnoty celkového smršťování jsou součtem autogenního smršťování a smršťování při vysychání. Průběh přetvoření od autogenního smršťování v čase odpovídá průběhu nárůstu pevností betonu při různém způsobu ošetřování. Je tedy

Kapitola 5

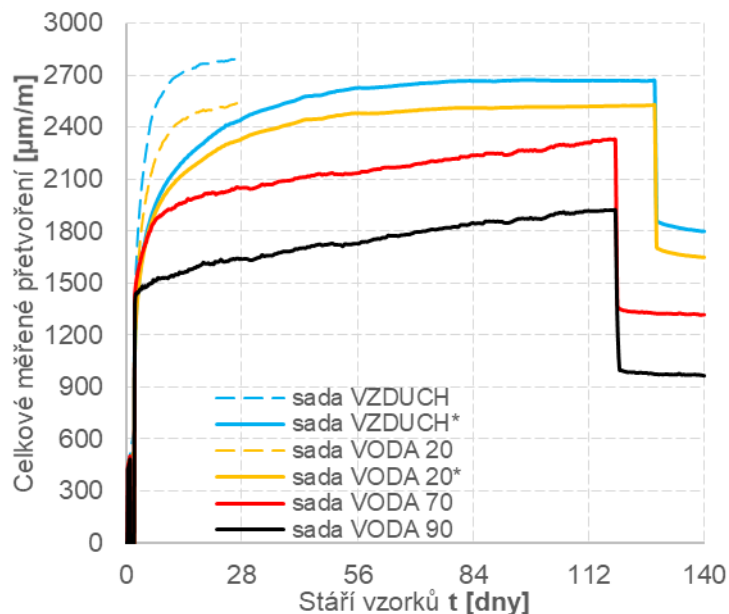
Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



očekávatelné, že nejvyšší hodnoty autogenního smršťování dosahují vzorky ošetřované 90 °C. Hodnota pevnosti dosažená po ukončení ošetřování za zvýšené teploty je dále téměř konstantní a tomu odpovídá i hodnota autogenního smršťování. Smršťování vysycháním dosahuje výrazně nižších hodnot než autogenní smršťování, velmi výrazně se v případě smršťování vysycháním projevuje účinek ošetřování – bobtnáním ošetřovaných vzorků.

Jelikož byla při experimentu měřena hodnota celkového smršťování, rozdělení na jednotlivé složky – přetvoření od autogenního smršťování a přetvoření od bobtnání a vysychání je detailně popsáno v následující kapitole, kde jsou složky smršťování odděleny a popsány samostatně na základě kalibrovaného modelu B4.

Na Obr. 5.9 je zobrazena celková hodnota přetvoření vzorků – přetvoření v důsledku elastického účinku zatížení, dlouhodobé smršťování a dotvarování (průběhy tedy nezahrnují pouze smršťování, které se událo do 2 dnů po betonáži). Po odečtení pružného přetvoření a účinku smršťování je na Obr. 5.10 uveden průběh přetvoření jen od dotvarování.



Obr. 5.9: Nárůst celkového přetvoření od pružného přetvoření od zatížení, smršťování a dotvarování UHPC vzorků

V případě přetvoření od dotvarování byl zaznamenán očekávaný silný vliv způsobu ošetřování, kdy vzorky ošetřované za zvýšené teploty 70 °C a 90 °C dotvarují výrazně méně než vzorky neošetřované, jak je patrné na Obr. 5.10. Zajímavým

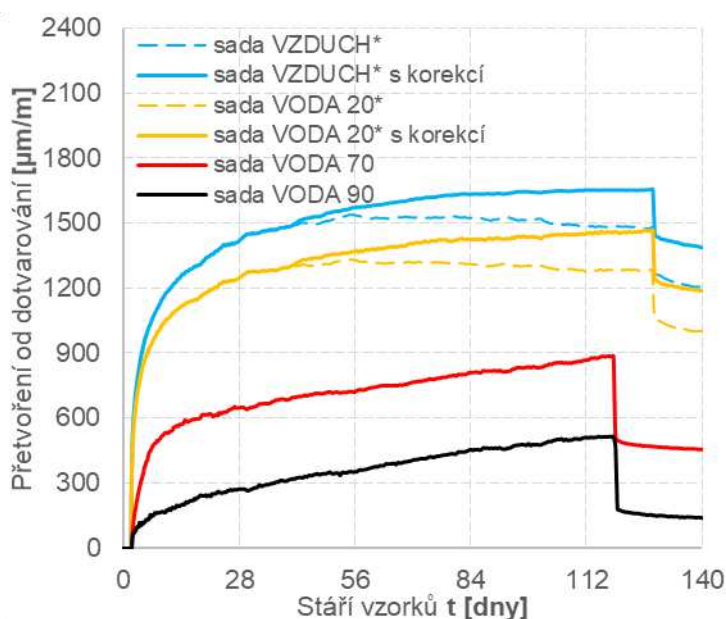
Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC ošetřovaného zvýšenou teplotou



úkazem je, že je patrný znatelný rozdíl mezi vzorkem ošetřovaným na vzduchu a ve vodě při stejné teplotě. Tento efekt byl již zmíněn ve výsledných pevnostech UHPC měřených na krychlích – pevnost prvku ošetřovaného ve vodě při pokojové teplotě byla o 2–5 % vyšší po skončení ošetřování než v případě neošetřovaného prvku. Toto zvýšení lze vysvětlit podporou zrání UHPC ve vodním prostředí, které má vliv na hydrataci a prvek zraje rychleji, což popisuje například (Koh, 2007)^[30]. Této problematice se věnuje více další kapitola, kde na základě provedeného experimentu a dalších dostupných studií je navržena adaptace modelu B4 tak, aby pozměněný model byl schopen toto chování predikovat s dostatečnou přesností.

Jak bylo uvedeno na Obr. 5.3, zhruba po 40 dnech od začátku měření přetvoření vzorků „VODA 20*“ a „VZDUCH*“ se v suterénním prostoru, kde byly vzorky uloženy, zvýšila v letních měsících velmi rychle (během jednoho měsíce) relativní vlhkost z průměrných 37 % na průměrných 82 %. Jelikož zároveň s měřením dotvarování nebylo měřeno samotné smršťování, je problematické odečíst od celkové deformace sad vzorků „VODA 20*“ a „VZDUCH*“ (měřeno 2021) deformace od smršťování sad vzorků „VODA 20“ a „VZDUCH“ (měřeno 2020). Jelikož měření v roce 2021 probíhalo v prostředí s vyšší relativní vlhkostí nad 80 %, v takovém prostředí již smršťování vysycháním neprobíhá, jak bude vysvětleno dále v kapitole 6.4. Aby se s hodnotami přetvoření od dotvarování dalo pracovat dále, je nutné přistoupit ke korekci.



Obr. 5.10: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků s korekcí

Kapitola 5

Experimentální měření dlouhodobých vlastností UHPC
ošetřovaného zvýšenou teplotou



Nutnost této korekce je patrná na odečtených hodnotách na Obr. 5.10, neboť by jinak data vykazovaly pokles přetvoření od dotvarování v čase, kdy je vzorek zatížen (cca 50.–119. den po betonáži). Měření dotvarování bylo ukončeno po 119 dnech pro prvky ošetřované zvýšenou teplotou a po 128 dnech pro zbývající prvky. Měření po odtížení probíhalo dále několik dní, aby mohlo být ověřeno v modelu B4 i přesnost predikce přetvoření při odtížení. Tento způsob zatížení může být podobný se zatížením prefabrikovaných prvků, kdy je prvek nejdříve vybetonován, předepnut a umístěn na skládku prefabrikátů a až po určité době je zabudován do konstrukce a zatížen stálým zatížením, které zpravidla působí s opačným účinkem než samotné předpětí.

6 Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou

6.1 Limitace modelu B4

Model B4 vznikl pro popis chování betonu běžných tříd o tlakové pevnosti do 70 MPa, což je v případě UHPC významně překročeno, neboť UHPC může dosahovat tlakové pevnosti až 150–250 MPa. Pro aplikaci na konstrukce z UHPC se zdá být model B4 nanejvýš vhodný, protože obsahuje parametr zohledňující teplotu okolí a teplotu při ošetřování a také umožňuje jeho kalibraci na konkrétní směs UHPC za použití empirických součinitelů příměsí.

Z hlediska použití pro predikci chování UHPC jsou důležitá některá z následujících omezení uvedených v definici modelu B4 (Bažant, 2015)^[12]:

- **Pevnost betonu** (menší než 70 MPa) – Pevnost betonu limituje použití zejména z hlediska jeho přepočtu na modul pružnosti a také aproximaci nárůstu modulu pružnosti v čase. Model ale umožňuje zadat 28denní modul pružnosti jako vstupní parametr místo použité aproximace dle hodnoty průměrné pevnosti betonu.
- **Teplota při ošetřování** (mezi 20 °C a 30 °C) – Teplota při ošetřování má zásadní vliv na rychlost hydratace ve velmi nízkém stáří prvku. Účinek teploty vyšší než 50 °C má řádově vyšší vliv na parametry ovlivňující přetvoření od smršťování a dotvarování než původní model.
- **Teplota při provozu** (mezi -25 °C a 75 °C) – toto omezení použití modelu na UHPC nelimituje, neboť UHPC na konstrukcích je vystaveno stejným vlivům venkovního prostředí, jako jiné konstrukce.
- **Vodní součinitel** (mezi 0,22 a 0,87) – typicky vodní součinitel UHPC má nižší hodnotu než je uvedené minimum. Zejména pokud přihlídneme k tomu, že některé studie uvažují do vodního součinitele i podíl dalších hydraulických příměsí (mikrosilika), pak je vodní součinitel UHPC ještě nižší. Vodní součinitel, stejně jako množství plniva ovlivňuje v modelu B4 výpočet všech veličin smršťování a dotvarování.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



- **Náhradní rozměr prvku** (V/S mezi 12 a 120) – prvky UHPC jsou nejčastěji tenkostěnné nebo deskové prvky s tloušťkou 40–200 mm, což se pohodlně vejde do uvedeného intervalu.

Mezi další omezení pro použití modelu na směsi UHPC je pak také:

- Nespojnost hodnot empirických **součinitelů příměsí**, zejména pro velké dávky superplastifikátoru a mikrosiliky, případně současného použití dalších hydraulicky aktivních příměsí (struska, popílek). Tyto součinitele dávají velmi rozdílné výsledky a není zřejmé, jak je kombinovat v případě, že směs obsahuje výrazně vyšší dávku příměsí, než je limitní hodnota pro danou sadu součinitelů.
- Předpoklad **vratného účinku ošetřování** vodou nebo v parní komoře na konečnou hodnotu přetvoření od smršťování vysycháním. Jak bylo experimentálně změřeno, účinek ošetřování v raném stádiu je částečně nevratný a jeho účinek může být velmi významný.

Jednotlivá omezení modelu B4 uvedená výše jsou v následujících kapitolách analyzována a úprava modelu B4 je navržena tak, aby byl použitelný na dostupné sady výsledků na vzorcích z UHPC a byla dosažena co nejlepší shoda i s vlastním experimentem.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



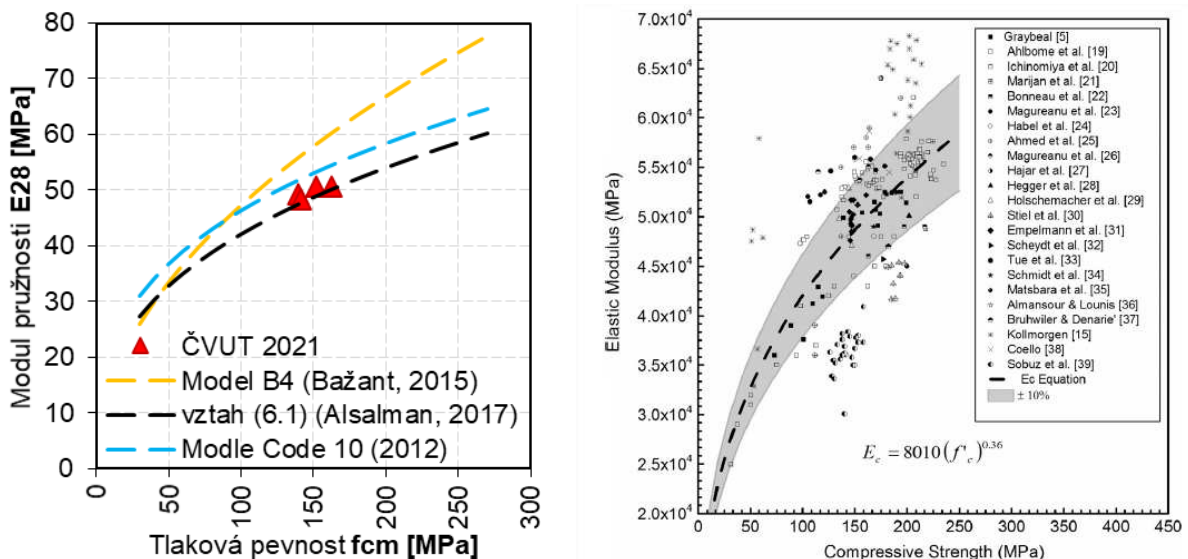
6.1.1 Průměrná hodnota modulu pružnosti jako funkce pevnosti

Modul pružnosti vysokopevnostního betonu je v modelu B4 určován z průměrné 28denní pevnosti betonu. Pro pevnost betonu nad 70 MPa je hodnota modulu pružnosti modelem B4 nadhodnocována, vhodnější se jeví přístup k určení modulu pružnosti UHPC uvedeným ve Fib Model code 2010 (MC10)^[11]. V Model code je uvažován komplexnější přístup k určování modulu pružnosti včetně zohlednění různých typů plniva.

Ve své souhrnné zprávě se Alsalman (2017)^[46] věnoval dosud publikovaným studiím, které obsahovaly údaj o pevnosti UHPC a zároveň obsahovaly měřený 28denní modul pružnosti. Alsalman na základě těchto studií formuloval vztah (6.1), který nejlépe popisuje závislost provedených měření a není pouhou extrapolací vztahu platného pro beton běžné třídy.

$$E_{28} = 8,010 \cdot f_c^{0,36} \quad (6.1)$$

Hodnoty modulu pružnosti predikovaného vztahem (6.1) jsou ve skvělém souladu s vybranými dostupnými obsáhlými studiemi z USA (Graybeal, 2006 a Ahlborn, 2008)^{[15],[47]} a přístup velmi dobře určuje modul pružnosti změřený na vzorcích v rámci vlastního experimentu (Obr. 6.1 – vlevo).



Obr. 6.1: **Vlevo:** Hodnoty 28denního modulu pružnosti v závislosti na průměrné pevnosti betonu dle vlastního experimentu (2020 a 2021), **Vpravo:** Hodnoty modulu pružnosti dle více dostupných studií (Alsalman, 2017)^[46].

Kapitola 6

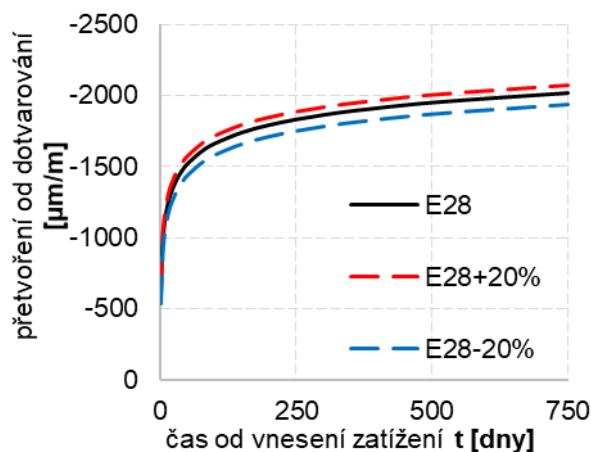
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Alsalmán dále ukazuje, proč je použití takového vzorce nebezpečné – výsledky všech studií jsou zobrazeny na obrázku (Obr. 6.1) vpravo, a přestože aproximace ukazuje průměrnou hodnotu, která je platná pro většinu měření, rozptyl možných hodnot je obrovský – pro pevnosti kolem 150 MPa dosahují různá měřená data hodnot od 33 GPa pro UHPC s použitím těžného kameniva a říčního písku (Sobuz, 2016)^[48] až po 55 GPa, způsobeného vyšším množstvím použitých drátků (Magureanu, 2012)^[49].

Vzhledem k tomu, že v rámci průkazných zkoušek směsi UHPC je běžné měření hodnoty modulu pružnosti přímo, zdá se být korektnější použít pro model B4 přímo dostupnou hodnotu modulu pružnosti dané směsi. Hodnoty vypočtené ze změřené tlakové pevnosti mohou být pouze orientační a je nutné přihlídnout k charakteristikám použitého kameniva a dalším faktorům, aby bylo možné použít jednoduchý přepočít, ať už podle Model code 2010 nebo podle Alsalmána (2017)^[46].

Na Obr. 6.2 níže je pro porovnání zobrazený rozdíl predikovaných hodnot přetvoření dotvarování modelem B4 pro stejnou směs a okrajové podmínky, s pouhou změnou hodnoty modulu pružnosti (pro srovnání byla použita hodnota vypočtené dle vztahu (6.1) a dále její modifikace o $\pm 20\%$). Pro tento rozdíl v hodnotách modulu pružnosti pozorujeme pouze malý rozdíl v přetvoření, přibližně $\pm 4\%$.



Obr. 6.2: Efekt různého modulu pružnosti na průběh přetvoření od dotvarování

V případě přetvoření od smršťování není výsledná hodnota přetvoření přímo závislá na absolutní hodnotě modulu pružnosti, protože smršťováním vysycháním je vyhodnocováno z poměru modulu pružnosti v čase po poločase autogenního smršťování a konečného modulu pružnosti.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou

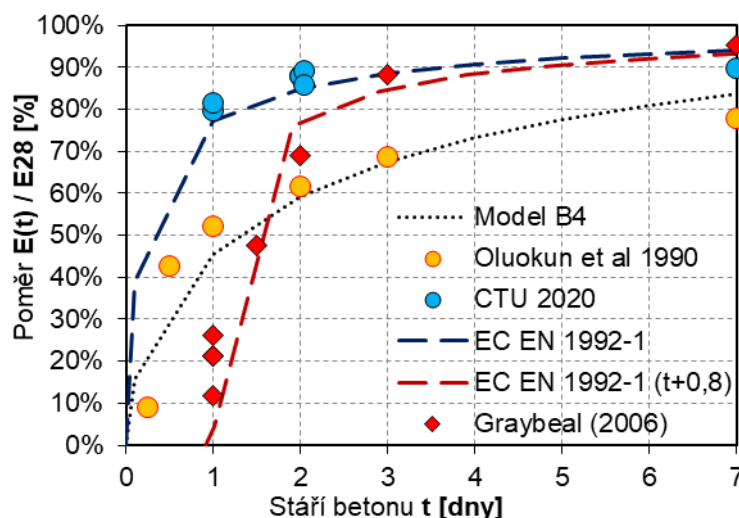


6.1.2 Nárůst modulu pružnosti krátce po betonáži

V případě UHPC lze uvažovat vzhledem k vysoké rané pevnosti o teoretickém stáří v době vnesení zatížení již kolem 1–2 dnů po betonáži. V modelu B4 má na predikovanou hodnotu velikosti přetvoření od dotvarování vliv hodnota modulu pružnosti v čase zatížení. Pro rané hodnoty modulu pružnosti v případě UHPC model B4 významně podhodnocuje nárůst modulu pružnosti v prvních dnech po betonáži, jak je patrné na Obr. 6.3. Model B4 predikuje 1denní hodnotu přibližně na úrovni 45 % 28denní hodnoty modulu pružnosti, ale naměřené hodnoty vlastního experimentu i publikovaných v jiných studiích (Graybeal, 2006)^[15] dosahují 80 %. Tuto rychlost náběhu lépe vystihuje vztah z ČSN EN 1992-1-1^[9]:

$$E(t) = E_{28} \cdot \beta_{cc}(t)^{0,3} \quad \text{kde: } \beta_{cc}(t) = e^{s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)} \quad (6.2)$$

Drobnou modifikací vztahu oproti původnímu z ČSN EN 1992-1-1^[9] je, že pro UHPC nepoužijeme redukci nárůstu modulu pružnosti v čase po 28 dnech (Eurokód používá redukci exponentem $\alpha = 2/3$). V případě UHPC nadbytek cementu způsobuje pokračující trend nárůstu pevnosti a modulu pružnosti i v čase po 28 dnech, jak bylo ukázáno na měřeních pevnosti betonu v kapitole 4.5.1. Je patrné, že s touto modifikací je dosaženo dobré shody s experimenty (Obr. 6.4)



Obr. 6.3: Porovnání měřených dat modulu pružnosti UHPC s predikcí dle vztahu (6.2) a dle původního modelu B4 pro dobu 7 dnů po betonáži

Porovnání měřených modulů pružnosti vlastního experimentu, modulů ze studie (Graybeal, 2006)^[15] a ze starších publikovaných dat pro beton běžné třídy s vodním

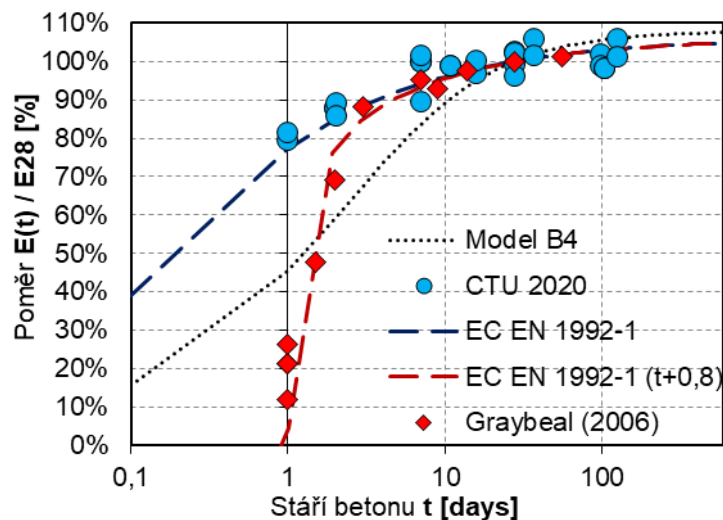
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



součinitelem 0,7 (Oluokun, 1990)^[50] je možné porovnat predikci modelem B4 a přístupem dle vztahů (6.2).

Zajímavé u UHPC je, že různé směsi mají rozdílný čas počátku hydratace. Pro směs UHPC použitou pro vlastní experiment započala hlavní část hydratace po 8 hodinách po betonáži, ale pro vzorky uvedené ve studii (Graybeal, 2006)^[15] byl tento čas až 20 hodin po betonáži. Je tedy zřejmé, že pokud bychom chtěli zatěžovat prvek z UHPC, je nezbytné znát okamžik, kdy proběhne hlavní část prvotního nárůstu pevnosti a modulu pružnosti.



Obr. 6.4: Porovnání měřených dat modulu pružnosti UHPC s predikcí dle vztahu (6.2) a dle původního modelu B4

Hodnoty času měření byly modifikovány součiniteli ošetřování UHPC za zvýšené teploty a za vysoké vlhkosti použitím součinitelů β_{Th} a β_{RH} , které budou detailně popsány v následujících kapitolách 6.3 a 6.5. Na Obr. 6.4 je patrná dobrá shoda naměřených dat s predikcí jak pro hodnoty naměřené na vzorcích v rámci vlastního experimentu, tak hodnoty publikované ve studii (Graybeal, 2006)^[15], u které je provedena korekce posunem času začátku hydratace.

6.2 Úprava množství jednotlivých složek směsi

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 0,15–0,25. Konzistence UHPC je následně upravena použitím superplastifikátorů. Použití takto nízkého vodního součinitele však vede na řádovou neshodu predikovaných výsledků s experimenty, jak poukázal například Yi (2018)^[21].

Je to způsobeno tím, že hydratace při extrémním nedostatku záměsové vody ponechá část cementu nehydratovaného. Tento cement působí jako jemnozrné plnivo a hydratace se zúčastní pouze v případě, že do struktury betonu dostane další voda, například v důsledku ošetřování.

Dle hydratačních chemických rovnic složek cementu C3S (Alit), C2S (Belit) a C3A (Trialkcium aluminát) lze na základě molárních hmotností jednotlivých složek určit vodní součinitel, při kterém dojde k teoretickému plné hydrataci veškerého cementu. Tyto minimální hodnoty vodního součinitele označme w/c_{min} a pro cementy typu I–III jsou uvedeny níže (Tabulka 6.1).

Tabulka 6.1: Vodní součinitel nutný pro plnou hydrataci

Typ cementu	Průměrný podíl složek			w/c_{min}
	C3S	C2S	C3A	
I	55 %	19 %	10 %	0,255
II	51 %	24 %	6 %	0,231
III	57 %	19 %	10 %	0,260

Při použití přesně takového vodního součinitele však prakticky k plné hydrataci docházet nemůže, buď voda nepronikne do jader velkých zrn a zejména část vody může mladý beton opustit vysycháním, anebo můžeme předpokládat, že tyto procesy transportu vody z UHPC mají na celkový výsledek jen malý vliv. Zhang (2016)^[51] se zabýval vodou obsaženou v pórech UHPC a ve své studii konstatuje, že ve struktuře UHPC se může nacházet velmi omezené množství vody. Důvodem je velmi malá velikost pórů v UHPC a množství vody v pórech popisuje Kelvin-Laplaceův zákon.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Pro UHPC použijeme zjednodušenou úpravu množství cementu na základě výše zmíněného předpokladu:

$$c_{min} = \frac{w}{\max(w/c, w/c_{min})} \quad (6.3)$$

V úpravě parametru a/c (poměr plniva a cementu) je potřeba zahrnout podíl cementu, který se nezúčastní hydratace.

$$a = a + c - c_{min} \quad (6.4)$$

Jako složka plniva a však reálně působí hmotnost všech složek betonové směsi s výjimkou vody, hydratujícího cementu a superplastifikátoru, přičemž vyšší množství plniva omezuje projevy autogenního smršťování a dotvarování. Zde je v případě UHPC problematické určit typ plniva, neboť model B4 uvažuje pro predikci autogenního smršťování a smršťování vysycháním použití 2 empirických součinitelů typu plniva. Předpoklad však je, že se jedná o plnivo jednosložkové (diabas, křemenec, vápenec, pískovec, žula, křemenný diorit), ale plnivo je v případě UHPC směsí jemnozrnného kameniva (nejčastěji křemenný písek, v některých případech i těženy), zbývajícího cementu, který se nezúčastní hydratace, a další hydraulické příměsi (mikrosilika, struska, popílek). Navíc, jak bylo uvedeno v kapitole 4, nezanedbatelnou roli hraje i množství rozptýlené výztuže (drátků), jejichž množství redukuje míru dotvarování až o 30 %.

Z důvodů neznámého chování směsi plniva v UHPC použijeme pro kalibraci modelu B4 typ příměsi „neznámé“, neboli směsné, kde oba empirické součinitele, které model B4 definuje na základě druhu kameniva, mají hodnotu 1,0 a tedy nemají přímý vliv na predikovanou hodnotu celkového konečného přetvoření od smršťování. Tímto zjednodušením se však výsledky modelu B4 mohou významně lišit od naměřených hodnot, je tedy nutné model B4 pro danou směs kalibrovat až v posledním kroku modifikace modelu pro danou směs UHPC za pomoci součinitelů příměsí. Postup této kalibrace bude blíže upřesněn v kapitole 6.7.

6.3 Úprava součinitele vlivu teploty na hydrataci

Doporučení úpravy efektu ošetřování zvýšenou teplotou vychází z měření provedených pro Federální ministerstvo dopravy USA (Graybeal, 2006)^[15] a je potvrzené dalšími studii (Flietstra 2011 a Burkart 2008)^{[19],[14]} a i vlastním experimentem. Ve studii (Graybeal, 2006)^[15] byl izolován efekt na poměrné přetvoření od smršťování a přetvoření od dotvarování. Válcové vzorky byly ošetřovány po dobu 48 hodin 3 různými způsoby na 4 sadách vzorků. Rozdíl mezi třetí a čtvrtou sadou je pouze v čase, kdy bylo ošetřování započato.:

- Bez zvýšené teploty
- Ošetřováno párou teploty 60 °C
- Ošetřováno párou teploty 90 °C
- Ošetřováno párou teploty 90 °C, které bylo provedeno až po 15 dnech po betonáži

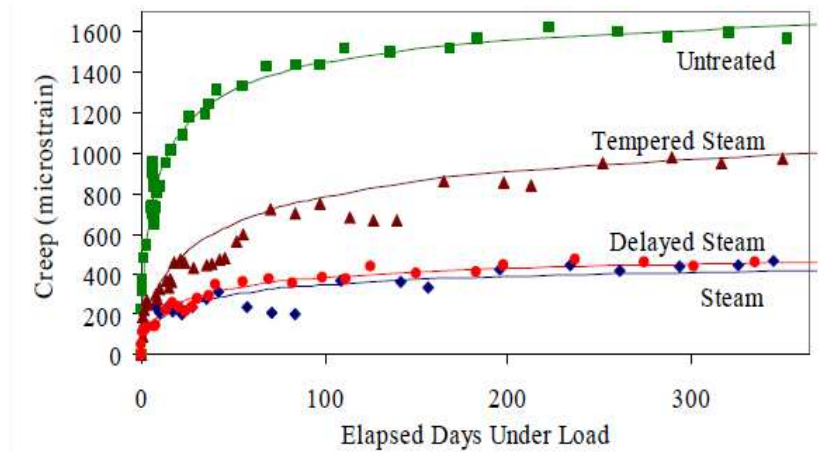
Model B4 zahrnuje vliv ošetřování parametrem β_{Th} , který zohledňuje vliv teploty na hydrataci. Parametr závisí na teplotě při ošetřování dle následujícího vztahu:

$$\beta_{Th} = \exp\left(\frac{U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur}+273}\right)\right) \quad (6.5)$$

Parametr β_{Th} následně lineárně ovlivňuje náhradní (novou) hodnotu stáří betonu po skončení ošetřování. Přestože je nárůst parametru β_{Th} exponenciální, po konfrontaci s naměřeným přetvořením od dotvarování ze studie (Graybeal, 2006)^[15] je patrný extrémní vliv parametru ošetřování zvýšenou teplotou nad 50 °C. Vzorky ošetřované 2 dny při teplotě 90 °C vykazují při zatížení ve 2,5 dnech po počátku hydratace 4x nižší nárůst přetvoření od dotvarování než neošetřované vzorky (Obr. 6.5). Neošetřovaný vzorek by musel mít pro stejný nárůst přetvoření od dotvarování stáří přibližně 350 dní, při predikci modelem B4.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou

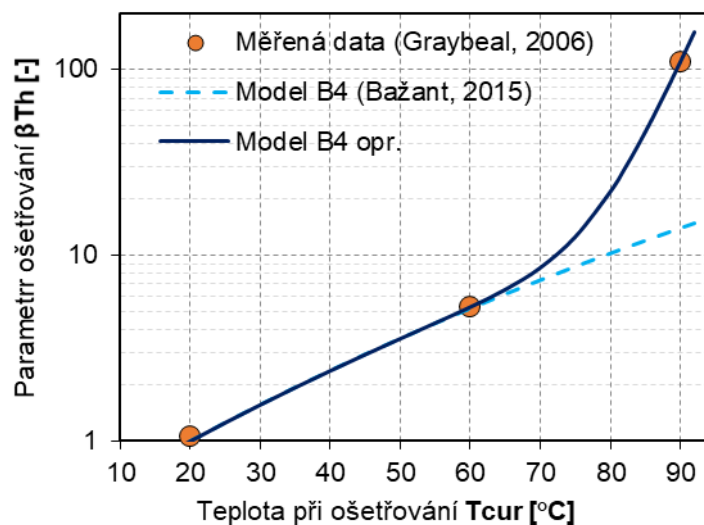


Obr. 6.5: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků s různou teplotou při ošetřování (Graybeal, 2006)^[15].

Z experimentů je patrné výrazné podhodnocení účinků teploty nad 60 °C, upravený výpočet parametru β_{Th} je patrný níže a obsahuje další exponenciální složku, která zajišťuje výrazný nárůst parametru β_{Th} při ošetřování teplotami až do 90–100 °C.

$$\beta_{Th,opr} = \beta_{Th} + \exp\left(\frac{5 \cdot U_h}{R} \cdot \left(\frac{1}{293} - \frac{1}{T_{cur} + 224}\right)\right) \quad (6.6)$$

Na grafickém znázornění níže je zobrazen rozdíl mezi původním parametrem β_{Th} a opraveným $\beta_{Th,opr}$. Pro ošetřování teplotou v mezích původní platnosti modelu B4 (do 30 °C) jsou výsledky totožné, jak je patrné na Obr. 6.6).



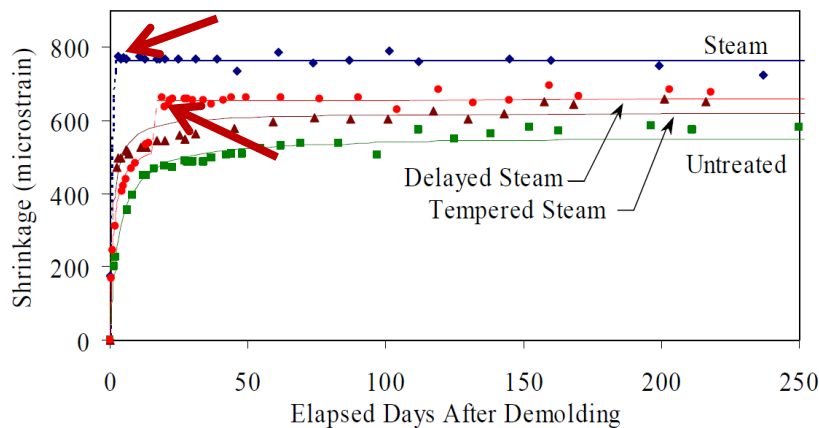
Obr. 6.6: Vliv parametru β_{Th} zohledňující ošetřování za zvýšené teploty

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Parametr β_{Th} má taktéž významný vliv na rychlost nárůstu autogenního smršťování, z experimentu je patrné, že ošetřování při 90 °C efektivně eliminuje jakékoliv následné přetvoření od autogenního smršťování. Vyšší absolutní hodnota autogenního smršťování při ošetřování je spojena s transportem vody do struktury betonu v době ošetřování. Tento efekt úzce souvisí s mírou hydratace a následně se projeví na výsledné pevnosti betonu. V rámci úpravy modelu B4 se tento efekt zohlední v navržené úpravě vodního součinitele.



Obr. 6.7: Nárůst přetvoření od autogenního smršťování UHPC (Graybeal, 2006)^[15] a vyznačení rozdílu účinku na základě stáří vzorků při počátku ošetřování.

Z Obr. 6.7 je patrné, že samotná teplota a doba působení nejsou jediné činitele, které ovlivňují konečnou hodnotu smršťování, jak je patrné při porovnání měření na prvcích ošetřovaných párou při 90 °C po dobu 2 dnů (sada „Steam“) ihned po odbednění a prvků, u kterých bylo aplikováno stejné ošetřování při 90 °C až 15 dnů po betonáži („Delayed Steam“). Tento efekt souvisí s transportem vody v mladém UHPC s vlivem úbytku vnitřní relativní vlhkosti v UHPC v důsledku samovysychání. Samovysychání a vlivu vlhkosti prostředí při ošetřování se věnují následující kapitoly. Na Obr. 6.7 je jasně patrné, že konečná hodnota přetvoření od autogenního smršťování je až o 40 % vyšší pro prvky ošetřované parou při teplotě 90 °C než u vzorku neošetřovaném. Zároveň je patrné, že po dosažení konečné hodnoty velikosti přetvoření po 100 dnech (pro neošetřovaný vzorek) již k dalšímu nárůstu přetvoření nedochází.

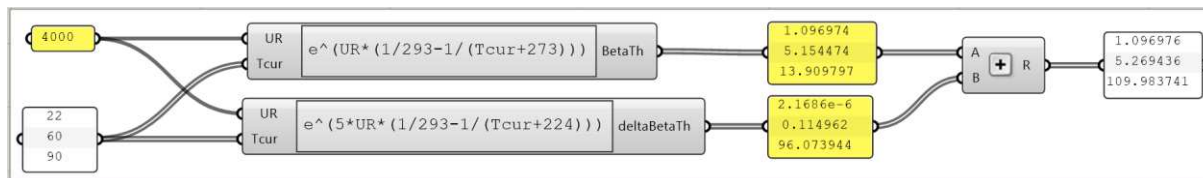
Porovnání mezi parametrem β_{Th} vypočteným původním modelem B4 a hodnotou parametru $\beta_{Th,opr}$ po adaptaci modelu B4 jsou zobrazeny pro 3 různé teploty ošetřování na schématu na Obr. 6.8 níže. Zvolené teploty jsou stejné jako byly použity

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



pro ošetřování ve studii (Graybeal, 2006)^[15]. Adaptace modelu zvyšuje významně hodnotu parametru β_{Th} pro teploty nad 80 °C. Hodnoty opraveného součinitele β_{Th} budou použity v následujících kapitolách pro celkovou kalibraci modelu.



Obr. 6.8: Hodnota parametru $\beta_{Th,opr}$ pro teplotu ošetřování 22 °C, 60 °C a 90 °C.

6.4 Úprava vlhkosti betonu

Jak bude ukázáno v této a následujících kapitolách, relativní vlhkost v betonu a případné její zvýšení v průběhu ošetřování má naprosto zásadní vliv na krátkodobé a dlouhodobé vlastnosti UHPC prvku. Vliv je patrný zejména na:

- tlakovou a tahovou **pevnost betonu** a v menší míře i modul pružnosti,
- absolutní hodnotu konečného **autogenního smršťování**,
- míru a rychlost přetvoření od **smršťování vysycháním**, včetně bobtnání při ošetřování.

Z naprosté většiny experimentů uvedených v předchozích kapitolách je jednoduchý závěr, a tím je, že u UHPC se projevuje velmi nízká nebo žádná míra přetvoření od vysychání. Výjimkou je vlastní experiment provedený na ČVUT v roce 2020, který ukazuje vysokou míru počátečního smršťování od bobtnání, a i následného smršťování vysycháním. Tento experiment je ve srovnání s ostatními níže uvedenými rozdílný velmi nízkou relativní vlhkostí prostředí (30–40 %), ve kterém byly vzorky po skončení ošetřování uloženy. Data z tohoto experimentu je tedy možné použít pro porozumění procesů transportu vody v UHPC.

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 r_h vlivu vlhkosti:

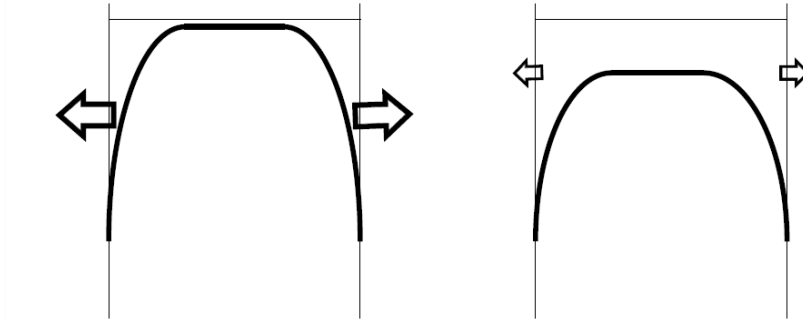
$$r_h = 1 - h^3 \quad \text{pro } h \leq 0,98 \quad (6.7)$$

$$r_h = 12.94 * (1 - h) - 0,2 \quad \text{pro } h > 0,98 \quad (6.8)$$

Při relativní vlhkosti větší než 98,5 % dochází dále dle modelu B4 k bobtnání. Tento předpoklad je platný pro betony běžné třídy, kde v důsledku samovysychání poklesne dlouhodobě vnitřní relativní vlhkost samovysycháním pouze o 2–4 %, ale v případě UHPC může tento efekt být řádově vyšší, čímž se změní gradient relativní vlhkosti na rozhraní mezi betonovým prvkem a okolním prostředím. U UHPC dochází zejména při ošetřování zvýšenou teplotou k významné hydrataci záměsové vody, a i vody použité při ošetřování.

6.4.1 Vnitřní relativní vlhkost UHPC a jeho samovysychání

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 jak popisuje Nilsson (2005)^[52] a jak je zobrazeno na obrázku níže.



Obr. 6.9: Rozdíl mezi betonem běžné třídy (vlevo) a UHPC (vpravo) z pohledu distribuce relativní vlhkosti po výšce průřezu (Nilsson, 2005)^[52].

Například pro relativní vlhkost prostředí 70 % a vnitřní vlhkosti betonu 98 % dochází k vysychání v důsledku gradientu vlhkosti. Pokud se do stejného prostředí umístí prvek z UHPC, kde může vnitřní vlhkost klesnout až pod 70 %, tento prvek vysychat nebude.

Snižování vnitřní relativní vlhkosti v prvcích z UHPC se tímto významně liší od prvků z betonu běžné třídy. Zásadním rozdílem je samovysychání betonu, které je přímým důsledkem chemické vazby vody na cement a další hydratující složky betonu. I pro masivní prvky je patrný výrazný pokles relativní vlhkosti, který je možné pozorovat po výšce průřezu. Jak je patrné na Obr. 6.9, tento efekt je doplněn o další pokles relativní vlhkosti v blízkosti povrchu betonového prvku vystavenému okolnímu prostředí. Tento pokles je způsoben transportem vlhkosti do okolí. Jak uvádí Nilsson (2005)^[52], transport vody z UHPC je významně nižší pro UHPC než pro beton běžné třídy.

Vhledem k velikosti pórů, které jsou v případě UHPC velmi malé, má UHPC podle Kelvin-Laplaceova zákona (Zhang, 2016)^[51] celkově nižší kapacitu na zadržení vody v pórech. Tedy, i když je na Obr. 6.9 výše zobrazena stejná hodnota relativní vlhkosti v betonu blízko povrchu, absolutní hodnota volné vody, které UHPC opustila, je nižší.

Kapitola 6

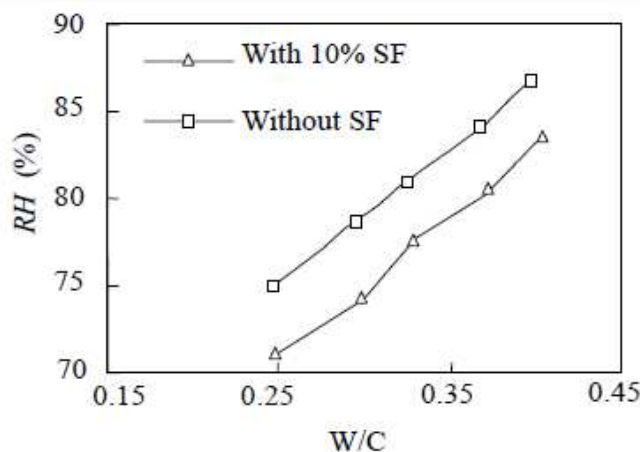
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Reakce cementu také snižuje množství vody, která by byla jinak vázána fyzikálně ve struktuře betonu. Důsledkem je rozdíl mezi relativní vlhkostí na povrchu prvku a uvnitř, je tedy nižší v případě UHPC právě díky efektu samovysychání. Zároveň tento proces není svázán s transportem vody v betonu.

Toto pozorování velmi omezeného vlivu transportu vody v UHPC se dá využít v případě tzv. vnitřního ošetřování betonu, které využívá příměsí, které jsou schopny vázat vodu a postupně ji ve struktuře betonu uvolnit pro pokračování hydratace, například pomocí nasávkavých polymerů (Androuët, 2021)^[18]. Ty po betonáži uvolňují vodu postupně a umožňují tak pokračující hydrataci a kompenzují tak sníženou vnitřní relativní vlhkost v důsledku samovysychání.

Yang (2005)^[53] se zabýval velmi důležitým tématem pro použití této problematiky pro predikci vlivu receptury betonu na konečnou relativní vlhkost v betonu.



Obr. 6.10: Závislost vodního součinitele na vnitřní vlhkosti betonu po hydrataci (Yang, 2005)^[53].

Jedná se o parametrickou studii na celkem 10 směsí betonu s vodním součinitelem od 0,25 do 0,40 a zároveň při použití mikrosiliky v množství 0 % nebo 10 % množství cementu. Pro tyto různé směsi byly měřeny hodnoty relativní vlhkosti v čase a experiment byl ukončen 1 rok po betonáži. Na obrázku výše je vidět zjištěná závislost. Výsledkem je velmi patrná a téměř lineární závislost mezi snižováním vodního součinitele a zvyšováním množství mikrosiliky na konečnou hodnotu poklesu vnitřní relativní vlhkosti. Právě díky charakteru výsledné závislosti můžeme pro UHPC tento experiment extrapolovat, a tím následně získáme skvělou shodu vlastních výsledků i výsledků dalších dříve uvedených studií.

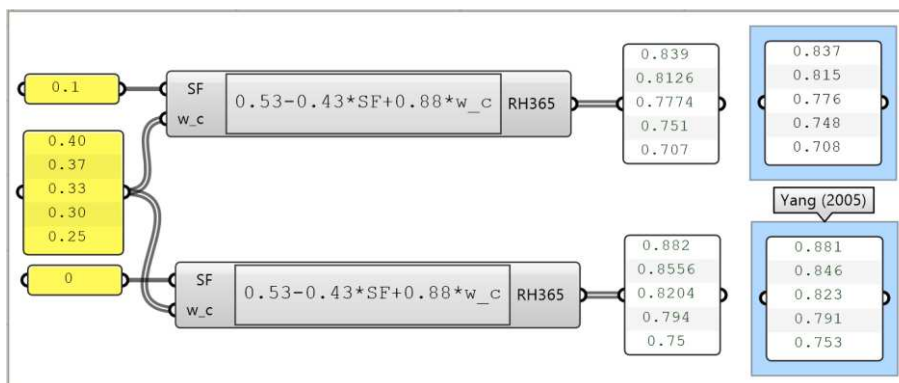
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Závislost vnitřní relativní vlhkosti v čase 365 dní po betonáži můžeme na základě výše uvedené studie (Yang, 2005)^[53] aproximovat vztahem (6.9) níže, kde SF je poměr množství mikrosiliky a cementu. Tento empirický vztah je porovnán s naměřenými hodnotami na diagramu níže.

$$r_{h,365} = 0,53 - 0,43 * SF + 0,88 * w/c \quad (6.9)$$



Obr. 6.11: Vnitřní vlhkost betonu 365 dní po betonáži – porovnání empirického vztahu a experimentu (Yang, 2005)^[53].

Kapitola 6

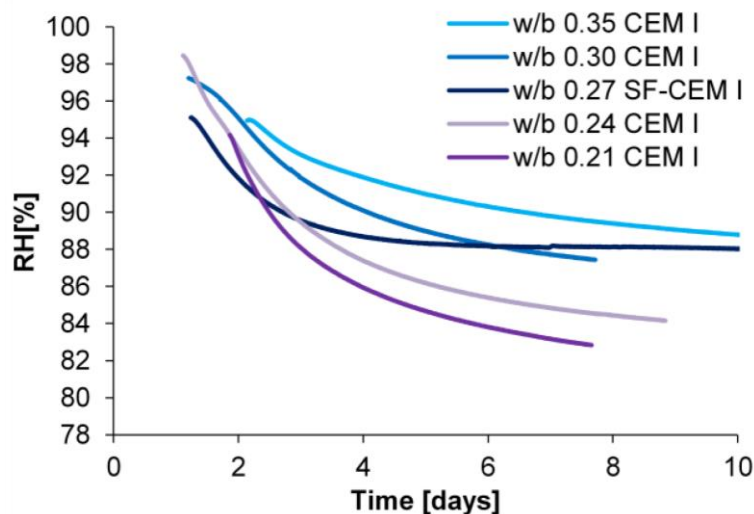
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



6.4.2 Samovysychání UHPC v raném stáří

Pro predikci účinku ošetřování zvýšenou teplotou za zvýšené vlhkosti je nutné určit nejen hodnoty konečné relativní vlhkosti, ale zabývat se mírou snížení relativní vlhkosti v betonu v prvních dnech po betonáži. Vnitřní vlhkost v malém stáří je publikována v několika studiích (Wyrzykowski, 2016, Yang, 2005 a Nilsson, 2005)^{[54],[53],[52]}. Experimenty provedené v těchto studiích ukazují pro různé směsi HPC rychlost poklesu relativní vlhkosti již v prvním dnu po betonáži.

Problematice samovysychání cementové pasty s příměsí mikrosiliky se věnoval Wyrzykowski (2016)^[54], který měřil pro 4 různé směsi s cementem třídy CEM I pokles relativní vlhkosti v prvních 10 dnech po betonáži. Pro recepturu s vodním součinitelem 0,21 a byl naměřen pokles relativní vlhkosti 17 % po prvních 7 dnech. Změřené hodnoty relativní vlhkosti jsou patrné na Obr. 6.12 níže a jsou doplněny o měření i na směsi s 10 % obsahem mikrosiliky.

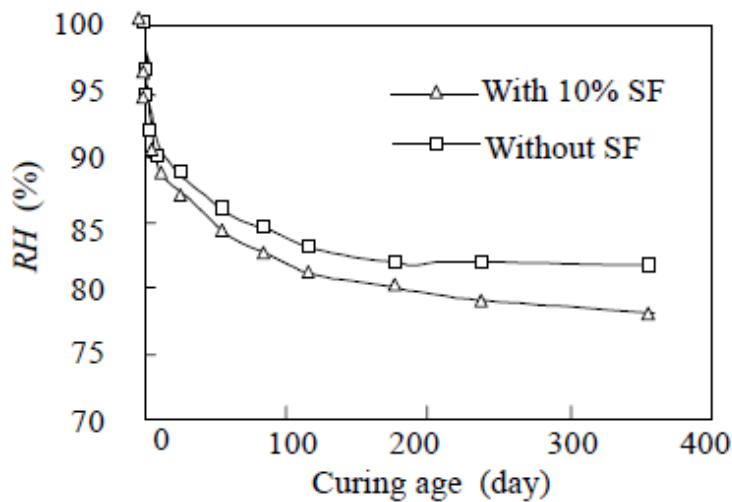


Obr. 6.12: Pokles relativní vlhkosti betonu po betonáži (Wyrzykowski, 2016)^[54].

Tyto hodnoty však nebyly měřeny pro směsi UHPC, ale na cementové pastě, tedy tato studie potvrzuje rychlý úbytek relativní vlhkosti, ale pro predikci úbytku relativní vlhkosti v UHPC se nehodí. Vhodnější referenci na průběh vlhkosti v čase nabízí opět Yang (2005)^[53] pro jednu směs bez obsahu mikrosiliky a druhou směs se stejným vodním součinitelem, ale obsahem mikrosiliky na úrovni 10 % množství cementu.

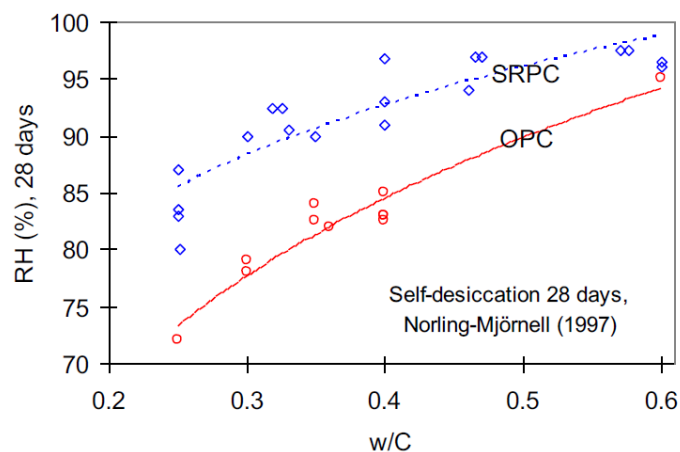
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Obr. 6.13: Závislost vodního součinitele na vnitřní vlhkosti betonu v čase po betonáži (Yang, 2005)^[53].

Konzistentně s daty uvedenými výše, Nilsson (2005)^[52] konstatuje na základě studií publikovaných ve Švédsku, že volba typu cementu vyšší třídy má vyšší účinek než obsah mikrosiliky a zároveň poukazuje na vysoký rozptyl hodnoty samovysychání při použití mikrosiliky. Závěrem Nilsson (2005)^[52] doporučuje pečlivé testování směsi před definováním empirické závislosti, neboť i pro velmi malé odchylky v receptuře mohou být výsledky velmi odlišné. Porovnávané hodnoty jsou zobrazeny na grafu níže pro cement s normálním nárůstem pevnosti (SRPC) a pro cement s rychlým nárůstem pevnosti (OPC). Hodnoty jsou zobrazené pro různé směsi ve stáří 28 dnů, zároveň Nilsson dále konstatuje, že se vzrůstajícím stářím betonu se rozdíl mezi jednotlivými druhy cementu snižuje. Pro beton s vodním součinitelem 0,25 je rozptyl hodnot relativní vlhkosti mezi 80–87 %, což odpovídá hodnotám naměřených Yangem (2005)^[53].



Obr. 6.14: Pokles relativní vlhkosti betonu 28 dní po betonáži (Nilsson, 2005)^[52].

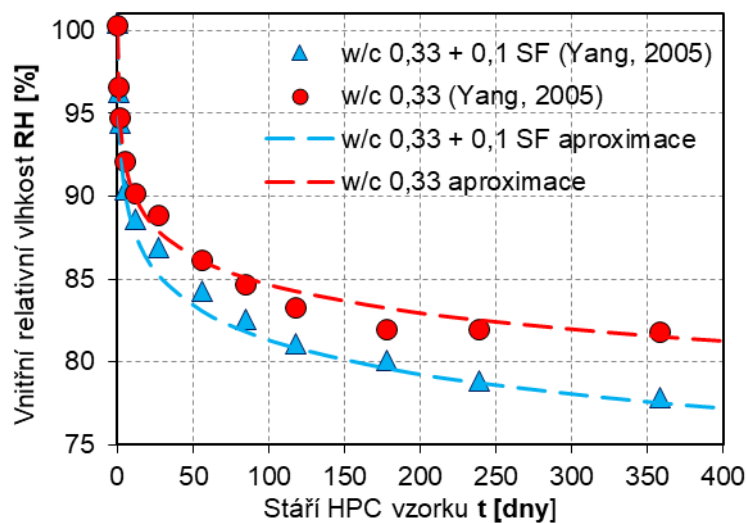
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Výsledky studie (Yang, 2005)^[53] jsou pro UHPC použitelné, neboť průměrná 28denní tlaková pevnost vzorku s nejnižším vodním součinitelem ve studii byla 136 MPa pro směs bez mikrosiliky a 140 MPa pro směs s 10 % obsahem mikrosiliky. Tyto hodnoty pevností jsou řádově shodné s pevnostmi směsí UHPC, která byla použita pro kalibraci modelu na základě vlastních experimentů a studie (Graybeal, 2006)^[15]. Při použití aproximace logaritmickou funkcí získáváme skvělé srovnání s uvedeným trendem poklesu relativní vlhkosti:

$$r_h(t) = 1 - (1 - r_{h,365}) * (0,135 * \ln(t) + 0,22) \quad (6.10)$$

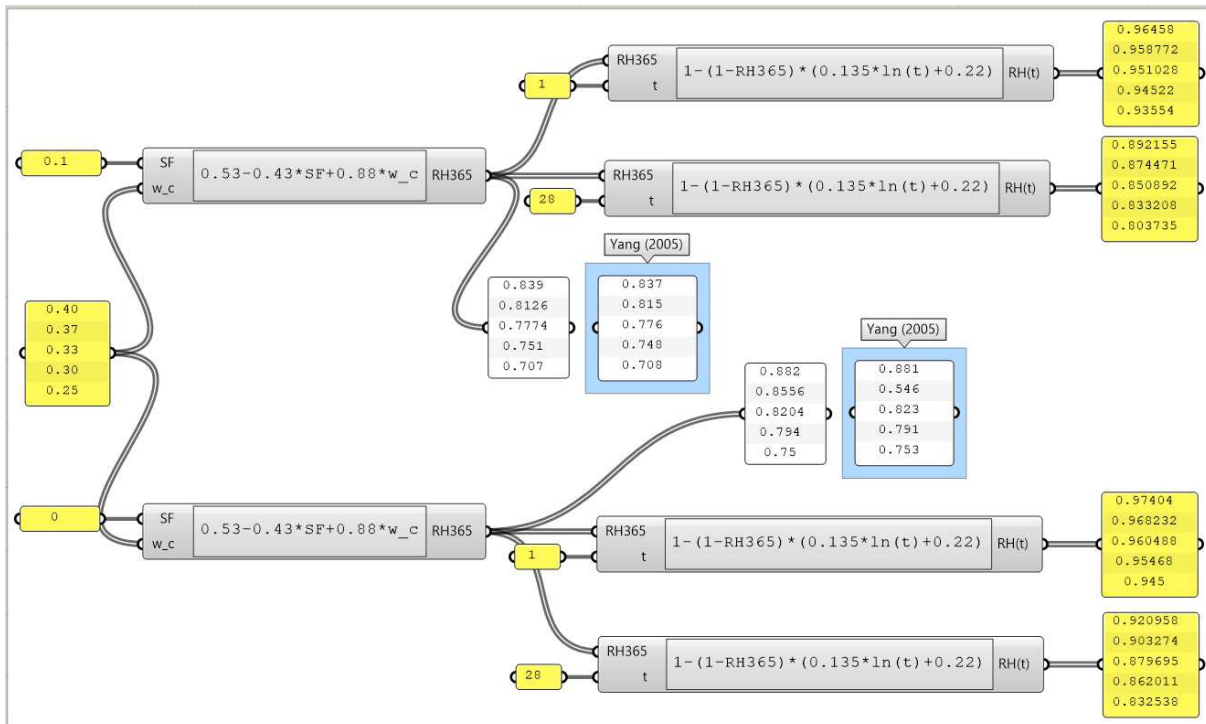


Obr. 6.15: Závislost vodního součinitele na vnitřní vlhkosti betonu po hydrataci a porovnání s empirickým vztahem (Yang, 2005)^[53].

Na Obr. 6.15 je uvedeno porovnání náběhu relativní vlhkosti naměřeného na vybraných 2 recepturách uvedených ve studii (Yang, 2005)^[53] a jejich aproximace pomocí logaritmické funkce (6.10). Na Obr. 6.16 jsou zobrazeny hodnoty vypočtené relativní vlhkosti pro 1 a 28 dnů.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Obr. 6.16: Závislost vodního součinitele na vnitřní vlhkosti betonu po hydrataci a porovnání s empirickým vztahem (Yang, 2005)^[53]. Dále je vyčíslena hodnota relativní vlhkosti po 1 a 28 dnech po betonáži.

Receptura UHPC použitá pro vlastní experiment, tak i další receptura z rozsáhlé studie (Graybeal, 2006)^[15], která byla v této práci použita pro kalibraci modelu B4, má však ještě nižší vodní součinitel, a i vyšší podíl mikrosiliky, jak je uvedeno v tabulce (Tabulka 6.2) níže. Hodnoty 365denních vypočtených relativních vlhkostí klesají až k hodnotám kolem 60 %, což indikuje, že hydratace v této době již dále neprobíhá. Většina zdrojů uvádí, že hydratace se zastavuje na 70–75 % vnitřní relativní vlhkosti (Nilsson, 2005 a Androuët, 2021)^{[52],[18]}.

Tabulka 6.2: vodní součinitel a obsah mikrosiliky vybraných směsí UHPC

veličina	Odhad vnitřní vlhkosti betonu [%]		
	Yang (2005) ^[53]	Graybeal (2006) ^[15]	Vlastní experiment
w/c	0,250	0,153	0,229
mikrosilika	10 %	20 %	20 %
RH365	70,7 %	57,9 %	64,5 %
RH1	93,6 %	90,7 %	92,2 %

Jak je patrné zejména z americké studie (Graybeal, 2006)^[15], hodnota autogenního smršťování se ustálila na konečné hodnotě mezi 60. a 100. dnem po

Kapitola 6

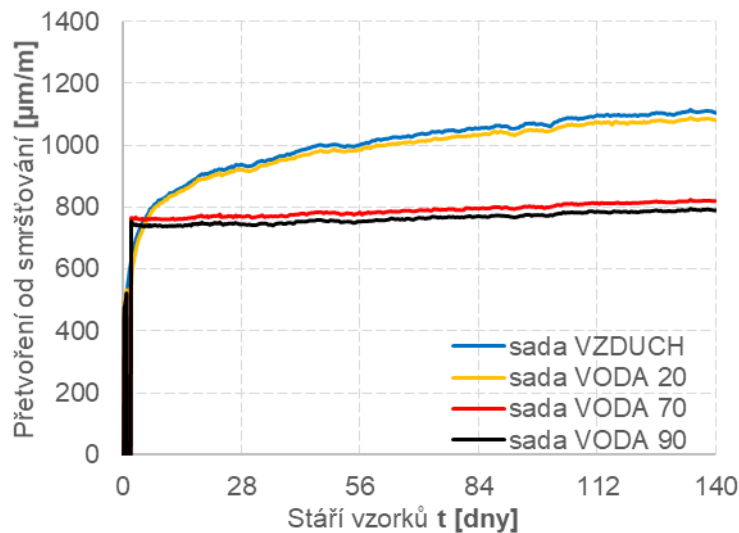
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



betonáži a dále již nenarůstala. Toto pozorování potvrzuje velmi rychlý pokles vnitřní relativní vlhkosti ve vzorcích až na úroveň, kdy hydratace dále nepokračuje.

Pro vzorky ošetřované zvýšenou teplotou se hydratace zastavila výrazně dříve. Toto pozorování je predikováno již dříve modifikovaným součinitelem β_{Th} , který je použit pro výpočet efektivního stáří vzorku po skončení ošetřování a jehož hodnota byla 13 pro vzorky ošetřované při 60 °C a 110 pro vzorky ošetřované při 90 °C. Při zahrnutí doby ošetřování 2 dny se hydratace na vzorku ošetřovaném při 60 °C zastaví po 30–60 dnech po betonáži a pro vzorek ošetřovaný při 90 °C se veškerá hydratace zastaví ještě v průběhu ošetřování a takto ošetřovaný vzorek je již stálý a dále nesmršťuje.

Konzistentní výsledky byly získány vlastním experimentem provedeným na ČVUT v roce 2020 a 2021. Na Obr. 6.17 níže jsou zobrazeny pro 4 různě ošetřované vzorky jejich hodnoty smršťování. V tomto případě se jedná o vzorky uložené po ošetřování v prostředí s extrémně nízkou relativní vlhkostí a naměřené hodnoty jsou kombinací autogenního smršťování a smršťování vysycháním.



Obr. 6.17: Nárůst přetvoření od smršťování UHPC vzorků (vlastní experiment, ČVUT 2021)

Vzorky ošetřované při 20 °C (ať už ve vodě nebo na vzduchu) vykazují již velmi nízký nárůst celkového smršťování po 130–160 dnech po betonáži. Vzorky ošetřované ve vodě o teplotě 70 °C a 90 °C jsou po skončení ošetřovacího programu v době 48 hodin po betonáži již téměř stálé a po dobu měření až do doby 150 dnů vzrostla

Kapitola 6

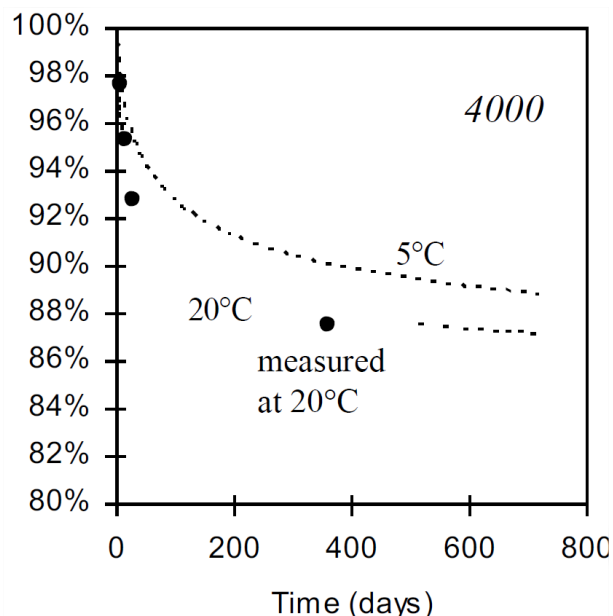
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



hodnota jejich celkového přetvoření od smršťování jen o $40 \cdot 10^{-6}$, což odpovídá zhruba 5 % celkového přetvoření od smršťování vzorku ošetřovaného ve vodě o teplotě 70 °C a tento efekt je možné připsat spíše mírnému smršťování od vysychání než autogennímu smršťování. Pro 20 °C je $\beta_{Th} = 1,0$ (20 °C je referenční teplota pro výpočet parametru β_{Th}), pro 70 °C je hodnota $\beta_{Th} = 9,0$ a pro 90 °C je hodnota $\beta_{Th} = 85$.

Zajímavým úkazem patrným na Obr. 6.17 z nárůstu přetvoření od smršťování v čase je, že prvky ošetřované při 90 °C dosahují nižší hodnoty celkového přetvoření od smršťování ve srovnání s neošetřovanými prvky, což na první pohled neodpovídá předpokladu vyšší míry hydratace a s ní spojeným přetvořením od autogenního smršťování. Pozorovaný efekt je v důsledku nevratného bobtnání UHPC v průběhu ošetřování detailně objasněn v následující kapitole.

Dalším zdrojem, který toto chování při ošetřování zvýšenou teplotou potvrzuje cíleně provedenými experimenty, je Nilsson (2005)^[52] a výsledky těchto experimentů jsou pro teplotu okolí 5 °C a 20 °C uvedeny na Obr. 6.18 níže. Přestože se Nilsson nezabýval vyššími hodnotami, prokazuje efekt zvýšené teploty na pokles vnitřní vlhkosti v betonu v důsledku samovysychání.



Obr. 6.18: Pokles snížení vnitřní relativní vlhkosti samovysycháním při různých teplotách okolí (Nilsson, 2005)^[52].

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



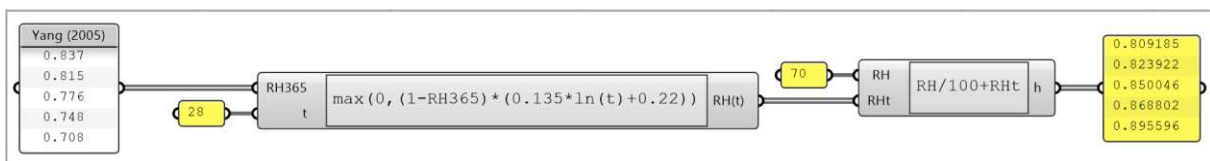
Když použijeme rovnici (6.6), tak pro 20 °C je $\beta_{Th} = 1,0$ a pro 5 °C je hodnota $\beta_{Th} = 0,47$. Beton při 5 °C tedy zraje více než 2x pomaleji, což přímo ovlivňuje rychlost náběhu autogenního smršťování a s tím spojeného efektu samovysychání.

6.4.3 Modifikace modelu B4 a zahrnutí efektu samovysychání

Z výše uvedených experimentů je patrné, že efekt samovysychání není v modelu B4 zahrnut. Platnost modelu B4 se uvádí pro beton do tlakové pevnosti 70 MPa a u betonu běžné třídy je samovysychání řádově nižší než v případě UHPC. Navrhovaná úprava modelu B4 spočívá v korekci hodnoty relativní vlhkosti okolí o míru úbytku relativní vlhkosti uvnitř UHPC v důsledku samovysychání v daném čase. Pozměněný vztah (6.11) je uveden níže.

$$RH_{eff} = RH + (1 - RH(t)) \quad (6.11)$$

Přepočítání při uvažované vlhkosti prostředí 70 % pro stáří betonu 28 dnů je pro hodnoty ze studie (Yang, 2005)^[53] uvedena na schématu na Obr. 6.19.



Obr. 6.19: Přepočtené hodnoty vlhkosti prostředí dle vztahu (6.11) a hodnot relativních vlhkostí betonu 365 dní po betonáži (Yang, 2005)^[53].

Z empirického vztahu (6.11) je zřejmé, že vypočtená vnitřní vlhkost betonu může v důsledku samovysychání klesnout pod 60 %. Většina odborných zdrojů uvádí, že hydratace se zastavuje na 70–75 % vnitřní relativní vlhkosti. Nilsson (2005)^[52] se této problematice věnoval detailněji a na velmi tenkých vzorcích UHPC bylo pozorována míra hydratace vyjádřená v grafu níže součinitelem α_c v závislosti na měřené vnitřní relativní vlhkosti vzorku.

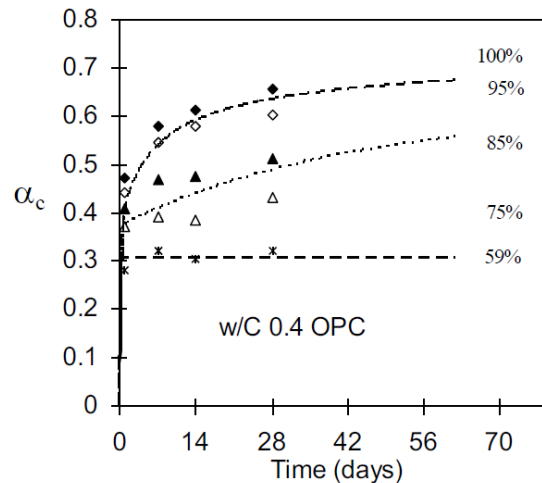
Tenké vzorky byly po odbednění rychle umístěny do prostředí s různou relativní vlhkostí v rozmezí od 59 % do 100 %. Díky malé tloušťce vzorků došlo k okamžitému vysychání a vnitřní relativní vlhkost vzorků dosáhla stejných hodnot jako okolní kontrolované prostředí za méně než 1 den. Na měřených datech (Obr. 6.20) je patrná rychlá a postupující hydratace vzorků umístěných do prostředí s 95% a 100% vlhkostí,

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



avšak i vzorky umístěné do prostředí s relativní vlhkostí 59 % vykazovaly řádově nižší, ale velmi mírný nárůst



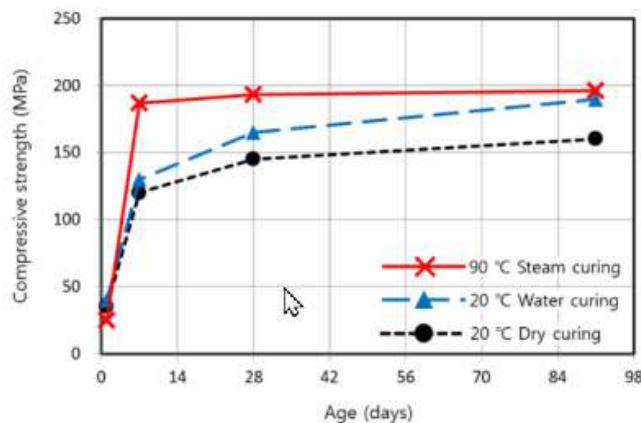
Obr. 6.20: Míra hydratace UHPC v závislosti na vnitřní relativní vlhkosti (Nilsson, 2005)^[52].

V této kapitole byly vysvětleny procesy transportu vody v betonu a zejména v UHPC a byl vysvětlen princip samovysychání. Na základě několika dostupných studií, které se samovysycháním a vnitřní relativní vlhkostí v betonu zabývají, byl definován empirický vztah pro stanovení relativní vlhkosti v UHPC. Vnitřní vlhkost v UHPC má velmi významný vliv na mechanické (okamžité) vlastnosti vzorků ošetřovaných různým způsobem, ale také na dlouhodobé vlastnosti UHPC, kterým se věnují další kapitoly.

6.5 Úprava modelu B4 přidáním součinitele typu ošetřování

Model B4 zahrnuje do výpočtu upravených dob ošetřování, doby zatížení a dob, kdy je hodnota smršťování a dotvarování vyhodnocována, vliv teploty pomocí parametru β_{Th} . Nedávné studie, a i vlastní výzkum prokazují, že teplota není jediný parametr ovlivňující výpočtovou hodnotu stárání betonu. Dalším faktorem je i vlhkost prostředí, a zejména její hodnota při ošetřování, zejména v čase brzy po betonáži, neboť zralý beton výrazně snižuje rychlost a množství možného transportu vody do struktury betonu difúzí.

Různé studie (například Koh, 2007 a Park, 2015)^{[30],[31]} se zabývají vlivem vlhkosti v průběhu ošetřování za různých teplot na míru celkové hydratace a na nárůst tlakové pevnosti betonu. Pro některé scénáře ošetřování je tlaková pevnost dosažená při ošetřování parou při 90 °C již konstantní (což odpovídá již popsánému efektu ošetřování zvýšenou teplotou, který je v modelu B4 zahrnut součinitelem β_{Th}) a neošetřované vzorky ve většině případů této pevnosti nedosahují ani po několika letech. Na obrázku níže je zároveň pro porovnání uveden i vzorek umístěný do vodního prostředí o teplotě 90 °C, tedy stejné jako pro prvek umístěný na vzduch do laboratorního prostředí.



Obr. 6.21: Nárůst pevnosti UHPC pro různé způsoby ošetřování (Koh, 2007)^[30].

Pro prvek ošetřovaný parou za stejné teploty je patrný postupný nárůst pevnosti v průběhu 100 dní po betonáži až na úroveň blízkou pevnosti vzorku ošetřovaného při 90 °C. Z tohoto pozorování lze odvodit, že teplota má vliv zejména na rychlost hydratace, ale ne přímo na absolutní hodnoty pevností, míry celkové hydratace, a i na

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



teoretické konečné přetvoření od autogenního smršťování. Tento předpoklad potvrzují i další již zmiňované experimenty (Graybeal, 2006)^[15], kde byla měřena přímo hodnota smršťování.

Dle měření relativní vlhkosti v UHPC v různých studiích uvedených v předchozí kapitole je patrné, že relativní vlhkost v UHPC starém 1–2 dny může poklesnout o 8–15 % a tedy při začátku ošetřování dochází k zesílení účinku transportu vlhkosti do struktury betonu díky vyššímu rozdílu vlhkosti mezi vnitřním prostředím UHPC a okolním prostředím, které je v čase ošetřování buď nasyceno parou nebo jsou vzorky dokonce ponořeny do vodního prostředí. Úbytek relativní vlhkosti uvnitř betonu je tak ihned kompenzován vodou z ošetřování, které podporuje další hydrataci, neboť UHPC obsahuje standardně velké množství cementu a dalších hydratujících složek, které by ve struktuře betonu neměly možnost hydratovat z důvodu nízkého množství záměsové vody.

Pro beton ošetřovaný v páře nebo ve vodním prostředí se zvýšenou teplotou pak efekt teploty vyjádřený součinitelem β_{Th} dále zvyšuje efekt ošetřování za zvýšené vlhkosti, protože efektivní doba ošetřování roste exponenciálně s rostoucí teplotou.

Důsledkem zvýšené míry hydratace UHPC je pak vyšší maximální dosažitelná pevnost, a i míra autogenního smršťování. Možné maximální zvýšení těchto charakteristik je také ovlivněno množstvím volného cementu a mikrosiliky, která by v případě neošetřovaného vzorku zůstala ve struktuře betonu jen jako plnivo. Dle hodnot konečného přetvoření od autogenního smršťování (Graybeal, 2006)^[15] je odvozen vztah (6.12), který bude použit v modelu B4 pro zvýšení hodnot konečného smršťování. Platnost tohoto vztahu je dále potvrzena i vlastním experimentem, kde však byla měřena hodnota celkového smršťování, jak od vysychání, tak i autogenního.

$$\beta_{RH} = (1 - RH(t) + RH_{cure})^{0,5*(1+SF)*c/c_{min}} \quad (6.12)$$

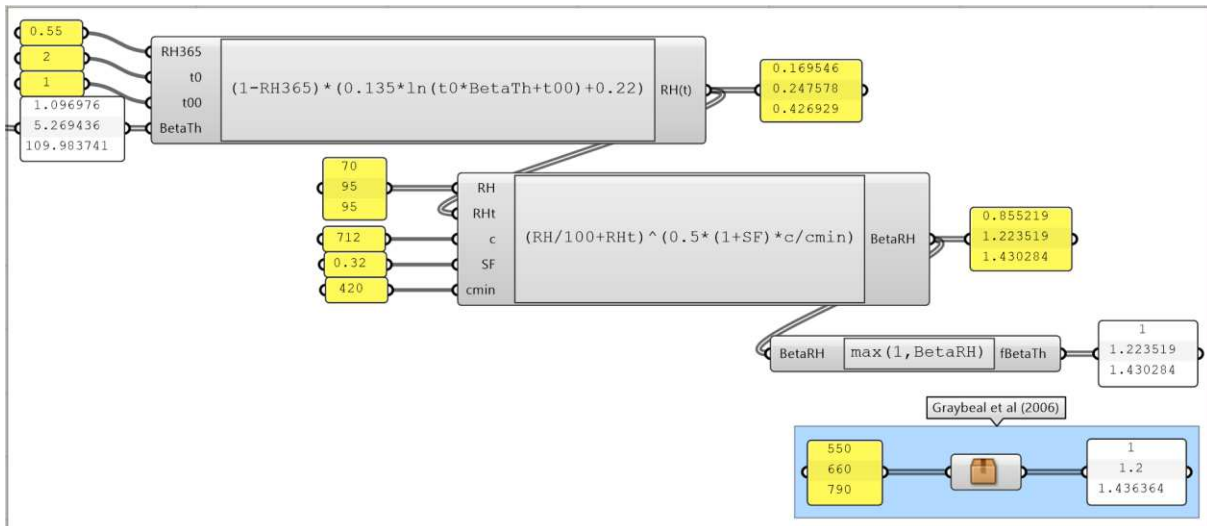
Čas t je součet doby před začátkem ošetřování a průběhu ošetřování včetně účinku zvýšené teploty. Tímto způsobem je určena vnitřní relativní vlhkost, která by v případě neošetřovaného vzorku poklesla samovysycháním, avšak vlhkost v betonu je v průběhu ošetřování dále doplňována. Exponenciální člen pak koriguje výpočetní účinek, neboť v průběhu ošetřování se s postupující hydratací dále zvyšuje difúzní odpor betonu a po určitém čase již efekt ošetřování nemá větší vliv na nárůst

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



autogenního smršťování. Porovnání měřených hodnot (Graybeal, 2006)^[15] a hodnot empirického vztahu s použitím součinitele β_{Th} je patrný na schématu na Obr. 6.22 níže, kde je hodnota $\beta_{RH} > 1.0$ (pro výpočet konečné hodnoty od autogenního smršťování tento součinitel nepůsobí jako redukční pro neošetřované prvky).



Obr. 6.22: Konečná hodnota autogenního smršťování – empirický vztah a porovnání s měřenými hodnotami (Graybeal, 2006)^[15].

Z odvozeného empirického vztahu výpočtu β_{RH} je zřejmé, že pokud bude beton ošetřován při 100% relativní vlhkosti a zároveň vnitřní relativní vlhkost v betonu neošetřovaném by za stejnou efektivní dobu klesla o 20–30 %, pak je gradient vlhkosti řádově významnější než pro beton běžné třídy, kde úbytek relativní vlhkosti samovysycháním může být 2–4 %, a tedy dochází k významnému urychlení transportu vody z okolí do struktury betonu. Tento efekt je pozorovatelný jak nárůstem přetvoření od autogenního smršťování, tak i bobtnáním, jak bude vysvětleno v následující kapitole.

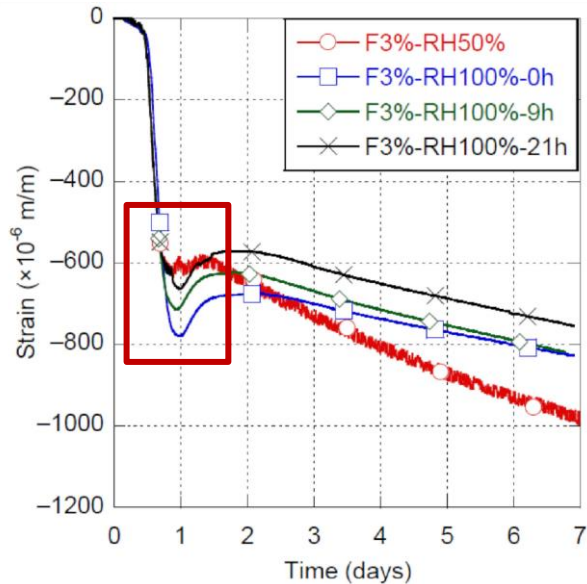
V nedávno publikované studii (Androuët, 2021)^[18] byl popsán efekt ošetřování betonu parou se 100% relativní vlhkostí a byl pozorován zvýšený efekt autogenního smršťování 1 den po betonáži, a to až o 20 % pro vzorky umístěné do tohoto prostředí 9 hodin po betonáži (Obr. 6.23). Pro vzorky umístěné do tohoto prostředí 21 hodin po betonáži byl tento efekt již pouze poloviční. Vzorky v průběhu ošetřování doplnily vnitřní relativní vlhkost, která byla způsobena samovysycháním a ošetřování podpořilo následnou hydrataci. Když byla vnitřní vlhkost betonu doplněna na 100 %, začaly se

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



ve zvýšené míře projevoval účinky bobtnání a došlo k poklesu celkového přetvoření od smršťování.

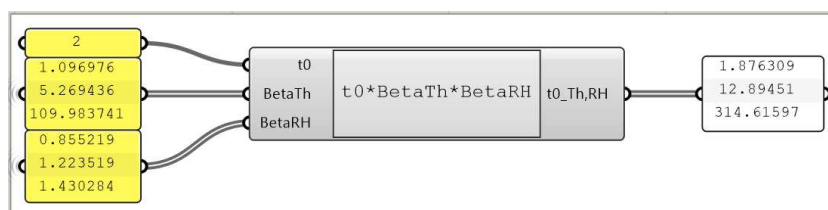


Obr. 6.23: Efekt ošetřování UHPC v parní komoře se 100% relativní vlhkostí pro různá stáří začátku ošetřování (Androuět, 2021)^[18] s vyznačeným účinkem počátku bobtnání.

V této studii je však obtížné oddělit zvýšení míry autogenního smršťování od bobtnání, jelikož tyto procesy působí současně. Studie nám však dává potvrzení, že ošetřování v raném čase po betonáži má zásadní vliv na postup hydratace a že rozdíl oproti neošetřovanému prvku může být v desítkách procent.

Pro nepřímé potvrzení konceptu dvou součinitelů ošetřování β_{Th} a β_{RH} můžeme vyčíslit dle modelu B4 hodnoty dotvarování pro efektivní stáří betonu, která je zvýšená o efektivní dobu ošetřování $t_{0,Th,RH}$, která vychází z doby reálné délky ošetřování betonu a součinitelů β_{Th} a β_{RH} :

$$t_{0,Th,RH} = \beta_{Th} * \beta_{RH} * t_0 \quad (6.13)$$



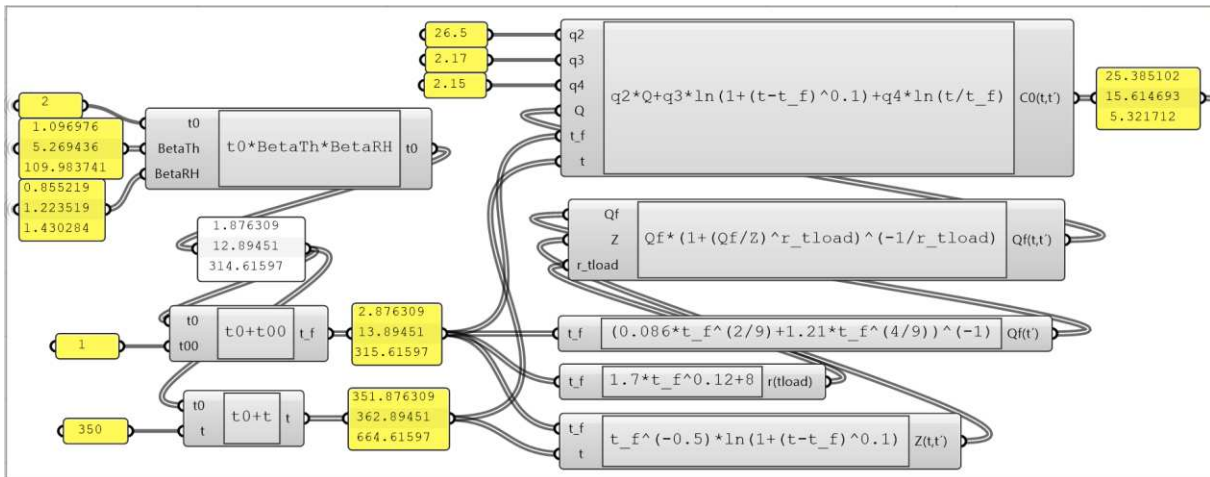
Obr. 6.24: Výpočet efektivního stáří betonu za použití součinitelů β_{Th} a β_{RH} , která bude použita dále pro ověření kalibrace na přetvoření od dotvarování.

Kapitola 6

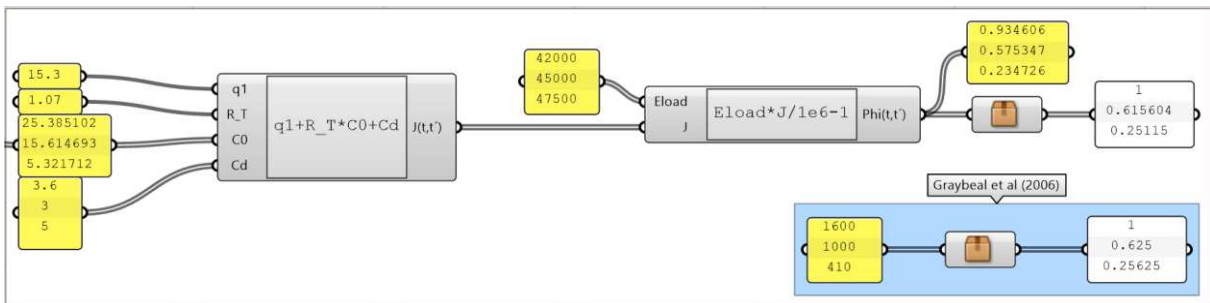
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Pro zjednodušení schématu výpočtu hodnot přetvoření od dotvarování jsou zde přeskočeny dílčí mezivýpočty jednotlivých materiálových součinitelů, součinitele dotvarování při vysychání a výpočtu modulu pružnosti v čase zatížení na Obr. 6.25 a Obr. 6.26 níže. Celý a nezjednodušený výpočet je uveden viz. Příloha 2 – Celkový modifikovaný model B4



Obr. 6.25: Výpočet základního dotvarování modelem B4.



Obr. 6.26: Potvrzení konceptu efektivní doby ošetřování opravenými součiniteli β_{Th} a β_{RH} a porovnání s měřenými hodnotami v čase 350 dnů po betonáži (Graybeal, 2006)^[15].

V této kapitole byl představen nový součinitel přidaný do modelu B4 modifikující efektivní stáří vzorku při ošetřování betonu v prostředí s vysokou relativní vlhkostí a zahrnutí efektu samovysychání v čase před a v průběhu doby ošetřování betonu. Data byla validována na dostupná data měření smršťování a dotvarování (Graybeal, 2006)^[15].

Kapitola 6

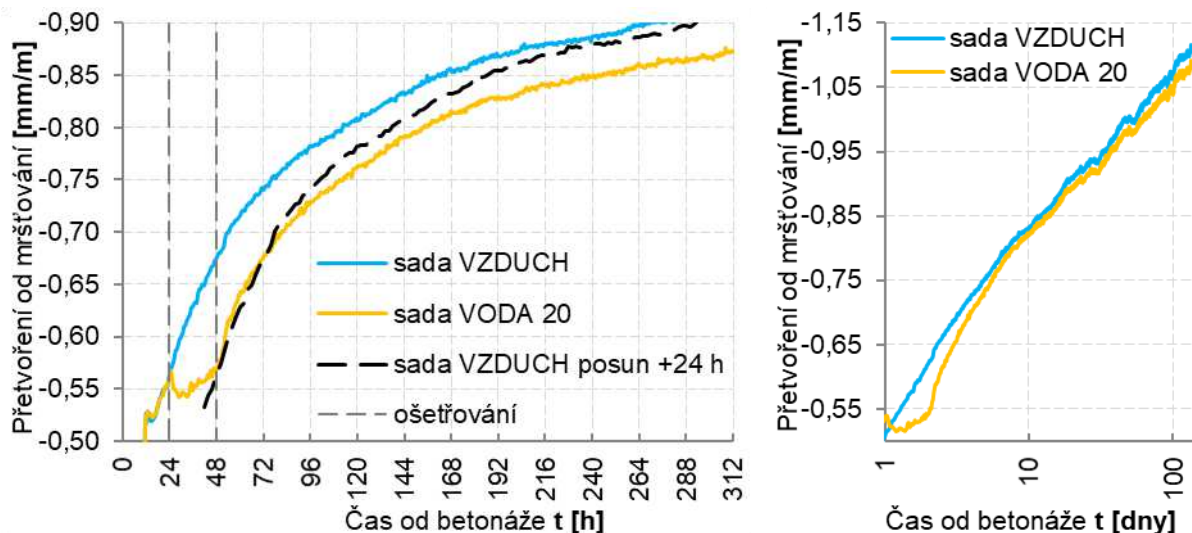
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



6.6 Bobtnání UHPC při ošetřování

V této kapitole se na základě poznatků uvedených v předchozích kapitolách popisují procesy, které ovlivňují smršťování ve velmi raném stáří betonového prvku pouhé 1–2 dny po betonáži a zejména pozorované nevratné bobtnání UHPC ošetřovaného v prostředí s vysokou relativní vlhkostí.

Pro predikci přetvoření od vysychání nebo bobtnání vychází model B4 z předpokladu, že děje spojené s transportem vody mezi betonem a okolím jsou vratné. Ošetřování betonu ve vodním prostředí nebo párou v základním modelu B4 pouze oddaluje počátek a nárůst predikovaného přetvoření od smršťování vysycháním. Tento předpoklad však pro UHPC platí jen částečně, jak je možné pozorovat na výsledcích vlastního experimentu na Obr. 6.27 níže. Při porovnání neošetřovaného vzorku s jinak shodným vzorkem ošetřovaným ve vodním prostředí o stejné teplotě po dobu 24 hodin je patrné, že došlo k nevratným změnám v betonu způsobenými bobtnáním (plně vratné změny by se projevily trendem odpovídajícím na Obr. 6.27: Vlevo na datové řadě „sada VZDUCH posun +25 h“).



Obr. 6.27: Efekt bobtnání při ošetřování patrných na výsledcích vlastního experimentu
Vlevo: do 13 dní po betonáži; **Vpravo:** do 150 dní (v logaritmickém měřítku) po betonáži.

Je možné pozorovat, že poměrné přetvoření od bobtnání po 24 hodinách je přibližně $110 \cdot 10^{-6}$ a po dalších 3–4 dnech se nárůst hodnoty smršťování ustálí na stejné rychlosti, jako v případě neošetřovaného vzorku. Rozdíl mezi vzorky se nadále

Kapitola 6

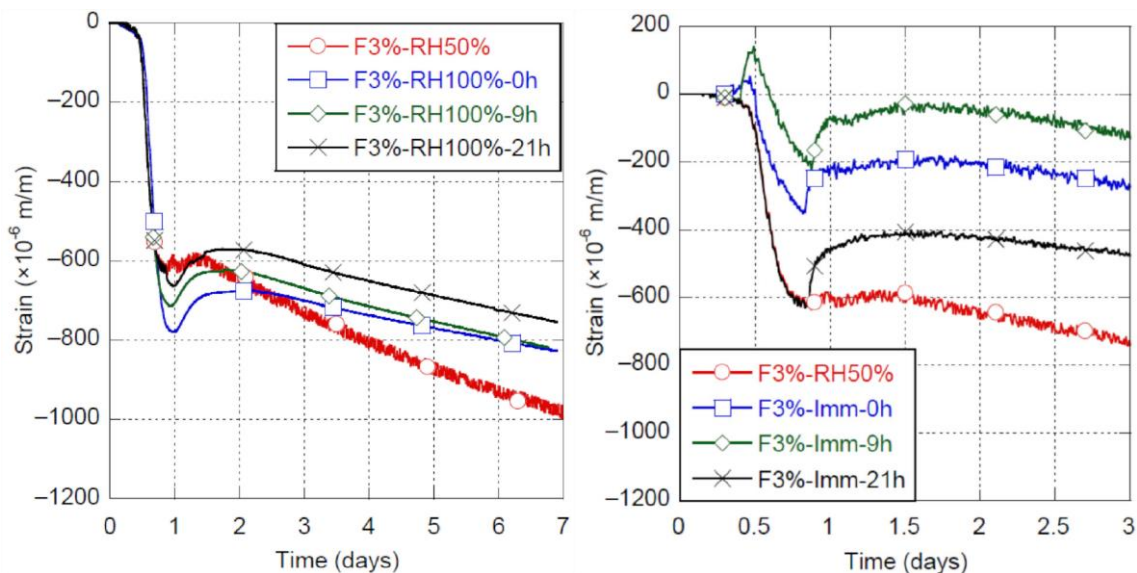
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



zachová a je patrný i 150 dní po betonáži. Naměřený poměr mezi celkovým přetvoření od bobtnání a nevratným přetvořením je 0,35.

Doporučení modelu B4 (Bažant, 2015)^[12] je použití hodnoty relativní vlhkosti okolí 98 % pro výpočet v případě, že se prvek nachází v prostředí vzdušné 100% vlhkosti (například mlha), protože pro betonové prvky umístěné v konstrukcích nemá toto prostředí znatelný vliv a k bobtnání dochází v zanedbatelné míře. Pro UHPC v čase ošetřování je efekt bobtnání v parním prostředí výrazně redukován, avšak při ošetřování za zvýšené teploty je množství vody obsažené ve vzduchu při 100% relativní vlhkosti násobné oproti množství vody obsažené ve vzduchu při pokojové teplotě, a proto se bobtnání bude u vzorků ošetřovaných za zvýšené teploty projevovat více než u vzorků vystavených vlhkosti při pokojové teplotě.

Bobtnání UHPC se detailně věnoval ve své studii Androuët (2021)^[18] a na 4 různých sadách porovnával míru bobtnání pro prvky ponořené do vody a pro prvky ošetřované v parní komoře se 100% relativní vlhkostí při pokojové teplotě. Při porovnání vzorků, jejichž ošetřování začalo 21 hodin po betonáži, je patrné, že vzorky ponořené do vody bobtnají 3x více oproti vzorkům ošetřovaných v parní komoře. Tento poměr byl odečten z grafů na Obr. 6.28.



Obr. 6.28: **Vlevo:** Efekt ošetřování UHPC v parní komoře se 100% relativní vlhkostí; **Vpravo:** ponořením do vody (Androuët, 2021)^[18].

Kapitola 6

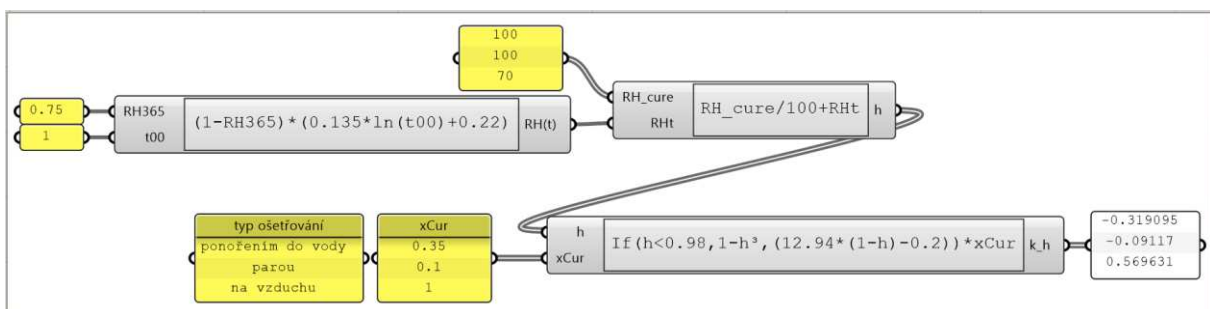
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Pro prvky vystavené ošetřování v čase 21 h po betonáži je rozdíl v době 3 dnů po betonáži prvku ošetřeného a neošetřeného pro:

- Ošetřování v parní komoře – rozdíl **110 $\mu\text{m}/\text{m}$** (sada „F3%-RH100%-21h“ a „F3%-RH50%“ na Obr. 6.28: Vlevo)
- Ošetřováno ponořením do vody – rozdíl 260 $\mu\text{m}/\text{m}$ (sada „F3%-Imm-21h“ a „F3%-RH50%“ na Obr. 6.28: Vpravo), k této hodnotě přidáme hodnotu nárůstu autogenního smršťování, které je viditelné na grafu ošetřování parou. Proces zvýšené míry autogenního smršťování 70 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Obr. 6.28: Vlevo v čase 1 den) je jistě přítomen i u vzorků ošetřovaných ve vodě, ale násobná míra bobtnání ho na grafu zakrývá. Celkový rozdíl mezi neošetřovaným a ošetřovaným vzorkem je **330 $\mu\text{m}/\text{m}$**

Při modifikaci modelu B4 vyjdeme z předpokladu, že nevratný efekt bobtnání je 0,35 z celkového bobtnání v průběhu ošetřování a že efekt ošetřování parou je přibližně třetinový ve srovnání s ošetřováním ve vodním prostředí. Tento efekt je v adaptovaném modelu B4 zohledněna parametrem x_{cur} . Pro ošetřování ve vodě má hodnotu 0,35, pro ošetřování parou 0,1 a pro ošetřování na vzduchu při běžné vlhkosti má hodnotu 1,0, neboť v tomto případě k bobtnání nedochází a prvek vysychá, jelikož nebyl ošetřován. Modifikace modelu B4 vychází z předpokladu, že samovysychání působí na prvek v čase t_{00} , což je doba mezi betonáží a dobou počátku ošetřování.



Obr. 6.29: Vizualizace adaptace parametru r_h pro výpočet účinků ošetřování.

Na základě vypočtené vlhkosti v betonu v čase začátku ošetřování je určen gradient vlhkosti, na kterém je následně přímo závislá hodnota přetvoření od bobtnání v průběhu ošetřování. Model B4 definuje veličinu $S(t)$, která popisuje pro daný časový okamžik a vypočtenou hodnotu poločasu smršťování od vysychání τ_{sh} , poměr konečného smršťování od vysychání, které už proběhlo. Definujme tedy veličinu

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



$S_{cur}(t_0)$, která popisuje míru nevratného přetvoření při ošetřování na základě upravené doby ošetřování t_0 (včetně zahrnutí vlivu součinitelů β_{Th} a β_{RH}) a poločasu smršťování vysycháním τ_{sh} , jehož hodnota je závislá na složení směsi a materiálových konstantách (úplný výpočet uveden dle modelu B4 viz. Příloha 2 – Celkový modifikovaný model B4).

$$S_{cur}(t_0) = \tanh\left(\left(\frac{t_0}{\tau_{sh}}\right)^{0,5}\right) \quad (6.14)$$

Jelikož ve výpočtu parametru r_h (dle vztahů (6.7) a (6.8) uvedených v kapitole 6.4) vycházíme z předpokladu, že bobtnání od ošetřování, již je uvažováno pouze ve formě nevratné části smršťování vysycháním a míra dodatečné difúze vodní páry z betonu je již redukována, můžeme redukovat zbývající hodnotu konečného smršťování od vysychání, kde ε_{sh} je hodnota smršťování vysycháním definována na v původním modelu B4. Označme jako ε'_{sh} redukovanou hodnotu smršťování vysycháním, která proběhne mezi dobou ukončení ošetřování a sledovaným okamžikem t .

$$\varepsilon'_{sh}(t) = (1 - S_{cur}(t_0)) * \varepsilon_{sh}(t) \quad \text{pro } t > t_0 \quad (6.15)$$

Pro určení celkové hodnoty přetvoření od bobtnání při ošetřování a vysychání v daném čase větším, než je doba ošetřování t_0 , pak můžeme pouze sečíst nevratné přetvoření při ošetřování $\varepsilon_{sh,cur}$ a zbývající přetvoření smršťování vysycháním $\varepsilon'_{sh}(t)$.

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh,cur} + \varepsilon'_{sh}(t) \quad \text{pro } t > t_0 \quad (6.16)$$

Tento přístup zahrnuje pozorovaný trend, že zejména při ošetřování zvýšenou teplotou se téměř veškeré smršťování odehraje v čase ošetřování a po ukončení ošetřování je již beton zralý a rychlost smršťování vysycháním se již realizuje pouze v té míře, jak by teoreticky narůstala hodnota přetvoření na neošetřovaném vzorku od doby efektivního stáří betonu po ošetřování (pro ošetřované prvky se zohledněním násobitelů β_{Th} a β_{RH}).

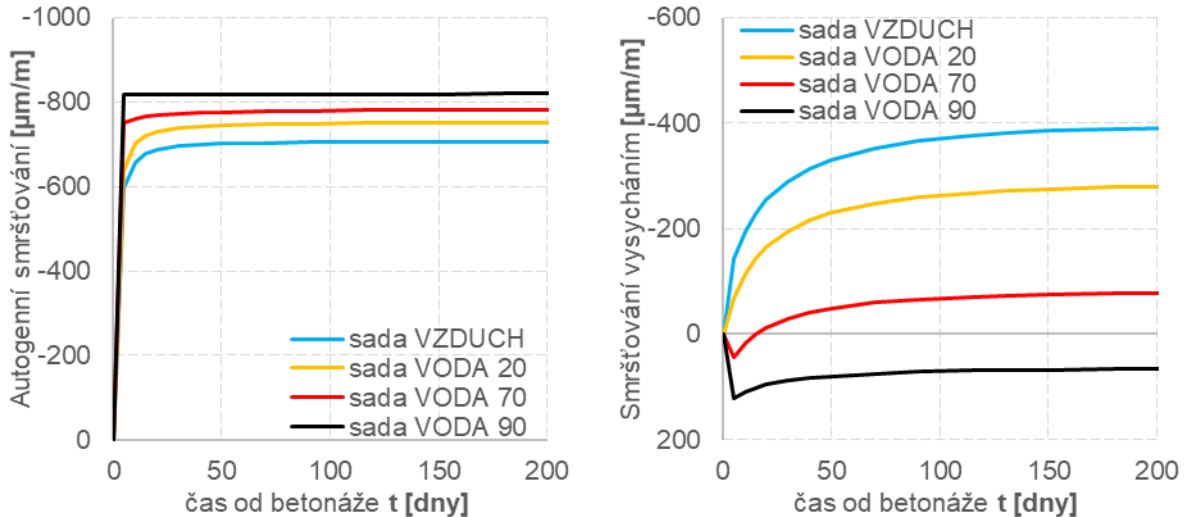
Předpoklady modifikace modelu B4 popsané výše je možné ověřit zejména na vlastních experimentálních měřeních, kdy bylo měřeno celkové poměrné přetvoření od smršťování na jinak nezátížených vzorcích. Výsledky tohoto měření jsou zobrazeny dále v kapitole 6.8.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Na základě predikce autogenního smršťování, které bylo popsáno v předchozích kapitolách, můžeme rozdělit celkové poměrné přetvoření od smršťování na autogenní složku a složku smršťování při bobtnání a vysychání. Průběh jednotlivých oddělených složek v čas po betonáži je patrný na Obr. 6.30:



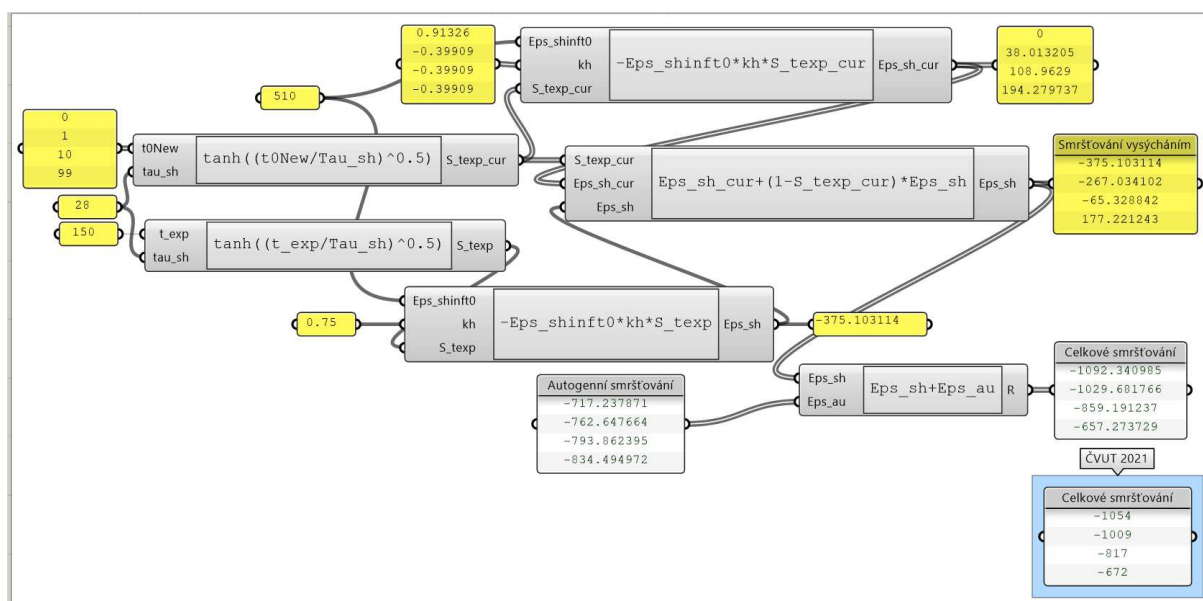
Obr. 6.30: Rozdělení celkového smršťování na autogenní složku a složku od vysychání.

Zjednodušené schéma výpočtu celkového přetvoření od smršťování je pro experimentálně zjištěná data uveden na schématu (Obr. 6.31) níže. Na schématu byly některé vstupní hodnoty zjednodušeny pro čitelnost schématu; celkový nezjednodušený model je uveden jako Příloha 2 – Celkový modifikovaný model B4). Upravený model B4 vykazuje dobrou shodu s měřenými daty.

Další studie použité pro kalibraci modelu B4 z předchozích kapitol nelze přímo použít, protože vzorky bobtnaly méně kvůli ošetřování parou a byly dále uloženy v prostředí o relativně vysoké vzdušné vlhkosti, a tedy ani výrazně nebobtnaly a ani následně výrazně nevysychaly. Odvozené vztahy jsou však použitelné i pro naměřené hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování, které uvádí Graybeal (2006)^[15], i když efekt není významný.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Obr. 6.31: Schéma výpočtu celkového přetvoření od bobtnání a vysychání pro prvky Vzduch, Voda 20, Voda 70 a Voda 90.

6.7 Empirické součinitele příměsí

6.7.1 Posouzení původních sad součinitelů

Různé směsi UHPC vykazují velmi rozdílné rychlosti náběhu autogenního smršťování při ošetřování zvýšenou teplotou. Například v dostupné studii (Flietstra, 2012)^[19] je náběh pozvolný, ale dle Graybeala (2006)^[15] a vlastního 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 predikci přetvoření od dotvarování 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. Pro predikci přetvoření od smršťování model uvažuje i s kombinovaným účinkem superplastifikátoru a mikrosiliky (součinitele uvedeny viz. Tabulka 6.4), avšak reálně použité množství mikrosiliky téměř 4x překračuje hodnotu poslední hraniční hodnoty při použití superplastifikátoru zároveň s mikrosilikou. Při použití příměsí pro redukci autogenního smršťování (jak bylo uvedeno v kapitole 3.2.2) nelze nalézt odpovídající sadu součinitelů příměsí a je nutné ji pro danou směs získat kalibrací na základě naměřených hodnot přetvoření.

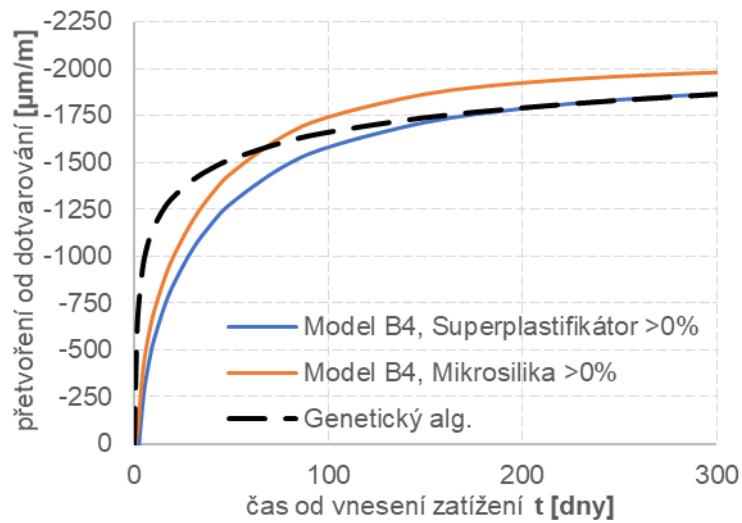
Relevantní sady součinitelů pro dotvarování UHPC jsou uvedeny níže (Tabulka 6.3). Při porovnání rozdílu mezi těmito dvěma sadami součinitelů je patrná pouze malá odchylka. Použití mikrosiliky zvyšuje jak celkovou míru dotvarování, tak i jeho nárůst v počátečních 50 dnech po zatížení. Na Obr. 6.32 níže je patrné srovnání těchto sad a pro porovnání je doplněna i sada zjištěná genetickým algoritmem, která nejlépe odpovídá naměřeným datům. Způsob zjištění této sady parametrů bude vysvětlen v následující kapitole.

Tabulka 6.3: Vliv příměsí na dotvarování. (Bažant, 2015)^[12]

Třída použité příměsí (% z c)	$\times p_2$	$\times p_3$	$\times p_4$	$\times p_5$
Superplastifikátor (≥ 0 %)	0,72	2,19	1,72	0,48
Mikrosilika (≥ 0 %)	1,12	3,11	0,51	0,61

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou



Obr. 6.32: Porovnání účinků příměsí na přetvoření od dotvarování a porovnání s použitými součiniteli, která mají konzistentní průběh s měřenými daty vlastního experimentu.

Z porovnání je zároveň patrné, že kromě výrazně rychlejšího nárůstu přetvoření od dotvarování v prvních 20 dnech po zatížení se finální hodnoty přetvoření příliš neliší. Zejména součinitele příměsí z první uvedené sady (použití superplastifikátoru) mají od doby 200 dnů po zatížení téměř identický průběh s extrapolovanou křivkou součinitelů zjištěných pro zkoušenou směs UHPC. Pro dlouhodobé hodnoty přetvoření od dotvarování lze tedy použít sadu součinitelů příměsí s obsahem superplastifikátoru.

Pro smršťování je dostupných více sad součinitelů příměsí, jak je uvedeno v tabulce níže (Tabulka 6.4). Některé součinitele popisují současný vliv superplastifikátoru a mikrosiliky.

Dalším faktorem, který není v dostupných součinitelích příměsí zohledněn a který byl představen v kapitole 3 je účinek příměsí redukujících smršťování označených jako SRA („*shrinkage-reducing admixture*“). Tyto příměsi jsou nejčastěji na polymerní bázi (polyetheru, polyolu a dalších), jejichž účinkem se zabývají některé nedávné studie (Zuo, 2017 nebo Androuët, 2021)^{[17],[18]}. Androuët (2021)^[18] například uvádí redukci přetvoření od autogenního smršťování až 63 % při použití tekuté příměsi na bázi polyolu. Účinek těchto příměsí vyžaduje kalibraci modelu B4 pro konkrétní směs úpravou (redukci) zejména parametru $\times \epsilon_{au}$, neboť tento parametr ovlivňuje lineárně hodnotu konečného přetvoření od autogenního smršťování. Tato úprava modelu B4 je však velmi jednoduchá a model je připraven na rozšíření své platnosti i na směsi obsahující příměsi redukující projevy smršťování.

Kapitola 6

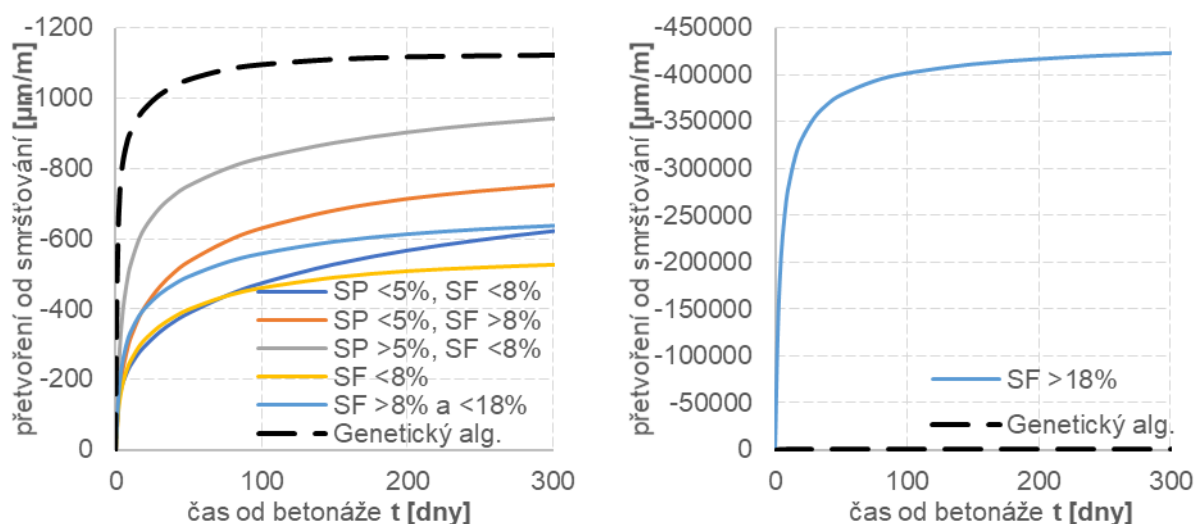
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Tabulka 6.4: Vliv příměsí na smršťování. (Bažant, 2015)^[12]

Třída použité příměsí (% z c)	$\times \tau_{cem}$	$\times \epsilon_{au}$	$\times r_{ew}$	$\times r_{\alpha}$
Superplastifikátor (≤ 5 %), Mikrosilika (≤ 8 %)	6,00	2,80	0,29	0,21
Superplastifikátor (≤ 5 %), Mikrosilika (≥ 8 %)	3,00	0,96	0,26	0,71
Superplastifikátor (≥ 5 %), Mikrosilika (≤ 8 %)	8,00	1,95	0,00	1,00
Mikrosilika (≤ 8 %)	1,90	0,47	0,00	1,20
Mikrosilika (> 8 %, ≤ 18 %)	2,60	0,82	0,00	1,20
Mikrosilika (> 18 %)	1,00	1,50	5,00	1,00

Při porovnání rozdílu mezi těmito sadami součinitelů na Obr. 6.33 je patrný výrazný nesoulad a největší řádovou odchylku vykazuje sada při obsahu mikrosiliky 18 % a více.



Obr. 6.33: **Vlevo:** Porovnání účinků sad součinitelů příměsí na přetvoření od smršťování a porovnání s použitými součiniteli, která mají konzistentní průběh s měřenými daty vlastního experimentu. **Vpravo:** datová řada pro příměsí s použitím více jak 18 % mikrosiliky

Z porovnání je patrné, že množství použité mikrosiliky má zejména vliv na rychlost nárůstu smršťování. Toto je zajištěno nízkou hodnotou parametru $\times \tau_{cem}$, který lineárně ovlivňuje vypočtený čas poločasu smršťování. U betonu běžné třídy může být tento poločas až 100 a více dní po betonáži, avšak v případě UHPC je pravděpodobné, že většina smršťování proběhne v prvních 2 dnech po betonáži, jak potvrzují experimentální výsledky uvedené v předchozí kapitole i měření v dalších studiích (Graybeal, 2006)^[15]. Pro UHPC je tedy očekávaná hodnota součinitele poločasu autogenního smršťování $\times \tau_{cem} < 1$.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Další součinitele upravují absolutní hodnotu celkového přetvoření od smršťování zvýšením či snížením vlivu vodního součinitele nebo množství plniva. Zejména problematická je sada při použití více jak 18 % mikrosiliky zobrazená na Obr. 6.33 vpravo. Tato sada definuje součinitel $\times r_{ew} = 5$, přičemž tento součinitel působí ve vztahu výpočtu konečného autogenního smršťování jako exponent ve členu vlivu vodního součinitele ve vztahu (6.17) uvedeném v modelu B4 (Bažant, 2015)^[12]:

$$\epsilon_{au\infty} = -\epsilon_{au,cem} \cdot \left(\frac{a/c}{6}\right)^{r_{ea}} \cdot \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{r_{ew} \times r_{ew}} \quad (6.17)$$

Jelikož je součinitel $r_{ew} = -3,5$, pak člen vztahu výpočtu konečného autogenního smršťování zohledňující vliv vodního součinitele bude mít hodnotu $(0,255/0,38)^{-3,5 \times 5} = 1075$, tedy součinitel $\times r_{ew}$ více jak 1000x zvýší konečnou hodnotu od autogenního smršťování v porovnání se sadou součinitelů příměsí pro množství mikrosiliky mezi 8–18 %, kdy je součinitel $\times r_{ew} = 0$. Celkový efekt je redukován dalšími součiniteli, avšak predikovaná hodnota je přibližně 400x větší pro směs obsahující například 20 % mikrosiliky ve srovnání směsi s 16 % mikrosiliky. Při porovnání mezi levou a pravou částí Obr. 6.33 je však patrné, že rychlost náběhu přetvoření od sady s množstvím mikrosiliky více než 18 % je velmi podobný naměřeným hodnotám, ale aby bylo dosaženo shody, je nutné velmi výrazně redukovat použitý součinitel $\times r_{ew}$.

Nejlepší shodu z dostupných sad příměsí pro dlouhodobou predikcí smršťování mají součinitele sady pro množství superplastifikátoru > 5 % (zkoušená směs má 5,7 %) a současného použití mikrosiliky < 8 % (mikrosiliky má zkoušená směs však 14,3 %). Použití této sady podhodnocuje naměřená data v době 1 rok po betonáži o přibližně 20 % a zároveň nepredikuje výrazný nárůst přetvoření v prvních několika dnech po betonáži.

Nespojitý charakter součinitelů příměsí při použití superplastifikátoru a velkého množství mikrosiliky je problematický pro plošné použití modelu bez nutnosti jeho kalibrace pro použitou recepturu právě za pomoci součinitelů příměsí. Tento nedostatek by bylo možné odstranit parametrickou experimentální studií vlivu příměsí a jejich kombinací na chování UHPC nebo alternativně je možné pro konkrétní zkoumanou směs provést i relativně krátkodobé měření smršťování a dotvarování na neošetřovaném vzorku (po dobu například 56 dnů) pro provedení kalibrace modelu B4

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



tak, aby pro tuto směs byla predikce co možná nejpřesnější. Tento krok je nezbytný zejména, pokud je ve směsi použito inovativních nebo dalších příměsí se specifickým účinkem na směs UHPC, například složky sloužící k vnitřnímu ošetřování betonu nebo příměsí redukující projevy smršťování. Další úpravy modelu B4 popsané v předchozích kapitolách zajistí, že i když pro kalibraci nebudou měřeny ošetřované vzorky, tak i přesto bude možné modelem B4 účinek ošetřování predikovat.

Kapitola 6

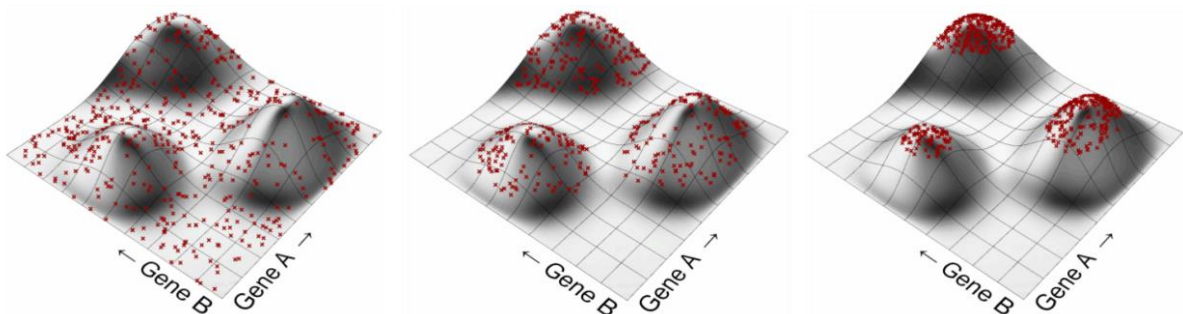
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



6.7.2 Součinitele příměsí zjištěné genetickým algoritmem

Jak bylo uvedeno v předchozí kapitole, pro kalibraci modelu (zjištění hodnot součinitelů příměsí) na sady naměřených dat byl použit genetický algoritmus. Pro kalibraci modelu B4 hledáme hodnotu celkem 8 součinitelů příměsí, které mohou být v rozmezí 0–6. Pokud bychom hledali řešení „silou“ s přesností na 1 desetinné místo, jedná se o 60^8 , neboli $1,7 \cdot 10^{14}$, možných řešení. Pokud bychom chtěli vyzkoušet každou kombinaci, tak i s dobou běhu výpočtu pouhých 10 ms by bylo potřeba přes 50000 let pro nalezení řešení, a tak je vhodnou možností použití genetického algoritmu pro kalibraci modelu B4.

Genetický algoritmus se výborně hodí pro řešení vícedimenzionálních problémů, tedy, pokud je výsledek, v našem případě rozdíl mezi naměřenými hodnotami a hodnotami predikovanými modelem B4, závislý na více parametrech. Parametry ovlivňující výsledné hodnoty predikované modelem B4 jsou součinitele příměsí, jejichž efekt není možné stanovit analyticky, a přesto je možné nalézt takovou konfiguraci parametrů, která bude mít nejmenší odchylku od naměřených hodnot. Genetický algoritmus může nalézt velmi rychle řešení pro problém vysoké complexity, který je neřešitelný analyticky metodami. Hledání řešení „silou“ zkoušením použití náhodných vstupů pro hledání minima problém v realistickém čase není možné použít vzhledem k časové náročnosti. Princip genetického algoritmu je zachycen na následujícím Obr. 6.34 pro řešení dvoudimenzionálního problému.



Obr. 6.34: Princip genetického algoritmu ve 3 krocích: Náhodná populace, Propagace genomů s nejlepšími vlastnostmi, Vizualizace konvergence k optimálnímu řešení. (Rutten, 2010)^[55].

Genetický algoritmus získává řešení porovnáváním „genomu“ jednotlivých možných řešení. Genom představuje sadu možných hodnot vstupních proměnných. Nejdříve jsou vygenerována náhodná řešení a jsou pro další „generace“ uchována

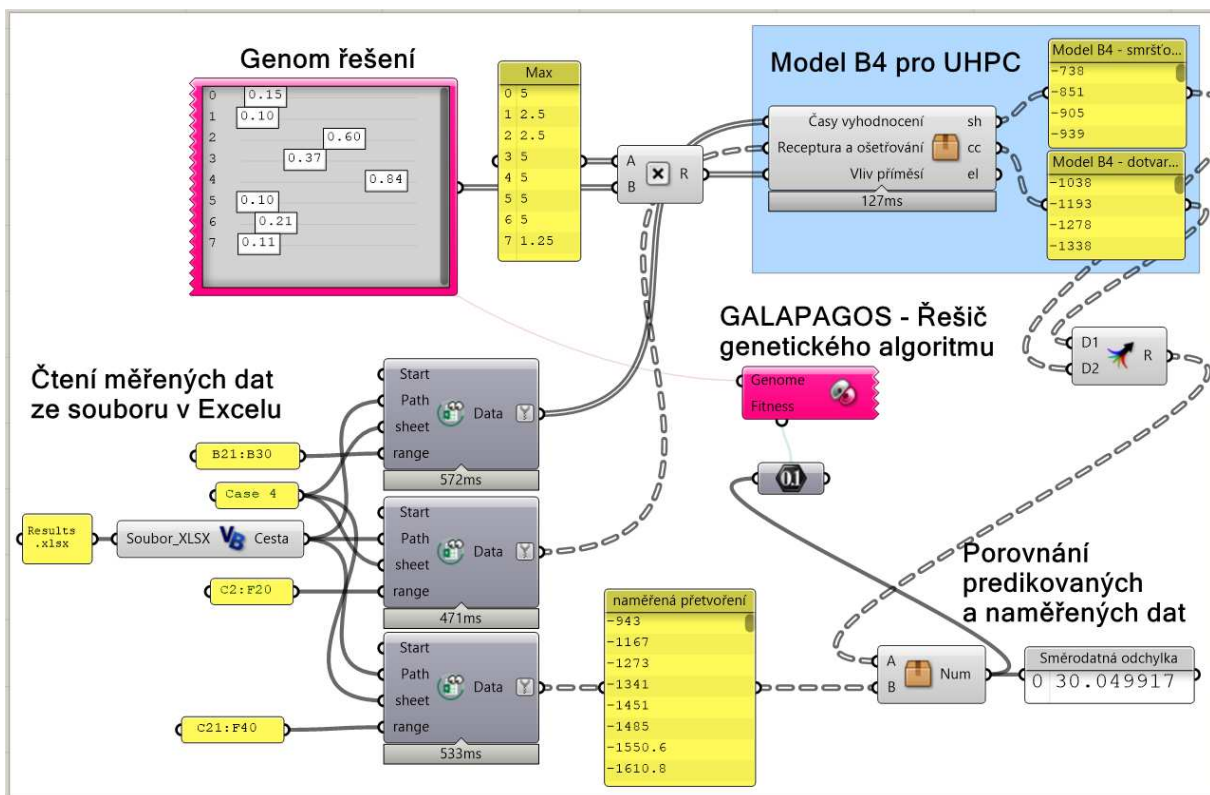
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



pouze ta řešení, která mají nejsilnější genom, tedy řešení, jejichž výsledek se nejvíce blíží v našem případě minimu výsledné hodnoty. V okolí těchto řešení a také kombinací silných genomů vytváří genetický algoritmus nové genomy v jednotlivých generacích (iteracích) a řešení konverguje k lokálním či globálním extrémům řešení.

Pro účely této práce byl vytvořen program na platformě komerčního software Rhinoceros 7 a jeho doplňku Grasshopper (grafické programování) a na Obr. 6.35 níže je zobrazen základní pohled na program. Program je volně dostupný on-line a jeho použití je vázáno pouze na komerční software Rhinoceros 7.



Obr. 6.35: Schéma výpočtu součinitelů příměsí pomocí genetického algoritmu.

Program má několik základních částí, které jsou na Obr. 6.35 od sebe graficky oddělené:

- Čtení dat z formátu MS Excelu (*.xlsx). Příklady použité pro kalibraci modelu v této práci jsou dostupné jako součást staženého programu. Vstupní data lze zadat i přímo do komponenty vyhodnocující model B4. Návod k použití programu a odkaz ke stažení je uveden v příloze této práce (Příloha 1 – Manuál k programu „B4 for UHPC“).

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



- Vyhodnocení modelu B4 na základě vstupních hodnot směsi, empirických konstant modelu B4 a seznamu jednotlivých časů, kdy je dotvarování a smršťování vyhodnoceno. Na obrázku je model B4 reprezentován jedinou komponentou (programem), viz. Příloha 2 – Celkový modifikovaný model B4.
- Definice genomu řešení a jeho napojení na řešič genetického algoritmu Galapagos, jehož autorem je Rutten (2010)^[55]. Řešič je kromě samotného genomu součinitelů příměsí napojen na i hodnotu směrodatné odchylky mezi měřenými hodnotami a hodnotami vypočtenými upraveným modelem B4. Řešič je nastaven tak, aby minimalizoval hodnotu odchylky.

Po spuštění programu řešení zpravidla konverguje do několika minut a díky charakteru součinitelů, které jsou většinou exponenty v modelu B4, jsou velmi rychle nalezena řešení, která vedou buď na příliš velkou nebo příliš malou hodnotu přetvoření a tyto jsou eliminovány hned v prvních iteracích. Program byl použit na kalibraci modelu B4 pro 4 různé sady dostupných měření a receptur UHPC (Graybeal, 2006, Francisco, 2012, hodnoty naměřené Kloknerovým ústavem ČVUT 2010 a výsledky vlastních měření 2020)^{[15],[16]}. Získané hodnoty empirických součinitelů příměsí jsou uvedeny níže pro smršťování (Tabulka 6.5) a pro dotvarování (Tabulka 6.6).

Tabulka 6.5: Součinitele vlivu příměsí na smršťování zjištěné genetickým algoritmem.

Referenční měření dle:	$\times \tau_{cem}$	$\times \epsilon_{au}$	$\times r_{ew}$	$\times r_{\alpha}$
Graybeal 2006 ^[15]	0,11	0,73	0,88	0,8
Francisco 2012 ^[16]	10	0,45	1,0	0,35
Kloknerův ústav 2010	0,33	0,65	0,33	1,05
Vlastní experiment ČVUT 2020	0,75	0,58	0,88	1,85

Tabulka 6.6: Součinitele vlivu příměsí na dotvarování zjištěné gen. algoritmem.

Referenční měření dle:	$\times p_2$	$\times p_3$	$\times p_4$	$\times p_5$
Graybeal 2006 ^[15]	1,45	1,5	1,25	0,13
Francisco 2012 ^[16]	0,95	2,8	1,25	0,15
Kloknerův ústav 2010	2,05	4,35	1,7	0
Vlastní experiment ČVUT 2020	4,2	0,5	1,05	0,14

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování zvýšenou teplotou

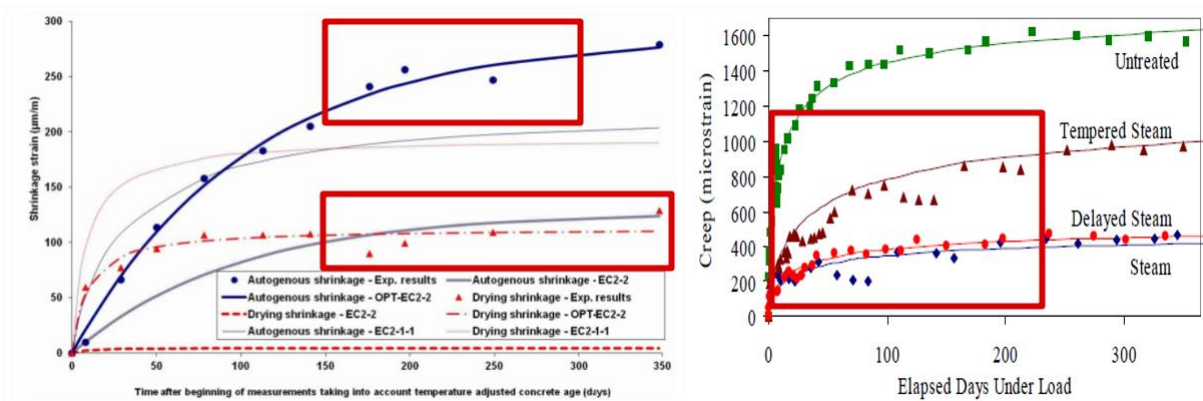


Pro ověření, že upravený model B4 dostatečně přesně popisuje nárůst přetvoření od smršťování a dotvarování, uvádíme i výsledné dosažení hodnoty směrodatné odchylky jednotlivých sad měření v tabulce níže (Tabulka 6.7).

Tabulka 6.7: Směrodatná odchylka měření (absolutní a relativní) a predikce hodnot smršťování a dotvarování za použití součinitelů zjištěných genetickým algoritmem.

Referenční měření dle:	Sm. odchylka [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Sm. odchylka [-]
Graybeal 2006 ^[15]	24,9	3,9 %
Francisco 2012 ^[16]	29,9	5,5 %
Kloknerův ústav 2010	22,8	3,5 %
Vlastní experiment ČVUT 2020	29,9	3,5 %

Hodnoty směrodatné odchylky jsou přepočteny na relativní odchylku vydělením směrodatné odchylky průměrnou hodnotou poměřeného přetvoření, a tyto hodnoty jsou pro lepší představu o přesnosti predikovaných hodnot také uvedeny v tabulce. Je nutné podotknout, že dosažená odchylka do 6 % je srovnatelná s přesností měření uvedených v některých použitých studiích (Graybeal, 2006 a Francisco, 2012)^{[15],[16]}, kde je u naměřených dat patrná znatelná nejistota měření, viz Obr. 6.36.

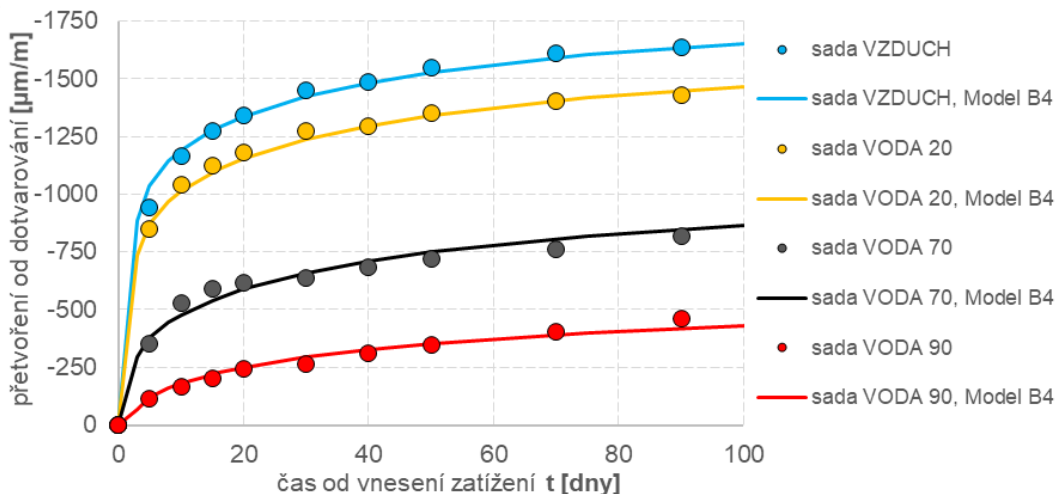


Obr. 6.36: Zobrazené měřené hodnoty a regresní (hladká) funkce, která indikuje omezenou přesnost jednotlivých měřených bodů studií (**Vlevo:** Francisco, 2012^[16]; **Vpravo:** Graybeal, 2006^[15])

6.8 Porovnání modelu B4 s vlastním experimentem

Na základě všech úprav modelu B4 vysvětlených v předchozích kapitolách můžeme porovnat přesnost model B4 vzhledem k naměřeným datům. Tyto data jsou nafitována za použití genetického algoritmu uvedeného v předchozí kapitole.

Hodnoty predikovaného přetvoření vzorků jsou dále dopočteny dle navržených modifikací modelu B4 a na obrázcích Obr. 6.37 a Obr. 6.39, na kterých je možné porovnat naměřené a predikované hodnoty přetvoření od smršťování a dotvarování. Je patrné, že adaptovaný model B4 vykazuje velmi dobrou shodu se všemi naměřenými sadami, zejména při predikci přetvoření od dotvarování. Při porovnání s neošetřovanými vzorky popisuje modifikovaný model B4 změnu přetvoření v důsledku ošetřování jak vodou při pokojové teplotě (vzorky „VODA 20“), tak i vzorky ošetřované zvýšenou teplotou „VODA 70“ a „VODA 90“ ve vodním prostředí.

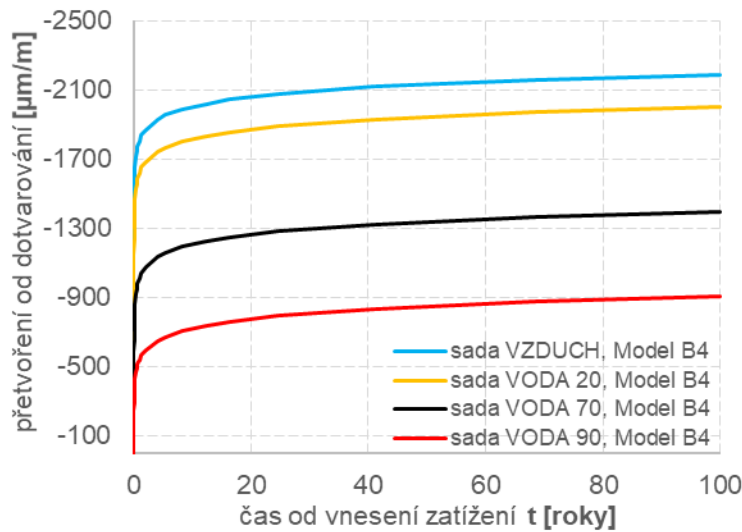


Obr. 6.37: **Vyhodnocení vlastního experimentu** – Zobrazené měřené hodnoty přetvoření od dotvarování a porovnání s modifikovaným modelem B4.

Přetvoření od dotvarování je v čase 100 dnů a ošetřované vzorky „VODA 90“ výrazně redukována při srovnání s neošetřovaným vzorkem (až o 70 %). Z hlediska navrhování konstrukcí z UHPC je níže na Obr. 6.38 uveden i extrapolovaný nárůst přetvoření od dotvarování až do 100 let. Hodnota 90 % konečné deformace od dotvarování proběhla u všech vzorků v čase mezi 15-25 let od zatížení.

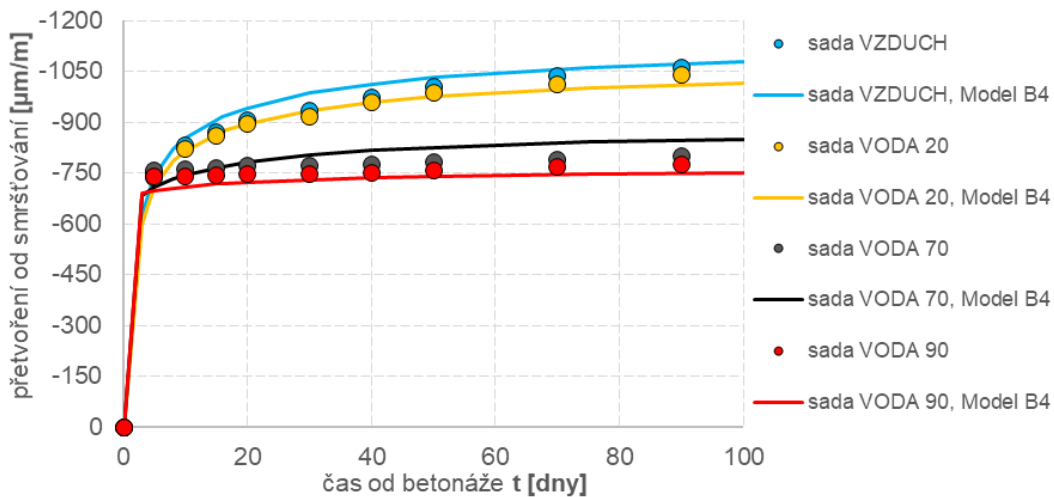
Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Obr. 6.38: Extrapolované hodnoty přetvoření od dotvarování predikované modifikovaným modelem B4 až do doby 100 let.

V případě hodnot přetvoření od smršťování se jedná o součet složek autogenního smršťování a smršťování od vysychání. Modifikovaný model B4 predikuje mírně nižší hodnotu celkového smršťování vzorků ošetřovaných ve vodě při pokojové teplotě („VODA 20“) oproti vzorkům neošetřovaným. Tato predikce je v souladu s měřenými hodnotami přetvoření.

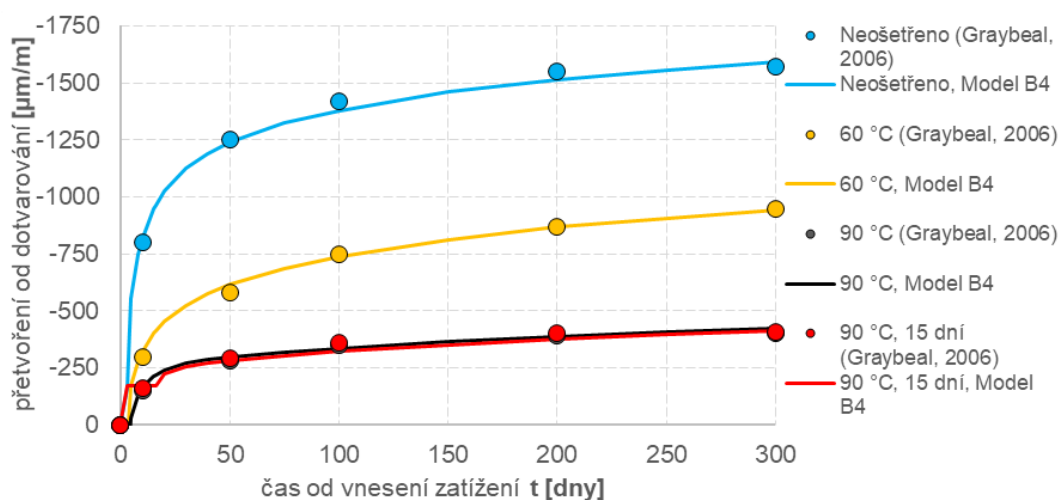


Obr. 6.39: **Vyhodnocení vlastního experimentu** – Zobrazené měřené hodnoty přetvoření od smršťování a porovnání s modifikovaným modelem B4.

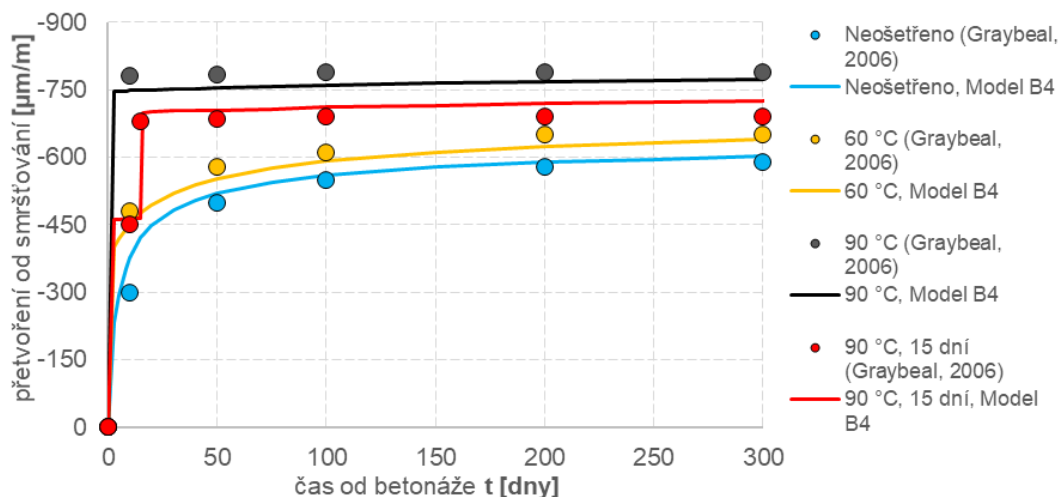
6.9 Porovnání modelu B4 s dostupnými studii

V této kapitole jsou uvedeny a porovnány měřené výsledky a predikce přetvoření na dalších sadách experimentů, které byly použity pro kalibraci modelu B4. Jedná se o experimentální studie:

- Graybeal 2006 (Obr. 6.40 a Obr. 6.41)^[15]
- Kloknerův ústav 2010 (Obr. 6.42)
- Francisco 2012 (Obr. 6.43)^[16]



Obr. 6.40: Zobrazené měřené a vypočtené hodnoty a přetvoření od dotvarování (Graybeal, 2006)^[15] a porovnání s modifikovaným modelem B4.



Obr. 6.41: Zobrazené měřené a vypočtené hodnoty a přetvoření od smršťování (Graybeal, 2006)^[15] a porovnání s modifikovaným modelem B4.

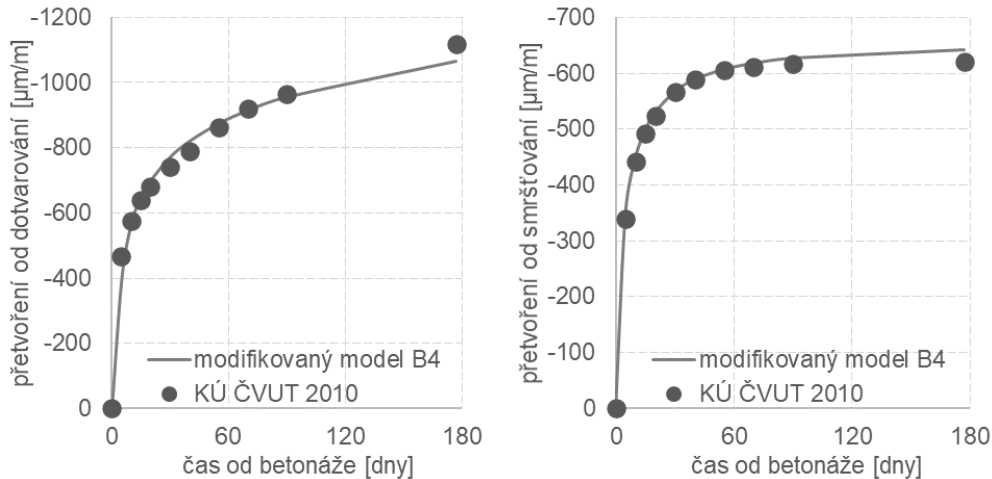
Při porovnání hodnot přetvoření na Obr. 6.41 je možné si povšimnout, že adaptovaný model B4 vykazuje dobrou shodu i se sadou ošetřovaných vzorků, jejichž

Kapitola 6

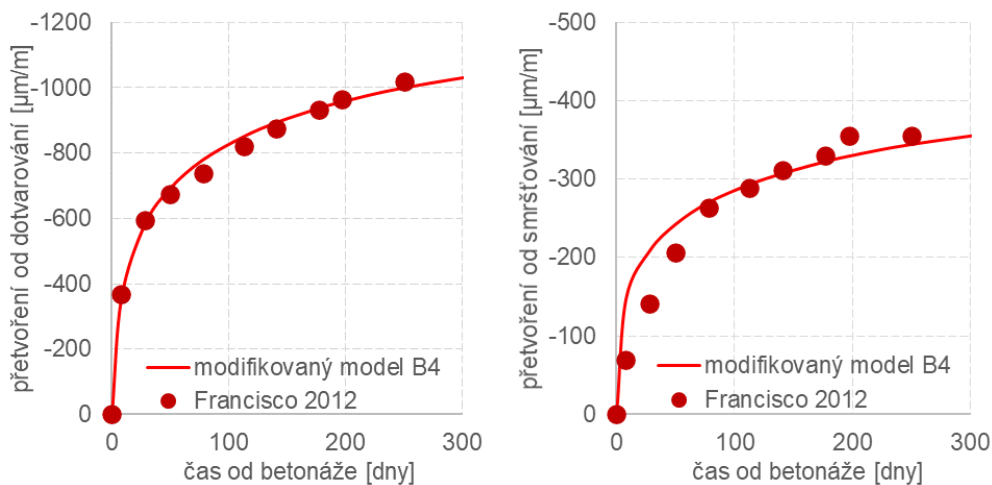
Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



ošetřování za zvýšené teploty bylo započato až po 15 dnech po betonáži. Na neměřených i predikovaných datech je patrné, že došlo k nižšímu autogennímu smršťování těchto vzorků, čemuž odpovídá i jejich nižší pevnost. Toto pozorování potvrzuje důležitost začátku ošetřování co možná nejdříve po betonáži.



Obr. 6.42: **Vzorky neošetřované** – Zobrazené měřené a vypočtené hodnoty a přetvoření od smršťování a dotvarování (Kloknerův ústav, 2010).



Obr. 6.43: **Vzorky ošetřované parou 62 °C** – Zobrazené měřené a vypočtené hodnoty a přetvoření od smršťování a dotvarování (Francisco, 2012)^[16].

Výsledky porovnání s dostupnými studii ukazují velmi dobrou shodu s modifikovaným modelem B4. Možné další zpřesnění modelu B4 je indikováno na Obr. 6.43 porovnáním náběhu smršťování ve studii (Francisco, 2012)^[16]. Z porovnání je patrný nesoulad v rychlosti nárůstu přetvoření od autogenního smršťování v prvních 50 dnech po betonáži – tento úkaz není ojedinělý, i další studie (Burkart, 2008)^[14] ukazuje postupný náběh přetvoření od autogenního smršťování pro neošetřované

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



vzorky. Není úplně zřejmé, čím je toto zpomalení způsobeno; model B4 umožňuje ve výpočtu použití i cementu s pomalým nárůstem pevnosti, ale použití jiného cementu, než R v modelu B4 je pro výpočet UHPC problematické, jak bude ukázáno v následující kapitole.

Pro kalibraci výsledků (Francisco, 2012)^[16] může být rychlost nárůstu přetvoření od autogenního smršťování řízena parametrem r_t , který má na rychlost náběhu přetvoření přímý vliv.

6.10 Diskuse k modelu B4

Model B4 byl v předchozích kapitolách kalibrován na měřená data přetvoření smršťování a dotvarování UHPC, ale přes dobrý soulad modelu s experimenty, jsou některé oblasti v definici modelu B4, které mohou být pro některé směsi a situace omezující či mohou vést k nepřesné predikci. Modifikací byly rozšířeny u modelu B4 následující podmínky využití, které vycházejí z charakteristik směsí UHPC publikovaných ve studiích, které byly pro kalibraci modelu použity. Jedná se o:

- **Pevnost betonu** (do 200 MPa)
- **Teplota při ošetřování** (do 100 °C), ošetřování ve vodě, či v páře při vysoké relativní vlhkosti (některé studie uvádějí účinek teplot nad 200 °C (Heinz, 2004)^[27], ale pro predikci smršťování a dotvarování není dostatek dat). Ošetřování je uvažováno, že začíná v čase hned po odbednění.
- **Vodní součinitel** (od 0,10), vodní součinitel může být libovolně nízký, neboť modifikovaný model uvažuje jako množství cementu jen takové množství, které odpovídá plné hydrataci veškeré záměsové vody
- **Vnitřní ošetřování** (například Du, 2021)^[34] není přímo podporováno modelem B4, ale absorpční příměsi mohou být zohledněny pomocí součinitelů příměsí.

Další stávající omezení jsou uvedena níže. Jedná se zejména o typ cementu a výpočet dotvarování při vysychání.

Model B4 je definován pro 3 základní typy cementu R – normální, RS – cement s rychlým nárůstem pevnosti a SL – cement s pomalým nárůstem pevnosti. Označení klasifikace typu cementu odpovídá Model code 2010. Každý z těchto typů cementů má jinou reaktivitu, ale jak již bylo ukázáno dříve, směs UHPC se může chovat zároveň jako kdyby byl použit cement RS tak i cement SL. Tento fakt je možné odvodit z nárůstu pevnosti UHPC – vzhledem k nadbytku hydraulicky aktivních složek ve směsi dochází k rychlé reakci, která by odpovídala cementu RS. Po dosažení 28denní pevnosti však pevnost dále roste vyšším tempem, než by bylo očekáváno pro typ RS a následný nárůst pevnosti odpovídá použití cementu typu SL.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Adaptace a kalibrace modelu byla v předchozích kapitolách provedena pro cement typu R a predikce bylo kalibrována pouze za pomoci součinitelů příměsí. V modelu B4 pro cementy typu RS a SL zůstává problematické vyhodnocení autogenního smršťování, neboť použití jiného cementu v modelu, než je typ R, vede k velmi odlišným výsledkům. Z modelu B4 mimo jiné vychází, že pro cement SL nedochází k autogennímu smršťování, jak je patrné ze vztahu (6.19), který byl převzatý z modelu B4 (Bažant, 2015, vztah 24 a 25)^[12]. I když se UHPC některými svými vlastnostmi blíží chování cementu typu SL, absence autogenního smršťování není pozorována v žádné dostupné studii. Aktuální hodnota přetvoření od autogenního smršťování $\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ v čase \tilde{t} je vyjádřena vztahem (6.18) a je přímo závislá na hodnotě konečného přetvoření od autogenního smršťování $\varepsilon_{au\infty}$, který je vyjádřen vztahem (6.19).

$$\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0) = \varepsilon_{au\infty} \left[1 + \left(\frac{\tau_{au}}{\tilde{t} + \tilde{t}_0} \right)^\alpha \right]^{r_t} \quad (6.18)$$

$$\varepsilon_{au\infty} = -\varepsilon_{au,cem} \left(\frac{a/c}{6} \right)^{r_{\varepsilon a}} \left(\frac{w/c}{0,38} \right)^{r_{\varepsilon w}} \quad (6.19)$$

Jelikož jsou parametry $r_{\varepsilon a}$ a $r_{\varepsilon w}$ ve vztahu (6.19) konstantní pro jakýkoliv druh cementu, pak je výpočet konečné hodnoty autogenního smršťování $\varepsilon_{au\infty}$ přímo závislý na parametru $\varepsilon_{au,cem}$, jehož hodnota je pro různé typy cementu uvedena v modelu B4 (Bažant, 2015, tabulka 2)^[12]:

- cement R $\varepsilon_{au,cem} = 210 \cdot 10^{-6}$,
- cement RS $\varepsilon_{au,cem} = -84 \cdot 10^{-6}$,
- cement SL $\varepsilon_{au,cem} = 0 \cdot 10^{-6}$.

Z hodnot parametru $\varepsilon_{au,cem}$ je patrné, že použití cementu SL způsobí, že hodnota autogenního smršťování $\varepsilon_{au}(\tilde{t}, \tilde{t}_0)$ bude v jakémkoliv čase nulová. Podobně problematické je, že pro cement typu RS má parametr $\varepsilon_{au,cem}$ zápornou hodnotu, přičemž pro cement typu R je hodnota kladná.

Dalším sporným bodem, který může vyžadovat další kalibraci je funkce popisující poddajnost od dotvarování při vysychání. Ve vztahu výpočtu parametru q_5 je použita hodnota konečného smršťování od vysychání umocněná na -0,85. Tento exponent definuje, že u prvků, které vysychají dle své receptury méně, mají vyšší poddajnost – tedy je i vyšší přetvoření od dotvarování. Jelikož jsme v předchozích kapitolách

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



identifikovali a popsali nevratné děje v UHPC v důsledku bobtnání, bylo by očekávatelné, že tyto prvky méně vysychají, a tedy i účinek dotvarování při vysychání by měl být nižší, ale model B4 predikuje opačný účinek, jak lze odvodit ze vztahu (6.20), který je převzat z modelu B4 (Bažant, 2015, vztah 43)^[12].

$$q_5 = \frac{p_5}{1 \text{ GPa}} \left(\frac{a/c}{6}\right)^{p_{5a}} \left(\frac{w/c}{0,38}\right)^{p_{5w}} |k_h \varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0)|^{p_{5\varepsilon}} \quad (6.20)$$

Dle modelu B4 (Bažant, 2015, tabulka 3)^[12] je hodnota $p_{5\varepsilon} = -0,85$ pro všechny druhy cementu. Člen k_h je pro různé typy ošetřování konstantní a člen $\varepsilon_{sh\infty}(\tilde{t}_0)$ je hodnota konečného přetvoření od smršťování vysycháním. Po umocnění absolutní hodnoty součinu těchto dvou členů na $-0,85$ získáme pro nižší hodnotu celkového smršťování vyšší hodnotu parametru q_5 , který má přímý vliv na hodnotu přetvoření od dotvarování. Jelikož model B4 lze extrapolovat pro UHPC i bez opravy tohoto výpočtu zejména proto, že smršťování vysycháním je opravdu velmi malé ve většině případů, a tedy i poddajnost od dotvarování při vysychání má tedy nízký efekt na celkové přetvoření od dotvarování.

Další problematickou použitelností modelu B4 při výpočtu dotvarování při smršťování je výpočet tahového dotvarování (Yanni, 2009)^[39], respektive dotvarování při odtížení. Celková poddajnost při dotvarování je dle modelu B4 (Bažant, 2015, vztah 27)^[12] definována jako součet 3 kladných členů: konstanty q_1 , členu základního dotvarování $R_T C_0(\hat{t}, \hat{t}')$ a členu dotvarování při vysychání $C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0)$.

$$J(\hat{t}, \hat{t}') = q_1 + R_T C_0(\hat{t}, \hat{t}') + C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0) \quad (6.21)$$

Při standardním způsobu zatěžování, se kterým model B4 uvažuje, se jedná výhradně o tlakové působení, zejména od předpětí, avšak díky vysoké pevnosti UHPC v tahu za ohybu 20–60 MPa je možné do procesu předpínání zařadit i vnesení velmi časného tahového napětí pro omezení dlouhodobého přetvoření. Model B4 však uvažuje poddajnost při vysychání $C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0)$ jako kladný člen, tedy při tlakovém zatížení účinek dotvarování při vysychání zvyšuje celkovou poddajnost, což je očekávané, avšak v případě tahového zatížení, kdy je prvek roztahován, člen $C_d(\hat{t}, \hat{t}', \tilde{t}_0)$ zvyšuje i tahovou poddajnost. Tedy tažený prvek se v důsledku vysychání ve výpočtu dále zvětšuje.

Kapitola 6

Adaptace modelu B4 pro použití na UHPC a ošetřování
zvýšenou teplotou



Model B4 může být dále modifikován tak, aby dokázal predikovat i situaci, kdy mezi dobou betonáže a dobou ošetřování uplynula definovaná doba. Tato úprava se zdá být poměrně komplexní, neboť je nutné do výpočtu autogenního smršťování zahrnout ještě přesněji transport vody do betonu, který již zraje mezi dobou odbednění do doby začátku ošetřování a přístup k tomuto případu je modelem B4 zjednodušený. Nejlepší shody je dosaženo, když jsou vzorky ošetřovány v co nejzazší době po betonáži.

7 Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci

7.1 Možnosti ošetřování při prefabrikaci

Experimentální výsledky uvedené v této práci prokazují pro UHPC pozitivní vliv ponoření vzorků do vodního prostředí, efekt je patrný zejména pro smršťování, kde podle jiných významných studií (Graybeal, 2006)^[15] pokud nebyly prvky ošetřovány ponořením do vodního prostředí, přetvoření od smršťování bylo tím vyšší, čím byla vyšší teplota při ošetřování a u těchto prvků docházelo k bobtnání velmi malou měrou, i když byly umístěny do prostředí s relativní vlhkostí blízké 100 %. Při ponoření do vodního prostředí je efekt opačný a významný, jak je popsáno v předchozí kapitole – ponoření do vody o teplotě 90 °C redukuje celkové přetvoření od smršťování až o 50 %.

Ošetřování zvýšenou teplotou je v praxi výhradně realizováno propařováním vzorků v utěsněném prostředí stanu nebo komory. Ošetřování ponořením do vody je spíše laboratorním způsobem, případně způsob ošetřování malých prvků, a v praxi není možné tento způsob použít pro velké předem předpjaté prvky (mostní nosníky a například stropní panely – ty je nutné ošetřovat zejména před vnesením předpětí na dlouhé dráze). Pro tyto prvky je však možné po částečném odbednění na předpínací dráze použít propařování jak za pomoci roztahovacích ošetřovacích stanů, případně vzorky překryté fólií propařovat přímo.

Ponoření do vodního prostředí je teoreticky realizovatelné pro prvky nepředpjaté nebo dodatečně předpjaté – z prostorově významných prvků například pro deskové prefabrikáty, mostní segmenty s omezenou výškou, segmenty lávek nebo nosníky s dodatečně předpjatými kabelem. Dle výsledků experimentu je realistické uvažovat o zkrácení betonážního cyklu až na 24 hodin (po dosažení maximální intenzity sálání tepla exotermickou reakcí přibližně 8 hodin po betonáži je prvek ve formě, po této době je tlaková pevnost na úrovni cca 50–80 MPa a následně 16 hodin ošetřování) ze současně běžných 3–5 dnů, přičemž okamžité i dlouhodobé vlastnosti ošetřovaných prvků převyšují vlastnosti i neošetřovaných prvků vyššího stáří. Tímto lze významně navýšit kapacitu výroby prefabrikovaných prvků za využití stávajících výrobních kapacit.

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



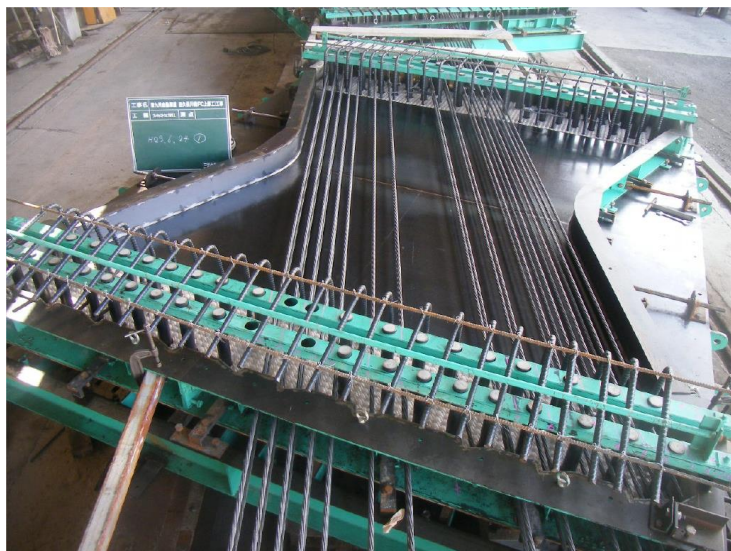
Pro předem předpjaté prvky je možné použít podobný harmonogram, jako byl použit pro experiment popsany v kapitole 5 při změně způsobu ošetřování: ošetřování parou místo ponořením do vody. Harmonogram je tedy 24 hodin ošetřování po 24 hodinách v bednění. Tento přístup je také vhodný z hlediska běžného provozu výroby prefabrikátů v podnicích, kdy je práce odváděna v denní směně a není nutné zavádět v podniku například třísměnný provoz a práci v každou denní dobu, neboť cyklus ošetřování probíhá automatizovaně. První den probíhá příprava napínací dráhy a bednění a dále míchání směsi UHPC, která je následně uložena do bednění. Druhý den může být prvek již plně nebo částečně odbedněn, přesunut do ošetřovací komory, případně je ošetřovací komora (či ošetřovací stan) umístěn přes prvek na jeho stávajícím místě, a může začít proces ošetřování při postupném zvyšování teploty.

S pořízením a provozem systému na ošetřování prvků z UHPC je spojena nutnost investice do inovace produkce, ať už se jedná o pořízení parního generátoru a ošetřovacích stanů, vybudování ošetřovací komory či prostoru pro ponoření UHPC prvků do vodního prostředí. Na ceně hotových vzorků se tato investice může podílet 5–10 % dle použité technologie ošetřování.

7.2 Prefabrikace stěny hybridního mostu s UHPC stojinou

S materiálovým modelem B4, který popisuje dlouhodobé chování UHPC, jak bylo přestaveno v kapitole 6, je možné přímo predikovat dlouhodobý účinek smršťování a dotvarování na prefabrikované prvky při různých technologických postupech při prefabrikaci. Průběh ošetřování a předpínání UHPC prvků je možné optimalizovat pro nejvyšší možnou jakost prvků při minimalizaci času mezi betonáží a předpínáním prvků.

Jak bylo popsáno v kapitole 2.1, hybridní mosty s prefabrikovanými HPC nebo UHPC panely působí tak, že jednotlivé prefabrikáty jsou namáhány jak v tlaku (tlačená diagonála), tak i v tahu. Na experimentálním ověření chování (Příbramský, 2019)^[56] bylo zjištěno, že díky spojitému tvaru panelu dochází k vzniku a rozšíření trhliny po dosažení tahové pevnosti za ohybu, která byla pro experiment průměrně 22 MPa. Působení tažené části panelu v kombinaci s ohybem, a ne v prostém tahu je velmi výhodné pro celkové působení UHPC panelu při zatížení. Přesto je vzhledem ke koncentraci napětí nutné UHPC prvky předepnout, protože koncentrace tahových napětí v jednotlivých prvcích dosahují řádově vyšších hodnot, než kdyby byla stojina komorového nosníku spojitá – spojitou stojinu na mostě dlouhého rozpětí však nelze prefabrikovat. Například u prefabrikovaného HPC panelu tloušťky 200 mm (Ashizuka, 2014)^[57] bylo použito celkem 28 předpínacích lan průměru 15,2 mm, jejichž rozmístění je patrné na Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Bednění UHPC panelu na předpínací dráze (Ashizuka, 2014)^[57].

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



Standardní proces prefabrikace předem předpjatých prvků z UHPC bez aplikace ošetřování zvýšenou teplotou umožňuje dobu vnesení předpětí již 3 dny po betonáži. Na Obr. 7.2 je představen modifikovaný přístup pro UHPC, který redukuje dobu betonážního cyklu ze 3 dnů na 2 s ošetřováním prvků v parní komoře při 90 °C po dobu 22 hodin s postupným nárůstem teploty při začátku ošetřování a poklesem teploty po dokončení ošetřování v průběhu 1 hodiny. Ošetřování je aplikováno v čas 24 hodin po betonáži.

V dobu 24 hodin po betonáži by směs UHPC (vycházíme z receptury, která byla použita pro vlastní experiment a jejíž receptura je uvedena v kapitole 5) měla mít již více jak 50 % 28denní tlakové a tahové pevnosti a zároveň modul pružnosti by měl být na úrovni přibližně 80 % 28denního modulu pružnosti. Tyto 1denní charakteristiky UHPC již bezpečně umožňují manipulaci s prefabrikátem, jeho odbednění a přesun do ošetřovací parní komory a případně i vnesení předpětí, avšak vnesení významného předpětí do neošetřovaného prvku takto časně by vedlo na zvýšenou míru dotvarování a následně i vymizení většiny předpínací síly dlouhodobými ztrátami předpětí.

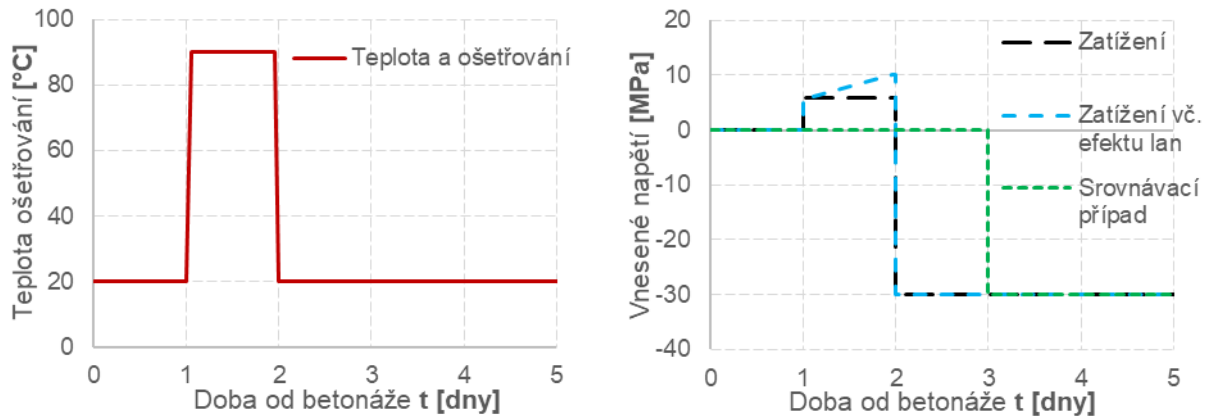
Pro dotvarování platí princip superpozice změny působícího zatížení způsobem, kdy je sečten účinek dotvarování od přetížení s účinkem při odtížení. Obecně je nutné uvažovat jakoukoliv změnu napjatosti. V případě zatížení a následného odtížení prvku v různém stáří tedy zůstane část dotvarování jako nevratná deformace prvku. Tento princip superpozice zatížení můžeme rozdělit v navrženém způsobu ošetřování a předpínání na následujících částí:

- časné mírné tahové napětí v UHPC,
- vnesení předpětí,
- zatížení vzorku po zabudování do nosné konstrukce.

UHPC má i v raném stáří nezanedbatelnou pevnost v tahu, respektive v tahu za ohybu. Tohoto účinku můžeme využít vnesením časného a mírného tahového napětí do prvků (Yanni, 2009)^[39]. Toto časné zatížení nastartuje rychlý nárůst přetvoření od dotvarování, které následně bude kompenzovat dotvarování od výrazně vyššího tlakového účinku po vnesení předpětí. Na dlouhé předpínací dráze je možné toto předpětí realizovat dopnutím lan na požadovanou hodnotu.

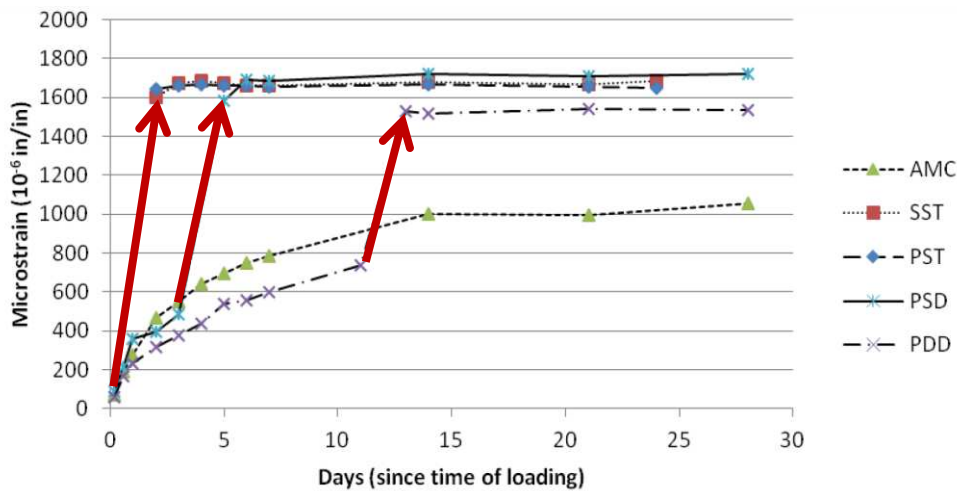
Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



Obr. 7.2: Navržené ošetřování a zatěžování; srovnávací případ vnesení předpětí do neošetřovaného vzorku v čase 3 dny

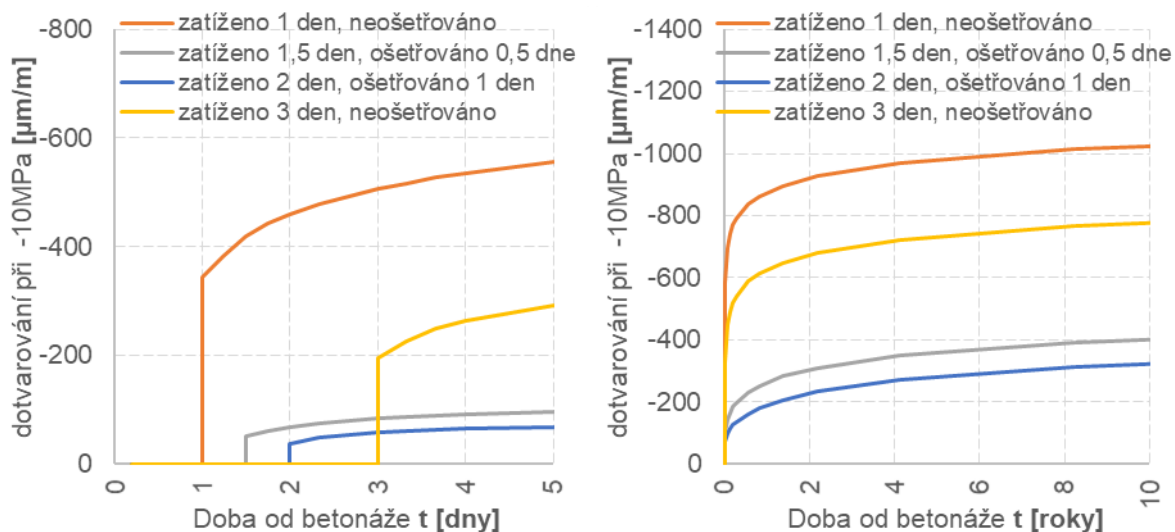
Dle studie zabývající se účinkem ošetřování zvýšenou teplotou, které je aplikováno na prvky z UHPC až po aplikaci zatížení (Flietstra, 2012)^[19] je zřejmé, že konečné hodnotě přetvoření od dotvarování se nelze vyhnout, ale pouze proběhne zrychleně v průběhu ošetřování, jak je patrné na Obr. 7.3. Tento efekt poukazuje na nevhodnost ošetřování až následně po vnesení předpětí, neboť omezení dlouhodobých deformací je jednou ze základních výhod ošetřování zvýšenou teplotou.



Obr. 7.3: Nárůst přetvoření od dotvarování UHPC vzorků pro různé teplotní ošetřování v raném stáří po aplikaci zatížení (Flietstra, 2012)^[19].

Nevýhodnost tohoto účinku ošetřování zvýšenou teplotou v době po vnesení zatížení však platí pouze pro tlaková namáhání a v případě zatížení drobným tahovým zatížením je velmi výhodná, jelikož tahové zatížení stačí v UHPC prvku podržet jen v průběhu ošetřování a ošetřování zajistí násobně vyšší přetvoření od tahového dotvarování, než kdyby prvek ošetřován nebyl.

Pro superpozici výše popsaných tahových účinků a účinku předpětí definujeme pro porovnání 3 časy, kdy se mění napjatost prvku. Pro zjednodušení uvažujme, že účinek zvýšeného tahového napětí od lan protahujících se od smršťování je aplikováno v polovině času ošetřování. Pro jednotkové zatížení aplikované na neošetřované nebo na již ošetřované konstrukci můžeme pomocí modelu B4 predikovat nárůst přetvoření od dotvarování, jak je zobrazeno na Obr. 7.4 níže:



Obr. 7.4: Náběh přetvoření od dotvarování pro vybrané časy a délky ošetřování

Zejména patrný je vysoký nárůst přetvoření pro neošetřované prvky v krátkém čase. Účinek dotvarování v čase 10 let je pro neošetřovaný prvek zatížený v čase 1 den přibližně 3,5x vyšší, než prvek zatížený ve stáří 2 dny, který byl po dobu 1 dne ošetřován.

Tento efekt je zásadní pro myšlenku použití konceptu tahového dotvarování (Yanni, 2009)^[39], neboť každý 1 MPa tahového namáhání, které vneseme před ošetřováním ve stáří 1 dne vykompenzuje dotvarování způsobené -3,5 MPa tlakového namáhání aplikovaného po ošetřování prvku v čase 2 dnů po betonáži. Je nutné podotknout, že vnášení tahového napětí (nebo částečné zamezení přetvoření od smršťování) pro směsi s množstvím vláken pod 1 % může vést k potrhání vzorku, a tedy jeho znehodnocení a při vnášení tahového napětí do UHPC je nutné znát jak charakteristickou 28denní pevnost v tahu (nebo v tahu za ohybu) tak i časné hodnoty 1–2 dny po betonáži a dále uvažovat i reálnou geometrii předpínací dráhy a délky volných lan. Tahové napětí můžeme do prvku vnést 2 způsoby, aktivně anebo pasivně v důsledku smršťování prvku v důsledku hydratace.

- **Pasivní** tahové předpětí – V případě, že je UHPC prvek betonován v bedně, jehož součástí je i konstrukce pro umístění a napnutí předpínacích lan (předpínání v rámu s podobnou velikostí, jako je velikost prefabrikátu, a nikoliv předpínání na dlouhé dráze), se projeví po prvním dnu nárůst tahového napětí v prvku v důsledku jeho přetvoření od smršťování. V prvních dnech po betonáži se projeví většina poměrného přetvoření od autogenního smršťování a prvek se zmenšuje.
- **Aktivní** tahové předpětí – Po uvolnění bočních prvků bedně v čase, kdy má být tahové napětí do prvku vneseno, jsou lana dopnuta hydraulickým zařízením. Původní tahové napětí v lanech může být voleno na nižší úrovni, než je maximální tahové napětí v lanech po zakotvení, proto, aby lana měla dostatečnou rezervu na dopnutí. Tento způsob je zejména vhodný pro předpínací dráhy, kde není možné uvažovat vnesení tahového napětí pasivně z důvodu délky lan mimo předpínané prvky.

Pasivní tahové napětí se do prvků v důsledku vysoké hodnoty časného přetvoření od autogenního smršťování v prvních 48 hodinách po betonáži dostane i v případě předpínání na dlouhé předpínací dráze. Jelikož je tahové napětí od částečného zamezení volné deformace od autogenního smršťování přímo úměrné délce volných kabelů, je významný rozdíl, zda je na předpínací dráze současně umístěn pouze 1 prefabrikát (v tomto případě ovlivňuje chování i samotná délka předpínací dráhy) anebo zda je předpínací dráha po celé své délce zaskládána více prvky s minimálními mezerami. V druhém případě je nutné počítat s nárůstem tahového napětí i bez aktivního dopnutí lan a tento případ funguje stejným způsobem jako kdyby byl jediný prefabrikát předpínaný na krátkém předpínacím rámu, jak bude detailně popsáno v následující kapitole 7.3. Nutnost aktivního vnesení tahového napětí do prvků dopnutím předpínacích lan je teoretická možnost, ale autogenní smršťování bude mít až na výjimečné situace srovnatelný efekt, je dále diskutována pouze možnost pasivního vnesení tahového předpětí na numerickém modelu krátkého rámu pro umístění právě 1 prefabrikátu.

Problematika smršťovacích trhlin je v případě UHPC úzce spojena s vysokou mírou autogenního smršťování v prvních dnech po betonáži a také situacím, kdy je volné deformaci bráněno. Tahovému napětí a nebezpečí vzniku smršťovacích trhlin v

Kapitola 7

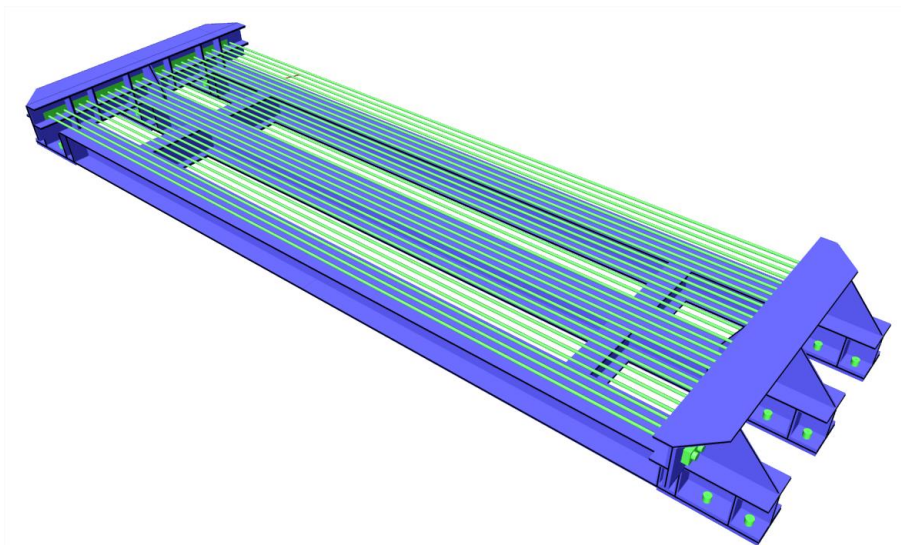
Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



UHPC se věnují některé nedávné studie, zejména důležitá je nedávná studie (Kheir, 2021)^[58], kde je zjišťována experimentálně tahová pevnost UHPC již 1 den po betonáži. Použitá směs je svými charakteristikami podobná směsi použité pro vlastní experiment s průměrnou 28denní pevností v tlaku 150 MPa. Ve studii (Kheir 2021)^[58] je detailně popsáno tahové chování UHPC a napětí při vzniku smršťovacích trhlin na tenké desce, u které je na jednom konci zabráněno volné deformaci zabetonováním do masivního deskového prvku. Tento experiment zkoumal rozvoj tahových trhlin v UHPC, které vznikají v časech již od prvního dne po betonáži prvku. Ve studii byla použita směs z UHPC s 28denní tahovou pevností 6,5 MPa a tahová pevnost naměřená 24 hodin po betonáži byla již na úrovni 4 MPa, tedy 61 % 28denní tahové pevnosti. Pro tuto směs UHPC byl nárůst tahové pevnosti v prvních dnech po betonáži vyšší než v případě tlakové pevnosti, kdy 1denní tlaková pevnost byla přibližně 50 % (74,5 MPa) 28denní takové pevnosti (150 MPa). Avšak i rychlejší nárůst tahové pevnosti ve srovnání s tlakovou pevností nezabránil vzniku a rozvoji tahových trhlin při zamezení velké části přetvoření od autogenního smršťování tenké desky. Tato skutečnost je diskutována dále v kapitole 7.4, kde je porovnáno napětí v UHPC při absolutním zamezení volné deformaci a napětí v UHPC prvku při smršťování na tuhém předpínacím rámu, který zamezí volné deformaci pouze částečně.

7.3 Tahové napětí v důsledku částečného omezení volného smršťování

Ve stáří přibližně 12–24 hodin má UHPC mechanické vlastnosti dostatečné na to, aby byla zajištěna soudržnost s jednotlivými předpínacími lany, a tedy za současného smršťování prvku jsou protahovány volné části předpínacích lan, které nejsou zabetonovány v prvku. Tyto části lan jsou patrné na Obr. 7.6 jako volné části předpínacích lan mezi okrajem betonového prvku a kotvení do předpínacího rámu. Protahením těchto částí lan se zvyšuje jejich tahové namáhání a tento nárůst tahového namáhání se zpětně projeví na nárůstu tahového napětí v UHPC prvku. Podmínkou pro vyvození znatelného účinku pasivně vneseného tahového napětí je dostatečně tuhý rám a zejména co možná nejkratší části lan mimo předpínaný prvek. Délka volných lan má zásadní efekt, neboť s délkou klesá přímo úměrně jejich tuhost, kterou vzdorují smršťování prvku a tím zpětně vyvozují v prvku tahová napětí. Zásadní také je, že lana jsou v porovnání s UHPC prvkem násobně méně tuhá a zabraňují pouze přibližně 20–30 % celkové deformace od smršťování, jak bude ukázáno dále na Obr. 7.11 a Obr. 7.12. Účinek volných částí lan omezuje tahové napětí v prvku na bezpečnou hodnotu pod mezí vzniku trhlin. Na Obr. 7.5 je zobrazen navržený rám pro účely predikce účinku procesu ošetřování a předpínání. Rám má délku mezi kotevními otvory v protilehlých koncových příčnicích 4,2 m a velikost rámu odpovídá přibližně rozměrům předpínané UHPC stěny 3 x 3 m.



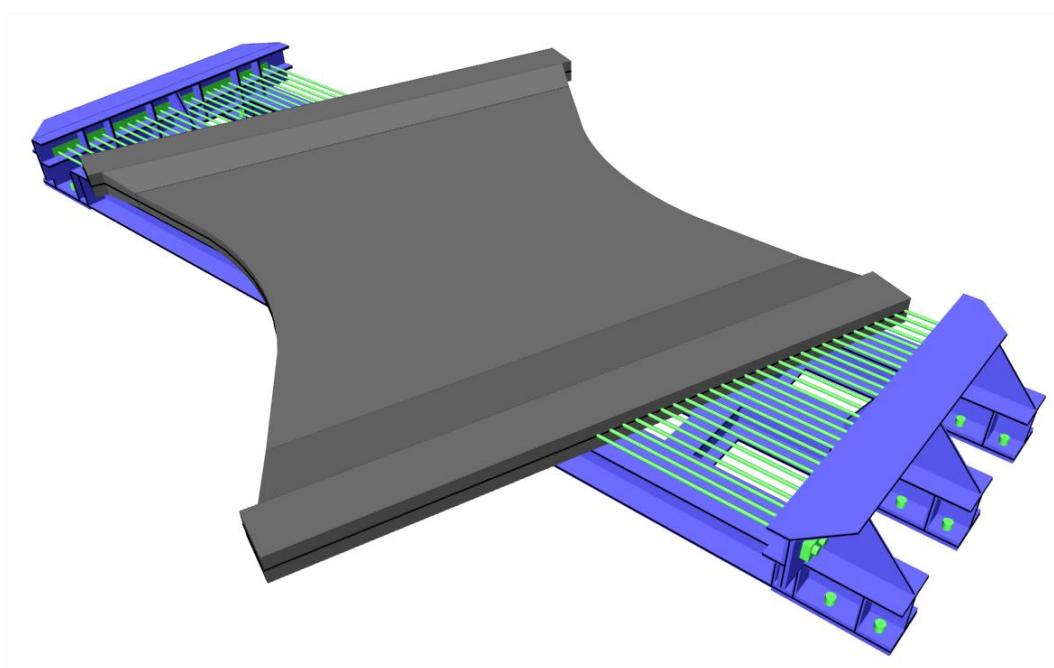
Obr. 7.5: Kotvený předpínací rám vytvořený pro předpínání prefabrikátů dané délky.

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci

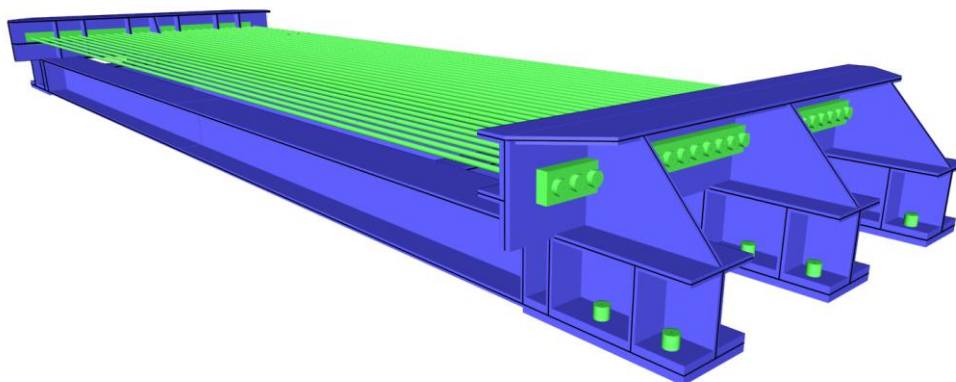


Mezi příčnický je napnuto 28 lan po 50 mm a tento systém je navržen pro prefabrikaci stěnových UHPC prvků pro most se stojinami typu „motýlích křídel“. Poloha UHPC prefabrikátu na rámu je patrná na Obr. 7.6. Uvažovaná tloušťka prvku je 80 mm a koncové části jsou zesíleny na 120 mm (horní povrch je rovinný, zesílení okrajových částí je dosaženo náběhy ve spodní ploše bednění). Pro tloušťku 80 mm není možné použít předpínací lana ve více vrstvách, jak bylo použito na mostu Takubogawa (Kata, 2013)^[6] a jak je patrné na fotografii prefabrikátu z HPC na Obr. 7.1.



Obr. 7.6: Kotvený předpínací rám a poloha prefabrikátu (schéma bez bednění prefabrikátu).

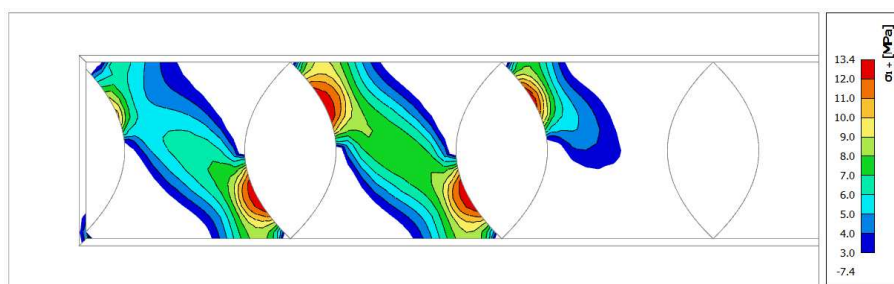
Použitá lana jsou o průměru 15,7 mm a uvažovaná předpínací síla každého lana je 230 kN. Jednotlivá lana jsou protažena otvory v koncových příčnicích a samostatně kotvena a předpínána. Vzhledem ke krátké délce lan (4,2 m) je významnou složkou ztrát předpětí ztráta pokluzem v kotevní oblasti (při uvažování pokluzu 3 mm je ztráta pokluzem přibližně 140 MPa, při použití rámu s 2 prvky předpínanými za sebou je hodnota poloviční, tedy 70 MPa). Napětí ve volných kabelech však vzroste v důsledku autogenního smršťování a ztráta předpětí pokluzem umožňuje lanům tento účinek přenést.



Obr. 7.7: Kotvený předpínací rám – detail čela.

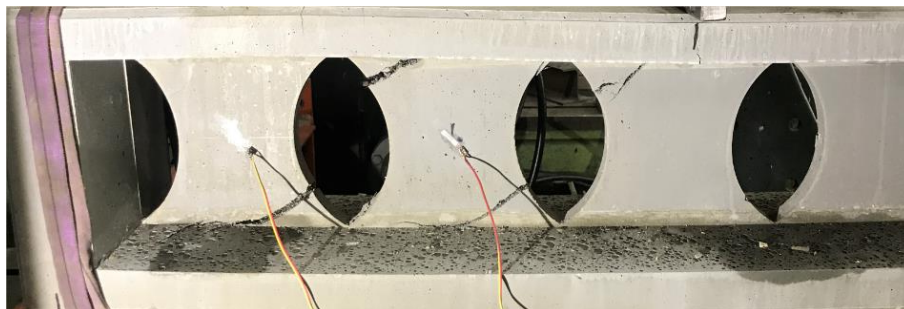
Bednicí systém musí dále umožnit i jeho částečné odbednění, zejména boků a pohledové spodní hrany desky. Po odbednění boků a spuštění spodní části musí být prefabrikát dále podporován ve svislém směru zbývajícími částmi bednění na koncích prefabrikátu, neboť pro tyto části není nutnost zajištění bezvadného ošetřování (změna barevnosti je možná). Následně po tomto částečném odbednění je předpínací rám spolu s prvkem zakryt ošetřovacím stanem, případně přes něj je umístěn ošetřovací box například z lehčených PIR panelů. Pohledové části jsou po odbednění všech pohledových ploch ošetřovány parou za zvýšené teploty po dobu 24 hodin.

Pro vyhodnocení účinku předpínacích lan umístěných na předpínacím rámu dle Obr. 7.6 vyjdeme z dřívější autorské práce a experimentu provedeného pro ověření chování UHPC prvků stojin s podobnou geometrií (Příbramský, 2019)^[56]. Numerickým modelem byla zjištěna koncentrace tahových napětí při okraji stěnových prvků (Obr. 7.8) při působícím zatížení 4 bodovým ohybem. Tento model postihuje v malém měřítku situaci na mostě s prefabrikovanými UHPC stojinami, avšak místa koncentrace tahových napětí budou shodná.



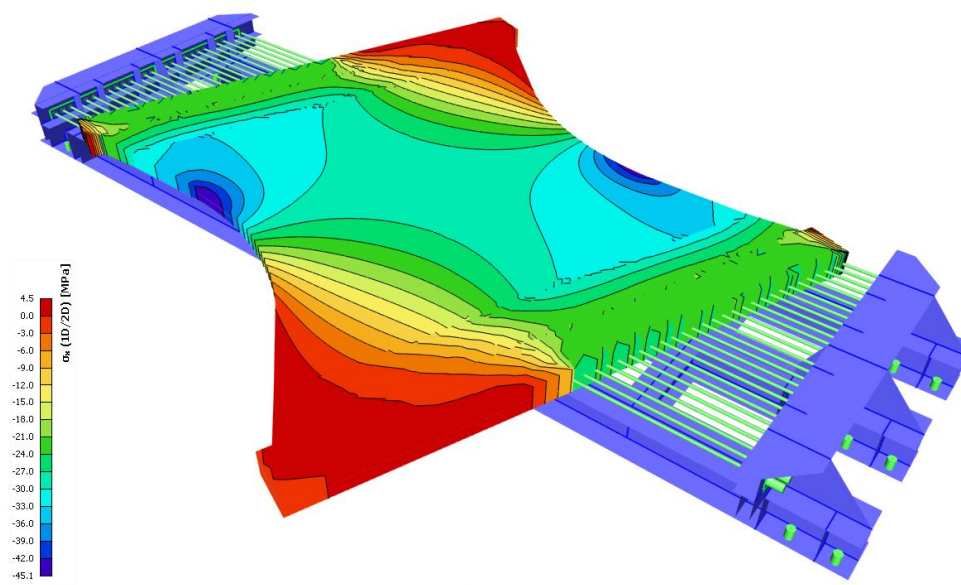
Obr. 7.8: Průběh normálových napětí od zatížení. V místech extrémního tahového napětí vzniknou trhliny po překročení tahové pevnosti za ohybu. (Příbramský, 2019)^[56].

Experimentální zkoušky (Obr. 7.9) ověřily přesnou polohu vzniku trhlin a zároveň potvrdily, že rozhodujícím parametrem pro vznik trhliny je pevnost v tahu za ohybu, což je na průběhu napětí na Obr. 7.6 patrné dle klesající hodnoty napětí od okraje směrem k ose stěny.



Obr. 7.9: Experimentální ověření chování – poloha a směr trhlin při zatěžování. (Příbramský, 2019)^[56].

Na Obr. 7.10 je zobrazeno chování prefabrikátu po vnesení předpětí (hodnota předpětí je zvolena dle charakteristik a polohy předpínacích lan a na obrázku má pouze informativní charakter). Důležité je, že ke koncentraci tlakového napětí od předpětí dochází v identických místech, kde při zabudování do konstrukce bude docházet ke koncentraci tahových napětí od působícího zatížení. Účinek předpětí je tedy velmi vhodný pro eliminaci vzniku trhliny právě v exponovaném místě na okraji prvku v oblasti vykrojení tvaru stěny.



Obr. 7.10: Průběh normálových napětí od předpětí (orientační hodnoty)

7.4 Studie chování konkrétního stěnového prvku z UHPC

Pro analýzu konkrétních hodnot napjatostí prvku před, v průběhu a po ošetřování a předepnutí uvažujeme následující případ:

- Prvek dimenzí uvedených výše v této kapitole, předpětí 28 lany průměru 15,7 mm umístěnými do navrženého předpínacího rámu (Obr. 7.6).
- Materiálové charakteristiky UHPC dle vlastního experimentu (kapitola 5): 28denní modul pružnosti 50 GPa, 1denní modul pružnosti 40 GPa, charakteristická tlaková pevnost 140 MPa (1denní 70 MPa) a charakteristická tahová pevnost za ohybu 22 MPa (1denní 12 MPa – Pozn. nebylo při provedeném vlastním experimentu přímo měřeno a hodnota je odhadnuta na základě měření ve studii (Kheir, 2021)^[58], kdy 1denní tahová pevnost byla více než 60 % 28denní tahové pevnosti). Pro reologické vlastnosti UHPC uvažujeme použití modelu B4 kalibrovaného na tuto směs UHPC (kapitola 6.8).
- Uvažujeme záměnu ošetřování ponořením do vody, které bylo experimentálně ověřeno, za ošetřování parou při 90 °C při relativní vlhkosti alespoň 95 % (neboť prvek v předpínacím rámu nebo na dlouhé dráze není technologicky možné ponořit do vody před vnesením předpětí).
- Okolní teplota před a po ukončení ošetřování prvku je běžných 20 °C a relativní vlhkost prostředí je 70 %.
- Hodnota přetvoření od autogenního smršťování po 12 hodinách po betonáži viz Obr. 5.6 je 500 $\mu\text{m}/\text{m}$ a zároveň do času 24 hodin proběhlo celkem 550 $\mu\text{m}/\text{m}$.
- Hodnota 2denního přetvoření od autogenního smršťování po ošetřování při 90 °C je dle Obr. 6.30 820 $\mu\text{m}/\text{m}$ a tato hodnota je již konečná (nárůst od doby 24 hodin je 270 $\mu\text{m}/\text{m}$).

Jelikož v prvku se odehrávají souběžně procesy smršťování, dotvarování a zároveň i relaxace předpínací výztuže (jak bylo popsáno v kapitole 4.5.2 včetně účinků zvýšené teploty) na základě aktuální napjatosti prvku, není možné jednotlivé složky účinků v jednotlivých časech pouze sečíst, protože se navzájem ovlivňují. Pro vyhodnocení použijeme metodu časové diskretizace, která umožní zahrnout například

Kapitola 7

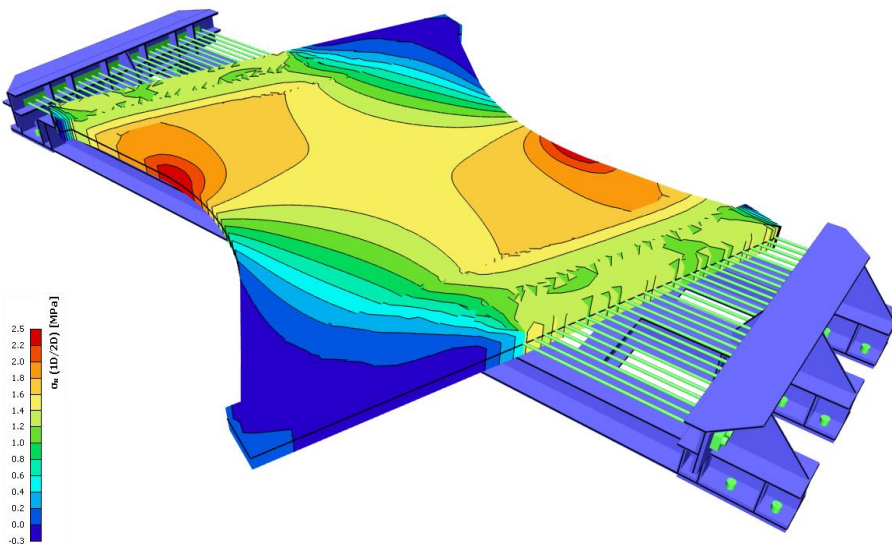
Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



nižší míru dotvarování jako následek ztrát předpětí v důsledku dotvarování a smršťování, které již v prvku proběhlo.

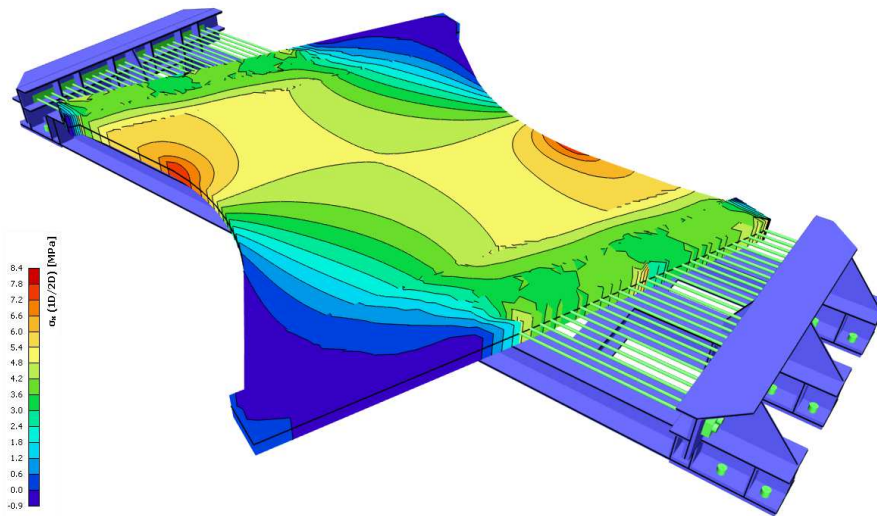
Uvažujme tedy rozdělení časové osy na diskrétní hodnoty, ve kterých lze určit přírůstky jednotlivých ztrát předpětí pro vypočtený časový okamžik t_i a tyto ztráty předpětí jsou vstupními hodnotami pro výpočet jednotlivých veličin v čase t_{i+1} .

V časových inkrementech v době před vnesením předpětí je předpínací dráhou a lany bráněno volné deformaci. Pro zvolený případ a uvažování 28denního modulu pružnosti odpovídá hodnotě volného přetvoření prvku $-100 \mu\text{m/m}$ napětí vnesené zpět do prvku 2,5 MPa v okrajových částech prvku a 1,5 MPa uprostřed prvku, jak je zobrazeno na Obr. 7.11. Průběh tahových napětí prvku zobrazuje místa koncentrace napětí v okolí zaoblení.



Obr. 7.11: Účinek přetvoření smršťováním o velikosti $-100 \mu\text{m/m}$ na prvek s 28denním modulem pružnosti

Na Obr. 7.12 níže je zobrazeno napětí za předpokladu, že je plně bráněno volné deformaci prvku z důvodu smršťování. Je patrné, že v prvku je až 3,5x vyšší tahové napětí (8,4 MPa) ve srovnání s pružným modelem, kde je hodnota napětí maximálně 2,5 MPa. Toto srovnání ukazuje důležitost správného určení tuhosti předpínacího systému, neboť při příliš tuhém systému nebo velmi krátkých úsecích volného lana může dojít k překročení časné tahové pevnosti a k potrhání vzorku smršťovacími trhlinami.



Obr. 7.12: Účinek přetvoření smršťováním o velikosti $-100 \mu\text{m}/\text{m}$ na prvek s 28denním modulem pružnosti – úplné zamezení volné deformace

Nejdříve určíme základní vstupní parametry. Maximální síla v předpínací výztuži při zakotvení $\sigma_{P,max}$ je pro lana z vysokopevnostní oceli 1860/1640 (pevnost a smluvní mez kluzu v MPa):

$$\sigma_{P,max} = \min[0,8 f_{pk}; 0,9 f_{p,0,1,k}] \quad (7.1)$$

$$\sigma_{P,max} = \min[0,8 \cdot 1860; 0,9 \cdot 1640] = \mathbf{1476 \text{ MPa}}$$

Uvažujme stejný rám, jako byl popsán dříve, s modifikací pro 2 stěnové dílce, tedy dvojnásobné délky než na Obr. 7.11 pro redukci ztrát pokluzem a pružným přetvořením napínacího rámu. Délka lan bude 8,4 m a předpokládejme nízkou hodnotu pokluzu a_p 3 mm, potom se ztráta předpětí pokluzem $\Delta\sigma_p$ určí ze vztahu:

$$\Delta\sigma_p = -\frac{a_p}{L} \cdot E_p = -\frac{0,003}{8,4} \cdot 195\,000 = \mathbf{-69,6 \text{ MPa}} \quad (7.2)$$

Ztráta přetvořením předpínacího rámu $\Delta\sigma_{psd}$ vychází z deformace rámu při napínání jednotlivých lan. Zde je zásadní, zda jsou lana napínána postupně nebo ve skupinách, neboť při předpínání se konstrukce již deformuje a po zakotvení poslední skupiny lan tato lana ztrátu pružným přetvořením napínacího rámu nebudou vykazovat. Uvažujme konzervativně napínání po jednom laně, kdy průměrná ztráta předpětí bude určena pro polovinu celkové deformace koncových příčníků rámu. Deformace příčníků dL při zatížení napínací silou je na každé straně 1 mm (zkrácený pevnostní výpočet rámu je uveden jako Příloha 4 – Návrh a posouzení předpínacího rámu). Po zakotvení se ihned projeví ztráta pokluzem, a tedy se rám pružně odtíží

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



poměrem mezi hodnotou napětí po ztrátě pokluzem a $\sigma_{P,max}$. Při uvážení současné ztráty pokluzem a deformací napínacího rámu je $\Delta\sigma_{psd}$ vyjádřeno vztahem:

$$\Delta\sigma_{psd} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{dL}{L} \cdot E_P \cdot \frac{\sigma_{P,max} + \Delta\sigma_P}{\sigma_{P,max}} \quad (7.3)$$
$$\Delta\sigma_{psd} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2 \cdot 0,001}{4,2} \cdot 195\,000 \cdot \frac{1476 - 69,6}{1476} = -44,24 \text{ MPa}$$

Napětí v předpínací výztuži po zakotvení:

$$\sigma_{P,0} = \sigma_{P,max} + \Delta\sigma_P + \Delta\sigma_{psd} = 1476 - 69,6 - 44,04 = 1362,1 \text{ MPa} \quad (7.4)$$

Ztráta pokluzem a elastickým zkrácením napínacího rámu má významný vliv a pro předpínání na dlouhé předpínací dráze klesají ztráty pokluzem a přetvořením napínacího zařízení nepřímo úměrně s délkou. Pro zvolený krátký rám pro 1 nebo 2 prefabrikáty jsou hodnoty ztrát předpětí při použití standardní technologie předpínání (kotvení za pomoci kuželíků a napínání lan po jednom) znatelné.

Pro výpočet metodou časové diskretizace je časová osa rozdělena jednotlivými časovými body na inkrementy, jejichž definice odpovídá významným časům v chování konstrukce. Definujme čas inkrementu t_i pro vyhodnocení účinků napjatosti a ztrát předpětí jako polovinu časového intervalu inkrementu (interval je definován časem konce předchozího inkrementu a inkrementu i). Výpočet ztrát předpětí pro interval i je dále uveden obecně, bez dosazení a výpočtu jednotlivých hodnot. Výpočet byl proveden pro 32 inkrementů a různé scénáře a výsledné hodnoty jednotlivých kroků výpočtu jsou uvedeny v tabulkách v příloze (Příloha 5 – Výpočet ztrát metodou časové diskretizace).

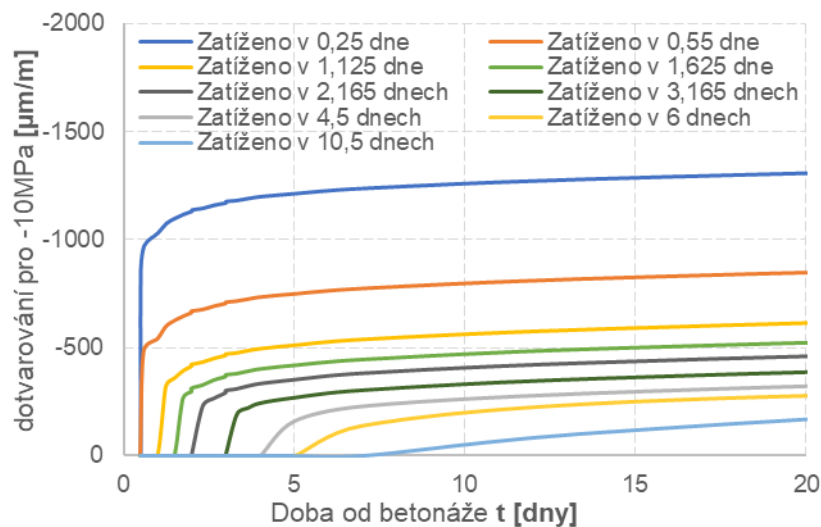
Nejdříve pro inkrement i určíme ztrátu relaxací předpínací výztuže $\Delta\sigma_{Pr}$ (viz kapitola 4.5.2, kde byl uveden celkový postup včetně zahrnutí zvýšené teploty při ošetřování). Jelikož je hodnota $\Delta\sigma_{Pr}$ závislá na poměru napětí v předpínacích lanech $\sigma_{P,i}$ (pro první inkrement $\sigma_{P,0}$) a pevnosti lan, je zřejmé, že relaxace bude rozdílná v čase po ukotvení a v době, kdy již proběhla část dlouhodobých ztrát. Určeme tedy ztrátu relaxací $\delta\Delta\sigma_{Pr,i}$ (symbolem δ označme přírůstek veličiny v daném inkrementu, aby byla odlišena hodnota přírůstku a celkové hodnoty ztráty předpětí) v inkrementu i jako:

$$\delta\Delta\sigma_{Pr,i} = \Delta\sigma_{Pr}(\sigma_{P,i}, t_i) - \Delta\sigma_{Pr}(\sigma_{P,i}, t_{i-1}) \quad (7.5)$$

Tím, že pro rozdíl relaxace v inkrementu i použijeme aktuální hodnotu napětí v předpínacích lanech $\sigma_{P,i}$, získáme (za obecně platné podmínky klesajícího napětí v lanech v čase) přesnější hodnotu celkové ztráty předpětí relaxací. Celková ztráta od relaxace $\Delta\sigma_{Pr,i}$ v čase t_i je pak prostým součtem ztrát dílčích ztrát relaxace v jednotlivých inkrementech:

$$\Delta\sigma_{Pr,i} = \sum_0^i \delta\Delta\sigma_{Pr,i} \quad (7.6)$$

V každém inkrementu, který předchází času vnesení zatížení vypočítáme pružné napětí $\sigma_{c,sh,cc,i}$ v UHPC v důsledku zabránění volné deformace prvku v důsledku smršťování a dotvarování. Z adaptovaného modelu B4 získáme hodnotu přetvoření od smršťování v jednotlivých inkrementech $\varepsilon_{sh,i}(t_i)$ – viz Obr. 6.30. Dále je nutné získat přetvoření od dotvarování, které odpovídá součtu impulzů vnesených v čase předcházejícího času t_i . Pro každý čas t_i vnesení dílčího zatížení je možné určit funkci dotvarování $\varepsilon_{cc}(t'_i, t_i)$, jako funkci času inkrementu t_i a času vnesení zatížení t'_i (jak je patrné na Obr. 7.13).



Obr. 7.13: Funkce nárůstu přetvoření od dotvarování pro jednotlivé inkrementy pojmenované dle času vnesení zatížení pro 0,25–10,5 dnů

V každém inkrementu se mění napjatost lan v důsledku ztrát předpětí a abychom korektně kompenzovali tento účinek, je nutné použít funkcí dotvarování pro daný časový okamžik. Celková hodnota poměrného přetvoření od dotvarování $\varepsilon_{cc,i}$ v čase t_i bude součtem jednotlivých příspěvků:

$$\varepsilon_{cc,i}(t_i) = \sum_0^i \varepsilon_{cc}(t'_i, t_i) \quad (7.7)$$

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



Pro určení změny přetvoření od smršťování $\delta\varepsilon_{sh,i}$ a dotvarování $\delta\varepsilon_{cc,i}$, která se stane v inkrementu i je nutné od hodnoty přetvoření v inkrementu i odečíst hodnotu přetvoření, která se již stala v době do konce předchozího inkrementu $i - 1$ (pro první inkrement je hodnota 0):

$$\delta\varepsilon_{sh,i} = \varepsilon_{sh,i}(t_i) - \varepsilon_{sh,i-1}(t_{i-1}) \quad (7.8)$$

$$\delta\varepsilon_{cc,i} = \varepsilon_{cc,i}(t_i) - \varepsilon_{cc,i-1}(t_{i-1}) \quad (7.9)$$

Hodnotu změny napětí v prvcích v případech, že je bráněno volné deformaci, získáme z hodnot napjatosti z Obr. 7.11 (hodnotu označme jako $\sigma_{c,ref}$) a zohledníme i aktuální tuhost betonu v inkrementu $E_{cm}(t_i)$, neboť při stejné hodnotě deformace, ale nižším modulu pružnosti, než je referenční modul, bude i účinek bránění volné deformaci přímo úměrně nižší. Hodnota modulu pružnosti $E_{cm}(t_i)$ musí být uvažována s účinkem ošetřování, jak bylo popsáno v kapitole 6.1.2.

$$\sigma_{c,s,c,i} = \sigma_{c,ref} \cdot \frac{(\delta\varepsilon_{sh,i} + \delta\varepsilon_{cc,i})}{100} \cdot \frac{E_{cm}(t_i)}{E_{cm}(28)} \quad (7.10)$$

Důležité u hodnot podrženého napětí $\sigma_{c,s,c,i}$ je, že hodnota napětí se kumuluje v jednotlivých inkrementech do okamžiku vnesení předpětí a v tuto chvíli je uvolněna. Uvolněné tahové napětí se projeví jako zvýšení změny napětí při předpětí (vnesené předpětí je označeno jako $\sigma_{p,in}$). Tento efekt je zohledněn při výpočtu dotvarování od zatížení působícího v čase vnesení předpětí, kdy pro výpočet následného dotvarování je použita hodnota změny napjatosti prvku $\sigma_{p,in,cure}$ v důsledku předpětí a uvolnění podrženého tahového napětí.

$$\sigma_{p,in,cure} = \sigma_{p,in} + \sum_0^i \sigma_{c,s,c,i} \text{ pro } t_i = \text{čas vnesení předpětí} \quad (7.11)$$

Jednotlivé změny ztrát předpětí v jednotlivých inkrementech jsou následně jednoduše dopočteny ze změny napětí nebo změny poměrného přetvoření v každém inkrementu. Postupně je vyhodnocena ztráta pružným zkrácením prvku $\Delta\sigma_{pe,i}$ při působení zatížení (vnesení předpětí, zatížení prvku zabudováním do konstrukce a časné tahové přetvoření $\sigma_{c,s,c,i}$ v čase před vnesením předpětí).

$$\Delta\sigma_{pe,i} = -\sigma_{c,i} \cdot \frac{E_p}{E_{cm}(t_i)} \quad (7.12)$$

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



Jelikož je předpínací výztuž pevně spojena s betonem, platí pak, že poměrné přetvoření v jednotlivých inkrementech je vypočteno přímo z přírůstku poměrného přetvoření betonu v daném inkrementu od smršťování a dotvarování.

Ztráty předpětím od smršťování $\delta\Delta\sigma_{PS,i}$ a dotvarování $\delta\Delta\sigma_{PC,i}$ jsou pro inkrement i popsány vztahy:

$$\delta\Delta\sigma_{PS,i} = -E_p \cdot \delta\varepsilon_{sh,i} \quad (7.13)$$

$$\delta\Delta\sigma_{PC,i} = -E_p \cdot \delta\varepsilon_{cc,i} \quad (7.14)$$

Po vyčíslení všech výše zmíněných ztrát předpětí je určena hodnota napětí v předpínacích lanech $\sigma_{P,i+1}$ ve vyhodnocovaném inkrementu i :

$$\sigma_{P,i+1} = \sigma_{P,i} + \delta\Delta\sigma_{Pr,i} + \Delta\sigma_{P,el,i} + \delta\Delta\sigma_{PS,i} + \delta\Delta\sigma_{PC,i} \quad (7.15)$$

Z hlediska vyhodnocení ztrát předpětí je pro analýzu nejzajímavější složka ztráty předpětí od dotvarování. Pro danou směs UHPC můžeme ovlivnit celkové přetvoření od smršťování použitím příměsí redukujících projevy smršťování (viz kapitola 3) avšak jen velmi malou měrou lze omezit ztráty od elastického přetvoření prvku při vnesení předpětí a zároveň při efektivní hodnotě předpětí nelze snížit ani hodnota relaxace předpínací výztuže.

Na grafech níže jsou porovnané scénáře pro ošetřovaný prvek zatížený v čase 2 dny po betonáži a neošetřovaný prvek zatížen 5 dnů po betonáži. Uvažované vnesené předpětí je odhadnuto na základě maximálního možného umístění předpínacích lan do průřezu (tlakové napětí v betonu v lokálním maximu 45 MPa, tedy přibližně 38 MPa po okamžitých ztrátách). Dle polohy stěnového prvku na konstrukci (dle vzdálenosti od pilíře mostu) se působící tahové napětí snižuje a je tedy možné návrh prvků optimalizovat dle polohy na mostě. Po zabudování prvku do hlavní nosné konstrukce dojde při výstavbě metodou letmé betonáže k postupné aktivaci tažené diagonály, a tedy k redukci tlakové síly vnesené předpětím. Uvažujme, že prvek je navržen tak, že lokální tahové napětí od zatížení v kvazistálé kombinaci má hodnotu 35 MPa. Možné scénáře, které budou dále vyhodnoceny, jsou shrnuty v tabulce níže (Tabulka 7.1).

Kapitola 7

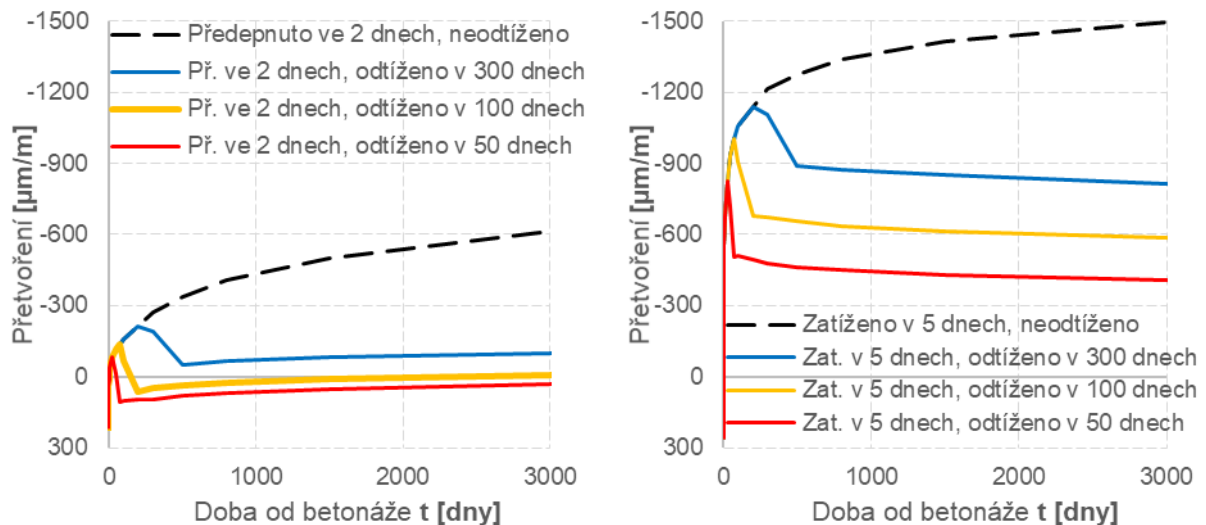
Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



Tabulka 7.1: porovnané scénáře pro ztráty předpětí

ošetřováno	zatíženo	lokální účinek předpětí	zabudováno (odtížení)	odtíženo hodnotou
90 °C, 24h	2 dny	45 MPa	ne	-
90 °C, 24h	2 dny	45 MPa	50 dní	35 MPa
90 °C, 24h	2 dny	45 MPa	100 dní	35 MPa
90 °C, 24h	2 dny	45 MPa	300 dní	35 MPa
ne	5 dnů	45 MPa	ne	-
ne	5 dnů	45 MPa	50 dní	35 MPa
ne	5 dnů	45 MPa	100 dní	35 MPa
ne	5 dnů	45 MPa	300 dní	35 MPa

Přetvoření od dotvarování je pro jednotlivé scénáře zobrazeno na graficky na Obr. 7.14. Je patrný velmi výrazný rozdíl mezi ošetřovaným a neošetřovaným prvkem. Pro srovnání jsou uvedeny i průběhy nárůstu deformací i pro prvky, které nebyly nikdy zatíženy (kromě samotného předpětí).



Obr. 7.14: Náběh přetvoření od dotvarování pro uvažované scénáře zatěžování předpínané diagonály; **Vlevo:** Ošetřované vzorky; **Vpravo:** Neošetřované vzorky

Pro zvolený postup ošetřování a předpínání je dosažena téměř úplná eliminace přetvoření od dotvarování (přes 85 %). Pro neošetřovaný prvek předepnutý v čase 5 dnů a zabudovaný ve 100 dnech po betonáži je přetvoření od dotvarování významná, a tedy spolu s dalšími ztrátami předpětí (ztráta relaxací, pokluzem a v důsledku smršťování) poklesne předpínací síla o více než 50 %. Pro ošetřovaný prvek a dosažení stejné míry předpětí na konci životnosti po odečtení dlouhodobých ztrát předpětí je jako přímý důsledek ošetřování a postupu předpínání možné použít

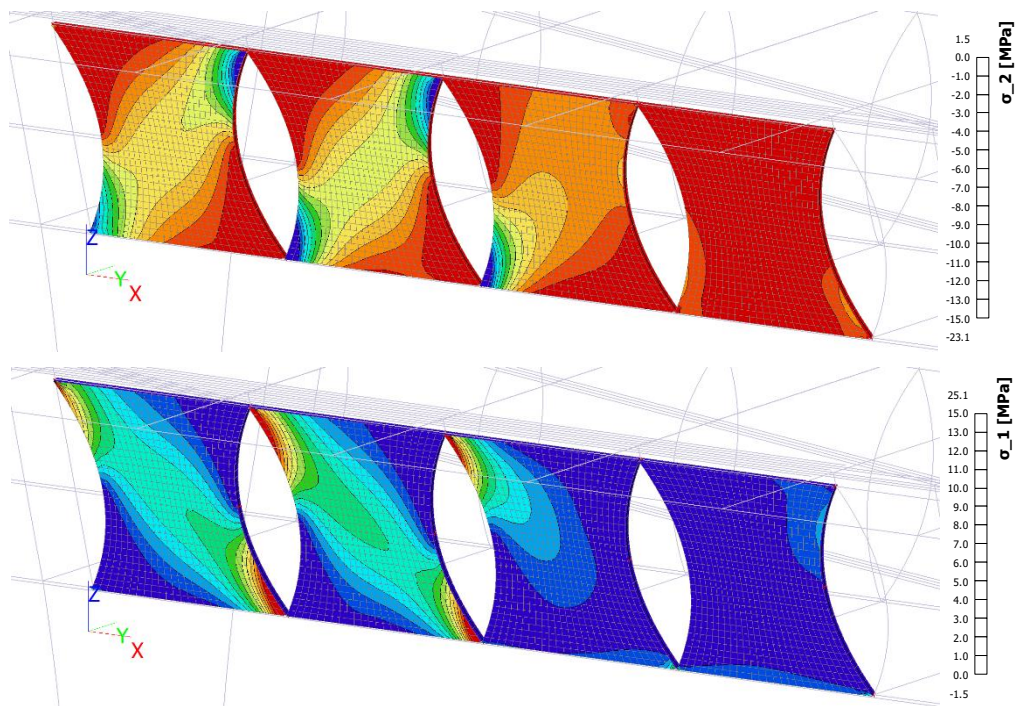
Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



optimalizované množství předpínacích lan, a tedy i redukci nutné vnesené předpínací síly, což synergicky vede k ještě nižší míře dotvarování.

Jak bylo publikováno v jiné autorské studii (Příbramský, 2016)^[59] pro působení prefabrikovaných stěn z UHPC je důležitá i analýza tlakového působení tlakové diagonály. Použití UHPC panelů redukuje tíhu hlavní nosné konstrukce a zároveň most s použitím těchto panelů má násobně nižší smykovou tuhost právě díky použití oddělených a velmi subtilních panelů v porovnání s letmo betonovaným mostem s monolitickými stěnami. Při působícím zatížení (jak stálé, tak i proměnné) vzniká v lokálních místech stěny v blízkosti hrany dvojice opačně působících oblastí, tedy tažené a tlačené diagonály. Při působícím zatížení na mostovku pak platí, že hodnota lokálního extrému tlakového a tahového napětí má stejnou absolutní hodnotu, jak je zobrazeno na Obr. 7.15 na výseku nosné konstrukce mostu s UHPC stojinami.



Obr. 7.15: Hodnoty účinků působícího zatížení a tahové a tlakové napětí v panelech (Příbramský, 2016)^[59].

Následky pružné deformace UHPC stěn se dají lehce odstranit při návrhu mostu a použitím nadvýšení tak, aby deformace od kvazistálé kombinace zatížení byla vyrušena nadvýšením. Dlouhodobé deformace od smršťování proběhnou téměř výhradně před zabudováním prvku do konstrukce, ale přetvoření od dotvarování může

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci

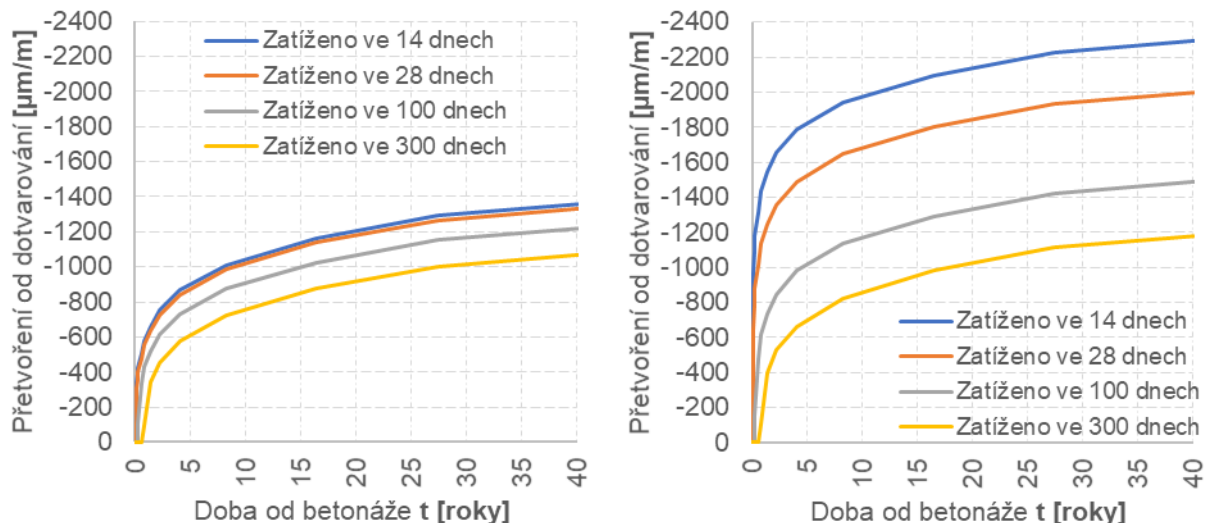


mít stále významný vliv. Podobně jako pro vyhodnocení dotvarování od předpětí, definujeme následující scénáře pro vyhodnocení (Tabulka 7.2):

Tabulka 7.2: porovnávané scénáře pro přetvoření od dotvarování při tlakovém působení

ošetřováno	zabudováno do konstrukce	zatíženo hodnotou
90 °C, 24h	14 dní	-35 MPa
90 °C, 24h	28 dní	-35 MPa
90 °C, 24h	100 dní	-35 MPa
90 °C, 24h	300 dní	-35 MPa
ne	14 dní	-35 MPa
ne	28 dní	-35 MPa
ne	100 dní	-35 MPa
ne	300 dní	-35 MPa

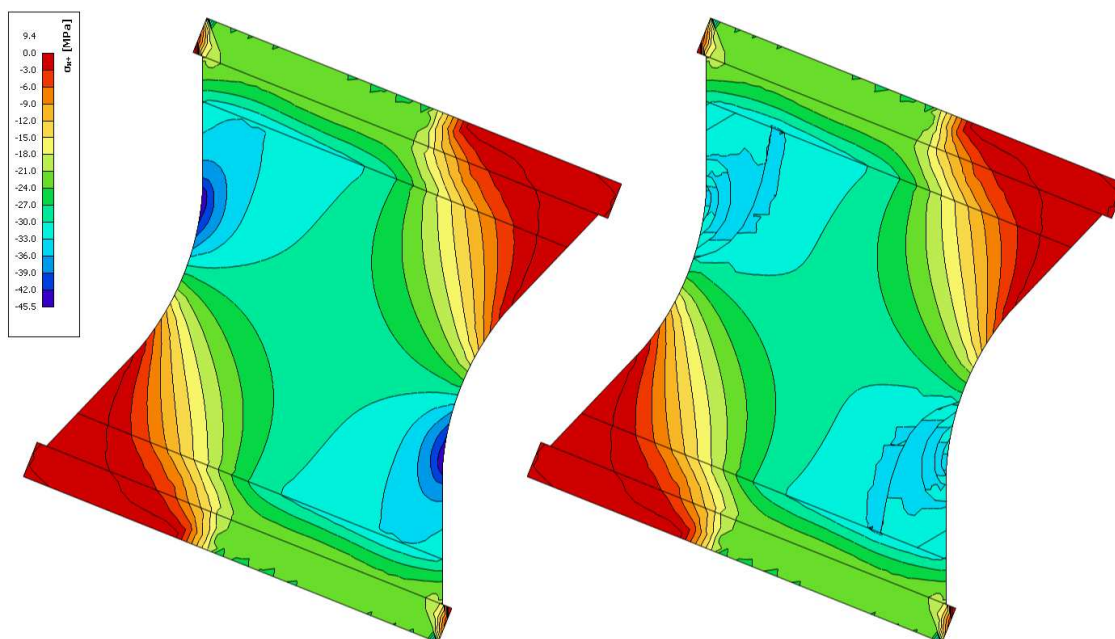
Jak je očekávatelné, nárůst přetvoření od dotvarování na Obr. 7.16 je nejvíce znatelný u relativně mladých prvků v čase zabudování do konstrukce. Přetvoření od dotvarování prvků zabudovaných po 14 dnech po betonáži (bez ošetřování) vykazují téměř 2x vyšší míru dotvarování ve srovnání se staršími prvky a prvky ošetřovanými.



Obr. 7.16: Náběh přetvoření od dotvarování tlačné diagonály pro uvedené scénáře zatěžování; **Vlevo:** Ošetřované prvky; **Vpravo:** Neošetřované prvky

Při aplikaci ošetřování zvýšenou teplotou se prvky chovají velmi podobně, ať už byly zabudovány do konstrukce v jakoukoliv dobu. Konzistentnost chování jednotlivých prvků zajišťuje rovnoměrné a odhadnutelné dlouhodobé deformace, jejichž část je možné započítat do navrženého nadvýšení a zajistit tak co nejmenší výkyvy nivelety v průběhu užívání mostu.

K výsledným hodnotám přetvoření od dotvarování je na závěr nutné zdůraznit, že vyhodnocení nárůstu dotvarování v lokálních místech je vypočteno konzervativním způsobem, uvážíme-li fakt, že lokální místa na okraji prvku sice vykazují vyšší účinek okamžitého zatížení než střed panelu (jak je vidět na Obr. 7.17: vlevo), avšak dotvarování způsobí lokální vyšší nárůst poddajnosti v tomto místě. Tím bude v důsledku snížena hodnota lokálního napětí, neboť lokální místo nedotvaruje volně, protože jeho volné deformaci brání materiál v okolí, který dotvaruje od původně působícího zatížení méně (přibližně o poměr mezi lokálním napětím a průměrným napětím v po šířce prvku, v tomto případě tedy přibližně 1,36x méně).



Obr. 7.17: Vymizení lokálních extrémů napětí od předpětí na prvku s vysokou mírou dotvarování. **Vlevo:** konstantní (okamžitá) tuhost prvku; **Vpravo:** Zvýšená poddajnost prvku (redukce tuhosti v místě extrému o 35 %)

Na Obr. 7.17: Vpravo je zobrazen modelovaný účinek redukce tuhosti v lokálních místech od okraje prvku o 35 %, který plynule přechází do neredukované tuhosti ve středu prvku. Tato úprava byla do modelu vnesena manuálně rozdělením prvku na několik polygonálních částí na základě lokálního působení. Tato úprava odpovídá stavu, kdy hodnota součinitele dotvarování v lokálních oblastech je o 0,50 vyšší než uprostřed prvku, což je v případě neošetřovaného prvku dosaženo již v prvním dnu po vnesení předpětí (jak lze odvodit z Obr. 7.14: Vpravo). Prvek ošetřovaný za zvýšené teploty má součinitel dotvarování násobně nižší, a tedy i redukce lokálního extrému

Kapitola 7

Použití ošetřování zvýšenou teplotou při prefabrikaci



v důsledku lokálního zvýšení poddajnosti je nižší. Tento účinek lokálního poklesu poddajnosti a zabránění jeho volné deformaci může být ve výpočtu ztrát předpětí uvažován jako částečné odtížení v čase po vnesení předpětí.

Stejný účinek zvýšené lokální poddajnosti bude i v případě tlakového napětí od zatížení prvku zabudovaného v mostě. Jak bylo ukázáno na Obr. 7.16, přetvoření v čase 3000 dní je při dostatečném stáří prvku (ošetřovaný prvek nebo stáří neošetřovaného prvku při zabudování 100 a více dní) součinitel dotvarování vyšší než 1,0 a tedy pro stálé zatížení dojde k vyhlazení lokálního tlakového napětí a redukci lokálního extrému o 20–30 %. Tento účinek se nevztahuje na okamžité zatížení, avšak pro posouzení kritéria omezení napětí charakteristické kombinace mezního stavu použitelnosti nebo omezení napětí při kvazistálé kombinaci může být tento účinek zahrnut. Místo lokální hodnoty vypočtené na tuhém modelu, může být v těchto kombinacích uvažována průměrná hodnota tlakového napětí po šířce stěny.

8 Závěr

V této práci bylo přestaveno použití inovativního materiálu, UHPC v konstrukcích mostů a zejména jeho použití ve formě prefabrikovaných předem předpjatých plošných dílců. Tyto prefabrikované prvky je možné použít jako stěny komorového mostu pro hybridní mosty velkého rozpětí. V úvodních kapitolách byly přiblíženy možné typy hybridních mostů, které kombinují beton běžné třídy s ocelí anebo UHPC prefabrikovanými prvky. Pro konstrukce projektované na životnost 100 a více let je nezbytné použít přesný materiálový model pro zajištění spolehlivosti konstrukčních prvků z UHPC a omezení dlouhodobých přetvoření. Na základě rešerše charakteristik UHPC a zejména jeho reologického chování je možné učinit několik závěrů:

- Je **nanejvýš vhodné prvky z UHPC ošetřovat**, zejména vhodné je ošetřování ve vodním prostředí a za zvýšené teploty. Pro omezení projevů smršťování je možné použít speciální příměsi na bázi polymerů, které vážou vodu a následně ji postupně uvolňují ve struktuře betonu (tzv. vnitřní ošetřování).
- Absolutní hodnota i rychlost nárůstu přetvoření od smršťování a dotvarování UHPC je **významně závislá na typu a délce ošetřování**. Ošetřováním za zvýšené teploty a v prostředí s vysokou relativní vlhkostí lze eliminovat až 70 % konečných přetvoření od smršťování a dotvarování.
- V případě **UHPC je většina dějů způsobená ošetřováním alespoň částečně nevratná**. Tedy neplatí, že ošetřování například ve vodě pouze oddaluje nárůst smršťování vysycháním, jak je pozorováno v případě smršťování od vysychání betonu běžné třídy. V případě UHPC ošetřování přetvoření smršťováním částečně eliminuje.
- Použití rozptýlené výztuže – **vysokopevnostních drátků** – významně ovlivňuje míru konečného přetvoření od dotvarování. Optimální dávka drátků se pohybuje mezi 1–1,5 %.

Na základě těchto pozorování byl v této práci definován extrapolovaný materiálový model B4 pro predikci reologických změn v UHPC. Model B4 popisuje chování betonu na základě velkého množství faktorů, což ho po extrapolaci činí vhodnou volbou pro použití na predikci chování prvků z UHPC. Jednotlivé vlivy ovlivňující okamžité

mechanické a dlouhodobé vlastnosti UHPC byly detailně představeny a model B4 byl adaptován tak, aby jeho jednotlivá omezení nebyla překážkou pro použití s prvky z UHPC. Pro kalibraci byly kromě dat z dostupných zdrojů použity i vlastní experimentální měření smršťování a dotvarování na vzorcích z UHPC s charakteristickou tlakovou pevností 140 MPa, které byly ošetřovány za různých teplot časně po betonáži. Mezi nejdůležitějšími adaptacemi modelu B4 pro UHPC na základě experimentů byla:

- Úprava množství složek směsi, zejména konstatováním, že **část cementu zůstává v UHPC jako plnivo**, neboť pro hydrataci není dostatek záměsové vody. Pro UHPC je charakteristický extrémně rychlý nárůst počáteční pevnosti (až 80 % 28denní pevnosti po 24 hodinách, což odpovídá charakteristice cementu s rychlým nárůstem pevnosti) a zároveň významný nárůst pevnosti dále po 28 dnech (což je charakteristika cementu s pomalým nárůstem pevnosti).
- Adaptace modelu B4 vzhledem k vlivu **ošetřování za zvýšené teploty v prostředí s vysokou relativní vlhkostí** včetně zahrnutí nevratných dějů spojených s ošetřováním, jako je například bobtnání při ošetřování v raném stádiu UHPC prvku nebo účinek vyšší míry autogenního smršťování při aplikaci ošetřování za zvýšené teploty. V případě provedených experimentů byl efekt bobtnání při zvýšené teplotě významný a způsobil snížení konečné celkové hodnoty přetvoření od smršťování o přibližně 35 %.
- Vzhledem k vlivům, které je velmi obtížné zahrnout do obecného modelu (inovativní polymerní příměsi redukující smršťování, použití významného množství superplastifikátoru a křemičitého úletu) bylo přistoupeno pro konkrétní směsi UHPC ke **kalibraci součinitelů vlivu příměsí** pomocí pokročilého genetického algoritmu. Program pro kalibraci modelu B4 na konkrétní směs UHPC je součástí výstupů této práce, je volně dostupný a je možné ho použít pro kalibraci libovolné směsi UHPC.

Přínosem řešené problematiky je, že na základě upraveného materiálového modelu pro dlouhodobé chování UHPC je možné definovat optimalizovaný technologický postup výroby předem předpjatých prvků z UHPC tak, aby byla dosažena vynikající jakost prefabrikovaných prvků při co nejkratším čase vnesení

předpětí. Velmi zajímavým konceptem pro možnou optimalizaci produkce je zahrnutí tahového dotvarování, které lze aplikovat do prvků předpínaných na předpínací dráze zároveň s aplikací ošetřování. V této práci byla tato možnost popsána na numerickém modelu prefabrikovaného stěnového dílce z UHPC. Použití tahového dotvarování může být zajímavým tématem dalšího experimentálního výzkumu v této oblasti, neboť pro bezporuchovou produkci prvků z UHPC je nutné pečlivě naladit a ověřit proces výroby. Mezi výzvy v navrženém procesu výroby předem předpjatých prefabrikovaných dílců patří vnesení tahového napětí do prvků (podržení napnutých lan), dále provedení vhodné metody ošetřování (například propařování při 90 °C v ošetřovacím stanu při použití parního generátoru) a následné vnesení předpětí do prvku. Jak bylo rozvedeno v poslední kapitole, sladěný proces výroby za použití technologické automatizace může redukovat výrobní cyklus až na 24 hodin při současné shodné nebo vyšší kvalitě prvků při porovnání s konvenčními výrobními cykly předem předpjatých prvků z UHPC.

Literatura

- [1] Kurrer, Karl-Eugen, ***History of the Theory of Structures – From Arch Analysis to Computational Mechanics***, Ernst & Son Publishing, 6/2008, ISBN 978-3-433-01838-5
- [2] He, J., Liu, Y., Chen, A., Yoda T., ***Mechanical Behavior and Analysis of Composite Bridges with Corrugated Steel Webs: State-of-the-Art***, International Journal of Steel Structures 9/2012, Vol. 12, No. 3, str. 321–338
- [3] Kanamoto, T., Osada, K., Iwatate, J., Usami O., ***Hybrid prestressed concrete bridges with steel truss webs-Sarutagawa bridge and Tomoegawa bridge***, Proceedings of Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh, 8/2015, str. 319–324
- [4] Fotografie *Pont du Bras de la Plaine – Ensemble*, Tento soubor podléhá licenci “*Creative Commons Uvedte autora 3.0 Unported*”, autor User:MOSSOT, cs.m.wikipedia.org/wiki/Soubor:Pont_du_Bras_de_la_Plaine_-1.jpg (online verze k 1. únoru 2022)
- [5] Kasuga, A., Nagamoto, N., Kata, K., Asai, H., ***Study of a bridge with a new structural system using ultra high strength fiber reinforced concrete***, Proceedings of 3rd fib Congress, Washington DC, 6/2010, Vol. 1, str. 235–245
- [6] Kata, K., Ashizuka, K., Miyamoto, K., Nakatsumi, K., ***Design and Construction of Butterfly Web Bridge***, Proceedings of Third International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, 8/2013, Kyoto, Japonsko
- [7] Kasuga, A., 2015, ***Development of butterfly web bridge***, Proceedings of Joint Conference on Advances in Bridge Engineering-III, Dhaka, Bangladesh, 8/2015, str. 35–48
- [8] Wendner, R., Hubler, M. H., Bažant, Z. P., ***Creep and shrinkage prediction models for concrete: uncertainty quantification***, Proceedings of the 11th International Probabilistic Workshop, Brno 2013, str. 517–515
- [9] **ČSN EN 1992-1-1 (73 1201) Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby (včetně oprav a změn: Oprava 1 7/2009, Z1 3/2010, Oprava 2 6/2011, Z2 7/2011)**, Český normalizační institut, 2006

- [10] **ČSN EN 1992-2** (73 6208) Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí – Část 2: Betonové mosty – navrhování a konstrukční zásady (včetně oprav a změn: Oprava 1 10/2009, Z1 3/2010), Český normalizační institut, 2007
- [11] Special Activity Group 5, fédération internationale du béton (2012), **Bulletin No 65. Model Code 2010 - Final draft, Vol 1**, ISBN: 978-2-88394-105-2, 2012
- [12] Bažant Zdeněk P., et al., *RILEM draft recommendation: TC-242-MDC multi-decade creep and shrinkage of concrete: material model and structural analysis Model B4 for creep, drying shrinkage and autogenous shrinkage of normal and high-strength concretes with multi-decade applicability*, Materials and Structures, Vol. 48, 2/2015, str. 753–770
- [13] Bažant, Zdeněk P., Baweja, Sandeep, **Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Members: Model B3**, Am. Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2000, str. 1–83
- [14] Burkart, I., Mueller, H. S., **Creep and shrinkage characteristics of ultra high strength concrete (UHPC)**, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Německo, 3/2008, str. 469–476
- [15] Graybeal, B. A., **Material Property Characterization of Ultra-High Performance Concrete**, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-06-103, 8/2006, str. 1-176
- [16] Francisco, P., Benboudjema, F., Rougeau, P., Torrenti, J.-M., **Creep and shrinkage prediction for a heat-treated Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concrete**, Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials, Kassel University Press, Kassel, Německo, 3/2012, str. 325–332
- [17] Zuo, W., Feng, P., Zhong, P., Tian, Q., Gao, N., Wang, Y., Yu, C., Miao, C., **Effects of novel polymer-type shrinkage-reducing admixture on early age autogenous deformation of cement pastes**, Cement and Concrete Research, Vol. 100, 2017, ISSN 0008-8846, str. 413-422

- [18] Androuët, C.; Charron, J.-P., ***Shrinkage Mitigation of an Ultra-High Performance Concrete Submitted to Various Mixing and Curing Conditions***, *Materials* **2021**, *14*, 3982, doi.org/10.3390/ma14143982
- [19] Flietstra, J. C., Ahlborn, T. M., Harris, D. K., Silva, H. M., ***Creep Behavior of UHPC under Compressive Loading with Varying Curing Regimes***, Proceedings of the 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction materials, Kassel University Press, Kassel, Německo, 3/2012, str. 333–340
- [20] Bărbos, G.-A., ***Long-term Behavior of Ultra – High Performance Concrete (UHPC) Bended Beams***, *Procedia Technology*, Vol. 22, 2016, ISSN 2212-0173, str. 203-210, doi.org/10.1016/j.protcy.2016.01.045
- [21] Yi X., Jiaping L., Jianzhong L., Ping Z., Qianqian Z., Linhua J., ***Experimental studies and modeling of creep of UHPC***, *Construction and Building Materials*, Vol. 175, ISSN 0950-0618, 6/2018, str. 643-652
- [22] ***Tips on how to prevent concrete discolouration***, blog.ecoratio.com/how-to-prevent-discolouration, 9/2010, (online verze k 1. únoru 2022)
- [23] Awasthi, A., Matsumoto, K., Nagai, K., Asamoto, S., Goto, S., ***Investigation on possible causes of expansion damages in concrete – a case study of sleepers in Indian Railways***, *Journal of Asian Concrete Federation*, Vol. 3, No. 1, 6/2017, ISSN 2465-7964, str. 49-66
- [24] James, T., Malachi, A., Gadzama, E. W., Anametemfioka, V., ***Effect of Curing Methods on the Compressive Strength of Concrete***, *Nigerian Journal of Technology*, 30(3), 2011, str. 14-20
- [25] Liu, J., Farzadnia, N., Khayat, K. H., and Shi, C., ***Effects of SAP characteristics on internal curing of UHPC matrix***, *Construction and Building Materials*, Vol. 280, 2021, 122530, ISSN 0950-0618
- [26] Justs, J., Wyrzykowski, M., Bajare, D., and Lura, P., ***Internal curing by superabsorbent polymers in ultra-high performance concrete***, *Cement and Concrete Research*, Vol. 76, 2015, ISSN 0008-8846, str. 82–90

- [27] Heinz, D., Ludwig, H.-M., ***Heat Treatment and the Risk of DEF Delayed Ettringite Formation in UHPC***, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Německo, 9/2004, str. 717–730
- [28] Santos, S. F., Rodrigues, J. A., Tonoli, G. H. D. et al., ***Effect of colloidal silica on the mechanical properties of fiber–cement reinforced with cellulosic fibers***, Journal of Materials Science, Vol. 49, 2014, str. 7497–7506, doi.org/10.1007/s10853-014-8455-1
- [29] Loe, D., Belkowitz, J., Miller, S. H., ***Better Concrete Starting at the Finish: Long-term benefits of colloidal silica-based finishing***, The Construction specifier, vol 67, 1/2014, ISSN 0010-6925, str. 32–45
- [30] Koh, K.T.; Park, J.J.; Ryu, G.S.; Kang, S.T., ***Effect of the compressive strength of ultra-high strength steel fiber reinforced cementitious composites on curing method***, Journal of Korean Society of Environmental Engineers 2007, 27, str. 427–432
- [31] Park, J.-S., Kim Y. J., Cho, J.-R., Jeon, S.-J., ***Early-Age Strength of Ultra-High Performance Concrete in Various Curing Conditions***, Journal Materials 2015, Vol. 8, ISSN 1996-1944, str. 5537–5553
- [32] Graybeal, B. A., ***Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community***, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, FHWA-HRT-13-060, 6/2013, str. 1-163
- [33] Ay, L., ***Curing Tests on Ultra High Strength Plain and Steel Fibrous Cement Based Composites***, Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Německo, 9/2004, str. 695–702
- [34] Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-obeidah, A., Nassif, H., Wang, H., ***New development of ultra-high-performance concrete (UHPC)***, Composites Part B: Engineering, Vol. 224, 2021, 109220, ISSN 1359-8368
- [35] Ono, T., Sugimoto, T., Shinkai, S., Sada, K., ***Lipophilic polyelectrolyte gels as super-absorbent polymers for nonpolar organic solvents***, Nature Materials, Vol. 6, 2007, str. 429–433, doi.org/10.1038/nmat1904
- [36] Kawashima, S., Hou, P., Corr, D. J., Shah, S. P., ***Modification of cement-based materials with nanoparticles***, Cement and Concrete Composites, Vol. 36, 2013, ISSN 0958-9465, str. 8-15

- [37] Schachinger, I., Hilbig, H., Stengel, T., ***Effect of curing temperature at an early age on the long-term strength development of UHPC***, Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel University Press, Kassel, Německo, 3/2008, str. 205–212
- [38] Chhun, P., Sellier, A., Lacarriere, L., Chataigner, S., Gaillet, L., ***Incremental modeling of relaxation of prestressing wires under variable loading and temperature***, Construction and Building Materials, Vol. 163, 2018, ISSN 0950-0618, str. 337–342
- [39] Yanni, V. Y. G., ***Multi-scale investigation of tensile creep of ultra-high performance concrete for bridge applications***, disertační práce Georgia Institute of Technology, 12/2009, str. 1–267
- [40] Kusumawardaningsih, Y., Fehling, E., Ismail, M., ***UHPC Compressive Strength Test Specimens: Cylinder or Cube?***, Procedia Engineering, Vol. 125, 2015, ISSN 1877-7058, str. 1076–1080,
- [41] Riedel, P., Leutbecher, T., ***Effect of specimen size on the compressive strength of ultra-high performance concrete***, Proceedings of 3rd International Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC 2017), Montpellier, France, 10/2017, str. 251–260
- [42] Sudarshan, N. M., Chandrasekhar Rao, T., ***Experimental Investigation of UHPFRC Cube and Cylinder Compression Test at Elevated Temperature***, Open Journal of Civil Engineering, 2017, Vol. 7, ISSN: 2164-3164, str. 282–296
- [43] Kang, S.-H., Lee, J.-H., Hong, S.-G., Moon, J., ***Microstructural Investigation of Heat-Treated Ultra-High Performance Concrete for Optimum Production***, Materials 2017, Vol. 10, 1106
- [44] Ibragimov, R., Pimenov, S., Kiyamov, I., Mingazov, R., & Kiyamova, L., ***Comparison of the effect of superplasticizing admixtures on the processes of cement hydration during mechanochemical activation***. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 4, No. 6(82), 2016, str. 56–63
- [45] Šiler, P., Kolářová, I., Krátký, J., Havlica, J., Brandštetr, J., ***Influence of superplasticizers on the course of Portland cement hydration***, Chemical Papers, Vol. 68, No. 1, 2014, ISSN 0366-6352, str. 90–97

- [46] Alsalman A., Dang C. N., Prinz G. S., Hale W. M., ***Evaluation of modulus of elasticity of ultra-high performance concrete***, Construction and Building Materials, Vol. 153, **2017**, ISSN 0950-0618, str. 918–928
- [47] Ahlborn, T. M., Peuse, E. J., Mission, D. L., ***Ultra High Performance Concrete for Michigan Bridges: Material Performance – Phase I Final Report***, Center for Structural Durability Michigan Tech Transportation Institute, 11/**2008**, str. 1–152
- [48] Sobuz H.R., Visintin P., Mohamed Ali M.S., Singh M., Griffith M.C., Sheikh A.H., ***Manufacturing Ultra-High Performance Concrete Utilizing Conventional Materials and Production Methods***, Construction and Building Materials, Vol. 111, 5/**2016**, ISSN 0950-0618, str. 251–261
- [49] Magureanu, C., Sosa, I., Negrutiu, C., Heghes, B., ***Mechanical properties and durability of ultra-high-performance concrete***, ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 2, **2012**, str. 177–183
- [50] Oluokun, F. A., Burdette, E. G., Deatherage, J. H., ***Rates of Development of Physical Properties of Concrete at Early Ages***, Transportation Research Record No. 1284: Materials and Construction, WASHINGTON, D.C., **1990**, str. 16–22
- [51] Zhang, Z., Thiery, M., Baroghel-Bouny, V., ***Investigation of moisture transport properties of cementitious materials***, Cement and Concrete Research, Vol. 89, **2016**, ISSN 0008-8846, str. 257–268
- [52] Nilsson, L.O., Mjörnell, K., ***A macro-model for self-desiccation in high performance concrete***, Proceedings of the fourth international research seminar, Gaithersburg, Maryland, USA, 6/**2005**
- [53] Yang Q., Zhang S., ***Self-desiccation mechanism of high-performance concrete***, Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, Vol. 5, 12/**2004**, str. 1517–1523
- [54] Wyrzykowski, M., Lura, P., ***Effect of relative humidity decrease due to self-desiccation on the hydration kinetics of cement***, Cement and Concrete Research, Vol. 85, **2016**, ISSN 0008-8846, str. 75–81
- [55] Rutten, D., ***Evolutionary Principles applied to Problem Solving***, Grasshopper Blog – Algorithmic modeling for Rhino 9/**2010**, (online verze k 1. únoru 2022) www.grasshopper3d.com/profiles/blogs/evolutionary-principles

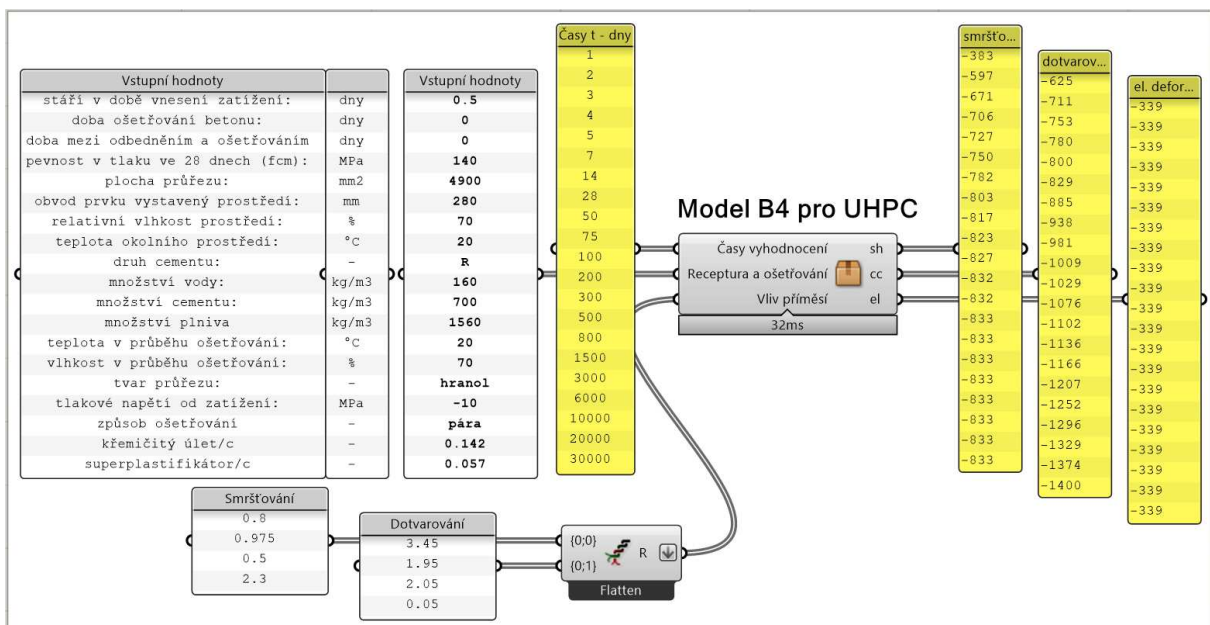
- [56] Příbramský, V., Kopálová, M., Vráblík, L., ***Experimentální analýza vzniku smykových trhlin předpjatého stěnového prvku z UHPC***, Beton TKS, Vol. 113, 10/2019, 5: Beton a architektura, ISSN 1213-3116, str. 52–57
- [57] Ashizuka, K., Miyamoto, K., Kata, K., Kasuga, A., 2012, ***Construction of a butterfly web bridge***, Journal of Civil Engineering and Architecture, Vol. 8, No. 11, 11/2014, ISSN 1934-7359, str. 1453–1456
- [58] Kheir J., Klausen A., Hammer T. A., Meyst L., Hilloulin B., Tittelboom K., Loukili A., Belie N., ***Early age autogenous shrinkage cracking risk of an ultra-high performance concrete (UHPC) wall: Modelling and experimental results***, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 257, 2021, 108024, ISSN 0013-7944, str. 1–17
- [59] Příbramský, V., Kopálová, M., Vráblík, L., ***Inovace v navrhování mostů velkých rozpětí s použitím konstrukčních prvků z UHPC***, Beton TKS, Vol. 94, 8/2016, 4: Mosty, ISSN 1213-3116, str. 66–71

Software použitý při zpracování této práce

- Scia Engineer 21** - Vizualizace konstrukcí, statická analýza předpínacího rámu s UHPC prvkem a analýza chování stěnového prefabrikátu z UHPC
- Rhinoceros 7** - Pro modelování modelu B4 byl použit i pro vizualizace doplněk Grasshopper a pro vyhodnocení sad výsledků genetický algoritmus Galapagos

Příloha 1 – Manuál k programu „B4 for UHPC“

Program vytvořený pro účely predikce smršťování a dotvarování modelem B4 a kalibrace modelu B4 pro UHPC je volně dostupný zdarma na www.food4rhino.com po vyhledání „UHPC creep and shrinkage“. Program je napsán ve formátu grafického skriptu v programu Rhinoceros 7. Pro použití skriptu na vlastní nebo již kalibrovanou směs UHPC je nutné mít platnou licenci komerčního programu Rhinoceros 7 (nebo novější) nebo případně zkušební verzi. Po rozbalení „zip“ archívu je dostupný soubor „B4_UHPC.gh“, který obsahuje definici programu použitou ve 2 variantách. První variantou je základní program, který na základě všech vstupních parametrů vypočítá dle modelu B4 při známé kalibraci hodnoty přetvoření od smršťování, dotvarování a od pružného přetvoření prvku, jak je patrné na obrázku níže.



Obr. P2.1: Základní použití programu, zadání vstupních hodnot a získání výsledků.

Vstupem pro výpočet jsou:

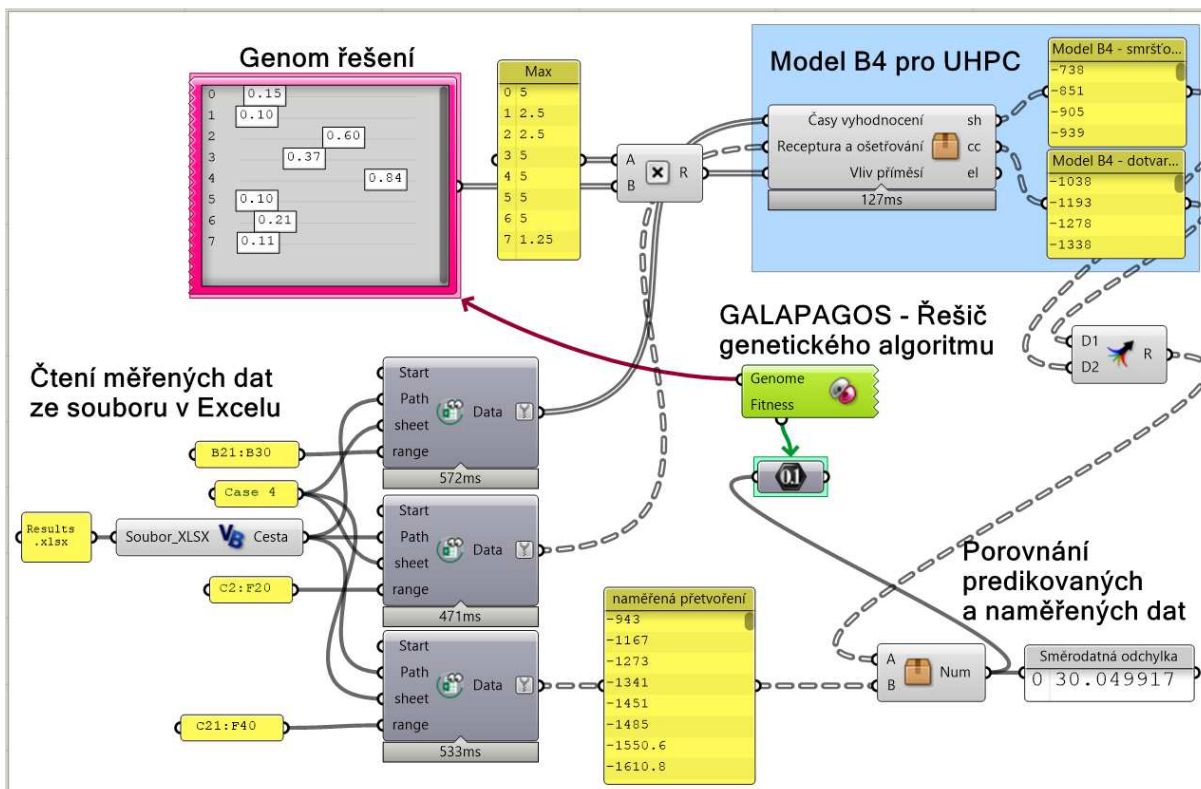
- Seznam vstupních hodnot obsahující 19 hodnot popisující materiálové charakteristiky směsi, způsob a délku ošetřování a dobu zatížení a popis teploty a vlhkosti okolního prostředí v průběhu a po ošetřování. Vysvětlení jednotlivých vstupních hodnot a jejich jednotka je uvedeno vlevo na Obr. P2.1.

- Empirické součinitele smršťování a dotvarování – celkem 8 součinitelů, které jsou popsány v kapitole 0 této práce. Empirické hodnoty pro nekalibrovanou směs UHPC je možné získat genetickým algoritmem, viz níže.
- Seznam časů, pro které má být predikováno smršťování a dotvarování. Z omezení modelu B4 je nutné vyhodnocovat hodnoty přetvoření do smršťování a dotvarování až pro časy po aplikaci ošetřování, tedy vyhodnocované časy musí být větší než délka ošetřování uvedená ve vstupních datech. Pro jeden zvolený čas je délka běhu programu 3-4 ms, tedy je realistické vyhodnocovat naráz hodnotu například pro každý den mezi dnem 1 a dnem 36500 (100 let), délka výpočtu 36500 časových bodů zabere přibližně 100 s. Doporučeno je vyhodnocovat delší intervaly, než 1 den zejména pro časy odpovídající vyššímu stáří prvku – velmi dobře funguje Fibonacciho posloupnost, tedy například 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21 ... $n_i = n_{i-2} + n_{i-1}$. Pro pokrytí časového intervalu 1 den – 100 let stačí 23 hodnot, což odpovídá době běhu programu kolem 70 ms. Fibonacciho posloupnost umožní získat detailní data pro časy krátce po betonáži a hodnoty ke konci životnosti již mají intervaly vyšší, protože v této době již je i změna hodnoty přetvoření nižší.

Druhou variantou programu je využití genetického algoritmu pro zjištění hodnot příměsí dle provedených experimentálních dat. V tomto případě jsou potřebné stejné vstupní parametry, jak byly popsány výše, a navíc je nutné pro zvolené časy vyhodnocení mít změřené hodnoty přetvoření od dotvarování a smršťování dle provedeného experimentu. Tato varianta programu je zobrazená na obrázku níže. Oproti jednoduché verzi programu obsahuje několik rozšíření:

- Vstupní data jsou čtena funkcemi přímo z tabulek vstupních a výsledných hodnot v programu MS Excel (na obrázku vlevo dole). Alternativně lze hodnoty vložit přímo do programu, jak bylo ukázáno výše.
- Součinitele příměsí jsou definovány součinem maximální hodnoty a „genomu“ řešení, který má hodnoty mezi 0-1 (na obrázku vlevo nahoře). Tyto hodnoty jsou napojeny na řešič genetického algoritmu „Galapagos“.
- Porovnány jsou výstupní data modelu B4 a naměřené hodnoty (na obrázku vpravo dole). Přesnost řešení je zobrazena jako směrodatná odchylka mezi

naměřenými a predikovanými daty. Na hodnotu směrodatné odchylky se odkazuje řešič Galapagos a cílem řešiče je získat minimální výstupní hodnotu na základě vstupního genomu 8 parametrů empirických součinitelů příměsí.



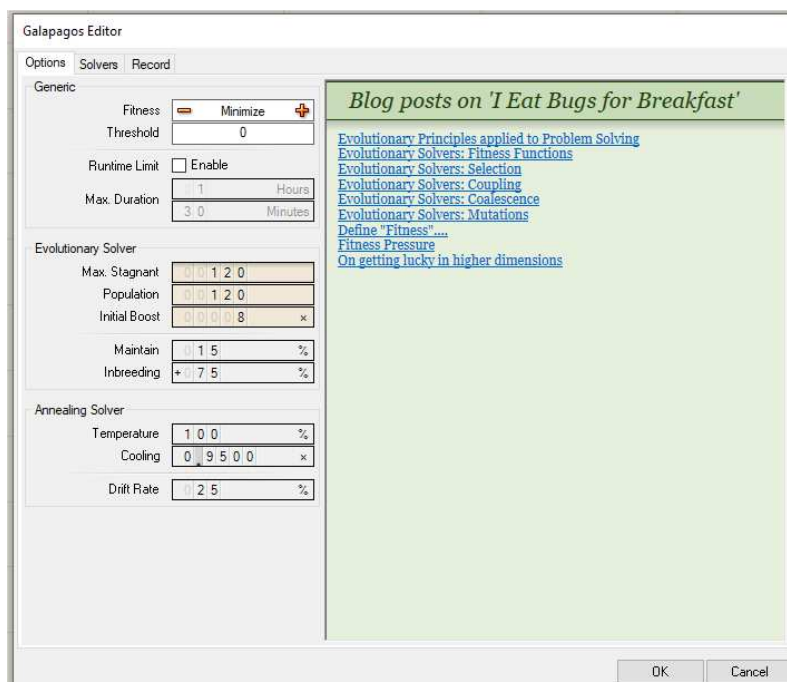
Obr. P2.2: Schéma výpočtu součinitelů příměsí pomocí genetického algoritmu.

Po dvojkliku na komponentu Galapagos se spustí okno nastavení genetického algoritmu (Obr. P2.3). V nastavení jsou nejdůležitější hodnoty populace generického algoritmu označené jako „*population*“ a „*initial boost*“.

- „*Population*“ je množství genomů uvažovaných v každé iteraci. Genomy s nejnižší výslednou směrodatnou odchylkou jsou propagovány do dalších iterací. Optimální velikost populace je 80-150, přičemž neplatí, že pro vyšší populaci získáme přesnější výsledek rychleji. Zvýšení populace prodlouží jednotlivé iterace, avšak výhodné pro konvergenci řešení je spíše množství iterací než samotná velikost populace.
- „*Initial boost*“ je způsob, jak zvýšit množství variant v první iteraci. Jelikož v první iteraci se genetický algoritmus neopírá o výsledky předchozí iterace, je zde provedeno vyhodnocení náhodné populace. Hodnota zvýšení počtu

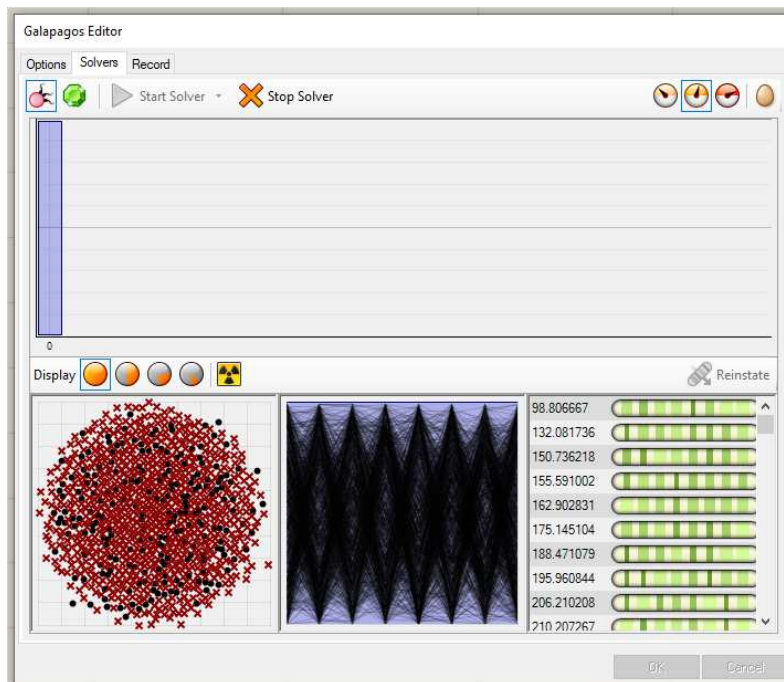
genomů v první iteraci je vhodné volit mezi 5-10; při nízké hodnotě je možné, že nebude nalezen genom blízko optimálnímu řešení a konvergence dojde pouze k lokálnímu minimu. Příliš velké zvětšení populace první iterace na druhou stranu prodlužuje výpočet.

Doporučené nastavení genetického algoritmu je na obrázku níže. Při běhu výpočtu jednoho genomu 70 ms je při populaci 120 doba trvání jedné iterace přibližně 10 s.



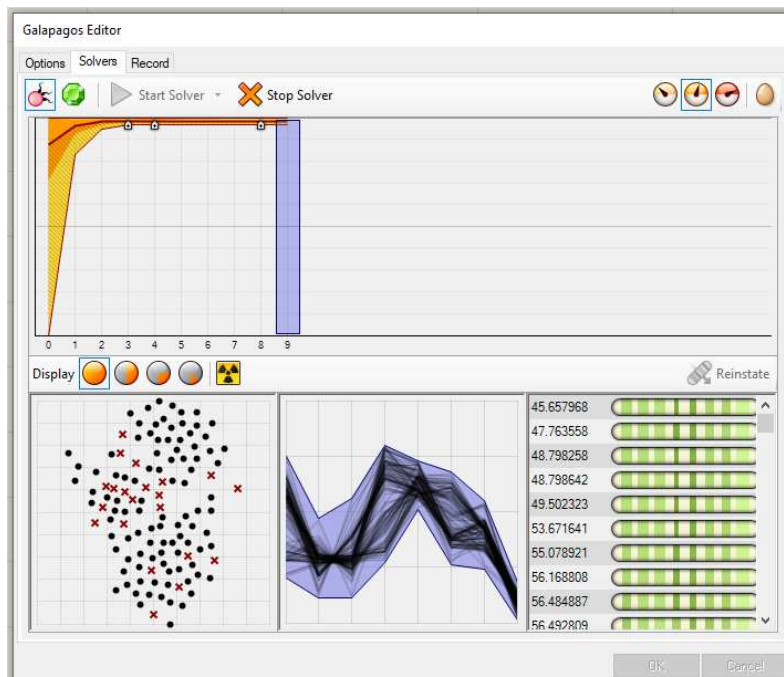
Obr. P2.3: nastavení genetického algoritmu.

Po spuštění začne generický algoritmus generovat zvolené množství genomů v populaci a nejlepší genomy se propagují do další iterace a nevhodné genomy (vedoucí na příliš vysokou směrodatnou odchylku mezi měřením a predikcí) jsou eliminovány. Dále mezi iteracemi probíhá křížení silných genomů a výsledek se zpřesňuje.



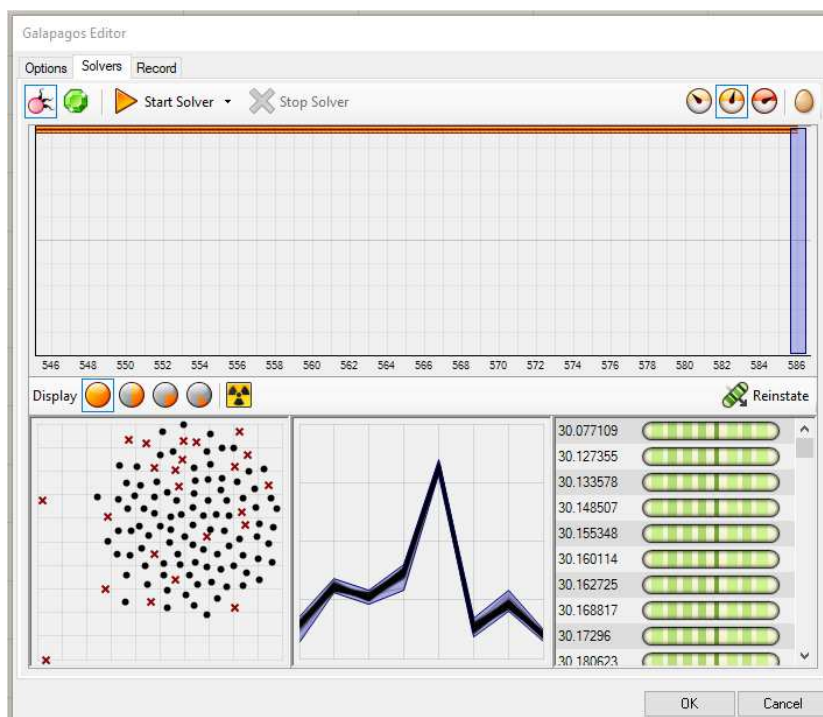
Obr. P2.4: Populace genomů po první iteraci.

Jelikož první iterace vyhodnocuje soubor náhodných genomů, je pravděpodobné, že směrodatná odchylka bude stále velmi vysoká po této úvodní iteraci, jak je patrné na Obr. P2.4 výše (nejlepší genom má odchylku 98,8 $\mu\text{m}/\text{m}$). Po 9 dalších iteracích se směrodatná odchylka nejlepšího genomu sníží o polovinu na 45,65 $\mu\text{m}/\text{m}$ (Obr. P2.5).



Obr. P2.5: Populace genomů po 10. iteraci.

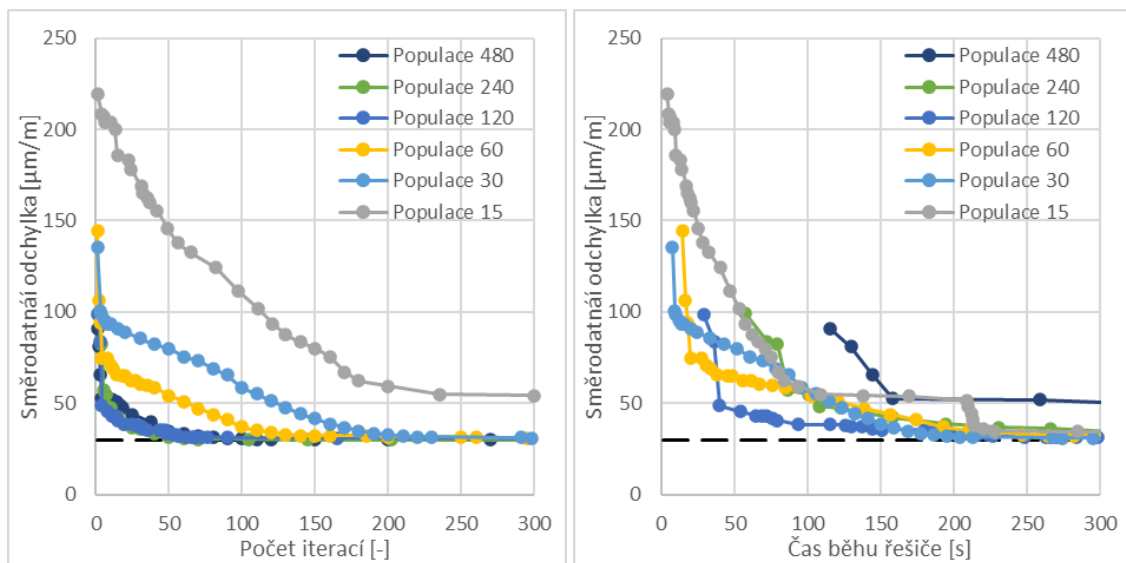
Po 50 iteracích již dochází ke konvergenci genomů kolem hodnoty 32 $\mu\text{m}/\text{m}$ a jako poslední iteraci volíme tu, kde nebyl po dobu 120 iterací (toto nastavení je na Obr. P2.3 označeno jako „*max. stagnant*“) nalezen lepší genom. Po této době se řešič genetického algoritmu sám ukončí a je možné použít získanou nejlepší hodnotu. Zároveň je patrný jen minimální rozdíl mezi nejlepšími 10 genomy (na Obr P2.6 vpravo dole).



Obr. P2.6: Populace genomů po poslední iteraci.

Získané hodnoty empirických součinitelů kalibrují model B4 a model je následně možné použít pro predikci chování této směsi UHPC při různých časech a způsobech ošetřování prvků z této směsi.

Na grafu na Obr. P2.7 a tabulce níže jsou porovnány rychlosti konvergence řešení pro různé nastavení řešiče pro stejná vstupní data.



Obr. P2.7: Konvergence pro různá nastavení řešiče Galapagos; **Vlevo**: konvergence dle množství iterací, **Vpravo**: konvergence dle času výpočtu

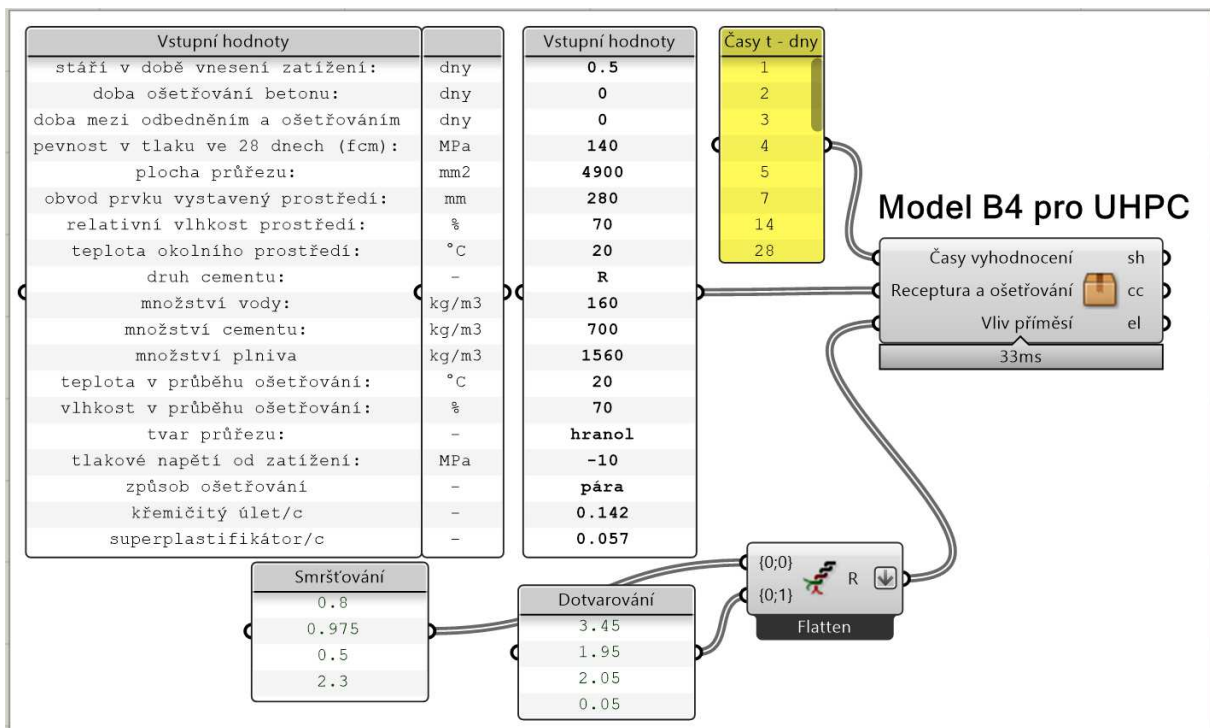
Z grafů na obrázku P2.7 je patrné, že při použití malého množství genomů v populaci (15) je potřeba výrazně více iterací, než pro doporučenou hodnotu 60-120. Příliš malé množství genomů může zapříčinit, že se výsledek ustálí na lokálním extrému a nebude nalezen globální extrém. Na druhou stranu, použití nadměrného množství genomů v populaci (240 nebo 480) již nevede na získání přesnějšího výsledku a zároveň výpočetní čas roste lineárně. Nehledě na dobu výpočtu, použití 60 a více genomů v populaci bezpečně zkonvertuje na hodnotu globálního extrému.

Příloha 2 – Celkový modifikovaný model B4

Celkový modifikovaný program pro výpočet modelu B4 byl napsán v prostředí Rhinoceros v modulu Grasshopper metodou grafického skriptování. Tento způsob umožňuje čitelnost kódu, neboť každá komponenta (funkce) samostatně přesně ukazuje, jaké vstupy a výstupy očekává. Komponenty jsou na sebe navzájem napojeny a je tak možné vizualizovat celý algoritmus výpočtu. Celý program je skrytý za jedinou komponentou (Obr. P3.1), která má 3 sady vstupních hodnot:

- časy pro vyhodnocení,
- charakteristiku směsi včetně způsobu ošetřování,
- součinitele příměsí.

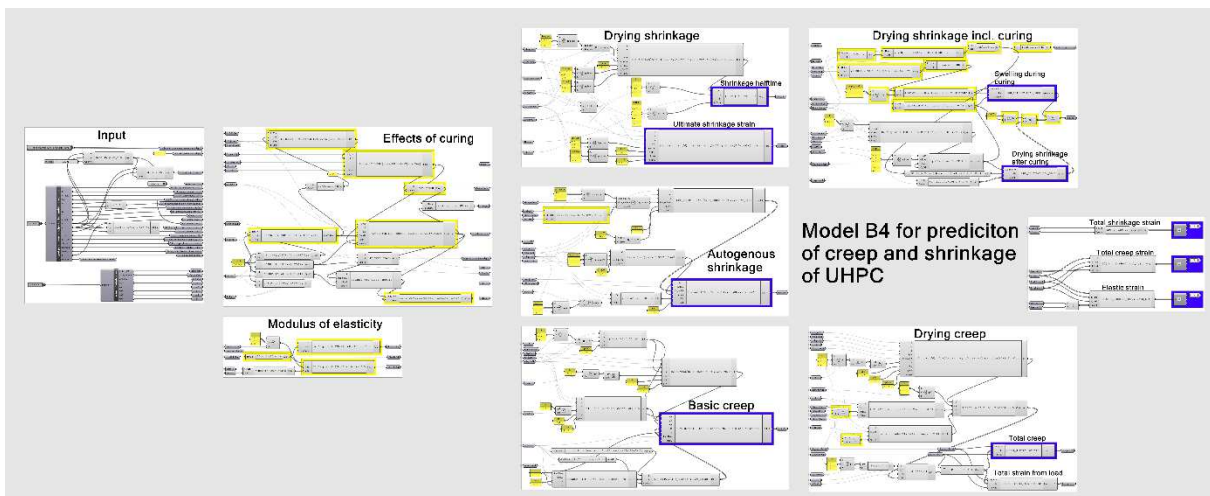
Výstupem programu jsou pro jednotlivé zadané časy seznamy hodnot obsahující přetvoření od smršťování „sh“, dotvarování „cc“ a pružná deformace „el“.



Obr. P3.1: Pohled na vstupy programu pro výpočet modelu B4 pro UHPC

Samotná komponenta modelu B4 se skládá z několika dílčích částí, které logicky oddělují postup výpočtu (Obr. P3.2). Program je dostupný v angličtině, a proto i označení jednotlivých oddílů programu jsou anglicky. Jelikož se stále jedná o formu programování, je označení proměnných zjednodušené oproti vztahům, které jsou

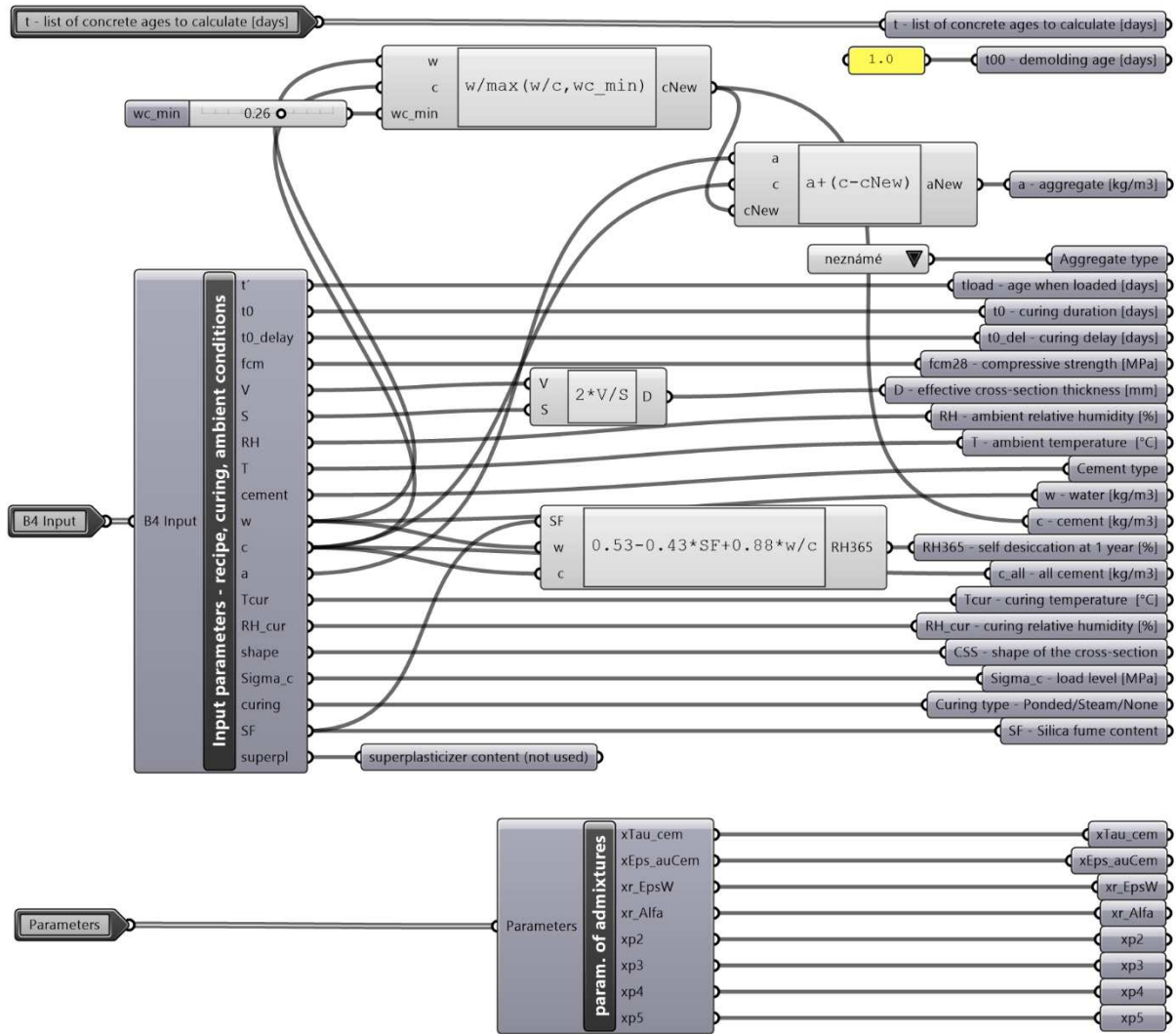
uvedené v této práci (pro název proměnné není možné použít spodní index, interpunkci nebo závorky pro označení funkce). Označení proměnných je uvedeno v bloku „*Input*“, ze kterého si další bloky programu berou jednotlivé potřebné proměnné. V programu jsou vyznačené důležité výsledky modrým rámečkem. Části programu, které byly adaptované pro UHPC oproti původnímu modelu B4 jsou označeny žlutým rámečkem. V blocích „*Effects of curing*“ a „*Modulus of elasticity*“ jsou uvedeny základní přepočty stáří betonu a modulu pružnosti s vlivem ošetřování. V bloku „*Drying shrinkage*“ je vypočten poločas smršťování vysycháním a v bloku „*Drying shrinkage incl. curing*“ je dopočteno přetvoření od smršťování v jednotlivých časech a tento výpočet je doplněn o zahrnutí nevratných účinků ošetřování. Autogenní smršťování v jednotlivých časech je vypočteno v bloku „*Autogenous shrinkage*“. Bloky „*Basic creep*“ a „*Drying creep*“ zobrazují výpočet funkce základního dotvarování a po použití výstupů z bloku popisujícího vysychání jsou vypočteny hodnoty dotvarování při vysychání. Vpravo na Obr. P3.2 jsou finální výstupy programu.



Obr. P3.2: Dělení programu na bloky dle logické posloupnosti výpočtu

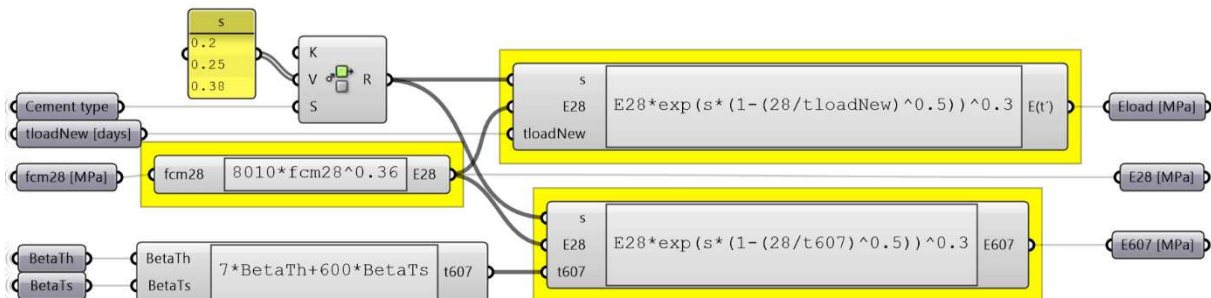
Pro čitelné zobrazení bloků a vztahů mezi nimi jsou jednotlivé bloky zobrazeny jako jednotlivé obrázky na následujících stranách. Jednotlivé bloky mají jednotný vzhled, kdy na levé straně jsou vstupy nutné pro výpočet bloku (ty vycházejí buď ze vstupních hodnot programu nebo z mezivýsledků předchozích bloků) a vpravo jsou výstupní hodnoty bloku použité v dalších blocích. Tímto je program čitelný i když je rozdělen. Program samotný je přidán na CD disk dostupný s touto prací a dále bude dostupný online.

Input



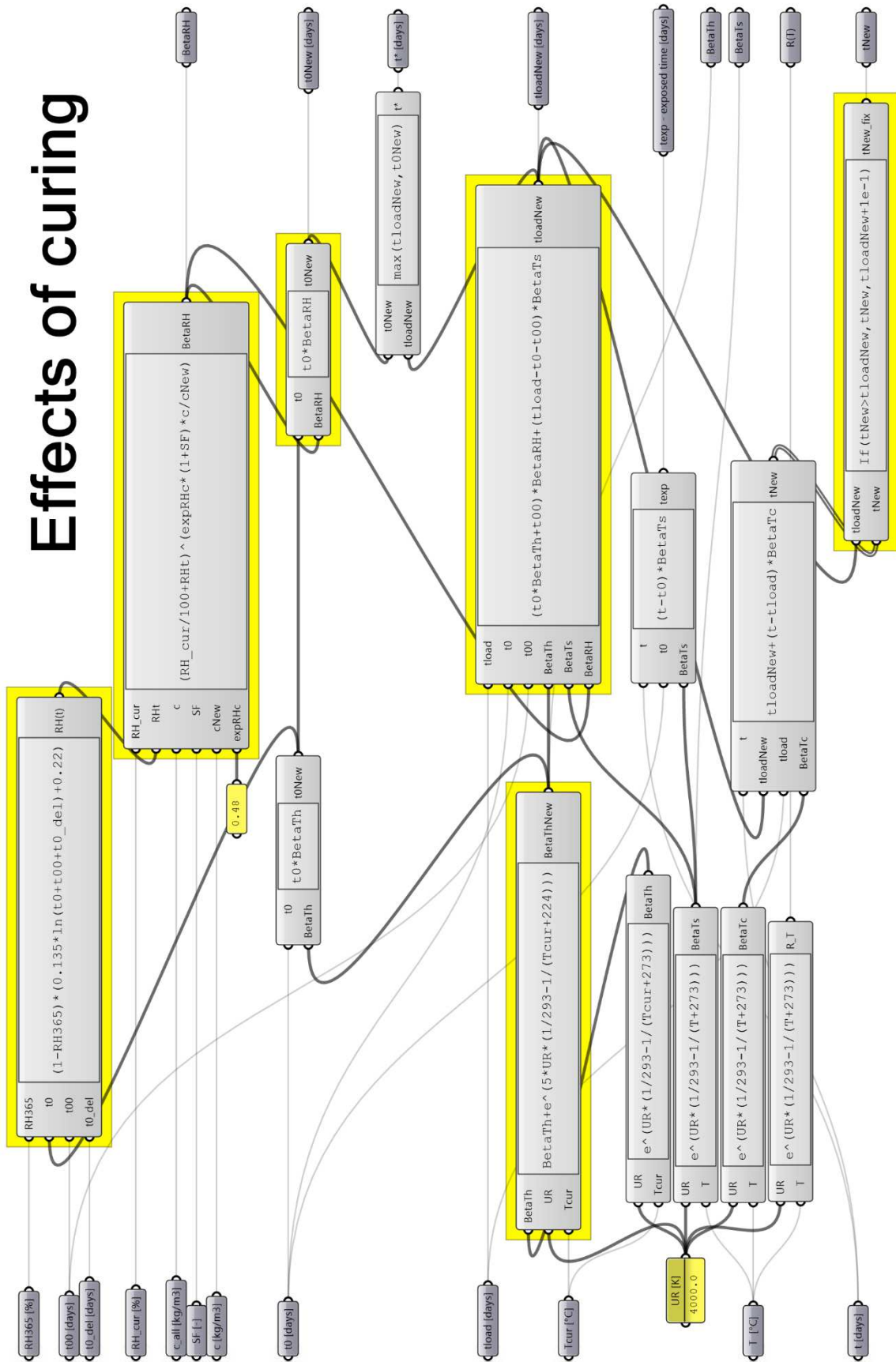
Obr. P3.3: Blok seznamu základních a přepočtených vstupních hodnot

Modulus of elasticity

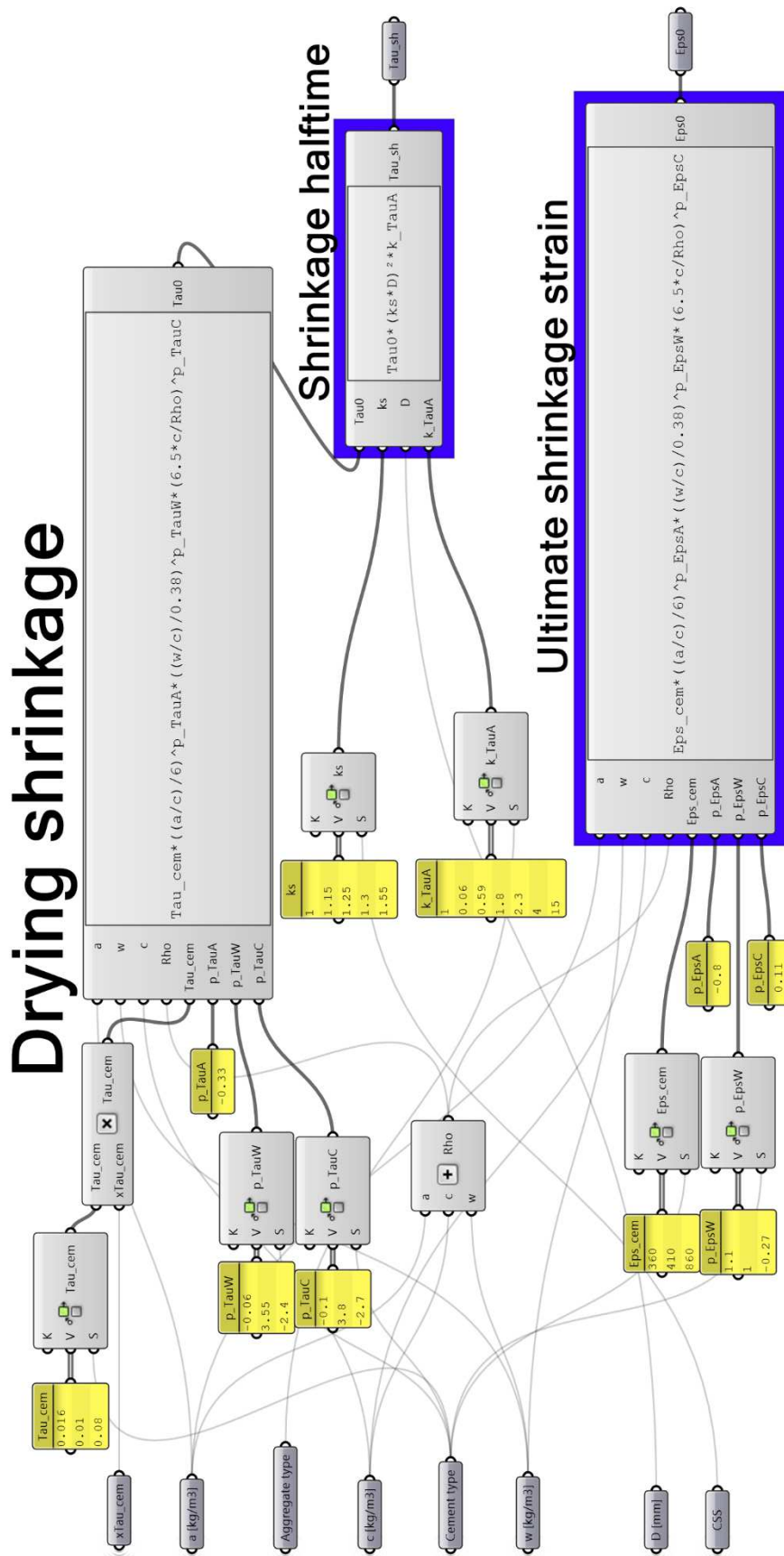


Obr. P3.4: Blok výpočtu modulů pružnosti použitých dále ve výpočtu

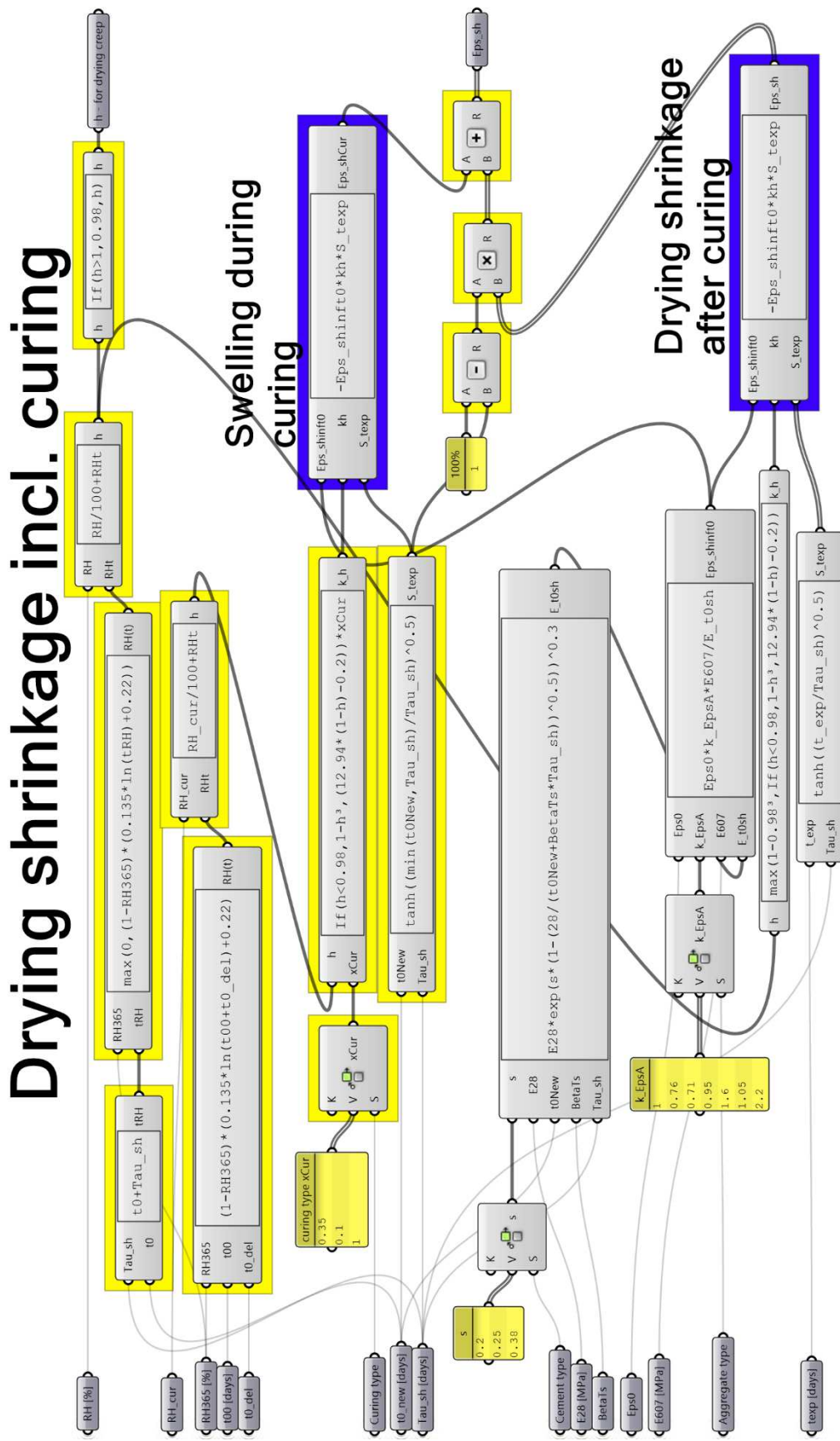
Effects of curing



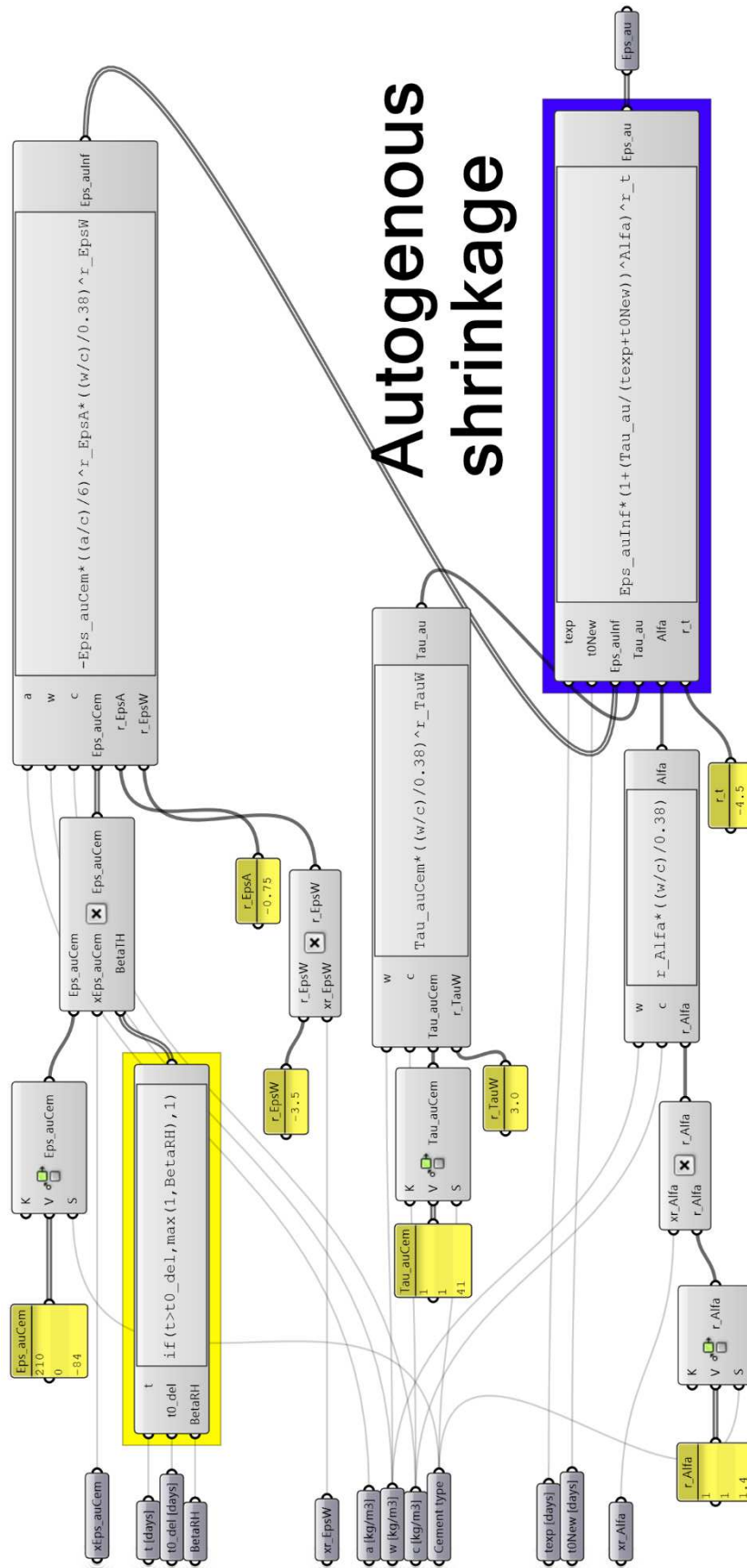
Obr. P3.5: Blok výpočtu parametrů zohledňující dobu a způsob ošetřování



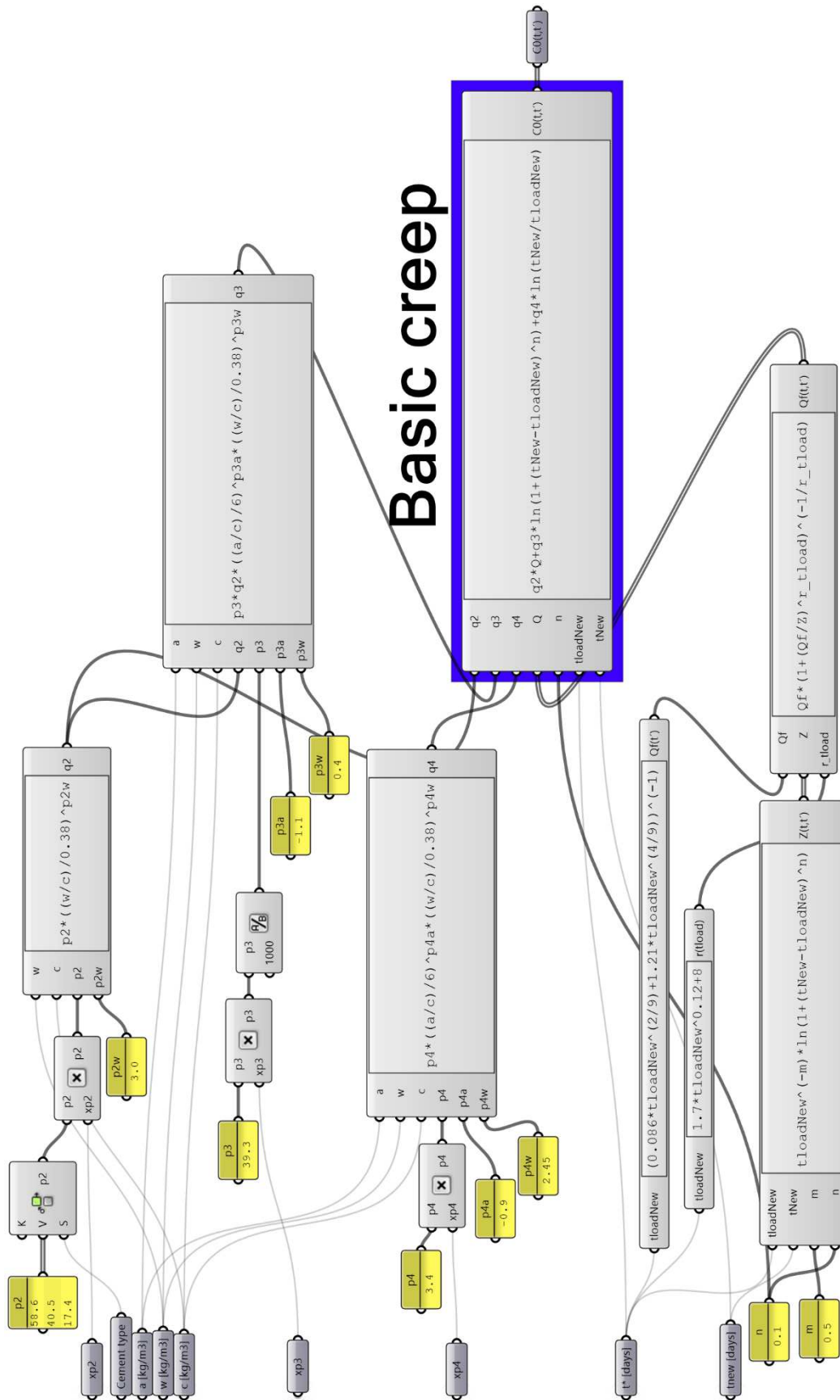
Obr. P3.6: Blok výpočtu poločasu smršťování a konečné hodnoty smršťování vysycháním



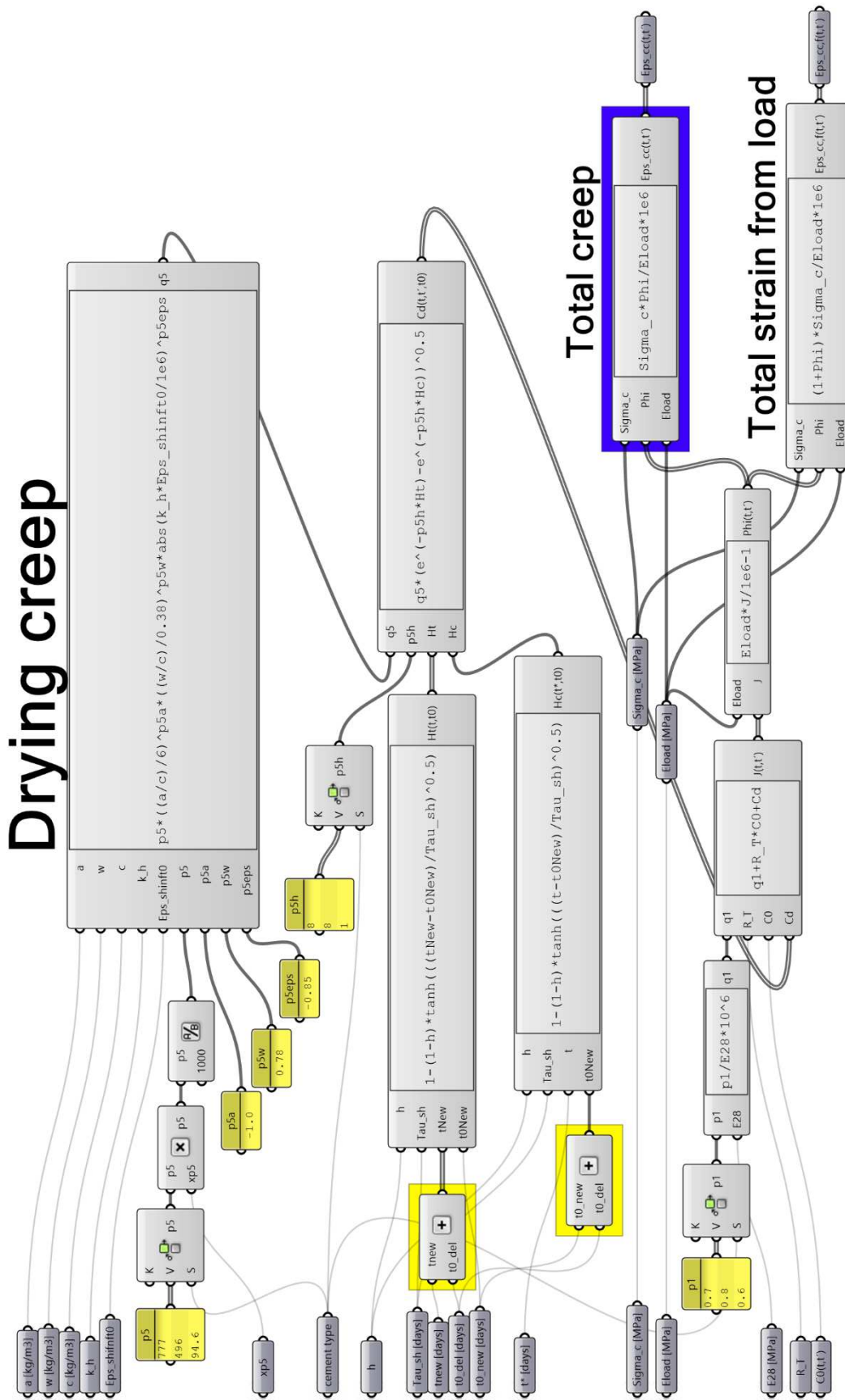
Obr. P3.7: Blok výpočtu smršťování vysycháním včetně nevratných účinků ošetřování



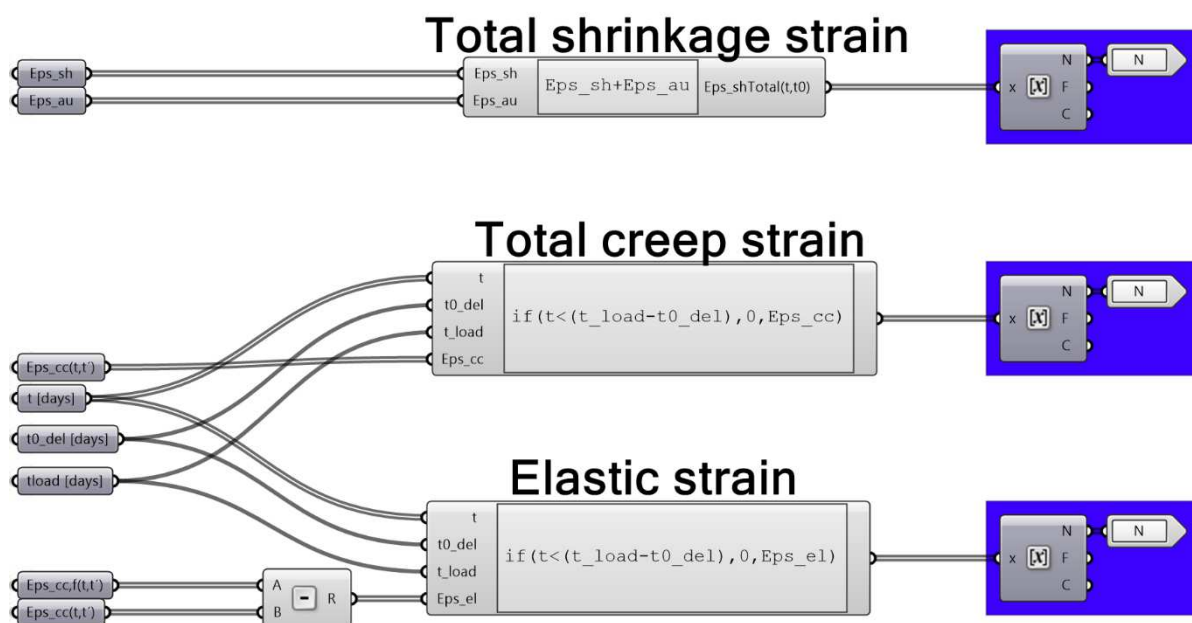
Obr. P3.8: Blok výpočtu autogenního smršťování



Obr. P3.9: Blok výpočtu základní funkce dotvarování



Obr. P3.10: Blok výpočtu dotvarování při vysychání a celkového dotvarování



Obr. P3.11: Výsledné hodnoty

Příloha 3 – Protokol měření KÚ 2021

		KÚ 100 LET KLOKNEROVA ÚSTAVU ČVUT V PRAZE	ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE KLOKNERŮV ÚSTAV Šolínova 7, 166 08 Praha 6 - Dejvice
Expertní zpráva č. 2000 J 111	Datum vydání zprávy 3. listopadu 2021	Oddělení KÚ Experimentální tel. +420 224 353 537	
Objednatel: Ing. Vladimír Příbramský Katedra betonových a zděných konstrukcí Fakulta stavební ČVUT v Praze Thákurova 2077/7 166 29 Praha 6			
Expertní zpráva: Studie vlivu ošetřování UHPC na jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti, smrštění a dotvarování.			
Vypracoval:	Ing. Karel Hurtig		
Spolupráce:	Ing. David Čítek Ing. Tomáš Mandlík Ruslan Matyas Pavel Borodáč		
Odpovědný řešitel:	Ing. Karel Hurtig		
Vedoucí oddělení:	Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.		
Ředitel KÚ:	Doc. Ing. Jiří Kolísko, Ph.D.		
Výtisk číslo: 1 2 3	Rozdělovník: Objednatel: 2 × Archiv KÚ: 1 ×		

Zpráva může být reprodukována pouze jako celek. Části zprávy mohou být reprodukovány, publikovány nebo jinak použity pouze na základě písemného souhlasu ředitele Kloknerova ústavu.

ANOTACE

Zpráva uvádí výsledky experimentu, cíleným na vliv ošetřování UHPC na jeho fyzikálně-mechanické vlastnosti, smršťení a dotvarování.

Zprávu zpracovali pracovníci ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, který je zapsán v seznamu ústavů kvalifikovaných pro znaleckou činnost dle ustanovení §21 odst. 3, zákona č. 36/1967 Sb. a vyhlášky č. 37/1967 Sb., ve znění pozdějších předpisů, uveřejněném v Ústředním věstníku ČR, ročník 2004, částka 2, ze dne 14. 10. 2004, přílohy ke sdělení Ministerstva spravedlnosti ze dne 13. 7. 2004, č.j. 228/203–Zn.

Klíčová slova: UHPC, ošetřování, fyzikálně-mechanické vlastnosti, smršťení, dotvarování

OBSAH:

1. ÚVOD	3
2. PODKLADY	3
3. POSTUP PRACÍ A VÝSLEDKY	4
3.1 POPIS ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A PROSTŘEDÍ	4
3.2 STANOVENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU	5
3.3 STANOVENÍ STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU	10
3.4 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU A TLAKU	15
3.5 STANOVENÍ VELIKOSTI SMRŠTĚNÍ	17
3.6 STANOVENÍ VELIKOSTI DOTVAROVÁNÍ	18

1. ÚVOD

Na základě objednávky Ing. Vladimíra Příbramského provedli pracovníci Kloknerova ústavu ČVUT Praha experiment, zaměřující se na vliv ošetřování UHPC na fyzikálně-mechanické zkoušky vlastností materiálu, smrštění a dotvarování. Zkušební vzorky byly vyrobeny v laboratořích Kloknerova ústavu. Celkem byl pozorován vliv čtyř prostředí, ve kterém byly vzorky po 24 hodinách uloženy ve formě po jejich výrobě, uloženy po dobu dalších 24 hodin. Po této době byly vzorky uloženy na vzduchu za standardních laboratorních podmínek až do doby zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností.

V rámci zkoušek bylo provedeno:

- stanovení pevnosti v tlaku na krychlích o hraně 100 mm ve stáří 1, 2, 7 a 28 dní;
- stanovení statického modulu pružnosti na válcích průměru 150 mm a výšce 300 mm ve stáří 1, 2, 7 a 28 dní;
- stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku na trámečcích o rozměru 40×40×160 mm ve stáří 28 dní;
- měření smrštění materiálu na trámečcích o rozměru 70×70×300 mm;
- měření dotvarování materiálu na trámečcích o rozměru 70×70×300 mm.

Účelem zkoušek bylo získat obraz o mechanicko-fyzikálních vlastnostech materiálů a poskytnout tak podklad pro následné zpracování materiálového modelu. Zkoušky proběhly v laboratořích Kloknerova ústavu v průběhu prosince 2019 až srpna 2021.

2. PODKLADY

- [1] ČSN EN 12390-3 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [2] ČSN EN 12390-7 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
- [3] ČSN ISO 1920-10 – Zkoušení betonu – Část 10: Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
- [4] ČSN EN 12390-5 – Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles

3. POSTUP PRACÍ A VÝSLEDKY

3.1 POPIS ZKUŠEBNÍCH VZORKŮ A PROSTŘEDÍ

Zkušební tělesa byla vyrobena z UHPC dle receptury vyvinuté v Kloknerově ústavu. Materiál obsahoval rozptýlenou výztuž v podobě ocelových drátků a to v množství 1,5 % obj.. Při výrobě krychlí, válců a trámečků o rozměrech 40×40×160 mm byly použity ocelové rozebíratelné formy a pro výrobu trámců o rozměrech 70×70×300 mm byly použity rozebíratelné formy z překližky.

Typy vzorků, počty vzorků a typy zkoušek jsou uvedeny v tabulce 1.

Tabulka 1: Vzorky a typy provedených zkoušek

Typ vzorku	Počet zkušebních těles				Typ zkoušky
	Stáří betonu				
	1D	2D	7D	28D	
Krychle o hraně 100 mm	3	12	12	12	Pevnost v tlaku
Válec Ø 150 mm a výšce 300 mm	2	8	8	8	Stanovení statického modulu pružnosti v tlaku
Trámeček o rozměrech 40×40×160 mm	-	-	-	12	Stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku
Trámec o rozměru 70×70×300 mm	4*	-	-	-	Stanovení velikosti smrštění
	-	8**	-	-	Stanovení velikosti dotvarování

Pozn.:

* Měření smrštění probíhalo již od naplnění forem materiálem, s vynucenou přestávkou při ošetřování těles v prostředí s vodou 70 °C a 90 °C.

** Měření dotvarování probíhalo od ukončení ošetřování ve všech 4 prostředích

Tělesa byla po 24 hodinách ve formě uložena ve čtyřech prostředích dalších 24 hodin. Prvním prostředím byly standardní laboratorní podmínky, tělesa byla tedy uložena na vzduchu v prostoru laboratoře. Druhým prostředím byla voda o teplotě 20 °C. Třetím a čtvrtým prostředím bylo též vodní uložení, a to o teplotě 70 °C a 90 °C. Po 24 hodinách umístění těles v těchto prostředích byla tělesa až do doby zkoušky fyzikálně-mechanických vlastností uložena na vzduchu se standardními laboratorními podmínkami.

3.2 STANOVENÍ PEVNOSTI BETONU V TLAKU

Provedení zkoušky	:	12. 12. 2019, 13. 12. 2019, 18. 12. 2019, 8. 1. 2020
Identifikace vzorků	:	krychle o hraně 100 mm
Zkušební postup	:	ČSN EN 12390-3 [1] ČSN EN 12390-7 [2]
Zatěžovací stroj	:	Instron 3000 kN, metrologické číslo S 12 005 M
Prostředí zkoušky	:	Teplota [°C] / vlhkost [%]: 18/27, 18/30, 19/31, 18/28
Provedl	:	Pavel Borodáč, Ing. Karel Hurtig

Pro účely destruktivních zkoušek pevnosti betonu v tlaku byly vyrobeny krychle o hraně 100 mm. Po odformování těles, které proběhlo po 24 hodinách uložení materiálu ve formách, byla tělesa uložena ve čtyřech různých prostředích, viz 3.1 a to po dobu 24 hodin, poté byla tělesa ponechána na vzduchu za standardních laboratorních podmínek až do doby zkoušky. Před zkouškou byla tělesa změřena a zvážena, aby bylo možno stanovit objemovou hmotnost betonu. Takto připravené vzorky byly zkoušeny v zatěžovacím stroji Instron 3000 kN, metrologické číslo S 12 005 M.

Výsledky pevností betonu v tlaku v daném stáří betonu a pro jednotlivá prostředí jsou uvedena v tabulkách 2 až 14.

Tabulka 2: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 1 den – po odformování

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 %, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 12. 12. 2019 - stáří 1 den							
1	100,4	100,4	99,3	2334	2330	713	70,7
2	100,4	100,0	100,3	2368	2350	729	72,6
3	100,5	98,1	100,3	2342	2370	698	70,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2350		71,4
Směrodatná odchylka					20,0		1,1
Variační koeficient [%]					0,9		1,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 3: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny							
1	100,2	100,5	99,7	2405	2400	945	93,8
2	100,0	101,1	99,8	2433	2410	958	94,8
3	99,8	101,6	100,0	2417	2380	918	90,5
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2400		93,0
Směrodatná odchylka					15,3		2,2
Variační koeficient [%]					0,6		2,4

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 4: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny							
1	100,0	101,7	100,4	2455	2400	876	86,1
2	100,0	101,0	99,9	2390	2370	887	87,8
3	100,1	102,0	100,0	2428	2380	886	86,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2380		86,9
Směrodatná odchylka					15,3		0,9
Variační koeficient [%]					0,6		1,0

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 5: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 70 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny							
1	100,3	101,5	100,4	2417	2360	1399	137,4
2	100,0	99,5	100,2	2405	2410	1420	142,7
3	100,4	101,2	100,2	2411	2370	1425	140,2
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2380		140,1
Směrodatná odchylka					26,5		2,6
Variační koeficient [%]					1,1		1,9

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 6: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 90 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny							
1	100,3	100,5	99,9	2436	2420	1409*	139,8
2	100,2	100,6	100,1	2416	2390	1463*	145,1
3	100,6	101,3	100,1	2453	2400	1387*	136,1
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2400		140,3
Směrodatná odchylka					15,3		4,5
Variační koeficient [%]					0,6		3,2

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Pozn.: * Tělesa byla dle ČSN EN 12390-3 porušena nevhodným způsobem, porušení kombinací tlaku a tahu

Tabulka 7: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní							
1	100,5	99,9	99,9	2346	2340	1133	112,8
2	98,7	99,9	99,9	2347	2380	1181	119,8
3	99,0	100,0	99,9	2378	2400	1197	120,9
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2370		117,9
Směrodatná odchylka					30,6		4,4
Variační koeficient [%]					1,3		3,7

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 8: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní							
1	99,8	100,0	100,2	2411	2410	1236	123,8
2	100,0	100,2	100,2	2405	2400	1232	123,0
3	100,7	100,1	100,4	2409	2380	1236	122,6
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2400		123,1
Směrodatná odchylka					15,3		0,6
Variační koeficient [%]					0,6		0,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 9: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 70 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní							
1	101,1	100,8	100,3	2408	2360	1476	144,8
2	99,6	100,4	100,2	2383	2380	1503	150,3
3	99,9	100,3	100,3	2389	2380	1467	146,4
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2370		147,2
Směrodatná odchylka					11,5		2,8
Variační koeficient [%]					0,5		1,9

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 10: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 90 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní							
1	100,3	99,6	99,8	2386	2390	1578	157,9
2	99,9	99,8	100,0	2373	2380	1613	161,8
3	100,0	99,7	100,0	2385	2390	1619	162,4
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2390		160,7
Směrodatná odchylka					5,8		2,4
Variační koeficient [%]					0,2		1,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 11: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní							
1	99,9	98,4	99,7	2316	2360	1371	139,5
2	99,8	97,4	100,1	2297	2360	1377	141,7
3	99,7	100,8	99,7	2397	2390	1442	143,5
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2370		141,5
Směrodatná odchylka					17,3		2,0
Variační koeficient [%]					0,7		1,4

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 12: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní							
1	99,8	99,4	99,9	2329	2350	1412	142,3
2	99,6	99,1	99,6	2366	2410	1400	141,8
3	99,7	99,6	99,7	2377	2400	1468	147,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2390		144,0
Směrodatná odchylka					32,1		3,3
Variační koeficient [%]					1,3		2,3

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 13: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 70 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní							
1	100,0	100,3	99,8	2370	2370	1523	151,8
2	99,7	100,4	99,8	2395	2400	1554	155,2
3	100,0	98,1	99,8	2358	2410	1475	150,4
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2390		152,5
Směrodatná odchylka					20,8		2,5
Variační koeficient [%]					0,9		1,6

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 14: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 90 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní							
1	99,9	101,5	99,9	2393	2360	1628	160,6
2	99,8	99,3	99,9	2374	2400	1647	166,2
3	99,8	97,3	99,9	2355	2430	1639	168,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2400		165,2
Směrodatná odchylka					35,1		4,2
Variační koeficient [%]					1,5		2,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

3.3 STANOVENÍ STATICKÉHO MODULU PRUŽNOSTI V TLAKU

Provedení zkoušky	:	12. 12. 2019, 13. 12. 2019, 18. 12. 2019, 8. 1. 2020
Identifikace vzorků	:	Válce Ø 150 mm a výšce 300 mm
Zkušební postup	:	ČSN ISO 1920-10 [3]
Zatěžovací stroj	:	Instron 3000 kN, metrologické číslo S 12 005 M Extenzometr - Epsilon E90868, metrologické číslo P 01 270 M Extenzometr - Epsilon E90867, metrologické číslo P 01 271 M
Prostředí zkoušky	:	Teplota [°C] / vlhkost [%]: 18/27, 18/30, 19/31, 18/28
Provedl	:	Pavel Borodáč, Ing. Karel Hurtig, Ing. Milan Rydval Ph.D.

Pro účely stanovení statického modulu pružnosti betonu v tlaku byly vyrobeny válce o Ø 150 mm a výšce 300 mm. Po odformování těles, které proběhlo po 24 hodinách uložení materiálu ve formách, byla tělesa uložena ve čtyřech různých prostředích, viz 3.1 a to po dobu 24 hodin, poté byla tělesa ponechána na vzduchu standardních laboratorních podmínek až do doby zkoušky. Tlačné plochy zkušebních těles byly před zkouškou zabroušeny na brusném zařízení pro dosažení jejich rovnoběžnosti a tělesa byla dále změřena a zvážena, aby bylo možno stanovit objemovou hmotnost betonu. Takto připravené vzorky byly zkoušeny v zatěžovacím stroji Instron 3000 kN, metrologické číslo S 12 005 M.

Výsledky stanovení statického modulu pružnosti v tlaku v daném stáří betonu a pro jednotlivá prostředí jsou uvedena v tabulkách 15 až 27.

Tabulka 15: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 1 den – po odformování

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	Ø [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 %, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 12. 12. 2019 - stáří 1 den													
1	150,3	286,6	12098	2380	1202	67,7	0,5	20,3	19,78	0,529	0,489	0,509	38,9
2	150,1	278,8	11812	2400	1234	69,8	0,5	20,4	19,85	0,517	0,481	0,499	39,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		68,8							39,3
Směrodatná odchylka				14,1		1,4							0,6
Variační koeficient [%]				0,6		2,1							1,6

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 16: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny													
1	149,6	287,9	12097	2390	1467	83,5	0,5	27,3	26,81	0,693	0,555	0,624	43,0
2	150,2	287,9	12181	2390	1471	83,1	0,5	27,1	26,60	0,680	0,560	0,620	42,9
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		83,3							42,9
Směrodatná odchylka				0,0		0,3							0,0
Variační koeficient [%]				0,0		0,4							0,1

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 17: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 20 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny													
1	149,8	287,6	12090	2390	1457	82,7	0,5	25,0	24,45	0,602	0,521	0,562	43,6
2	150,1	285,1	11999	2380	1405	79,5	0,5	27,1	26,64	0,703	0,569	0,636	41,9
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		81,1							42,7
Směrodatná odchylka				7,1		2,3							1,2
Variační koeficient [%]				0,3		2,8							2,8

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 18: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 70 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny													
1	149,8	288,5	12229	2410	2296	130,3	0,5	40,3	39,77	0,822	0,825	0,824	48,3
2	149,8	290,8	12259	2390	2242	127,2	0,5	40,3	39,77	0,779	0,870	0,825	48,2
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2400		128,7							48,3
Směrodatná odchylka				14,1		2,2							0,0
Variační koeficient [%]				0,6		1,7							0,1

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 19: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 90 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 13. 12. 2019 - stáří 2 dny													
1	149,2	288,2	11963	2380	2365	135,4	0,5	40,6	40,12	0,797	0,815	0,806	49,8
2	150,0	280,7	11814	2380	2382	134,9	0,5	40,2	39,69	0,791	0,853	0,822	48,3
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2380		135,1							49,0
Směrodatná odchylka				0,0		0,3							1,1
Variační koeficient [%]				0,0		0,3							2,1

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 20: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní													
1	148,7	285,4	11799	2380	2087	120,2	0,5	33,7	33,19	0,710	0,805	0,758	43,8
2	148,8	281,3	11662	2390	2112	121,5	0,5	37,4	36,89	0,724	0,785	0,755	48,9
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		120,9							46,4
Směrodatná odchylka				7,1		0,9							3,6
Variační koeficient [%]				0,3		0,7							7,7

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 21: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní													
1	148,9	285,1	11855	2390	2069	118,8	0,5	41,3	40,83	0,883	0,792	0,838	48,8
2	148,8	284,2	11820	2390	2079	119,6	0,5	39,1	38,61	0,777	0,779	0,778	49,6
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		119,2							49,2
Směrodatná odchylka				0,0		0,6							0,6
Variační koeficient [%]				0,0		0,5							1,3

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 22: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 70 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní													
1	148,9	288,6	11952	2380	2401	137,9	0,5	50,0	49,45	1,028	1,060	1,044	47,4
2	148,7	287,6	11931	2390	2386	137,5	0,5	50,1	49,61	0,990	1,035	1,013	49,0
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2390		137,7							48,2
Směrodatná odchylka				7,1		0,3							1,2
Variační koeficient [%]				0,3		0,2							2,4

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 23: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 90 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 18. 12. 2019 - stáří 7 dní													
1	149,0	283,5	11729	2370	2607	149,6	0,5	53,4	52,86	1,079	1,126	1,103	47,9
2	149,0	282,0	11694	2380	2642	151,5	0,5	53,3	52,82	1,104	1,098	1,101	48,0
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2380		150,6							48,0
Směrodatná odchylka				7,1		1,4							0,0
Variační koeficient [%]				0,3		0,9							0,0

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 24: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní													
1	148,7	288,9	11954	2380	2388	137,5	0,5	45,2	44,68	0,824	0,961	0,893	50,1
2	148,9	285,4	11773	2370	2452	140,8	0,5	45,1	44,56	0,875	0,964	0,920	48,5
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2380		139,2							49,3
Směrodatná odchylka				7,1		2,3							1,1
Variační koeficient [%]				0,3		1,7							2,3

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 25: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 8 dní													
1	149,0	287,4	11935	2380	2487	142,6	0,5	47,0	46,51	1,019	0,846	0,933	49,9
2	149,0	285,6	11831	2380	2449	140,5	0,5	47,1	46,54	1,025	0,957	0,991	47,0
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2380		141,6							48,4
Směrodatná odchylka				0,0		1,5							2,1
Variační koeficient [%]				0,0		1,0							4,3

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 26: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 70 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní													
1	148,9	284,8	11812	2380	2614	150,1	0,5	48,8	48,30	1,028	0,839	0,934	51,7
2	148,6	287,8	11885	2380	2655	153,1	0,5	49,0	48,49	0,958	0,997	0,978	49,6
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2380		151,6							50,7
Směrodatná odchylka				0,0		2,1							1,5
Variační koeficient [%]				0,0		1,4							3,0

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 27: Statický modul pružnosti v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 90 °C

Ozn. vzorku	Rozměry vzorku		Hmotnost [g]	Objemová hmot. vypočtená [kg/m ³]	Max. tlaková síla F [kN]	Pevnost betonu na válci σ [MPa]	Napětí v průřezu [MPa]			Měření poměrného přetvoření $\varepsilon \cdot 10^{-3}$			Statický modul pružnosti betonu [GPa]
	\varnothing [mm]	h [mm]					dolní úroveň σ_b	horní úroveň σ_a	$\Delta\sigma$	$\Delta\varepsilon_1$	$\Delta\varepsilon_2$	$\varphi \Delta\varepsilon$	
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 8. 1. 2020 - stáří 28 dní													
1	148,9	285,7	11772	2370	2810	161,4	0,5	51,7	51,17	0,959	1,019	0,989	51,7
2	148,5	288,2	11842	2370	2841	164,1	0,5	52,0	51,48	1,076	1,007	1,042	49,4
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:				2370		162,8							50,6
Směrodatná odchylka				0,0		2,0							1,6
Variační koeficient [%]				0,0		1,2							3,2

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření statického modulu pružnosti v tlaku je 0,5 GPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 10 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

3.4 STANOVENÍ PEVNOSTI V TAHU ZA OHYBU A TLAKU

Datum zkoušky	:	7. 1. 2020
Identifikace vzorků	:	Trámečky o rozměrech 40×40×160 mm
Zkušební postup	:	ČSN EN 12390-5 [4]
Zatěžovací stroj	:	Zkuš. stroj VEB TIW 2214/20, metrologické číslo S 12 003 T Zkuš. stroj WPM 500 kN, metrologické číslo S 12 011 M
Prostředí zkoušky	:	Teplota 18 °C, vlhkost 27 %
Provedl	:	Pavel Borodáč

Pro účely stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku byly vyrobeny trámečky o rozměrech 40×40×160 mm. Po odformování těles, které proběhlo po 24 hodinách uložení materiálu ve formách, byla tělesa uložena ve čtyřech různých prostředích, viz 3.1 a to po dobu 24 hodin, poté byla tělesa ponechána na vzduchu standardních laboratorních podmínek až do doby zkoušky. Před zkouškou byla tělesa změřena a zvážena, aby bylo možno stanovit objemovou hmotnost betonu. Takto připravené vzorky byly zkoušeny v zatěžovacím stroji VEB TIW 2214/20, metrologické číslo S 12 003 T a WPM 500 kN, metrologické číslo S 12 011 M.

Výsledky stanovení pevnosti v tahu za ohybu a tlaku v daném stáří betonu a pro jednotlivá prostředí jsou uvedena v tabulkách 28 až 31.

Tabulka 28: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg.m ⁻³]	Tah za ohybu		Pevnost v tlaku			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]			Síla [kN]	Napětí [MPa]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Napětí 1 [MPa]	Napětí 2 [MPa]
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 7. 1. 2020 - stáří 27 dní											
1	39,8	40,2	159,9	592	2314	8,67	20,2	229,0	223,0	143,8	140,1
2	39,2	40,3	160,5	588	2319	8,68	20,5	230,0	226,0	146,7	144,1
3	39,5	40,1	159,9	602	2377	11,94	28,2	255,0	252,0	161,4	159,5
Průměrná hodnota:					2340		23,0			149,5	
Směrodatná odchylka					34,9		4,5			8,9	
Variační koeficient [%]					1,5		19,8			6,0	

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tahu za ohybu je 1,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 29: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg.m ⁻³]	Tah za ohybu		Pevnost v tlaku			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]			Síla [kN]	Napětí [MPa]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Napětí 1 [MPa]	Napětí 2 [MPa]
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 7. 1. 2020 - stáří 27 dní											
1	38,6	40,4	159,9	594	2382	8,72	20,8	224,0	224,0	145,1	145,1
2	38,5	40,3	159,9	591	2382	9,89	23,7	238,0	219,0	154,5	142,2
3	39,8	40,3	160,0	611	2381	10,19	23,6	238,0	245,0	149,5	153,9
Průměrná hodnota:					2380		22,7			148,5	
Směrodatná odchylka					0,8		1,7			5,1	
Variační koeficient [%]					0,0		7,4			3,4	

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tahu za ohybu je 1,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 30: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 70 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg.m ⁻³]	Tah za ohybu		Pevnost v tlaku			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]			Síla [kN]	Napětí [MPa]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Napětí 1 [MPa]	Napětí 2 [MPa]
UHPC 1,5 % - voda 70 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 7. 1. 2020 - stáří 27 dní											
1	39,8	40,4	159,5	604	2355	11,97	27,6	257,0	257,0	161,4	161,4
2	38,9	40,0	160,1	592	2376	10,64	25,6	271,0	247,0	174,2	158,7
3	39,8	39,9	159,3	603	2384	12,24	29,0	259,0	267,0	162,7	167,7
Průměrná hodnota:					2370		27,4			164,5	
Směrodatná odchylka					14,8		1,7			5,6	
Variační koeficient [%]					0,6		6,1			3,4	

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tahu za ohybu je 1,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 31: Pevnost v tahu za ohybu a tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 90 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objem. hmotnost [kg.m ⁻³]	Tah za ohybu		Pevnost v tlaku			
	b [mm]	h [mm]	l [mm]			Síla [kN]	Napětí [MPa]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Napětí 1 [MPa]	Napětí 2 [MPa]
UHPC 1,5 % - voda 90 °C, výroba: 11. 12. 2019, termín zkoušky: 7. 1. 2020 - stáří 27 dní											
1	39,6	39,9	159,9	590	2335	11,28	26,8	271,0	257,0	171,1	162,2
2	40,6	40,3	159,2	615	2361	10,27	23,4	268,0	259,0	165,0	159,5
3	39,7	40,1	159,2	609	2403	10,42	24,5	270,0	258,0	170,0	162,5
Průměrná hodnota:					2370		24,9			165,0	
Směrodatná odchylka					34,1		1,8			4,6	
Variační koeficient [%]					1,4		7,1			2,8	

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tahu za ohybu je 1,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

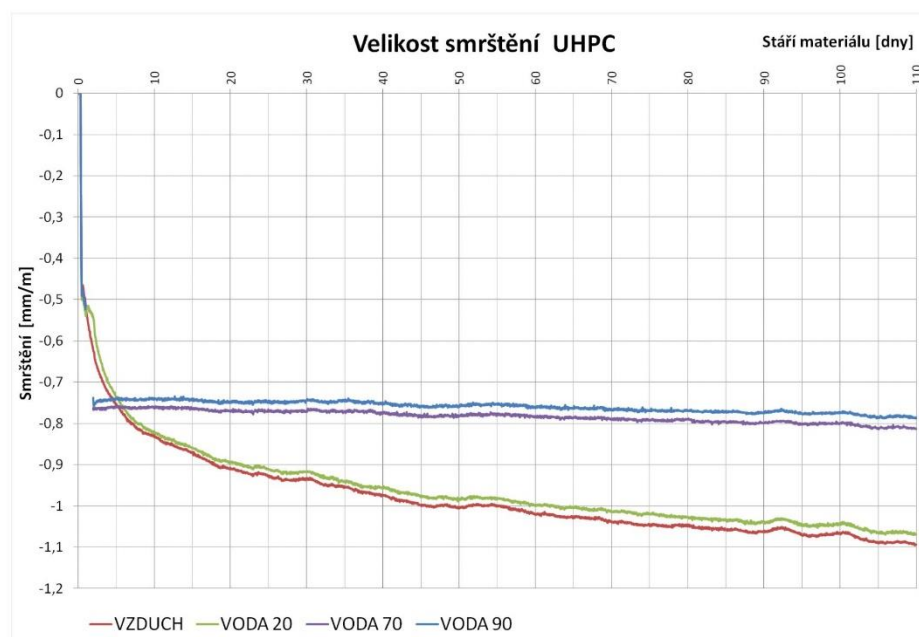
Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

3.4 STANOVENÍ VELIKOSTI SMRŠTĚNÍ

Provedení zkoušky : Průběžné měření od 11. 12. 2019
 Identifikace vzorků : Trámce o rozměrech 70×70×300 mm
 Měřicí zařízení : Strunový tenzometr EDS-20V-E se zabudovaným termočlánkem
 Datalogger DATATAKER DT85
 Provedl : Ing. David Čítek, Ing. Karel Hurtig

Pro účely stanovení velikosti smrštění UHPC byly vyrobeny trámce o rozměrech 70×70×300 mm. Do připravených forem byly zafixovány strunové tenzometry tak, aby zaujímaly polohu ve středu zkušebního tělesa. Poté byly formy i se strunovými tenzometry naplněny připravenou směsí UHPC. Měření velikosti smrštění probíhalo již od naplnění forem materiálem. Přerušení měření nastalo pouze u trámců, které byly ošetřovány ve vodní lázni o teplotě 70 °C a 90 °C, tedy po dobu 24 hodin.

Výsledky stanovení velikosti smrštění UHPC v daném stáří a pro jednotlivá prostředí jsou zobrazeny v grafu 1.



Graf 1: Časová závislost smrštění UHPC

3.5 STANOVENÍ VELIKOSTI DEFORMACE PŘI ZKOUŠCE DOTVAROVÁNÍ

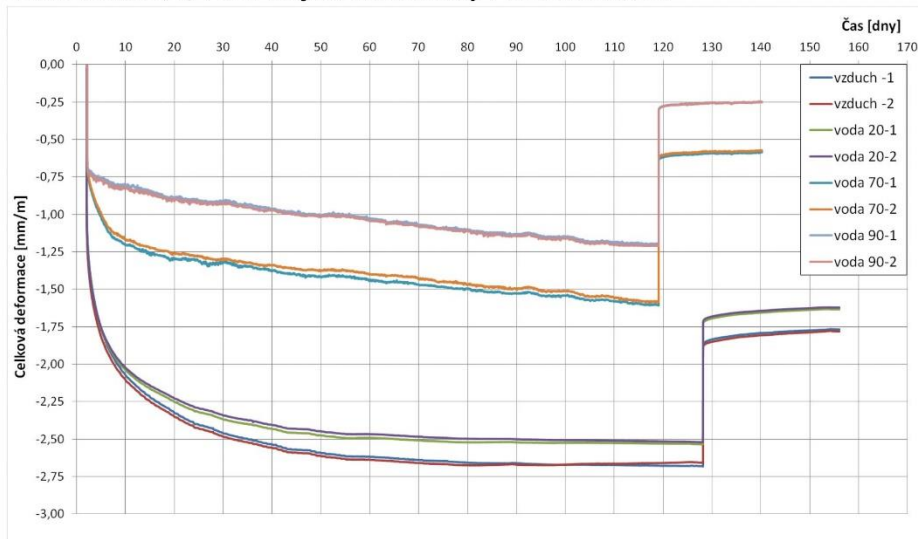
Provedení zkoušky	: Průběžné měření od 13. 12. 2019 a od 18. 3. 2021
Identifikace vzorků	: Trámce o rozměrech 70×70×300 mm
Měřicí zařízení	: Strunový tenzometr EDS-20V-E se zabudovaným termočlánkem Datalogger DATATAKER DT85 Snímače posunu LVDT
Provedli	: Ing. David Čítek, Ing. Karel Hurtig, Ing. Adam Čítek

Pro účely stanovení velikosti dotvarování UHPC byly vyrobeny trámce o rozměrech 70×70×300 mm. Do připravených forem byly zařazovány strunové tenzometry tak, aby zaujímaly polohu ve středu zkušebního tělesa. Poté byly formy i se strunovými tenzometry naplněny připravenou směsí UHPC. Po 24 hodinách byla tělesa odformována a následujících 24 hodin ošetřována v prostředí, viz 3.1. Po ošetřování byla tělesa uložena do stojanů a zatížena na hodnotu 150 kN, což odpovídá přibližně 30 % hodnoty pevnosti materiálu v tlaku.

Z důvodu dosažení hranice rozsahu tenzometrů bylo měření dotvarování u těles z prostředí vzduchu laboratorních podmínek a uložených ve vodě o teplotě 20 °C zopakováno za pomoci externích LVDT snímačů. Výroba zkušebních těles proběhla dne 16. 3. 2021 obdobným způsobem jako zkušební tělesa z data výroby 11. 12. 2019. Stejně tak se přikročilo k ošetřování těles a vnesenému počátečnímu zatížení 150 kN, což odpovídá přibližně 30 MPa.

Vzorky z prostředí ošetřování při teplotě 70 °C a 90 °C byly odtíženy po 117 dnech a vzorky z prostředí ošetřování při teplotě 20 °C a z prostředí vzduchu laboratorních podmínek po 126 dnech.

Výsledky stanovení velikosti celkové deformace tvořené deformací od vneseného zatížení, deformací od smrštění a deformací od dotvarování pro UHPC v daném stáří a pro jednotlivá prostředí jsou zobrazeny v grafu 2. Materiálové parametry směsi míchané 16.3.2021 ve stáří 1, 2, 7 a 28 dní jsou zaznamenány v tabulce 32 až 38.



Graf 2: Časová závislost celkové deformace UHPC

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 32: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 1 den – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 %, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 17. 3. 2021 - stáří 1 den							
1	99,6	99,6	100,0	2343	2360	615	62,0
2	100,0	99,9	100,0	2382	2380	621	62,2
3	100,0	98,3	100,4	2332	2360	624	63,5
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2370		62,5
Směrodatná odchylka					11,5		0,8
Variační koeficient [%]					0,5		1,3

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 33: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 18. 3. 2021 - stáří 2 dny							
1	100,3	100,8	100,3	2387	2350	832	82,3
2	100,0	101,1	100,2	2373	2340	852	84,3
3	100,1	100,2	100,1	2369	2360	840	83,7
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2350		83,4
Směrodatná odchylka					10,0		1,0
Variační koeficient [%]					0,4		1,2

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 34: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 23. 3. 2021 - stáří 7 dní							
1	100,4	99,2	100,0	2321,7	2330	1099	110,3
2	100,3	100,8	100,1	2391,1	2360	1084	107,2
3	100,2	98,4	100,3	2329,7	2360	1078	109,3
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2350		109,0
Směrodatná odchylka					17,3		1,6
Variační koeficient [%]					0,7		1,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 35: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vzduch laboratorních podmínek

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - vzduch, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 13. 4. 2021 - stáří 28 dní							
1	100,2	98,2	100,2	2311,5	2340	1312	133,3
2	100,1	98,7	100,2	2320,4	2340	1291	130,7
3	100,2	99,7	100,2	2352,1	2350	1320	132,1
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2340		132,0
Směrodatná odchylka					5,8		1,3
Variační koeficient [%]					0,2		1,0

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 36: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 2 dny – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 18. 3. 2021 - stáří 2 dny							
1	100,7	100,1	100,6	2340	2310	851	84,4
2	100,1	99,3	100,5	2372	2370	859	86,4
3	100,3	100,8	100,4	2373	2340	840	83,1
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2340		84,6
Směrodatná odchylka					30,0		1,7
Variační koeficient [%]					1,3		2,0

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Tabulka 37: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 7 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 23. 3. 2021 - stáří 7 dní							
1	100,5	100,2	100,0	2385,1	2370	1128	112,0
2	100,1	100,4	100,1	2409	2390	1143	113,7
3	100,5	99,4	100,2	2384,2	2380	1157	115,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2380		113,9
Směrodatná odchylka					10,0		1,9
Variační koeficient [%]					0,4		1,7

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

ČVUT v Praze, Kloknerův ústav, Šolínova 7, 166 08 Praha 6

Tel.: 224 353 537

Tabulka 38: Pevnost betonu v tlaku ve stáří 28 dní – prostředí: vodní uložení 20 °C

Označení vzorku	Rozměry			Hmotnost [g]	Objemová hmotnost [kg.m ⁻³]	Tlaková síla [kN]	Napětí v tlaku [MPa]
	a [mm]	b [mm]	h [mm]				
UHPC 1,5 % - voda 20 °C, výroba: 16. 3. 2021, termín zkoušky: 13. 4. 2021 - stáří 28 dní							
1	100,3	98,7	99,9	2366	2390	1385	139,9
2	100,0	100,1	100,2	2395,5	2390	1381	138,0
3	100,1	100,8	100,3	2405,5	2380	1370	135,8
PRŮMĚRNÁ HODNOTA:					2390		137,9
Směrodatná odchylka					5,8		2,1
Variační koeficient [%]					0,2		1,5

Nejistota měření:

Rozšířená nejistota měření pevnosti v tlaku je 2,0 MPa.

Rozšířená nejistota měření objemové hmotnosti je 20 kg/m³.

Standardní nejistota odpovídá jedné směrodatné odchylce a byla vypočtena jako kombinovaná. Uvedená nejistota je rozšířená nejistota, která byla vypočtena s použitím koeficientu rozšíření k=2, což odpovídá hladině spolehlivosti přibližně 95 %.

Příloha 4 – Návrh a posouzení předpínacího rámu

SCIAENGINEER SCIA Engineer 21.1.1027	Část Autor	Pevnostní výpočet rámu Ing. Vladimír Příbramský	Národní norma Národní dodatek Licenční jméno Číslo licence	EC - EN Czech CSN-EN NA SCIA 670576
Projekt	Předem předpjatý UHPC stěnový dílec			

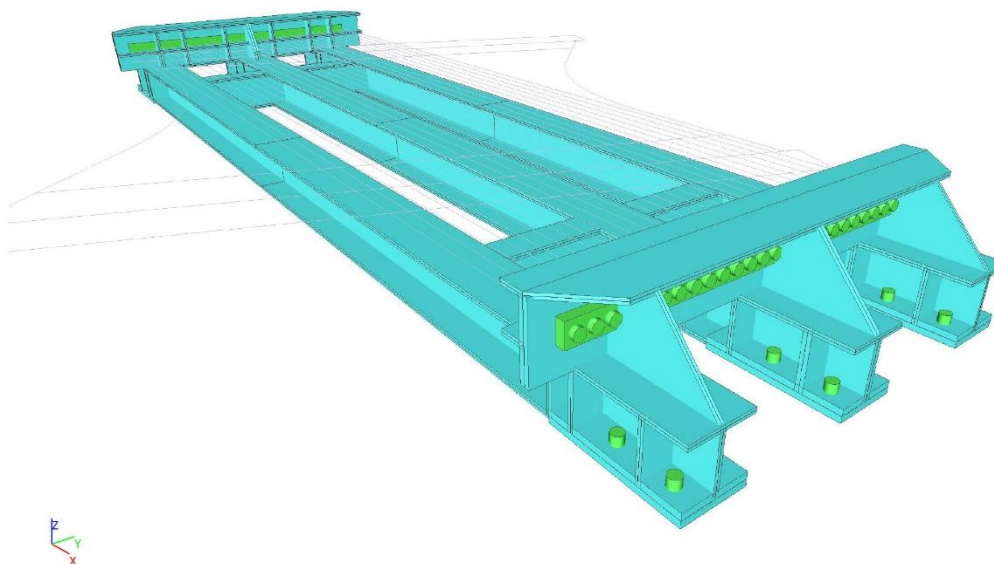
1. Obsah

1. Obsah	1
2. Úvod	1
3. 3D vizualizace modelu	1
4. 3D vizualizace modelu	2
5. Statický model	2
6. Tloušťka plechů	3
7. Materiály	3
8. Zatěžovací stavy	3
9. LC3 - Zatížení předpětím	4
10. Kombinace	4
11. 2D napětí - von Mises	5
12. 2D napětí/přetvoření	5
13. 3D přemístění - ux	6
14. 3D přemístění	7
15. Výkaz materiálu	7

2. Úvod

Tento zjednodušený pevnostní výpočet předpínacího rámu byl proveden pro ověření předběžných dimenzí rámu nutných pro přenesení předpínací síly jednotlivých lan, které jsou použity pro předepnutí UHPC stěnového dílce. Napínací síla lan po zakotvení je uvažována jako 210 kN. Cílem výpočtu je pouze prověřit realizovatelnost rámu, což je prokázáno napětím v rámu, které nepřesahuje mez kluzu oceli v kombinaci MSÚ. Dále jsou z modelu možné získat hodnoty přetvoření rámu v podélném směru od zatížení předpětím. Toto přetvoření je dále použito pro vyčíslení ztrát předpětí v důsledku pružného zkrácení rámu. Rám je zjednodušeně podepřen ve střední části (zde je nutné podlití pro zajištění kontaktu se základem) a dále je bodově podepřen na koncích podélných nosníků, kde bude realizováno kotvení do základu na předem zabetonované závitové tyče. Posudek detailů a kotvení není obsahem tohoto výpočtu.

3. 3D vizualizace modelu



SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec

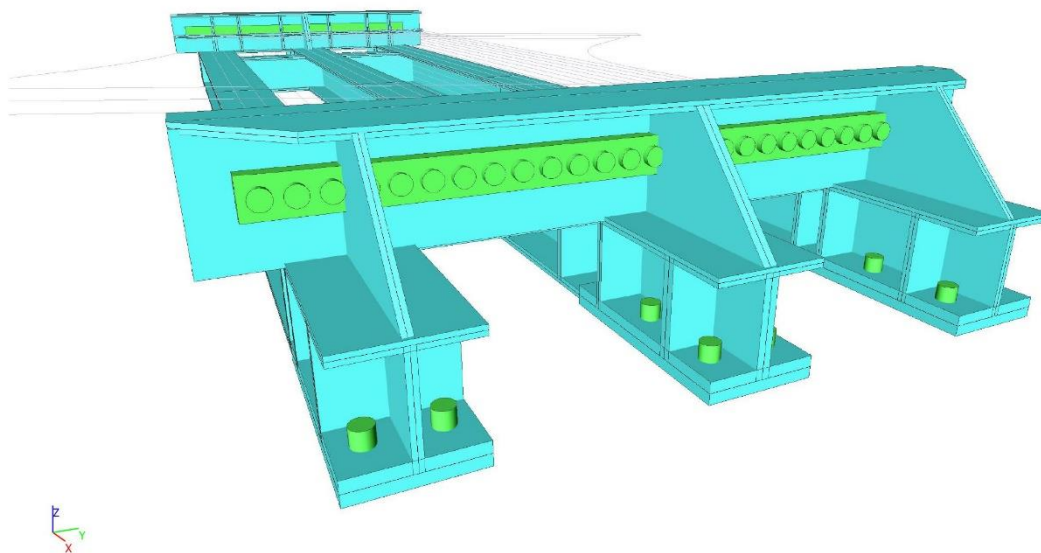
Část
Autor

Pevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír Příbramský

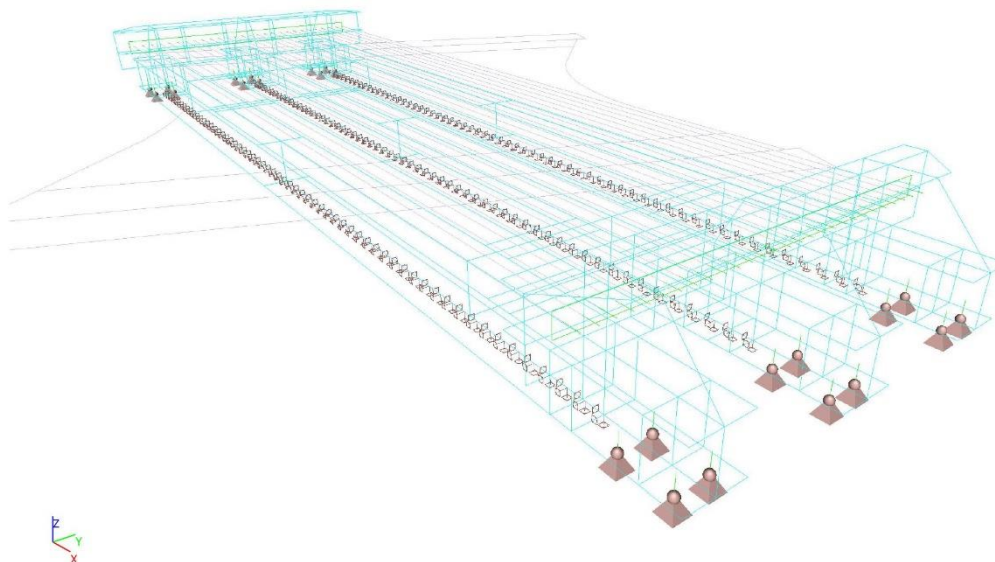
Národní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licence

EC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576

4. 3D vizualizace modelu



5. Statický model



SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Část
Autor

Pevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír Příbramský

Národní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licence

EC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576

Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec

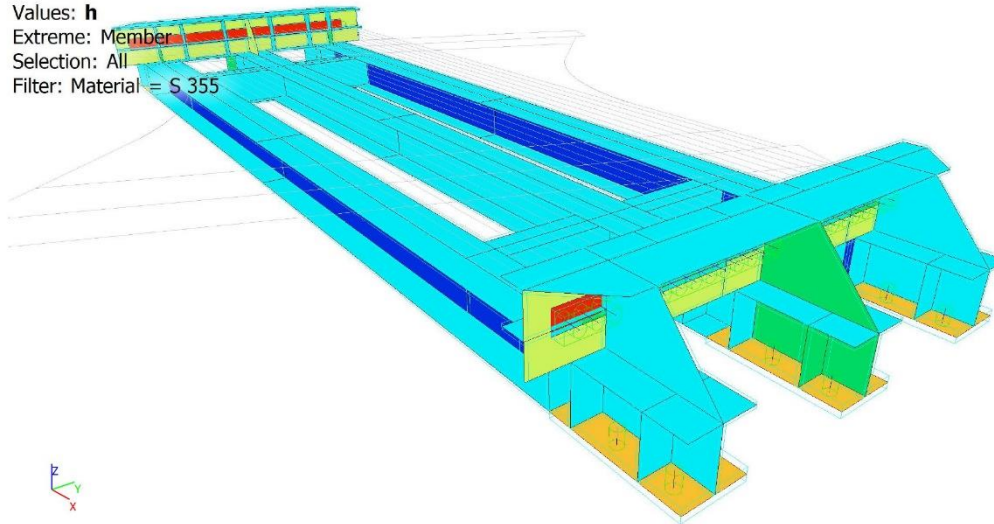
6. Tloušťka plechů

Values: **h**

Extreme: Member

Selection: All

Filter: Material = S 355





h [mm]



7. Materiály

Ocel EC3

Jméno	ρ [kg/m ³]	E_{mod} [MPa] G_{mod} [MPa]	μ α [m/mK]	Lower limit [mm]	Upper limit [mm]	F_y [MPa]	F_u [MPa]	Barva
S 355	7850,00	2,1000e+05 8,0769e+04	0.3 0,01e-003	0 40	40 80	355,0 335,0	490,0 470,0	
S 450	7850,00	2,1000e+05 8,0769e+04	0.3 0,01e-003	0 40	40 80	440,0 410,0	550,0 550,0	

8. Zatěžovací stavy

Jméno	Popis Spec	Typ působení Typ zatížení	Skupina zatížení	Směr
LC1	G0	Stálé Vlastní tíha	LG1	-Z
LC3	P_dráhy	Stálé Standard	LG1	

SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Část
Autor

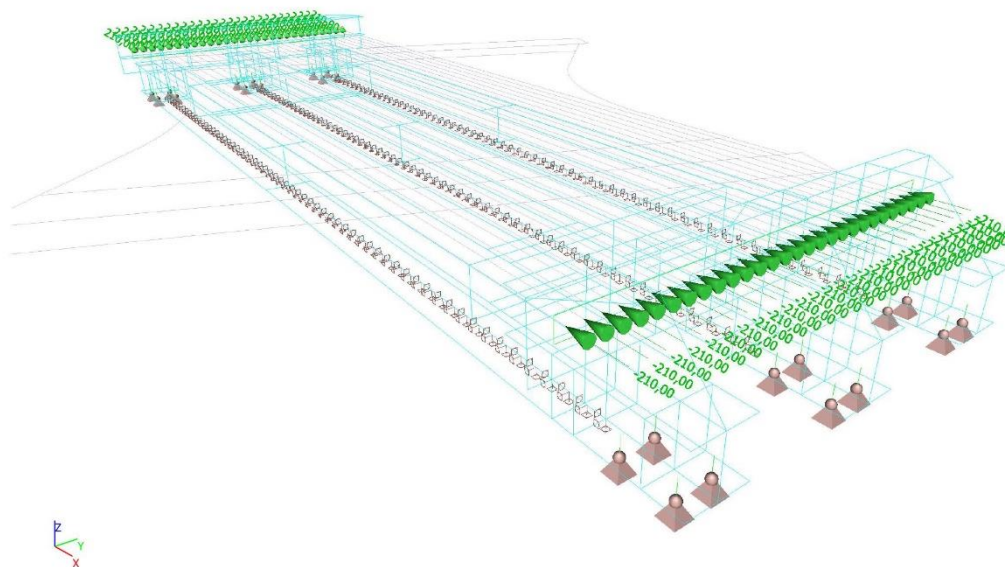
Pevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír Příbramský

Národní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licence

EC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576

Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec

9. LC3 - Zatížení předpětím



10. Kombinace

Jméno	Popis	Typ	Zatěžovací stavy	Souč. [-]
MSÚ		Obálka - únosnost	LC1 - G0 LC3 - P_dráhy	1,350 1,000
MSP		Obálka - použitelnost	LC1 - G0 LC3 - P_dráhy	1,000 1,000

SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Část
Autor

Pevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír Příbramský

Národní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licence

EC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576

Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec

11. 2D napětí - von Mises

Values: σ_E

Linear calculation

Combination: MSÚ

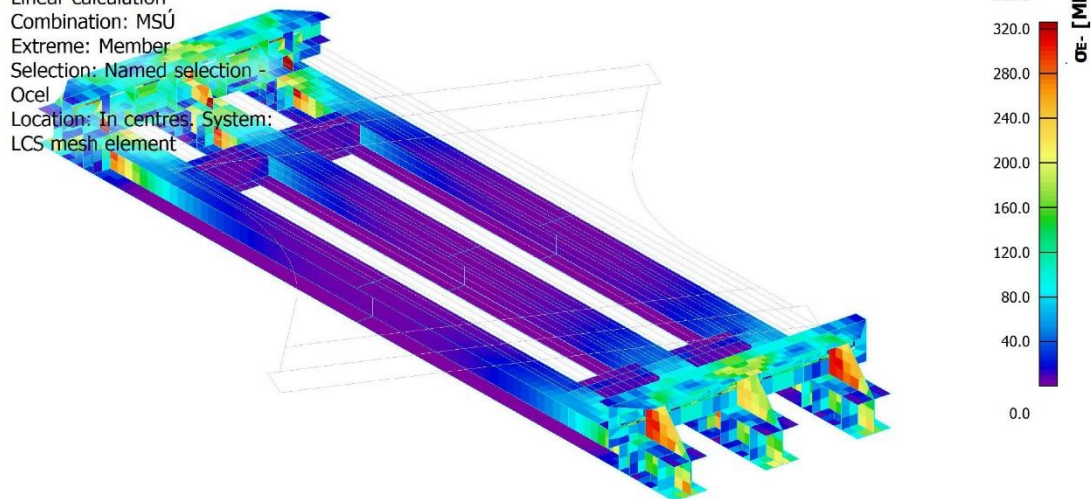
Extreme: Member

Selection: Named selection -

Ocel

Location: In centres. System:

LCS mesh element



12. 2D napětí/přetvoření

Lineární výpočet

Kombinace: MSÚ

Extrém: Globální

Výběr: Vše

Poloha: V těžištích. Systém: LSS prvku síť

Hlavní napětí

Jméno	Sít'	Pozice [m]	Stav	σ_{1+} [MPa] σ_{1-} [MPa]	σ_{2+} [MPa] σ_{2-} [MPa]	σ_{E+} [MPa] σ_{E-} [MPa]	$\alpha+$ [deg] $\alpha-$ [deg]	$T_{max,b}$ [MPa]
S207	Prvek: 6061	4,720 -0,247 0,290	MSÚ/1	-125,9 112,6	-186,5 86,5	164,8 102,1	-89,16 74,12	44,7
S207	Prvek: 6042	4,720 -0,008 0,305	MSÚ/1	294,0 -9,1	-27,9 -171,3	308,9 166,9	-2,64 85,14	109,7
S66	Prvek: 493	0,500 0,247 0,290	MSÚ/1	112,5 -125,8	86,7 -186,5	102,1 164,7	-73,88 89,11	44,7
S66	Prvek: 503	0,500 0,008 0,305	MSÚ/1	-9,1 294,0	-171,3 -27,9	167,0 308,9	-85,10 2,66	109,8
S66	Prvek: 377	0,500 0,306 0,367	MSÚ/1	153,3 -60,3	107,2 -152,2	136,3 132,7	-65,79 3,50	46,8
S71	Prvek: 537	0,645 0,000 0,207	MSÚ/1	-32,1 -32,6	-340,4 -340,3	325,5 325,2	-37,83 -37,73	0,1

SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Část
Autor

Pevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír Příbramský

Národní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licence

EC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576

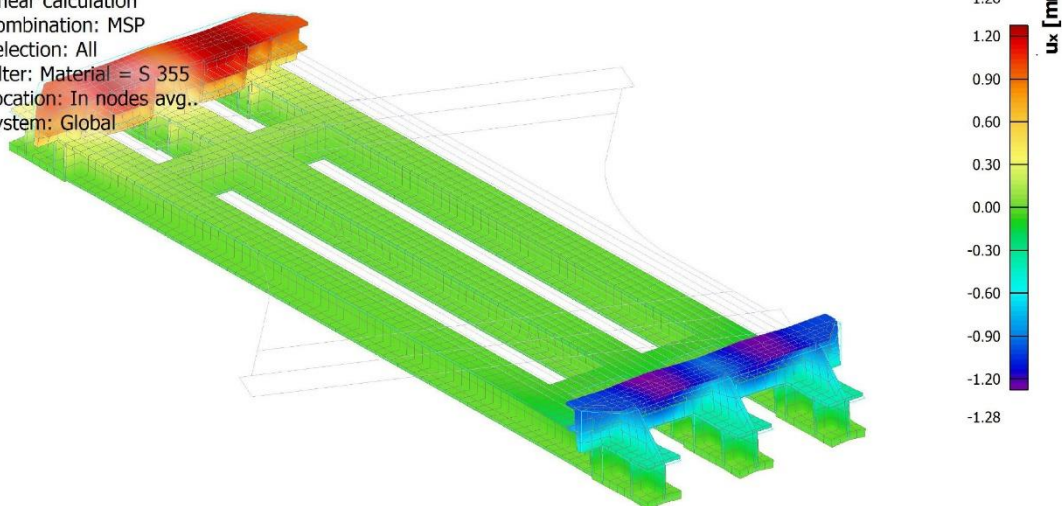
Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec

Jméno	Sít'	Pozice [m]	Stav	σ_{1+} [MPa]	σ_{2+} [MPa]	σ_{E+} [MPa]	$\alpha+$ [deg]	$T_{max,b}$ [MPa]
				σ_{1-} [MPa]	σ_{2-} [MPa]	σ_{E-} [MPa]	$\alpha-$ [deg]	
S207	Prvek: 6028	4,720 -0,306 0,367	MSÚ/1	-60,4 153,4	-152,4 107,1	133,0 136,3	-3,57 66,17	46,9
S270	Prvek: 7975	2,939 -0,075 0,000	MSÚ/1	0,0 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	89,73 -0,26	0,0
S208	Prvek: 6151	4,680 -0,550 0,214	MSÚ/1	15,2 17,5	-318,8 -315,1	326,6 324,2	38,85 39,07	2,7
S266	Prvek: 7607	1,263 0,625 0,000	MSÚ/1	0,0 0,0	0,0 0,0	0,0 0,0	83,55 4,81	0,0
S70	Prvek: 535	0,540 -0,550 0,214	MSÚ/1	14,4 19,0	-318,7 -316,2	326,1 326,1	-38,78 -39,21	2,9
S178	Prvek: 2950	2,663 -0,025 0,300	MSÚ/1	0,2 1,9	-8,6 -8,2	8,7 9,3	-83,07 -87,99	0,0
S66	Prvek: 370	0,500 0,662 0,305	MSÚ/1	130,6 -34,3	73,7 -76,5	113,4 66,4	74,32 -36,41	118,1

Jméno	Klíč kombinace
MSÚ/1	1.35*LC1 + LC3

13. 3D přemístění - u_x

Values: u_x
Linear calculation
Combination: MSP
Selection: All
Filter: Material = S 355
Location: In nodes avg..
System: Global



SCIAENGINEER

SCIA Engineer 21.1.1027

Část
AutorPevnostní výpočet rámu
Ing. Vladimír PříbramskýNárodní norma
Národní dodatek
Licenční jméno
Číslo licenceEC - EN
Czech CSN-EN NA
SCIA
670576**Projekt Předem předpjatý UHPC stěnový dílec****14. 3D přemístění**

Lineární výpočet

Kombinace: MSP

Výběr: Vše

Filtr: Průřez = CS7 - RD36

Poloha: V uzlech s průměrováním. Systém: Globální

Výsledky na 1D dílci:

Extrém 1D: Globální

Jméno	dx [m]	Vlákn	Stav	u _x [mm]	u _y [mm]	u _z [mm]	φ _x [mrad]	φ _y [mrad]	φ _z [mrad]	U _{total} [mm]
B272	0,000	11	MSP/1	-1,22	0,00	0,01	0,0	-2,7	-0,3	1,22
B311	0,000	11	MSP/1	1,22	0,00	0,01	0,0	2,7	-0,3	1,22

Jméno	Klíč kombinace
MSP/1	LC1 + LC3

15. Výkaz materiálu

Výběr: Vše

Filtr: Materiál = S 355

Způsob třídění: Materiál

Shrnutí

Materiál	Hmotnost [kg]	Povrch [m ²]	Objem [m ³]
Ocel	1739,69	12,252	2,2162e-01
Celkem	1739,69	12,252	2,2162e-01

Poznámka: Hodnota 'Povrch' představuje pro 1D dílce celkový vnější povrch, zatímco pro 2D dílce odpovídá ploše střednicové roviny.

Ocel (2D)

Materiál	Hustota [kg/m ³]	Hmotnost [kg]	Povrch [m ²]	Objem [m ³]
S 355	7850,00	1648,36	12,058	2,0998e-01
S 450	7850,00	91,33	0,194	1,1634e-02
Celkem		1739,69	12,252	2,2162e-01

Příloha 5 – Výpočet ztrát metodou časové diskretizace

Metoda časové diskretizace je uvedena pro přesnější vyhodnocení ztrát předpětí a je alternativou použití sumačního vzorce. Časová osa je rozdělena na inkrementy, tak, že jemnější členění je v raném stáří a v čase ke konci životnosti může být mezi inkrementy významné stáří.

Pro účinky dotvarování je v každém časovém inkrementu určen účinek dotvarování od jednotkového zatížení, které v tomto inkrementu začne působit. Tabulka účinků jednotkového zatížení ve vyhodnocovaných časech je uvedena v tabulce P5.2. Tyto hodnoty jsou následně použity to získání celkové hodnoty ztráty dotvarováním, kdy ve vyhodnocovaném čase se započítají účinky dílčích změn napjatosti všech předcházejících inkrementů. V tabulkách P5.3 a P5.4 je uveden výpočet ztrát předpětí. Časy vnesení napětí jsou označeny v tabulkách žlutě.

Tato příloha navazuje na kapitolu 7.4 a do výpočtu prvního inkrementu vstupují hodnoty již po ztrátách předpětí pokluzem a pružným přetvořením předpínacího rámu. Vstupní data včetně výpočtu ztráty pokluzem a pružným přetvořením napínacího rámu jsou uvedeny pro úplnost v tabulce P5.1 níže.

Tabulka P5.1: Tabulka vstupních hodnot pro výpočet časové diskretizace

Teplota při ošetřování	Tcure	90	°C
Modul pružnosti UHPC	Ecm28	50	Gpa
Charakteristiky předpínací výztuže	Ep	195	Gpa
	Ap1	150	mm2
	f _{pk}	1860	Mpa
	f _{p0,1k}	1640	Mpa
(7.1) maximální napínací napětí před zakotvením	f_{p_max}	1476	Mpa
Maximální síla v laně před zakotvením	Fp1_max	221	kN
účinek ošetřování	βRH*βTh	99,50	-
Doba v bednění před začátkem ošetřování	t00	1,00	den
Doba ošetřování	t0	1,00	den
(4.4) násobitel relaxace		3,10	
(7.2) pokluz	L	8,40	m
	w	0,003	m
	ztráta	-	MPa
napětí v lanech po ztrátě pokluzem	σ_{p,in}	1406	Mpa
(7.3) deformace rámu	L	4,20	m
	dL	0,002	m
	ztráta	-	MPa
(7.4) napětí v lanech po výše uvedených ztrátách	σ_{p,in}	1362	Mpa

Tabulka P5.2: Přetvoření od dotvarování od jednotkového zatížení každém inkrementu

dotvarování pro zatížení -1 Mpa pro každý inkrement																																	
t (dny)	0,5	0,6	1	1,25	1,5	1,75	2	2	2,33	2,66	3	3	3,33	3,66	4	5	7	14	28	50	75	100	200	300	500	800	1500	3000	6000	#####	#####	#####	
0,5	-86,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,6	-97,2	-48,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1	-103	-54,2	-38,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,25	-108	-60,0	-44,9	-8,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,5	-110	-62,7	-48,3	-10,2	-5,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1,75	-112	-64,7	-50,6	-11,3	-6,7	-4,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-113	-66,4	-52,4	-12,0	-7,6	-5,7	-4,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-114	-67,1	-53,2	-12,3	-7,9	-6,1	-4,3	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,33	-115	-67,9	-54,1	-12,6	-8,2	-6,5	-5,0	-4,2	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2,66	-116	-69,4	-55,6	-13,1	-8,7	-7,1	-5,8	-5,1	-4,8	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	-117	-70,7	-57,0	-13,6	-9,1	-7,5	-6,2	-5,6	-5,4	-4,8	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	-118	-71,2	-57,6	-13,8	-9,2	-7,7	-6,4	-5,8	-5,6	-5,1	-4,2	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,33	-118	-71,8	-58,1	-14,0	-9,4	-7,9	-6,6	-5,9	-5,8	-5,4	-4,8	-4,2	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3,66	-119	-72,7	-59,1	-14,3	-9,7	-8,2	-6,8	-6,2	-6,0	-5,7	-5,4	-5,1	-4,7	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	-120	-73,6	-60,0	-14,6	-9,9	-8,4	-7,0	-6,4	-6,3	-6,0	-5,7	-5,5	-5,3	-4,7	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	-121	-75,1	-61,5	-15,2	-10,3	-8,8	-7,4	-6,7	-6,6	-6,4	-6,2	-6,1	-6,0	-5,7	-5,3	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	-124	-77,6	-64,1	-16,3	-11,1	-9,5	-8,0	-7,2	-7,2	-7,0	-6,9	-6,8	-6,8	-6,6	-6,5	-6,1	-3,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	-128	-82,3	-68,8	-18,5	-12,6	-10,9	-9,1	-8,2	-8,1	-8,1	-8,0	-7,9	-7,9	-7,8	-7,7	-7,6	-7,2	-3,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	-133	-87,7	-74,3	-21,7	-14,7	-12,7	-10,5	-9,4	-9,4	-9,3	-9,3	-9,3	-9,2	-9,2	-9,1	-9,0	-8,8	-8,1	-3,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
50	-138	-92,3	-79,0	-25,1	-17,0	-14,6	-12,0	-10,8	-10,7	-10,7	-10,6	-10,6	-10,6	-10,6	-10,5	-10,4	-10,3	-9,8	-8,7	-3,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
75	-141	-95,7	-82,4	-27,8	-19,1	-16,2	-13,4	-12,0	-12,0	-11,9	-11,9	-11,9	-11,8	-11,8	-11,7	-11,6	-11,2	-10,2	-8,7	-3,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
100	-144	-98,1	-84,7	-29,8	-20,7	-17,6	-14,6	-13,0	-13,0	-13,0	-12,9	-12,9	-12,9	-12,9	-12,8	-12,8	-12,6	-12,2	-11,4	-10,1	-8,4	-3,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
200	-147	-102	-88,4	-33,2	-23,5	-20,0	-16,7	-15,0	-15,0	-15,0	-14,9	-14,9	-14,9	-14,9	-14,8	-14,8	-14,6	-14,3	-13,5	-12,3	-11,0	-9,7	-2,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
300	-151	-105	-91,8	-36,4	-26,3	-22,6	-19,0	-17,2	-17,2	-17,2	-17,1	-17,1	-17,1	-17,1	-17,0	-17,0	-16,9	-16,5	-15,8	-14,7	-13,4	-12,3	-9,9	-2,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
500	-154	-108	-94,9	-39,4	-29,1	-25,1	-21,4	-19,6	-19,5	-19,5	-19,5	-19,4	-19,4	-19,4	-19,4	-19,3	-19,2	-18,8	-18,1	-17,0	-15,9	-14,8	-12,6	-9,9	-2,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
800	-157	-111	-98,1	-42,5	-32,0	-27,9	-24,1	-22,2	-22,2	-22,1	-22,1	-22,1	-22,1	-22,0	-22,0	-21,9	-21,8	-21,5	-20,7	-19,7	-18,5	-17,5	-15,4	-12,9	-10,1	-2,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
1500	-160	-115	-102	-46,2	-35,6	-31,4	-27,4	-25,5	-25,5	-25,4	-25,4	-25,4	-25,3	-25,3	-25,2	-25,1	-24,8	-24,1	-23,0	-21,9	-20,8	-18,8	-16,4	-13,8	-10,8	-1,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
3000	-165	-119	-106	-50,5	-39,9	-35,6	-31,5	-29,6	-29,5	-29,5	-29,5	-29,4	-29,4	-29,4	-29,3	-29,2	-28,9	-28,2	-27,1	-26,0	-25,0	-22,9	-20,6	-18,1	-15,3	-11,7	-1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	
6000	-169	-124	-111	-55,0	-44,3	-40,0	-35,9	-33,9	-33,9	-33,9	-33,8	-33,8	-33,8	-33,8	-33,7	-33,7	-33,6	-33,2	-32,5	-31,5	-30,3	-29,3	-27,3	-25,0	-22,5	-19,8	-16,3	-12,0	-1,4	0,0	0,0	0,0	
#####	-173	-128	-114	-58,7	-48,0	-43,7	-39,6	-37,6	-37,6	-37,5	-37,5	-37,5	-37,5	-37,4	-37,4	-37,3	-37,2	-36,9	-36,2	-35,1	-34,0	-33,0	-31,0	-28,7	-26,2	-23,5	-20,1	-16,0	-11,4	-1,3	0,0	0,0	
#####	-177	-132	-118	-62,8	-52,1	-47,7	-43,6	-41,6	-41,6	-41,6	-41,5	-41,5	-41,5	-41,5	-41,4	-41,4	-41,3	-40,9	-40,2	-39,2	-38,0	-37,0	-35,0	-32,7	-30,3	-27,6	-24,2	-20,1	-15,8	-12,0	-1,2	0,0	
#####	-180	-135	-122	-66,1	-55,4	-51,0	-46,9	-44,9	-44,9	-44,8	-44,8	-44,8	-44,8	-44,7	-44,7	-44,5	-44,2	-43,5	-42,5	-41,3	-40,3	-38,3	-36,0	-33,6	-30,9	-27,5	-23,5	-19,2	-15,6	-11,4	-1,2	0,0	

Tabulka P5.3: Časová diskretizace pro výpočet ztrát předpětí, čas 0-5 dnu

vyhodnocovaný čas (dny)	t	0,5	0,6	1	1,25	1,5	1,75	1,999	2	2,33	2,66	2,999	3	3,33	3,66	4	5
čas středu inkrementu (dny)	ti	0,25	0,55	0,8	1,125	1,375	1,625	1,875	2	2,165	2,495	2,83	3	3,165	3,495	3,83	4,5
čas středu inkrementu včetně účinků ošetřování (dny)	ti(cure)	0	1	1	13	38	63	88	100	101	101	101	101	102	102	102	103
Modul pružnosti (6.2) v čase středu inkrementu (GPa)	Ecm(ti)	0,0	34,6	37,2	48,7	50,4	51,0	51,3	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,4	51,5	51,5
počáteční napětí v kabelech na začátku inkrementu (7.15)	σp	1362	1356	1371	1331	1324	1312	1305	1299	1092	1088	1081	1078	1076	1076	1073	1072
relaxace - poměr napětí a pevnosti	σp/fpk	0,732	0,729	0,737	0,716	0,712	0,706	0,702	0,698	0,587	0,585	0,581	0,579	0,579	0,578	0,577	0,576
relaxace (4.1)	ztráta	-6,31	-1,04	-0,61	-0,48	-0,29	-0,24	-0,20	-0,09	-0,04	-0,07	-0,06	-0,03	-0,03	-0,05	-0,05	-0,08
relaxace ošetř. (4.4)	ztráta				-13,28	-3,36	-1,74	-1,21	-0,49	-0,18							
kumulativní relaxace (4.5)	ztráta	-6,31	-7,35	-7,96	-21,72	-25,37	-27,34	-28,75	-29,33	-29,55	-29,61	-29,67	-29,70	-29,73	-29,77	-29,82	-29,90
smršťování v čase z modelu B4	εsh	-250	-500	-550	-618	-685	-753	-820	-820	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819
smršťování v inkrementu (7.8)	Δεsh	-250	-250	-50	-68	-68	-68	-67	0	1	0	0	0	0	0	0	0
tahové napětí od podrženého smršťování (7.10)	Δσc_sh	0,00	4,33	0,93	1,64	1,70	1,72	1,73	0,01	-0,03							
kumulativní dotvarování od předchozího zatížení (model B4)	εcc	0	210	129	166	177	191	203	26	11	-26	-44	-52	-54	-65	-72	-80
dotvarování změna od předchozího kroku	Δεcc	0,0	210	-81	37	11	14	12	-177	-15	-36	-19	-8	-2	-11	-6	-8
změna napětí v betonu od dotvarování (při podřízení)	Δσc_cc	0	0,00	-3,64	1,51	-0,90	-0,28	-0,34	-0,32								
uvolnění podrženého tahu (pro kompenzaci napětí pro dotvarování)	Δσc_p								-8,08								
změna napětí způsobená ztrátami předpětí (po vnesení předpětí)	Δσc_ztráty									0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
vnesení předpětí (zadáno)	Δσc_p								-45,00								
elastická ztráta předpětí (7.12)	Δσp_el	0,0	24,4	-14,2	12,6	3,1	5,5	5,2	-171,8	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
elastické zkrácení									-13%								
úbytek předpínací síly el. zkrácením									5,95								
ztráta předpětí od smršťování v inkrementu (7.13)	Δσp_SH	0,00	-48,75	-9,75	-13,16	-13,16	-13,16	-13,11	-0,05	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ztráta předpětí od dotvarování v inkrementu (7.14)	Δσp_CC	0,00	40,99	-15,80	7,20	2,19	2,64	2,41	-34,59	-2,97	-7,08	-3,66	-1,48	-0,41	-2,16	-1,23	-1,63
Celková ztráta v inkrementu (Relaxace, elastické přetvoření, SH, CC)	Δσp_tot	-6,3	15,6	-40,3	-7,1	-11,5	-7,0	-6,9	-207,0	-3,1	-7,1	-3,7	-1,5	-0,4	-2,2	-1,3	-1,7
Napětí po ztrátách (v daném inkrementu) (7.15)	σp	1356	1371	1331	1324	1312	1305	1299	1092	1088	1081	1078	1076	1076	1073	1072	1070
ztráty kumulativní	σp/fp_max	8,1%	7,1%	9,8%	10,3%	11,1%	11,6%	12,0%	26,0%	26,3%	26,7%	27,0%	27,1%	27,1%	27,3%	27,4%	27,5%

Tabulka P5.4: Časová diskretizace pro výpočet ztrát předpětí, čas 5-30000 dnů

vyhodnocovaný čas (dny)	t	7	14	28	50	75	100	200	300	500	800	1500	3000	6000	10000	20000	30000
čas středu inkrementu (dny)	ti	6	10,5	21	39	62,5	87,5	150	250	400	650	1150	2250	4500	8000	15000	25000
čas středu inkrementu včetně účinků ošetřování (dny)	ti(cure)	105	109	120	138	161	186	249	349	499	749	1249	2349	4599	8099	15099	25099
Modul pružnosti (6.2) v čase středu inkrementu (GPa)	Ecm(ti)	51,5	51,5	51,6	51,7	51,8	51,9	52,0	52,2	52,3	52,5	52,6	52,7	52,8	52,9	53,0	53,0
počáteční napětí v kabelech na začátku inkrementu (7.15)	σp	1070	1068	1062	1055	1047	1039	1164	1188	1187	1184	1180	1174	1167	1159	1153	1147
relaxace - poměr napětí a pevnosti	σp/fpk	0,576	0,574	0,571	0,567	0,563	0,559	0,626	0,639	0,638	0,636	0,634	0,631	0,627	0,623	0,620	0,617
relaxace (4.1)	ztráta	-0,16	-0,34	-0,51	-0,54	-0,47	-0,37	-1,15	-1,38	-1,44	-1,68	-2,25	-3,09	-3,79	-3,68	-4,71	-4,45
relaxace ošetř. (4.4)	ztráta																
kumulativní relaxace (4.5)	ztráta	-30,06	-30,40	-30,91	-31,45	-31,92	-32,30	-33,45	-34,82	-36,27	-37,94	-40,19	-43,28	-47,07	-50,75	-55,46	-59,91
smršťování v čase z modelu B4	εsh	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819	-819
smršťování v inkrementu (7.8)	Δεsh	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tahové napětí od podrženého smršťování (7.10)	Δσc_sh																
kumulativní dotvarování od předchozího zatížení (model B4)	εcc	-94	-122	-153	-194	-229	-167	-37	-35	-46	-56	-75	-94	-114	-127	-136	-138
dotvarování změna od předchozího kroku	Δεcc	-14	-28	-32	-41	-35	63	130	1	-10	-11	-19	-19	-20	-13	-9	-2
změna napětí v betonu od dotvarování (při podržení)	Δσc_cc																
uvolnění podrženého tahu (pro kompenzaci napětí pro dotvarování)	Δσc_p																
změna napětí způsobená ztrátami předpětí (po vnesení předpětí)	Δσc_ztráty	0,02	0,04	0,09	0,13	0,14	0,13	0,10	0,31	0,37	0,39	0,45	0,61	0,84	1,03	1,00	1,28
vnesení předpětí (zadáno)	Δσc_p						30,00										
elastická ztráta předpětí (7.12)	Δσp_el	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	112,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
elastické zkrácení																	
úbytek předpínací síly el. zkrácením																	
ztráta předpětí od smršťování v inkrementu (7.13)	Δσp_SH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ztráta předpětí od dotvarování v inkrementu (7.14)	Δσp_CC	-2,70	-5,43	-6,14	-7,94	-6,92	12,20	25,40	0,27	-2,02	-2,09	-3,65	-3,78	-3,92	-2,54	-1,67	-0,41
Celková ztráta v inkrementu (Relaxace, elastické přetvoření, SH, CC)	Δσp_tot	-2,9	-5,8	-6,7	-8,5	-7,4	124,6	24,3	-1,1	-3,5	-3,8	-5,9	-6,9	-7,7	-6,2	-6,4	-4,9
Napětí po ztrátách (v daném inkrementu) (7.15)	σp	1068	1062	1055	1047	1039	1164	1188	1187	1184	1180	1174	1167	1159	1153	1147	1142
ztráty kumulativní	σp/fp_max	27,7%	28,1%	28,5%	29,1%	29,6%	21,1%	19,5%	19,6%	19,8%	20,1%	20,5%	20,9%	21,5%	21,9%	22,3%	22,6%